



Universidad
Carlos III de Madrid

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Localización de eventos en radiofrecuencia mediante
una antena de alta directividad**

Autor:

Beatriz Pérez Prieto

Tutor:

Dr. D. Guillermo Robles Muñoz

Leganés, Octubre de 2015



Título: Localización de eventos en radiofrecuencia mediante una antena de alta directividad

Autor: Beatriz Pérez Prieto

Tutor: Dr. D. Guillermo Robles Muñoz

EL TRIBUNAL

Presidente: David Santos Martín

Vocal: Margeris del Valle Jiménez Sánchez

Secretario: Carlos Pons Gómez

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 15 de Octubre de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





Resumen

En el presente trabajo se analizan las emisiones electromagnéticas producidas en la banda de ultra alta frecuencia UHF por la actividad de descargas parciales (DPs). El principal objetivo es la localización de la fuente de este fenómeno mediante un sistema que no precise de contacto eléctrico y analice un área en todo su conjunto, como puede ser una subestación. Así, se detectarían con mayor rapidez los equipos que presentan fallos en una instalación, puesto que se evitaría examinar cada elemento por separado.

Para captar la radiación de las descargas parciales se emplea una antena directiva acoplada a un sistema móvil que permite adquirir las ondas en diferentes posiciones. Posteriormente, se realiza una serie de cálculos sobre estas señales y a partir de sus resultados se establece la procedencia del fenómeno.

Este trabajo precisa tomar como base el proyecto *Control mediante Arduino del movimiento de una antena directiva con un servomotor*, que proporciona el sistema móvil en el que se acopla la antena y el sistema de adquisición de las señales. Este último consiste en la comunicación entre los datos recibidos por el sensor y el software empleado para el análisis a través de una tarjeta de adquisición.





Abstract

This document discusses the electromagnetic emissions in the ultra high frequency (UHF) band produced by partial discharge (PD) activity. The main objective is the location of the source of this phenomenon through a system that does not require electrical contact and analyse a wide area, such as a substation. Thus, equipments that present failures in their electrical installation would be detected faster, since it would avoid to examine each element separately.

To capture the radiation of partial discharges, a directional antenna attached to a mobile system that allow to analyze the waves in different positions is used. Subsequently, a series of calculations on these signals is carried out, and the origin of the phenomenon is determined based on their results.

This project requires the use as a basis the work *Control with Arduino from the movement of a directive antenna with a servomotor*, which provides the mobile system in which the antenna is coupled and the signals acquisition system. The latter consists of the communication between the data received by the sensor and the software used for the analysis of the signals through a data acquisition card.





Índice

Índice de figuras	5
Índice de tablas	8
Capítulo I.....	9
1. Introducción	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Estructura del documento.....	10
Capítulo II.....	12
2. Aislamientos eléctricos	12
2.1. Aislamiento eléctrico.....	12
2.2. Propiedades de los dieléctricos	12
2.2.1. Conductividad eléctrica	12
2.2.2. Permitividad dieléctrica.....	13
2.2.3. Polarización	13
2.2.4. Rigidez dieléctrica	13
2.3. Clasificación de los materiales aislantes	14
2.3.1. Aislantes gaseosos	14
2.3.2. Aislantes líquidos	14
2.3.3. Aislantes sólidos	15
2.3.4. Aislantes compuestos	15
2.4. Tipos de ruptura de aislantes	15
2.4.1. Ruptura dieléctrica en aislantes gaseosos.....	16
2.4.2. Ruptura dieléctrica en aislantes líquidos	16
2.4.3. Ruptura dieléctrica en aislantes sólidos.....	16



Capítulo III	18
3. Descargas parciales.....	18
3.1. Aspectos generales	18
3.2. Clasificación de descargas parciales según su origen	20
3.2.1. Descargas parciales superficiales	21
3.2.2. Descargas parciales internas.....	22
3.2.3. Descargas parciales efecto corona.....	23
3.3. Efectos.....	25
3.4. Técnicas de detección.....	25
3.4.1. Medida convencional según la norma IEC 60270.....	26
3.4.2. Medida no convencional según la norma IEC 62478.....	28
Capítulo IV	31
4. Método de localización de DPs. Antenas empleadas	31
4.1. Localización de DPs.....	31
4.2. Antenas.....	34
4.2.1. Parámetros importantes de una antena	35
4.2.2. Algunos tipos de antenas para la detección de DPs.....	40
Capítulo V	49
5. Procesamiento digital de las señales	49
5.1. Sistema de medición.....	49
5.2. Adquisición de las señales.....	52
5.3. Análisis de las señales	56
5.3.1. Cálculo de la energía	56
5.3.2. Análisis estadístico	62
5.3.3. Análisis definitivo	65
Capítulo VI.....	66
6. Resultados experimentales.....	66
6.1. Primer ensayo. Antena 1: antena parabólica	66
6.2. Segundo ensayo. Antena 2: plato metálico circular	72
6.3. Tercer ensayo. Antena 3: antena Vivaldi	75
6.4. Cuarto ensayo. Comprobación de rebotes en el medio	78
6.5. Mediciones necesarias.....	82



Capítulo VII.....	84
7. Conclusiones	84
Capítulo VIII	86
8. Trabajos futuros	86
Capítulo IX	87
9. Presupuesto	87
Capítulo X	91
10. Planificación del proyecto	91
Bibliografía.....	92
Anexo	95
Interfaz gráfica.....	95
Código total implementado en Matlab.....	96



Índice de figuras

Figura 1. Descargas parciales en una cavidad sometida a tensión alterna. Evolución de la tensión e intensidad en la vacuola [10].....	19
Figura 2. Representación elíptica de una descarga parcial [11]	19
Figura 3. Forma pulsante de la descarga parcial	20
Figura 4. Descarga parcial superficial [12]	21
Figura 5. Patrón de descarga parcial superficial [12]	21
Figura 6. Descarga parcial interna [14]	22
Figura 7. Arborescencia en un aislante [14]	23
Figura 8. Patrón de descarga parcial interna [12]	23
Figura 9. Descarga parcial efecto corona [12].....	24
Figura 10. Patrón de descarga parcial efecto corona [12]	24
Figura 11. Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento. Circuito indirecto [2]	26
Figura 12. Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el objeto de ensayo. Circuito directo [2]	27
Figura 13. Esquema de un circuito equilibrado [2]	27
Figura 14. Esquema de un circuito de discriminación de la polaridad [2]	27
Figura 15. Disposición de la configuración de las antenas y de la fuente de DPs	32
Figura 16. Localización de DPs en una subestación mediante antenas colocadas sobre una superficie móvil [20]	34
Figura 17. Patrón de radiación isotrópico [14]	36
Figura 18. Patrón de radiación direccional [14]	36
Figura 19. Patrón de radiación omnidireccional [14]	37
Figura 20. Ejemplo del parámetro S11 en función de la frecuencia para diferentes antenas [3]	40
Figura 21. Evolución de un dipolo de longitud total $2l$ y diámetro d [21]	40
Figura 22. Resumen de características de una antena dipolo [21].....	41
Figura 23. Antena monopolo de longitud l y diámetro d [21].....	42
Figura 24. Teoría de la imagen [21]	42
Figura 25. Resumen de características de una antena monopolo [21].....	43



Figura 26. Antena logarítmica periódica [12] 44

Figura 27. Configuración de una antena logarítmica periódica y su patrón de radiación [21] 45

Figura 28. Partes de la antena Vivaldi [18] 45

Figura 29. Antena Vivaldi [18]..... 46

Figura 30. Diagrama de radiación teórico de una antena Vivaldi [18]..... 46

Figura 31. Espectro de ruido de fondo para la antena monopolo de 10 cm [3]..... 47

Figura 32. Pulsos de DPs medidos con la antena monopolo de 10 cm [3]..... 48

Figura 33. Espectro promediado de 500 pulsos adquiridos con la antena monopolo de 10 cm [3]..... 48

Figura 34. Esquema del sistema de medición para la localización de DPs 50

Figura 35. Sección de la unión entre el cable rojo y el hilo de cobre..... 50

Figura 36. Sistema de medición para la localización de DPs en el laboratorio..... 51

Figura 37. Onda sinusoidal con un número de muestras igual a 1000 53

Figura 38. Onda sinusoidal con un número de muestras igual a 10 53

Figura 39. Calibración de la señal para un número de muestras igual a 500 54

Figura 40. Calibración de la señal para un número de muestras igual a 700 54

Figura 41. Método de integración numérica trapezoidal. Adaptado de [26]..... 57

Figura 42. Onda sinusoidal de tensión de 1V de amplitud..... 58

Figura 43. Señal potencia de una onda sinusoidal de 1V de amplitud 59

Figura 44. Matriz senal que incluye las señales recogidas en una posición..... 60

Figura 45. Matriz senal_potencia de dimensiones MxN que incluye la señal de potencia de las ondas adquiridas en una posición..... 60

Figura 46. Matriz potencia de dimensiones NxM. Matriz transpuesta de la matriz senal_potencia 61

Figura 47. Vector energía_cada_senal de dimensiones 1xM 61

Figura 48. Vector_energia_media de dimensiones 1xP 61

Figura 49. Ejemplo de los resultados proporcionados por el análisis de las señales atendiendo a la energía media en cada posición..... 63

Figura 50. Matriz_todas_senales de dimensiones TxN..... 63

Figura 51. Vector_picos_max de dimensiones 1xT 64

Figura 52. Matriz_picos_max de dimensiones PxM 64

Figura 53. Ejemplo de los resultados proporcionados por el análisis de los picos máximos de tensión de las señales 65

Figura 54. Patrón de elevación de plato parabólico [24]..... 67

Figura 55. Antena 1: antena parabólica 68

Figura 56. Recogida 1. Energía media obtenida con la antena parabólica..... 69

Figura 57. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica 69

Figura 58. Recogida 2. Energía media obtenida con la antena parabólica..... 69

Figura 59. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica 69



Figura 60. Recogida 3. Energía media obtenida con la antena parabólica.....	70
Figura 61. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica	70
Figura 62. Plato metálico circular.....	72
Figura 63. Recogida 1. Energía media obtenida con el plato metálico circular.....	73
Figura 64. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular.....	73
Figura 65. Recogida 2. Energía media obtenida con el plato metálico circular.....	73
Figura 66. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular.....	73
Figura 67. Recogida 3. Energía media obtenida con el plato metálico circular.....	74
Figura 68. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular.....	74
Figura 69. Antena 3: antena Vivaldi.....	75
Figura 70. Recogida 1. Energía media obtenida con la antena Vivaldi.....	76
Figura 71. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi	76
Figura 72. Recogida 2. Energía media obtenida con la antena Vivaldi.....	76
Figura 73. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi	76
Figura 74. Recogida 3. Energía media obtenida con la antena Vivaldi.....	77
Figura 75. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi	77
Figura 76. Antena monopolo fija de 10 cm.....	79
Figura 77. Disposición de las antenas en la comprobación de la existencia de rebotes .	80
Figura 78 TDOAs obtenidos con un monopolo de 10 cm y una antena móvil.....	81
Figura 79. Interfaz gráfica.....	95



Índice de tablas

Tabla 1. Elementos de los circuitos de medida convencionales para la detección de descargas parciales	26
Tabla 2. Coordenadas de la antena respecto del objeto de ensayo	51
Tabla 3. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Antena parabólica	70
Tabla 4. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Plato metálico circular	74
Tabla 5. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Antena Vivaldi.....	77
Tabla 6. Costes directos. Recursos humanos.....	87
Tabla 7. Costes directos. Equipos.....	88
Tabla 8. Costes directos. Subcontratación de tareas.....	89
Tabla 9. Otros costes directos.....	89
Tabla 10. Costes indirectos.....	90
Tabla 11. Resumen de costes.....	90
Tabla 12. Planificación del proyecto. Diagrama de Gantt.....	91



Capítulo I

1. Introducción

1.1. Motivación

Durante la segunda mitad del siglo XX, se incrementó el interés en la medición de descargas parciales dado el beneficio que supone en el diagnóstico del estado del aislamiento eléctrico, ya que se trata de un buen indicador del deterioro de estos elementos [1].

Resulta de gran importancia tener un conocimiento sobre el comportamiento de las DPs en los dieléctricos para establecer su vida útil. De esta manera, es posible asegurar la calidad del suministro eléctrico, mantener la fiabilidad en los equipos y garantizar la seguridad de las personas.

En ocasiones, la falta de revisiones en los equipos conlleva a fallos que se podrían haber pronosticado y por tanto, haber evitado. Por ello, se hace necesario incorporar en las instalaciones eléctricas un plan de mantenimiento preventivo.

Hoy en día, una de las técnicas de medición de DPs que se aplica son las mediciones según el método convencional descrito en la norma IEC 60270 (UNE-EN 60270 es su norma española equivalente) [2]. Este método detecta las DPs mediante el análisis estadístico de la distribución de amplitudes de los impulsos de las descargas adquiridas con dispositivos inductivos. La desventaja que presentan es que precisan de la desconexión de los equipos para la instalación del circuito de medición y no pueden localizar la fuente del fenómeno geoméricamente, lo que sería de gran utilidad en el mantenimiento de los mismos [3].

Alternativamente, se han desarrollado nuevas técnicas que superan estas limitaciones. Entre las diferentes opciones se encuentran las técnicas electroacústicas y la técnica UHF. La primera emplea sensores piezoeléctricos que detectan ondas de presión, pero no se pueden aplicar a dieléctricos sólidos, y tienen baja sensibilidad y una banda estrecha. En



cuanto a la segunda, se trata de una técnica cada vez más extendida que utiliza antenas capaces de detectar las emisiones de las DPs. Además, puede aplicarse a cualquier tipo de material aislante y ofrecen excelentes resultados.

Debido al éxito que tiene esta última técnica, este proyecto se centra en seguir profundizando en la localización de las DPs mediante el análisis de las ondas que emiten, recogidas por una antena direccional.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en la localización de eventos en radiofrecuencia mediante una antena de alta directividad, concretamente en la localización de descargas parciales.

Para alcanzar dicho propósito, el trabajo se ha dividido en los siguientes objetivos:

-Construir una antena directiva y acoplarla a un sistema móvil que permita detectar emisiones electromagnéticas en la banda de ultra alta frecuencia en diferentes posiciones.

-Adquirir DPs en el laboratorio mediante la antena directiva.

-Realizar un procesamiento digital de las señales adquiridas e implementar un algoritmo de cálculo que determine la fuente del fenómeno.

-Comprobar la validez de la antena en la localización de DPs y el correcto funcionamiento del algoritmo implementado mediante ensayos reales en el laboratorio.

1.3. Estructura del documento

Este documento se ha estructurado en diferentes capítulos, en los cuales se tratan los temas expuestos a continuación.

- Capítulo I: Introducción. El primer capítulo engloba una introducción sobre la motivación de la realización de este proyecto y los objetivos que se han abordado.
- Capítulo II: Aislamientos eléctricos. En el segundo capítulo se define el concepto de aislamiento eléctrico, se detallan sus propiedades y su clasificación, y se exponen los tipos de ruptura.
- Capítulo III: Descargas parciales. En este capítulo se desarrollan los aspectos generales de las descargas parciales, los tipos que existen y los efectos negativos que suponen para los dieléctricos. También se describen diferentes técnicas de detección.
- Capítulo IV: Método de localización de DPs. Antenas empleadas. En el cuarto capítulo se tratan dos temas. Por un lado, se describe uno de los métodos actuales para la localización de DPs, y por otro lado, se centra en las antenas. En este último



apartado, se explica su funcionamiento y se detallan algunos parámetros importantes que las caracterizan, además de mencionar distintos tipos destinados a la localización del fenómeno a estudiar.

- Capítulo V: Procesamiento digital de las señales. Este capítulo se divide en tres apartados: el primero presenta el circuito empleado en el laboratorio, el segundo explica los parámetros que hay que ajustar en una calibración previa a la recogida de señales, y el tercero detalla el código implementado que determina la posición de la fuente de DPs. También se explican los métodos empleados en el tratamiento de las señales y los conceptos teóricos en los que se basan.
- Capítulo VI: Resultados experimentales. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio. Contiene información de los diferentes tipos de antenas que han sido acoplados a la base móvil, los resultados obtenidos con cada uno de ellos y su validación en el propósito de este proyecto.
- Capítulo VII: Conclusiones. Este capítulo resume todas las conclusiones que se han extraído de los resultados alcanzados en los ensayos.
- Capítulo VIII: Trabajos futuros. Se mencionan posibles trabajos futuros que permiten seguir avanzando en la investigación y que pueden ser de gran interés en la localización de DPs.
- Capítulo IX: Presupuesto. El noveno capítulo incluye una estimación de los costes que supone el desarrollo de este trabajo.
- Capítulo X: Planificación del proyecto. En este capítulo se muestra un esquema en el que se representa cómo se ha estructurado el proyecto en el tiempo, es decir, la planificación que se ha seguido.

El documento finaliza con un anexo que incluye todo el código implementado para la localización de la fuente de DPs mediante la antena móvil. Para una mejor comprensión, también se muestra una imagen de la interfaz gráfica que se emplea en este trabajo y que ha sido proporcionada por el proyecto tomado como base.



Capítulo II

2. Aislamientos eléctricos

2.1. Aislamiento eléctrico

El aislamiento eléctrico tiene lugar cuando se recubren materiales conductores que forman parte de una instalación eléctrica con materiales que no permiten el paso de la corriente, impidiendo el paso de la misma al exterior [4].

Para garantizar un aislamiento adecuado y conseguir una operación segura y confiable del mismo, es imprescindible tener los conocimientos necesarios sobre los fenómenos físicos y químicos que determinan las propiedades dieléctricas del material aislante, así como conocer las causas que originan su deterioro, ya que este puede ser el responsable de fallos en el sistema. Con el fin de reducir estos fallos, es importante hacer una buena selección del aislante a utilizar en los sistemas eléctricos [5].

2.2. Propiedades de los dieléctricos

Un ingeniero debe tener en cuenta diversas propiedades de los dieléctricos. De todas ellas, cabe destacar: la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica, la polarización y la rigidez dieléctrica.

2.2.1. Conductividad eléctrica

Es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de corriente a través del mismo, es decir, es una propiedad física que permite transmitir la electricidad y está relacionada con la facilidad con la que los electrones son capaces de atravesar un cuerpo [6].

Se define como:

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad [S/m] \quad (1)$$



donde J es la densidad de corriente (A/m^2) y E es el campo eléctrico (V/m).

En la mayor parte de los aislantes, la conductividad se ve afectada por la pureza del material, a medida que aumentan las impurezas aumenta la resistividad y por tanto disminuye la conductividad ya que esta es la inversa de la resistividad. También se ve afectada por la temperatura y el campo eléctrico, como se ve en la siguiente relación:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-E}{k \cdot T}} \quad (2)$$

donde σ_0 es una constante que varía con la temperatura; E , es el campo eléctrico; k , es la constante de Boltzmann; T , es la temperatura; y σ , es la conductividad para una temperatura determinada [5] y [7].

2.2.2. Permitividad dieléctrica

La permitividad dieléctrica, ϵ , es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio, y está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico. Como consecuencia de esta polarización, se puede anular parcialmente el campo interno del material. En caso de que la polarización se produjese en el sentido del campo del material, en vez de anularse, se reforzaría.

Se define como:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad [F/m] \quad (3)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$) y ϵ_r es la permitividad relativa del material ($\epsilon_r = 1$ en el vacío).

2.2.3. Polarización

Cuando un dieléctrico es sometido a un campo eléctrico, las fuerzas electrostáticas resultantes provocan modificaciones en sus moléculas: la parte positiva de estas se desplaza en un sentido y la parte negativa, en el sentido contrario, dando lugar a la formación de dipolos (un dipolo es un sistema de dos cargas iguales pero de sentido opuesto separadas una cierta distancia).

2.2.4. Rigidez dieléctrica

Es el valor máximo de campo eléctrico que puede soportar un aislante antes de convertirse en conductor, es decir, es el valor de campo eléctrico a partir del cual se produce la ruptura del dieléctrico y pierde su propiedad de aislamiento.



Se define como el cociente entre la tensión máxima que se puede aplicar sin ocasionar la ruptura y la distancia entre los electrodos en los que se aplica la tensión, y se mide en V/m .

La rigidez dieléctrica de este tipo de materiales se ve afectada por numerosas variables: depende de la forma de onda de la tensión aplicada, la polaridad y su duración; de la temperatura, la presión y humedad del aislante; de la forma geométrica y la naturaleza de los electrodos; y en el caso de ser un aislamiento externo, también se ve influenciada por fenómenos ambientales tales como la lluvia y la contaminación [8].

2.3. Clasificación de los materiales aislantes

Existe una elevada variedad de materiales aislantes que se pueden clasificar en: gaseosos, líquidos, sólidos y compuestos [5].

2.3.1. Aislantes gaseosos

En general, los gases en estado normal ofrecen un buen aislamiento. Un aislante gaseoso ideal tiene que ser barato, térmica y químicamente estable, no ser tóxico, corrosivo ni inflamable bajo tensión eléctrica prolongada, y debe proporcionar una excelente transferencia de calor y propiedades de extinción de arcos eléctricos incluso cuando es presurizado. También debe ofrecer una baja conductividad para no permitir el paso de la corriente a través de él.

Uno de los materiales más empleados es el aire, y se utiliza en líneas aéreas y sistemas a la intemperie. Además de este, se ha empezado a usar recientemente el hexafluoruro de azufre (SF_6), ya que presenta buenas propiedades dieléctricas.

2.3.2. Aislantes líquidos

El aislante líquido ideal es aquel que posee una elevada rigidez dieléctrica, no es corrosivo, inflamable ni tóxico, es químicamente estable, y ofrece buenas propiedades de extinción de arco y de absorción de gases. Se suele emplear para rellenar espacios como poros o grietas en materiales aislantes, disipar calor y extinguir arcos eléctricos. En su elección hay que tener en cuenta algunas características como el calor específico, el factor de pérdida, la viscosidad, la densidad y el punto de ignición, además de presentar una conductividad eléctrica baja.

Debe poseer buenas propiedades a baja temperatura para evitar que la congelación del fluido provoque daños mecánicos, tiene que tener una viscosidad baja para garantizar la transferencia de calor y una buena circulación, y debe presentar tanto una compatibilidad con los materiales de los equipos de alta tensión como una compatibilidad ecológica para impedir la destrucción del medio ambiente [8].



Generalmente, se recurre a los aceites minerales de hidrocarburos naturales refinados. Durante un tiempo se emplearon los líquidos clorados aromáticos, también llamados PCBs, pero hace unas décadas se descubrió que eran perjudiciales para la salud y se prohibieron en muchos países. Con el tiempo, se han desarrollado nuevos aislantes con propiedades similares a los PCBs que no presentan efectos adversos. Estos líquidos están formados por aceite de silicona, hidrocarburos sintéticos e hidrocarburos fluorados. Actualmente se está investigando en la posibilidad de utilizar aceites vegetales para el aislamiento y refrigeración de transformadores por ser biodegradables.

2.3.3. Aislantes sólidos

El aislante sólido ideal ofrece algunas de las propiedades de los dieléctricos gaseosos y líquidos como son la alta rigidez dieléctrica y la baja conductividad; y tiene buenas propiedades mecánicas y de unión [5].

Se suelen emplear materiales inorgánicos como la cerámica y el vidrio, y materiales orgánicos como las resinas termoestables epoxi o los materiales termoplásticos, entre ellos, el cloruro de polivinilo (PVC), el polietileno (PE) y el polietileno reticulado (XLPE). Otros de los materiales que se suelen usar son la mica, el grafito y el papel.

2.3.4. Aislantes compuestos

El aislante compuesto consiste en la unión de diferentes tipos de dieléctricos para el recubrimiento de un conductor. La interfaz entre ambos aislantes es una superficie débil, por lo que tiene que ser diseñada cuidadosamente. Es fundamental que los constituyentes presenten constantes eléctricas similares, y hay que cerciorarse de que sean químicamente estables y no reaccionen entre sí. [5]

Como ejemplo, destacar los aislantes sólido-gas utilizados en líneas de transmisión y el compuesto sólido-líquido empleado en transformadores.

Dependiendo de la aplicación y el tipo de aislamiento que se desee, interno o externo, será adecuado un tipo de material diferente, pero todos ellos deben ser capaces de soportar elevadas tensiones y, por tanto, ofrecer una elevada rigidez dieléctrica. Esta propiedad disminuye con el uso de los equipos, y la rapidez con la que se deteriora el dieléctrico depende de los esfuerzos mecánicos a los que esté expuesto y a factores térmicos, ambientales y químicos.

2.4. Tipos de ruptura de aislantes

Conforme van teniendo lugar las DPs, el material aislante se va degradando hasta perder sus propiedades. A continuación, se muestra una breve explicación de los diferentes tipos de ruptura que puede sufrir un dieléctrico en función del estado físico en el que se encuentre.



2.4.1. Ruptura dieléctrica en aislantes gaseosos

En un aislante gaseoso se produce la ruptura cuando se alcanza la tensión de ruptura del material. En ese momento el dieléctrico se vuelve conductor y empieza a circular corriente eléctrica a través de él. Esta conducción se conoce como arco o chispa [9].

2.4.2. Ruptura dieléctrica en aislantes líquidos

En un aislante líquido no existe una teoría definitiva para el proceso de ruptura. Esto se debe principalmente a que es normal que los fluidos contengan impurezas que afectan de manera significativa sus propiedades dieléctricas. Hoy en día, existen tres tipos de ruptura que pueden darse simultáneamente [8].

- Ruptura electrónica. La ruptura tiene lugar cuando el aislante es un líquido puro en el que no existen ni impurezas ni oquedades. Los electrones emitidos por el cátodo inmerso en el fluido se dirigen hacia el ánodo y chocan con átomos del aislante. Cuando la energía producida en el choque es suficientemente alta, se desprenden electrones de los átomos del dieléctrico, que se suman a los anteriores originando una avalancha de electrones que origina la ruptura.
- Ruptura de la burbuja. La presencia de burbujas en el líquido hace que este gas se ionice y se produzca la avalancha de electrones.
- Ruptura debido a la partícula embebida. Cuando se aplica un campo eléctrico, las partículas existentes en el fluido se polarizan y se desplazan hasta alcanzar un electrodo. Cuando se produce el contacto de alguna de ellas con el electrodo, el extremo más alejado de esta última presenta la misma polaridad que el conductor y atrae al resto de partículas polarizadas de tal manera que se va formando una cadena de partículas polarizadas. Si la cadena sigue aumentando puede llegar a puentear la distancia entre electrodos, cortocircuitando el dieléctrico.

2.4.3. Ruptura dieléctrica en aislantes sólidos

En un dieléctrico sólido, se pueden encontrar los siguientes mecanismos de ruptura [8].

- Ruptura intrínseca. Ocurre cuando se aplica una tensión en un breve periodo de tiempo, del orden de 10 ns, para una temperatura determinada y el máximo valor de rigidez dieléctrica. Es poco habitual debido a que otros tipos de ruptura se producen a una rigidez dieléctrica inferior.
- Ruptura electromecánica. Al aplicar una tensión entre dos electrodos, se crea un campo eléctrico. Cuando este campo es lo suficientemente elevado aparece una fuerza de atracción entre ambos electrodos, y el aislante que los separa se ve sometido a una fuerza de compresión que lo deforma, llegando a destruirlo si se supera su límite de compresión mecánica.



- Ruptura térmica. La rotura del aislante es ocasionada por una temperatura elevada.
- Ruptura electroquímica. Las DPs producidas en las partes conductoras y aislantes producen la descomposición química de los materiales, y esta descomposición provoca la aparición de elementos y compuestos cuya presencia en el medio deterioran el aislante.
- Ruptura por descargas superficiales. Aparece cuando el aislamiento se ve sometido a tensiones elevadas durante un largo periodo de tiempo.
- Ruptura por descargas internas. Tienen lugar cuando existe una cavidad interna en el aislante.

De todos los mecanismos mencionados, los tres últimos son los más habituales. En el *Capítulo III*, se explica más detalladamente la ruptura por descargas superficiales y la ruptura por descargas internas.

En cuanto a la ruptura intrínseca, electromecánica y térmica, el fabricante diseña los equipos para que sean las menos frecuentes. Para ello, debe tener en cuenta las condiciones de trabajo a las que el aislante va a estar sometido y diseñarlo de tal manera que se evite este tipo de ruptura.

Generalmente, la ruptura del material no se produce por un sólo tipo de mecanismo sino que es ocasionada por varios de ellos. Son muchos los factores que afectan a la ruptura y por este motivo, hay varios mecanismos de degradación activos simultáneamente.

Capítulo III

3. Descargas parciales

3.1. Aspectos generales

Las descargas parciales se tratan de descargas eléctricas localizadas que cortocircuitan sólo parcialmente el aislamiento que existe entre conductores que se encuentran a distinto potencial [2].

Aparecen en zonas pequeñas del material aislante que presentan impurezas o vacuolas de aire. En estos espacios, la constante dieléctrica del aire o de los gases que se encuentran encerrados en ellos es muy pequeña, y esto implica que, cuando el aislante es sometido a una tensión, el campo eléctrico en las cavidades es muy grande. Teniendo en cuenta esto, las DPs se producen por la heterogeneidad del medio en cuanto a permitividad y rigidez dieléctrica se refiere.

Generalmente, son una consecuencia de concentraciones de tensiones locales en el aislante. Cuando el campo eléctrico es muy grande, el medio se ioniza dando lugar a una avalancha de electrones que propician la ruptura del dieléctrico y la formación de un pequeño arco que deteriora el material.

El campo eléctrico presente en los defectos del aislamiento depende de la tensión aplicada. Puesto que la tensión que se aplica es alterna, en general las descargas parciales se producen tanto en el semiciclo positivo como negativo de tensión. Las DPs superficiales e internas tienen lugar en los dos semiciclos, sin embargo, las del tipo corona ocurren principalmente en uno de ellos.

En la *Figura 1* se muestra la tensión alterna aplicada en el dieléctrico junto con la tensión y corriente en la cavidad.

Analizando el semiciclo positivo, cuando se aplica tensión en el aislante, la tensión en el interior de la vacuola aumenta de forma gradual. En el momento en el que esta tensión, V_c ,

alcanza la tensión de ruptura del dieléctrico, V_{rd} , se produce una avalancha de electrones, originándose la descarga e inmediatamente después se produce una caída brusca de tensión hasta alcanzar el valor de tensión de extinción V_e . En este instante, la tensión en el espacio de aire empieza a aumentar progresivamente hasta alcanzar de nuevo V_{rd} . El proceso anterior se repite de forma continuada, generando así una corriente pulsante [8]. Conforme se van produciendo las descargas, la magnitud de la corriente va disminuyendo. Esto sirve como indicador del estado en el que se encuentra el aislante [10].

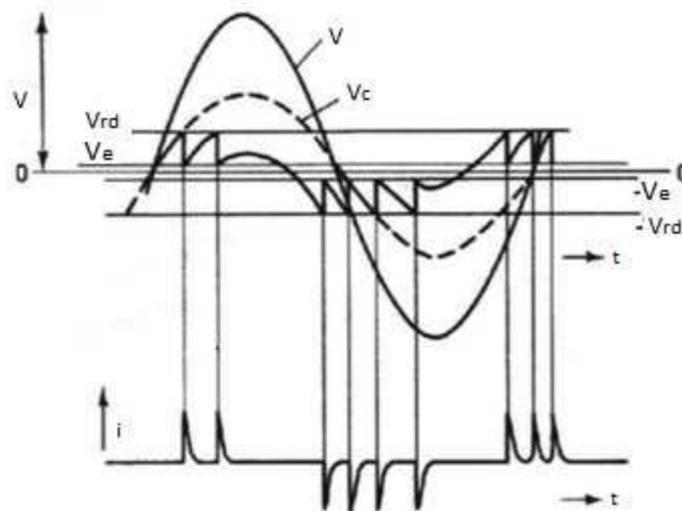


Figura 1. Descargas parciales en una cavidad sometida a tensión alterna. Evolución de la tensión e intensidad en la vacuola [10]

Como se ha mencionado en el párrafo anterior, las descargas parciales se manifiestan como pulsos rápidos de corriente. En la *Figura 2* se muestra la representación elíptica de la onda sinusoidal de la tensión aplicada con los pulsos que caracterizan la descarga parcial. Como se puede observar en la gráfica, en la elipse se representa la fase de la tensión. En la *Figura 3* se representa simplemente el fenómeno pulsante.

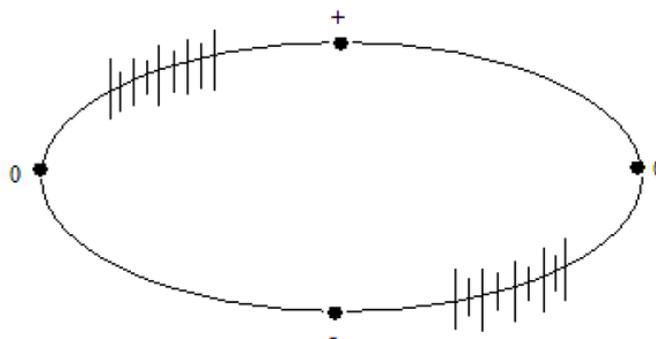


Figura 2. Representación elíptica de una descarga parcial [11]

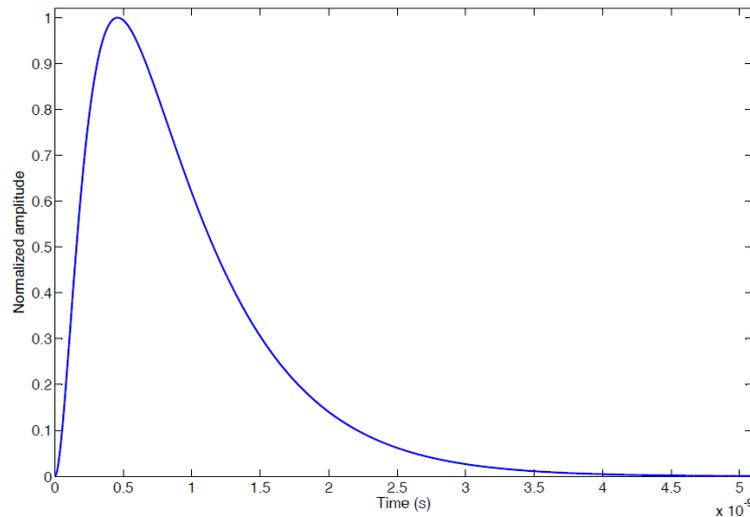


Figura 3. Forma pulsante de la descarga parcial

La duración de las descargas parciales es muy breve, está comprendida entre unos pocos nanosegundos y décimas de microsegundo. Se tratan de pulsos de corriente de muy alta frecuencia, y el ancho de banda de los dispositivos empleados para su detección debe incluir las frecuencias a las que se producen [12]. Existen muchos tipos de sensores que miden las DPs, pero en concreto nos interesan aquellos que miden la señal eléctrica. Estos sensores se dividen en dos tipos con diferentes anchos de banda: inductivos (0,1 – 100 MHz) y de radiofrecuencia (50 MHz – 25 GHz).

Descargas parciales. Fenómeno estocástico

Las DPs se tratan de un fenómeno estocástico que varía con el tiempo y aparecen cuando un conjunto de factores presenta unas determinadas características. Dichos factores son:

- *Geometría y naturaleza de los defectos*: dimensiones de las cavidades y tipo de impurezas.
- *Factores ambientales*: temperatura, presión y humedad.
- *Condiciones y características del aislante*: tensión suministrada y permitividad dieléctrica.

3.2. Clasificación de descargas parciales según su origen

Se distinguen tres tipos de DPs dependiendo de las propiedades del medio existente entre los electrodos:

- Descargas parciales superficiales
- Descargas parciales internas
- Descargas parciales efecto corona

3.2.1. Descargas parciales superficiales

Este tipo de descargas tiene lugar en la interfase entre dos medios dieléctricos o en la interfase entre un conductor y un medio aislante, y suele manifestarse cuando dicha superficie está contaminada o presenta humedad.

La causa de su aparición es la presencia de componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad que tienen lugar cuando la tensión que se aplica es máxima; y se caracterizan porque se propagan de tal manera que recorren el material en dirección al electrodo con menor potencial [12] y [13].

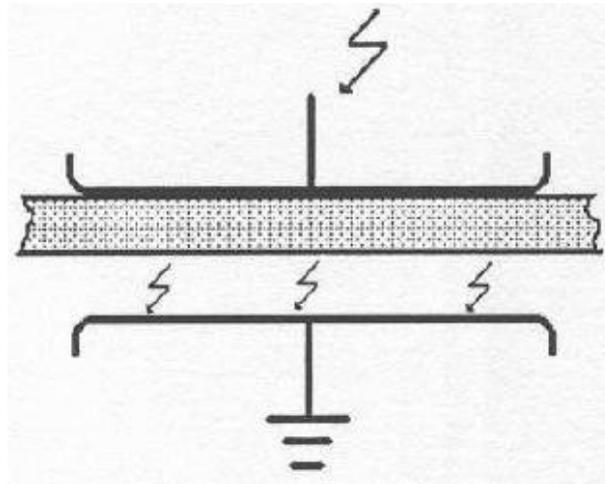


Figura 4. Descarga parcial superficial [12]

En la Figura 5 se muestra el patrón de este tipo de DPs. Ocurre en las zonas más alejadas del cruce por cero y el patrón puede llegar a tener cierta asimetría debido a que en el semiciclo negativo puede aparecer una mayor concentración de descargas de gran amplitud.

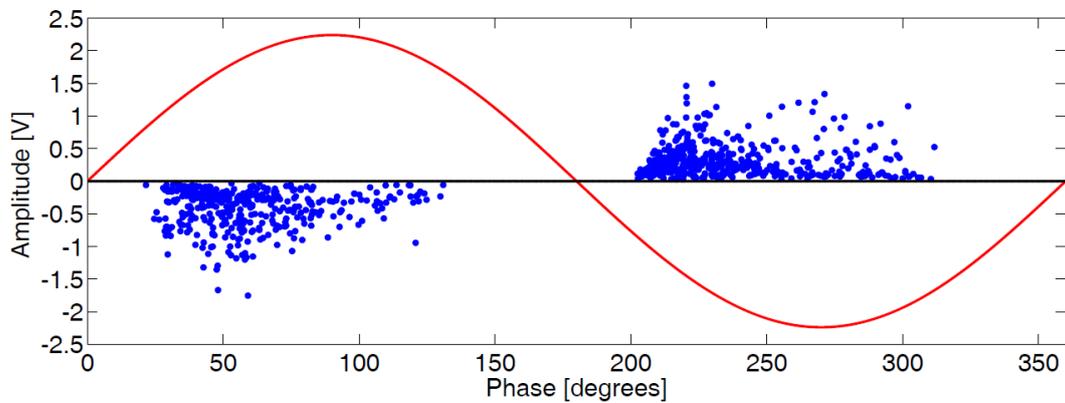


Figura 5. Patrón de descarga parcial superficial [12]

En la vida real nos encontramos este fenómeno en los pasatapas de los transformadores, en los terminales de los cables y en la superficie de los devanados de los generadores [13].

3.2.2. Descargas parciales internas

Las descargas internas tienen lugar en los espacios de aire presentes en un material aislante sólido o líquido, que aparecen como consecuencia de fallos en su fabricación o bien, por efectos químicos, mecánicos, eléctricos o térmicos que se producen en dicho material. También pueden aparecer por otro tipo de inclusiones como partículas extrañas, cavidades de aceite o protuberancias metálicas, y pueden situarse tanto en el interior del aislante como en la frontera próxima a alguno de los electrodos. [11], [13] y [14].

Debido a que la constante dieléctrica en dichas inclusiones es pequeña, el campo eléctrico dentro de los defectos es muy grande, y esto hace que las descargas puedan producirse incluso cuando se aplica la tensión nominal. Como se trata de un fenómeno estocástico, la magnitud de este campo eléctrico también está condicionada por otros parámetros como la forma y el tamaño de los defectos, siendo mayor, por ejemplo, en una cavidad esférica que en una cavidad elíptica.

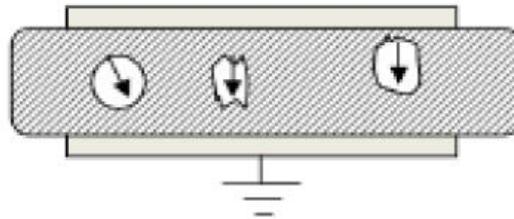


Figura 6. Descarga parcial interna [14]

Dentro de este tipo de descargas, cabe destacar un caso especial denominado arborescencia. Este fenómeno aparece cuando existe una actividad continuada de DPs y consiste en la formación de canales de aire creados por descargas de corriente que forman una estructura ramificada que se extiende por el aislante hasta provocar su ruptura. [13].

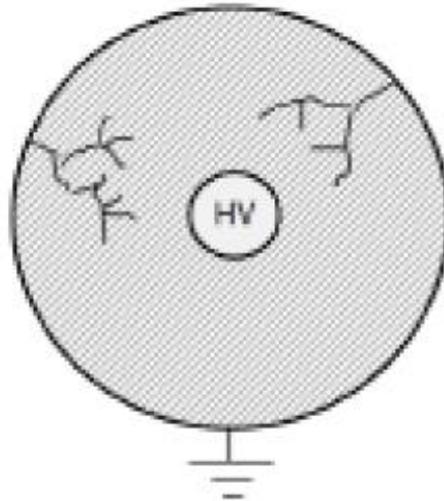


Figura 7. Arborescencia en un aislante [14]

En cuanto a su recurrencia, la aparición de las descargas parciales internas depende del momento en que la pendiente de la tensión aplicada es máxima. En la *Figura 8*, se muestra el patrón característico, que permite apreciar este comportamiento [13].

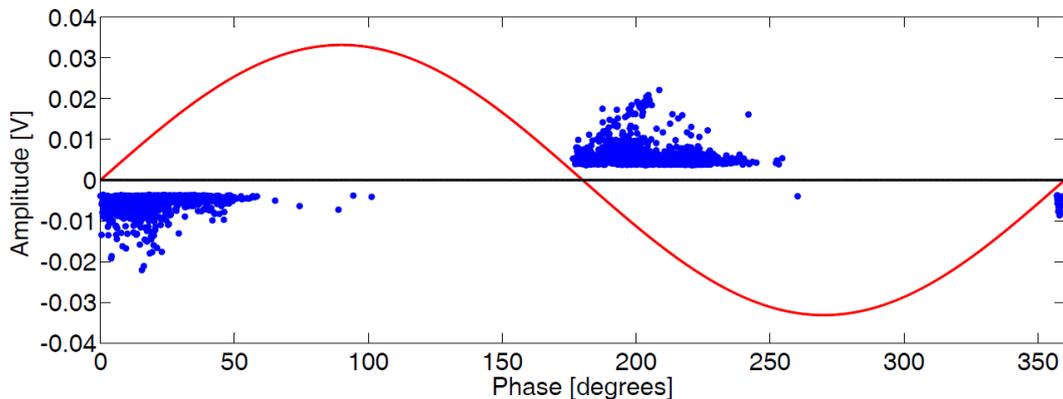


Figura 8. Patrón de descarga parcial interna [12]

Debido a que se originan en zonas de reducido tamaño y en las partes más débiles del aislante, resulta complicada su localización en las máquinas, conductores y transformadores, lo que las convierte en las más problemáticas de las tres [13].

3.2.3. Descargas parciales efecto corona

Las descargas parciales efecto corona son descargas que tienen lugar en las proximidades de bordes afilados o alambres finos presentes en un medio gaseoso sometidos a un fuerte campo eléctrico [15].

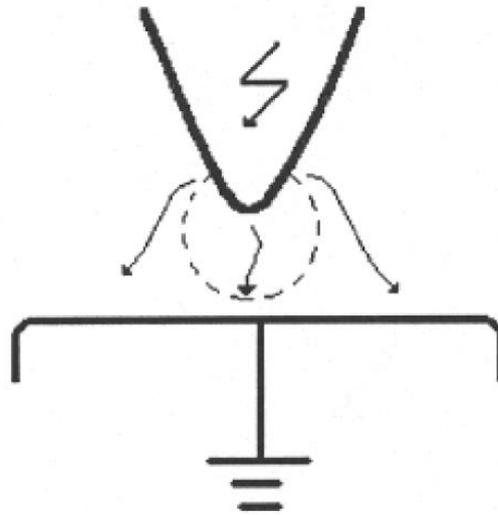


Figura 9. Descarga parcial efecto corona [12]

Aparecen en campos no uniformes y van acompañadas de un efecto luminoso en la cercanía de los electrodos y de un zumbido perceptible. Cuando el campo electrostático en la superficie del aislante alcanza la rigidez dieléctrica del aire contenido entre los electrodos, el aire se ioniza, se vuelve conductor y se genera la descarga. La generación de estas descargas conlleva la producción de ozono, y en caso de existir humedad, la producción de ácido nitroso, que tiene como consecuencia la corrosión de los conductores si el fenómeno es intenso [16].

Este tipo de descargas suele originarse en el semiciclo negativo de la tensión aplicada y su magnitud es constante. Pese a ello, si la tensión es muy elevada, pueden aparecer también en el semiciclo positivo. El motivo por el que existe mayor probabilidad de producirse en el semiciclo negativo es porque el comportamiento del aislante es diferente según la polaridad de la tensión, y es en esta zona donde el dieléctrico necesita una menor tensión para ocasionarse la descarga [13].

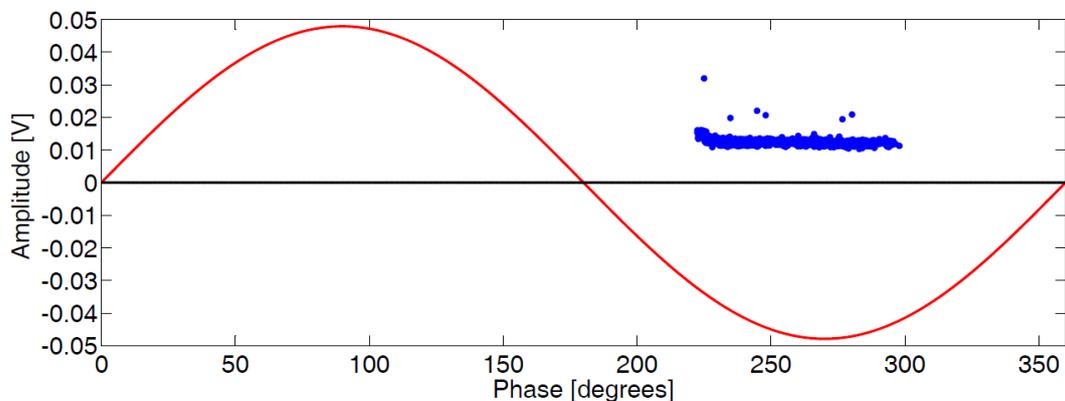


Figura 10. Patrón de descarga parcial efecto corona [12]



Este fenómeno se aprecia en los alrededores de las líneas aéreas de alta tensión o en los pararrayos.

3.3. Efectos

Las descargas parciales tienen efectos negativos sobre el medio aislante en el que aparecen. Por un lado nos centraremos en los efectos de las descargas superficiales e internas; y por otro lado, en los defectos de las descargas efecto corona.

En el primer grupo destaca como consecuencia principal la erosión del aislante. Las superficies de la cavidad actúan como ánodo y cátodo, y durante el fenómeno, se producen electrones e iones positivos que se desplazan de una zona a otra. Los electrones bombardean la superficie anódica y algunos de ellos, adquieren tanta energía que rompen enlaces químicos del medio aislante. Los iones positivos impactan sobre la superficie catódica, causando daños por inestabilidad térmica. Además de la erosión provocada por el bombardeo iónico, durante las descargas se generan compuestos químicos como el ozono, O_3 , y el dióxido de nitrógeno, NO_2 , que originan una degradación química. Esta erosión se va produciendo de forma lenta y continuada hasta que finalmente provoca la ruptura del material.

Las descargas efecto corona, como se ha descrito en el apartado anterior, presentan efectos que el ser humano puede percibir mediante sus sentidos: efecto luminoso, sonoro y generación de ozono. Este último es apreciable por el olor característico del compuesto químico. Además de los citados, también presentan otros efectos más difíciles de apreciar:

- Erosión de las superficies por el impacto de iones
- Radiación ultravioleta
- Interferencias con ondas de radio
- Pérdidas de potencia

En general, se podría decir que los tres tipos de DPs tienen en común el deterioro de las superficies del dieléctrico y la generación de calor en las zonas en las que se originan [8] y [17].

Por último, indicar que generan ondas electromagnéticas que interfieren en los sistemas de comunicación tales como radio, televisión y otras comunicaciones inalámbricas que trabajan en un rango de frecuencia comprendido entre 1-2000 MHz y se manifiestan en forma de ruido [10].

3.4. Técnicas de detección

Actualmente, se aplica la norma IEC 60270 [2] para la medida y detección de descargas parciales en los equipos eléctricos, los componentes o los sistemas cuando se ensayan con tensiones alternas de hasta 400 Hz o con tensión continua. Alternativamente, se emplean

otros métodos de detección como los acústicos, electromagnéticos, químicos y ópticos, explicados en la norma IEC 62478¹ (pendiente de publicación).

En este apartado se explica en profundidad cada uno de los métodos.

3.4.1. Medida convencional según la norma IEC 60270

La norma IEC 60270 establece los circuitos de medida convencionales para la detección de DPs según el método eléctrico. Existen cuatro circuitos básicos a partir de los cuales se derivan el resto de circuitos [2].

Los elementos que aparecen nombrados en las siguientes figuras se corresponden con las variables indicadas en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Elementos de los circuitos de medida convencionales para la detección de descargas parciales

U_{\sim}	Fuente de alta tensión
Z_{mi}	Impedancia de entrada del sistema de medida
CC	Cable de conexión
OL	Enlace óptico
C_a	Objeto de ensayo
C_k	Condensador de acoplamiento
CD	Dispositivo de acoplamiento
MI	Instrumento de medida
Z	Filtro

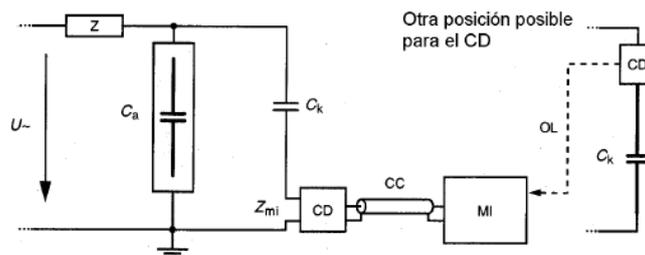


Figura 11. Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el condensador de acoplamiento. Circuito indirecto [2]

¹ Aunque la norma IEC 62478 todavía no está publicada, en la norma UNE-EN 60270 existe un anexo en el que se mencionan y se detallan los métodos de medida que incluye dicha norma.

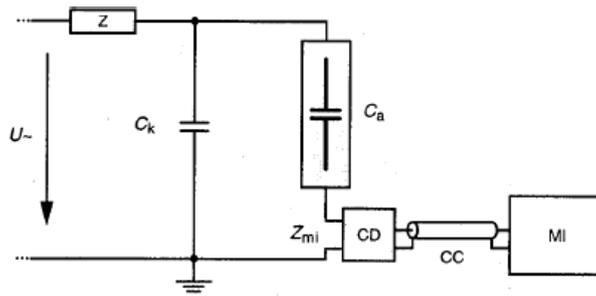


Figura 12. Dispositivo de acoplamiento CD en serie con el objeto de ensayo. Circuito directo [2]

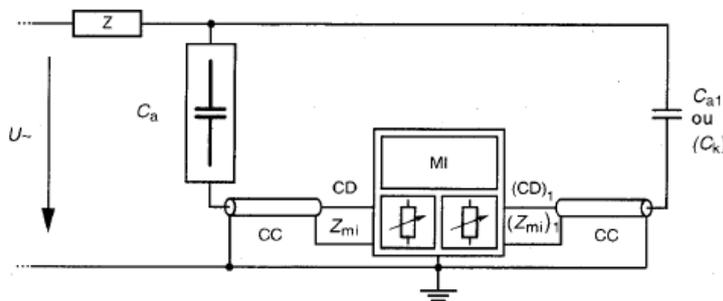


Figura 13. Esquema de un circuito equilibrado [2]

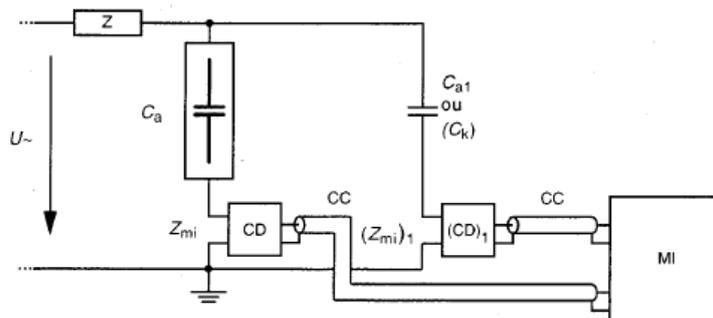


Figura 14. Esquema de un circuito de discriminación de la polaridad [2]

Como se puede observar, los circuitos anteriores se componen principalmente de:

- Fuente de alta tensión, $U\sim$. Debe proporcionar una señal de ruido baja.
- Impedancia de filtro, Z . Se emplea para disminuir el ruido de la fuente de alta tensión y evitar que los pulsos de corriente de las DPs circulen por la misma.
- Objeto de ensayo, C_a . Se puede representar como una capacidad ya que tiene un comportamiento similar.
- Condensador de acoplamiento, C_k . Permite el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia. Con el fin de permitir la medida de las DPs, este condensador debe



presentar un nivel bajo de DPs para la tensión aplicada en el ensayo. En el caso de que el sistema de medida sea capaz de distinguir las descargas producidas en el objeto de ensayo de las producidas en el condensador de acoplamiento, este último podrá admitir un nivel superior.

Los sistemas de medida se dividen en tres subsistemas: sistema de transmisión (cable de conexión o enlace óptico), instrumento de medida acompañado de su impedancia de entrada, y dispositivo de acoplamiento, destacando fundamentalmente los dos últimos.

- Instrumento de medida, MI. En función del tipo de medición, se requieren diferentes instrumentos de medida: de banda ancha, de banda ancha con integrador activo o de banda estrecha.
- Dispositivo de acoplamiento, CD. Generalmente, es una red activa o pasiva de cuatro terminales, es decir, un cuadripolo. Transforma los pulsos de corriente de las DPs que le llegan en señales de tensión, y estas son enviadas al instrumento de medida a través de los sistemas de transmisión.

Para analizar las DPs, se somete el objeto de ensayo a un voltaje a través de la fuente de alta tensión. La tensión se aumenta progresivamente hasta alcanzar los valores en los que aparecen las descargas. En este momento, la corriente empieza a circular por la rama capacitiva, ya que ofrece un camino de baja impedancia para señales de alta frecuencia [13].

Todos los circuitos se pueden clasificar en dos grupos: circuitos directos e indirectos. El directo se caracteriza por tener la impedancia de entrada del sistema de medida en serie con el objeto de ensayo, mientras que en el indirecto, dicha impedancia se encuentra en serie con el condensador de acoplamiento. De los dos sistemas de medición, el más utilizado es el indirecto. Como la impedancia de entrada no se encuentra en serie con el objeto de ensayo, se evitan daños en los equipos de medida y en el personal ante fallos en el aislante, aumentando así la seguridad. Otra de las diferencias de este último con el primero es la polaridad de los pulsos de corriente: en el circuito directo, los pulsos presentan la misma polaridad que la tensión aplicada y en el indirecto, ofrecen una polaridad opuesta.

3.4.2. Medida no convencional según la norma IEC 62478

La norma IEC 62478 establece sistemas alternativos de medida no convencionales. Principalmente, se basa en los métodos acústicos y electromagnéticos aunque también hace referencia a otras técnicas como los métodos ópticos y químicos.

Pese a que presentan ciertas ventajas frente a los convencionales también suponen algunos inconvenientes. Permiten detectar y localizar las DPs sin necesidad de un contacto eléctrico con el objeto de ensayo, lo que aumenta la seguridad, y se realizan sin



tener que desenergizar los equipos. Sin embargo, no son adecuados para medidas cuantitativas de las magnitudes relativas a las DPs [2].

3.4.2.1. Métodos acústicos

Los métodos acústicos se basan en los ultrasonidos para la detección de las DPs. Para ello, emplean transductores acústicos tales como micrófonos y otros sistemas electrónicos que permiten el análisis de la señal como amplificadores y dispositivos de visualización. Un ejemplo de aplicación es el uso de micrófonos de selectividad direccional y de alta sensibilidad en el campo de las frecuencias ultrasonoras para la localización de las descargas corona en el aire. Esta técnica es útil en espacios con bajo nivel de ruido [2].

Los sensores piezoeléctricos detectan ondas de presión para la localización. El inconveniente que presentan es que no detectan las descargas cuando tienen lugar en el interior de dieléctricos sólidos. Además, suelen tener baja sensibilidad y banda estrecha lo que dificulta su detección [3].

3.4.2.2. Métodos electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos consisten en un sistema de medición basado en radiofrecuencia. Los pulsos de corriente característicos de las DPs originan ondas electromagnéticas que pueden ser detectadas con sensores como las antenas [12].

El espectro de las ondas emitidas por el fenómeno puede encontrarse en diferentes rangos de frecuencia. Por este motivo, existen tres rangos de medida [18]:

- HF (*High Frequency*). Alta frecuencia. Tiene un rango de frecuencia comprendido entre los 3 MHz y 30 MHz.
- VHF (*Very High Frequency*). Muy alta frecuencia. Su rango está comprendido entre los 30 MHz y 300 MHz. Los sistemas de medida con este rango pueden utilizarse para cualquier tipo de aislante y proporcionan buenos resultados.
- UHF (*Ultra High Frequency*). Ultra alta frecuencia. Admite frecuencias entre los 30 MHz y 3 GHz.

Las antenas son capaces de detectar las ondas electromagnéticas procedentes de las DPs, pero también detectan otro tipo de ondas como el ruido electromagnético. Este aparece por la presencia de señales de FM, televisión y emisiones Wi-Fi, entre otras, que pueden interferir en los equipos de medida e incluso aumentar la señal de la descarga como consecuencia de la superposición de señales. Por este motivo, es muy importante identificarlas para que no afecten en el análisis, y emplear aparatos de medida de gran precisión.



3.4.2.3. Métodos ópticos

Esta técnica se basa en encontrar la luz emitida por las DPs. El método seguido depende de si tienen lugar en el interior o exterior de los sistemas eléctricos. Así, se realiza una búsqueda visual en espacios oscuros o un registro fotográfico. También se emplean sensores ópticos, cámaras infrarrojas, fotomultiplicadores o intensificadores de imagen.

3.4.2.4. Métodos químicos

Como se ha mencionado anteriormente, las DPs provocan una descomposición química en los dieléctricos. Este método se fundamenta en el análisis de los productos de descomposición disueltos en el aceite o en el gas, y su concentración permite conocer el grado de deterioro del aislante



Capítulo IV

4. Método de localización de DPs. Antenas empleadas

4.1. Localización de DPs

La localización de DPs a partir de las ondas electromagnéticas que emiten fue descrita hace más de 40 años sobre un cable dieléctrico sólido. Con el tiempo, se ha ido mejorando y perfeccionando la técnica y se han presentado en varias publicaciones los resultados satisfactorios que presenta el uso de radiofrecuencia como técnica de localización de este fenómeno [19] y [20].

Los desarrollos en la tecnología de muestreo digital de ultra alta velocidad han demostrado que las señales presentan una forma de onda impulsiva y dado que el tiempo de subida de la onda de corriente es suficientemente alto, el espectro de frecuencia correspondiente se encuentra dentro de la región característica de la frecuencia de radio; lo que permite emplear las técnicas radiométricas. Además, estos impulsos son fáciles de identificar en el tiempo. Todo esto permite ubicar la fuente de las descargas en equipos energizados a partir de un conjunto de antenas que adquieran dichas señales.

Para conseguir una localización tridimensional es necesario, al menos, un sistema de 4 antenas. El algoritmo utilizado y descrito a continuación, necesita conocer los tiempos de llegada de las ondas a cada una de las antenas. Estos tiempos son denominados TOAs (*Time of Arrival*) y se tratan de tiempos absolutos. Este algoritmo es un ejemplo de los métodos actuales de localización de DPs que se llevan a cabo.

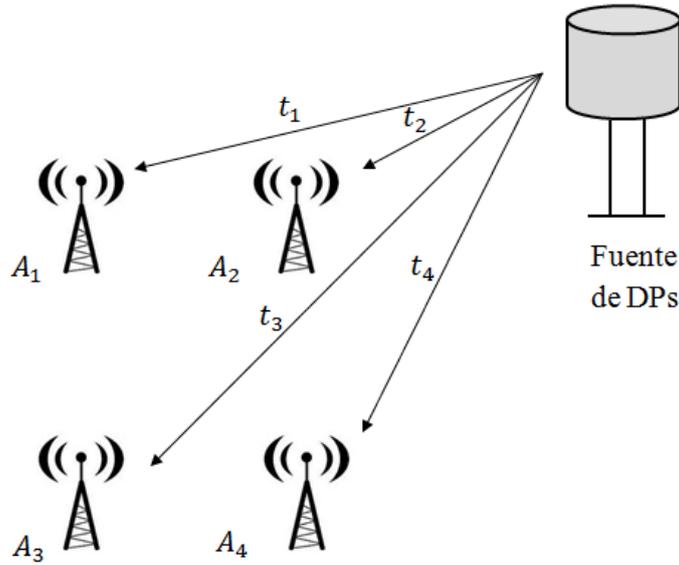


Figura 15. Disposición de la configuración de las antenas y de la fuente de DPs

En la *Figura 15* se muestra un sistema de cuatro antenas (A_1 , A_2 , A_3 y A_4) colocadas cerca de la fuente. El tiempo de llegada de la perturbación a cada antena se define como t_1 , t_2 , t_3 y t_4 , y la diferencia de estos tiempos determina la diferencia de tiempos de recepción de las DPs entre dos antenas. Este desfase es conocido como TDOA (*Time Difference of Arrival*):

$$t_{ij} = t_i - t_j \quad [m] \quad (4)$$

Para la configuración de la *Figura 15* existen seis combinaciones de diferencia de tiempos de llegada, es decir, hay seis TDOAs:

$$t_{12} = t_1 - t_2 \quad [m] \quad (5)$$

$$t_{13} = t_1 - t_3 \quad [m] \quad (6)$$

$$t_{14} = t_1 - t_4 \quad [m] \quad (7)$$

$$t_{23} = t_2 - t_3 \quad [m] \quad (8)$$

$$t_{24} = t_2 - t_4 \quad [m] \quad (9)$$

$$t_{34} = t_3 - t_4 \quad [m] \quad (10)$$

Suponiendo que las ondas de las DPs se transmiten a la velocidad de la luz, se emplea como algoritmo la ecuación que describe su propagación para alcanzar la solución:

$$c \cdot (t_a - \tau) = \sqrt{(x_d - x_a)^2 + (y_d - y_a)^2 + (z_d - z_a)^2} \quad (11)$$



En esta ecuación se expresa que la velocidad del medio en el que se propaga la perturbación, c , por una diferencia de tiempos equivale a la distancia geométrica entre dos puntos. El subíndice “ a ” hace referencia a las antenas y el subíndice “ d ” a la fuente de DPs. Conocidos los tiempos de llegada, t_a , y la posición, $S_a(x_a, y_a, z_a)$, de las antenas, quedan como incógnitas la variable τ y las coordenadas de la fuente $S_d(x_d, y_d, z_d)$. La variable τ representa el instante en el que empieza la propagación de la perturbación y es un tiempo desconocido. Dado que se desconoce su valor y el objetivo es conocer S_d , es preciso modificar la *Ecuación 11* de manera que sólo se tengan tres incógnitas. Para ello, se cancela el término τ de la primera igualdad de dicha ecuación. La cancelación se puede alcanzar a partir de los TDOAs, ya que son datos que se pueden obtener de mediciones experimentales, y el modo de anular la variable es mediante la siguiente expresión:

$$t_{ij} = (t_i - \tau) - (t_j - \tau) = t_i - t_j \quad [m] \quad (12)$$

Combinando esta ecuación con la *Ecuación 11* se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, siendo posible la resolución del problema:

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_2 - \tau)) = c \cdot (t_1 - t_2) = c \cdot t_{12} = g_1 - g_2 \quad (13)$$

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_3 - \tau)) = c \cdot (t_1 - t_3) = c \cdot t_{13} = g_1 - g_3 \quad (14)$$

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_4 - \tau)) = c \cdot (t_1 - t_4) = c \cdot t_{14} = g_1 - g_4 \quad (15)$$

donde

$$g_1 = \sqrt{(x_d - x_1)^2 + (y_d - y_1)^2 + (z_d - z_1)^2} \quad (16)$$

$$g_2 = \sqrt{(x_d - x_2)^2 + (y_d - y_2)^2 + (z_d - z_2)^2} \quad (17)$$

$$g_3 = \sqrt{(x_d - x_3)^2 + (y_d - y_3)^2 + (z_d - z_3)^2} \quad (18)$$

$$g_4 = \sqrt{(x_d - x_4)^2 + (y_d - y_4)^2 + (z_d - z_4)^2} \quad (19)$$

Puesto que las tres expresiones no son lineales, se requiere de métodos iterativos para alcanzar el resultado, destacando el método de Newton-Raphson, el método de mínimos cuadrados, o bien, el método de optimización por enjambre de partículas, entre otros.

Como se ha mencionado al inicio de este apartado, la localización tridimensional se obtiene a partir de cuatro antenas. Sin embargo, si se quisiera determinar en otras dimensiones, habría que variar el número de dispositivos receptores. En caso de querer obtener la posición en un plano, sería suficiente un sistema compuesto por tres antenas. El problema se resolvería de la misma manera pero partiendo de la ecuación principal sin el término correspondiente a la coordenada z :

$$c \cdot (t_a - \tau) = \sqrt{(x_d - x_a)^2 + (y_d - y_a)^2} \quad (20)$$

Según la colocación de las antenas, el estudio puede llevarse a cabo de diferentes modos: las antenas pueden estar en un sitio específico de la planta a analizar o sobre una superficie móvil como puede ser el techo de un vehículo que presente un área plana (camión, furgoneta...) que facilite la sujeción de las antenas. En este último caso, el análisis se realizaría desde diferentes perspectivas y la posición de la fuente de las DPs sería el punto de intersección de las soluciones de cada una de las zonas en las que se situase el vehículo.



Figura 16. Localización de DPs en una subestación mediante antenas colocadas sobre una superficie móvil [20]

4.2. Antenas

Antes de definir qué es una antena, es importante conocer el concepto de sistema de radio. Un sistema de radio es un sistema electrónico que emplea ondas electromagnéticas capaces de alcanzar frecuencias del orden de GHz, denominadas ondas de radio.

Una antena es una parte esencial del sistema de radio y se trata de un dispositivo que puede radiar y recibir energía electromagnética de forma eficiente. Normalmente, son de metal pero también pueden estar fabricadas de otro tipo de material como la cerámica [21].

Hoy en día, muchos objetos que nos rodean son capaces de radiar y emitir energía electromagnética, pero sólo aquellos que cumplen esta función de manera eficiente y forman parte de un sistema de radio pueden utilizarse como antenas.

Las ventajas que ofrecen los sistemas de radio frente a los sistemas de cable son:

- Movilidad. Es fundamental para las comunicaciones móviles.
- Buena cobertura. Una antena puede cubrir radiaciones de áreas grandes.
- Bajas pérdidas. Las pérdidas en las ondas de radio son menores que en las líneas de transmisión, ya que son proporcionales al cuadrado de la distancia, mientras que en las líneas, las pérdidas siguen una función exponencial de la distancia.



Dependiendo de la utilidad, existen diversos tipos de antenas: para televisión, WI-FI, radio, comunicaciones de telefonía móvil, etc. Este proyecto se basa en una antena que permite captar las ondas electromagnéticas generadas por las DPs.

En este capítulo, se exponen varios tipos de antenas empleados en un estudio destinado al mismo objetivo. En primer lugar, se explica en detalle cada uno de ellos y posteriormente, los resultados obtenidos en la investigación que se tienen en cuenta en nuestro proyecto. Antes de profundizar en estos tipos de antenas, se definen algunos de sus parámetros.

4.2.1. Parámetros importantes de una antena

En la selección de la antena, hay que tener en cuenta algunos parámetros importantes: patrón de radiación, directividad, eficiencia, ancho de banda de la señal y área efectiva. También es preciso fijarse en la ganancia, ancho de haz, potencia radiada, polarización (longitud efectiva, área efectiva y factor de antena), resonancia e impedancia de entrada de una antena. En este apartado sólo se profundiza en los más significativos.

4.2.1.1. Patrón de radiación

El patrón de radiación se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena que se establece a partir de coordenadas espaciales [22].

Indica en qué direcciones la antena radia o recibe mejor las ondas electromagnéticas y se determinan en una región de campo lejano, es decir, el patrón de radiación se establece a una distancia fija que debe ser lo suficientemente grande para poder ser considerado como campo lejano [21].

Atendiendo al diagrama de radiación, se distinguen diferentes tipos de antenas [14]:

- *Antena isotrópica.* Es aquella que radia la misma cantidad de energía en todas las direcciones del espacio, es decir, distribuye la energía uniformemente en forma esférica. Consiste en una antena ideal que no existe en la práctica y se emplea como referencia en el estudio del comportamiento del resto de antenas.

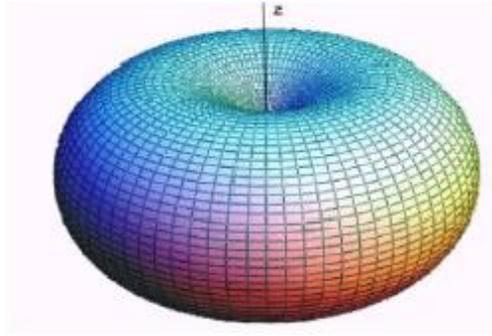


Figura 19. Patrón de radiación omnidireccional [14]

4.2.1.2. Directividad

La directividad es una medida que proporciona la capacidad que tiene una antena para concentrar la potencia radiada en una dirección en concreto. Se define como el cociente entre la intensidad de radiación en una determinada dirección y la intensidad de radiación media de todas las direcciones. En caso de no especificarse la orientación a estudiar, se analiza la zona con radiación máxima [21].

Este parámetro viene determinado por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{U(u)}{U_{av}} = \frac{U(u)}{\frac{P_t}{4\pi}} \quad (21)$$

donde P_{rad} es la potencia radiada total expresada en vatios (W), U es la intensidad de radiación expresada en vatios por unidad de ángulo sólido (W/sr) y u es la dirección..

Como se puede observar, la intensidad de radiación media se define como la potencia radiada total entre 4π .

4.2.1.3. Eficiencia

La eficiencia de una antena establece las pérdidas que se producen en ella. Se define como [14]:

$$e = e_c \cdot e_d \cdot e_r \quad (22)$$

donde e es la eficiencia total; e_c es la eficiencia de conducción; e_d es la eficiencia dieléctrica y e_r es la eficiencia de reflexión.

Atendiendo a la expresión anterior, el rendimiento de la antena viene determinado por tres tipos de rendimientos, lo que significa que en ella se producen tres tipos de pérdidas.



Eficiencia de conducción

Está relacionada con las pérdidas por efecto Joule. Estas pérdidas se producen por el paso de la corriente a través de un material conductor y se obtienen con la siguiente fórmula:

$$P_0 = R \cdot i_{ef}^2 \quad [W] \quad (23)$$

En el cálculo de la eficiencia intervienen la potencia radiada, P_{rad} , y la potencia total de entrada, P_i (W).

$$e_c = \frac{P_{rad}}{P_i} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_0} \quad (24)$$

Eficiencia dieléctrica

Esta eficiencia viene determinada por las pérdidas que se producen en el dieléctrico presente en la antena.

Eficiencia de reflexión

La eficiencia de reflexión relaciona la potencia que le llega a la antena con la potencia que se le envía. Depende de la impedancia de la línea de transmisión y de la impedancia de entrada de la antena. Cuando las ondas electromagnéticas se envían desde un medio con una determinada impedancia a otro con impedancia diferente, se produce la reflexión de las ondas, lo que origina pérdidas en el sistema.

El rendimiento se calcula a partir del coeficiente de reflexión, Γ :

$$\Gamma = \frac{Z_{inc} - Z_m}{Z_{inc} + Z_m} \quad (25)$$

donde Z_{inc} es la impedancia de entrada de la antena y Z_m , la impedancia de la línea de transmisión.

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (26)$$

La eficiencia total de la antena también se puede calcular a partir de las pérdidas totales:

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{pérdidas}} \quad (27)$$

4.2.1.4. Ancho de banda

El ancho de banda determina el rango de frecuencias en el que puede trabajar una antena, es decir, establece los valores de frecuencia en los que trabaja correctamente [18].



Con el fin de recoger las señales deseadas, es importante seleccionar una antena con un ancho de banda que comprenda la frecuencia de las ondas a analizar. De lo contrario, no sería capaz de detectarlas.

El ancho de banda se calcula con la siguiente expresión:

$$BW = \frac{f_{m\acute{a}x} - f_{m\acute{i}n}}{f_0} \quad (28)$$

siendo $f_{m\acute{a}x}$, la frecuencia máxima a la que trabaja la antena; $f_{m\acute{i}n}$, la frecuencia a la que la antena empieza a recoger señales; y f_0 , la frecuencia central obtenida a partir de las dos primeras:

$$f_0 = \frac{f_{m\acute{a}x} + f_{m\acute{i}n}}{2} \quad [Hz] \quad (29)$$

4.2.1.5. Ganancia

La línea de alimentación de la antena recibe una potencia P_i desde el transmisor (P_i es la diferencia de potencias incidente y reflejada). La potencia radiada P_{rad} es menor o igual a P_i debido a las posibles pérdidas óhmicas en la antena [23].

La ganancia de la antena, $G(u)$, tiene en cuenta estas pérdidas, y para ello, compara la densidad de potencia efectiva radiada con la densidad media que existiría si toda la potencia P_i que alimenta a la antena fuese radiada (suponiendo cero pérdidas).

$$G(u) = \frac{\text{densidad de potencia efectiva en la dirección } u}{\text{densidad media asumiendo cero pérdidas}} = \frac{\frac{dP_{rad}}{dS}}{\frac{P_i}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} \quad (30)$$

La ganancia y la directividad están relacionadas por la siguiente expresión:

$$\frac{G(u)}{D(u)} = \frac{P_{rad}}{P_i} \leq 1 \quad (31)$$

4.2.1.6. Resonancia de la antena

La resonancia se produce cuando el circuito eléctrico pasa a ser puramente inductivo como consecuencia de la cancelación de las inductancias con las capacitancias. Durante esta situación, la corriente es máxima y se irradia la máxima potencia. Variando la longitud de la antena, se consigue irradiar una cantidad de potencia óptima. La mejor intensidad de corriente se consigue con una longitud total de la antena igual a media longitud de onda para la frecuencia de trabajo [24].

La frecuencia de resonancia se puede obtener de la gráfica en la que se representa el parámetro S_{11} (también conocido como parámetro de reflexión) en función de la

frecuencia. Con este parámetro se mide la cantidad de potencia reflejada en comparación con la cantidad de potencia que se aplica.

En la *Figura 20* se muestra un ejemplo del parámetro S_{11} en función de la frecuencia para diferentes tipos de antenas.

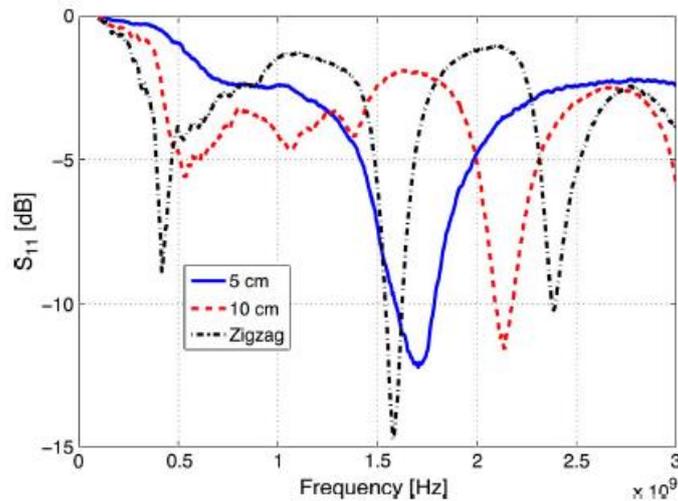


Figura 20. Ejemplo del parámetro S_{11} en función de la frecuencia para diferentes antenas [3]

La frecuencia de resonancia es aquella en la que el parámetro S_{11} alcanza el punto más bajo.

4.2.2. Algunos tipos de antenas para la detección de DPs

4.2.2.1. Antena dipolo

Una antena dipolo está constituida por un hilo conductor con una longitud de onda igual a la mitad de la frecuencia a la que trabaja. Este hilo está dividido en dos tramos separados una cierta distancia, que con el fin de evitar perturbaciones en la radiación del dipolo, debe ser pequeña. En el centro se coloca un generador o una línea de transmisión para permitir la radiación o recepción de las señales en radiofrecuencia [23] y [25].

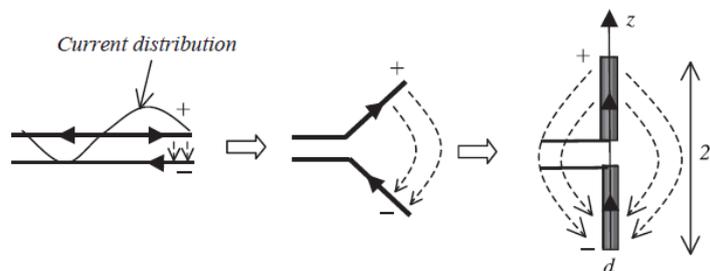


Figura 21. Evolución de un dipolo de longitud total $2l$ y diámetro d [21]

La longitud de la antena se calcula a partir de la frecuencia a la que trabaja, expresada en megahercios (*MHz*):

$$L = \frac{150}{f} \quad [m] \quad (32)$$

Cuanto menor sea la frecuencia de trabajo, mayor será su longitud.

La existencia de las dos puntas en la estructura física del dipolo ocasionan una cierta capacidad que el conductor en continuo no tiene, y para obtener una resonancia adecuada es preciso reducir la longitud del dispositivo en torno a un 5%:

$$L = \frac{142,5}{f} \quad [m] \quad (33)$$

Con esta fórmula se obtienen excelentes resultados si se coloca la antena a una distancia igual a la mitad de su longitud de onda.

Por último, comentar que se trata de una antena omnidireccional y el patrón de radiación, la distribución de corriente y su directividad, entre otras características, varían según la longitud del dipolo. En la *Figura 22*, se muestran las variaciones que se producen en los parámetros de la antena según las coordenadas del eje *z*.

Dipole length $2l$	$\lambda/10$	$\lambda/2$	λ	1.5λ
Current distribution				
Radiation pattern				
Directivity	1.5 or 1.76 dBi	1.64 or 2.15 dBi	2.4 or 3.8 dBi	About 2.3
HPBW	90°	78°	47°	NA
Input impedance	R : very small ($\sim 2 \Omega$) jX : capacitive	R : $\sim 73 \Omega$ jX : $\sim 0 \Omega$	R : very large jX : $\sim 0 \Omega$ for thin dipole	R : $\sim 100 \Omega$ jX : $\sim 0 \Omega$ for thin dipole
Note	jX sensitive to the radius	$R+jX$ not sensitive to the radius	$R+jX$ sensitive to the radius	$R+jX$ sensitive to the radius

Figura 22. Resumen de características de una antena dipolo [21]

4.2.2.2. Antena monopolo

La antena monopolo está constituida por un hilo conductor colocado sobre un plano conductor o plano de tierra, y su longitud es la mitad de la correspondiente al dipolo. Se alimenta por la base a través de un generador o línea de transmisión, que inyectan una corriente de excitación [14].

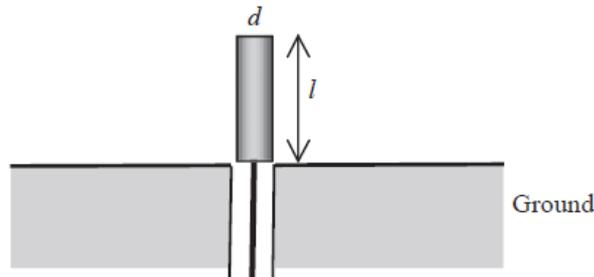


Figura 23. Antena monopolo de longitud l y diámetro d [21]

Dado que la longitud de un monopolo es la mitad que la de un dipolo, un monopolo $\lambda/4$ con un plano de tierra infinito se asemeja a un dipolo $\lambda/2$. Esta equivalencia se obtiene a partir de la teoría de la imagen.

Esta teoría expone que si existe una corriente sobre un plano de tierra infinito, este actúa como espejo generando una imagen de la corriente [21].

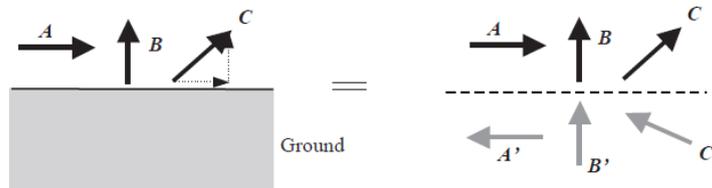


Figura 24. Teoría de la imagen [21]

En la *Figura 24* se muestran tres ejemplos de dicha teoría con diferentes corrientes. El campo en cualquier punto por encima del plano de tierra es equivalente al campo generado por la corriente $A/B/C$ y su correspondiente imagen $A'/B'/C'$ sin la presencia del plano de tierra. La imagen de la corriente tiene la misma amplitud, sin embargo, su dirección viene determinada por las condiciones de contorno. Siguiendo la teoría de la imagen, el problema se puede tratar sin el plano de tierra, considerándolo como un espacio libre con dos fuentes de corriente.

Analizando la corriente tipo B de la figura anterior, se demuestra que un monopolo de longitud l equivale a un dipolo de longitud $2l$ en el espacio libre.

Además de esta equivalencia, ambos tipos de antenas presentan la misma distribución de corriente, por lo que el patrón de radiación también es el mismo. La diferencia es que en el monopolo, ambos parámetros sólo aparecen por encima del plano de tierra.

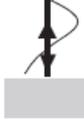
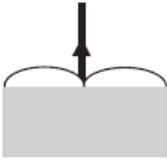
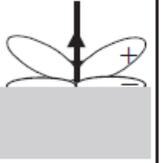
Monopole length l	$\lambda/20$	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3/4$
Current distribution				
Radiation pattern				
Directivity	3.0 or 4.76 dBi	3.28 or 5.15 dBi	4.8 or 6.8 dBi	About 4.6
HPBW	45°	39°	23.5°	NA
Input impedance	R : very small ($\sim 1\Omega$) jX : capacitive	R : $\sim 37\Omega$ jX : $\sim 0\Omega$	R : very large jX : $\sim 0\Omega$ for thin dipole	R : $\sim 50\Omega$ jX : $\sim 0\Omega$ for thin dipole
Note	jX sensitive to the radius	$R+jX$ not sensitive to the radius	$R+jX$ sensitive to the radius	$R+jX$ sensitive to the radius

Figura 25. Resumen de características de una antena monopolo [21]

La energía correspondiente a la parte inferior se refleja en la parte superior. Esto supone un aumento en la directividad, que alcanza un valor igual al doble de la directividad que posee el dipolo. En cambio, con la tensión sucede lo contrario: los monopolos alcanzan la mitad de tensión, reduciéndose también la impedancia de entrada a la mitad.

Las antenas monopolo tienen la ventaja de ser relativamente sencillas de sintonizar en un intervalo de frecuencias determinado. Además, no necesitan de un balun, que es un dispositivo conductor que convierte líneas de transmisión no balanceadas en líneas de transmisión balanceadas, y esto hace que sean más utilizadas que los dipolos.

Asimismo, son fáciles de construir y son ideales para la detección de descargas parciales por la banda de frecuencias que presentan.

4.2.2.3. Antena logarítmica periódica

La antena logarítmica periódica se trata de una antena formada por dipolos de diferentes longitudes con una disposición geométrica determinada: los dipolos están colocados en paralelo de mayor a menor tamaño y sus longitudes decrecen de forma logarítmica. Su nombre proviene de su impedancia de entrada, que sigue una función periódica del logaritmo de la frecuencia [14] y [21].



Figura 26. Antena logarítmica periódica [12]

La antena se divide en dos regiones (*Figura 27*): activa e inactiva, y dependiendo de la frecuencia de funcionamiento, los dipolos se encuentran dentro de una región u otra y poseen una función determinada:

- Si su longitud es aproximadamente la mitad de la longitud de onda, es un dipolo activo y pertenece a la región activa.
- Si su longitud es superior a la mitad de la longitud de onda, pertenece a la región inactiva y actúa como reflector.
- Si su longitud es inferior a la mitad de la longitud de onda, también pertenece a la región inactiva pero actúa como director.

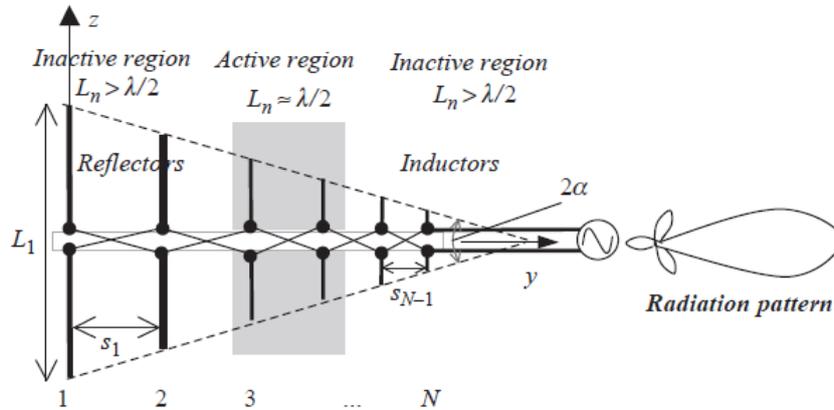


Figura 27. Configuración de una antena logarítmica periódica y su patrón de radiación [21]

Otra manera de entender el mecanismo de funcionamiento es:

- Si la frecuencia de operación es baja, los dipolos de mayor longitud actúan como elementos resonantes mientras que el resto actúa como directores.
- Si la frecuencia de operación es alta, los elementos resonantes son los de menor longitud y el resto de dipolos actúan como reflectores.

Estas características dotan a la antena de un mayor ancho de banda, donde la frecuencia mínima viene determinada por el dipolo de mayor longitud y la frecuencia máxima, por el dipolo de menor longitud. Además, presenta un patrón de radiación direccional, como se puede apreciar en la *Figura 27*.

4.2.2.4. Antena Vivaldi

Es una antena plana de apertura formada por una ranura de sustrato dieléctrico que tiene una apertura exponencial (*Slot Line*) y que se encuentra rodeada por otro sustrato dieléctrico constituido por dos placas de cobre (*Substrate*). Se alimenta a través de una línea de transmisión integrada en el dispositivo (*Microstrip Line*) que parte del punto de alimentación (*Feeding Point*) [18].

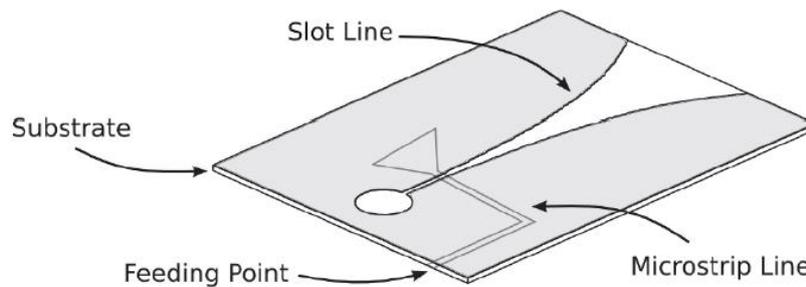


Figura 28. Partes de la antena Vivaldi [18]

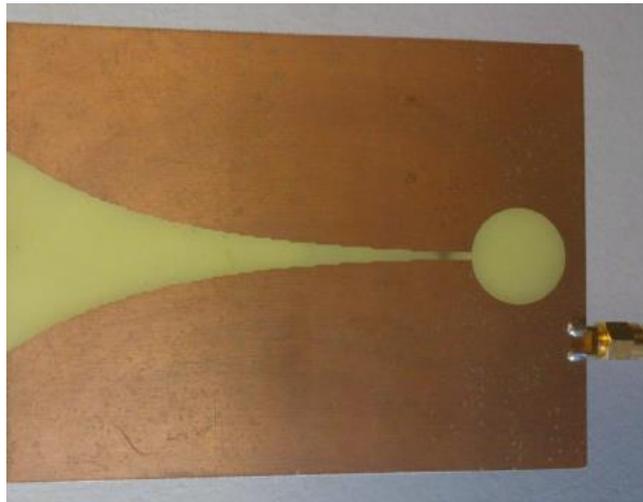


Figura 29. Antena Vivaldi [18]

Este sensor presenta la ventaja de poder variar su geometría, lo que permite obtener un mayor ancho de banda para la adquisición de energía o establecer un diseño que elimine las bandas de frecuencia no deseadas. Además no es resonante, y por tanto, las frecuencias de funcionamiento en las que trabaja son las determinadas por su condición geométrica.

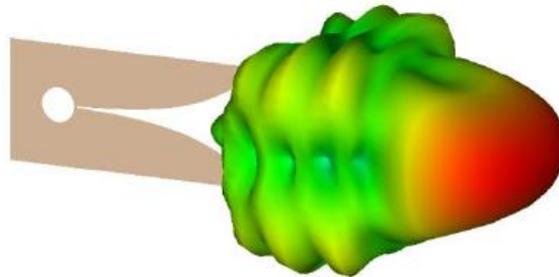


Figura 30. Diagrama de radiación teórico de una antena Vivaldi [18]

Este tipo de antena sigue un patrón de radiación direccional.

4.2.2.5. Resultados de estudios anteriores

En este apartado nos basaremos en los resultados obtenidos en el estudio mostrado en el artículo correspondiente a la referencia [3], realizado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid. Su objetivo era el análisis del comportamiento de cuatro tipos de antenas en la medición de pulsos electromagnéticos radiados por la actividad de DPs.

Este estudio se centraba en antenas simples y omnidireccionales con patrones de radiación que presentaban una directividad media o baja. Puesto que las antenas eran fijas, interesaba tener este tipo de patrón de radiación, ya que al no conocer la posición de la fuente, era conveniente cubrir todas las direcciones posibles. Las antenas seleccionadas

fueron: tres monopolos (monopolo de 5 cm, monopolo de 10 cm y monopolo trapezoidal con geometría en zigzag) y una antena periódica logarítmica.

Puesto que en nuestro proyecto se recurre a un monopolo de 10 cm, nos centraremos únicamente en los resultados alcanzados con esta antena.

Durante el mencionado estudio, en el laboratorio se tomaron muestras de 500 señales en el tiempo y posteriormente, se calculó su espectro promediado. Para ello, se aplicó la transformada rápida de Fourier a cada señal y se promedió el espectro con el fin de reducir su varianza. Esta recogida se realizó con y sin actividad de descargas parciales en el medio. Este último ensayo tenía como objetivo caracterizar el ruido electromagnético presente en el laboratorio y los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

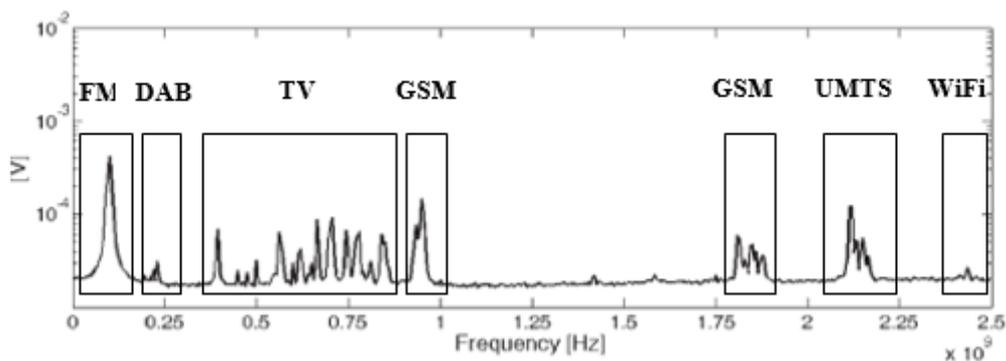


Figura 31. Espectro de ruido de fondo para la antena monopolo de 10 cm [3]

Como se puede ver en la *Figura 31*, las señales de radio FM, de radiodifusión de audio digital (DAB), de radiodifusión de televisión, servicio de radio por paquetes GSM y WIFI se detectaron fácilmente. Por tanto, nuestras señales van a estar afectadas por estas interferencias.

Después de detectar la presencia de ruido, se analizaron los espectros alcanzados durante la recepción de las DPs. La *Figura 32* muestra la onda expresada en el tiempo y la *Figura 33* muestra el espectro promediado de los 500 pulsos adquiridos con la antena. Estas gráficas nos indican el tipo de señal que se va a obtener en nuestra investigación y el reparto de energía en antenas omnidireccionales, respectivamente.

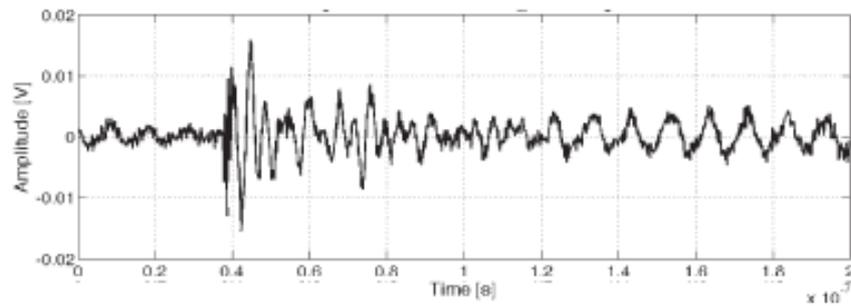


Figura 32. Pulsos de DPs medidos con la antena monopolo de 10 cm [3]

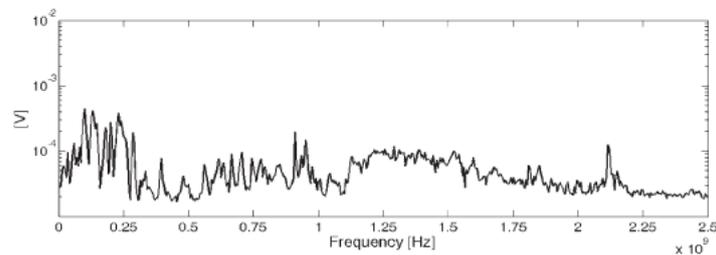


Figura 33. Espectro promediado de 500 pulsos adquiridos con la antena monopolo de 10 cm [3]

Como se puede observar, el monopolo de 10 cm tiene una excelente respuesta en un rango de frecuencias comprendido entre los 1000 y 1750 MHz.

En resumen, de este estudio se concluye que en el laboratorio existe ruido electromagnético que puede afectar a las ondas a analizar y que las DPs emiten en una amplia banda de frecuencias.



Capítulo V

5. Procesamiento digital de las señales

Este capítulo explica el circuito empleado para la medida de las DPs y detalla el código implementado en Matlab para su análisis.

En este proyecto nos basaremos en una parte del código total necesario para la localización del fenómeno, ya que el programa final se divide en dos partes. La primera de ellas consiste en el movimiento del servomotor sobre el que se acopla la antena y los comandos necesarios para la recogida de datos (disponibles en la interfaz gráfica); y la segunda, que es la correspondiente a este trabajo, consiste en la adquisición de los datos partiendo del código anterior y el estudio de las señales. En los siguientes apartados se expone el criterio aplicado en la detección y ubicación de las DPs.

Con el fin de reducir el tiempo de desarrollo del proyecto, todos los análisis se han probado previamente en un ordenador portátil con el modo simulación de la tarjeta de adquisición de datos y sólo cuando se comprobaba que el programa funcionaba correctamente se acudía al laboratorio para realizar las pruebas oportunas.

5.1. Sistema de medición

Los ensayos realizados en la investigación se han llevado a cabo en el Laboratorio de Investigación y Ensayos de Alta Tensión del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid. El sistema que se ha diseñado para la localización es el mostrado en el siguiente esquema:

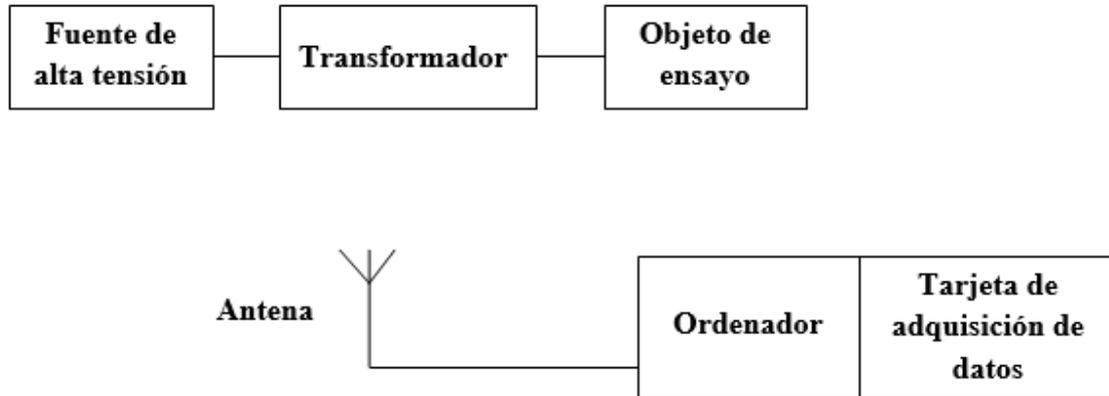


Figura 34. Esquema del sistema de medición para la localización de DPs

En primer lugar, se conecta el transformador *Schleich BV 702210* a una fuente de alta tensión (*Schleich GLP1-e HV*), y el voltaje se variará mediante el módulo de control de la fuente hasta conseguir la actividad de descargas parciales. A la salida del transformador, se conecta un cable de 20 KV (cable de color rojo en la *Figura 35*), que formará parte del objeto de prueba.

La emisión de las DPs se consigue creando una diferencia de voltaje. Para ello, se rodea el cable rojo con un hilo de cobre conectado a tierra, de manera que el primer cable se encuentra a la tensión del transformador y el hilo a tensión 0 V. La presencia de este gradiente de tensión en la cavidad de aire presente entre ambos elementos provocará la actividad de descargas deseada.

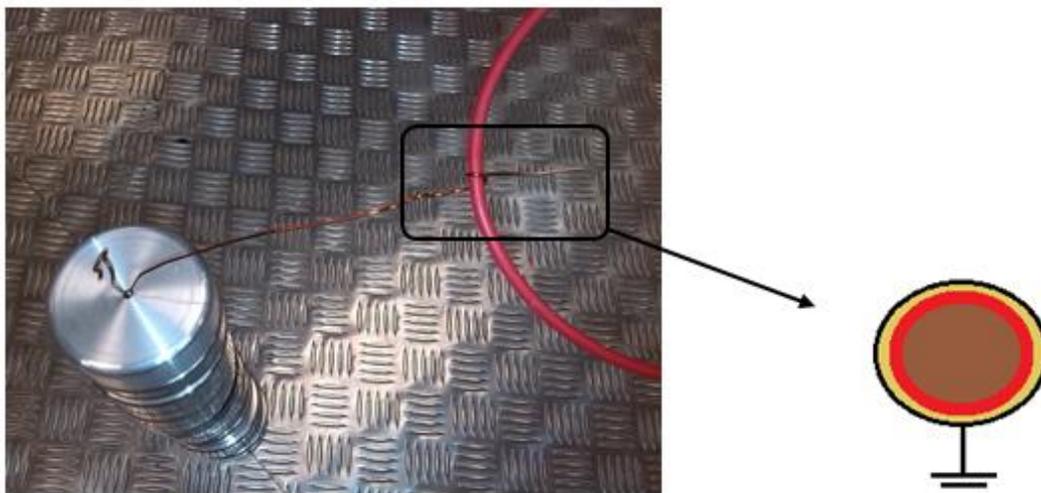


Figura 35. Sección de la unión entre el cable rojo y el hilo de cobre

En segundo lugar, se coloca la antena de estudio, situada sobre la estructura móvil gobernada por el servomotor. El servo utilizado sólo permite un giro máximo de 180° y esto limita el análisis de las señales en este rango. A la hora de posicionar la antena

respecto a la fuente de DPs hay que tener en cuenta esta limitación colocándola de tal manera que el objeto de ensayo se encuentre en uno de los ángulos alcanzados durante el barrido del servomotor.

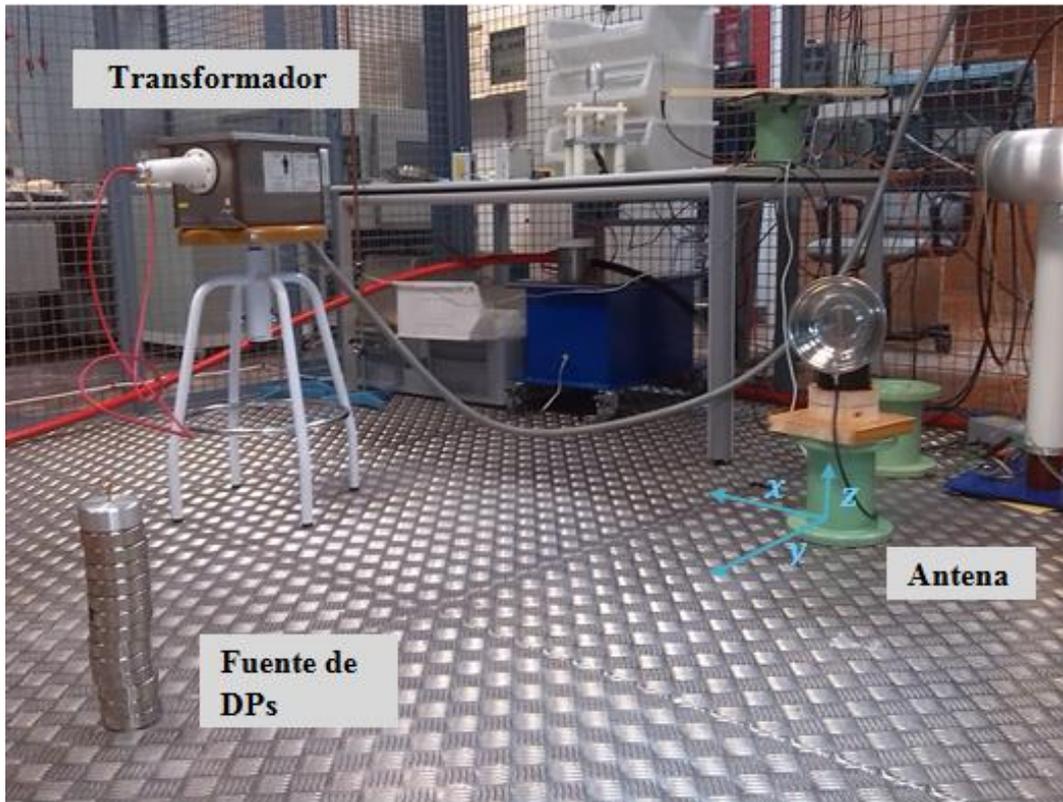


Figura 36. Sistema de medición para la localización de DPs en el laboratorio

En este estudio las coordenadas de la antena respecto del objeto de ensayo son:

Tabla 2. Coordenadas de la antena respecto del objeto de ensayo

x	0,30 m
y	1,32 m
z	0,30 m

La antena, a su vez, se conecta mediante un cable coaxial RG-58 a uno de los canales de entrada del ordenador y este recibe las señales a través de una tarjeta de adquisición de datos.

Por último, comentar que aunque no forma parte de los instrumentos que componen nuestro sistema de medición, ha sido necesario en varias ocasiones el empleo de un osciloscopio con el fin de comprobar la efectividad del programa y la existencia de las DPs. En este caso, en vez de conectar el cable coaxial de la antena al ordenador se conectaba a este instrumento de medida, y el modelo utilizado fue el osciloscopio



Tektronix DPO7254, que tiene un ancho de banda de $2,5\text{ GHz}$ y un muestreo simultáneo de 4 canales a una velocidad de 40 GS/s .

5.2. Adquisición de las señales

Antes de empezar con la recogida de las ondas, es importante cerciorarnos que la señal adquirida es justo la que queremos estudiar. Por este motivo, se realiza una calibración previa en la que se modifican los parámetros necesarios y se ajustan hasta obtener la señal deseada. En concreto, es preciso ajustar tres parámetros: número de señales, número de muestras y paso del servomotor. Estos parámetros se ajustan en la interfaz gráfica proporcionada por el proyecto tomado como base.

Número de señales

Es el número de señales recogidas en cada posición, y todas ellas se tienen en cuenta en los cálculos oportunos para la localización de las DPs. Cuanto mayor sea el número de ondas, mayor será la precisión en las operaciones aunque también será mayor el tiempo de adquisición total. En un principio, como se pretendía comprobar el funcionamiento correcto del programa, se estableció un número de señales pequeño (10 señales) pero en el análisis definitivo este número se incrementó a 50.

Número de muestras

Es el número de puntos que componen la señal, es decir, el número de puntos que se adquieren y constituyen la onda completa. Para que la señal obtenida tenga similitud con la real, el número de muestras no debe ser bajo.

A continuación, se muestra un ejemplo sencillo basado en una onda sinusoidal con el que se percibe la importancia de tener un número de muestras adecuado. Para ello, se crea en Matlab un vector de tiempos comprendido entre $0\ \mu\text{s}$ y $1\ \mu\text{s}$, y en él se determina el número de puntos que lo constituyen. Posteriormente, se crea una señal sinusoidal de amplitud 1 V y se dibuja para el vector de tiempos definido. Se ha determinado un tiempo de $1\ \mu\text{s}$ para que la señal sea de 1 MHz .

Señal sinusoidal con un número de muestras igual a 1000

```
t=linspace(1,1000,1000); % Vector de tiempos comprendido entre 0 ms y 1000 ms
                          % (1 us) formado por 1000 puntos (número de muestras)
x=sin(t/1000*2*pi);      % Señal sinusoidal. Se divide entre 1000 para
                          % representar un periodo

figure(1)
plot(t,x)
xlabel('tiempo [ms]');
ylabel('tensión [V]');
```

**Señal sinusoidal con un número de muestras igual a 10**

```
t=linspace(1,1000,10); %% Vector de tiempos comprendido entre 0 ms y 1000 ms
                        %% (1 us) formado por 10 puntos (número de muestras)
y=sin(t/1000*2*pi);    %% Señal sinusoidal. Se divide entre 1000 para
                        %% representar un periodo

figure(2)
plot(t,y)
xlabel('tiempo [ms]');
ylabel('tensión [V]');
```

A la hora de definir la señal, el vector de tiempo se divide entre 1000 para que en la gráfica se represente un ciclo de la onda sinusoidal.

En este ejemplo de aplicación se compara un número de muestras de 1000 frente a uno de 10. Ambos valores se han elegido al azar con la condición de que uno fuese lo suficientemente grande y el otro lo suficientemente pequeño para demostrar la importancia de este parámetro.

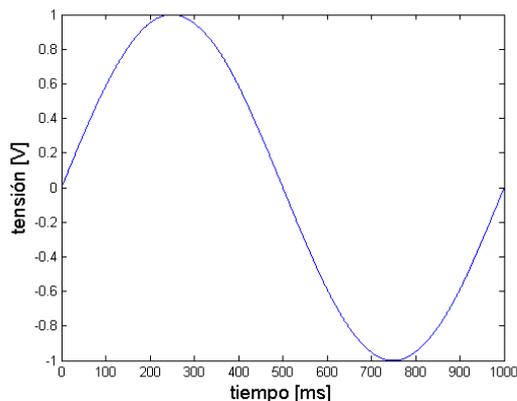


Figura 37. Onda sinusoidal con un número de muestras igual a 1000

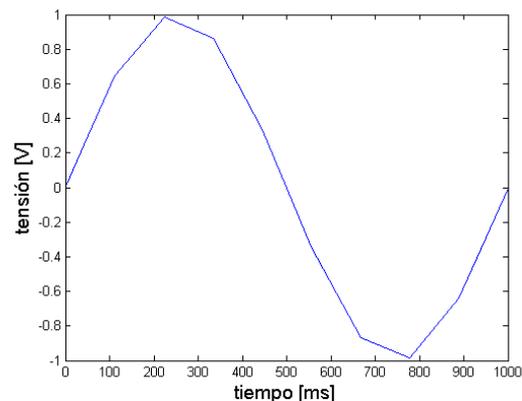


Figura 38. Onda sinusoidal con un número de muestras igual a 10

Como se puede comprobar en las figuras anteriores, con un número de muestras pequeño la señal está distorsionada mientras que con un número de muestras grande la señal obtenida es idéntica a la onda sinusoidal.

Esta variable también determina el tiempo de adquisición, que se calcula dividiendo el número de muestras por la frecuencia de muestreo:

$$t_{adquisición} = \frac{\text{número de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} \quad [s] \quad (34)$$



En la *Figura 39* y *Figura 40* se representan dos ejemplos de diferentes tiempos de adquisición. En ellas, se muestran varias calibraciones del número de muestras para un conjunto de 50 señales.

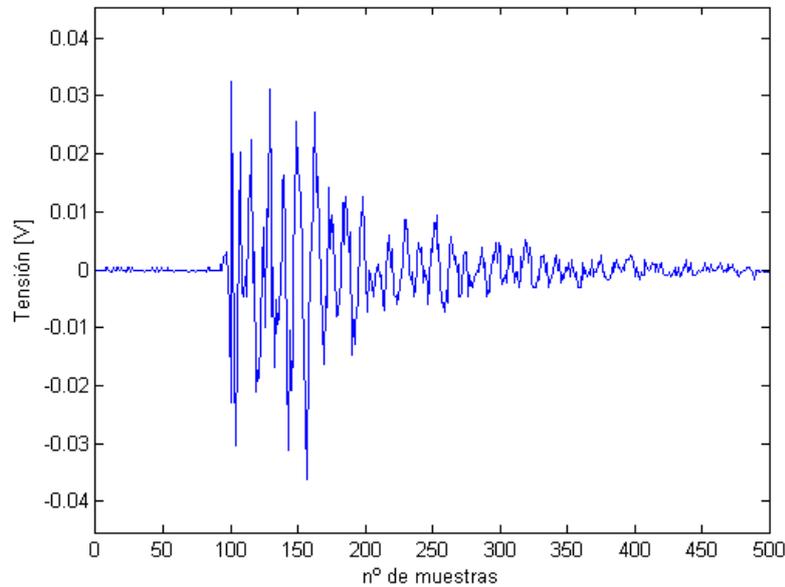


Figura 39. Calibración de la señal para un número de muestras igual a 500

La frecuencia de muestreo que se emplea en el proyecto es de $1GS/s$ y su valor permanece fijo en todo el trabajo. Para $1GS/s$ y 500 muestras se obtiene un tiempo de adquisición de $0,5 \mu s$.

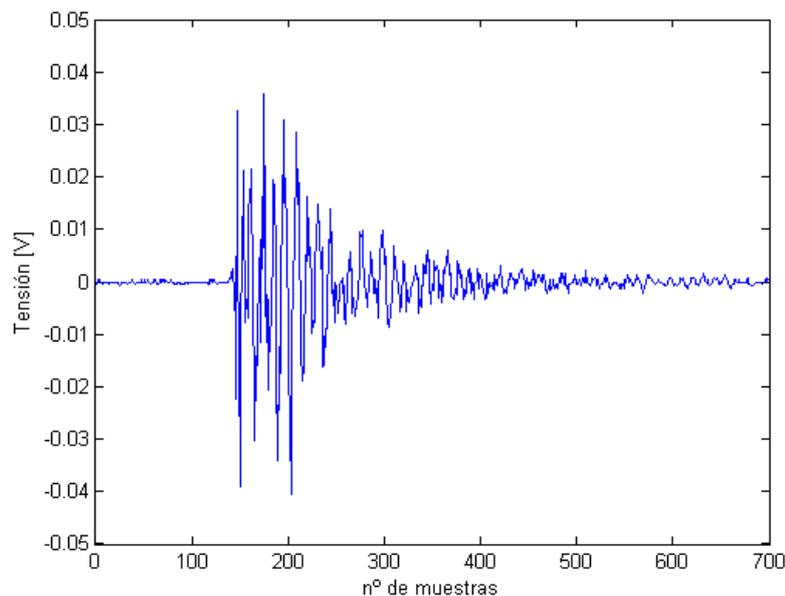


Figura 40. Calibración de la señal para un número de muestras igual a 700



Si se modifica el número de muestras a 700, para la misma frecuencia de muestreo, se obtiene un tiempo de adquisición de $0,7 \mu s$.

En el programa se ha establecido un tiempo de adquisición de $1 \mu s$ porque para ese valor se sabe que se recoge la señal entera. Conocido este valor y sabiendo que la frecuencia de muestreo es de $1GS/s$, el número de muestras que se debe utilizar es 1000.

Paso del servomotor

El paso del servomotor define el número de grados que gira el dispositivo cada vez que cambia de posición.

Para alcanzar la máxima exactitud posible, se ha fijado un paso de 10° . De esta manera, como la variación entre una posición y otra es pequeña, es más precisa la localización de la fuente de las DPs.

Además de estos tres parámetros, en el programa se configuran otras dos variables importantes que también definen la adquisición: rango y disparo. Estos parámetros no se configuran en la calibración inicial, se calculan en una recogida previa a la adquisición de interés y son distintos en cada ángulo.

Con estos parámetros, se pretende conseguir únicamente la señal propia a las DPs. Sin embargo, la relación señal-ruido es baja y no son señales fáciles de coger. Como se ha mencionado con anterioridad, las antenas son capaces de detectar estas señales pero también detectan otro tipo de ondas como FM, TV y WiFi, entre otras, con frecuencias comprendidas en el rango de frecuencias propio de las DPs.

Rango

El rango determina el valor de tensión máximo admisible en la recogida, es decir, aquellos valores superiores al mismo no formarán parte de la señal a analizar puesto que no serán recogidos. En nuestro proyecto, es muy importante adquirir la señal en su totalidad y por tanto, definir correctamente el valor de esta variable.

Con el fin de asegurarnos que todas nuestras señales presentan valores de tensión inferiores al rango, este se determina en la recogida previa a las adquisiciones, y se define como un 40% superior del pico máximo alcanzado entre todas las señales que componen dicha recogida. Puede ocurrir que en la adquisición alguna de las señales supere el rango establecido. En ese caso, habría que modificarlo aumentando su valor y se descartaría todo el proceso de recogida, ya que no estaríamos analizando todas las señales en su totalidad y el resultado se vería afectado. La interfaz gráfica proporcionada presenta una gráfica en la que se muestra a tiempo real las señales que se adquieren y en ella se define un eje vertical que tiene como límites el rango, lo que permite detectar si alguna de las ondas supera su valor, ya que aparecerían cortadas. De esta manera, podríamos interrumpir la adquisición nada más detectarlo y comenzar de nuevo el proceso con el



parámetro modificado. La interrupción se lleva a cabo a partir de uno de los botones que forman parte de la interfaz gráfica.

Disparo

El disparo determina el umbral de tensión a partir del cual se activa la recogida de señales. Esta variable no aparece en la interfaz gráfica y para modificarlo hay que acudir al archivo *.m* de Matlab, que contiene todas las instrucciones.

La idea es fijar un valor lo suficientemente alto como para que el sistema empiece a adquirir señales en el momento en el que se produce la descarga, reduciendo así la adquisición de ruido electromagnético, pero no tan elevado para que se puedan detectar señales en todas las posiciones.

En teoría, en cada región los niveles de tensión son diferentes y por ello, se decidió calcular un nivel de disparo para cada posición siguiendo el mismo criterio. El proceso seguido consistía en tomar cinco señales de muestra antes de iniciar la recogida y guardar en un vector el pico de tensión más alto de cada una de ellas. Después se comparaban y se establecía un nivel de disparo (definido como *Level* en el código de Matlab) igual a 0,6 veces el máximo valor registrado en el vector.

Sin embargo, en vista de los resultados, se descartó este criterio al no obtener señales coherentes y se fijó por ensayo y error un valor de 5 *mV*. Este valor está por encima del ruido del laboratorio, por lo que los valores de tensión superiores al mismo se consideran que forman parte de la señal de interés.

5.3. Análisis de las señales

En este apartado se explican los métodos empleados en el tratamiento de las señales y los conceptos teóricos en los que se basan

5.3.1. Cálculo de la energía

Uno de los criterios seguidos en la localización de las DPs consiste en el cálculo de la energía media de las señales recibidas por la antena. El propósito es determinar la posición de la fuente a partir de la comparación de la energía media resultante en cada una de las direcciones. La región en la que se registre el valor más alto será la correspondiente a la fuente.

Los datos de partida son valores de tensión y por tanto, para establecer la energía hay que convertir dichos valores en potencia. Aplicando los conceptos básicos de circuitos eléctricos sabemos que:

$$p(t) = \frac{1}{R} \cdot v(t)^2 \quad [W] \quad (35)$$

donde R es la resistencia y $v(t)$ es la tensión de la señal recogida.

Por simplicidad, se normaliza la potencia considerando un valor de $R = 1 \Omega$. De esta manera, la fórmula de la potencia asociada a la señal $v(t)$ queda:

$$p(t) = v(t)^2 \quad [W] \quad (36)$$

Conocida la potencia, se calcula la energía. La energía que se disipa en un intervalo de tiempo t se define como:

$$e(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_0^t v(t)^2 dt \quad [J] \quad (37)$$

El entorno de Matlab dispone de varias funciones que la calculan directamente. En nuestra aplicación, nos basaremos en el comando *trapz*.

Atendiendo a la Ecuación 37, la energía también se puede definir como el área bajo la curva de potencia. Es en esta definición en la que se basa el comando de Matlab. Para alcanzar una aproximación del área encerrada bajo la curva, divide la señal en elementos con una forma geométrica determinada y posteriormente, devuelve la suma del área de cada uno de los elementos. La instrucción *trapz* se trata de un método de integración numérica trapezoidal y calcula la energía sumando el área de todos los trapecios en los que queda dividido el área de la señal potencia.

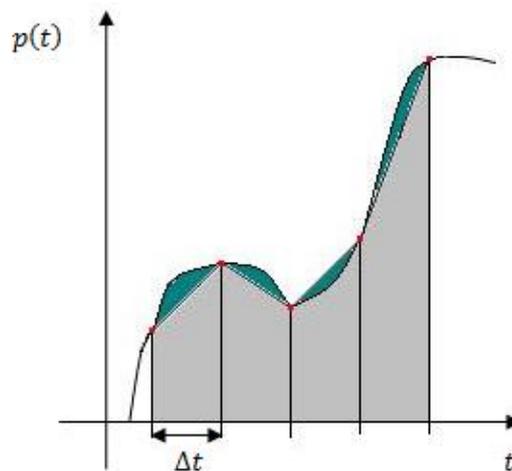


Figura 41. Método de integración numérica trapezoidal. Adaptado de [26]

5.3.1.1. Comprobación del cálculo de la energía

Antes de realizar los ensayos, se ha comprobado la validez de la instrucción *trapz* para el cálculo de la energía con el fin de asegurarnos que los resultados proporcionados son fiables.



Para la comprobación, se ha partido de una señal en la que somos capaces de calcular analíticamente su energía con el fin de compararla posteriormente con el valor devuelto por el programa. El método se considerará válido si ambos valores coinciden y en ese caso, será el utilizado para nuestro objetivo.

La señal definida es una señal sinusoidal de amplitud 1 V y un vector de tiempo comprendido entre 0 s y 1 s , en el que la distancia entre puntos es de $200\ \mu\text{s}$, es decir, es una señal compuesta por un número de muestras igual a 5000 , una frecuencia de muestreo de 5000 S/s y una frecuencia de 1 Hz .

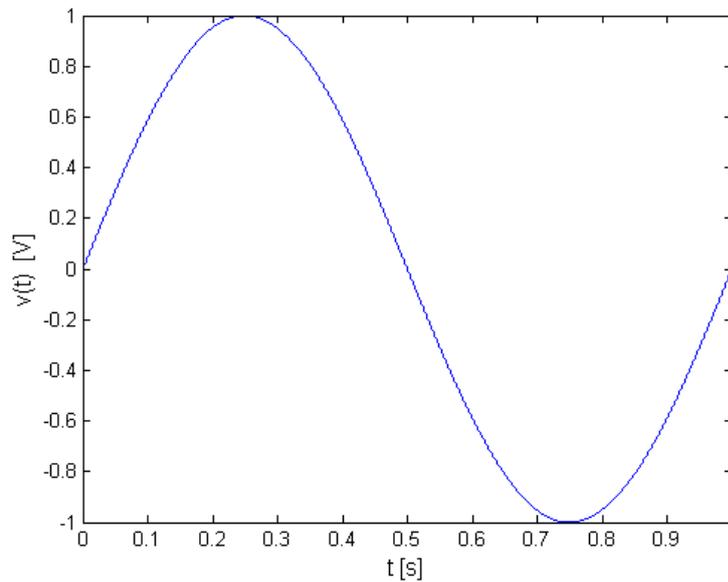


Figura 42. Onda sinusoidal de tensión de 1 V de amplitud

Conocida la señal, se calcula la potencia correspondiente con la *Ecuación 36*.

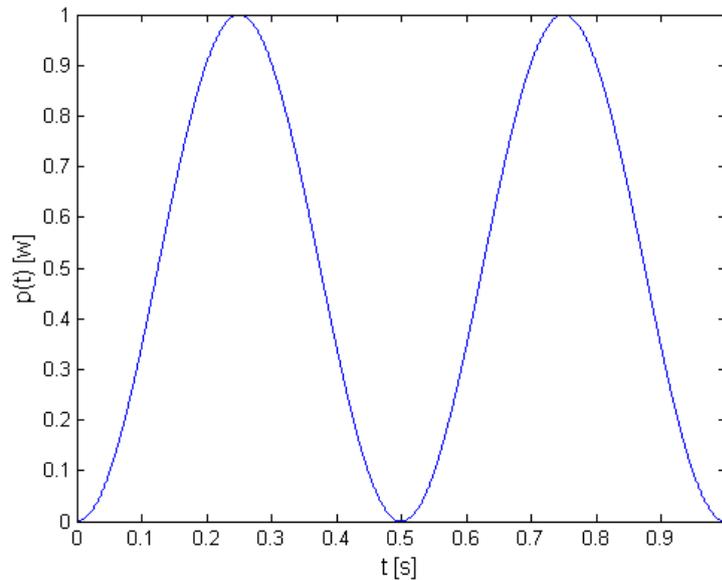


Figura 43. Señal potencia de una onda sinusoidal de 1V de amplitud

Observando la gráfica, se determina fácilmente el valor del área bajo la curva. Como se trata de una señal simétrica, el área por encima y por debajo de la curva coinciden, y por tanto, el área bajo la curva de la señal potencia equivale a la mitad del área del cuadrado de la gráfica, siendo así el valor de la energía igual a 0,5.

Determinado el resultado analítico, se calcula su valor aplicando la función *trapz* a la potencia:

$$\text{energía} = \text{trapz}(p(t) \cdot 0,0002) \quad [J] \quad (38)$$

donde 0,0002 es el incremento de tiempo mencionado anteriormente. En nuestro caso, el intervalo de tiempo que se aplica es el tiempo de muestreo, que se obtiene como la inversa de la frecuencia de muestreo (definida como *MinSampleRate* en el programa).

Mediante el código implementado en Matlab, se obtiene la solución deseada, por lo que se da por bueno este método para el cálculo de la energía.

```
% Código: Comprobación del cálculo de la energía

t=[0:0.0002:1]; % vector tiempo
a=sin(2*pi*t); % señal sinusoidal

figure(1)
plot(t,a)
xlabel('t [s]');
ylabel('v(t) [V]');
```



```

pot=a.^2;           %señal potencia
figure(2)
plot(t,pot)
xlabel('t [s]');
ylabel('p(t) [w]');

energia=trapz(pot*0.0002)

```

Resultado:

```
energia = 0.5000
```

5.3.1.2. Determinación de la fuente de DPs. Código en Matlab

Para alcanzar el objetivo de este proyecto se siguen los pasos descritos a continuación.

En primer lugar, tras realizar la calibración previa, se recogen en la primera posición tantas señales como se haya definido en la interfaz gráfica y se guardan en una matriz $M \times N$ denominada *senal*, donde M es el número de señales y N es el número de muestras.

matriz <i>senal</i>				
	muestra 1	muestra 2	muestra 3	etc.
señal 1				
señal 2				
señal 3				
etc.				

Figura 44. Matriz *senal* que incluye las señales recogidas en una posición

Posteriormente, se calcula la potencia de cada una de las señales. Para ello, se eleva al cuadrado cada señal tal y como se ha explicado anteriormente y se guarda en una nueva matriz llamada *senal_potencia*. Esta matriz tiene las mismas dimensiones que la matriz *senal* ($M \times N$).

matriz <i>senal_potencia</i>				
	muestra 1	muestra 2	muestra 3	etc.
señal potencia 1				
señal potencia 2				
señal potencia 3				
etc.				

Figura 45. Matriz *senal_potencia* de dimensiones $M \times N$ que incluye la señal de potencia de las ondas adquiridas en una posición

Calculadas las potencias de las señales, se procede al cálculo de la energía. El comando *trapz* realiza las operaciones por columnas por lo que para conseguir la energía de cada señal es imprescindible una matriz de dimensiones $N \times M$, es decir, ahora las filas representan el número de muestras (N) y las columnas el número de señales (M). Esta nueva matriz se consigue transponiendo la matriz *senal_potencia*, y en el código se le asigna el nombre de *potencia*.

matriz potencia				
	señal potencia 1	señal potencia 2	señal potencia 3	etc.
muestra 1				
muestra 2				
muestra 3				
etc.				

Figura 46. Matriz potencia de dimensiones $N \times M$. Matriz transpuesta de la matriz *senal_potencia*

Como resultado, el comando *trapz* devuelve un vector de dimensiones $1 \times M$ con las energías de cada una de las ondas adquiridas. Este vector se denomina *energia_cada_senal*.

energía señal 1	energía señal 2	energía señal 3	energía señal 4	etc.

Figura 47. Vector *energia_cada_senal* de dimensiones $1 \times M$

Conocidas todas las energías, se estima la energía media en esa dirección y se guarda en un vector llamado *vector_energia_media* de dimensiones $1 \times P$, siendo P el número de posiciones a analizar. Esta variable almacena la energía media de cada posición en la que se sitúa el servomotor.

energía media posición 1	energía media posición 2	energía media posición 3	energía media posición 4	etc.

Figura 48. Vector *vector_energia_media* de dimensiones $1 \times P$

En el cálculo de la energía media se recurre al concepto de *media*, que se define como el valor promedio de un conjunto de valores y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (39)$$

siendo n , el número de elementos de una muestra y x_i , el valor del elemento i .

En Matlab se calcula directamente con el comando *mean(X)*, donde X representa el vector que compone todos los elementos a tener en cuenta en el cálculo de la media.



Después de obtener la energía media en la primera posición, el servomotor se mueve a la siguiente posición, y así sucesivamente.

Finalmente, cuando finaliza todo el proceso se comparan todos los valores del *vector_energia_media* y se determina la región en la que se está produciendo el fenómeno de descarga parcial. En la interfaz gráfica se comunica al usuario el valor de energía media máximo alcanzado y el grado en el que tiene lugar, y se muestra una gráfica de la variación de la energía media en función del ángulo del servomotor.

5.3.2. Análisis estadístico

La técnica de la energía nos indica en qué región puede encontrarse la fuente de DPs pero no proporciona un resultado del todo fiable. Para que fuese fiable, la forma de onda debería ser similar en todas las adquisiciones, es decir, el perfil de onda debería ser el mismo en todas las posiciones, diferenciándose en la amplitud de las DPs, que iría aumentando conforme se fuese acercando la antena a la dirección de las mismas. Sin embargo, esto no sucede en la realidad.

Promediar la señal está bien si no hay dispersión en las señales pero para la misma posición se pueden obtener ondas diferentes. Por este motivo, se realiza un estudio adicional basado en un análisis estadístico de los picos máximos de tensión con el que se calcula la dispersión de la señal. A partir de este estudio, se determina en torno a qué valores se encuentra el pico máximo en cada grado del servomotor, es decir, se ve el rango de amplitudes que se ha recibido, lo que permite obtener información de cómo son las señales. El primer estudio no proporciona esta información por lo que este segundo análisis se empleará para corroborar que los resultados del primero sean correctos. Si existe mucha dispersión en los picos de tensión de una posición, los datos en dicha posición no son fiables y por tanto, no serán determinantes para la localización de la fuente de las DPs.

En la *Figura 49* se muestra un ejemplo de los resultados que proporciona el análisis de la energía media.

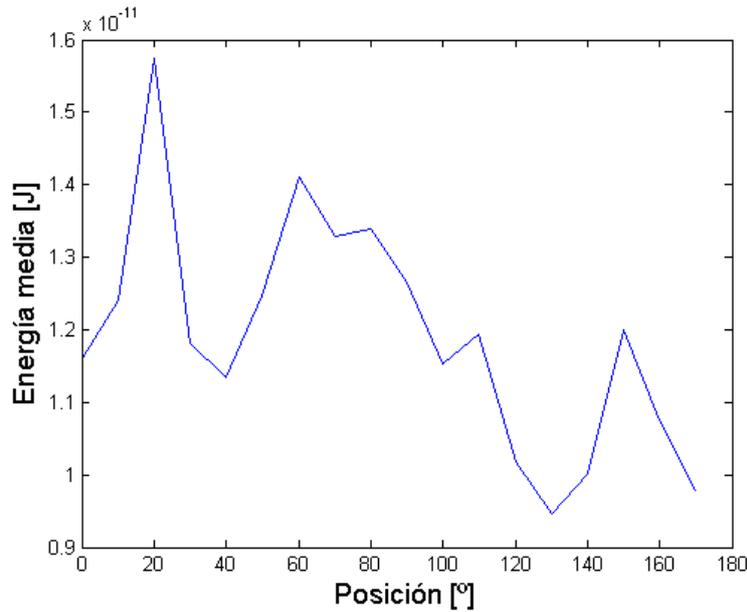


Figura 49. Ejemplo de los resultados proporcionados por el análisis de las señales atendiendo a la energía media en cada posición

5.3.2.1. Determinación de la fuente de DPs. Código en Matlab

En el programa se guardan las señales de todas las posiciones en una matriz de dimensiones $T \times N$ denominada *matriz_todas_senales*. El número de filas T representa el número total de señales y se calcula como el número de ondas adquiridas en una posición (M) por el número de posiciones en las que se sitúa el servomotor (P); y el número de columnas N representa el número de muestras que se ha definido para las señales. Esta matriz se utiliza como punto de partida para el análisis estadístico.

<i>matriz_todas_senales</i>					
		muestra 1	muestra 2	muestra 3	etc.
Posición 1	señal 1				
	señal 2				
	...				
	señal M				
Posición 2	señal 1				
	señal 2				
	...				
	señal M				
etc.					

Figura 50. Matriz_todas_senales de dimensiones $T \times N$

En primer lugar, se obtiene el pico máximo de cada señal y se almacena en un vector $1 \times T$ llamado *vector_picos_max* a partir del cual se construye otra matriz en la que se diferencian los picos máximos correspondientes a cada ángulo del servomotor. Esta matriz denominada *matriz_picos_max* tiene unas dimensiones de $P \times M$, es decir, tiene

tantas filas como número de posiciones recorre el dispositivo móvil y tantas columnas como número de señales se adquieren por posición.

pico máx. 1	pico máx. 2	pico máx. 3	pico máx. 4	etc.
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------

Figura 51. *Vector_picos_max* de dimensiones 1xT

<i>matriz_picos_max</i>				
	Señal 1	Señal 2	Señal 3	etc.
Posición 1				
Posición 2				
Posición 3				
etc.				

Picos máximos

Figura 52. *Matriz_picos_max* de dimensiones PxM

El pico máximo se consigue mediante el comando *max(vector)* de Matlab, donde *vector* es la variable en la que se quiere identificar el elemento con el valor más alto. En nuestro caso, se aplica esta instrucción a cada fila de la matriz *matriz_todas_senales*.

A continuación, se calcula el pico máximo medio y la desviación típica correspondiente a cada ángulo, y se determina a partir de ellos los límites superior e inferior que definen el rango en el que se encuentra el pico máximo de tensión en cada posición.

La media se calcula aplicando la ecuación descrita anteriormente a cada una de las filas de la matriz *matriz_picos_max*. En cuanto a la desviación, se explica a continuación la fórmula empleada.

La desviación típica, σ , es la raíz cuadrada de la varianza, es decir, es la raíz cuadrada de la media de las diferencias elevadas al cuadrado de los elementos de una muestra con la media calculada a partir de la *Ecuación 39*. Existen dos ecuaciones que permiten obtener el valor de esta variable. La diferencia entre ellas es que una proporciona la desviación típica y otra la desviación típica corregida:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (40)$$

$$\sigma_{\text{corregida}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (41)$$

En Matlab se utiliza el comando *std* y según los parámetros de entrada que se le indiquen aplica una ecuación u otra. Para la desviación correspondiente a la *Ecuación 40* se implementa el comando *std(X)* o *std(X, flag)* igualando la segunda variable a 1; mientras que para la *Ecuación 41* se escribe la instrucción *std(X, flag)* igualando a cero la variable *flag*.

En este proyecto se recurre a la desviación típica corregida. La *Figura 53* muestra un ejemplo de los resultados que proporciona este segundo análisis.

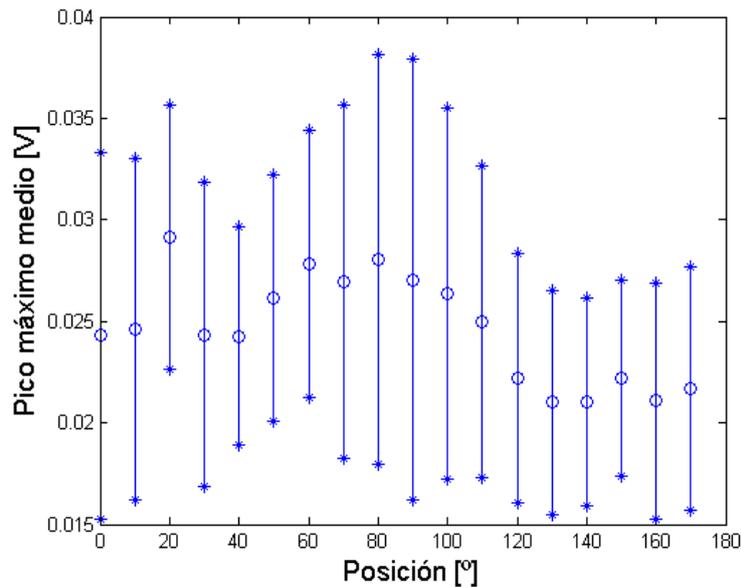


Figura 53. Ejemplo de los resultados proporcionados por el análisis de los picos máximos de tensión de las señales

A medida que el servomotor se mueve, el programa va representando los resultados de este análisis. Así, el usuario puede ver la evolución del estudio y detener el proceso en caso de no ser coherente.

5.3.3. Análisis definitivo

El programa final incluye los dos estudios anteriores con el fin de tener mayor información acerca de las DPs y la interfaz gráfica muestra los resultados de ambos. De esta manera se puede comprobar si la solución alcanzada con el primer método es correcta o se ha visto afectada por otros fenómenos presentes en el laboratorio.



Capítulo VI

6. Resultados experimentales

En este apartado se describen los ensayos llevados a cabo en el laboratorio. Dichos ensayos constituyen la parte más importante de este proyecto debido a que sus resultados confirmarán la validez de la antena.

En teoría, la gráfica de energía que debemos obtener debe tener un máximo en la región correspondiente a la fuente de DPs y dos mínimos en los ángulos extremos del servomotor (0° y 180°). Si en la práctica se alcanzan estos resultados, significará que la antena construida es adecuada en cuanto a directividad se refiere, ya que a medida que se aproxima al fenómeno, la energía aumenta hasta alcanzar el valor máximo en la fuente. Además de estos resultados, el estudio de los picos máximos de tensión debe presentar poca dispersión para poder considerar que el resultado del análisis de la energía es fiable. Asimismo, en este último análisis se debería alcanzar el mismo perfil de resultados que en el primero en cuanto al valor del pico máximo medio se refiere: un máximo en la fuente y dos mínimos en los extremos del dispositivo móvil.

Según la posición en la que fue colocada la antena, ambos estudios deberían indicar que la región en la que se alcanzan los máximos valores es la de 30° , ya que es el lugar en el que la antena apunta directamente al objeto de ensayo.

6.1. Primer ensayo. Antena 1: antena parabólica

Dado que el objetivo principal es localizar la fuente de descargas parciales mediante una antena de alta directividad, se buscó una antena con esta característica y se optó por una antena parabólica.

Las antenas parabólicas son dispositivos que proporcionan una alta ganancia y directividad. Se componen principalmente de dos elementos: un reflector parabólico y un elemento activo llamado mecanismo de alimentación. El mecanismo de alimentación constituye la antena principal, ya que irradia las ondas electromagnéticas hacia el

reflector, y suele ser un dipolo. En cuanto al reflector, irradia las ondas electromagnéticas recibidas por la antena a un punto focal, y su geometría es similar a la de un plato. Por este motivo, este tipo de antenas también reciben el nombre de antenas parabólicas de plato o antenas de plato [27] y [28].

Su elevada ganancia se debe a que concentra toda la potencia que le llega y la enfoca en una sola dirección.

En la *Figura 54* se muestra la direccionalidad que presenta.

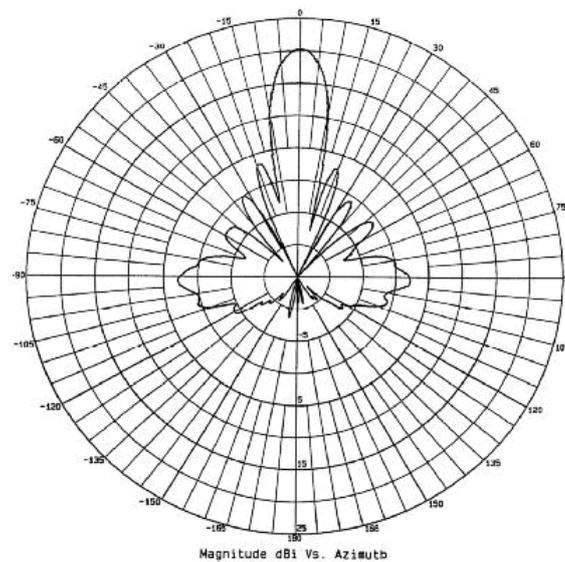


Figura 54. Patrón de elevación de plato parabólico [24]

En el ensayo real se empleó un cuenco cuya geometría se asemejaba a una parábola y como mecanismo de alimentación se colocó un monopolo de 10 cm.

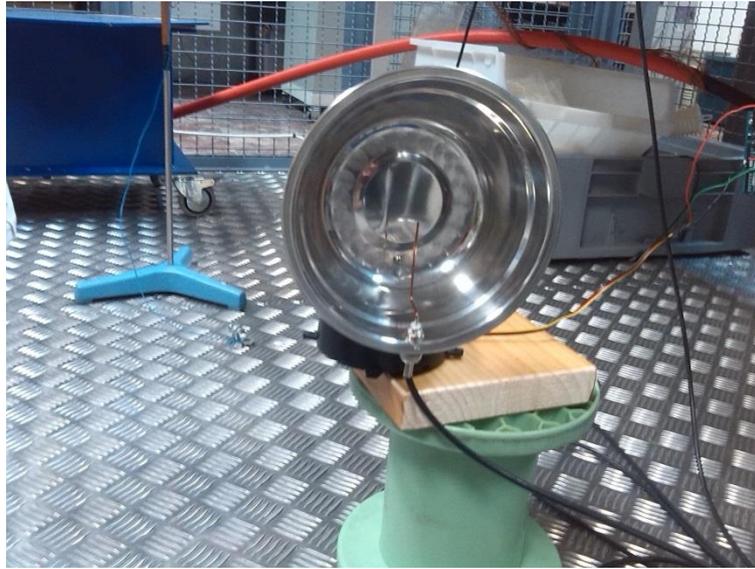


Figura 55. Antena 1: antena parabólica

Puesto que las DPs se tratan de un fenómeno estocástico, es preciso realizar diversas recogidas para poder extraer conclusiones. En nuestro caso, se repitió el proceso de adquisición tres veces con cada antena.

Aplicando una tensión de 10500 V, los resultados de las adquisiciones fueron los siguientes:

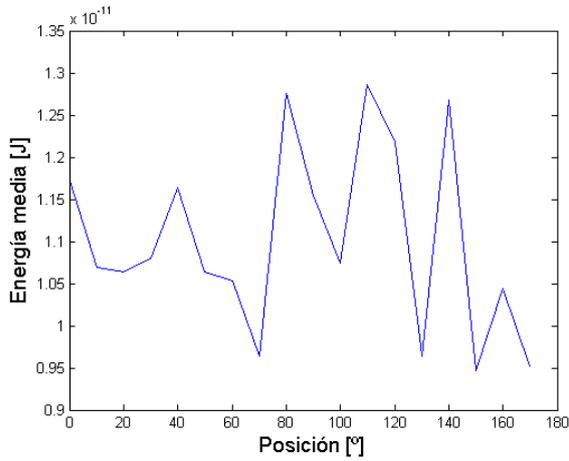


Figura 56. Recogida 1. Energía media obtenida con la antena parabólica

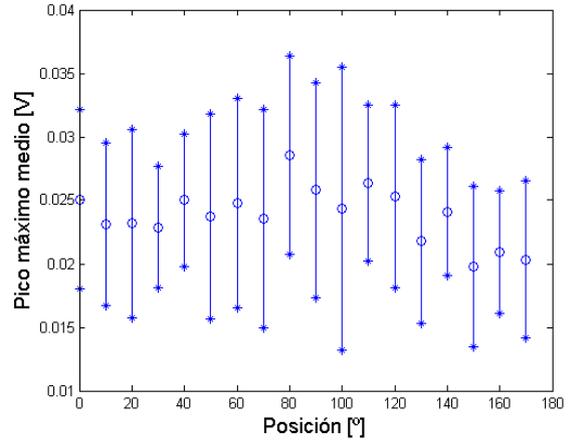


Figura 57. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica

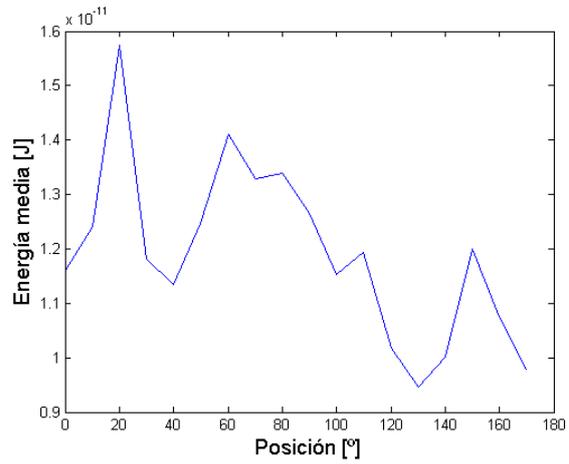


Figura 58. Recogida 2. Energía media obtenida con la antena parabólica

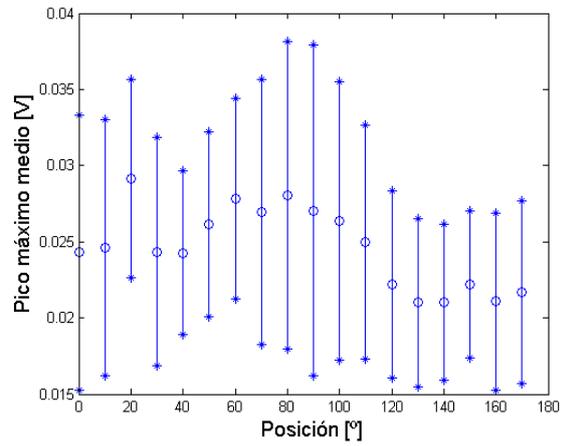


Figura 59. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica

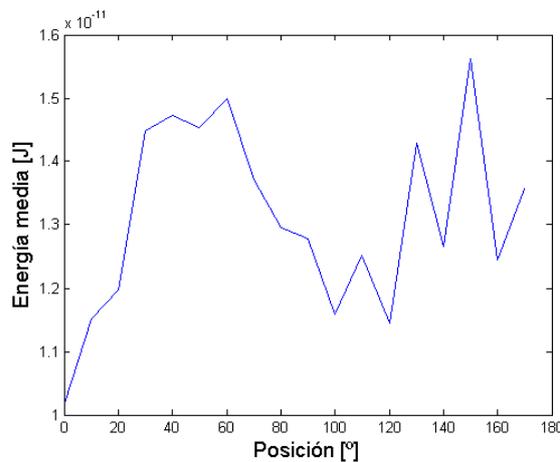


Figura 60. Recogida 3. Energía media obtenida con la antena parabólica

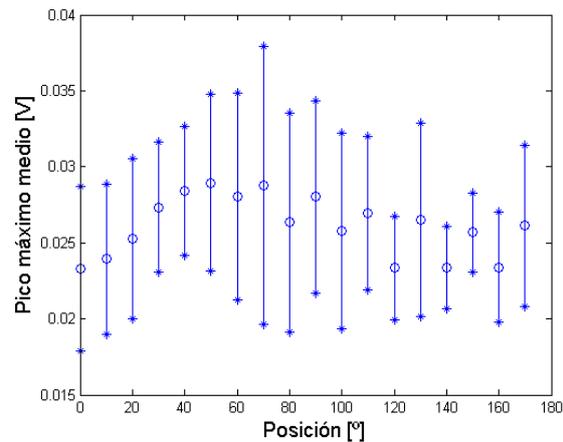


Figura 61. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena parabólica

Analizando las gráficas correspondientes a *Figura 56-Figura 61*, se puede ver que todas presentan el mismo comportamiento: la tendencia de la energía media es muy irregular. Además las adquisiciones son muy inestables, ya que en cada una, las gráficas que se obtienen son completamente diferentes.

La inestabilidad se aprecia muy bien en los valores de energía media de cada posición, ya que existen posiciones en las que la energía media presenta una tendencia diferente. Un ejemplo muy claro es el que aparece en el rango de 0° a 20° : en la primera recogida la energía media tiende a bajar mientras que en las dos siguientes, aumenta, hecho que no debería ocurrir, ya que en teoría las señales que se recogen en cada momento deberían ser las mismas.

Por otro lado, queda demostrado que el cálculo de la energía media no es suficiente para determinar la posición. En líneas generales, la forma de las gráficas de energía y picos máximos es muy parecida. Sin embargo, si se analiza en detalle el resultado que proporciona cada una, la localización de las descargas no siempre coincide. En la *Tabla 3* se muestra la posición que determina el programa para cada recogida según el análisis que se realice.

Tabla 3. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Antena parabólica

	Energía media	Análisis estadístico
Recogida 1	110°	80°
Recogida 2	20°	20°
Recogida 3	150°	50°

El elevado contraste de resultados se debe a que existe algún fenómeno en el laboratorio que eleva o disminuye la energía media en algunas posiciones y la varía lo suficiente



como para que el resultado no sea el adecuado. El encendido de las luminarias en los alrededores del laboratorio podría ser una de las causas que provocasen estos cambios en la energía.

En la tabla, no sólo se aprecia la diferencia de resultados entre los dos métodos, sino que también se observa una gran desviación en los resultados de cada recogida por lo que la localización no es determinante.

Para establecer la posición de la fuente, no hay que fijarse únicamente en los valores máximos de los dos análisis. La *Tabla 3* era un ejemplo para visualizar la diferencia de resultados, pero para ser objetivos hay que hacer un estudio más detallado en el que se comparen las posibles soluciones del primer estudio atendiendo a las desviaciones de las señales que proporciona el segundo análisis.

En primer lugar, si nos fijamos en las gráficas de la primera recogida (*Figura 56* y *Figura 57*) existen tres posibles posiciones para la fuente de las DPs: 80° , 110° y 140° . Sin embargo, atendiendo a las desviaciones de los picos máximos de tensión, las dos primeras presentan desviaciones muy grandes por lo que se descartarían como posibles soluciones. En ese caso, nos quedaría el ángulo de 140° como solución pero como se ha mencionado antes, el objeto de ensayo no se encuentra en esa región, lo que quiere decir que se están alcanzando valores grandes de energía que no pertenecen a la emisión directa de las descargas. Una de las posibles explicaciones es que se podrían estar recibiendo rebotes en esa región.

Atendiendo a la segunda recogida, los valores máximos se alcanzan en 20° . Sin embargo, la desviación de los picos máximos en esa posición es elevada, por lo que no se puede concluir que el resultado sea determinante. Además, si observamos la *Figura 59*, por lo general, las desviaciones son muy grandes en todas las posiciones y por tanto, los resultados no son muy fiables.

En cuanto a la tercera recogida (*Figura 60* y *Figura 61*), el perfil de las gráficas vuelve a ser completamente diferente a las anteriores. En esta ocasión, la energía media máxima se alcanza en 150° , y la desviación de la señal en ese punto es muy pequeña por lo que podría darse por válido el resultado. Sin embargo, este no coincide con los 30° , y otra vez se podría estar recogiendo una señal diferente a la emisión directa de las DPs. Según el pico máximo, la fuente se encuentra en 50° , pero sus desviaciones son grandes y el objeto de ensayo no se encuentra en esa región, por lo que también se descarta el resultado de este análisis.

La conclusión que se puede extraer es que la antena no proporciona la efectividad y directividad esperada.

6.2. Segundo ensayo. Antena 2: plato metálico circular

Suponiendo que el problema se encontraba en la antena construida, en este segundo ensayo, se optó por otro modelo de antena, disponible en el laboratorio.

Se empleó una antena similar a la utilizada en una investigación realizada con anterioridad en la Universidad, que se basaba en la integración de una tarjeta NI PCI-5152 con una tarjeta ARDUINO MEGA 2560 a través de LabVIEW con el fin de diseñar un sistema de adquisición y localización de fuentes de descargas parciales mediante una antena móvil. En este estudio se usó un monopolo de 5 cm acoplado a un plato metálico circular conectado a tierra.

En nuestro proyecto, se sustituyó la antena parabólica del ensayo anterior por el plato metálico circular, manteniendo el monopolo de 10 cm, y se tomaron de nuevo las medidas.

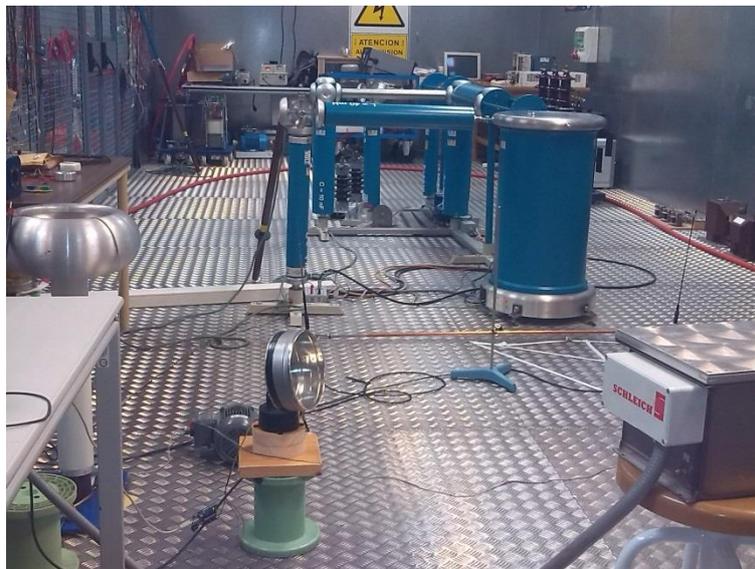


Figura 62. Plato metálico circular

Las condiciones de todos los ensayos fueron las mismas, por lo que se aplicó la misma tensión de 10500 V.

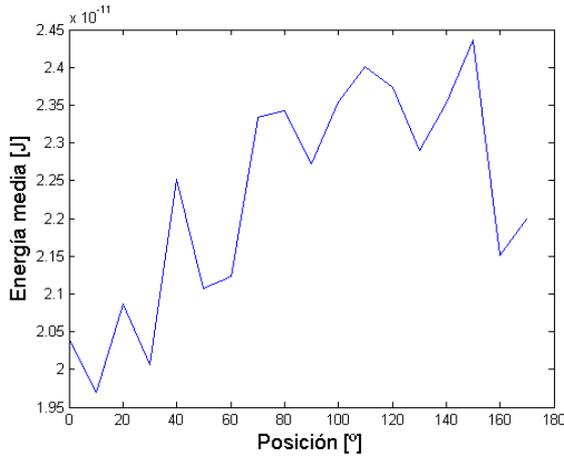


Figura 63. Recogida 1. Energía media obtenida con el plato metálico circular

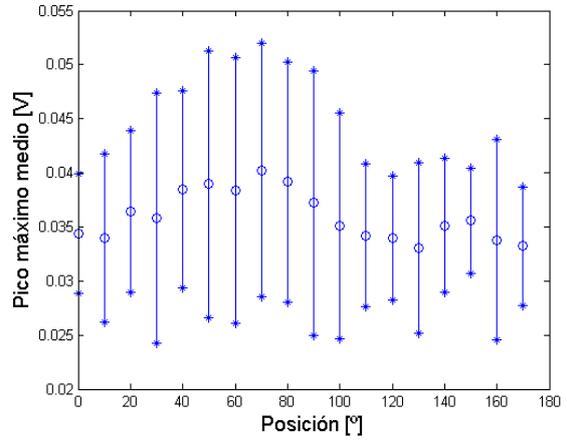


Figura 64. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular

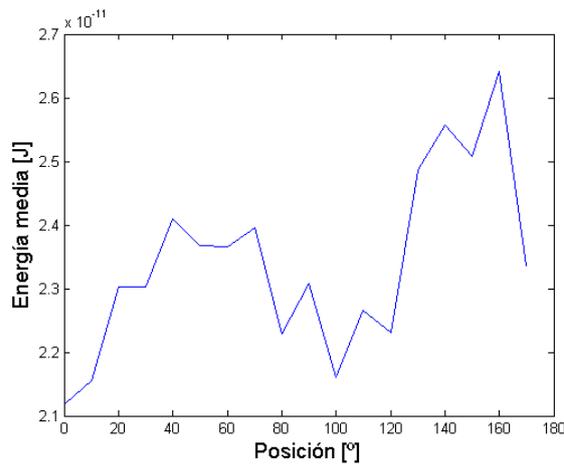


Figura 65. Recogida 2. Energía media obtenida con el plato metálico circular

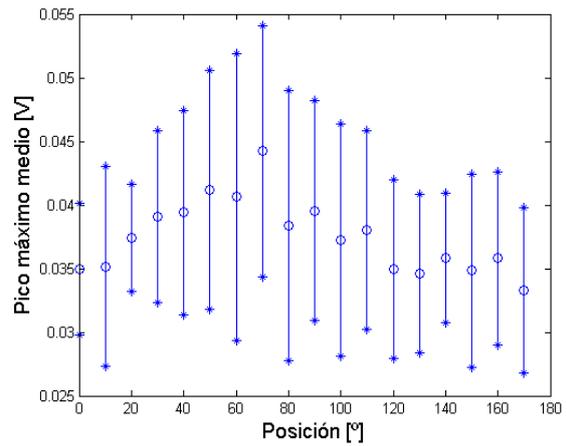


Figura 66. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular

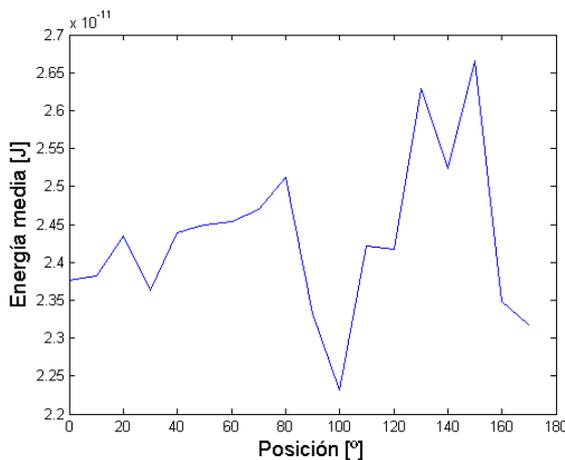


Figura 67. Recogida 3. Energía media obtenida con el plato metálico circular

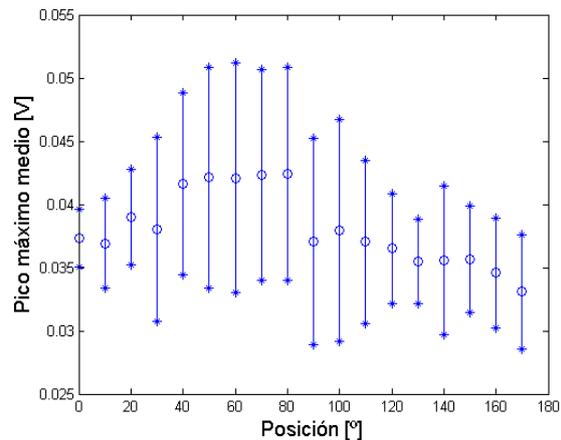


Figura 68. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con el plato metálico circular

Interpretando los resultados, se observa que en esta ocasión también se obtuvo una tendencia inestable.

A simple vista, las posiciones de la fuente determinadas en cada recogida según el tipo de análisis son los mostrados en la siguiente tabla. Sin embargo, como se ha mencionado con anterioridad, es preciso realizar un estudio más detallado de los resultados.

Tabla 4. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Plato metálico circular

	Energía media	Análisis estadístico
Recogida 1	150°	70°
Recogida 2	160°	70°
Recogida 3	150°	80°

En primer lugar, analizaremos con detalle los posibles resultados según la energía media y su validez teniendo en cuenta las desviaciones de los picos máximos de tensión. En la primera recogida (Figura 63 y Figura 64) se alcanza el valor máximo de energía media en 150°, posición en la que la dispersión de los picos máximos no es muy grande, por lo que se podría dar por válido el resultado. Sin embargo, se descarta esta solución ya que no coincide con la posición correcta de la fuente de DPs. En la segunda recogida (Figura 65 y Figura 66), el valor más alto de energía se obtiene en 160°. En ese punto la desviación es muy grande, por lo que los datos no son fiables y se descarta esa solución. Fijándonos en el siguiente valor más elevado, que es 140°, la dispersión es más pequeña, pero este ángulo no coincide con la solución correcta. Finalmente, la tercera adquisición (Figura 67 y Figura 68) proporciona un ángulo de 150°. En ella, ocurre la misma situación que en la primera recogida: se descarta ya que a pesar de que la dispersión de los picos máximos es pequeña, no coincide el resultado con el real.

Atendiendo al análisis de los picos máximos (*Figura 64, Figura 66 y Figura 68*), los máximos valores alcanzados para cada adquisición son 70° , 70° y 80° . Estos resultados se descartan por dos motivos: sus desviaciones son demasiado grandes y el resultado no coincide con los 30° .

La discrepancia de resultados respecto al real puede deberse, al igual que en el ensayo anterior, a la efectividad de la antena en cuanto a directividad se refiere.

6.3. Tercer ensayo. Antena 3: antena Vivaldi

Para el tercer ensayo se colocó una antena Vivaldi, caracterizada también por su alta directividad.

En el laboratorio se utilizó una antena de dimensiones $9 \times 12 \text{ cm}$ y un espesor de $0,15 \text{ cm}$. Dicha antena está definida para una frecuencia de operación de 2 GHz y adaptada para un rango de frecuencias de 750 MHz a 3 GHz .

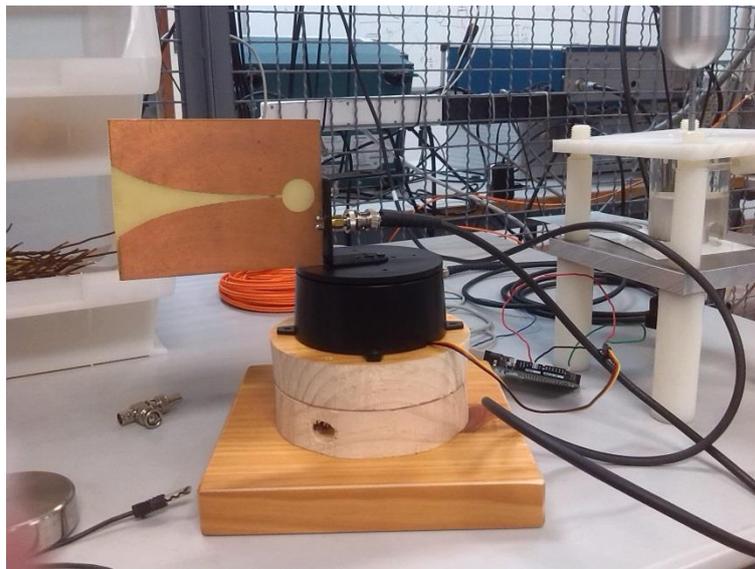


Figura 69. Antena 3: antena Vivaldi

Los resultados para una tensión de 10500 V fueron los siguientes:

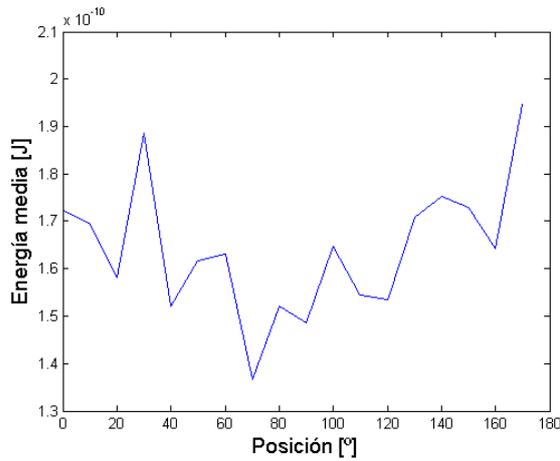


Figura 70. Recogida 1. Energía media obtenida con la antena Vivaldi

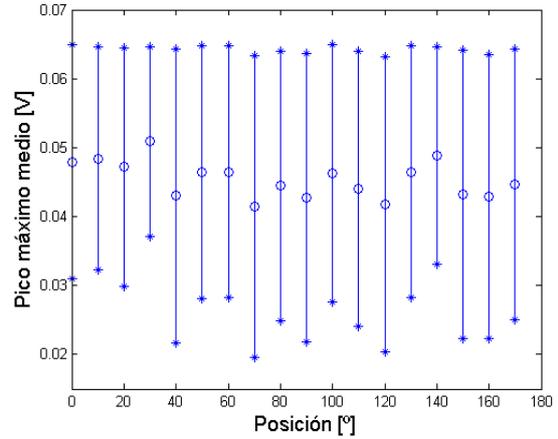


Figura 71. Recogida 1. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi

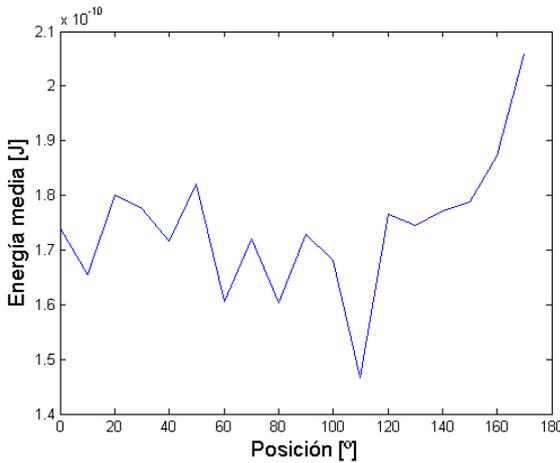


Figura 72. Recogida 2. Energía media obtenida con la antena Vivaldi

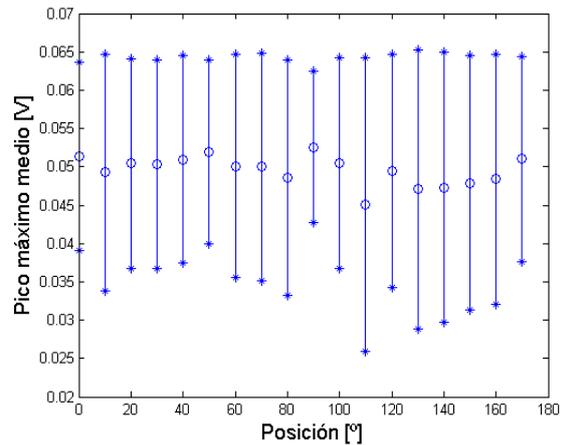


Figura 73. Recogida 2. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi

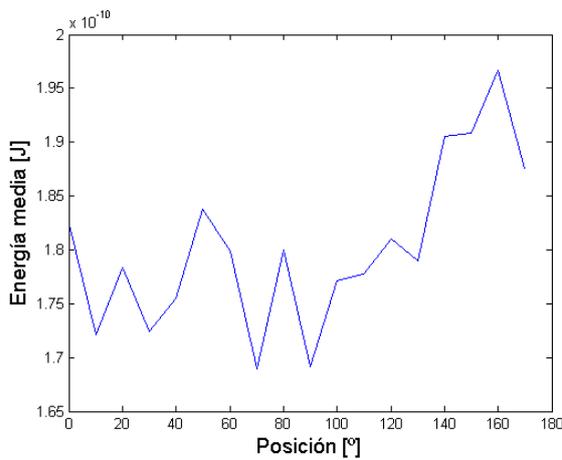


Figura 74. Recogida 3. Energía media obtenida con la antena Vivaldi

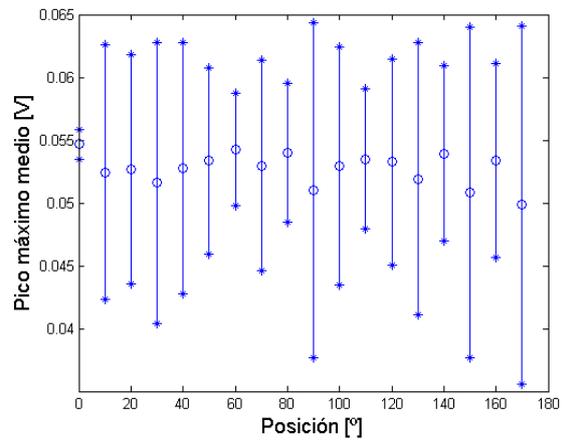


Figura 75. Recogida 3. Análisis de los picos máximos obtenidos con la antena Vivaldi

En esta antena se observa el mismo comportamiento que en los modelos anteriores: la tendencia de las adquisiciones es inestable, las gráficas no se corresponden con las deseadas y la posición resultante no es la correcta.

En la siguiente tabla se muestra la posición de la fuente determinada en cada adquisición según el tipo de análisis.

Tabla 5. Localización de las descargas parciales en función de la recogida y el análisis. Antena Vivaldi

	Energía media	Análisis estadístico
Recogida 1	170°	30°
Recogida 2	170°	90°
Recogida 3	160°	60°

A continuación, se detalla en profundidad la validez de estos resultados.

Basándonos en la *Figura 70* y *Figura 71*, se determina que la energía media máxima se alcanza en 170°. En esta posición, la dispersión de los picos máximos es muy grande, motivo por el cual se descarta la validez del resultado. El siguiente punto más alto se obtiene en 30°. En esta ocasión, coincide con la posición real de la fuente y es el punto que ofrece menor dispersión, pero como la desviación no es lo suficientemente pequeña no se puede dar por concluida la validez de la antena. Además, para poder concluir que la antena permite alcanzar el objetivo de este proyecto, en el resto de adquisiciones se deberían obtener resultados igual de buenos.

La segunda adquisición indica que el objeto de ensayo se encuentra en 170°, pero su desviación de picos máximos no es lo suficientemente pequeña por lo que se rechaza esta solución y se mira el siguiente valor más alto. Hay dos posibles soluciones (50° y 20°),



sin embargo sus desviaciones siguen siendo demasiado altas. El punto que ofrece menor dispersión es el de 90° , por lo que sería el dato más fiable de todos ellos. En el análisis de picos máximos es el que alcanza el valor más alto pero no representa la solución correcta.

Finalmente, la tercera adquisición (*Figura 74 y Figura 75*) no ofrece tampoco resultados concluyentes. Según el análisis de la energía, la fuente se encuentra en 170° , valor que se descarta por su elevada dispersión; y el siguiente a este es 50° , que presenta el mismo comportamiento. La posición con menor desviación y con mayor valor en el pico máximo medio de tensión es la de 60° , pero una vez más, no coincide con la deseada.

Como se puede ver, el comportamiento que presentan los resultados no es coherente. Por ello, se rechaza la validez de los mismos. Al igual que en los ensayos anteriores, puede deberse a la antena empleada.

6.4. Cuarto ensayo. Comprobación de rebotes en el medio

En vista de los resultados obtenidos en los tres ensayos anteriores, se realizó un nuevo estudio. En esta ocasión, en vez de modificar la antena, se estudió qué fenómeno podría estar modificando negativamente la señal de las DPs recibida por el sensor.

La receptividad en la banda de UHF depende de las estructuras metálicas que se encuentran alrededor de las antenas, lo que supone un problema muy importante. El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad dispone de numerosos elementos metálicos, y esto afecta negativamente, ya que la antena podría estar recibiendo una gran cantidad de rebotes de las señales. En un ángulo en el que no se apunta a la descarga, si la antena recibe este fenómeno por rebotes, se aumentarían los valores de los picos máximos y energía media en esa posición.

Para comprobar la existencia de rebotes, se colocó en una posición fija un monopolo de 10 cm con buena receptividad en el rango de frecuencias que emiten las DPs ($0,3 - 3\text{ GHz}$).



Figura 76. Antena monopolo fija de 10 cm

En este ensayo se empleó el mismo montaje que en los ensayos anteriores con la excepción de la disposición de las antenas: la antena móvil se colocó de tal manera que la posición central del servomotor apuntase a la fuente, y la antena fija se situó en el lateral opuesto a la antena móvil, tal y como se muestra en la *Figura 77*. La antena móvil con la que se llevó a cabo el estudio fue la antena constituida por el plato metálico circular.

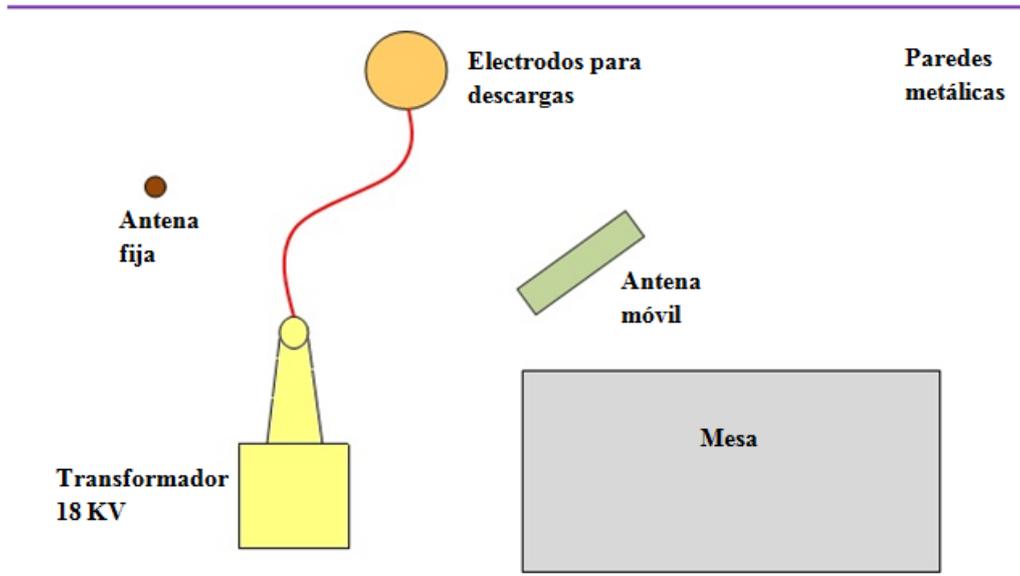


Figura 77. Disposición de las antenas en la comprobación de la existencia de rebotes

El estudio consistía en medir los TOAs de las dos antenas para cada posición del servomotor y calcular el desfase entre ellos (TDOA), es decir, la diferencia de tiempos de llegada de las DPs entre los dos dispositivos:

$$t_{ij} = t_i - t_j \quad [m] \quad (42)$$

Puesto que una de las antenas es fija, sus TOAs se mantienen constantes. Lo que varían son los TOAs de la móvil, y por tanto los TDOAs. Suponiendo que la antena móvil es direccional, en las posiciones próximas a la fuente el tiempo de recepción de la misma será menor alcanzando así el menor valor en la fuente.

Como el TOA de la antena fija es constante, en todas las TDOAs se suma o resta ese valor, y por tanto, una manera sencilla de identificar cuál es la posición de las DPs es mirando en qué punto el TOA de la antena móvil es menor. Esto equivale a mirar en qué punto se alcanza el TDOA menor.

En función de qué antena represente el término t_i y t_j , el desfase de tiempos será positivo o negativo. En cualquier caso, para identificar la localización de la fuente nos fijaremos en el valor absoluto.

Basándonos en estos conceptos, como la finalidad es determinar la existencia de rebotes, se compararán los TDOAs de la posición en la que la antena móvil apunta a la fuente con los del resto de posiciones. En concreto, nos interesan los resultados en la posición en la que el dispositivo móvil apunta directamente a la rejilla metálica del laboratorio (180°). En ese momento, como se estaría produciendo un rebote, la descarga recibida por la antena móvil llegaría un tiempo posterior que la emisión directa en la región de la fuente, lo que

se traduce en que en 180° el TDOA debería ser mayor al recibir la señal un tiempo más tarde.

En el laboratorio se recogieron un total de 50 señales por posición y se calculó la moda de todos los TDOAs. El motivo por el cual se evaluó la moda es que el cálculo de TDOAs es complicado de automatizar en señales con interferencias y la mejor manera de analizarlo es con el dato que más se repite. Las antenas fueron conectadas al osciloscopio *Tektronix DPO7254* y las señales fueron guardadas para su posterior análisis. Se muestreó a una frecuencia de 5 GS/s y la ventana de adquisición fue de $1\ \mu\text{s}$.

Estas medidas se han hecho en el marco de una tesis doctoral que se está realizando en la Universidad y se utilizan como complemento a este proyecto para comprobar la existencia de rebotes en el laboratorio con el fin de determinar si los resultados que se habían obtenido en los ensayos anteriores deben su incoherencia a la presencia de estos.

Los resultados alcanzados en este estudio se presentan en la *Figura 78*.

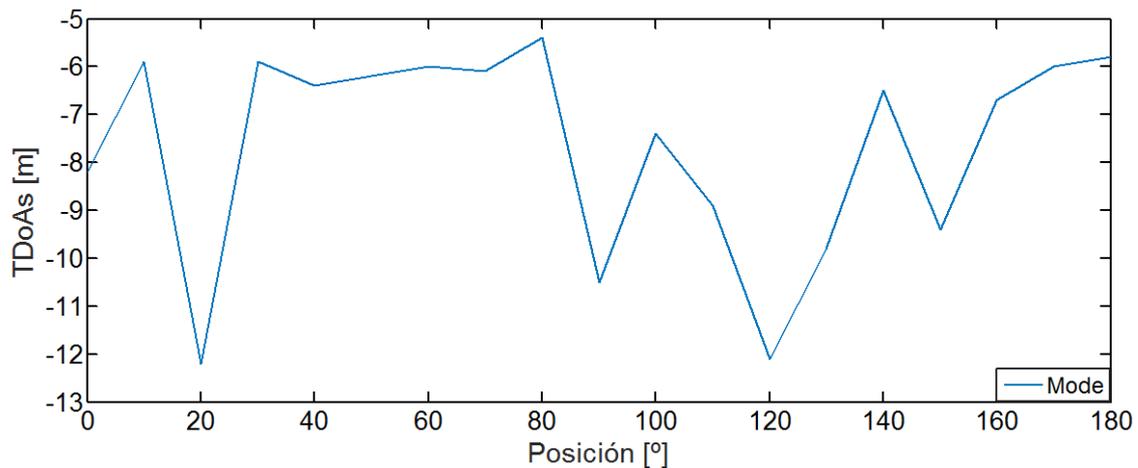


Figura 78 TDOAs obtenidos con un monopolo de 10 cm y una antena móvil

Según lo explicado anteriormente, en 180° , la señal que recoge la antena móvil es un rebote de las DPs, por lo que el TDOA correspondiente a esa posición debe ser mayor que en la dirección de la fuente (90°), en donde se adquiere la señal de las DPs directamente.

Sin embargo, si nos fijamos en la gráfica, en dicho ángulo no se aprecia el comportamiento esperado: el TDOA en 180° no es mayor. Esto significa que la antena no es lo suficientemente directiva como se pretendía, y por tanto, no sólo captura las señales de la dirección a la que apunta sino que también recibe el resto de señales. Traducido a este último ensayo, en 180° , además de adquirir el rebote, recibe la emisión directa de las DPs, motivo por el cual el TDOA es menor respecto al valor que se debería obtener.



6.5. Mediciones necesarias

Todos los resultados que se han expuesto a lo largo de este capítulo no constituyen todas las mediciones realizadas en el laboratorio. En esta memoria sólo se han mostrado los datos finales alcanzados en cada uno de los ensayos debido a la gran cantidad de pruebas que fueron necesarias en cada uno de ellos.

Esta investigación ha necesitado más de 92 *horas* en el laboratorio y 340 *horas* aproximadamente de trabajo personal, implementando, comprobando y mejorando el código; y se han analizado más de 114 puntos (esta cifra representa sólo los resultados mostrados en este trabajo).

La realización de cada prueba en el laboratorio lleva asociada una gran cantidad de pasos que hay que seguir en todas ellas, y por ese motivo, se ha precisado acudir durante tanto tiempo al lugar de ensayo. A continuación, se describen estos pasos.

En primer lugar, hay que colocar la antena sobre la estructura móvil gobernada por el servomotor y situarla en una posición que permita detectar las DPs fácilmente. Hay que tener en cuenta que el movimiento del servo está limitado en 180° por lo que el dispositivo de recepción debe apuntar a la fuente de DPs dentro de ese rango de valores.

Una vez colocada la antena en la zona de alta tensión, ya que es ahí donde se van a generar las DPs, se establece la conexión entre la misma y el ordenador mediante un cable coaxial.

A continuación, antes de aplicar tensión para conseguir la emisión de las DPs, es imprescindible salir del área de tensión y permanecer al otro lado del aula, donde se encuentra el PC y la fuente de alta tensión, habiendo cerrado antes la puerta que separa ambas zonas. Estando en el recinto de seguridad, se procede a aumentar el voltaje con la fuente de alta tensión hasta que aparece actividad de DPs. En ese momento, se espera unos instantes hasta que se estabilizan las descargas y posteriormente, se comienza con la calibración y la recogida de las señales.

En caso de obtener incoherencias en los resultados, se detiene la recogida y se vuelve a realizar una nueva para comprobar si todas las adquisiciones son inestables o si ha habido un problema en esa adquisición. En un principio, dejábamos que terminase la recogida en todas las posiciones antes de iniciar un nuevo estudio, pero a medida que fue avanzando el desarrollo del proyecto, como ya sabíamos que existía algún problema, se detenía el servomotor en cuanto se veía que los resultados no eran los esperados. De esta manera, podíamos detectar con mayor rapidez cuál era el problema.

Puesto que las señales eran inestables y había desviaciones muy grandes en ellas, se plantearon los posibles fallos con sus respectivas soluciones. Para cada solución, se realizaron como mínimo tres adquisiciones para comprobar los resultados.



En el proyecto, se probaron diferentes posiciones de la antena y se emplearon diferentes dispositivos de recepción. Antes de realizar estos cambios, había que llevar a cabo operaciones de suma importancia por el riesgo que supone entrar en el recinto donde se está aplicando tensión: había que disminuir la tensión hasta alcanzar un valor de 0 V y una vez que el área estaba libre de tensión ya se podía acceder a él para realizar los cambios necesarios.

Todas estas operaciones había que repetirlas cada vez que se modificaba el sistema construido en el laboratorio.



Capítulo VII

7. Conclusiones

Este documento describe la localización de DPs en RF mediante una antena de alta directividad. Con ánimo de alcanzar este objetivo, el trabajo se divide principalmente en dos partes: la construcción de la antena y el desarrollo de un algoritmo que determina el lugar de la fuente de DPs.

El código a partir del cual se establece la posición de las DPs fue implementado en la herramienta de Matlab. Tomando como base las características de las ondas producidas por las DPs, se realizaron dos estudios. El primero de ellos, determina la posición según el mayor valor de energía media, y el segundo, consiste en un análisis estadístico de los picos máximos en el que se proporciona su valor medio y su desviación en cada dirección. Este último análisis calcula el rango dentro del cual se encuentra el pico de tensión máximo de las señales en cada ángulo y la localización es aquella en la que el pico medio de tensión es máximo, ya que se considera que estos picos corresponden a las DPs. Se realiza como complemento para verificar si los resultados del primero son correctos: si la posición de las DPs proporcionada por el primer análisis presenta una dispersión grande en el segundo, se descarta la validez de los resultados del análisis de la energía, ya que el mayor valor de energía media se ha podido obtener por un fenómeno ajeno a la emisión directa de las DPs. En el resultado del segundo análisis se sigue el mismo criterio en la validación de sus resultados: se descarta la solución si la posición que indica tiene mucha dispersión.

Las instrucciones de Matlab que constituyen ambos análisis fueron probadas mediante simulaciones y se comprobó que dichos estudios convergían en el resultado, por lo que en teoría, sería suficiente con aplicar uno de ellos para establecer la fuente del fenómeno de DPs. Sin embargo, en los ensayos reales no se obtuvieron los mismos resultados, lo que demostró la necesidad de centrarse en ambos estudios debido a que las señales que se adquirirían no eran en todo momento las mismas. De esta manera, se comprobaba si la energía media se obtenía con los datos propios a las DPs o tenía en cuenta también otros fenómenos.



Por otro lado, los resultados están condicionados por el tipo de antena. La idea era construir una antena de elevada directividad, de manera que a medida que el servomotor apuntase a la fuente, los valores fuesen aumentando. No obstante, no se ha logrado alcanzar esta tendencia. Se ha probado con tres antenas distintas y ninguna ha proporcionado un resultado coherente.

Como última opción, se realizó un estudio que se basaba en comprobar la existencia de rebotes que provocase la recogida de la señal de las DPs en posiciones distintas a la de la fuente. Para ello, se estudió el TDOA de una posición concreta en la que se conocía la existencia de rebotes como consecuencia de elementos metálicos. Tras ver que el TDOA en esa posición era más pequeño de lo que se esperaba, se dedujo que en esa dirección la antena recibía también la emisión directa de la descarga. Esto significa que la antena no es lo suficientemente direccional como para distinguir la procedencia de la emisión. A pesar de que en alguna adquisición se alcanzó la solución correcta, en la mayoría se obtuvieron resultados erróneos, por lo que no se puede concluir la validez de las antenas empleadas.

En conclusión, la antena construida es omnidireccional, y consecuentemente, no es capaz de distinguir el origen de la radiación procedente de las DPs. La solución a este problema sería diseñar una antena verdaderamente direccional e inmune a las radiaciones incidentes en los laterales de la misma.

Pese a que parte del primer objetivo de este proyecto, mencionado en el apartado *Introducción* de la memoria, no se ha cumplido, al no lograr construir una antena de alta directividad, el resto de objetivos se han llevado a cabo con éxito.



Capítulo VIII

8. Trabajos futuros

Los resultados alcanzados en este proyecto sirven como punto de partida de otros estudios relacionados con la localización de DPs. A continuación, se mencionan algunas de las investigaciones que pueden realizarse tomando como base este trabajo.

- Seguir avanzando en la investigación de una antena directiva para la localización de DPs en RF.
- Modificar la fuente de emisión de DPs. En vez de conseguir una actividad de DPs superficiales, probar la efectividad de la antena para DPs internas o efecto corona.
- Medir el parámetro S_{11} para conocer cómo recibe la antena.
- Filtrar la señal antes de analizarla. Se puede hacer un filtrado digital o una eliminación de ruido mediante ondículas.
- Analizar la envolvente de la señal en el tiempo para cada posición.



Capítulo IX

9. Presupuesto

En este capítulo se detallan los costes que supone la realización del proyecto *Localización de eventos en radiofrecuencia mediante una antena de alta directividad*.

Los precios mostrados en las siguientes tablas se tratan de aproximaciones, por lo que el coste total del trabajo no es real, sino un indicador del coste necesario para esta investigación.

COSTES DIRECTOS

Recursos Humanos

Tabla 6. Costes directos. Recursos humanos

RECURSOS HUMANOS				
Apellidos y nombre	Categoría	Dedicación (meses)	Coste hombre mes (€)	Coste (€)
Pérez Prieto, Beatriz	Ingeniero	11	3000	33000
TOTAL				33000 €

Equipos

Tabla 7. Costes directos. Equipos

EQUIPOS						
Descripción	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación (meses)	Número de unidades	Coste unitario (€)	Coste* (€)
RECURSOS DE HARDWARE						
PC de sobremesa	100	7	36	1	700	136,111
PC Portátil	100	11	36	1	400	122,222
Tarjeta de adquisición NI PCI-5152	100	7	24	1	8270	2412,083
Arduino UNO	100	7	24	1	20	5,833
Osciloscopio (Tektronix DPO7254)	100	7	36	1	21000	4083,333
RECURSOS DE SOFTWARE						
Matlab R2014. Licencia	100	7	12	2	2000	2333,333
RECURSOS TANGIBLES						
Servomotor Hitec HS-422	100	7	24	1	9,20	2,683
Accesorios del servomotor	100	7	24	1	41,40	12,075
Antena parabólica	100	7	24	1	0,90	0,263
Plato metálico circular	100	7	24	1	4,50	1,313
Antena monopolo 10 cm	100	7	12	2	10	11,667
Antena Vivaldi	100	7	24	1	10	2,917
Transformador (Schleich BV-702210)	100	7	36	1	8000	1555,556
Fuente de alta tensión (Schleich GLPI-e HV)	100	7	36	1	6000	1166,667
Cable coaxial RG-58	100	7	24	1	6,19	1,805



Cable <i>USB 2.0</i> (Tipo A/M-B/- M)	100	7	24	1	3,99	1,164
Electrodo	100	7	12	14	2	16,333
TOTAL						11865,358 €

*En el cálculo del importe de los equipos se ha tenido en cuenta la amortización:

$$\text{Coste real} = \frac{A}{B} \cdot C \cdot D \quad (43)$$

donde

A = número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación en meses (es una estimación)

C = coste del equipo sin I.V.A.

D = porcentaje de uso dedicado al proyecto. En la ecuación se introduce el valor dividido entre 100.

Subcontratación de tareas

Tabla 8. Costes directos. Subcontratación de tareas

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS		
Descripción	Empresa	Coste (€)
TOTAL		0 €

Otros costes directos

Tabla 9. Otros costes directos

OTROS COSTES DIRECTOS (Fungibles, viajes y dietas...)		
Descripción	Empresa	Coste (€)
TOTAL		0 €

**COSTES INDIRECTOS**

Tabla 10. Costes indirectos

COSTES INDIRECTOS			
Descripción	Dedicación (meses)	Coste unitario (€)	Coste (€)
Internet y teléfono	11	47	517
Luz, agua y gas	11	100	1100
Material de oficina	11	30	330
TOTAL			1947 €

OTROS COSTES

En todos los costes anteriores no se ha tenido en cuenta el I.V.A. Para obtener el importe presupuestado total se aplica un I.V.A. del 21 %:

$$CT = \text{costes} + 0,21 \cdot \text{costes} \quad (44)$$

siendo la variable CT el coste total y la variable costes , el importe total sin I.V.A.

RESUMEN DE COSTES

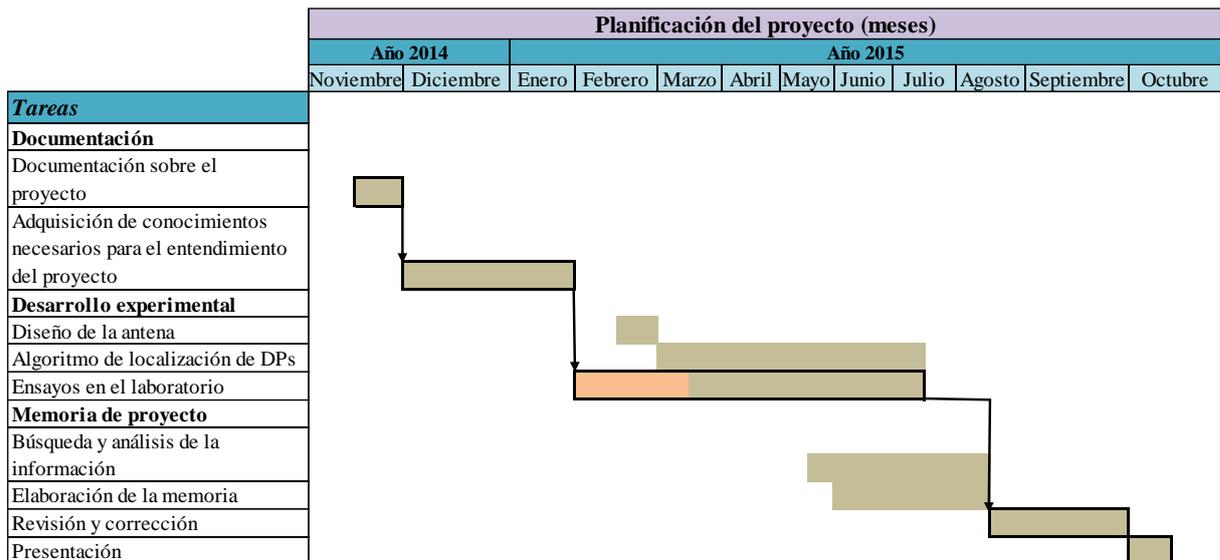
Tabla 11. Resumen de costes

RESUMEN DE COSTES	
Presupuesto costes totales	Coste (€)
Recursos Humanos	33000
Equipos	11865,358
Subcontratación de tareas	0
Otros costes directos	0
Costes indirectos	1947
I.V.A.	9830,595
Total	56642,953

Capítulo X

10. Planificación del proyecto

Tabla 12. Planificación del proyecto. Diagrama de Gantt



En la tarea *Ensayos en el laboratorio* aparecen dos colores diferentes debido a que este proyecto se ha realizado en conjunto con otro trabajo de una compañera del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales.

El color naranja representa el tiempo en el que se empezaron a llevar a cabo los ensayos. Aparece en otro color porque no pertenece a las actividades correspondientes a este proyecto.



Bibliografía

- [1] [En línea]. Available: <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/624/14/Cappy2.DPf>. [Último acceso: 12 Agosto 2015].
- [2] Norma UNE-EN 60270, *Técnicas de ensayo en alta tensión. Medida de descargas parciales*, 2002.
- [3] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, M. V. Rojas-Moreno, E. Rajo-Iglesias y J.M. Martínez-Tarifa, «Antenna Parametrization for the Detection of Partial Discharges,» *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 62, nº 5, pp. 932-940, 2013.
- [4] «Temesa,» [En línea]. Available: <http://temesa.com/index.php/productos/aislamiento-electrico/>. [Último acceso: 7 Junio 2015].
- [5] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy y M. I. Qureshi, *Electrical insulation in power systems*, Marcel Dekker, 1998.
- [6] «Definición.DE,» [En línea]. Available: <http://definicion.de/conductividad/>. [Último acceso: 7 Junio 2015].
- [7] «Universidad de Málaga Departamento de Física Aplicada II,» [En línea]. Available: http://webpersonal.uma.es/~jmpeula/banda_prohibida.html. [Último acceso: 15 Septiembre 2015].
- [8] J. A. M. Velasco, *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*, McGraw-Hill, 2008.



- [9] [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/687/1/te319.pdf>. [Último acceso: 15 septiembre 2015].
- [10] J. M. F. d. Marcos, Localización de descargas parciales mediante el estudio radiométrico de señales captadas con antenas UHF. Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [11] D. T. Peñaloza, *Sistema de Localización de Descargas Parciales en Línea. Tesis en Maestría en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional.*, México, Febrero de 2010.
- [12] A. C. Hernández, Manual PDS100: Dispositivo portátil de inspección de descargas parciales mediante la medida de energía electromagnética en el espectro de RF. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid, Julio de 2013.
- [13] M. V. R. Moreno, Sensor de acoplamiento inductivo para la medida de pulsos de corriente de alta frecuencia. Aplicación para la medida y detección de descargas parciales. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid, Junio de 2011.
- [14] Y. P. Sánchez, Aplicación práctica del equipo PDS-100 para la medida de descargas parciales. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid, Julio de 2013.
- [15] A. F. y L. A. Kennedy, *Plasma physics and engineering*, Taylor & Francis, 2004.
- [16] N. M. Osorio, «Fenómeno Corona en líneas aéreas,» Julio 2006. [En línea]. Available: <http://es.scribd.com/doc/250852636/Fenomeno-Corona#scribd>. [Último acceso: 11 Junio 2015].
- [17] [En línea]. Available: <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/624/Cappy2.DPf;jsessionid=18FF3971A31686B860BB2731A98B3B86?sequence=14>. [Último acceso: 11 Junio 2015].
- [18] R. A. Sánchez, Medida de descargas parciales en radiofrecuencia. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid, Febrero de 2014.
- [19] Philip J. Moore, Iliana E. Portugués e Ian A. Glover, «Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant,» *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 20, n° 3, pp. 2264-2272, 2005.



- [20] Iliana E. Portugués, Philip J. Moore, Ian A. Glover, Carl Johnstone, Ralph H. McKosky, Mark B. Goff y Luke van der Zel, «RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations,» *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 24, n° 1, pp. 20-29, 2009.
- [21] Y. H. y. K. Boyle, *Antennas from theory to practice*, Wiley, 2008.
- [22] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [23] S. Drabowitch, *Modern antennas*, Chapman & Hall, 1998.
- [24] [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/ea7ahg/antena/teoria/resonancia>. [Último acceso: 28 Agosto 2015].
- [25] [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/nhduran2002/resumendipolo>. [Último acceso: 2015 Junio 20].
- [26] [En línea]. Available: <http://www.tonahtiu.com/notas/metodos/trapecio.htm>.
- [27] [En línea]. Available: https://docs.google.com/document/d/1ZmrfGjBO0xYEs4WaJ02kOTD_UjGEN_1KgS29gYJ5zTs/edit?pli=1. [Último acceso: 2015 Agosto 8].
- [28] «monografias.com,» [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos89/antenas-parabolicas/antenas-parabolicas.shtml#ixzz3i7elwD80>. [Último acceso: 2015 Agosto 8].

Anexo

En el *Anexo* se muestra la interfaz gráfica que se utiliza. También se muestra el código total implementado, que incluye el movimiento del servomotor, la recogida de las señales de las ondas electromagnéticas y el análisis de las mismas.

Interfaz gráfica

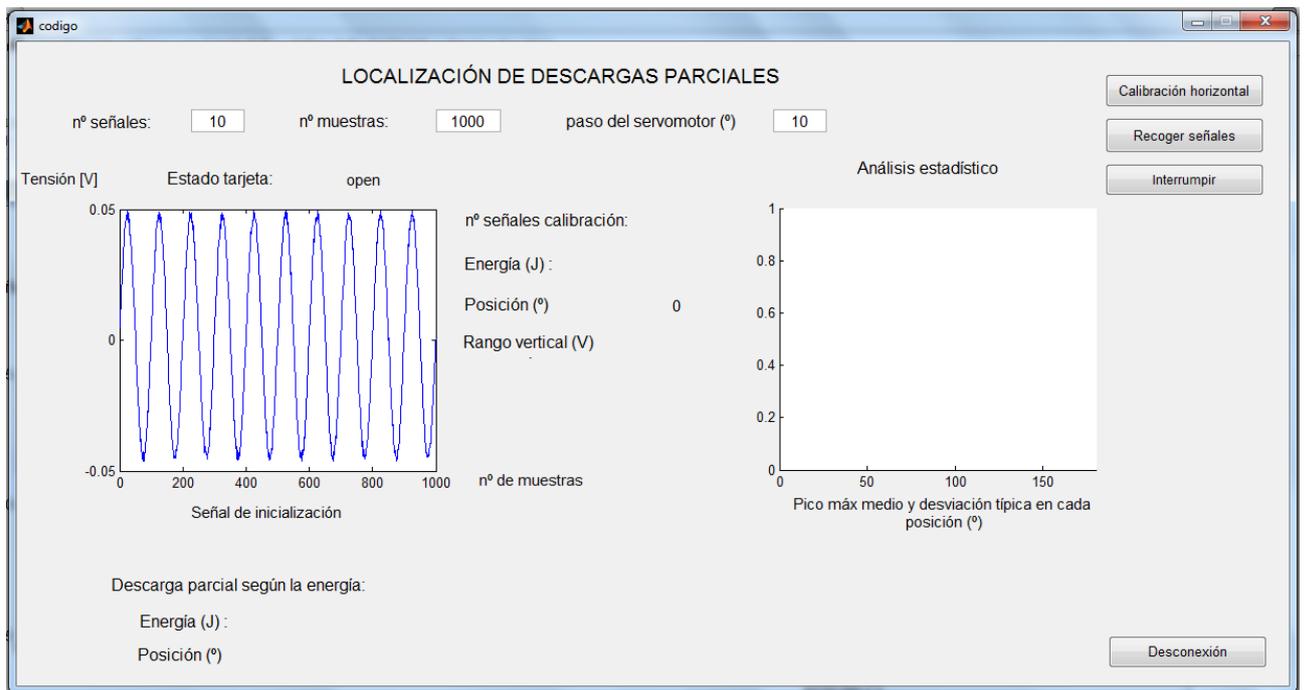


Figura 79. Interfaz gráfica



Código total implementado en Matlab

```
function varargout = codigo(varargin)
% CODIGO MATLAB code for codigo.fig
%   CODIGO, by itself, creates a new CODIGO or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = CODIGO returns the handle to a new CODIGO or the handle to
%
%   the existing singleton*.
%
%   CODIGO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in CODIGO.M with the given input arguments.
%
%   CODIGO('Property','Value',...) creates a new CODIGO or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before codigo_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to codigo_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help codigo

% Last Modified by GUIDE v2.5 29-Jul-2015 11:00:34

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @codigo_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @codigo_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before codigo is made visible.
function codigo_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to codigo (see VARARGIN)

% Choose default command line output for codigo

handles.output = hObject;
```



```
handles.vector_energia_media=zeros(1,360);
```

* SERVOMOTOR *

```
% Se crea el "Objeto arduino"  
  
a=arduino('COM10','uno','Libraries','Servo');  
s=servo(a,4)  
clear s;  
s = servo(a, 4, 'MinPulseDuration', 0.6e-3, 'MaxPulseDuration', 2.4e-3)  
ang_inic=0;  
ang_fin=1;  
angle=ang_inic;  
writePosition(s, angle);  
cont_angulo=1; % Contador que indica todas las posiciones del servomotor
```

* TARJETA DE ADQUISICIÓN *

```
% Se crea el "Controlador de instrumentos de Matlab (Matlab Instrument Object)"  
y se conecta  
  
% * TARJETA REAL*  
%ictObj = icdevice('niscope.mdd', 'DAQ::Dev1');  
  
% *TARJETA EN MODO SIMULACIÓN*  
ictObj = icdevice('niscope.mdd', 'DAQ::Dev1','OptionString','simulate=true');  
  
connect(ictObj);  
  
% Estado de la tarjeta  
  
set(handles.text_valor_estado_tarjeta,'String',ictObj.status)  
set(handles.text_n_senales,'String',' ');  
  
% ** Configuración del Scope **  
  
configuration = ictObj.Configuration;  
invoke(configuration, 'autosetup');  
  
% ** Configuración vertical: canal 0 **  
  
Range = 0.01;  
Offset = 0;  
Coupling = 1;  
ProbeAttenuation = 1;  
Inputimpedance=50;  
Maxinputfrequency=-1;  
  
invoke(ictObj.Configurationfunctionsvertical, 'configurevertical', '0', Range,  
Offset, Coupling, ProbeAttenuation, true);  
invoke(ictObj.Configurationfunctionsvertical,'configurechancharacteristics','0'  
,Inputimpedance,Maxinputfrequency);  
  
% NOTA: El true corresponde a la variable enabled  
  
% ** Configuración horizontal: canal 0 **
```



```
MinSampleRate=1e9;
MinNumPts=1000;
RefPosition=20;
NumRecords=1;
EnforceRealTime=1;

invoke(ictObj.Configurationfunctionshorizontal,'configurehorizontaltiming',Min
SampleRate,MinNumPts,RefPosition,NumRecords,EnforceRealTime);

% ** Configuración del trigger (disparo): canal 0 **

TriggerSource='0'; % Es el mismo que el canal de entrada
Level=2e-3;
Slope=1;
TriggerCoupling=1;
HoldOff=0;
Delay=0;

invoke(ictObj.Configurationfunctionstrigger,'configuretriggeredge',TriggerSour
ce,Level,Slope,TriggerCoupling,HoldOff,Delay);

% Se prepara la información de la señal

numChannels = 1;
channelList = '0';
numSamples = 1000;

    waveformInfo.absoluteInitialX = 0;
    waveformInfo.relativeInitialX = 0;
    waveformInfo.xIncrement = 0;
    waveformInfo.actualSamples = 0;
    waveformInfo.offset = 0;
    waveformInfo.gain = 0;
    waveformInfo.reserved1 = 0;
    waveformInfo.reserved2 = 0;

% Obtención de la señal

waveformArray = zeros(numChannels * numSamples,NumRecords );
TimeOut = 30; % (segundos)

% Adquisición de la primera señal (señal de inicialización)

    invoke(ictObj.Acquisition, 'initiateacquisition');
    [waveformArray, waveformInfo] = invoke(ictObj.Acquisition, 'fetch',
channelList,...
    TimeOut, numSamples, waveformArray, waveformInfo);
    senal=waveformArray;

    fig1=handles.axes1;
    plot(fig1,senal');

    set(handles.text_info,'String','Señal de inicialización');
    set(handles.text_n_senales,'String',' ');

    set(handles.edit_n_muestras,'String',numSamples);

    set(handles.text_energia_descarga,'String',' ');
    set(handles.text_posicion_descarga,'String',' ');
    set(handles.text_energia,'String',' ');
```



```
set(handles.text_posicion,'String',0);
set(handles.text_range,'String',' ');
set(handles.text_n_senales_calibr,'String',' ');

fig2=handles.axes2;
xlim(fig2,[0 180]);

% ** Variables globales **

handles.tarjeta=ictObj;
handles.arduino=a;
handles.servo=s;
handles.cont_angulo=cont_angulo;
handles.ang_inic=ang_inic;
handles.ang_fin=ang_fin;
handles.angle=angle;

handles.Range=Range;
handles.Offset=Offset;
handles.Coupling=Coupling;
handles.ProbeAttenuation=ProbeAttenuation;

handles.MinSampleRate=MinSampleRate;
handles.MinNumPts=MinNumPts;
handles.RefPosition=RefPosition;
handles.NumRecords=NumRecords;
handles.EnforceRealTime=EnforceRealTime;

handles.TriggerSource=TriggerSource;
handles.Level=Level;
handles.Slope=Slope;
handles.TriggerCoupling=TriggerCoupling;
handles.HoldOff=HoldOff;
handles.Delay=Delay;

handles.numChannels = numChannels;
handles.channelList = channelList;
handles.numSamples = numSamples;
handles.waveformInfo = waveformInfo;
handles.waveformArray = waveformArray;
handles.TimeOut = TimeOut;

handles.num_senales=str2double(get(handles.edit_n_senales_def,'String'));
handles.paso_servo=(str2double(get(handles.edit_paso_servo,'String')))/180;

handles.movimiento=1; % Se va a emplear para que cuando se interrumpa
                    % la recogida de señales el servomotor no pase a
                    % la siguiente posición de giro

% Choose default command line output for p_gui_todojunto
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes codigo wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = codigo_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
```



```
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
```

* ELECCIÓN DEL NÚMERO DE MUESTRAS *

```
function edit_n_muestras_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_n_muestras (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_n_muestras as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_n_muestras
%        as a double

handles.numSamples=str2double(get(hObject,'String'));

guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_n_muestras_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit_n_muestras (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

* CALIBRACIÓN HORIZONTAL *

```
% --- Executes on button press in togglebutton_calibracion.
function togglebutton_calibracion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton_calibracion (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton_calibracion

ictObj=handles.tarjeta;
a=handles.arduino;
s=handles.servo;
cont_angulo=handles.cont_angulo;
ang_inic=handles.ang_inic;
ang_fin=handles.ang_fin;
angle=handles.angle;

Range=handles.Range;
Offset=handles.Offset;
Coupling=handles.Coupling;
ProbeAttenuation=handles.ProbeAttenuation;
```



```
MinSampleRate=handles.MinSampleRate;
RefPosition=handles.RefPosition;
NumRecords=handles.NumRecords;
EnforceRealTime=handles.EnforceRealTime;

TriggerSource=handles.TriggerSource;
Level=handles.Level;
Slope=handles.Slope;
TriggerCoupling=handles.TriggerCoupling;
HoldOff=handles.HoldOff;
Delay=handles.Delay;

numChannels=handles.numChannels;
channelList=handles.channelList;
numSamples=handles.numSamples;

waveformInfo=handles.waveformInfo;
waveformArray=handles.waveformArray;
TimeOut=handles.TimeOut;

% Posición del servomotor. Se lee la posición para mostrarla en el Guide

current_pos = readPosition(s);
current_pos = current_pos*180; %Se expresa la posición en grados
set(handles.text_posicion,'String',current_pos);
set(handles.text_n_senales,'String',' ');

set(handles.text_energia,'String',' ');
set(handles.text_range,'String',' ');
set(handles.text_n_senales_calibr,'String',' ');

m=1; % Contador de las señales que se van recogiendo en la calibración

button_state = get(hObject,'Value'); % Se mira el estado del toggle button
% de "Calibración horizontal"

matriz_calibracion=zeros(500,numSamples); % Hemos considerado inicialmente
% que como mucho vamos a recoger
% 500 señales de calibración

while button_state == get(hObject,'Max')

    waveformArray = zeros(NumRecords,numChannels * numSamples);
    invoke(ictObj.Acquisition, 'initiateacquisition');
    [waveformArray, waveformInfo] = invoke(ictObj.Acquisition, 'fetch',
channelList,...
TimeOut, numSamples, waveformArray, waveformInfo);

    senal=waveformArray;
    vector_range(m)=max(senal);
    matriz_calibracion(m,:)=senal;
    m=m+1;

    fig1=handles.axes1;
    plot(fig1,senal)
    axis(fig1,[0 numSamples -Range Range]);
    pause(0.2)

    set(handles.text_info,'String','Recogida de la señal de calibración');

    button_state = get(hObject,'Value');

    if button_state == get(hObject,'Min')
```



```
Range=(max(vector_range))*1.4;
indice_rango_max=min(find(vector_range==max(vector_range)));

    invoke(ictObj.Configurationfunctionsvertical, 'configurevertical', '0',
Range, Offset, Coupling, ProbeAttenuation, true);

invoke(ictObj.Configurationfunctionshorizontal, 'configurehorizontaltiming', Min
SampleRate, numSamples, RefPosition, NumRecords, EnforceRealTime);

    plot(fig1,matriz_calibracion(indice_rango_max,:));
    axis(fig1,[0 numSamples -Range Range]);

    set(handles.text_info, 'String', 'Calibración terminada');
    set(handles.text_range, 'String', Range);
    set(handles.text_n_senales, 'String', ' ');

    set(handles.text_n_senales_calibr, 'String', m-1);

handles.tarjeta=ictObj;

handles.ang_inic=ang_inic;
handles.ang_fin=ang_fin;
handles.angle=angle;
handles.numSamples=numSamples;
handles.waveformInfo=waveformInfo;
handles.waveformArray=waveformArray;
handles.Range=Range;
handles.matriz_calibracion=matriz_calibracion;

save('datos_calibracion', '-struct', 'handles', 'matriz_calibracion');

guidata(hObject, handles);
end
end
```

* RECOGIDA DE SEÑALES *

```
% --- Executes on button press in togglebutton_recoger_senales.
function togglebutton_recoger_senales_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton_recoger_senales (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
togglebutton_recoger_senales

ictObj=handles.tarjeta;
a=handles.arduino;
s=handles.servo;
cont_angulo=handles.cont_angulo;
paso_servo=(str2double(get(handles.edit_paso_servo, 'String')))/180;
ang_inic=handles.ang_inic;
ang_fin=handles.ang_fin;
angle=handles.angle;

Range=handles.Range;
Offset=handles.Offset;
Coupling=handles.Coupling;
```



```
ProbeAttenuation=handles.ProbeAttenuation;

MinSampleRate=handles.MinSampleRate;
RefPosition=handles.RefPosition;
NumRecords=handles.NumRecords;
EnforceRealTime=handles.EnforceRealTime;

TriggerSource=handles.TriggerSource;
Level=handles.Level;
Slope=handles.Slope;
TriggerCoupling=handles.TriggerCoupling;
HoldOff=handles.HoldOff;
Delay=handles.Delay;

numChannels=handles.numChannels;
channelList=handles.channelList;
numSamples=handles.numSamples;
waveformInfo=handles.waveformInfo;
TimeOut=handles.TimeOut;

num_senales=str2double(get(handles.edit_n_senales_def,'String'));

% Se lee el estado del togglebutton para poder iniciar la recogida
button_state = get(hObject,'Value');

if button_state==get(hObject,'Max')
    handles.movimiento=1; % Indica al servomotor si debe continuar con
                        % el movimiento o detenerse
    angle=0;
    writePosition(s, angle);
end

matriz_todas_senales=zeros(((1/paso_servo)+1)*num_senales,numSamples);

while(handles.movimiento==1)

    % Posición del servomotor

    current_pos = readPosition(s);
    current_pos = current_pos*180; %Se expresa la posición en grados
    set(handles.text_posicion,'String',current_pos);
    set(handles.text_n_senales,'String',' ');

    % Calibración automática del rango: Se recogen cinco señales

    for k =1:5

        waveformArray = zeros(NumRecords,numChannels * numSamples);
        invoke(ictObj.Acquisition, 'initiateacquisition');
        [waveformArray, waveformInfo] = invoke(ictObj.Acquisition,
'fetch', channelList,...
        TimeOut, numSamples, waveformArray, waveformInfo);
        senal_cal=waveformArray;

        vector_range(k)=max(senal_cal);

    end

    Range=(max(vector_range))*1.4;
    %Level=0.6*Range;
    Level=5e-3;
```



```
        invoke(ictObj.Configurationfunctionsvertical,
'configurevertical', '0', Range, Offset, Coupling, ProbeAttenuation, true);

invoke(ictObj.Configurationfunctionstrigger,'configuretriggeredge',TriggerSource,Level,Slope,TriggerCoupling,HoldOff,Delay);

% Recogida del número de señales definido, y cálculo de la energía a
% tiempo real

for k =1:num_senales

    fig2=handles.axes2;
    xlim(fig2,[0 180]);

    button_state = get(hObject,'Value');

    if button_state==get(hObject,'Max')

        set(handles.text_info,'String','Número de la señal recogida:');
        set(handles.text_n_senales,'String',num2str(k));

        waveformArray = zeros(NumRecords,numChannels * numSamples);
        invoke(ictObj.Acquisition, 'initiateacquisition');
        [waveformArray, waveformInfo] = invoke(ictObj.Acquisition,
'fetch', channelList,...
        Timeout, numSamples, waveformArray, waveformInfo);
        senal(k,:)=waveformArray;

        fig1=handles.axes1;
        plot(fig1,senal(k,:))
        pause(0.1)
        axis([0 numSamples -Range Range]);

        senal_potencia(k,:)=(senal(k,:)).^2;
    end
end

potencia=senal_potencia'; % Se calcula la transpuesta para expresarlo
% como un vector columna

energia_cada_senal=trapz(potencia*(1/MinSampleRate)); % Energía de
% cada
% señal en una
% posición
energia_media=(sum(energia_cada_senal')/num_senales); % Energía media
% en una
% posición

set(handles.text_energia,'String',energia_media);

vector_energia_media(cont_angulo)=energia_media;

vector_angulo(cont_angulo)=angle*180;

% Se guardan todas las señales de cada posición en una matriz de tal
% manera que en una matriz estén todas las señales de todas las
% posiciones
```



```
matriz_todas_senales(1+(num_senales*(cont_angulo-
1)):num_senales*cont_angulo,:)=senal;

handles.matriz_todas_senales=matriz_todas_senales;
handles.vector_energia_media=vector_energia_media;
handles.vector_angulo=vector_angulo;
handles.MinSampleRate=MinSampleRate;
handles.num_senales=num_senales;
handles.paso_servo=paso_servo;
%
*****
*****

% *** CÁLCULO DE PICOS MÁXIMOS Y ESTUDIO ESTADÍSTICO ***

% Vector de picos máximos de todas las señales

for k=1:num_senales*cont_angulo

    vector_picos_max(k)=max(matriz_todas_senales(k,:));

end

% Se crea una matriz en la que las filas se corresponden con las
% posiciones del servomotor y las columnas con los picos de las
% señales en esa posición

j=1;

for k=1:cont_angulo
    for i=1:num_senales
        matriz_picos_max(k,i)=vector_picos_max(1,j);
        if j<=((1/paso_servo)+1)*num_senales % Es el n° de
                                                % señales
                                                % totales
            j=j+1;
        end
    end
end

% Gráfico con los picos máximos medios y la desviación típica en cada
% posición

fig2=handles.axes2;

for k=1:cont_angulo
    pico_max_medio(k)=mean(matriz_picos_max(k,:));
    desv_tipica(k)=std(matriz_picos_max(k,:),0);
    % El 0 indica que calcula la desviación corregida

    valor_max(k)=pico_max_medio(k)+desv_tipica(k);
    valor_min(k)=pico_max_medio(k)-desv_tipica(k);

    plot(fig2,[vector_angulo(k)
vector_angulo(k)], [valor_max(k) valor_min(k)]);
    hold on
    plot(fig2,[vector_angulo(k)
vector_angulo(k)], [valor_max(k) valor_min(k)], '*');
    hold on

    % Se ha puesto dos veces la misma gráfica para que
```



```

% primero se una con una recta, y después, se añadan
% los asteriscos en los extremos

end

plot(fig2,vector_angulo,pico_max_medio,'o');
axis(fig2,[0 180 -Range Range]);

set(handles.text_info_estadistico,'String','Pico máx medio y
desviación típica en cada posición (°)');

%
*****
*****

button_state = get(hObject,'Value');

if button_state==get(hObject,'Max')

cont_angulo=cont_angulo+1;
angle=angle+paso_servo;

if angle>ang_fin
posicion_final=length(vector_angulo);

% *** POSICIÓN DE ENERGÍA MÁXIMA CALCULADA POR EL PROGRAMA
% TENIENDO EN CUENTA LA ENERGÍA MEDIA DE CADA POSICIÓN.
% RESULTADO NO EXACTO. ***

energia_maxima=max(vector_energia_media);
indice_vector=find(vector_energia_media==energia_maxima);

set(handles.text_energia_descarga,'String',vector_energia_media(indice_vector)
);

set(handles.text_posicion_descarga,'String',vector_angulo(indice_vector));
set(handles.text_info,'String','Ha finalizado la recogida en
todas la posiciones. Se muestran los datos de la aprox de la descarga parcial');
set(handles.text_n_senales,'String',' ');

% ** GRÁFICA: Energía media en cada posición

fig1=handles.axes1;
plot(fig1,vector_angulo,vector_energia_media);
set(handles.text_info,'String','Energía media en cada posición
(°)');

set(handles.text_ejey,'String',' ');
set(handles.text_ejex,'String',' ');

angle=ang_fin;
handles.movimiento=0;

set(handles.togglebutton_recoger_senales,'Value',0);

```



```
% *** RESULTADO MÁS CORRECTO. ANÁLISIS DE LOS PICOS DE TODAS
% LAS SEÑALES DE CADA POSICIÓN ***

% Para obtener un resultado más correcto se analizan los picos
% de cada señal, ya que al calcular la energía media no se sabe
% si el valor obtenido es afectado por fenómenos distintos a
% las descargas parciales.
% De esta manera se puede ver dónde tiende a encontrarse el
% pico máximo y si hay algún pico que se salga fuera de su
% valor normal, y por tanto, se deba a otros fenómenos

% *** CÁLCULO DE PICOS MÁXIMOS Y ESTUDIO ESTADÍSTICO ***

% Vector de picos máximos de todas las señales

for k=1:num_senales*posicion_final
    vector_picos_max(k)=max(matriz_todas_senales(k,:));
end

% Se crea una matriz en la que las filas se corresponden con
% las posiciones del servomotor y las columnas con los picos de
% las señales en esa posición

j=1;

for k=1:posicion_final
    for i=1:num_senales
        matriz_picos_max(k,i)=vector_picos_max(1,j);
        if j<=num_senales/paso_servo % Es el n° de señales
            % totales
                j=j+1;
        end
    end
end

% Gráfico con con los picos máximos medios y la desviación típica
% en cada posición

fig2=handles.axes2;

for k=1:posicion_final
    pico_max_medio(k)=mean(matriz_picos_max(k,:));
    desv_tipica(k)=std(matriz_picos_max(k,:),0);
    % El 0 indica que calcula la desviación corregida

    valor_max(k)=pico_max_medio(k)+desv_tipica(k);
    valor_min(k)=pico_max_medio(k)-desv_tipica(k);

    plot(fig2,[vector_angulo(k)
vector_angulo(k)], [valor_max(k) valor_min(k)]);
    hold on
    plot(fig2,[vector_angulo(k)
vector_angulo(k)], [valor_max(k) valor_min(k)], '*');
    hold on

    % Se ha puesto dos veces la misma gráfica para que
    % primero se una con una recta, y después, se añadan
```



```
                                % los asteriscos en los extremos

                                end

                                handles.matriz_picos_max=matriz_picos_max;
                                handles.pico_max_medio= pico_max_medio;
                                handles.desv_tipica=desv_tipica;
                                handles.valor_max=valor_max;
                                handles.valor_min=valor_min;

                                plot(fig2,vector_angulo,pico_max_medio,'o');
                                axis(fig2,[0 180 -Range Range]);

                                set(handles.text_info_estadistico,'String','Pico máx medio y
                                desviación típica en cada posición (°)');

                                save('datos','-
                                struct','handles','matriz_todas_senales','vector_energia_media','matriz_picos_
                                max','pico_max_medio','desv_tipica','valor_max','valor_min','MinSampleRate','n
                                um_senales','vector_angulo','paso_servo','numSamples');

                                else

                                set(handles.text_info,'String',' Recogida de la señal terminada.
                                Se cambia a la nueva posición (°):');
                                set(handles.text_n_senales,'String',angle*180);

                                end

                                end

                                if button_state==get(hObject,'Min')

                                handles.movimiento=0;
                                angle=0;
                                cont_angulo=1;

                                set(handles.text_info,'String','AVISO: Se ha pulsado el botón de
                                interrumpir');
                                set(handles.text_n_senales,'String','');
                                set(handles.text_energia,'String','');
                                set(handles.text_posicion,'String',angle*180);

                                end

                                % Se mueve el servomotor

                                pause(2)

                                writePosition(s, angle);

                                end

                                handles.tarjeta=ictObj;
                                handles.cont_angulo=cont_angulo;
                                handles.angle=angle;
                                handles.ang_inic=ang_inic;
                                handles.ang_fin=ang_fin;
                                handles.paso_servo=paso_servo;

                                handles.num_senales=num_senales;

                                handles.vector_energia_media=vector_energia_media;
```



```
handles.vector_angulo=vector_angulo;  
  
guidata(hObject, handles);
```

*** ELECCIÓN DEL NÚMERO DE SEÑALES A RECOGER EN CADA POSICIÓN ***

```
function edit_n_senales_def_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to edit_n_senales_def (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)  
  
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_n_senales_def as text  
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_n_senales_def  
% as a double  
  
handles.num_senales=str2double(get(hObject,'String'));  
  
guidata(hObject, handles);  
  
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
function edit_n_senales_def_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to edit_n_senales_def (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called  
  
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.  
% See ISPC and COMPUTER.  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

*** ELECCIÓN DEL PASO DEL SERVOMOTOR ***

```
function edit_paso_servo_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject handle to edit_paso_servo (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)  
  
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_paso_servo as text  
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit_paso_servo  
% as a double  
  
paso_servo=str2double(get(hObject,'String'));  
paso_servo=paso_servo/180;  
  
handles.paso_servo=paso_servo;  
  
guidata(hObject, handles);  
  
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
function edit_paso_servo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```



```
% hObject      handle to edit_paso_servo (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

* INTERRUPCIÓN DE LA RECOGIDA *

```
% --- Executes on button press in pushbutton_Interrumpir.
function pushbutton_Interrumpir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton_Interrumpir (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

a=handles.arduino;
s=handles.servo;

set(handles.togglebutton_recoger_senales,'Value',0);

guidata(hObject, handles);
```

* DESCONEXIÓN DEL SISTEMA *

```
% --- Executes on button press in pushbutton_desconexion.
function pushbutton_desconexion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton_desconexion (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

ictObj=handles.tarjeta;
a=handles.arduino;
s=handles.servo;

set(handles.text_info,'String','AVISO: Se ha pulsado el botón de desconexión');
angle=0;
handles.movimiento=0;
writePosition(s, angle);

handles.servo=s;
clear s a
disconnect(ictObj)
delete(ictObj)
guidata(hObject, handles);
```