

Universidad Carlos III de Madrid

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



**APLICACIÓN PRÁCTICA
DEL EQUIPO PDS-100 PARA LA
MEDIDA DE DESCARGAS
PARCIALES**

AUTOR: Yorgo Psonis Sánchez

TUTOR: Ricardo Albarracín Sánchez

Leganés, Julio 2013





AGRADECIMIENTOS

A mi madre Carmen y a mi padre Dimitri, sin todo su apoyo no habría sido posible estudiar esta carrera.

A mi hermano Alexis, a mi abuela Mari Carmen y a toda mi familia.

A todos mis compañeros y amigos por su ayuda y muy en especial a Desirée.

Quiero agradecer también la dirección a mi tutor Ricardo Albarracín.

Αφιερωμένο στον παππού μου Γιώργο και στη γιαγιά μου Ελευθερία.

ÍNDICE

I. LISTA DE TABLAS	6
II. LISTA DE FIGURAS.....	7
1. Introducción	9
1.1. Objetivos del trabajo.....	10
1.2. Estructura del documento	10
2. Tipos de descargas parciales en los equipos eléctricos	11
2.1. Qué son las descargas parciales.....	11
2.2. Tipos de rotura de aislantes sólidos	11
2.3. Métodos para la clasificación de DP	13
2.4. Tipos de descargas parciales.....	14
2.4.1. Descargas parciales internas	14
2.4.2. Descargas superficiales	15
2.4.3. Descargas por efecto corona.....	16
2.5. Medición de descargas parciales	16
2.5.1. Circuitos para la medida de descargas parciales: medida convencional según IEC 60270	17
2.5.1.1 Circuito directo de detección.....	17
2.5.1.2 Circuito indirecto de detección.....	18
2.5.2. Circuitos para la medida de descargas parciales: medida no convencional según IEC 62478	18
2.5.3. Medición de descargas parciales por radio frecuencia	19
2.6. Métodos de clasificación de descargas parciales	19
2.6.1. Patrones PRPD	19
2.6.2. Mapas T-F	21
2.6.3. Mapa PRH-PRL	22
2.7. Ventajas e inconvenientes de estos métodos	23
3. Antenas para la medida de descargas parciales	25
3.1. Tipos de antenas:	25
3.1.1. Antenas de alambre	25
3.1.2. Antenas de apertura	25
3.1.3. Antenas de apertura plana.....	25
3.1.4. Antenas de microstrip.....	26
3.1.5. Antenas de reflexión.....	26
3.1.6. Antenas de lentes	26
3.1.7. Antenas array	26
3.2. Aspectos generales:	26
3.2.1. Antena	26
3.2.2. Diagrama de radiación.....	27
3.2.3. Ganancia	28
3.2.4. Directividad	29
3.2.5. Intensidad de radiación.....	29
3.2.6. Densidad de potencia radiada	30
3.2.7. Regiones de campo.....	31
3.2.8. Ancho de banda	31
3.2.9. Rendimiento	32
3.3. Parámetros de la antena en recepción:.....	33
3.3.1. Teorema de reciprocidad o de Lorentz	33

3.3.2. La impedancia de una antena.....	34
3.3.3. Longitud efectiva.....	35
3.3.4. Área efectiva	36
3.3.5. Factor de antena.....	36
3.3.6. Parámetros S	36
3.3.7. Resonancia de la antena.....	38
3.4. Dipolo	39
3.5. Antena Monopolo.....	41
3.5.2. Monopolos de 5 y 10 cm:	43
3.6. Antena logarítmico-periódica:.....	46
3.7. Antena vivaldi	48
3.8. Antena parche:.....	50
3.9. Antenas empleadas por el PDS-100	52
3.9.1. Antena Watson W-889	52
3.9.2. Antena Diamond RH789	53
4. El PDS-100 para la medida de Descargas Parciales [32]	54
4.1. Introducción	54
4.2. Características del PDS-100	54
4.3. Medidas con el PDS-100.....	56
4.3.2. Modo analizador de espectro.....	58
4.3.3. Modo de tiempo resuelto	58
5. Mediciones de Descargas Parciales en el laboratorio con el PDS-100	61
5.1. Introducción al montaje.....	61
5.2. Objetos de ensayo.....	61
5.3. Montaje para el ensayo.....	63
5.3.1. Circuito de medida convencional	63
5.3.2. Medida no convencional.....	64
5.4. Resultados de los ensayos	64
5.4.2. Ensayo 1	66
5.4.3. Ensayo 2	70
6. Seguridad en ambientes de alta tensión	73
7. Presupuestos para la medida de descargas parciales con la herramienta PDS-100	76
8. Conclusiones y trabajos futuros.....	78
9. Bibliografía	79
10. Relación de Anexos	82
10.1. Anexo I: Introducción histórica a las antenas [11]	83
10.2. Anexo II: Frecuencias y su clasificación:	85
10.3. Anexo III: Equipos para la medida de descargas parciales.....	86
10.3.1. Fuente de alimentación.....	86
10.3.2. Condensador de acoplamiento.....	86
10.3.3. Osciloscopio	87
10.3.4. Cable coaxial con conector BNC.....	87
10.3.5. Transformador de corriente de alta frecuencia HFCT	88
10.3.6. Equipo PDCheck de Techimp	88
10.3.7. Analizador de redes	89



10.3.8. Antenas empleadas	89
10.3.9. Envasadora de vacío	90
10.3.10. PDS-100	90
10.4. Anexo IV: Hoja de especificaciones del PDS-100 [32].....	91
10.5. Anexo V: Funciones de los botones y teclas de función [32]	92
10.6. Anexo VI: Botones y teclas alfanuméricas [32]	93

I. Lista de tablas.

<i>Tabla 3 1. Parámetros dipolo de $\lambda/2$</i>	40
<i>Tabla 3 2. Relación de los parámetros del monopolo con los del dipolo</i>	42
<i>Tabla 3 3. Frecuencias de resonancia de los monopolos de 5 y 10 cm</i>	44
<i>Tabla 3 4. Propiedades de la antena logarítmico-periódica</i>	47
<i>Tabla 3 5. Ventajas e inconvenientes de la antena microstrip [28]</i>	51
<i>Tabla 3 6. Parámetros de la antena parche [28]</i>	51
<i>Tabla 3 7. Parámetros de la antena Watson W-889 [30]</i>	52
<i>Tabla 3 8. Valores de los parámetros de la antena Diamond RH789 [31]</i>	53
<i>Tabla 5 1. Rangos de frecuencia</i>	64
<i>Tabla 5 2. Ruidos captados por el PDS-100</i>	65
<i>Tabla 5 3. Clasificación de los tramos a analizar</i>	66
<i>Tabla 5 4. Ratios para las DP internas</i>	69
<i>Tabla 5 5. Ratios para DP superficiales</i>	72
<i>Tabla 6 1. Distancias mínimas de seguridad [33]</i>	74
<i>Tabla 7 1. Costes estimados para la realización de medidas de DP con el PDS-100</i>	76
<i>Tabla 10 1. Clasificación de las bandas de frecuencia</i>	85
<i>Tabla 10 2. Frecuencias de ruido</i>	85
<i>Tabla 10 3. Bandas de microondas</i>	86
<i>Tabla 10 4. Especificaciones del modelo HFCT 39</i>	88
<i>Tabla 10 5. Botones y teclas alfanuméricas</i>	93

II. Lista de figuras.

Fig. 2.1. Mecanismos de ruptura de un aislamiento [4]	12
Fig. 2.2. Descargas parciales en una cavidad a corriente alterna [4]	13
Fig. 2.3. Arborescencia en un aislante [7].....	14
Fig. 2.4. Descarga en una cavidad interna [7].....	15
Fig. 2.5. Distribución del campo eléctrico en una vacuola [8]	15
Fig. 2.6. Descarga superficial [7].....	16
Fig. 2.7. Efecto corona [7].....	16
Fig. 2.8. Circuito directo de detección [1].....	17
Fig. 2.9. Circuito indirecto de detección. [1].....	18
Fig. 2.10. Diagrama PRPD de DP internas [10].....	20
Fig. 2.11. Patrón de descargas superficiales [10]	20
Fig. 2.12. Patrón PRPD del efecto corona [10]	21
Fig. 2.13. Representación de DP en un plano T-F [9].....	21
Fig. 2.14. Ejemplo de mapa PRH-PRL [2]	23
Fig. 3.1. Patrón de radiación isotrópico [14].....	27
Fig. 3.2. Patrón de radiación direccional [13].....	27
Fig. 3.3. Patrón de radiación omnidireccional [11].....	28
Fig. 3.4. Orientación del campo eléctrico generado por un dipolo [13].....	29
Fig. 3.5. Definición geométrica de estereorradián [13]	30
Fig. 3.6. Teorema de reciprocidad.....	33
Fig. 3.7. Circuito equivalente de una antena [14]	34
Fig. 3.8. Red de dos puertos [12].....	37
Fig. 3.9. Representación gráfica del parámetro S_{11} [20].....	38
Fig. 3.10. a) Diagrama de radiación del dipolo de $\lambda/4$ b) Diagrama para dipolo de $\lambda/2$ [11]	39
Fig. 3.11. Diagrama de radiación tridimensional normalizado de un dipolo de $\lambda/2$ [13]	39
Fig. 3.12. Monopolo de $\lambda/4$ de longitud h sobre un plano conductor [14]	41
Fig. 3.13. Diagrama de radiación monopolo de $\lambda/4$ [23]	42
Fig. 3.14. Parámetro S_{11} de los monopolos a) sin plano conductor b) con plano conductor [23]	43
Fig. 3.15. Ruido medido con monopolo de 5 cm [22].....	44
Fig. 3.16. Ruido medido con el monopolo de 10 cm [22]	44
Fig. 3.17. Antena monopolo de 5 cm empleada en los ensayos de laboratorio	45
Fig. 3.18. Monopolo de 10 cm	45
Fig. 3.19. Antena logarítmico-periódica UHALP 91088A en el laboratorio.....	46
Fig. 3.20. Diagrama de radiación antena logarítmico-periódica [24].....	47
Fig. 3.21. Ruido con antena logarítmico-periódica [22].....	48
Fig. 3.22. Antena vivaldi	49
Fig. 3.23. a) Diagrama de radiación tridimensional b) Diagrama de radiación bidimensional [27]	49
Fig. 3.24. Esquema de una antena parche de geometría cuadrada [28].....	50
Fig. 3.25. a) Diagrama de radiación Parche b) Diagrama de radiación tridimensional [28].....	51
Fig. 3.26. Antena Watson W-889 [30]	52
Fig. 3.27. Diagrama de radiación de la antena Watson [18]	52
Fig. 4.1. El PDS-100 midiendo en el laboratorio	54
Fig. 4.2. Panel superior del PDS-100 [32].....	55
Fig. 4.3. Panel frontal del PDS-100 [32].....	55
Fig. 4.4. Medida del PDS-100 [32].....	57
Fig. 4.5. Medida en modo de tiempo resuelto en el que se observan dos fuentes de DP [32]	59
Fig. 5.1. Objeto de ensayo 1: papel aislante de ranura de transformador	62
Fig. 5.2. Objeto de ensayo 2: electrodo sobre lámina de polietileno.....	63

Fig. 5.3. Esquema equivalente del montaje de los ensayos.....	63
Fig. 5.4. Ruido registrado entre 50 y 1000 MHz.....	64
Fig. 5.5. Ruido registrado entre 50 y 600 MHz.....	65
Fig. 5.6. Ruido registrado entre 50 y 300 MHz.....	65
Fig. 5.7. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 3.....	67
Fig. 5.8. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 2.....	67
Fig. 5.9. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 1.....	67
Fig. 5.10. Datos del PDCheck correspondientes al ensayo 1	68
Fig. 5.11. Patrón PRPD del objeto de ensayo A.....	68
Fig. 5.12. Mapa T-F del ensayo 1	69
Fig. 5.13. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 3.....	70
Fig. 5.14. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 2.....	70
Fig. 5.15. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 1.....	71
Fig. 5.16. Resultados del ensayo 2 obtenidos con el PDCheck.....	71
Fig. 5.17. Patrón PRPD de el objeto de ensayo B	72
Fig. 10.1. a) Transformador de AT Schleich b) Módulo de control Schleich	86
Fig. 10.2. Condensador de acoplamiento Haefely	87
Fig. 10.3. Osciloscopio Tektronix DPO 7254	87
Fig. 10.4. Conector BNC.....	87
Fig. 10.5. Transformador HFCT de Techimp	88
Fig. 10.6. PDCheck de Techimp	89
Fig. 10.7. Analizador de redes de Agilent Technologies.....	89
Fig. 10.8. Envasadora Magic Van MAXIMA	90

1. INTRODUCCIÓN

En las décadas de los años 60 y 70 se produjo un gran desarrollo de las redes eléctricas así como de los distintos equipos que las componen. Desde entonces se ha empleado la creciente evolución tecnológica para garantizar la seguridad de las personas, ampliar el ciclo de vida útil de los equipos y mantener un suministro de electricidad constante y de calidad. Para esto es necesario aplicar con regularidad un plan de mantenimiento preventivo específico. La seguridad para los operarios y usuarios es algo fundamental como también lo es la fiabilidad de los equipos, que ayuda a mantener un sistema eléctrico estable.

Este trabajo trata sobre la medición, en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión –LINEALT- del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid, de descargas parciales, en adelante DP, a través del equipo PDS-100. Este aparato es un analizador de espectros portátil diseñado para la medida de radio frecuencia, en adelante RF, que emiten las descargas parciales.

Para cumplir con los requisitos de seguridad, calidad y continuidad en el suministro eléctrico, es indispensable un correcto diseño y dimensionamiento de los aislantes empleados en toda la aparatenta que compone la red eléctrica. Los materiales aislantes pueden verse sometidos a distintos tipos de esfuerzos a lo largo de su vida.

La medición de las descargas parciales es un buen método para determinar el estado de degradación de un aislamiento. Si este fenómeno se produce de manera continuada, está comprobado que el material aislante de una máquina va degradándose progresivamente pudiendo llegar incluso a la destrucción de la misma. Por esta razón, se mide la actividad de DP en los equipos para conocer el estado de su aislamiento. Debido a que los transformadores son el activo más importante de una red eléctrica, el uso de esta técnica de medida es de vital importancia para llevar a cabo un correcto mantenimiento predictivo.

Hoy en día las descargas parciales son objeto de estudio y ensayo en numerosos laboratorios, en donde se aplican altas tecnologías para monitorizar y clasificar los parámetros que aportan valiosa información sobre sus efectos en distintos materiales aislantes. El PDS-100 es un aparato portátil que permite la detección de descargas parciales en tiempo real de manera rápida y sencilla.

Los ensayos de recreación de DP en el laboratorio, se llevan a cabo de acuerdo con la norma IEC 60270 sobre medidas convencionales. Se confecciona un circuito de medida auxiliar para complementar y asegurar con precisión que las medidas tomadas con el PDS-100 son correctas.

Para establecer una metodología segura, se han seguido las pautas establecidas por la norma UNE 207020:2012 y el Real Decreto 614/2001 de 8 de Junio. La medida de DP suele efectuarse en subestaciones o en laboratorios, donde hay alta tensión. Es preciso realizar estas medidas de seguridad para salvaguardar la integridad de las personas presentes en entornos de tensión.

Este trabajo es la continuación del Trabajo de Fin de Grado, que se presenta en Julio de 2013, “Manual PDS-100: dispositivo portátil de inspección de descargas parciales mediante la

medida de energía electromagnética en el espectro de RF” de Alberto Checa Hernández, del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid.

1.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo de fin de Grado es utilizar el PDS-100 en dos tipos de ensayos, que consisten en reproducir de manera segura descargas parciales internas y superficiales en unos objetos de ensayo en el laboratorio.

En primer lugar se aplica tensión a los objetos de ensayo para provocar las DP y se monitoriza su actividad con el programa *PDCheck* de *TechImp Systems S.r.l.* A continuación se mide la actividad de RF emitida por las DP con el PDS-100, procediendo así a clasificarlas y analizarlas con más detalle. Las DP internas y superficiales recreadas en el laboratorio se pueden distinguir según su espectro en frecuencia. Se comprueba el correcto funcionamiento de este equipo y su eficacia para medir DP con éxito.

1.2. Estructura del documento

La estructura de este trabajo está formada por un primer capítulo que define los aspectos característicos de las DP. Se explica la naturaleza de estos fenómenos para entender mejor su impacto sobre los elementos aisladores de los equipos eléctricos.

El segundo capítulo hace referencia a las antenas y trata sobre el funcionamiento y la utilidad de éstas a la hora de captar la energía de las ondas electromagnéticas provenientes de las descargas parciales. En primer lugar se habla de aspectos básicos de las antenas para definir su funcionamiento. Posteriormente se profundiza en ciertos tipos de antenas que se emplean en el apartado de medidas y ensayos realizados en el laboratorio, como es la antena monopolo que usa el PDS-100.

En el siguiente apartado se explica el funcionamiento del PDS-100 así como sus características principales. Se definen el modo analizador de espectro y el modo de tiempo resuelto con los que el PDS-100 realiza las medidas.

El apartado del ensayo recoge toda la actividad de DP registrada en el laboratorio con el PDS-100. Se analizan e interpretan los datos obtenidos para clasificar las DP.

Por último, se expone un apartado de presupuestos en el que se estiman los costes del uso de la herramienta PDS-100 para la detección de DP.

2. TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES EN LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS

En este apartado se definen los aspectos más relevantes de las descargas parciales y cómo afectan al funcionamiento de los equipos eléctricos. Se habla también de la manera de clasificarlas y analizarlas.

2.1. Qué son las descargas parciales

Se define una descarga parcial como descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ser o no adyacente a un conductor [1].

Las descargas parciales son fenómenos que se dan en los aislantes de los equipos eléctricos, los cuales se ven sometidos a un campo eléctrico lo bastante fuerte para que el medio se ionice. Si esta ionización es suficientemente grande se produce una avalancha de electrones que provoca la ruptura dieléctrica en algún lugar situado entre electrodos a potencial y tierra, formándose un pequeño arco que desgasta el material y se extingue al cabo de pocos nanosegundos [2].

Las DP aparecen en cualquier tipo de aislante y lo degradan. Además de actuar sobre otros equipos eléctricos, las DP ocasionan daños en los transformadores, que son el activo más importante de la red eléctrica. Un buen mantenimiento es algo indispensable para prolongar su vida en servicio. El aceite aislante de la cuba del transformador se degrada con la presencia de DP. Suelen ser descargas internas que descomponen el aceite generando ozono y facilitando la aparición de más DP [3].

Las descargas parciales constituyen un problema para la vida útil de los equipos eléctricos y por ello es fundamental la prevención y detección de estos fallos para así poder evitar o paliar los efectos negativos que provocan sobre el aislamiento.

2.2. Tipos de rotura de aislantes sólidos

Los aislantes no son perfectos y en muchas ocasiones tienen defectos e irregularidades como poros o pequeñas bolsas de gas denominadas vacuolas. Es en estas irregularidades donde se producen las descargas parciales y también se pueden dar en burbujas de un líquido aislante, aisladores agrietados y juntas. Las DP deterioran el material, pudiendo llegar incluso a su destrucción. Estas descargas son un síntoma inequívoco del envejecimiento de un aislamiento y de su consecuente degradación. Otros factores que influyen de manera directa sobre la degradación de un aislante son el efecto térmico, el mecánico, el correspondiente a las condiciones ambientales y al estado del aislamiento. Además de los factores anteriores, las DP también dependen del nivel de tensión aplicado.

En un aislante se pueden dar los siguientes tipos de ruptura [4]:

- Ruptura intrínseca: se da únicamente a un valor de temperatura dado, para una rigidez dieléctrica del material máxima y a una tensión de duración inferior a 10 ns. Este tipo de ruptura no es frecuente.
- Ruptura térmica: el efecto de una temperatura elevada puede destruir el material. Este exceso de temperatura es provocado por los pulsos de corriente de las DP.
- Ruptura electromecánica: un campo eléctrico suficientemente elevado crea unas fuerzas de atracción entre los elementos a mayor diferencia de potencial. Si estas fuerzas son suficientemente grandes pueden deformar y destruir el material aislante.
- Ruptura electroquímica: las DP descomponen los materiales produciendo ozono y óxidos de nitrógeno que favorecen la aparición de más DP. Las reacciones químicas pueden alterar la composición del material aislante.
- Ruptura por descargas superficiales: se produce cuando el aislante se ve sometido a potencial durante un largo periodo tiempo.
- Ruptura por descargas parciales internas: se dan en huecos o imperfecciones en el interior de los aislantes destruyendo el aislante. Son las más significativas.

Los tipos de ruptura que se dan con más asiduidad son las relacionadas con el envejecimiento del material. Destacan las rupturas electroquímica, por DP superficiales y por DP internas.

En la Fig. 2.1 se observa la disminución de la rigidez dieléctrica con el paso del tiempo.

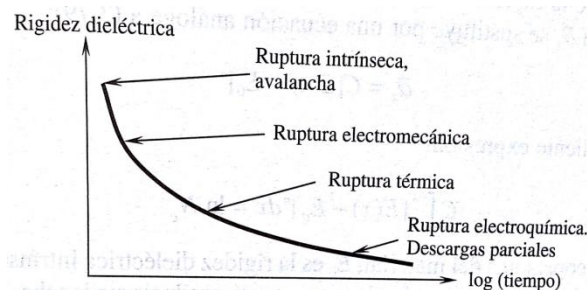


Fig. 2.1. Mecanismos de ruptura de un aislamiento [4]

Las DP se producen a tensiones nominales, lo que incrementa su cuantía. Se manifiestan en los aparatos en forma de pulsos -de corriente o tensión- de breve duración (inferiores a 1 μ s). No obstante, las DP también pueden presentarse de forma más continuada, como una sucesión de pulsos en el tiempo. Esta sucesión de pulsos se denomina *tasa de repetición de pulsos* y se denota con la letra n [1]. Estos pulsos son de baja energía y se dan en un rango de frecuencias amplio. Esta actividad está relacionada con la frecuencia de servicio, habitualmente 60 Hz en América y Japón y 50 Hz en Europa. Se producen pulsos de corriente cuando la tensión de servicio crece o decrece. A mayor frecuencia se producirán mayor número de pulsos de DP [5].

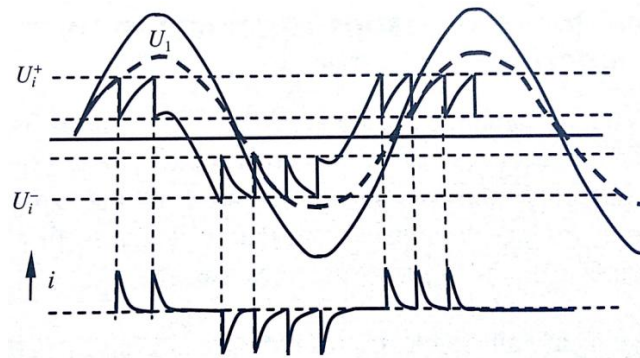


Fig. 2.2. Descargas parciales en una cavidad a corriente alterna [4]

En el momento en que se alcanza la tensión necesaria para provocar la ruptura del dieléctrico $-U_1$ se produce una descarga de tensión U_i que lleva asociada una onda de corriente. Las descargas parciales se producen en las fases de crecimiento de los semiciclos positivo y negativo. Si la actividad de DP internas es muy continuada, se degrada el material por el efecto térmico que llevan asociadas las corrientes debilitándolo hasta su destrucción definitiva [4].

2.3. Métodos para la clasificación de DP

Se pueden detectar DP de varias maneras. Atendiendo a las propiedades físicas de las DP, algunas de las variables utilizadas corresponden a los siguientes aspectos [2]:

1. Pulsos de corriente
2. Calor
3. Radiación electromagnética
4. Sonido
5. Reacciones Físico-Químicas

Partiendo de la posibilidad de detectar algunas de las variables anteriores, se desarrollan unas técnicas de detección, las cuales son [2]:

1. Técnicas eléctricas
2. Técnicas de RF
3. Técnicas visuales
4. Técnicas acústicas
5. Técnicas químicas

Las DP se pueden analizar según la información que proporcionan los siguientes parámetros [6]:

1. Tensión (mV): se aplica a objetos inductivos (medida directa).
2. Carga (pC): representa la carga aparente de DP. Se aplica en objetos capacitivos y requiere calibrar cada objeto de medida. Usual en laboratorios de ensayo o fábricas.
3. Corriente (mA): se usa en caso de emplear transformadores de corriente para realizar la medida.
4. Ganancia (dBm): se utilizan en analizadores de espectros.

Atendiendo a los aspectos anteriores, en el presente trabajo se opta por medir mediante radio frecuencia –técnicas RF- captando la radiación electromagnética de las DP con el PDS-100, obteniendo unos valores en ganancia –dBm- para un espectro de frecuencia.

Algunos métodos de clasificación de descargas parciales son los que se muestran a continuación:

- Patrones PRPD: se mide entre los terminales de la impedancia superponiendo el resultado obtenido a una onda de tensión de 50 Hz.
- Mapas T-F
- Mapa PRH-PRL

2.4. Tipos de descargas parciales

A continuación se definen con mayor detalle los tipos de descargas parciales. Según la naturaleza de las DP, afectan de una manera u otra a los materiales aislantes.

Por ejemplo, algunos aislantes como los formados por polímeros orgánicos se degradan a más velocidad que otros materiales ya que en ellos se presenta el fenómeno de arborescencia o *treeing* -Fig. 2.3-. El campo eléctrico puede provocar la aparición de corrientes que se expanden con forma de ramificación causando una degradación progresiva en el material hasta llegar a la ruptura final del mismo [6]. Este fenómeno suele darse cuando hay alta tensión.

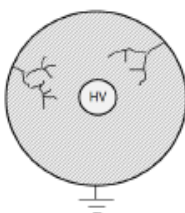


Fig. 2.3. Arborescencia en un aislante [7]

2.4.1. Descargas parciales internas

Las DP internas son las más significantes porque dañan el material aislante directamente hasta su rotura. Pueden aparecer a tensiones nominales. Suelen darse en las irregularidades de los materiales aislantes. La facilidad con la que se dan las DP internas es inversamente proporcional a la rigidez dieléctrica del medio donde se producen. Se dan habitualmente en las vacuolas de gas que se encuentran en los aislantes por un defecto de fabricación o bien por los efectos eléctricos, químicos, térmicos o mecánicos que puede sufrir el material. La Fig. 2.4 representa las descargas en el interior de las imperfecciones del material aislante [5] [2].

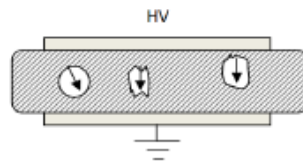


Fig. 2.4. Descarga en una cavidad interna [7]

La descarga formada en el interior de las vacuolas se distribuye en función de la polaridad dentro de la misma. La descarga crea un campo eléctrico que se suma al campo eléctrico creado por la tensión de servicio. La Fig. 2.5 muestra cómo se distribuyen las líneas de campo eléctrico en el interior de una vacuola esférica.

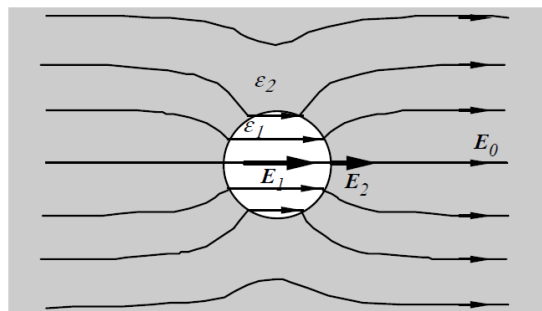


Fig. 2.5. Distribución del campo eléctrico en una vacuola [8]

La siguiente ecuación explica matemáticamente esta distribución:

$$E_1 = E_0 \frac{3\epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \quad (V/m) \quad [8]$$

Donde:

E_1 – Campo eléctrico en el interior de la vacuola (V/m)

E_0 – Campo eléctrico homogéneo en un punto lejano a la vacuola (V/m)

ϵ_1 – Permitividad dieléctrica en el interior de la vacuola (F/m)

ϵ_2 – Permitividad dieléctrica del material asilante donde está la vacuola (F/m)

2.4.2. Descargas superficiales

Suelen darse en ambientes contaminados o con mucha humedad relativa. Aparecen con más facilidad que otros tipos de DP ya que no es necesario un nivel muy alto de tensión. Se producen entre un elemento conductor y otro elemento a distinto potencial, como por ejemplo el aislante de dicho conductor [5] [2]. La corriente surca la superficie del aislante buscando un elemento a menor potencial. Esto se observa en la Fig. 2.6.

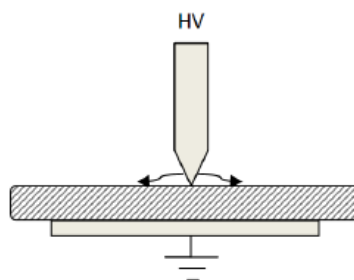


Fig. 2.6. Descarga superficial [7]

2.4.3. Descargas por efecto corona

El efecto corona se produce por el exceso de ionización en un punto determinado del espacio que hace que aparezcan grandes gradientes de campo eléctrico. El medio ionizado permite el paso de corriente lo que produce pérdidas. Por este motivo es necesaria la detección de este fenómeno [5] [2].

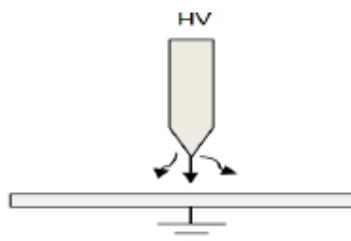


Fig. 2.7. Efecto corona [7]

En ocasiones, este fenómeno es visible a simple vista y emite ruido acústico. Este efecto aparece más en equipos de alta tensión donde los gradientes de campo eléctrico son mayores.

2.5. Medición de descargas parciales

Los sistemas de medida normalizados son los que se realizan con divisores resistivo-capacitivos, los cuales se conectan en paralelo con el objeto que se desea analizar. La norma IEC 60270, con correspondencia en la UNE-EN 60270, sobre métodos de medida convencionales acerca del método eléctrico, establece varios circuitos de medida, entre los que destacan los circuitos directo e indirecto de detección –apartados 2.5.1.1 y 2.5.1.2 respectivamente-.

La detección de DP suele llevarse a cabo mediante sensores inductivos y transformadores de alta frecuencia (HFCT). Estas medidas tienen como inconveniente la necesidad de desconectar los equipos a medir antes de realizar la medida para analizar el ruido. Otro inconveniente de éstos es que no permiten la localización exacta de más de una fuente de DP.

La norma IEC 64278, pendiente de publicación, trata sobre métodos de medida no convencionales para medir con sensores electromagnéticos, como es el caso de las antenas, sensores inductivos, capacitivos y direccionales. Se mide en el espectro UHF –*Ultra High Frequency*- con antenas, las cuales no necesitan del contacto eléctrico para la medida de DP ya que captan la radiación que desprenden. A continuación se habla de los circuitos de medida convencionales y no convencionales.

2.5.1. Circuitos para la medida de descargas parciales: medida convencional según IEC 60270

Los circuitos de medida convencionales son los especificados en la IEC 60270. Esta norma establece los criterios para medir DP con alta tensión tanto en corriente continua como en corriente alterna con frecuencias de hasta 400 Hz. Es preciso que haya baja impedancia entre los aparatos de medida y el objeto para medir los pulsos de corriente que producen las DP [1].

2.5.1.1 Circuito directo de detección

La impedancia se sitúa en serie con el objeto de ensayo. La polaridad de los pulsos de las DP es la misma que la tensión de entrada [1].

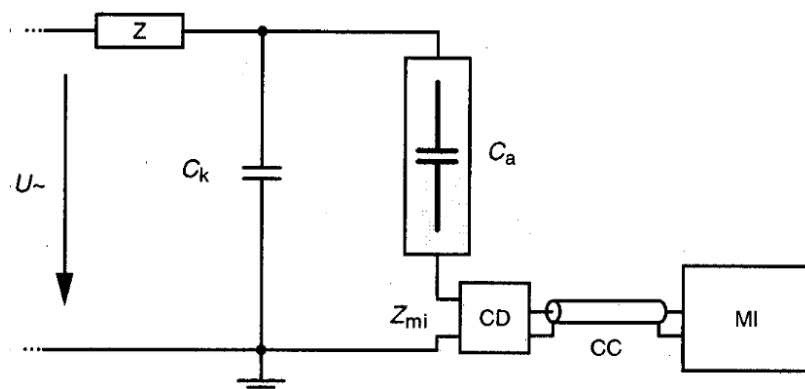


Fig. 2.8. Circuito directo de detección [1]

El objeto de ensayo se encuentra en serie con el dispositivo de acoplamiento CD.

2.5.1.2 Circuito indirecto de detección

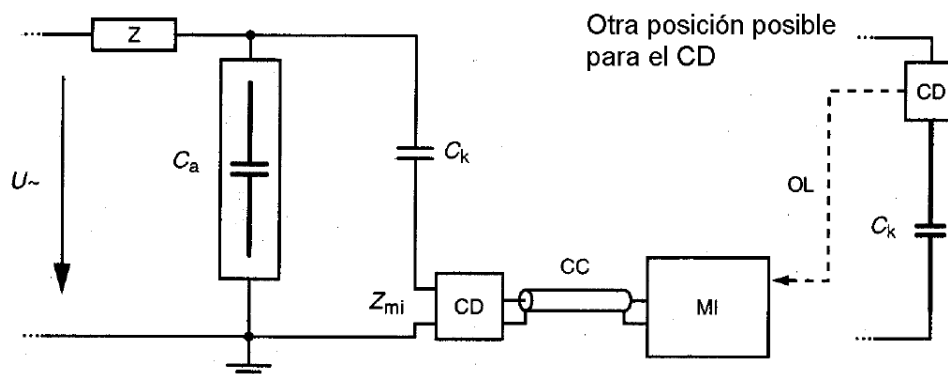


Fig. 2.9. Circuito indirecto de detección. [1]

En este circuito –indirecto- la impedancia de entrada del sistema de medida Z_{mi} está en serie con el condensador de acoplamiento C_k . Los pulsos de DP tienen una polaridad opuesta a la tensión aplicada.

Común a ambos circuitos, los elementos para formarlos son:

- U_{\sim} : Fuente de alta tensión de corriente alterna.
- Z : Filtro para reducir el ruido e impedir que los pulsos de las DP circulen hasta la fuente.
- CC : Cable de Conexión al instrumento de medida.
- MI : Instrumento de Medida.
- OL : Enlace óptico.
- Z_{mi} : Impedancia de entrada del sistema de medida por donde circulan los pulsos de DP.
- CD : Dispositivo de acoplamiento.
- C_a : Objeto de ensayo considerado como una capacidad.
- C_k : Condensador de acoplamiento que facilita el paso de los pulsos de DP de alta frecuencia.

2.5.2. Circuitos para la medida de descargas parciales: medida no convencional según IEC 62478

La norma IEC 62478, pendiente de publicación, tiene como alcance establecer otros sistemas no contemplados en la medida convencional de detección de DP como son los métodos acústicos y electromagnéticos. Estos métodos posibilitan la detección de varias fuentes de DP porque es posible analizar los datos en el dominio del tiempo. Estos métodos de medida recogen mediciones de un amplio rango de frecuencias, concretamente los espectros de alta frecuencia - *High Frequency* -(HF), muy alta frecuencia -*Very High Frequency*- (VHF) y ultra alta frecuencia (UHF) [5]. Las bandas de frecuencia se muestran en el Anexo II.

2.5.3. Medición de descargas parciales por radio frecuencia

Los pulsos de corriente que llevan asociadas las DP producen unas ondas electromagnéticas, las cuales pueden detectarse y medirse con antenas. La técnica de detección de DP mediante antenas es un método que evita la necesidad de estar en contacto con el equipo, lo cual se traduce en seguridad para el usuario. Es aprovechable en el uso de subestaciones y aparataje de alta tensión.

Estos fenómenos emiten ondas electromagnéticas en los espectros de muy alta frecuencia (VHF) y ultra alta frecuencia (UHF), definidos en el Anexo II. En la actualidad cada vez se emplean más estos métodos de detección de radio frecuencia, denominados sensores UHF.

La creciente y constante evolución en la industria hace que cada vez existan más señales de ruido electromagnético, en adelante denominado ruido, que interfieren con los aparatos de medida. Cada vez es más necesario desarrollar nuevos métodos de medida que sean de gran precisión para identificar correctamente las fuentes de DP. El ruido también puede llegar a incrementar el pulso de una descarga parcial superponiéndose ambas señales lo que perjudica el resultado de la medida. Esto se da con más asiduidad en elementos pasivos de equipos electrónicos [2]. A diferencia de otras técnicas de medición, las de detección acústica y de radio frecuencia sí permiten detectar más de una fuente de DP.

2.6. Métodos de clasificación de descargas parciales

Los principales métodos de analizar las DP son los que se presentan a continuación. Para analizar posibles fuentes de DP se trabaja normalmente sobre unos resultados medidos con anterioridad. Al procesarse las medidas mediante estos métodos de clasificación se pueden detectar las diversas fuentes de DP.

2.6.1. Patrones PRPD

Para detectar los distintos tipos de descargas parciales –superficiales, internas y corona– el método más empleado es el de los denominados patrones PRPD –*Phase-Resolved Partial Discharge*–. Este método se basa en una teoría estocástica que consiste en aplicar un análisis estadístico a los procesos de DP. Así se consigue determinar ciertos parámetros físicos determinantes de las DP. Se estiman los valores de los parámetros de los pulsos de DP, así como sus errores correspondientes, a partir de unos patrones de medida, lo que evita tener que realizar simulaciones [2]. Los algoritmos de medida permiten llevar las mediciones con exactitud en ambientes en los que hay ruido, lo cual es muy ventajoso. Durante años, este método ha sido el utilizado para detectar posibles fuentes de descargas parciales ocultas en el ruido [9].

Los patrones PRPD se representan superponiendo los valores de las DP a una onda de tensión sinusoidal a la frecuencia de operación que corresponda.

Se deben observar la cuantía, situación y valor de las señales obtenidas en las mediciones para registrar las DP. En función de estos datos se podrá clasificar el tipo de

descarga parcial que se está midiendo. En los equipos reales suelen darse varias fuentes de descargas parciales simultáneas y no siempre es posible la detección de más de una de estas fuentes [10].

La Fig. 2.10 representa el patrón PRPD típico de las DP internas.

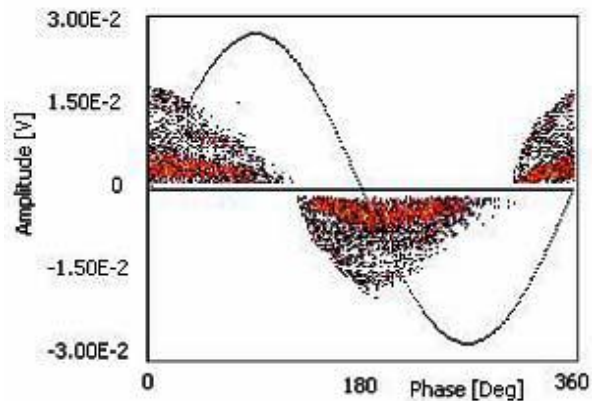


Fig. 2.10. Diagrama PRPD de DP internas [10]

Puede observarse que las nubes de puntos o *clusters* que representan los pulsos de las descargas parciales internas intersectan con la sinusoide de tensión en su paso por cero.

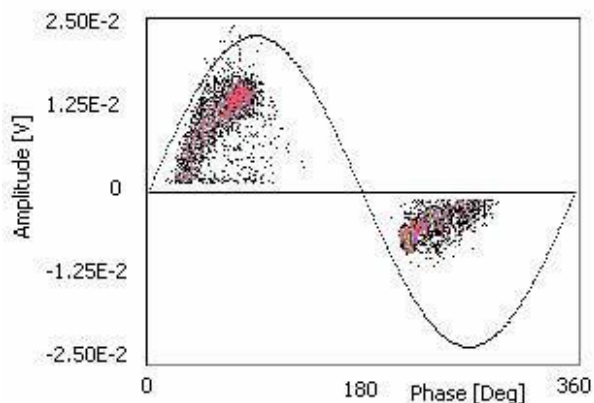


Fig. 2.11. Patrón de descargas superficiales [10]

En el patrón PRPD correspondiente a las descargas superficiales -Fig. 2.11- se aprecia que las descargas superficiales aparecen al principio de cada semiciclo de la onda de tensión sinusoidal.

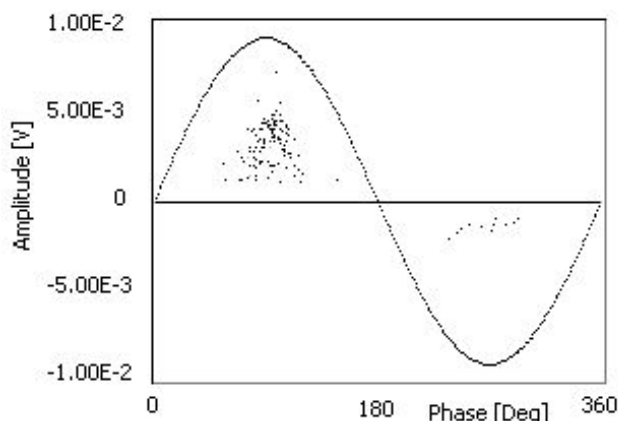


Fig. 2.12. Patrón PRPD del efecto corona [10]

En la Fig. 2.12 se muestran los patrones PRPD del efecto corona. El patrón PRPD de este efecto tiene la característica de que los pulsos suelen aparecer con una magnitud prácticamente constante en el semiciclo negativo de la onda de tensión. También puede darse en el positivo si la tensión es muy alta [2].

Las mediciones suelen realizarse en presencia de ruido causado por las señales de radio, televisión, sistemas de comunicaciones, internet, etc. Esto dificulta la correcta interpretación de los patrones PRPD.

2.6.2. Mapas T-F

Los pulsos de las DP tienen una forma distinta de los pulsos provenientes del ruido. Atendiendo a esto se pueden agrupar los pulsos según su naturaleza en los mapas de tiempo-frecuencia. Consiste en representar sobre un gráfico de tiempo-frecuencia la duración y el ancho de banda de cada pulso registrado. Dado que los pulsos de DP tienen otra duración distinta al ruido aparecen en un lugar distinto en el diagrama T-F. Se transforman las series temporales de DP en sub-series de tiempo correspondientes a los pulsos con la forma de onda similar, separadas entre sí, tal y como se observa en la Fig. 2.13. Cada nube de puntos representa una fuente de DP [2].

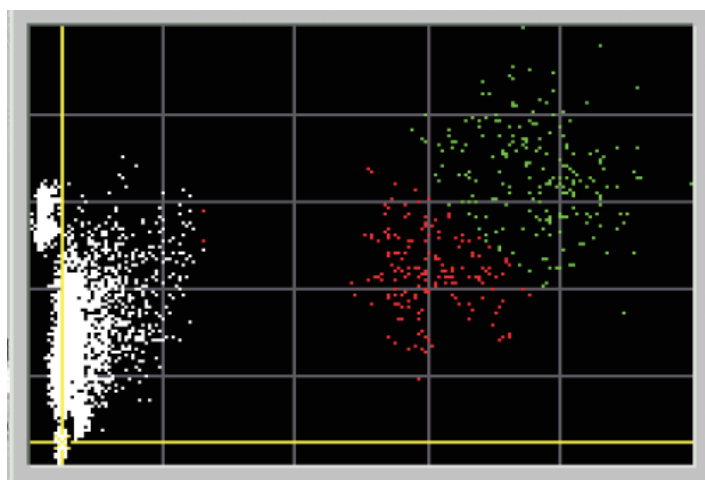


Fig. 2.13. Representación de DP en un plano T-F [9]

Para poder representar estos pulsos deben seguirse una serie de pasos previos para realizar la transformación. En primer lugar se normalizan las señales de los pulsos de DP en el dominio del tiempo ($s(t)$):

$$\hat{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad [2]$$

Se calcula, para el dominio del tiempo y de la frecuencia, la desviación típica normalizada:

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \hat{s}(t)^2 dt} \quad [2]$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\hat{s}(f)|^2 df} \quad [2]$$

Siendo:

f – frecuencia

$\hat{s}(f)$ – transformada de Fourier de $\hat{s}(t)$

t_0 – es el centro de gravedad temporal de la señal normalizada:

$$t_0 = \int_0^T t \hat{s}(t)^2 dt \quad [2]$$

Basta con dar valores a la duración y ancho de banda equivalentes para poder representar estos puntos en un plano T-F.

2.6.3. Mapa PRH-PRL

Este método utiliza la potencia emitida por los pulsos de DP. Consiste en clasificar según la frecuencia –alta o baja- el porcentaje de potencia de cada señal, separando las señales de DP y ruido. Se representa el parámetro PRH *-Power Ratio for High frequency-* en función del parámetro PRL *-Power Ratio for Low frequency-*. Cada pulso medido se representa con un punto en este gráfico, es decir, tiene un valor de PRH y otro de PRL [2].

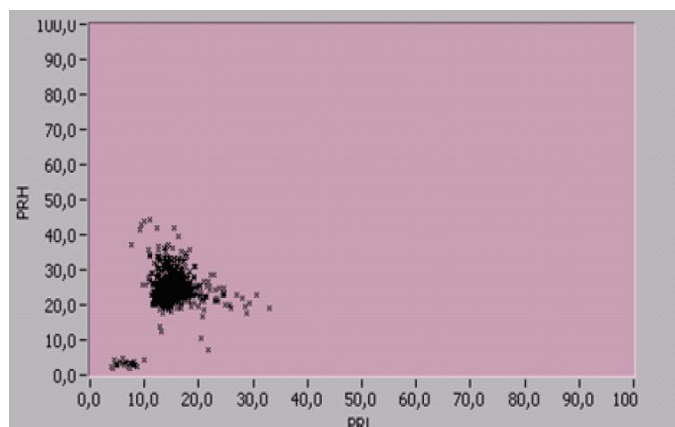


Fig. 2.14. Ejemplo de mapa PRH-PRL [2]

Para hallar estos parámetros se emplean las fórmulas siguientes:

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_t} |s(f)|^2} [2]$$

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_t} |s(f)|^2} [2]$$

Siendo:

f_{1H} , f_{2H} – Banda de frecuencia alta

f_{1L} , f_{2L} – Banda de frecuencia baja

f_t – Frecuencia máxima bajo análisis

$s(f)=|FFT(s(t))|$ – la magnitud de la FFT (transformada rápida de Fourier) de la señal del pulso de DP $-s(t)-$

2.7. Ventajas e inconvenientes de estos métodos

Interpretar estos mapas es fundamental y se han aplicado con resultados positivos en equipos industriales.

En los métodos de detección eléctricos a veces es necesario desconectar las fuentes de alimentación para ajustar los patrones de medida o no es posible determinar con exactitud el lugar preciso en el que se está produciendo la descarga parcial. Debido a esto se deben emplear otros métodos de detección de DP para complementar la información obtenida. Cada vez se emplean más las tecnologías de detección de DP acústica y por radio frecuencia. También son muy eficaces los sensores inductivos de alta frecuencia *-High Frequency-* (HF) obteniendo resultados satisfactorios.

Como inconveniente de la detección acústica cabe mencionar que únicamente es detectable en sistemas que empleen aceite y papel como aislantes ya que sólo es detectable cuando las ondas acústicas se propagan a través del aceite.

La ventaja de la detección de DP mediante antenas es la posibilidad de medir sin necesidad de estar en contacto o en conexión con los equipos de fallo y permiten localizar con exactitud el problema.

El principal inconveniente que presentan los sistemas de detección por radio frecuencia es que se puede confundir o pasar inadvertida una medición de DP debido a la presencia de ruido. Las bandas de ruido se describen en el Anexo II. Otro inconveniente de este método es que dependen de las cualidades de la antena con la que se mida en el momento preciso. Si las cualidades de una antena no son las adecuadas se podría obviar el fallo que se está buscando.

Las DP son muy perjudiciales para el aislante de los equipos hasta el punto de llegar a destruirlos. Pueden aparecer en todo tipo de aislantes –sólidos, líquidos y gaseosos-. En este trabajo se presenta un método eficaz de detección mediante RF, que es la herramienta PDS-100.

3. ANTENAS PARA LA MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES

Las antenas son hoy en día un elemento fundamental en la sociedad debido a sus funciones en los sistemas de comunicaciones, tanto de audio como de vídeo. Estos elementos inalámbricos se encuentran presentes en muchos ámbitos cotidianos como en teléfonos móviles, routers, coches, aviones, satélites espaciales, etc [11]. Se usan también para la captación y medida de las ondas electromagnéticas que emiten las DP.

El Anexo I trata sobre una breve introducción histórica a las antenas.

3.1. Tipos de antenas:

Las antenas se pueden clasificar según los siguientes tipos: antenas de alambre, de apertura, de apertura plana, de microstrip, de reflexión, de lentes y arrays. A continuación se explican estos tipos:

3.1.1. Antenas de alambre

Representan la clase más común ya que son las más empleadas. Un buen ejemplo son los dipolos. Pueden tener varios tipos de configuraciones como circulares, con forma de elipse o rectangulares. Por su sencillez, su configuración más habitual es la circular. Se usan en prácticamente toda la industria como, por ejemplo, coches, aviones, edificios, diversos aparatos electrónicos, etc [12] [13].

3.1.2. Antenas de apertura

Permiten emplearse a altas frecuencias gracias a su constante desarrollo. Se emplean en el sector aeronáutico y espacial debido a su fácil montaje y robustez, gracias al dieléctrico que las protege en condiciones extremas. Están constituidas por una guía con forma de pirámide, cilindro, etc [12] [13].

3.1.3. Antenas de apertura plana

Son antenas de apertura pero rediseñadas para reducir sus dimensiones y sus costes de fabricación. Un ejemplo de apertura plana es la vivaldi, de la que se sabrá con más detalle en párrafos posteriores [12] [13].

3.1.4. Antenas de microstrip

Se han desarrollado notablemente en los últimos años debido a sus reducidas dimensiones y su adaptación a las variantes y crecientes frecuencias industriales. Son de fabricación sencilla ya que están formadas por un parche conductor sobre un material semiconductor denominado substrato dieléctrico aterrizado [12]. Además son resistentes. Permiten varias configuraciones en función del diseño del parche metálico. Se aplican en aviones, satélites, misiles balísticos, coches, etc [13].

3.1.5. Antenas de reflexión

Son del mismo tipo que las descritas con anterioridad con la novedad de incorporar un elemento reflector para mejorar sus cualidades. Estas antenas han supuesto un gran avance en el ámbito de las comunicaciones aeroespaciales. Han permitido la comunicación a grandes distancias, lo que ha sido fundamental en la exploración espacial. Cabe mencionar la antena parabólica, de plano de esquina, cilíndrica y esférica [12] [13].

3.1.6. Antenas de lentes

Están formadas por lentes capaces de convertir varias formas de energía divergente en ondas planas gracias a su diseño de construcción. Destacan por su gran directividad. Por sus propiedades se emplean en las antenas parabólicas, sobre todo a altas frecuencias, ya que el tamaño sería grande y costoso a baja frecuencia [12] [13].

3.1.7. Antenas array

Son antenas formadas por varios elementos radiantes para conseguir, en su conjunto, unas características determinadas. Se consiguen los parámetros de radiación deseados variando la geometría de su estructura. Un ejemplo de antena de esta categoría es la Yagi-Uda o la logarítmico-periódica, de la que se hablará posteriormente [12] [13].

3.2. Aspectos generales:

3.2.1. Antena

Dispositivo conductor de diversas formas de diseño acoplado a la salida del equipo cuya función es enlazar y comunicar varios dispositivos a través de ondas de energía electromagnética [11]. Una antena es considerada emisora cuando transforma la tensión que se le aplica en la base en ondas electromagnéticas, proyectando éstas últimas a un espacio. Si el

principio de funcionamiento es el contrario, entonces se trata de una antena receptora. Esto se consigue produciendo corriente a partir de la tensión de alimentación. Esta corriente es la que radia hacia el espacio un campo electromagnético variable en el tiempo. El campo magnético propagado induce corrientes en los aparatos receptores transmitiendo así la información [14].

3.2.2. Diagrama de radiación

Es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en las distintas direcciones del espacio. Nos indica la potencia radiada o recibida por la antena en una región del espacio. La antena se sitúa en el origen de coordenadas y se toma el valor máximo de la magnitud como referencia al resto de valores. El campo eléctrico se representa en coordenadas esféricas [15].

Según su diagrama de radiación, las antenas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Antena isotrópica: es aquella que radía la misma energía electromagnética en todas las direcciones del espacio por igual. Es físicamente imposible de hacer ya que no tiene pérdidas. Se trata de una antena que no existe en la realidad si no que es un modelo ideal empleado como referencia para expresar las propiedades directivas de una antena [13].

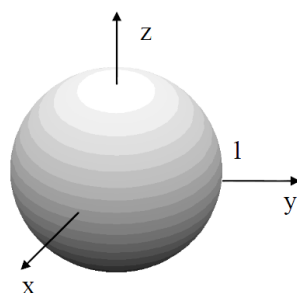


Fig. 3.1. Patrón de radiación isotrópico [14]

- La antena direccional: es una antena que recibe o envía más energía electromagnética en unas direcciones que en otras. Suelen pertenecer a esta categoría las antenas cuya directividad máxima es mucho mayor a la de un dipolo de media onda [13].

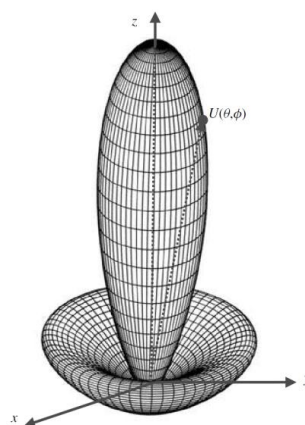


Fig. 3.2. Patrón de radiación direccional [13]

- Antena omnidireccional: presenta un diagrama de radiación que se da a lo largo de un plano y en una dirección de un plano ortogonal. Radia en varias direcciones simultáneamente [13].

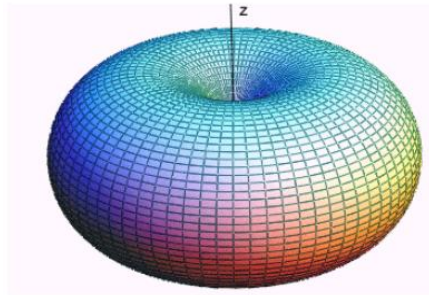


Fig. 3.3. Patrón de radiación omnidireccional [11]

3.2.3. Ganancia

Es el valor máximo del diagrama de radiación. Relaciona el campo electromagnético generado por una antena en una dirección respecto a la antena de referencia [16]. Esta antena de referencia es un radiador isotrópico ideal, explicado en el punto anterior. Se puede dar en dBi o en dBi, decibelios respecto a la antena isotrópica [14].

La ganancia en potencia de una antena se expresa como:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot U(\theta, \Phi)}{P_i} \text{ (adimensional) [12]}$$

G – Ganancia (adimensional)

$U(\theta, \Phi)$ – Intensidad de radiación (W/sr)

P_i – Potencia total entrante (W)

θ – Ángulo azimutal

Φ – Ángulo de elevación

La ganancia también puede expresarse como:

$$G(\theta, \Phi) = e \cdot D(\theta, \Phi) [13]$$

Siendo:

e – La eficiencia de la antena

D – La directividad de la antena en función de los ángulos azimutal y de elevación

A continuación, en la Fig. 3.4 se muestra un ejemplo de la orientación del campo eléctrico de un dipolo elemental. El campo se puede descomponer en dos coordenadas en función de los ángulos anteriormente expuestos.

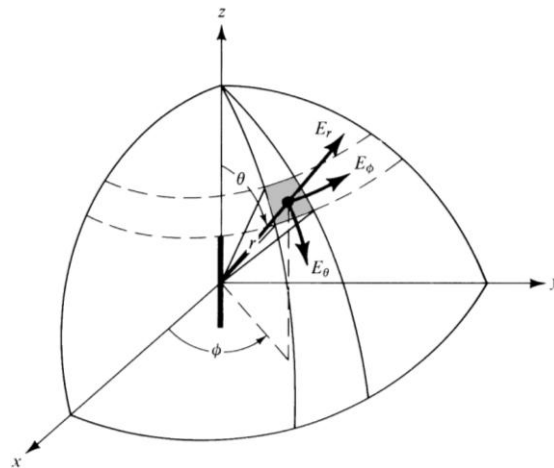


Fig. 3.4. Orientación del campo eléctrico generado por un dipolo [13]

3.2.4. Directividad

Es el nombre que se le da a la máxima ganancia directiva de una antena. Hace referencia a la intensidad de radiación radiada en una dirección respecto a la intensidad de radiación de un radiador isotrópico [13]. Este parámetro se expresa matemáticamente como:

$$D = \frac{U(\theta, \Phi)}{U_0} = \frac{4 \cdot \pi \cdot U(\theta, \Phi)}{P_{rad}} \quad [15]$$

Siendo:

D – Directividad (adimensional)

U_0 – Intensidad de radiación de un radiador isotrópico (W/sr)

$U(\theta, \Phi)$ – Intensidad de radiación en la dirección dada por los ángulos (θ, Φ) (W/sr)

P_{rad} – Potencia total radiada (W)

La directividad es un parámetro adimensional aunque puede expresarse, en algunos casos, en decibelios (dB) referidos a la unidad.

3.2.5. Intensidad de radiación

Es la potencia media temporal por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida en el Sistema Internacional de unidades es el W/sr (vatio por estereorradián) [17].

La intensidad de potencia se mide en la región de campo más lejano donde la potencia radiada es, en su mayoría, de carácter radioactivo [12].

Se expresa como:

$$U = r^2 \cdot W_{rad} \left(\frac{W}{sr} \right) \quad [17]$$

Donde:

U – Intensidad de radiación (W/sr)

r – Radio de radiación alrededor de la antena (m)

W_{rad} – Densidad de radiación (W/m²)

Un estereorradián es el ángulo sólido, cuyo vértice está en el centro de una esfera de radio r , formado por el arco superior cuya superficie esférica es equivalente a un cuadrado de lado r [13].

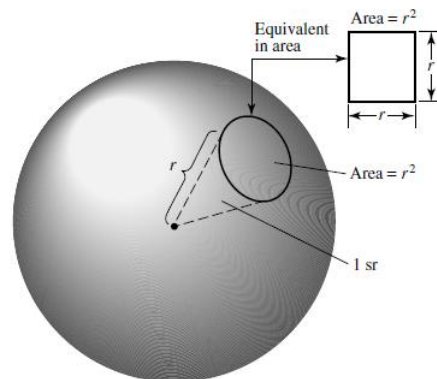


Fig. 3.5. Definición geométrica de estereorradián [13]

3.2.6. Densidad de potencia radiada

La potencia asociada a cualquier onda electromagnética puede definirse mediante el vector de Poynting. Este vector indica la dirección de propagación de la onda [13].

La densidad de potencia se expresa como:

$$W = E \times H \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad [17]$$

W – vector de Poynting (W/m²)

E – Intensidad de campo eléctrico (V/m)

H – Intensidad de campo magnético (A/m)

Se puede descomponer en una parte real y otra imaginaria. La parte real se denomina potencia radiactiva. Esta potencia radiactiva es la que podemos transmitir a un medio, por tanto se puede definir como potencia útil o aprovechable.

La parte imaginaria se corresponde a la potencia reactiva, la cual no puede ser transferible a un medio, por lo que se queda oscilando entre las distintas regiones de los campos [18].

3.2.7. Regiones de campo

El espacio que rodea a una antena se le puede dividir en tres regiones [13]:

1. Campo cercano reactivo
2. Campo cercano radiante o región de *Fresnel*
3. Campo lejano o región de *Fraunhofer*

En la región del campo más cercano a una antena (campo reactivo) se puede encontrar mayoritariamente potencia reactiva [18]. Esta zona se define en el siguiente rango de forma genérica para cualquier tipo de antena:

$$r < 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D_m^3}{\lambda}} \quad [13]$$

Siendo:

r – radio alrededor de la antena (m)

λ – longitud de onda (m)

D_m – dimensión mayor de la antena (m)

La región cercana o de campo radiante suele estar comprendida entre los siguientes límites:

$$0,62 \cdot \sqrt{\frac{D_m^3}{\lambda}} \leq r < \frac{2 \cdot D_m^2}{\lambda} \quad [13]$$

En la región de campo lejano la potencia que se transmite al medio es principalmente potencia radiactiva. Está delimitada por:

$$r > \frac{2 \cdot D_m^2}{\lambda} \quad [13]$$

3.2.8. Ancho de banda

Es el rango de valores de frecuencia en los cuales una antena opera dando unos resultados deseados [13]. Estos resultados deseados dependen de los valores de aquellos parámetros anteriormente descritos que interesen y satisfagan al usuario para el funcionamiento de su antena.

Se calcula de la siguiente manera:

$$W = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \cdot 100 \quad (\%) \quad [19]$$

BW – Ancho de banda en tanto por ciento – *BandWidth* por sus siglas en inglés-

- f_{\max} – Frecuencia máxima a la que opera la antena (Hz)
 f_{\min} – Frecuencia a la que comienza a operar la antena (Hz)
 f_0 – Frecuencia central (Hz). Se calcula como:

$$f_0 = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} \text{ (Hz)} \quad [19]$$

3.2.9. Rendimiento

El rendimiento o eficiencia de una antena determina las pérdidas que se producen en dicho aparato [13]. Relaciona las pérdidas con la potencia aprovechable.

En una antena se dan pérdidas debidas a 3 fenómenos físicos:

- 1º. Efecto Joule: son pérdidas que se deben al paso de la corriente de excitación por un conductor:

$$P_0 = R \cdot i_{ef}^2 \text{ (W)} \quad [18]$$

El balance de potencia en la antena queda de la siguiente manera:

$$P_i = P_{rad} + P_0 \quad [18]$$

- P_i – Potencia total de entrada (W)
 P_{rad} – Potencia radiada (W)
 P_0 – Pérdidas por efecto Joule (W)

La eficiencia debida al efecto Joule vendrá representada por e_c .

- 2º. Pérdidas debidas al dieléctrico presente en el medio [12]. Su eficiencia se expresa como e_d .

Pérdidas debidas a la reflexión de onda: dado que al emitir potencia de radiación lo que ocurre es que ésta se transmite de un medio con una impedancia a otro con otra impedancia diferente, la onda electromagnética se ve reflejada en parte. Esta energía da lugar a ondas estacionarias que no constituyen potencia útil y provocan ruido en la señal y más pérdidas por efecto Joule. Todo esto se traduce en pérdidas de potencia de transmisión.

Estas pérdidas, llamadas también pérdidas de retorno, se pueden calcular a través del coeficiente de reflexión dado por:

$$\Gamma = \frac{Z_{inc} - Z_m}{Z_{inc} + Z_m} \text{ (adimensional)} \quad [14]$$

Siendo:

- Γ – Coeficiente de reflexión (adimensional)
 Z_{inc} – Impedancia del medio desde el cual incide la onda (Ω)
 Z_m – Impedancia del medio al cual se transmite la onda (Ω)

La eficiencia de reflexión es:

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad [13]$$

La eficiencia total de la antena se expresa como el múltiplo de las eficiencias correspondientes a los distintos casos anteriores:

$$e = e_c \cdot e_d \cdot e_r \quad [13]$$

El rendimiento de una antena también se puede expresar de la siguiente manera:

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{pér}} \cdot 100 \quad (\%) \quad [18]$$

P_{rad} – Potencia radiada (W)

$P_{pér}$ – Potencia debida a las pérdidas (W)

e – Eficiencia de la antena (adimensional)

Se puede deducir que para que una antena sea eficiente y radíe o reciba la amplia mayoría de la potencia, debe de estar bien dimensionada. Esto se consigue dimensionándola acorde a una longitud de onda, habitualmente la octava parte $\lambda/8$ [13].

3.3. Parámetros de la antena en recepción:

3.3.1. Teorema de reciprocidad o de Lorentz

Si a un circuito se le aplica una corriente entrante I_A , ésta da como resultado una corriente saliente I_B . Si al mismo circuito se le aplica la corriente de entrada I_A en el lado de salida, entonces aparece una corriente I_B en el lado de entrada [13]. Este principio se ilustra en la Fig. 3.6:

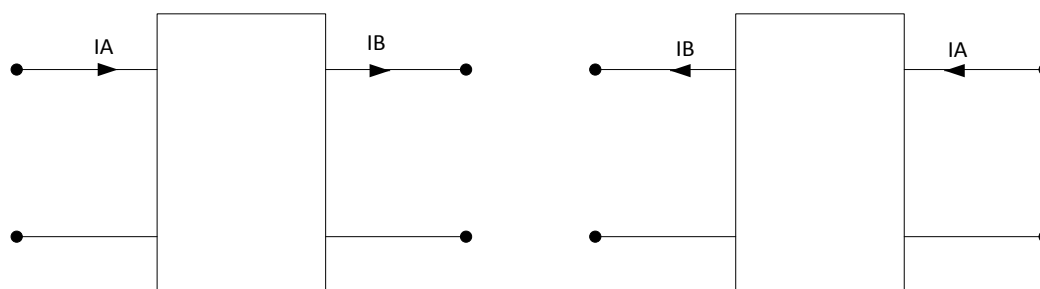


Fig. 3.6. Teorema de reciprocidad

Este modelo eléctrico es aplicable a elementos lineales y pasivos, por tanto, se puede aplicar al funcionamiento de una antena, excepto en los casos en los que las antenas estén fabricadas con materiales magnéticos.

Debido a este teorema se puede considerar que los parámetros, tales como el diagrama de radiación, definidos anteriormente, serán iguales para una antena en recepción que para la misma antena en modo emisión [13].

3.3.2. La impedancia de una antena

Es un aspecto fundamental ya que va ligada directamente con la eficiencia de dicho aparato. Es determinante a la hora de transmitir o recibir más o menos potencia. El comportamiento de una antena se puede entender como una impedancia en un circuito eléctrico, ya que se comporta de manera similar. Las antenas, al igual que las líneas eléctricas, se pueden considerar elementos de parámetros distribuidos. Por tanto se debe buscar siempre un acoplamiento óptimo entre las impedancias que componen los elementos del sistema. De no ser así se producirán las pérdidas, antes mencionadas, debidas a la reflexión de onda que se produce por la presencia de una discontinuidad en la impedancia [13].

Las pérdidas debidas al efecto Joule mencionadas con anterioridad se deben a esta impedancia interna de la antena, compuesta por una parte real o resistiva y una parte imaginaria o reactiva. La parte resistiva está relacionada con la resistencia de radiación y la parte reactiva puede ser tanto de carácter inductivo como capacitivo.

El circuito eléctrico equivalente de una antena es el que se muestra en la Fig. 3.7

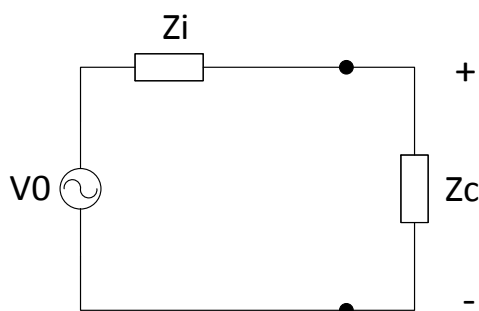


Fig. 3.7. Circuito equivalente de una antena [14]

El circuito equivalente se puede expresar mediante el equivalente Thévenin y la tensión aplicada es por tanto la de circuito abierto V_0 .

No obstante este circuito equivalente no es del todo real ya que la carga no está conectada físicamente a la antena y, por tanto, el circuito eléctrico quedaría abierto, por lo que no circularía corriente alguna.

Las antenas constan de una impedancia interna Z_i , además de la impedancia de la carga Z_c . Ambas impedancias son complejas, tienen una parte resistiva y otra reactiva por lo que se expresan de la siguiente manera:

$$Z_i = R_i + j \cdot X_i \quad (\Omega) \quad [20]$$

$$Z_c = R_c + j \cdot X_c \quad (\Omega) \quad [20]$$

- R – Resistencia (Ω)
- X – Reactancia (Ω)
- Z_i – Impedancia interna (Ω)
- Z_c – Impedancia de la carga (Ω)

No obstante la resistencia interna de la antena $-R_i-$ está formada por la resistencia que se opone al paso de corriente $-R_p-$ provocando pérdidas por calentamiento y otra resistencia de radiación $-R_r-$ que absorbe la potencia que recibe la antena o radía si es emisora.

$$R_i = R_p + R_r (\Omega) \quad [13]$$

- R_i – Resistencia interna de la antena (Ω)
- R_p – Resistencia eléctrica (Ω)
- R_r – Resistencia de radiación (Ω)

La resistencia de radiación se puede calcular de la siguiente manera:

$$R_r = \frac{P_{rad}}{I^2} (\Omega) \quad [13]$$

- P_{rad} – Potencia radiada (W)
- I – Corriente que circula por la antena (A)

3.3.3. Longitud efectiva

La longitud efectiva de una antena es la longitud de un dipolo ideal con distribución de intensidad constante a lo largo de toda su longitud [14]. La longitud efectiva de la antena viene expresada por:

$$l_{ef} = \frac{1}{I_0} \cdot \int_{-l/2}^{l/2} I(l) dl \quad [14]$$

Siendo l la longitud de la antena en metros (m) e I_0 la corriente de alimentación de la antena en amperios (A).

Otra manera de expresar la longitud efectiva de una antena es sabiendo que el producto del campo eléctrico, en las proximidades de una antena, y la longitud efectiva debe ser igual a la tensión del circuito abierto:

$$V_0 = -l_{ef} \cdot E \quad [14]$$

- V_0 – Tensión en circuito abierto (V)
- l_{ef} – Longitud efectiva (m)
- E – Amplitud del campo eléctrico (V/m)

3.3.4. Área efectiva

El área efectiva de una antena receptora hace referencia a la potencia media recibida por una carga adaptada en relación con la densidad de potencia media. Esta potencia que recibe la antena es la que finalmente emplea la carga asociada a la impedancia de la misma, es decir, es la potencia útil de la antena. También se puede denominar sección transversal de captura o sección transversal de absorción.

El área efectiva es directamente proporcional a la frecuencia.

$$A_{ef} = \frac{P_c}{W_0} (m^2) [13]$$

A_{ef} – Área efectiva (m^2)

P_c – Potencia entregada a la carga (W)

W_0 – Densidad de potencia de la onda electromagnética incidente (W/m^2)

El área efectiva se puede relacionar con la ganancia de una antena de la siguiente manera:

$$A_{ef} = A_{ef-iso} \cdot G (m^2) [13]$$

Donde G es la ganancia y A_{ef-iso} es el área efectiva de una antena isotrópica:

$$A_{ef-iso} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} (m^2) [13]$$

Siendo λ la longitud de onda en metros (m).

3.3.5. Factor de antena

En una antena receptora se expresa como el campo eléctrico aplicado entre la tensión que se le entregará a una carga normalizada con un valor de $R=50 \Omega$. Una antena con un factor de antena de bajo valor es más sensible al campo eléctrico circundante [14].

$$F_a = \frac{E}{V} (m^{-1}) [14]$$

F_a – Factor de antena (también se puede medir en $dB \cdot m^{-1}$)

E – Amplitud del campo eléctrico incidente (V/m)

V – Tensión aplicada (V)

3.3.6. Parámetros S

Una antena también puede asemejarse a un circuito electrónico, en el que se hay dos puertos, uno de entrada y otro de salida, que permiten analizar la respuesta del sistema [19].

Además de los parámetros S , existen otros tantos que permiten analizar la respuesta de la antena. Sin embargo, a diferencia de los parámetros S , todos los parámetros expresados a continuación se hallan cortocircuitando o dejando en circuito abierto la entrada o la salida del circuito. Esto presenta el gran inconveniente de que no se pueden medir a altas frecuencias debido a las capacitancias e inductancias residuales que se establecen. Esto es así ya que tanto la capacitancia como la inductancia son variantes con la frecuencia. Estos son los parámetros adicionales [12]:

- Parámetros de impedancia o Z
- Parámetros de admitancia o Y
- Parámetros de transmisión o T
- Parámetros híbridos o H
- Parámetros de transmisión inversa o ABCD

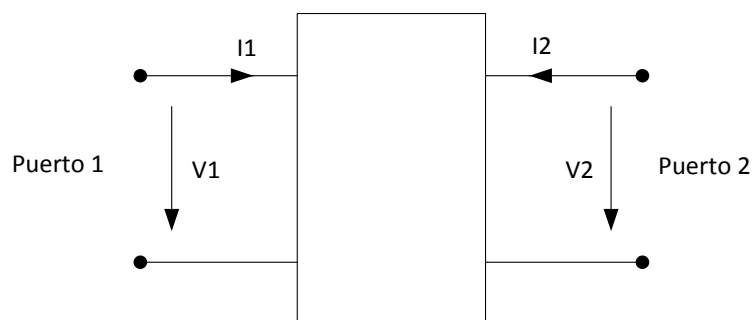


Fig. 3.8. Red de dos puertos [12]

En la Fig. 3.8 anterior se muestra un circuito eléctrico con un puerto de entrada -1- y un puerto de salida -2-. En este caso, los terminales o puertos son las vías de alimentación, por tensión o corriente, de una antena. Los parámetros S ofrecen la relación existente de entrada/salida entre los terminales o puertos del circuito eléctrico equivalente de la antena.

Hay cuatro parámetros de dispersión S :

- 1- S_{11} : Coeficiente de reflexión en el puerto de entrada: mide el nivel de potencia que se refleja en la entrada –puerto 1-, respecto a la potencia aplicada, a causa de una discontinuidad en la impedancia de la línea.
- 2- S_{12} : Coeficiente de transmisión inversa: compara la potencia de entrada en el puerto 1 con la potencia que sale por el puerto 2.
- 3- S_{21} : Coeficiente de transmisión directa: corresponde a la relación entre la potencia de entrada en el puerto 2 y la potencia de salida por el puerto 1.
- 4- S_{22} : Coeficiente de reflexión en el puerto de salida: mide la potencia reflejada en el puerto 2 relacionándola con la potencia aplicada en este mismo puerto.

Los parámetros S están estrechamente relacionados con la frecuencia a la que trabaja la antena. Los parámetros S_{11} y S_{22} son los denominados de reflexión y los S_{12} y S_{21} los de transmisión.

El S_{11} es el parámetro más representativo. A veces conocido como Γ o como parámetro de reflexión ofrece información sobre la cantidad de potencia que refleja la antena. Se busca que sea lo más bajo posible.

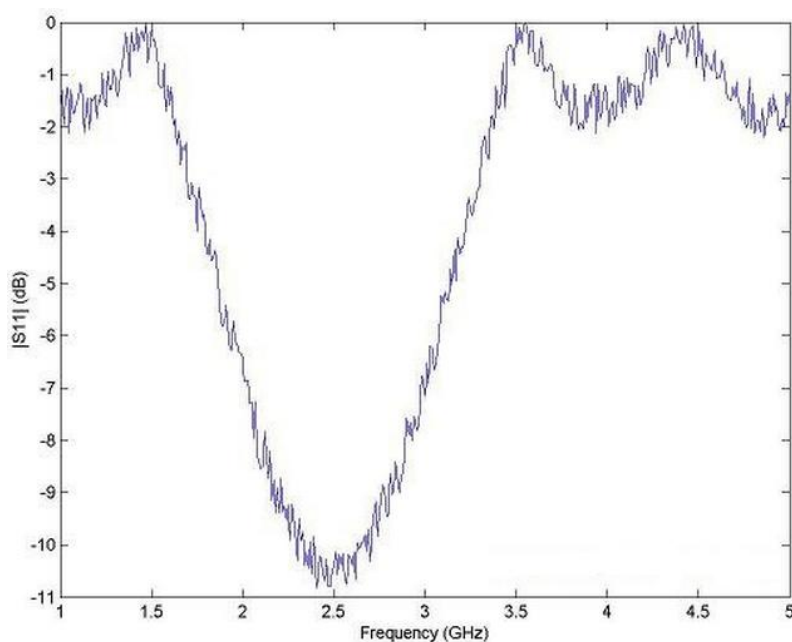


Fig. 3.9. Representación gráfica del parámetro S_{11} [20]

La figura anterior es un ejemplo de representación del S_{11} en función de la frecuencia. De ella se deduce que para 2,5 GHz, el parámetro S_{11} toma su valor más bajo. Es en esta frecuencia en la que la antena radía la mayor parte de la energía electromagnética, ya que el valor de reflexión toma su valor mínimo. Esta frecuencia -2,5 GHz- es la denominada frecuencia de resonancia. Cabe destacar también que para las frecuencias de 1,5; 3,5 y 4,5 GHz el valor de S_{11} ronda los 0 dB. Esto quiere decir que toda la potencia se refleja y la antena no radía nada [20].

El parámetro S_{11} hace referencia al rendimiento y a las pérdidas de las antenas. Con este parámetro se puede determinar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda en los que la antena opera. El valor de S_{11} para medir el ancho de banda de una antena es típicamente -6 dB, de tal manera que se toma como ancho de banda aquel espectro de frecuencias en las que el valor de S_{11} no supere el valor anteriormente dado.

3.3.7. Resonancia de la antena

No todas las antenas son resonantes. Una antena es resonante cuando su longitud y frecuencia de operación son coincidentes. Cuando se cancelan las inductancias con las capacitancias, el circuito es puramente resistivo y la corriente es máxima, por lo que radía la máxima potencia. Al ser resistiva, la corriente está en fase con la tensión facilitando la adaptación de la impedancia de la antena con la de la línea de transmisión [13].

Se puede variar la longitud de la antena para lograr una transferencia de potencia óptima. Gráficamente se puede representar el parámetro S_{11} en función de la frecuencia para obtener la frecuencia de resonancia en la que la antena radía al máximo [20].

3.4. Dipolo

El principio de funcionamiento del dipolo es similar al de la antena monopolo pero a diferencia de ésta, el dipolo radía tanto en el semiplano superior como en el inferior. Ambos tienen la misma corriente y radían el mismo campo en el semiplano superior. Está formada por un elemento conductor recorrido por una corriente uniforme [11].

En la siguiente figura se observa el diagrama de radiación de un dipolo:

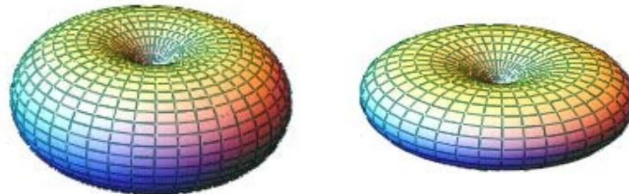


Fig. 3.10. a) Diagrama de radiación del dipolo de $\lambda/4$ b) Diagrama para dipolo de $\lambda/2$ [11]

En la Fig. 3.11 aparece el diagrama de radiación –seccionado a 1/4– de un dipolo de $\lambda/2$. Se ve cómo se distribuye la radiación de la antena en función de los ángulos azimutal (θ) y de elevación (Φ) [13].

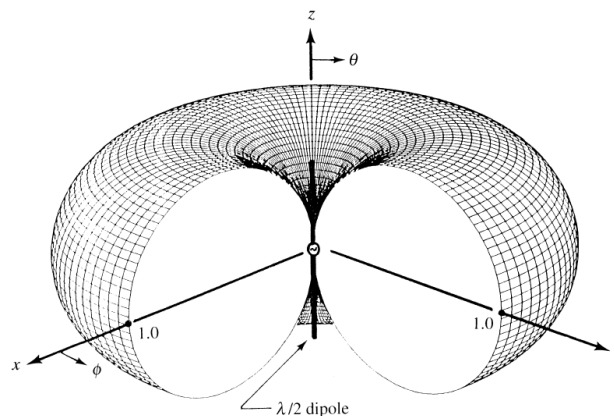


Fig. 3.11. Diagrama de radiación tridimensional normalizado de un dipolo de $\lambda/2$ [13]

La Tabla 3 1 muestra el procedimiento de cálculo que afecta a los parámetros más importantes de la antena dipolo.

Tabla 3 1. Parámetros dipolo de $\lambda/2$

Parámetro	Procedimiento de Cálculo
Directividad máxima (adimensional) [13]	$D_{max} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{max}}{P_{rad}} = 4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{\theta=\frac{\pi}{2}}}{P_{rad}}$ $= \frac{4}{C_{in}(2\pi)} = \frac{4}{2,435} = 1,643$
Densidad de potencia radiada (W/m ²) [13]	$W_{rad} = \eta \cdot \frac{ I_0 ^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot r^2} \cdot \text{sen}^3\theta$
Potencia total radiada (W) [13]	$P_{rad} = \eta \cdot \frac{ I_0 ^2}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \cos\theta\right)}{\text{sen}\theta} d\theta$
Resistencia de radiación (Ω) [13]	$R_r = \frac{2 \cdot P_{rad}}{ I_0 ^2} = \frac{\eta}{4 \cdot \pi} \cdot C_{in}(2\pi) = 30 \cdot 2,435 = 73,1$
Impedancia de entrada (Ω) [13]	$Z_i = 73,1 + j42,5$
Ganancia (adimensional) [13]	$G = e \cdot D(\theta, \Phi)$
Rendimiento (%) [13]	$e = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{p\acute{e}r}} \cdot 100$
Intensidad de radiación (W/sr) [13]	$U = r^2 \cdot W_{rad} = \eta \cdot \frac{ I_0 ^2}{8 \cdot \pi^2} \cdot \text{sen}^3\theta$
Ancho de banda (%) [21]	$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \cdot 100$
Longitud efectiva máxima (m) [13]	$l_{ef} = \frac{\lambda}{\pi} = 0,3183 \cdot \lambda$
Área efectiva máxima (m ²) [13]	$A_{ef\ max} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot D_{max} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot 1,643 = 0,13 \cdot \lambda^2$
Factor de antena (m ⁻¹) [14]	$F_a = \frac{E}{V}$

Siendo:

U_{max} – Intensidad de radiación máxima (W/sr). Se da para $\theta=\pi/2$

θ – Ángulo azimutal

Φ – Ángulo de elevación

P_{rad} – Potencia radiada (W)

$$C_{in}(2\pi) = C + \ln(2\pi) - C_i(2\pi) \quad [13]$$

$C = 0,5772$ – Constante de Euler

$C_i(2\pi)$ – Integral del coseno

$\eta = 120\pi$ – Resistencia de radiación en el espacio (Ω)

I_0 – Corriente máxima de valor constante (A)

e – Eficiencia (adimensional)

$P_{pér}$ – Potencia debida a las pérdidas (W)

λ – Longitud de onda (m)

E – Amplitud del campo eléctrico incidente (V/m)

V – Tensión aplicada (V)

La resistencia de radiación es de 73Ω por lo que no difiere mucho de los 50 a 75Ω de la impedancia característica de la línea de transmisión.

3.5. Antena Monopolo

Es una antena situada perpendicularmente sobre un plano conductor o plano de tierra. Esta antena lineal está formada por un alambre o hilo conductor alimentado por una corriente de excitación que circula a través de una línea de transmisión.

Al ser un monopolo la mitad de un dipolo, se asume que un monopolo de $\lambda/4$ situado sobre un plano conductor infinito equivale a un dipolo de $\lambda/2$. Esto se debe al método de las imágenes [16].

La configuración más común del monopolo es la de $\lambda/4$. La antena monopolo tiene un patrón de radiación omnidireccional. Se emplea más que el dipolo por su sencillez y buena disposición para medir en las bandas de frecuencia requeridas para la detección de DP. Su directividad máxima es de unos 5 dB [22].

El monopolo se usa actualmente en la industria principalmente en la radiodifusión de ondas en la banda de frecuencia AM ($0,5$ - $1,5 \text{ MHz}$) y también en telefonía. Su pequeño tamaño y eficiencia permiten usar la antena monopolo a esta frecuencia, dentro del rango de frecuencia media –*Medium Frequency*– (MF). A estas frecuencias de funcionamiento es preferible la polarización vertical a la horizontal; se producen menos pérdidas de propagación.

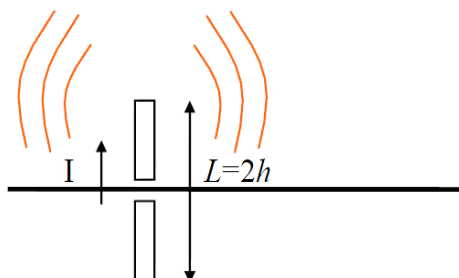


Fig. 3.12. Monopolo de $\lambda/4$ de longitud h sobre un plano conductor [14]

Dado que sólo se alimenta la parte de la antena situada en la mitad superior, sólo radia esta mitad, por lo que la potencia radiada es la mitad que la del dipolo, así como su impedancia.

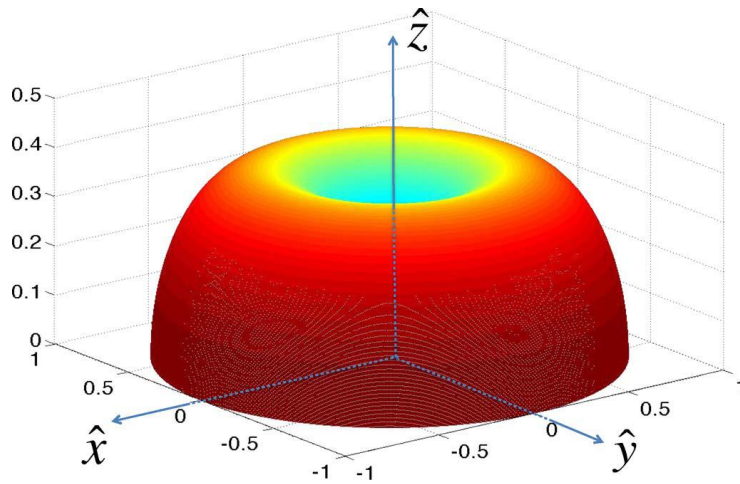


Fig. 3.13. Diagrama de radiación monopolo de $\lambda/4$ [23]

El monopolo está situado en el eje z y radía transversalmente a éste en todas direcciones por igual.

En el caso ideal de que el monopolo de $\lambda/4$ radíe sobre un plano conductor infinito, se pueden establecer las equivalencias con el dipolo de $\lambda/2$ mostradas en la Tabla 3 2:

Tabla 3 2. Relación de los parámetros del monopolo con los del dipolo

Parámetro	Relación matemática
Impedancia interna (Ω) [16]	$Z_{i,mon} = \frac{1}{2} \cdot Z_{i,dip}$
Resistencia de radiación (Ω) [16]	$R_{r,mon} = \frac{1}{2} \cdot R_{r,dip}$
Directividad (adimensional) [16]	$D_{mon} = 2 \cdot D_{dip}$
Potencia total radiada (W) [14]	$P_{rad,mon} = \frac{1}{2} \cdot P_{rad,dip}$
Intensidad de radiación (W/sr) [14]	$U(\theta, \Phi)_{mon} = 2 \cdot U(\theta, \Phi)_{dip}$
Ancho de banda (%) [13]	$BW_{mon} = BW_{dip}$
Longitud efectiva (m) [13]	$l_{ef,mon} = l_{ef,dip}$
Área efectiva (m^2) [13]	$A_{ef,mon} = 2 \cdot A_{ef,dip}$
Factor de antena (m^{-1}) [16]	$F_{a,mon} = 2 \cdot F_{a,dip}$

La ganancia del monopolo se puede calcular como el producto de la directividad y la eficiencia.

3.5.2. Monopolos de 5 y 10 cm:

Variando la longitud de la antena monopolo se consigue un determinado ancho de banda y unas frecuencias de resonancia. En este apartado se muestra gráficamente la diferencia entre situar el monopolo o no sobre un plano conductor [23].

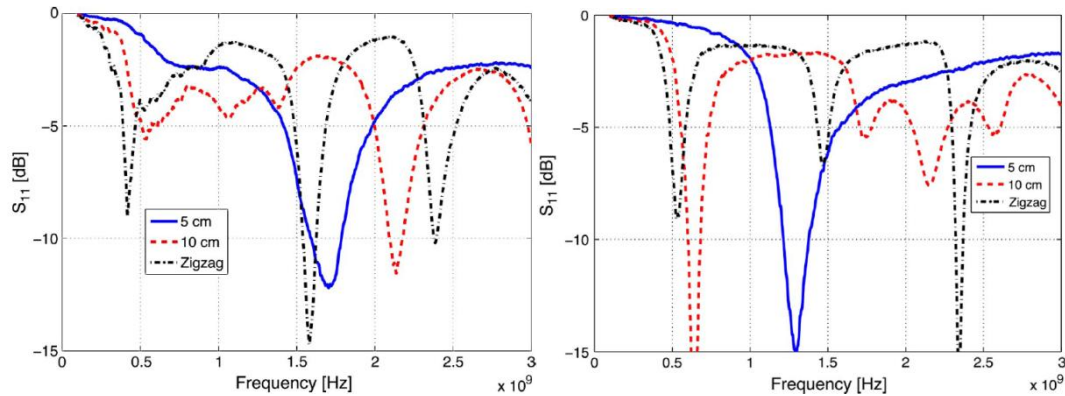


Fig. 3.14. Parámetro S_{11} de los monopolos a) sin plano conductor b) con plano conductor [23]

En los gráficos anteriores se representa el parámetro S_{11} en función de la frecuencia de las antenas. Se observa que para ciertos valores de frecuencia el parámetro S_{11} decrece notablemente. Es entonces cuando la antena está radiando con la máxima energía posible. En los valores más bajos de S_{11} se localizan las frecuencias de resonancia de la antena, en este caso los monopolos de 5 y 10 cm. En la figura b) destaca la mejoría de estas frecuencias de resonancia – menor valor del S_{11} – cuando se colocan los monopolos sobre un plano conductor. También mejora la directividad de las antenas [23].

Se puede calcular la primera frecuencia de resonancia, según la longitud de los monopolos $-h-$, a través de la ecuación siguiente:

$$h = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f}$$

Se despeja $\lambda=c/f$, en donde:

$$c = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s} \right) - \text{Velocidad de la luz}$$

h – Longitud e la antena (m)

f – Frecuencia de resonancia (Hz)

Despejando la frecuencia, para el monopolo de 5 cm queda:

$$f_{r_{5cm}} = \frac{c}{4 \cdot h} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,05} = 1500 \text{ MHz}$$

Del mismo modo, para el monopolo de longitud igual a 10 cm, la primera frecuencia de resonancia es:

$$f_{r_{10cm}} = \frac{c}{4 \cdot h} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,1} = 750 \text{ MHz}$$

La primera frecuencia de resonancia se da en $\lambda/4$. Las siguientes frecuencias de resonancia en la antena monopolo se repiten cada $\lambda/2$, por lo que se dan en $\lambda/2$, $3\lambda/4$ y λ [13]. En la tabla siguiente aparecen los valores de las cuatro primeras frecuencias de resonancia de los monopolos de 5 y 10 cm de longitud.

Tabla 3.3. Frecuencias de resonancia de los monopolos de 5 y 10 cm

Longitud monopolo	Frecuencia de resonancia (MHz)			
	$(\lambda/4)$	$(\lambda/2)$	$(3\lambda/4)$	(λ)
5 cm	1500	3000	4500	6000
10 cm	750	1500	2250	3000

A continuación aparece una medida de ruido efectuada con el monopolo de 5 cm y otra con el ruido medido por el monopolo de 10 cm. Se aprecia que la energía electromagnética captada por la antena de 10 cm es mayor para frecuencias menores a 1 GHz. El monopolo de 5 cm capta una mayor energía electromagnética en el espectro de UHF.

El nivel de ruido detectado por una antena monopolo de 5 cm se muestra en la Fig. 3.15.

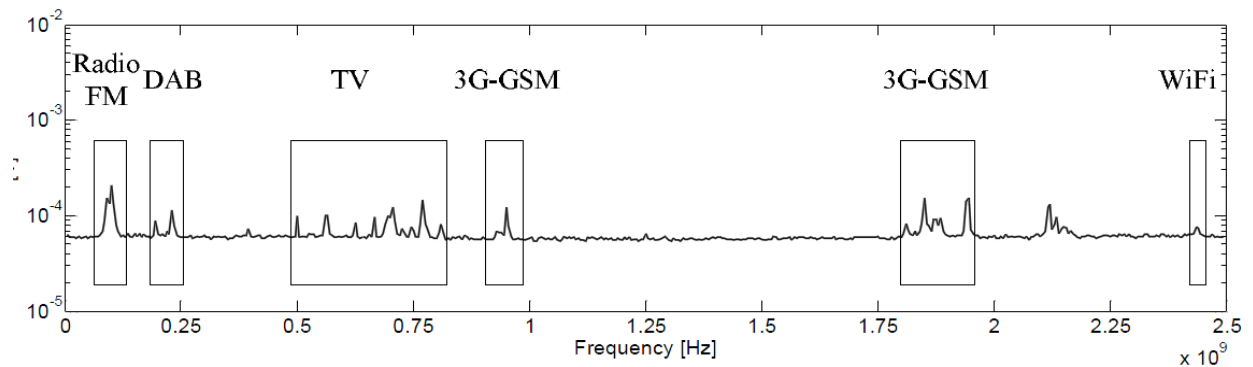


Fig. 3.15. Ruido medido con monopolo de 5 cm [22]

Se mide el ruido ambiente con la antena monopolo de 10 cm obteniendo el resultado mostrado en la Fig. 3.16.

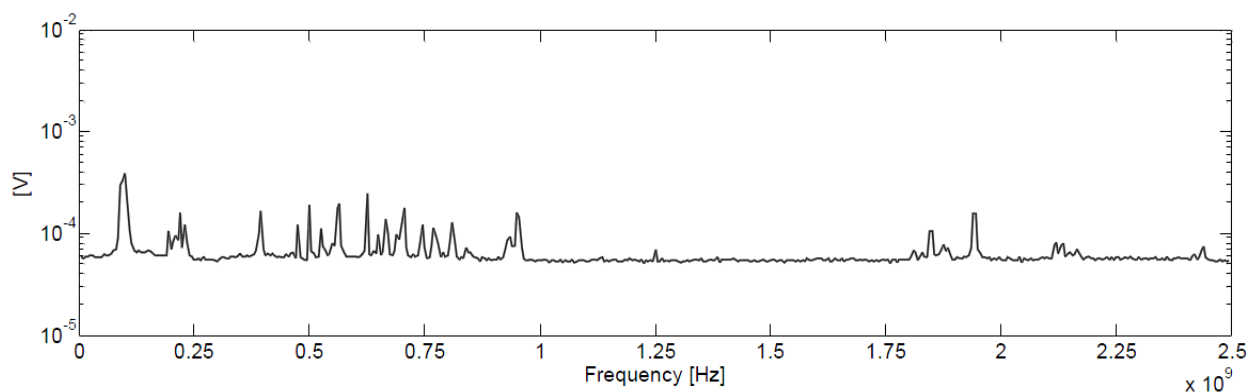


Fig. 3.16. Ruido medido con el monopolo de 10 cm [22]

Las antenas pueden medir en un ancho de banda en el que captan señales de radio, wifi, TV y DAB.

El monopolo de 5 cm tiene un ancho de banda de 1100 MHz hasta 1700 MHz, obteniendo un resultado excelente en las banda de 1250-1500 MHz y un buen resultado en la de 1000-1250 MHz. El monopolo de 10 cm también opera en este rango de frecuencias, en especial entre los 1000 y los 1750 MHz en donde su condición de emisión / recepción será óptima. Además, ofrece un buen comportamiento entorno a los 750 MHz y sus múltiplos –cada $\lambda/2$ - [13].

El monopolo de 5 cm detecta alrededor del 60 % de la energía en el espectro de UHF, por lo que es la mejor opción para medir las DP.

Ambos monopolos tienen una directividad de unos 2 dB cuando no disponen de plano conductor. En caso contrario, la directividad puede llegar hasta los 5 dB.

Estas son las antenas monopolo situadas en la posición de medida para el ensayo en el laboratorio. Están situadas sobre un plano conductor para mejorar sus propiedades de captación de potencia.



Fig. 3.17. Antena monopolo de 5 cm empleada en los ensayos de laboratorio



Fig. 3.18. Monopolo de 10 cm

3.6. Antena logarítmico-periódica:

Esta antena se diseña manteniendo una relación geométrica entre los dipolos que la forman. Consigue un amplio ancho de banda debido a la diferencia entre longitudes de las antenas que la componen. Está constituida por varios dipolos rectos paralelos que decrecen de forma logarítmica entre sí, manteniendo siempre una relación de tamaño comprendida entre 0,8 y 0,96. Sus dimensiones y forma le otorgan una ganancia de 10 dB [14]. Esta antena es unidireccional, es decir, radía en una sola dirección en el sentido decreciente de sus antenas: las más pequeñas son las directrices y las de mayor longitud actúan como reflectores. Se diseña teniendo en cuenta que la longitud de su brazo más largo debe ser $L = \lambda/2$ para la frecuencia más baja de utilización y su dipolo más corto debe medir $L = \lambda/2$ para la frecuencia más alta.

Su alta ganancia, directividad y ancho de banda hace que se emplee en radio y televisión a frecuencias VHF y UHF -30 a 3000 MHz- [13].

Su ancho de banda suele operar en frecuencias de su frecuencia mínima $-f_{\min}$ a su frecuencia máxima $-4f_{\min}$.

El modelo empleado en el laboratorio es el UHALP 91088A, cuya dimensión más larga es de 54 cm. En sus frecuencias de funcionamiento opera con una ganancia de unos 6 o 7 dB. Tiene un ancho de banda que va desde 150 MHz hasta 2400 MHz.



Fig. 3.19. Antena logarítmico-periódica UHALP 91088A en el laboratorio

A diferencia de las antenas anteriores, la logarítmico-periódica muestra un patrón de radiación direccional. Quiere decir que radía más en una dirección, no como las omnidireccionales que radían a lo largo de su acimutal.

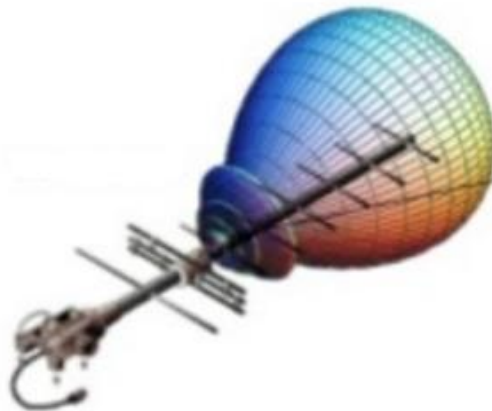
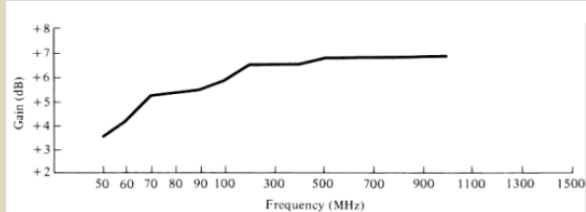


Fig. 3.20. Diagrama de radiación antena logarítmico-periódica [24]

La Tabla 3 4 muestra los principales parámetros de la antena logarítmico-periódica y su manera de calcularlas.

Tabla 3 4. Propiedades de la antena logarítmico-periódica

Parámetro	Procedimiento de Cálculo
Directividad (adimensional) [13]	7 – 12 dB
Impedancia (Ω) [13]	$Z_{log} = 120 \cdot \left(\ln \left(\frac{l_n}{d_n} \right) - 2,25 \right)$ <p>l y d son longitud y diámetro respectivamente de los dipolos que componen la antena</p>
Ganancia (adimensional) [13]	<p>La ganancia depende de la frecuencia de operación de la siguiente manera:</p> 
Rendimiento (%) [13]	$e = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{pér}} \cdot 100 \text{ (%)}$
Ancho de banda real (%) [13]	$B_s = B \cdot [1,1 + 7,7 \cdot (1 - \tau)^2 \cdot \cotg \alpha]$
Ancho de banda de la región activa (%) [13]	$B_{ar} = 1,1 + 7,7 \cdot (1 - \tau)^2 \cdot \cotg \alpha$
Aspectos constructivos	
Longitud total de la estructura (m), desde el dipolo más corto l_{min} hasta el más largo l_{max} [13]	$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \cdot \left(1 - \frac{1}{B_s} \right) \cdot \cotg \alpha$

Relación geométrica (adimensional) [13]	$\frac{1}{\tau} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_{n+1}}{d_n}$
Factor de espaciado (adimensional) [13]	$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2 \cdot l_{n+1}}$
Número de elementos [13]	$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)}$
Distancia entre centros de las antenas (m) [13]	$s = d \cdot \cosh\left(\frac{Z}{120}\right)$

Siendo B el ancho de banda deseado en tanto por ciento.

Los parámetros de diseño α , σ y τ de una antena logarítmico-periódica se relacionan según la ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1 - \tau}{4 \cdot \sigma}\right) \quad [13]$$

El ruido medido con la antena logarítmico-periódica se muestra en la Fig. 3.21.

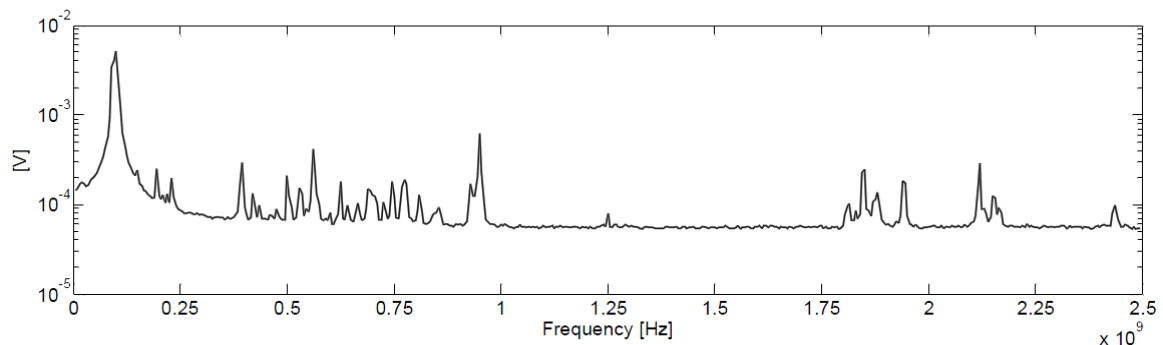


Fig. 3.21. Ruido con antena logarítmico-periódica [22]

Las antena logarítmico-periódica es especialmente útil a frecuencias inferiores a los 500 MHz mientras que los monopolos expuestos en el apartado anterior presentan una buena respuesta en torno a 1000 MHz.

3.7. Antena vivaldi:

La antena vivaldi es una antena de apertura plana con una ranura tipo cónica. Está formada por un canal de sustrato dieléctrico de apertura exponencial situado entre dos placas dieléctricas metalizadas –de cobre– [25]. Con esto se consigue un haz simétrico a la salida de la antena. Tiene una ganancia comprendida entre 4,5 y 6,8 dBi. Se puede variar su geometría permitiendo trabajar con un amplio ancho de banda, lo que la hace ideal para la detección de posibles fuentes de DP [25].



Fig. 3.22. Antena vivaldi

La antena vivaldi no es una antena resonante y tiene como frecuencia central $f_0 - 2$ GHz. Posee un buen rendimiento –pérdidas reducidas- para el ancho de banda comprendido entre 1,5 y 3,7 GHz. La vivaldi empleada en los ensayos de DP tiene unas dimensiones de 9x12 cm y el dieléctrico conste de un grosor de 1,5 mm [26].

La antena vivaldi no es resonante, por lo que opera en el ancho de banda para la que es dimensionada. Presenta una buena disposición para captar potencia electromagnética de baja frecuencia. Atendiendo a unas necesidades, la fabricación adecuada de esta antena la hace ideal para la detección de DP.

A continuación aparecen los diagramas de radiación normalizados de la antena vivaldi para una frecuencia de $2,5 \cdot f_{\min}$. Se puede observar que se trata de un patrón de radiación direccional.

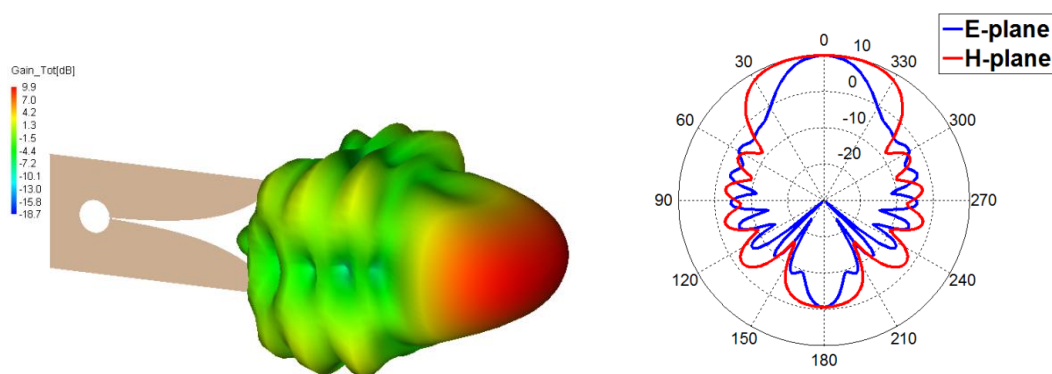


Fig. 3.23. a) Diagrama de radiación tridimensional b) Diagrama de radiación bidimensional [27]

Se observa en estos diagramas que radía mucho en una dirección y poco en las zonas laterales. La ganancia mínima de la antena vivaldi es de 2 dBi y la máxima es de 17 dBi [27].

3.8. Antena parche:

La antena parche o microstrip es una antena impresa en una placa. Está formada por un parche metálico conductor impreso sobre un material de sustrato dieléctrico que la separa de un plano de masa puesto a tierra. Tanto el plano de masa como el parche metálico suelen estar hechos con cobre, que es un excelente conductor de la electricidad.

Se diseña de acuerdo a su longitud de onda λ , típicamente el grosor del dieléctrico se sitúa entre $0,003 \cdot \lambda$ y $0,05 \cdot \lambda$ dependiendo de la potencia que se quiera disipar. Se integran en los circuitos impresos de microondas como extensión natural de los mismos. Actúan pasivamente como filtros, o activamente como amplificadores.

Se produjo un gran desarrollo de esta antena en la década de los 70 y los 80. Su uso se ha extendido notablemente en los últimos años debido a su creciente aplicación en telefonía móvil. Son de sencilla fabricación y reducido coste [28].

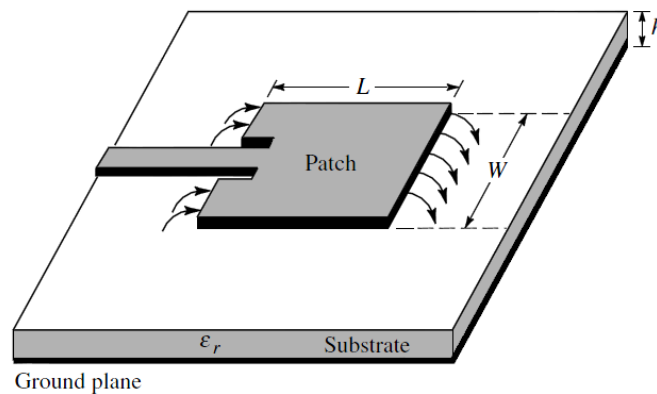


Fig. 3.24. Esquema de una antena parche de geometría cuadrada [28]

Variando el ancho del parche $-W-$ se consigue modificar la impedancia y el patrón de radiación de la antena. Suelen tener una impedancia de entrada de 300Ω y una directividad de entre 5 y 7 dB.

Se puede calcular su frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0}} \text{ (Hz) [20]}$$

L – Longitud del parche (m)

ϵ_r – Permitividad relativa del sustrato dieléctrico

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (F/m)}$ – Permitividad del vacío

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (T}\cdot\text{m/A)}$ – Permeabilidad magnética del vacío

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)}$ – Velocidad de la luz

Variando la longitud del parche se pueden obtener unas características específicas como variar el ancho de banda, la directividad, el diagrama de radiación o la frecuencia idónea – frecuencia de resonancia-. Su ancho de banda es muy reducido por lo que se debe dimensionar adecuadamente conforme al uso que se le vaya a dar [29].

En la Tabla 3 5 aparecen las ventajas y los inconvenientes de usar estas antenas.

Tabla 3 5. Ventajas e inconvenientes de la antena *microstrip* [28]

Ventajas	Inconvenientes
Bajo coste	Pequeño ancho de banda
Adaptabilidad a todo tipo de superficies	Baja potencia
Integrables a sistemas integrados de microondas	Baja ganancia
Pueden trabajar a distintas frecuencias	Baja pureza de polarización
Reducido volumen	Los parámetros pueden verse alterados por la polarización circundante
Robustez	
Polarización lineal o circular	

Su forma puede ser cuadrada, rectangular, circular, con forma de dipolo e incluso elíptica o triangular.

Algunos de sus parámetros se muestran en la Tabla 3 6.

Tabla 3 6. Parámetros de la antena parche [28]

	Ganancia	Ancho de banda	Impedancia
Valor típico	7 dBi	5 %	75 Ω
Valor máximo	8 dBi	15 %	-
Valor mínimo	5 dBi	0,3 %	-

A continuación se describen de forma gráfica los diagramas de radiación normalizados, para una frecuencia de unos 600 MHz, en 2 y 3 dimensiones:

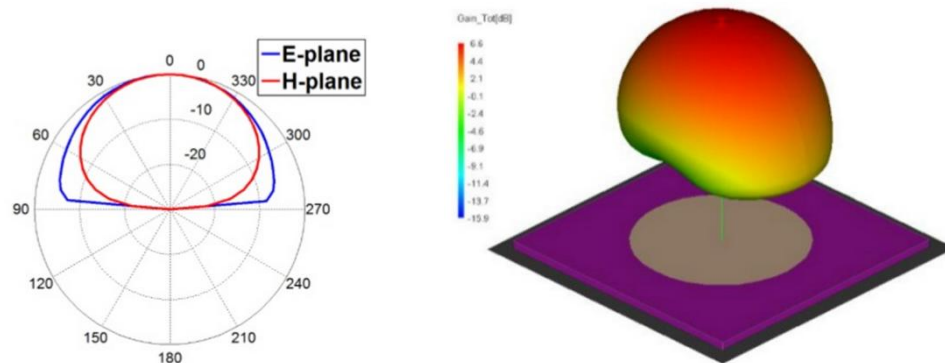


Fig. 3.25. a) Diagrama de radiación Parche b) Diagrama de radiación tridimensional [28]

Suelen operar en la banda de UHF pero o ideal para estas antenas es trabajar a altas frecuencias, por encima de los 2 GHz, donde se da su mejor eficiencia. Se emplean en sistemas de teledetección como radar, GPS, sistemas de comunicación móvil, satélites, guiado de misiles, sensores, biomédicas, etc.

3.9. Antenas empleadas por el PDS-100

3.9.1. Antena Watson W-889



Fig. 3.26. Antena Watson W-889 [30]

En el ensayo referido posteriormente la antena empleada es la Watson W-889. Por sus características se puede concluir que es apta para medir en los rangos de frecuencia requeridos en el laboratorio. Se comporta como un monopolo lineal, por lo que su diagrama de radiación queda de la siguiente manera:

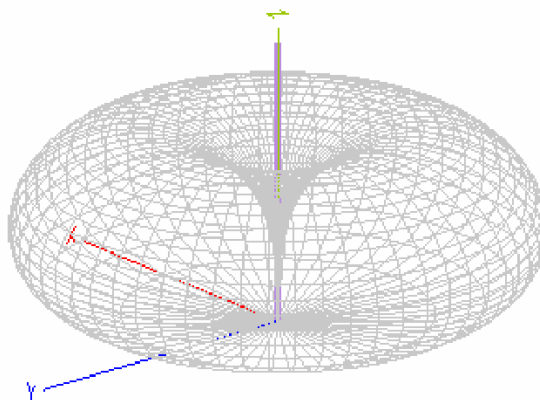


Fig. 3.27. Diagrama de radiación de la antena Watson [18]

En la Tabla 3 7 aparecen los principales parámetros:

Tabla 3 7. Parámetros de la antena Watson W-889 [30]

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	25 – 1900 MHz
Potencia nominal	25 W
Longitud extendida	31 cm
Longitud plegada	14 cm
Conector	BNC

Dado que los monopolos son antenas resonantes, se puede calcular la primera frecuencia de resonancia de la antena Watson W-889 cuya longitud total extendida al máximo es de 31 cm [30].

$$h = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f};$$

$$f = \frac{c}{4 \cdot h} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,31} = 242 \text{ MHz}$$

Significa que, para una longitud de 31 cm, la antena Watson tiene su capacidad óptima de transmisión en los 242 MHz.

Esta antena permite doblarse cerca del punto de roscado con el aparato. La Watson W-889 es un dipolo, que al doblarlo consigue modificar la distribución de la densidad de carga. No obstante esta variación es mínima respecto a la antena recta.

3.9.2. Antena Diamond RH789

Esta antena es la que se emplea por defecto en el PDS-100. Algunas de las características de la antena Diamond se indican a continuación:

Tabla 3 8. Valores de los parámetros de la antena Diamond RH789 [31]

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	95 MHz – 1100 MHz
Rango mínimo	95 MHz – 300 MHz ($1/4 \cdot \lambda$)
Rango máximo	300 MHz – 1100 MHz ($5/8 \cdot \lambda$)
Potencia máxima de transmisión	10 W
Ganancia en el rango mínimo	2,15 dBi
Ganancia en el rango máximo	3,2 dBi
Impedancia	50 Ω
Longitud extendida	80,5 cm
Longitud plegada	20 cm
Peso	29 g
Conector	BNC / SMA

4. EL PDS-100 PARA LA MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES [32]

4.1. Introducción

El PDS-100, de Doble Lemke, es un equipo comercial analizador de espectros que permite la detección de DP analizando el espectro de RF. Posibilita apreciar variaciones en estas señales. Se emplea principalmente en subestaciones aunque su uso no se restringe solamente a este espacio, sino que es capaz de detectar DP en líneas aéreas de alta tensión, cables, máquinas rotativas transformadores, subestaciones de gas –GIS- y otros equipos. Puede realizar mediciones en un espectro de frecuencia que va desde 50 MHz hasta 1 GHz con una precisión de ± 100 kHz. Se puede elegir otro rango distinto de medición. Representa la amplitud de la señal medida respecto a la frecuencia a la que se produce dicho valor. Su resolución de medida es de 0,1 dB [32].

En este apartado se comentan las funciones básicas de este equipo portátil para la medida de DP.

En los Anexos IV, V y VI aparecen las especificaciones dadas por el fabricante, las teclas y botones así como sus funciones.

4.2. Características del PDS-100



Fig. 4.1. El PDS-100 midiendo en el laboratorio

El PDS-100 tiene un panel superior de conexiones entre las que se encuentran:

- 1- Conexión para la antena tipo BNC.
- 2- Interruptor de encendido / apagado.
- 3- Toma de conexión de 5 mm y 12-18 V de corriente continua.

- 4- Clavija USB para la conexión de accesorios. No es de uso de transmisión de datos.
- 5- Conector para transferencia de datos con un ordenador.
- 6- Conector tipo *jack* de 3,5 mm para auriculares.



Fig. 4.2. Panel superior del PDS-100 [32]

El PDS-100 consta de una batería extraíble de ion de litio de 6,6 Ah que proporciona una autonomía de hasta 4 horas en un modo de funcionamiento normal. El aparato permite ahorrar energía y prolongar la duración de la batería apagando la iluminación de fondo del display gráfico.

Está dotado de una memoria interna de 50 MB de RAM para almacenar el firmware y los datos de mediciones. Con esta memoria es posible almacenar hasta 830 mediciones. Además existe la opción de activar un 1 GB extra de memoria o conectar por USB un dispositivo de almacenamiento externo.

A continuación se muestra en la Fig. 4.3 el panel frontal del aparato:



Fig. 4.3. Panel frontal del PDS-100 [32]

- 1- Botón de encendido / apagado de la luz de fondo del display.
- 2- Botones de función: configuran el aparato.
- 3- Botones de menú: permiten operar ciertas funciones del aparato.
- 4- Teclado alfanumérico: permite introducir números y letras.
- 5- Botones de marcado: marcan las trazas en el modo analizador de espectro y varían el volumen de los auriculares en el modo de tiempo resuelto.
- 6- Botón start / stop: comienza o detiene la medida.

4.3. Medidas con el PDS-100

El PDS-100 es una herramienta de uso portátil que permite la detección de fuentes de descargas parciales de manera sencilla y no invasiva. Lo hace a través de la detección de señales de radio frecuencia que emiten estos fenómenos. Este método de detección es muy ventajoso al ser no invasivo. Permite la detección de DP en transformadores, líneas eléctricas, aparata de alta tensión y cualquier aparato de una instalación de alta tensión. Presenta las siguientes ventajas

- No invasivo.
- Portátil.
- Resultados en patrón de frecuencia y de la frecuencia preestablecida en el tiempo – *Osciloscopio*-.
- Es posible superponer mediciones para compararlas entre sí.
- Permite trasladar los resultados a un ordenador.
- La salida de audio hace que se puedan escuchar las interferencias debidas a las DP.
- Permite conectar diversos tipos de antenas para captar una mayor banda de frecuencias.

La atenuación de la señal de radio frecuencia depende de la frecuencia y la distancia al fallo. Si la DP es de alta frecuencia, quiere decir que está en un lugar cercano o es de gran energía.

Las DP son de naturaleza intermitente y se dan en pulsos que se forman por la tensión del aparato. Estos pulsos se visualizan a modo de picos en un rango de frecuencias. El tiempo de muestreo es el tiempo que transcurre entre las medidas que realiza el aparato en el ancho de banda de medida. Normalmente es de 40 ms. Este parámetro sólo puede modificarse en el modo analizador de espectro expuesto posteriormente.

El PDS-100 permite ajustar la escala de frecuencias y dB para captar el espectro electromagnético requerido.

En la Fig. 4.4 se muestra un ejemplo de medida en modo analizador de espectro de 50 a 1000 MHz tal y como aparece en el display del PDS:

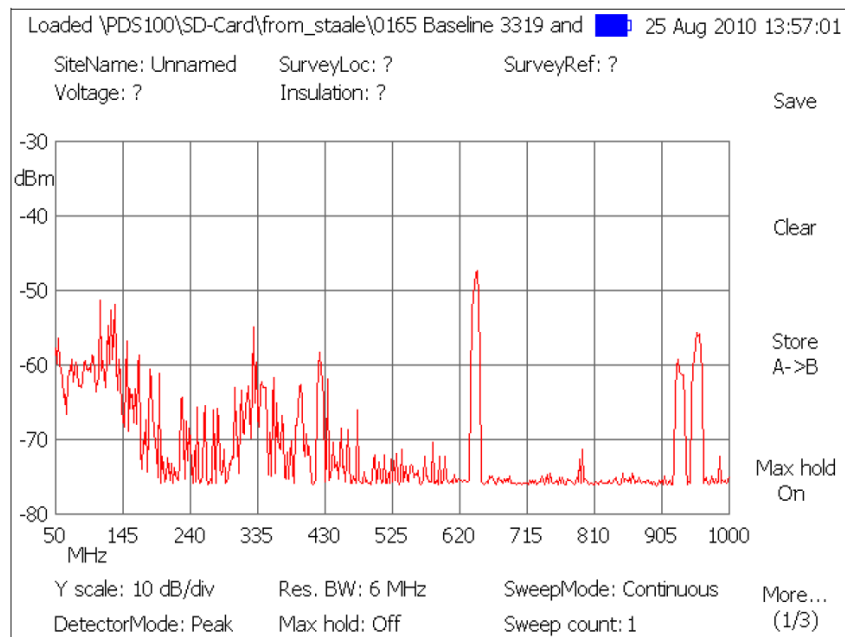


Fig. 4.4. Medida del PDS-100 [32]

Para llevar a cabo una medición correcta es necesario hacer varias medidas para que los datos obtenidos sean fiables. Se sigue una metodología:

- 1º. Planificación de la medida: se deben tener esquemas de los equipos e instalaciones a analizar.
- 2º. Eliminar fuentes de RF externas: la energía se puede acumular en objetos metálicos próximos e incluso en prendas de vestir. Se deben prevenir tales efectos.
- 3º. Preparación del PDS-100: Comprobar batería y accesorios como antena o auriculares.
- 4º. Medida de ruido: se realizan varias mediciones lejos de los aparatos de medida para captar todas las señales de RF externas al ensayo.
- 5º. Mediciones de descargas parciales: se realizan medidas y se comparan con las de referencia para detectar las descargas parciales y su proximidad.
- 6º. Registrar y anotar los resultados obtenidos con el objetivo de analizarlos.

Existen dos maneras de analizar los resultados de los ensayos del PDS-100:

1. En el propio PDS-100 se pueden ver los análisis en tiempo real o bien ser almacenados. Se pueden realizar diversas operaciones tales como crear carpetas y gestionar los archivos de manera eficiente o mostrar una o varias mediciones simultáneamente.
2. Conectando el PDS-100 a un ordenador, existe la posibilidad de volcar los datos de las mediciones y ejecutarlos con el programa *PDS Viewer*, el cual permite editar y analizar estos datos.

Como se ha comentado con anterioridad, esta herramienta es capaz de mostrar los resultados de dos maneras:

4.3.2. Modo analizador de espectro

Representa la amplitud en dB de la señal de RF respecto a la frecuencia. Muestra de manera gráfica la potencia radiada por un objeto a su respectiva frecuencia. Es capaz de escanear en un rango de entre 1 y 6 MHz para un tiempo de muestreo dado. No obstante el escaneo estándar está comprendido entre 50 MHz y 1 GHz. El PDS-100 posibilita cambiar las frecuencias de muestreo, tanto la frecuencia a la que se inicia la medida -50MHz por defecto- como la frecuencia de parada, programada a los 1000 MHz.

Con este aparato existen 3 maneras de registrar la actividad de radio frecuencia:

1. Valor de pico: muestra el valor de pico para cada tiempo de muestreo en el ancho de banda seleccionado para la medida. Esta es la configuración de medida predeterminada.
2. Valor medio: muestra el valor medio de la señal de RF captada para cada tiempo de muestreo durante todo el ancho de banda requerido.
3. S.P.A.M -*Separated Peak And Average Mode* -: refleja tanto el valor medio como el de pico en trazas separadas para el ancho de banda determinado y cada tiempo de muestreo. Este modo identifica inmediatamente la señal de RF detectando las descargas parciales.

La Fig. 4.4 anterior muestra un ejemplo de medición en modo analizador de espectro.

4.3.3. Modo de tiempo resuelto

Representa la amplitud en dB de la señal de radio frecuencia respecto al tiempo. Este modo permite detectar DP relacionadas con la frecuencia de operación -50 o 60 Hz-. Se muestra un tiempo de 20 ms -50 Hz- o 16,67 ms -60Hz- correspondiente al período de la onda a dicha frecuencia. Se detecta la DP en caso de que aparezca en la pantalla uno o más pulsos de RF con distintas anchuras. Si un tren de pulsos se desplaza por la pantalla podría indicar que la descarga parcial medida está variando. A continuación se muestra un ejemplo del modo en tiempo resuelto:

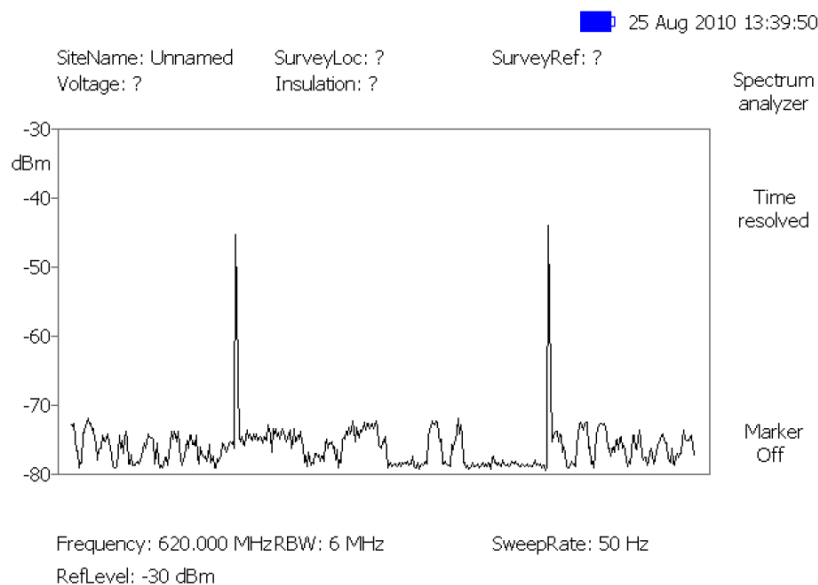


Fig. 4.5. Medida en modo de tiempo resuelto en el que se observan dos fuentes de DP [32]

El PDS-100 tiene la capacidad de operar varios parámetros que pueden ser de interés a la hora de realizar medidas. Se pueden utilizar las siguientes funciones:

- Tiempo de muestreo -Página 56-
- Nivel de referencia: ajusta los valores de la ganancia en el eje de ordenadas. Aparecen típicamente valores negativos al no disponer el equipo de amplificador.
- Fijación máxima: permite almacenar y mostrar los valores de la actividad de RF medidos por el equipo. Esta función únicamente está disponible en el modo analizador de espectro.
- Ajuste del ancho de banda: como se ha comentado anteriormente se puede modificar el ancho de banda de medida del aparato entre 1 y 6 MHz. Esta función es ejecutable tanto en el modo analizador de espectro como en el modo de tiempo resuelto.
- Información del lugar o sitio: esta función permite almacenar detalles del lugar en el que se realiza la medida.
- Modo barrido: es un modo que permite controlar si se realizan varios barridos o se detiene la medición tras realizar uno de ellos.
- Contador de barridos: permite mantener la cuenta de los barridos que se realizan constantemente en tiempo real.
- Ratio de barrido: como se ha comentado con anterioridad, en modo de tiempo resuelto, se puede ajustar el tiempo en función de la frecuencia. Las trazas son de 20 ms a 50 Hz o de 16,67 ms para 60 Hz. Esta función ajusta el ratio de tiempo para el cual se realiza la medición en el modo antes mencionado. Esto es de gran utilidad para detener algún pulso que se desplaza en el eje de abscisas. Una vez fijado se puede determinar la potencia y frecuencia del fallo.

En caso de que la señal se desplace con mucha velocidad y no se pueda detener, lo más probable es que se trate de una señal de ruido.

El equipo permite calibrar ciertos ajustes como la fecha y la hora, actualizar el firmware desde la página web www.doble.com, o crear preajustes de medida.

Nota: siempre que se realicen mediciones con el PDS-100 se deben seguir las recomendaciones de seguridad descritas en el apartado 6. Se debe mantener cierta precaución al andar con el PDS-100 en ambientes con tensión ya que si no se presta la atención requerida se podría tropezar con un elemento a tensión o la antena del aparato podría establecer contacto con un elemento no deseado.

5. MEDICIONES DE DESCARGAS PARCIALES EN EL LABORATORIO CON EL PDS-100

Este apartado contiene los resultados de los objetos de ensayo que generan DP internas y superficiales. Los ensayos se realizan en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión –LINEALT- del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid. Estos ensayos han sido realizados con los aparatos que especificados en el Anexo III y de acuerdo con las normas IEC 60270, sobre técnicas de medida convencionales, y la IEC 62478, medidas no convencionales.

Se ha recreado en el laboratorio una situación en la que se dan pulsos de descargas parciales. Se comparan, en el dominio de la frecuencia, los resultados obtenidos en el PDS-100 y los sistemas de medición auxiliares para confirmar que los pulsos medidos en la banda de UHF corresponden a la actividad de DP.

5.1. Introducción al montaje

El transformador de corriente de alta frecuencia HFCT mide los pulsos de corriente en el espectro de VHF, con un ancho de banda de 40 MHz. Lo hace a través del método PRPD expuesto en el apartado 2.6.1 de este documento. Los datos obtenidos se interpretan con el programa informático *PDCheck* de *TechImp Systems S.r.l.*

Las antenas sirven como soporte para corroborar que las medidas son correctas, están conectadas a un mismo osciloscopio, el Tektronix DPO7254 8-bit de 4 canales [22]. Estas antenas son:

- Monopolo 5 cm
- Monopolo 10 cm
- Antena logarítmico-periódica
- Antena vivaldi

Las antenas se sitúan cerca del objeto de ensayo para captar mejor la energía electromagnética que desprende la actividad de DP. Actúan en la región de campo lejano. Se hace así para operar a una distancia en la que el diagrama de radiación no varía con la distancia.

La antena logarítmico-periódica se sitúa a una distancia superior a la longitud de dicha antena, a unos 90 cm del objeto de ensayo, mientras que los monopolos y la vivaldi están a unos 50 cm de él. Los monopolos se colocan perpendicularmente al suelo para conseguir que su campo de radiación quede paralelo al plano conductor.

5.2. Objetos de ensayo

A continuación se describen los objetos empleados en el laboratorio para generar fuentes de descargas parciales internas y superficiales. Los objetos de ensayo son los siguientes:

- Objeto de ensayo A: papel aislante de ranura de un transformador: se emplean un total de once capas de papel Nomex utilizado para aislar transformadores. Cada una de las capas cuadradas, de 8 cm de lado, tiene un grosor de 0,35 mm, siendo 3.85 mm el grosor total de las capas apiladas. Las cinco capas intermedias constan de un agujero de 1 mm de diámetro que simula la imperfección en el aislante –vacuola-. El papel está dentro de una bolsa al vacío para que únicamente quede la vacuola y por el exterior el aceite mineral aislante. Todo ello está situado dentro de una cuba de metacrilato y entre dos electrodos; uno de ellos está a potencial y el otro puesto a tierra. Se le aplica un nivel de tensión suficiente para alcanzar la tensión de ruptura dieléctrica en la vacuola. El valor de esta tensión no es muy elevado debido a que la rigidez dieléctrica en la vacuola es menor que la del papel aislante permitiendo la aparición de descargas parciales internas en el interior de ella.



Fig. 5.1. Objeto de ensayo 1: papel aislante de ranura de transformador

- Objeto B: lámina de polietileno de 1 mm de grosor: consiste en un electrodo, al que se le aplicará tensión, sobre una lámina de polietileno de 1 mm de espesor puesta directamente a tierra. El electrodo se sitúa sobre la lámina tal y como muestra la Fig. 5.2. Este objeto crea DP superficiales perpendiculares al campo eléctrico, en la dirección horizontal de la lámina, y se le ha nombrado como objeto de ensayo B.



Fig. 5.2. Objeto de ensayo 2: electrodo sobre lámina de polietileno

5.3. Montaje para el ensayo

5.3.1. Circuito de medida convencional

En los ensayos realizados en el laboratorio de alta tensión, el esquema del montaje para la medida de DP corresponde al circuito indirecto tal y como especifica la IEC 60270. Esta configuración es más segura que la del circuito directo de detección. Se debe a que en éste último la impedancia de medida se conecta en serie con el objeto de ensayo y en caso de un fallo del aislante, puede haber una derivación de tensión a un equipo cercano o persona [5].

En la Fig. 5.3 aparece el esquema de conexión empleado en el laboratorio.

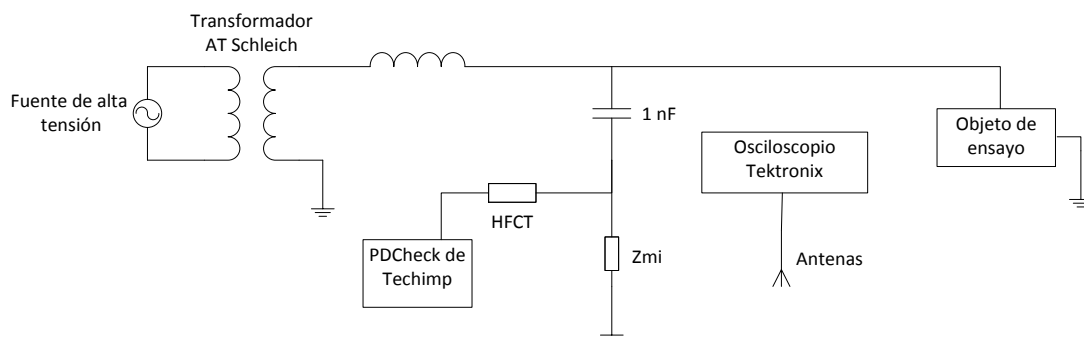


Fig. 5.3. Esquema equivalente del montaje de los ensayos

Los pulsos de corriente se producen en el objeto de ensayo encuentran un camino de baja impedancia en el condensador de acoplamiento permitiendo el paso de las señales de alta frecuencia. La impedancia Z impide que los pulsos circulen hacia la fuente. Los pulsos son medidos por el transformador HFCT, situado en el cable de puesta a tierra del condensador.

La fuente de tensión se conecta al transformador *Scheich* –Anexo III- y se regula con el módulo de control. La salida del transformador se conecta al condensador de acoplamiento en paralelo con el objeto de ensayo. Por medio del transformador de alta frecuencia HFCT

conectado al *PDCheck* se monitorizan los resultados en un ordenador para clasificarlos según su naturaleza. El programa empleado es el *PDCheck* y permite analizar los patrones PRPD y mapas T-F.

5.3.2. Medida no convencional

Se miden con las cuatro antenas conectadas al osciloscopio a la vez que se realizan las mediciones con el PDS-100.

5.4. Resultados de los ensayos

Antes de realizar los ensayos se mide con el PDS-100 la señal de ruido eléctrico en distintos rangos de frecuencia para poder registrar posteriormente con mayor detalle las zonas de interés. Las DP emiten energía electromagnética hasta 500 MHz de frecuencia. Se inicia la medición en la frecuencia por defecto del aparato -50 MHz- registrando la actividad de RF hasta llegar a la frecuencia final indicada en la Tabla 5 1. Estos rangos son:

Tabla 5 1. Rangos de frecuencia

Rango	Frecuencia mínima (MHz)	Frecuencia máxima (MHz)
1	50	1000
2	50	600
3	50	300

Se decide medir en tres rangos para medir con mayor detalle en las zonas en las que se cree que van a aparecer con mayor probabilidad las DP.

El ruido medido en el rango 1 es el que se muestra en la Fig. 5.4:

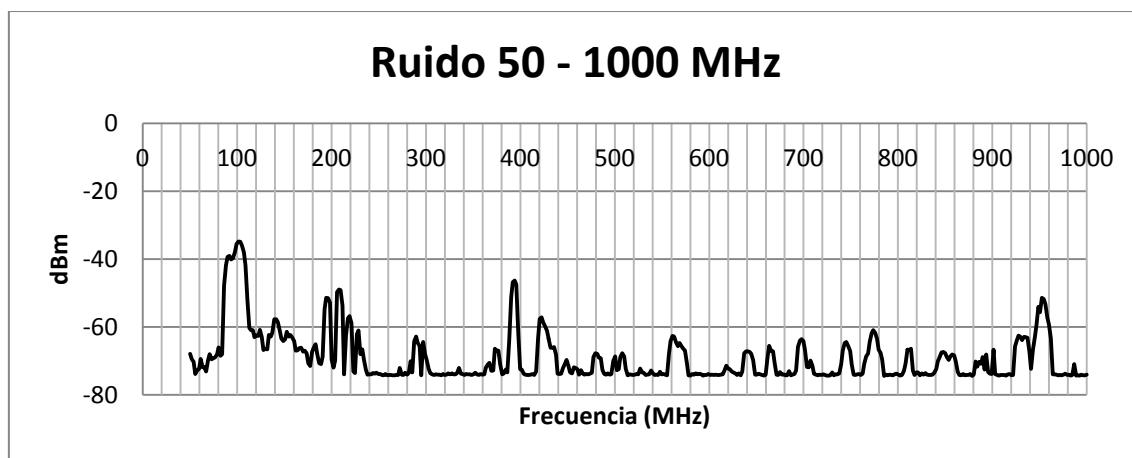


Fig. 5.4. Ruido registrado entre 50 y 1000 MHz

A continuación se observa el ruido medido en el rango 2 de frecuencia:

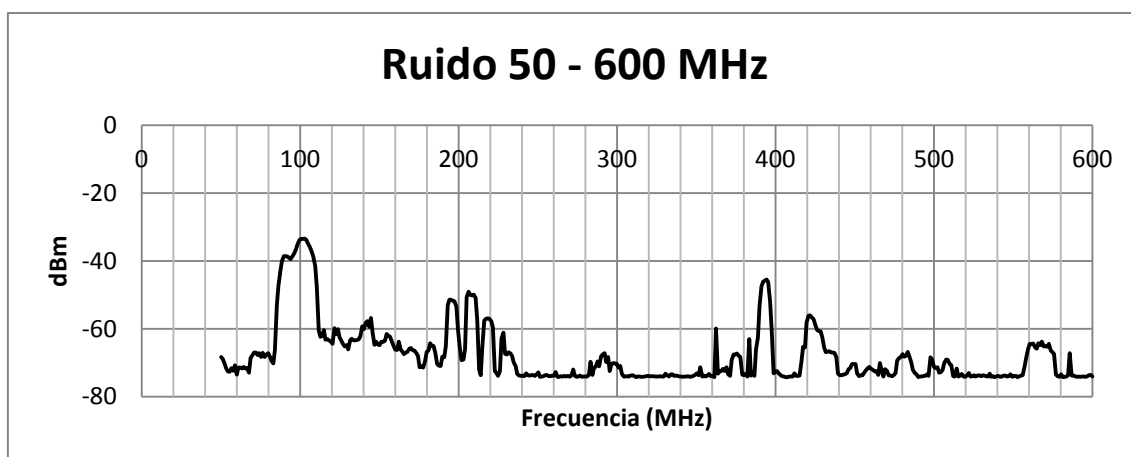


Fig. 5.5. Ruido registrado entre 50 y 600 MHz

La siguiente imagen representa el ruido en el rango 3:

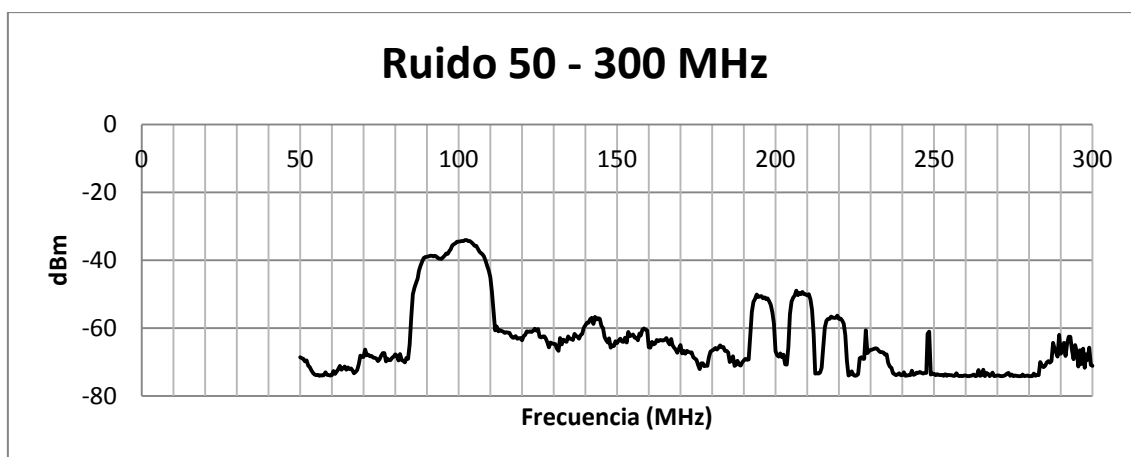


Fig. 5.6. Ruido registrado entre 50 y 300 MHz

Sobre estas plantillas de ruido se trabajará para detectar las descargas parciales medidas por el PDS-100.

Se puede observar, en el tramo medido de 50 a 1000 MHz, que el ruido captado por el PDS-100 se corresponde a las frecuencias aproximadas dadas en la Tabla 5 2 :

Tabla 5 2. Ruidos captados por el PDS-100

Señal de ruido	Frecuencia aproximada
Radio FM	100 MHz
DAB (Digital Audio Broadcasting)	200 MHz
TV	500 – 800 MHz
3G-GSM	950 MHz

5.4.2. Ensayo 1

El primer ensayo consiste en medir descargas internas en la vacuola del papel sumergido en aceite. Para ello se conecta un electrodo a la fuente de alta tensión y el otro electrodo se pone a tierra. Se conecta un condensador en paralelo tal y como especifica la norma IEC 60270 para drenar a tierra los pulsos de corriente de alta frecuencia y que queden registrados gracias al HFCT.

Se aplica gradualmente tensión al objeto de ensayo aumentándola hasta llegar a los 14,5 kV. A este potencial se consiguen unos pulsos de DP estables. Se comprueba que el porcentaje de descargas internas es superior al 90% del total de las DP que se producen –internas más superficiales–. Esta tensión de ensayo es suficiente para medir las DP con los equipos auxiliares de medida y con el PDS-100. Gracias a la conexión *transformador HFCT - PDCheck* se verifica que las señales detectadas de UHF se deben a descargas parciales.

Para medir con el PDS-100, se pulsa el botón *Mode* y a continuación *F1 (Spectrum analyzer)*. Si se deseara medir en tiempo resuelto habría que pulsar la tecla *F2 (Time resolve)*. Una vez realizada la medida en el espectro de frecuencia deseado se procede a guardar la traza pulsando *Menu* y después *Save*.

Se llevan a cabo tres mediciones con el PDS-100 correspondientes a los tres rangos de frecuencia antes mencionados. El PDS-100 recoge 501 valores de medida en el tramo de frecuencia que elija el usuario, por lo que al reducir el rango de frecuencia a medir, se obtiene mayor precisión minimizando el error de medida.

Dado que es un diagrama en ganancia y no se pueden restar las señales, lo más efectivo es superponer los dos registros para apreciar gráficamente las diferencias entre ambos.

Para analizar estas gráficas que ofrece el modo analizador de espectro del PDS-100, se separan en tres tramos. Se hace así para apreciar con mayor facilidad en qué rango de frecuencia se dan las descargas parciales en los objetos de ensayo.

Tabla 5 3. Clasificación de los tramos a analizar.

Tramo	Frecuencia mínima (MHz)	Frecuencia máxima (MHz)
1	50	300
2	300	600
3	600	1000

A continuación, en las figuras Fig. 5.7, Fig. 5.8 y Fig. 5.9 se muestran los resultados de las mediciones de DP internas en el objeto de ensayo A en los tres rangos definidos con anterioridad.

La onda de color negro en las siguientes gráficas se corresponde al ruido y la onda naranja se corresponde con la actividad relacionada con las DP internas.

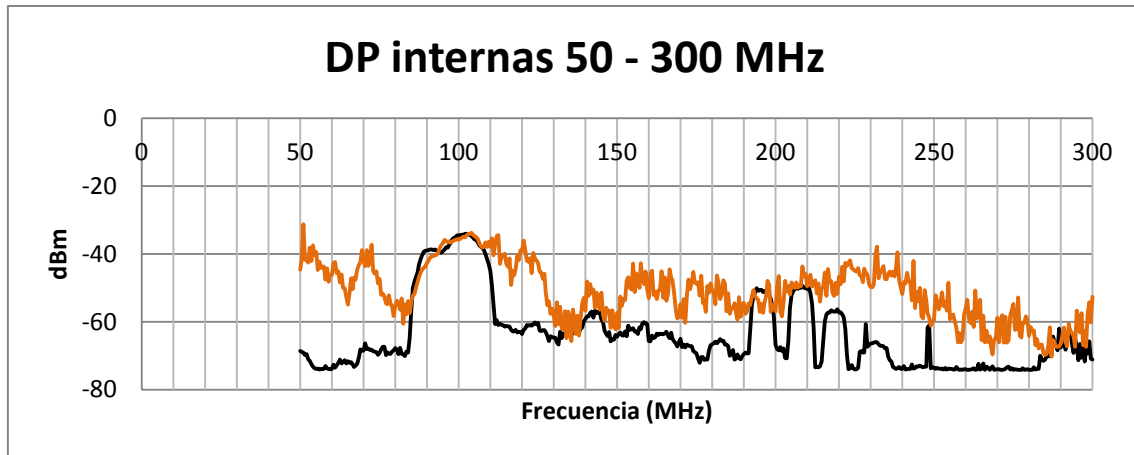


Fig. 5.7. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 3.

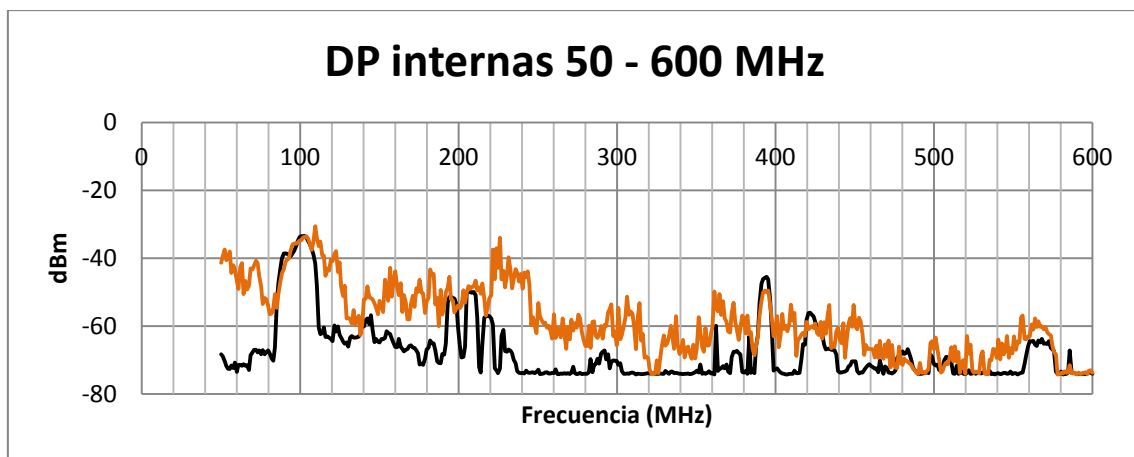


Fig. 5.8. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 2.

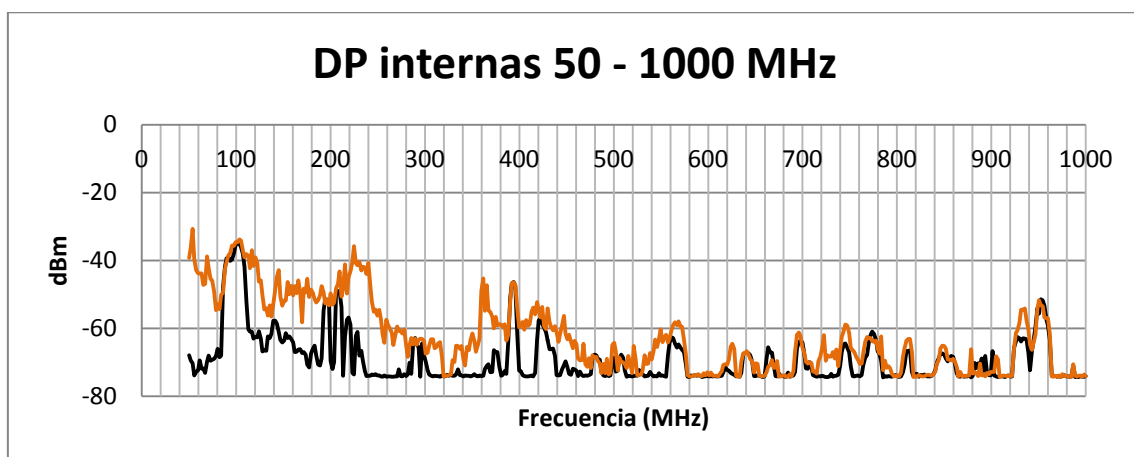


Fig. 5.9. Superposición de las ondas del ensayo 1 y ruido para el rango 1.

Con el programa informático *PDCheck* se pueden interpretar los pulsos de corriente medidos por el transformador HFCT y se pueden analizar los patrones PRPD y los mapas T-F de las descargas parciales en el objeto de ensayo A -Fig. 5.10-:

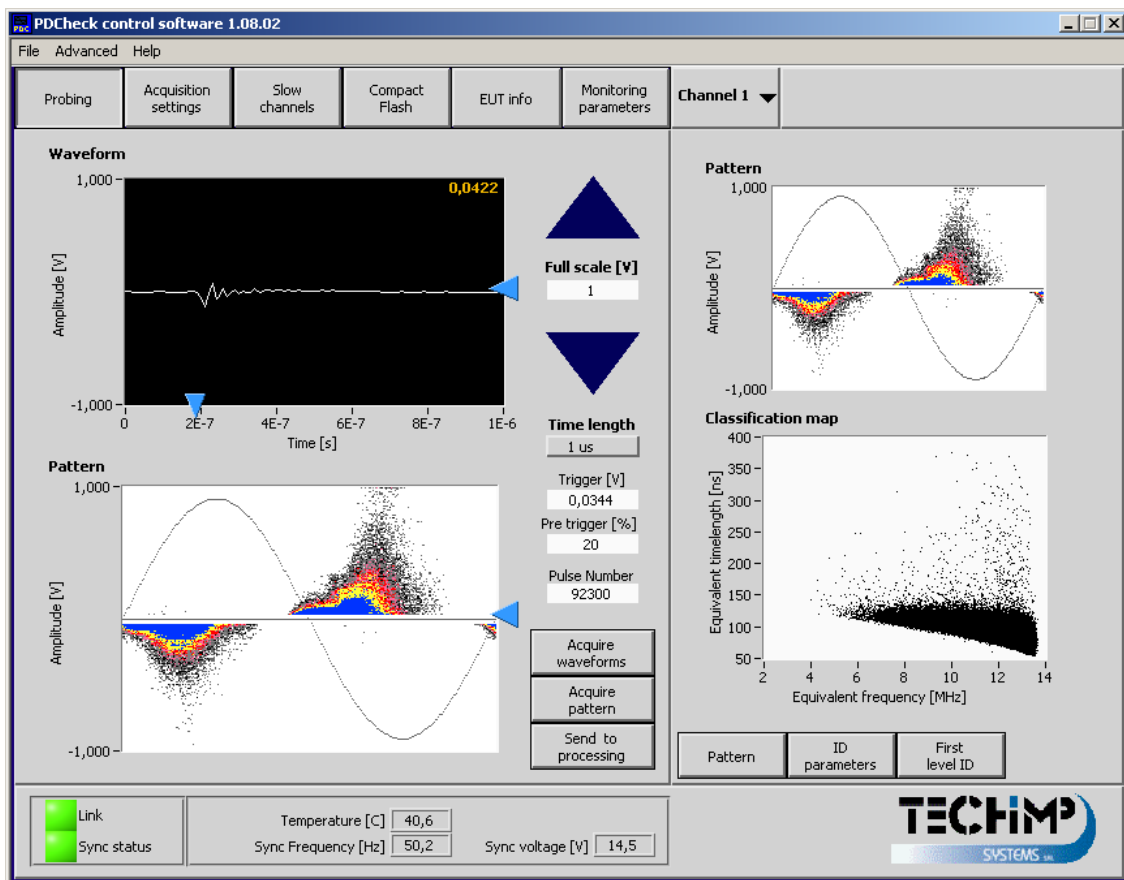


Fig. 5.10. Datos del PDCheck correspondientes al ensayo 1

Se verifica con el patrón PRPD que se trata de DP internas. La nube de puntos de los pulsos registrados interseca con la onda de tensión sinusoidal superpuesta en el paso por cero.

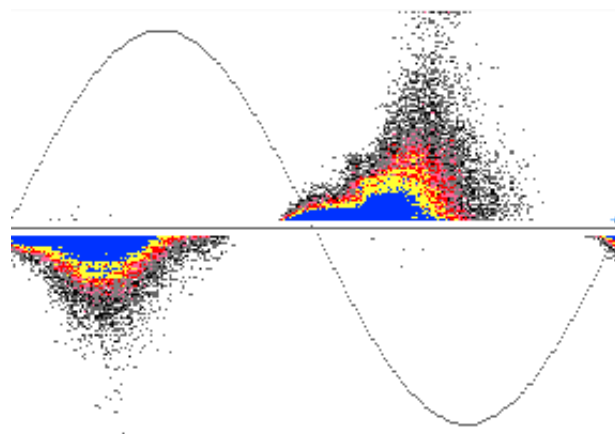


Fig. 5.11. Patrón PRPD del objeto de ensayo A

El mapa T-F muestra una sola agrupación de pulsos, por lo que únicamente existe, en este ensayo, una fuente de DP.

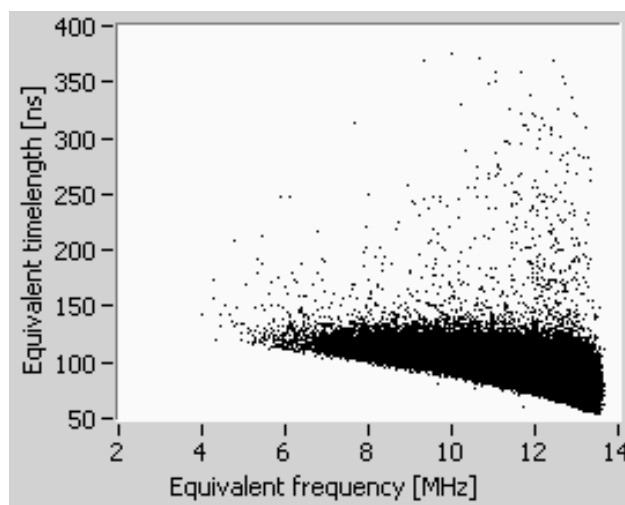


Fig. 5.12. Mapa T-F del ensayo 1

Para interpretar los resultados obtenidos en el ensayo 1, se utiliza la Tabla 5 4, la cual muestra, en función de cada tramo, la relación entre ambas señales. Se acumulan los valores medidos con el PDS-100 por tramos. Se dividen entre sí los valores acumulados en cada tramo para obtener un ratio que es indicativo de la diferencia que se produce entre las señales de ruido y la actividad correspondiente a la actividad de DP.

Tabla 5 4. Ratios para las DP internas

Tramo	Rango de frecuencia (MHz)	Ruido acumulado (dBm)	DP internas acumuladas (dBm)	Ratio
1	50 – 300	-32024	-25567	1,2525
2	300 – 600	-19354	-17745	1,0906
3	600 - 1000	-14952	-14629	1,0220

El mayor ratio se da en el tramo que va desde los 50 MHz hasta los 300 MHz. Las descargas parciales internas suelen darse en torno a los 200 o 230 MHz de frecuencia. Se observa en las gráficas anteriores que la mayor diferencia se encuentra en los 238,5 MHz. Esto indica que efectivamente se miden DP internas en el objeto de ensayo A.

Se puede concluir que, al haber diferencia entre las dos señales en esos puntos cercanos a los 200 MHz, existen descargas parciales internas en el objeto de ensayo A.

5.4.3. Ensayo 2

Este ensayo se lleva a cabo con la lámina de polietileno de 1mm de grosor situada entre un electrodo a potencial y tierra. Se aplican 1,6 kV de tensión al objeto de ensayo B para medir la energía electromagnética que emite dicho objeto. Aplicando un nivel de tensión no muy elevado aparecen DP superficiales por lo que no es necesario seguir elevando la tensión de ensayo. Se analizan los resultados obtenidos con el PDS-100 superponiéndolos a los registros del ruido previamente medidos con dicho aparato. Las trazas se guardan de la misma manera que la explicada en el ensayo 1.

La onda negra se identifica como ruido y la de color morado se corresponde con las DP superficiales.

Los resultados obtenidos son los que aparecen en las Fig. 5.13, Fig. 5.14 y Fig. 5.15:

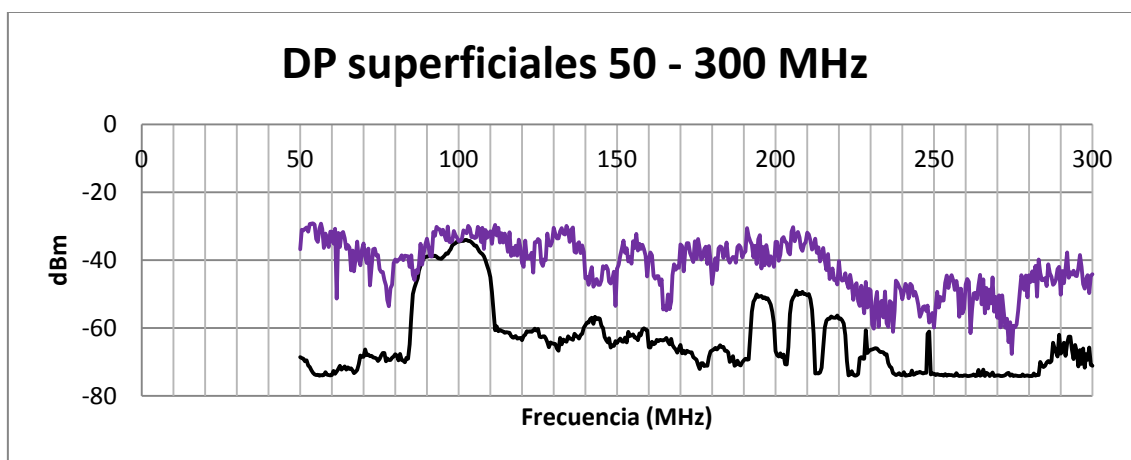


Fig. 5.13. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 3.

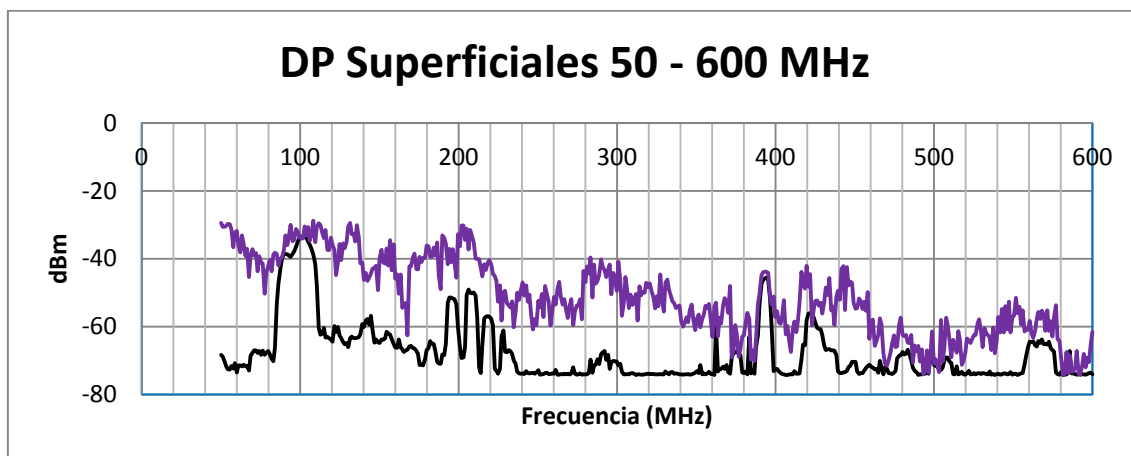


Fig. 5.14. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 2.

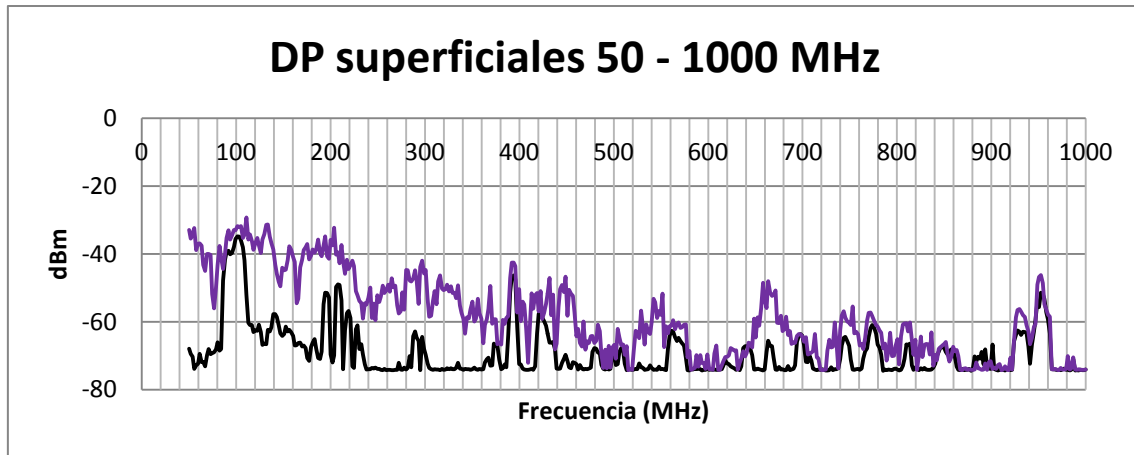


Fig. 5.15. Superposición de las ondas del ensayo 2 y ruido para el rango 1.

En la Fig. 5.16 aparecen los resultados que arroja el PDCheck sobre este ensayo:

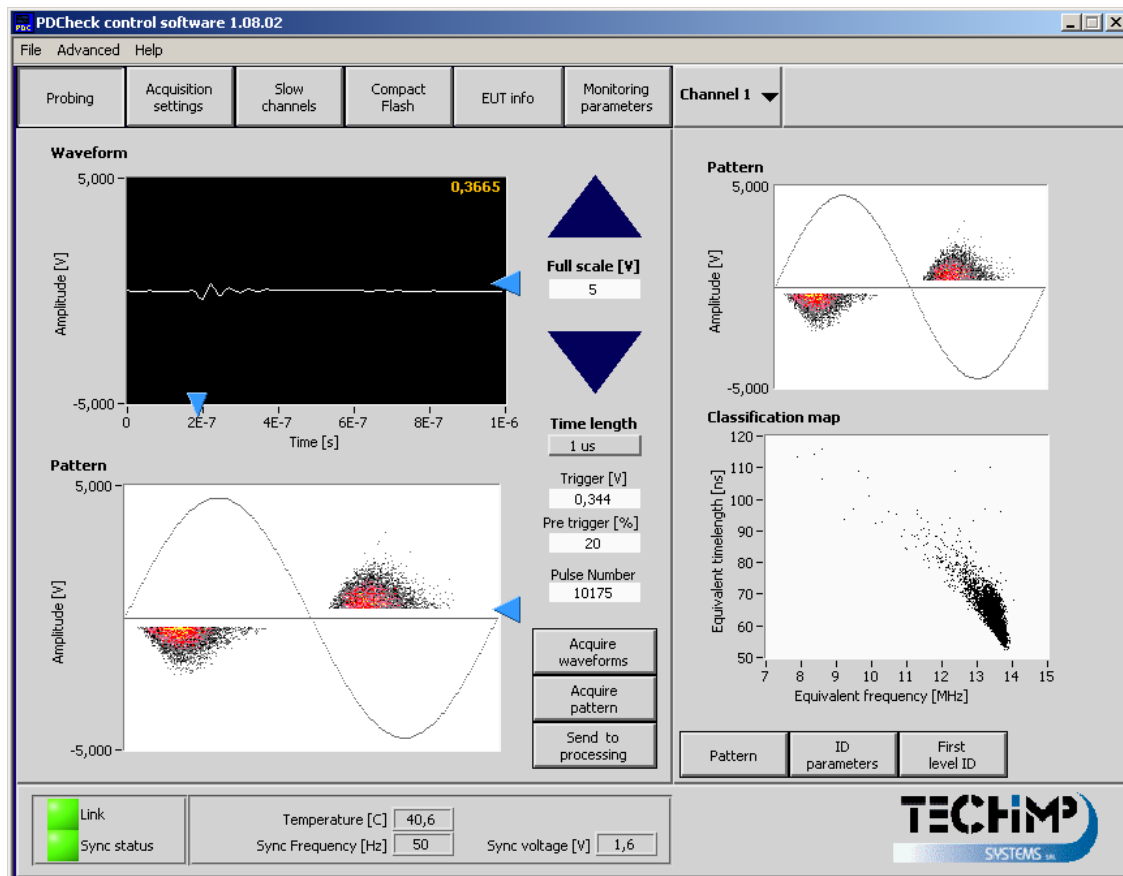


Fig. 5.16. Resultados del ensayo 2 obtenidos con el PDCheck

Este método de medida permite obtener los patrones PRPD y el mapa T-F del ensayo 2 para analizar con más detalle la actividad que produce la tensión en el objeto de ensayo B.

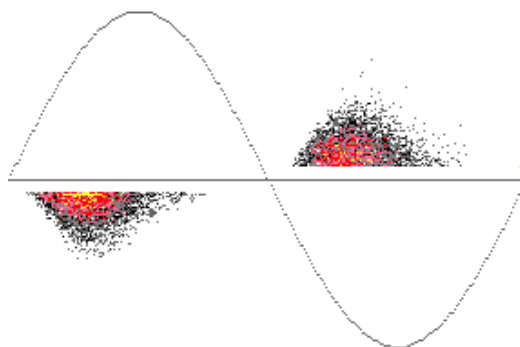


Fig. 5.17. Patrón PRPD de el objeto de ensayo B

La figura anterior muestra una agrupación de pulsos de DP en el inicio de cada semiciclo. Esto se corresponde con los patrones PRPD propios de las descargas superficiales. Se puede afirmar que el patrón PRPD de este ensayo verifica que en el objeto se producen DP superficiales. Las descargas superficiales suelen darse de 0 a 400 MHz y en algunas ocasiones en torno a los 600MHz.

Se agrupan los datos medidos con el PDS-100 en los intervalos expuestos en la Tabla 5 5 para analizar cómo se distribuyen las descargas superficiales en la banda de frecuencia comprendida entre 50 y 1000 MHz.

Tabla 5 5. Ratios para DP superficiales

Tramo	Rango de frecuencia (MHz)	Ruido acumulado (dBm)	DP superficiales acumuladas (dBm)	Ratio
1	50 – 300	-32024	-20838	1,5368
2	300 – 600	-19354	-16027	1,2075
3	600 - 1000	-14952	-14044	1,0646

En las gráficas anteriores se aprecia una clara diferencia entre las dos ondas superpuestas. Esta diferencia es más pronunciada en el rango de 0 a 443MHz, lo que implica que se trata de DP superficiales.

Si se analiza con los ratios, el ratio en el tramo 1 es de 1,53 y en el tramo 2 es de 1,2. Esto es indicativo de la presencia de dichas descargas superficiales. En el tramo que va desde los 600 MHz hasta los 1000 MHz no se aprecia una diferencia significativa. No obstante, se observa también una pequeña diferencia entre los dos registros a una frecuencia de 658 Hz.

6. SEGURIDAD EN AMBIENTES DE ALTA TENSION

En el ensayo del laboratorio correspondiente a las descargas parciales se utiliza el circuito indirecto por la seguridad que supone. Es más seguro que el circuito directo ya que en caso de fallo en el aislamiento de éste último, los equipos y las personas quedan expuestos [33].

Atendiendo a la norma UNE 207020:2012 y al Real Decreto 614/2001, de 8 de Junio, se exponen en este apartado las precauciones para ejecutar con seguridad y garantía cualquier trabajo en un ambiente donde exista riesgo de contacto con un elemento a tensión.

Garantizar la salud de los trabajadores es primordial en cualquier ámbito de trabajo. Se deben tomar todas las medidas necesarias para garantizar la integridad y salud de los trabajadores, sea cual sea su campo de trabajo. Con el paso del tiempo se ha ido perfeccionando la materia referente a la seguridad, publicando normas y leyes de obligado cumplimiento. Es la Ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales la referente a este apartado.

Prevenir los accidentes a través de una buena gestión de las instalaciones y elementos potencialmente peligrosos y minimizar los efectos de aquellos accidentes que sean inevitables.

Los trabajadores que desempeñen su labor en áreas que conlleven un riesgo eléctrico para la salud deben tener una formación adecuada y estar previamente informados sobre los peligros a los que pueden estar expuestos. Además deben emplearse todo tipo de accesorios y equipos protectores para proteger al empleado del riesgo eléctrico. Estos accesorios básicamente son:

- Accesorios aislantes para proteger frente a partes a distinto potencial. Banquetas o plataformas de goma son útiles para evitar que el trabajador cierre el circuito en caso de contacto con un elemento electrificado.
- Pértigas aislantes para descargar elementos que puedan almacenar energía.
- Herramientas aisladas tales como alicates o pinzas para trabajar de forma más segura.
- Equipos de protección individual –EPI- como casco, chaleco o gafas.

Los trabajadores deben prevenir e intentar evitar los contactos accidentales con elementos que estén a tensión. Además se debe permanecer a una distancia de seguridad de aquellos elementos que estén a alta tensión. Las distancias deben cumplirse para que no se produzcan contactos directos o arcos eléctricos que ocasionen daños al personal. El trabajador Jefe debe asumir la responsabilidad efectiva de los trabajos.

La Tabla 6 1 muestra las distancias mínimas de seguridad que debe respetar un trabajador desprovisto de elementos de protección [34].

Tabla 6 1. Distancias mínimas de seguridad [33]

U_n (kV)	D_{pel-1} (cm)	D_{pel-2} (cm)	D_{prox-1} (cm)	D_{prox-2} (cm)
1	50	50	70	300
3	62	52	112	300
6	62	53	112	300
10	65	55	115	300
15	66	57	116	300
20	72	60	122	300
30	82	66	132	300
45	98	73	148	300
66	120	85	170	300
110	160	100	210	500
132	180	110	330	500
220	260	160	410	500
380	390	250	540	700

Donde:

U_n - Tensión nominal de la instalación en kV.

D_{pel-1} - Distancia hasta el límite exterior de la zona de peligro cuando exista riesgo de sobretensión por el impacto de un rayo.

D_{pel-2} - Distancia hasta el límite exterior de la zona de peligro cuando no exista riesgo de sobretensión por el impacto de un rayo.

D_{prox-1} - Distancia hasta el límite exterior de la zona de proximidad cuando resulte posible delimitar con precisión la zona de trabajo y controlar que ésta no se sobrepasa durante la realización del mismo.

D_{prox-2} - Distancia hasta el límite exterior de la zona de proximidad cuando no resulte posible delimitar con precisión la zona de trabajo y controlar que ésta no se sobrepasa durante la realización del mismo.

Todos los trabajadores deben de cumplir una serie de operaciones para poder realizar maniobras en equipos eléctricos a tensión. Esta metodología de actuación se conoce comúnmente como las cinco reglas de oro. Se debe eliminar la tensión de los equipos a revisar para realizar la tarea sin tensión. Posteriormente se restablece la tensión. Es fundamental cumplir cada uno de los pasos siguientes para garantizar la salud y seguridad del personal.

1º- Desconexión: se debe desconectar cualquier fuente de tensión de los aparatos que se van a manejar. Se debe interponer un aislamiento entre contactos, ya sea un espacio de aire o de cualquier otro material aislante. Se descargarán mediante un método adecuado los condensadores o los elementos que puedan almacenar energía una vez desconectada la instalación.

2º- Prevención de cualquier posible realimentación: siempre que sea posible de debe bloquear mecánicamente cualquier método de desconexión empleado en el primer paso que pueda restablecer accidentalmente la tensión en la zona de trabajo. Además se deben señalar

correctamente las zonas oportunas para prohibir cualquier maniobra de reenganche. Si no es posible realizar un bloqueo se adoptarán medidas de protección equivalentes. Si se precisa de una fuente de energía auxiliar para alimentar algún elemento de corte, ésta se debe mantener a una distancia suficiente para asegurar que la instalación siga aislada.

3º- Comprobación de ausencia de tensión: se verifica con los aparatos adecuados la ausencia total de tensión en todos los elementos de la instalación. Se debe comprobar a su vez el correcto funcionamiento de estos aparatos de medida antes y después de realizar las mediciones.

4º- Puesta a tierra y cortocircuito: por seguridad, se cortocircuitan y se ponen a tierra las zonas en las que se vaya a trabajar y en aquellas que pueda darse tensión por inducción. Los conductores utilizados estarán dimensionados acorde a la corriente de cortocircuito que deben soportar. Los sistemas de puesta a tierra deben ser visibles desde la zona de trabajo y se conectarán primero a tierra y después al elemento deseado. Se deben asegurar estas conexiones durante el periodo de operación en el campo de trabajo. Si en algún momento es necesario desconectar estos sistemas de protección deberán proponerse medidas adicionales.

5º- Señalización y protección frente a elementos próximos de tensión: Se señala la zona delimitada para el trabajo. Si en zonas próximas hay elementos con tensión se deben adoptar medidas de protección adicionales para garantizar la ausencia de la misma.

Para poder restablecer la tensión después de la tarea realizada se deben seguir unas pautas:

1º- Retirada de la señalización de la zona de trabajo así como de las protecciones auxiliares si las hay.

2º- Retirada de la puesta a tierra y cortocircuito.

3º- Se liberan los dispositivos de bloqueo mecánico que hacían seguro el corte de los dispositivos a tal efecto.

4º- Por último se cierran los dispositivos de corte y se restablece la tensión en la zona.

7. PRESUPUESTOS PARA LA MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES CON LA HERRAMIENTA PDS-100

En este capítulo se presentan los costes económicos estimados para la realización de medidas de descargas parciales con la herramienta PDS-100.

Se tienen en cuenta todos los posibles elementos que se puedan necesitar a la hora de medir e interpretar los resultados con el PDS-100. Se requiere disponer de una serie de materiales además de licencias y/o contratos.

Los precios mostrados no son exactos, si no de carácter orientativo.

Se ha considerado necesario disponer de todos los elementos que figuran en la Tabla 7 1.

Tabla 7 1. Costes estimados para la realización de medidas de DP con el PDS-100

Elemento	Unidades	Tiempo	Coste
PDS-100	1		10000 €
Ingeniero eléctrico		1 mes	2500 €
Material de oficina	1	1 mes	30 €
Ordenador	1		800 €
Impresora	1		200 €
Licencias de software	1	1 año	500 €
Alquiler del inmueble		1 mes	1000 €
Contrato internet y teléfono		1 mes	40 €
Contrato de luz, agua y gas		3 meses	300 €

La compra del PDS-100 supone también la adquisición del software *PDS Viewer* con el que se trabajan los datos en el ordenador. Una vez efectuada la compra no es necesario invertir más dinero en este equipo.

El ingeniero eléctrico responsable de realizar las medidas y su posterior interpretación con el ordenador. Se estima que el sueldo del ingeniero oscila en torno a 20 € la hora y se considera un sueldo mensual de unos 2500 €.

El material de oficina comprende todo lo necesario para el desarrollo de las tareas en la misma. Se ha supuesto una compra de material al mes.

Se invierte una sola vez en un ordenador y una impresora.

Para las licencias de software se considera su necesaria renovación una vez al año desembolsando una cantidad simbólica.

El pago de internet, teléfono e inmueble se realiza mensualmente.

Se efectúa un pago trimestral de luz, agua y gas. Se han unido en un mismo pago por simplicidad.

Así pues, si se desea conocer el desembolso inicial, se estiman necesarias las compras del PDS-100, el primer lote de material de oficina, el ordenador y la impresora. Este pago se realiza en una única vez. El desembolso de estos pagos asciende a los 11030 €.

Así mismo, se ha supuesto necesario el pago mensual del material de oficina, el sueldo de ingeniero, las licencias de software, el alquiler y el internet. Se realizan cuatro pagos anuales de luz, agua y gas. Se considera que el pago anual llega a los 50010 €.

El coste total para el desarrollo de la actividad de medición de descargas parciales con el PDS-100 es de 61040 €.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha propuesto la detección de descargas parciales por RF y su aplicación con el PDS-100 midiendo en el laboratorio de Alta Tensión –*LINEALT*–.

Conociendo la naturaleza de estos fenómenos y con sistemas de detección adecuados es factible clasificarlas y analizarlas mediante el análisis de las mismas por RF. La naturaleza de las DP es distinta a la del ruido: sus pulsos son de corta duración y constan de distinta amplitud. Se pueden identificar sobre el ruido ya que su energía se suma mostrando así diferencias entre la amplitud de ambas señales en el espectro de frecuencia que se desee analizar.

Se pueden detectar las DP sin necesidad de estar en contacto con el objeto a medir. Se consigue captando su energía electromagnética mediante antenas. Se han empleado unas determinadas antenas para registrar la actividad de DP. Cada una posee unas características determinadas y se adaptan mejor o peor a las mediciones realizadas. Cabe destacar la antena vivaldi y el monopolo de 5 cm como mejores antenas para este caso. Poseen un buen comportamiento en el espectro de frecuencia en el que aparecen las DP.

Según la naturaleza de las DP que se miden, se pueden identificar interpretando los datos obtenidos con el PDS-100. Este equipo permite el análisis inmediato de los datos medidos en el propio display gráfico del aparato. Otra opción es trasladar los datos a un ordenador para procesarlos con el *PDS Viewer*. En este trabajo se ha optado por medir en el modo analizador de espectro.

El *PDCheck*, y la conexión del mismo con el resto de aparatos para la medida, permite obtener los patrones PRPD de las descargas parciales, los mapas T-F y la amplitud frente al tiempo de las DP. A lo largo de este trabajo se han enumerado diferentes métodos de clasificación de DP.

Los patrones PRPD son sencillos de interpretar, pues hay que observar cómo se distribuyen las nubes de pulsos de DP en relación a la onda sinusoidal. Las señales de los pulsos de DP se diferencian del ruido ya que éste último es de baja amplitud. Este método es de fácil interpretación pero da información muy general de la señal medida.

Los mapas T-F y los PRL-PRH permiten separar de manera sencilla el ruido y los pulsos de DP, ya que cada uno se sitúa en una zona del mapa. Estos dos métodos de clasificación detallan más la información que los patrones PRPD sobre los pulsos de descargas parciales.

El PDS-100 utiliza el modo analizador de espectro para llevar a cabo las mediciones de DP. Se registra la amplitud de los pulsos de DP en el espectro de frecuencia. Se compara el resultado obtenido con el ruido y se observa gráficamente dónde se producen las DP.

Dado el carácter portátil y la precisión de medida del equipo PDS-100 es recomendable su uso para medir la actividad de RF en subestaciones, cables, máquinas rotativas, líneas y equipos de alta tensión, tales como transformadores. Se realizan las mediciones de forma segura para el usuario, ya que el PDS-100 no precisa estar en contacto con el objeto de medida.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.-E. 60270:2001, Técnicas de ensayo en alta tensión: Medidas de las descargas parciales, UNE-EN 60270, 2001.
- [2] J. A. A. Rey, Sistema de adquisición de descargas parciales. Caracterización de fuentes de descarga y ruido por análisis de potencia espectral. Trabajo fin de Máster en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [3] J. R. D. Gautier, Caracterización de defectos en sistemas de aislamiento mediante detección de descargas parciales, Contrato programa de la Universidad Carlos III y la Comunidad de Madrid, 2002.
- [4] J. A. M. Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, McGraw-Hill, 2008.
- [5] 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, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2011.
- [6] Á. S. Blázquez, Monitorización continua de descargas parciales para caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas eléctricas, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010.
- [7] www.doble.com, «PDS100 Partial Discharge Surveyor Training Course,» 2011.
- [8] J. M. M. Tarifa, Apuntes de Ingeniería de Alta Tensión, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [9] A. Cavallini, G. Montanari, A. Contin y F. Puletti, «A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference,» *Electrical Insulation Magazine, IEEE (Volume:19, Issue: 2)*, pp. 23 - 30, 2003.
- [10] A. Cavallini, G. Montanari y F. Ciani, «Analysis of partial discharge phenomena in paper-oil insulation systems as a basis for risk assessment evaluation,» *Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. 2005 IEEE International Conference on*, pp. 241 - 244, 2005.
- [11] U. P. d. Valencia, «<http://www.upv.es/antenas/>,» [En línea]. Available: <http://www.upv.es/antenas/>. [Último acceso: 13 Abril 2013].
- [12] R. H. Aquino, Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz, Universidad de las Américas Puebla-Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, 2008.
- [13] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Wiley-Interscience, 2005.

- [14] J. J. M. Fuentes, Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla, 2007.
- [15] R. E. Collin, Antennas and Radiowave Propagation, McGraw-Hill, 1985.
- [16] W. L. Stutzman y G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, Wiley-Interscience, 2012.
- [17] D. K. Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, Pearson, 1997.
- [18] D. A. A. Cerda, Diseño e implementación de una antena Yagi Fractal en las bandas de 200, 400 y 800 MHz, Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [19] J. C. Brégains, Análisis, síntesis y control de diagramas de radiación generados por distribuciones continuas y discretas utilizando algoritmos estocásticos y redes neuronales artificiales. Aplicaciones, Universidad de Santiago de Compostela, 2007.
- [20] «www.antenna-theory.com,» [En línea]. [Último acceso: 10 Mayo 2013].
- [21] C. A. Jiménez, Dipolo impreso para aplicaciones Wi-Fi y caracterización de la ganancia por medio de la celda TEM, Universidad Autónoma de Barcelona, 2011.
- [22] G. Robles, J. Martínez-Tarifa, M. Rojas-Moreno, R. Albarracín y J. Ardila-Rey, «Antenna selection and frequency response study for UHF detection of partial discharges,» *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012.
- [23] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, R. A. Sánchez, 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 (Volume:62, Issue: 5)*, 2012.
- [24] «<http://es.slideshare.net>,» [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/gusniell/antenas>. [Último acceso: 7 Abril 2013].
- [25] R. Janaswamy y D. H. Schaubert, «Analysis of the tapered slot antenna,» *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1986 (Volume:24)*, pp. 689 - 692, 1986.
- [26] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, R. A. Sánchez, M. V. Rojas-Moreno, E. Rajo-Iglesias y J. M. Martínez-Tarifa, «On the use of vivaldi antennas in the detection of partial discharges,» *11th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 2013.
- [27] «www.patternmagus.com/,» 11 Abril 2013. [En línea]. Available: http://www.patternmagus.com/database/patterns/pattern_page.php?dir=69.
- [28] «<http://es.slideshare.net/>,» 15 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/lonely113/diseo-de-antena-microstrip>.

- [29] Y. Shibuya, S. Matsumoto, M. Tanaka, H. Muto y Y. Kaneda, «Electromagnetic waves from partial discharges in windings and their detection by patch antenna,» *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (Volume:18 , Issue: 6)*, 2011.
- [30] «www.radioworld.co.uk,» 6 Mayo 2013. [En línea]. Available: http://www.radioworld.co.uk/catalog/w-889_watson_25-1900mhz_tele-gainer_bnc-p-4033.html.
- [31] «www.diamondantenna.net,» 15 Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://www.diamondantenna.net/rh789.html> .
- [32] Doble, PDS100 Partial Discharge Surveyor User Guide, Doble Engineering Company, 2011.
- [33] U. 207020:2012, Procedimiento para garantizar la protección de la salud y la seguridad de las personas en instalaciones eléctricas de ensayo y de medida de alta tensión, UNE 207020, 2012.
- [34] M. d. Presidencia, REAL DECRETO 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. BOE nº 148 21-06-2001, 2001.
- [35] I. T. Union, Reglamento de Radiocomunicaciones-Artículos, 2012.
- [36] I. Standard, Definitions of Terms for Antennas, 1983.
- [37] C. P. Vega, Capítulo 10 Antenas, Universidad de Cantabria-Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones.
- [38] C. Rodríguez Moya, Caracterización de un dieléctrico mediante envejecimiento por tensión alterna, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010.
- [39] J. C. B. Díaz, Apuntes de Instalaciones Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2012.



10. RELACIÓN DE ANEXOS

Anexo I: Introducción histórica a las antenas

Anexo II: Frecuencias y su clasificación

Anexo III: Equipos para la medida de descargas parciales

Anexo IV: Hoja de especificaciones del PDS-100

Anexo V: Funciones de los botones y teclas de función

Anexo VI: Botones y teclas alfanuméricas

10.1. Anexo I: Introducción histórica a las antenas [11]

Joseph Henry consiguió demostrar en 1842 que se podían magnetizar agujas situadas a una distancia de dos pisos a través de la inducción electromagnética que él mismo descubrió. A finales del siglo XIX se produjeron grandes avances tales como el descubrimiento por parte de Edison de que las chispas que se producen en los interruptores eléctricos liberan radiación. En 1887 Hertz comprobó experimentalmente la validez de las ecuaciones de Maxwell y en 1891 Edouard Branly inventó el primer receptor de ondas electromagnéticas.

No obstante no es hasta principios del siglo XX cuando se produce la primera conexión radiofónica, que se estableció el 12 de Diciembre de 1901 entre Cornualles, Gran Bretaña y Terranova, Canadá. Marconi fue el responsable de dicha comunicación gracias a una antena de 15 kW que operaba a 820 kHz. Unos años más tarde, en 1906 el propio Marconi midió el primer diagrama de radiación de una antena formada por un hilo conductor situado en paralelo al suelo. Un año más tarde Lee De Forest inventó el tríodo, que fue el precursor de elementos electrónicos de gran importancia como amplificadores de radio frecuencia, osciladores, moduladores...

En la segunda década del siglo XX se construyen grandes antenas de baja frecuencia y de elevada potencia sobretudo en Estados Unidos. Los ensayos con estos aparatos permitieron establecer la primera radiodifusión -de música- en New Rochele, New York.

En 1920 se produjo la primera radiodifusión regular en la estación de radio KDKA en Pittsburgh. En 1922 la BBC emitió, por primera vez en Europa, un programa no experimental. En este mismo año se desarrolló un sistema de detección de objetos en movimiento gracias a un sistema de ondas continuas. Este primer radar no se llegó a desarrollar.

Fue en 1923 cuando se produjo la primera comunicación entre Nueva York y Escocia. Se produjo gracias a Beverage y su antena de onda progresiva.

En 1929 Franklin desarrolló un radiofaro en Escocia.

En 1925 John L. Baird propuso un sistema para la exploración mecánica de las imágenes pero no fue hasta 1936, en los Juegos Olímpicos de Berlín, que se retransmitieron las primeras imágenes de televisión. En la década de los 30' se aumentó la frecuencia y aparecieron las microondas, las cuales empiezan a partir de la banda UHF.

La utilización de estas frecuencias permitieron en 1931 el primer enlace troposférico entre Francia y Gran Bretaña. Se descubrió entonces que se podían transmitir señales hasta cinco veces el alcance visual.

En 1930 se detectó de forma accidental un avión en pleno vuelo. Se comprobó la variación de la señal mientras se llevaba a cabo otro experimento. Se incrementó la investigación del radar y en pocos años se llegó a la conclusión de que había que incrementar la frecuencia para disponer de un mayor alcance de detección a menores potencias de radiación. También en 1930 al inventar Karl G. Jansky una antena tipo cortina, éste dedujo que el ruido que estaba presente de forma temporal provenía de las tormentas. No obstante, dedujo que el ruido que aparecía de forma permanente era debido al sol, las plantas y en definitiva de toda la galaxia. Este descubrimiento supuso el principio de la comunicación astronómica.

Un gran avance fue el que se produjo en 1939 cuando D. Blumlein inventó la ranura resonante. Ésta consiste en un cilindro ranurado alimentado por una espira. Se descubrieron también los efectos de las cargas inductivas serie y las cargas capacitivas en paralelo.

La II Guerra Mundial obligó a un notable crecimiento en la investigación y el desarrollo de la tecnología relacionada con las telecomunicaciones. La tecnología que más vio incrementada su desarrollo fue la de radar y se emplearon los reflectores, lentes y bocinas que ya se habían diseñado en el siglo XIX pero no se habían empleado. Las antenas evolucionaron y aparecieron distintos sistemas para aumentar eficiencia, controlar la distribución de campos en la apertura, la tecnología de guías de onda, etc.

En los años 50's se desarrollan notablemente las ranuras, las espiras, los dipolos y los reflectores con barrido mecánico o electrónico. Se consiguieron antenas independientes de la frecuencia y de banda ancha. Aparecieron también nuevas antenas como la logarítmico-periódicas y la de hélice.

Cabe destacar el uso y desarrollo de las antenas en la carrera aeroespacial, donde se produjeron grandes avances, destacando el ámbito de las comunicaciones. Desde mediados del siglo XX hasta la actualidad se han puesto en órbita numerosos satélites de comunicaciones. El primero se puso en órbita en 1958 seguido de los ECHO I y II, que se lanzaron en 1960 y 1964 respectivamente.

Desde entonces la tecnología referente a las comunicaciones no ha hecho más que evolucionar. En la historia reciente de las antenas cabe destacar que la mayoría de avances están directamente relacionados con los ordenadores. Éstos suponen una gran herramienta de cálculo, lo cual simplifica mucho hallar, por ejemplo, el campo radiado por una antena mediante la transformada de Fourier, que es más rápida y sencilla que la integral analítica.

El avance que está sufriendo la electrónica repercute directamente sobre las antenas. Gracias a estos componentes se puede controlar la fase y la amplitud para ajustar el diagrama de radiación a unas necesidades específicas. Estas antenas se denominan *arrays*.

También se mejoran las técnicas de análisis, las técnicas de fabricación, los circuitos integrados, se incorporan microprocesadores, aparecen los analizadores de redes automáticos, etc.

Con toda la tecnología digital, en la actualidad, se pretende mejorar la ganancia de las antenas, la resolución de las mismas con un menor tamaño y que sean de carácter reconfigurable.

La NASA (Agencia Espacial Norteamericana) y la ESA (Agencia Espacial Europea) han sido en los últimos años los principales desarrolladores de antenas. Se incorporan en los satélites antenas nuevas como las desplegadas y las hinchables y se busca constantemente nuevos diseños.

10.2. Anexo II: Frecuencias y su clasificación:

En la Tabla 10 1 podemos observar la clasificación de la frecuencia en rangos con las correspondientes longitudes de onda λ [35].

Tabla 10 1. Clasificación de las bandas de frecuencia

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λ mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz	30 kHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 GHz	300 GHz	1 cm	1 mm

En la Tabla 10 2 se muestran las frecuencias correspondientes al ruido generado por la radio, la televisión, el teléfono móvil, el internet...

Tabla 10 2. Frecuencias de ruido

Tipo de Ruido	Denominación	Rango de frecuencia (MHz)
CB	Citizens Band	26,96 – 27,41
FM	Frecuencia Modulada	88 – 108
DAB	Digital Audio Broadcasting	195 – 223
TV	Televisión	470 – 882
3G-GSM	Global System for Mobile Communications	900
DAB	Digital Audio Broadcasting	1452 – 1479,5
3G-GSM	Global System for Mobile Communications	1800
Banda S	Banda S	2170 – 2200
Wi-Fi	Wireless Fidelity	2400

La Tabla 10 3 muestra las bandas de microondas.

Tabla 10 3. Bandas de microondas

Banda	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λ mínima
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7,5 cm
C	4 GHz	8 GHz	7,5 cm	3,75 cm
X	8 GHz	12,4 GHz	3,75 cm	2,42 cm
Ku	12,4 GHz	18 GHz	2,42 cm	1,66 cm
K	18 GHz	26,5 GHz	1,66 cm	1,11 cm
Ka	26,5 GHz	40 GHz	11,1 mm	7,5 mm
mm	40 GHz	300 GHz	7,5 mm	1 mm

10.3. Anexo III: Equipos para la medida de descargas parciales

Se nombra y define cada uno de los aparatos que intervienen en el ensayo experimental.

10.3.1. Fuente de alimentación

A partir de un módulo de control Schleich GLP1-e HV, conectado a un transformador de alta tensión Schleich BV 702210 se pudo aplicar la tensión necesaria -14,5 kV- para que se produjesen las descargas parciales en los test de ensayo. Este transformador regula la tensión hasta un máximo de 18 kV.



Fig. 10.1. a) Transformador de AT Schleich b) Módulo de control Schleich

10.3.2. Condensador de acoplamiento

Fabricado por Haefely, el condensador empleado en los ensayos acorde a lo establecido en la norma UNE (circuito directo). Su capacidad es de 1 nF.



Fig. 10.2. Condensador de acoplamiento Haefely

10.3.3. Osciloscopio

El modelo empleado es el Tektronix DPO 7254 de 8 bits y 4 canales, con 2,5 GHz de ancho de banda y una velocidad de muestreo de 40 GS/s. A él se conectan las cuatro antenas que se nombran más adelante en el apartado 10.3.8.



Fig. 10.3. Osciloscopio Tektronix DPO 7254

10.3.4. Cable coaxial con conector BNC

Para conectar los elementos entre sí se utiliza el cable coaxial RG-223 que permite la transmisión de gran información, necesario para medir señales de RF. Se conectan gracias a los conectores BNC.



Fig. 10.4. Conector BNC

10.3.5. Transformador de corriente de alta frecuencia HFCT

Este transformador se utiliza para la medición de descargas parciales. Las detecta en cables, transformadores, motores eléctricos, etc. Puede conectarse a la tierra del sistema de ensayo sin necesidad de desconectarse del mismo. Actúa como un sensor inductivo. Lleva un conector BNC y se conecta por medio de un cable coaxial al sistema de análisis de *Techimp*. El modelo utilizado es el *Clamp HF Current Transformer 39*.



Fig. 10.5. Transformador HFCT de Techimp

En la Tabla 10 4 se dan las especificaciones técnicas ofrecidas por el fabricante

Tabla 10 4. Especificaciones del modelo HFCT 39

Parámetro	Valor
Ancho de banda (-6 dB)	2 MHz a 60 MHz
Sensibilidad máxima (V_{out}/I_{in} a 79 MHz y carga de 50 Ohms)	21 mV/mA
Impedancia de carga	50 Ω
Vout sin carga @ 50 Hz	0,6 Vpp @ 100 A
Vout sin carga @ Frecuencia de DP	0,4 Vpp @ 100 pC
Dimensiones	115 x 145 x 33 (mm)
Diámetro interior	\varnothing 39 mm
Peso	1,3 kg

10.3.6. Equipo PDCheck de Techimp

Ofrece una medida independiente de equipos de media y alta tensión. Analiza las DP que se producen en estos equipos. Permite monitorizar y analizar otros parámetros como la humedad relativa, el nivel de vibraciones, la temperatura ambiente, la tensión, corriente, etc. También dispone de una tarjeta de memoria para almacenar datos de interés. Está provisto de 3 canales para la medida de DP, 7 canales para la medida de los parámetros auxiliares y 1 salida auxiliar del relé.

Este equipo registra los datos de medida de DP a una velocidad de 100 MS/s de forma continua. Es capaz de representar en un diagrama de tiempo–frecuencia (T-F) los pulsos medidos aislándolos del ruido. Mide estos pulsos de DP, analiza las formas de onda y deriva los espectros de los mismos. Además emplea funciones para optimizar el flujo de datos.

El PDCheck es controlable desde equipos portátiles, ya que conecta con fibra óptica o cable Ethernet, y posee control remoto.



Fig. 10.6. PDCheck de Techimp

10.3.7. Analizador de redes

El modelo E8364B de Agilent Technologies mide desde los 10 MHz hasta 50 GHz. Es un equipo que mide las propiedades de transmisión de las líneas de propagación eléctricas. Concretamente se centra en la medida de los coeficientes de reflexión y de los parámetros S_{11} y S_{21} .

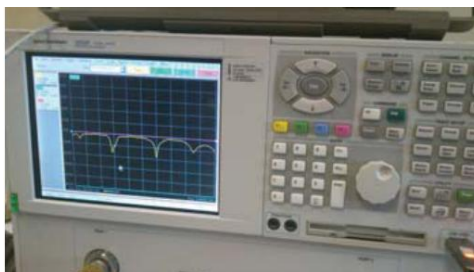


Fig. 10.7. Analizador de redes de Agilent Technologies

10.3.8. Antenas empleadas

Las antenas utilizadas para medir los pulsos de DP en el ensayo son:

- Monopolo de 5 cm
- Monopolo de 10 cm
- Antena logarítmico-periódica UHALP 9108A
- Antena Vivaldi

Estas antenas se describen con más detalle en los apartados 3.5, 3.6 y 3.7 del presente trabajo.

10.3.9. Envasadora de vacío

Se utilizó para aislar el papel Nomex de ranura de transformador para evitar su contacto con el aceite. El modelo es el Magic Vac MAXIMA de aspiración de 13 l/min, barra de soldadura de 30 cm y una depresión máxima de 0,932 bar.



Fig. 10.8. Envasadora Magic Van MAXIMA

10.3.10. PDS-100







El PDS-100 se ha descrito con detalle en el apartado 4.

10.4. Anexo IV: Hoja de especificaciones del PDS-100 [32]

Características	Especificación
Física	
Tamaño (ancho x alto x profundo)	225 x 310 x 70 mm / 8.85 x 12.20 x 2.25 in
Peso (con batería)	2.4 kg / 5.29 lbs
Medioambiental	
Temperatura de operación	0 – 50 °C / 32 – 122 °F
Temperatura de almacenamiento	-20 – 70 °C / -4 – 158 °F
Clase IP	<ul style="list-style-type: none"> • IP64 con la tapa cerrada • IP51 con la tapa abierta
Humedad	0 - 95 % sin condensación
Eléctricas	
Suministro externo	Adaptador de DC externo, 12 V – 2 A
Adaptador DC	85 – 264 V _{AC} (47 - 63 Hz) / 12 V _{DC}
Batería Interna	Li-Ion, 7.2 V, 6.6 Ah <ul style="list-style-type: none"> • Vida de la batería > 4 horas • Tiempo de carga= 1, 5 horas
Frecuencia	
Rango de medida	50 MHz – 1000 MHz
Precisión	± 100 MHz
Display	
Display	Pantalla TFT, 6.4 in, transreflectivo
Tamaño (ancho x alto)	132 x 100 mm / 5.20 x 3.94 in
Resolución	640 x 480 pixeles, 256 colores
Luz de fondo	Sí
Otros	
Memoria interna	Tarjeta SD
Memoria externa	Compatible con almacenamiento USB (pendrive USB o disco duro externo USB)
Comunicación conectores	<ul style="list-style-type: none"> • Host USB: Tamaño completo tipo A para adaptarse a unidades USB <i>flash</i> • Cliente USB: Tamaño completo tipo B para sincronizar resultados y ajustes con el software del PC (Usando <i>MS ActiveSync</i> o similar)
Auriculares	Auriculares estándar con conector <i>jack</i> de 4 mm
Antena	Diamond RH 789 (por defecto)

10.5. Anexo V: Funciones de los botones y teclas de función [32]

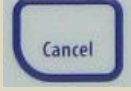

La tabla que aparece a continuación muestra el menú de teclas y teclas de función que afectan.

Tecla de menú	Tecla de función	Función
	Ajustes del menú. Página 1 de 3	
	F1	Guardar la traza como TRAC****.pdsx (****=4 dígitos identificados automáticamente).
	F2	Limpiar la traza A desde la pantalla.
	F3	Copiar la traza A a la B (Ver “Traza” y luego “Display”).
	F4	Cambiar la fijación máxima ON/OFF.
	F5	Más... Ir a la página 2 de 3.
	Ajustes del menú (2/3)	
	F1	Establecer el reloj interno de la unidad.
	F2	Introducir el dato para identificar el lugar visitado.
	F3	Cargar los ajustes predeterminados (4 costumbres y 1 ajuste de fabricación).
F4	Guardar los preajustes(A, B, C o D).	
F5	Más... Ir a la página 3 de 3.	
Ajustes del menú (3/3)		
F1	Opciones de archivo.	
F5	Volver = ir a la página 1 de 3.	
	Selección de modo	
	F1	Seleccionar modo analizador de espectro.
F2	Seleccionar modo de tiempo resuelto.	
	Frecuencias	
	F1	Introducir frecuencia de arranque.
	F2	Introducir frecuencia de parada.
	F3	Seleccionar período completo (Arranque = 50, Parada = 1000).
F4	Cambiar resolución del ancho de banda (De 1 a 6 MHz).	
	Frecuencia de barrido	
	F1	Introducir tiempo eléctrico/ de muestreo (1-100 ms).
	F2	Cambiar el modo de barrido (Simple o continuo).
F3	Contador de barridos (Modo de barrido = Cont., Fijación máxima = On).	
	Ampliación de la traza	
	F1	Introducir el nivel de referencia (dBm).
	F2	Incrementar el nivel de referencia en 10 dBm.
	F3	Disminuir el nivel de referencia en 10 dBm.
F4	Cambiar la escala del eje Y 5 o 10 dB/div.	
	Ajuste de las trazas	
	F1	Cambiar el modo de detección (Pico, media o S.P.A.M.).
	F2	Renombrar la traza desde el archivo en Traza B
	F3	Introducir la configuración de muestreo (Mostrar A, mostrar B y mostrar A-B).
F4	Cambiar marcador.	

10.6. Anexo VI: Botones y teclas alfanuméricas [32]

La tabla que se muestra a continuación define los botones restantes con sus respectivas funciones.

Tabla 10 5. Botones y teclas alfanuméricas

Botón	Función
	Iniciar / parar barrido.
Números 0-9 Letras A-Z	Teclado para introducir datos.
	Borrar el dato seleccionado.
	Cambiar entre más y menos.
	Cancelar el ítem seleccionado.
	Confirmar el ítem seleccionado.
	Aumentar el volumen de los auriculares en modo de tiempo resuelto.
	Disminuir el volumen de los auriculares en modo de tiempo resuelto.
	Aumentar la intensidad de la luz de fondo.
	Disminuir la intensidad de la luz de fondo.
	Iluminación de la pantalla. Poner el aparato en modo ahorro de energía.