

Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales

Pía Francisca Reyes González

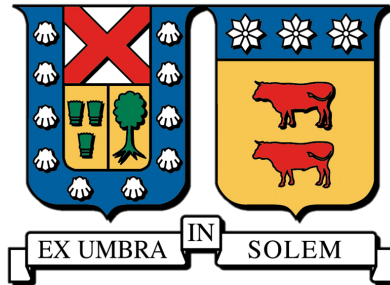
2021

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:
Roger Schürch Brandt

Profesor Co-referente:
Jorge Ardila Rey

Valparaíso, 21 de junio de 2021.



Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales

Pía Francisca Reyes González

2021

Dedicado a mi familia.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional, y a todos los que de una u otra manera contribuyeron en la realización de este trabajo.

Resumen

Se presenta el trabajo de memoria de título llamado *Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales*, en el cual se implementaron ensayos de detección y medición de descargas parciales (DP) en el Laboratorio de Alta Tensión de la Casa Central de la Universidad Federico Santa María, basado en las técnicas de medición de la norma internacional Partial discharge measurement IEC 60270. El propósito de los ensayos es proponer el equipo y configuración del sistema de medida más adecuado según la fuente de descargas parciales.

El desarrollo de este trabajo de memoria consta de tres etapas. La primera corresponde a un trasfondo teórico, donde se entrega una visión general de la teoría referente a descargas parciales, su generación, clasificación y circuitos de detección, entre otros. En la segunda etapa se presenta el desarrollo experimental. Se describen los equipo de medida, los componentes del circuito de detección, el procedimiento de calibración y de medición para realizar las pruebas, y las distintas configuraciones empleadas en el laboratorio.

Para los ensayos se dispuso de tres equipos de medida de descargas parciales, de diferentes tecnologías: equipo Terco, equipo Tem y equipo Omicron. Cada uno de estos cuenta con una impedancia de medida y un filtro o ajuste de la frecuencia de integración de la carga aparente. Las pruebas de medición de descargas parciales se realizaron con cuatro probetas de ensayo distintas, utilizando diferentes configuraciones del sistema de medida. Estas configuraciones consisten en ir variando los equipos de medida, las impedancias de medida y la frecuencia de integración. Las probetas seleccionadas permiten evaluar cada sistema de medida con distintos tipos de descargas parciales.

La tercera y última etapa presenta los resultados obtenidos de los ensayos realizados con cada una de las probetas, analizando las distintas configuraciones del sistema de medida. Este análisis se basa en el comportamiento de la impedancia de medida y de la frecuencia de integración en relación a los valores obtenidos de carga aparente, al diagrama de fase resuelta (PRPD) y a la respuesta en frecuencia de la señal de descarga parcial (diagrama de la trasformada rápida de Fourier).

Finalmente, en base al análisis de los resultados de los ensayos, se propone el sistema de medida más apropiado según la fuente de descargas parciales. En la medición de descargas parciales es importante determinar previamente la impedancia de medida y la frecuencia de integración para el equipo de medida. De lo contrario, la señal de descargas parciales termina siendo filtrada y la medición no es correcta.

Los resultados de los distintos ensayos con cada una de las probetas muestran que el equipo Omicron, más moderno, presenta una clara ventaja en la medición de descargas parciales en todas ellas, comparado con los equipos Terco y Tem. Se observa que esto se debe principalmente a que las impedancias de medida y los filtros de los equipos Terco y Tem filtran en gran parte la señal de las descargas parciales. En comparación, el software del equipo Omicron permite seleccionar frecuencias de integración específicas, aumentando la sensibilidad de la medición.

Para cada tipo de descargas parciales, este trabajo presenta la impedancia de medida y el rango de frecuencia de integración a ser seleccionado en el equipo Omicron para obtener las mediciones más precisas. En caso de no contarse con un equipo Omicron, se entregarán las mejores alternativas de medición con el equipo Terco o Tem, indicando la mejor impedancia de medida y filtro en cada caso.

Índice de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice de contenidos	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
2. Marco teórico	3
2.1. Descargas Parciales	3
2.2. Generación de Descargas Parciales	4
2.3. Clasificación de Descargas Parciales	6
2.3.1. Descargas Parciales Internas	6
2.3.2. Descargas Parciales Superficiales	7
2.3.3. Descargas Parciales Corona	7
2.4. Medición de Descargas Parciales	8
2.5. Análisis de Descargas Parciales	11
2.5.1. Diagrama de Fase Resuelta	11
2.6. Sensores de medida	12
2.6.1. Sensores RLC en paralelo	12
2.6.2. Sensores inductivos	14
3. Descripción de equipos y ensayos	15
3.1. Equipos de detección de Descargas Parciales	15
3.1.1. Equipo Terco	15
3.1.2. Equipo Tem	16
3.1.3. Equipo Omicron	17
3.2. Circuito de detección de Descargas Parciales	17
3.2.1. Probetas de ensayo	19
3.2.1.1. Probeta punta placa	19
3.2.1.2. Probeta vacuola en resina	19
3.2.1.3. Probeta aislador	20

3.2.1.4. Probeta bobina	20
3.3. Configuración del sistema de medición de Descargas Parciales	20
3.4. Procedimiento de medición y detección de Descargas Parciales	22
3.4.1. Procedimiento de calibración	22
3.4.1.1. Calibración del equipo Terco	23
3.4.1.2. Calibración del equipo Tem	23
3.4.1.3. Calibración del equipo Omicron	24
4. Resultados y análisis	25
4.1. Probeta punta placa	26
4.1.1. Punta placa (Terco – Z.Terco – F.Terco)	26
4.1.2. Punta placa (Tem – Z.Tem – F.E10)	26
4.1.3. Punta placa (Tem – Z.Tem – F.HV)	27
4.1.4. Punta placa (Tem – Z.HFCT – F.E10)	27
4.1.5. Punta placa (Tem – Z.HFCT – F.HV)	28
4.1.6. Punta placa (Omicron – Z.Omicron)	28
4.1.7. Punta placa (Omicron – Z.HFCT)	30
4.1.8. Análisis	32
4.1.8.1. Omicron – Z.Omicron	32
4.1.8.2. Omicron – Z.HFCT	32
4.1.9. Comparativa de los sistemas de medición	35
4.2. Probeta vacuola en resina	36
4.2.1. Vacuola en resina (Terco – Z.Terco – F.Terco)	36
4.2.2. Vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.E10)	36
4.2.3. Vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.HV)	37
4.2.4. Vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.E10)	37
4.2.5. Vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.HV)	38
4.2.6. Vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron)	38
4.2.7. Vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT)	40
4.2.8. Análisis	42
4.2.8.1. Omicron – Z.Omicron	42
4.2.8.2. Omicron – Z.HFCT	42
4.2.9. Comparativa de los sistemas de medición	45
4.3. Probeta aislador	46
4.3.1. Aislador (Terco – Z.Terco – F.Terco)	46
4.3.2. Aislador (Tem – Z.Tem – F.E10)	46
4.3.3. Aislador (Tem – Z.Tem – F.HV)	47
4.3.4. Aislador (Tem – Z.HFCT – F.E10)	47
4.3.5. Aislador (Tem – Z.HFCT – F.HV)	48
4.3.6. Aislador (Omicron – Z.Omicron)	48
4.3.7. Aislador (Omicron – Z.HFCT)	50
4.3.8. Análisis	52
4.3.8.1. Omicron – Z.Omicron	52
4.3.8.2. Omicron – Z.HFCT	52
4.3.9. Comparativa de los sistemas de medición	55
4.4. Probeta bobina	56
4.4.1. Bobina (Terco – Z.Terco – F.Terco)	56
4.4.2. Bobina (Tem – Z.Tem – F.E10)	56

4.4.3. Bobina (Tem – Z.Tem – F.HV)	57
4.4.4. Bobina (Tem – Z.HFCT – F.E10)	57
4.4.5. Bobina (Tem – Z.HFCT – F.HV)	58
4.4.6. Bobina (Omicron – Z.Omicron)	58
4.4.7. Bobina (Omicron – Z.HFCT)	60
4.4.8. Análisis	62
4.4.8.1. Omicron – Z.Omicron	62
4.4.8.2. Omicron – Z.HFCT	62
4.4.9. Comparativa de los sistemas de medición	65
5. Conclusiones y trabajo futuro	66
5.1. Conclusiones	66
5.2. Trabajo futuro	67
Bibliografía	68
A. Tablas de calibración	70
B. Tablas de mediciones	72

Índice de tablas

3.1.	Frecuencias de integración definidas para el equipo Omicron.	21
3.2.	Configuración del sistema de medición de DP	21
4.1.	Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron)	30
4.2.	Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT)	30
4.3.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron)	40
4.4.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT)	40
4.5.	Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.Omicron)	50
4.6.	Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.HFCT)	50
4.7.	Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.Omicron)	60
4.8.	Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.HFCT)	60
A.1.	Calibración equipo de medida Terco	70
A.2.	Calibración equipo de medida Tem	71
B.1.	Total de configuraciones del sistema de medición de DP.	72
B.2.	Valores de carga aparente resultados de las mediciones de DP.	75

Índice de figuras

2.1.	Diagrama básico de DP de una vacuola en un dieléctrico	4
2.2.	Diagrama esquemático de un evento de DP	5
2.3.	Gráficas de las tensiones y corriente asociadas a un evento de DP	5
2.4.	Descargas parciales internas	6
2.5.	Descargas parciales superficiales	7
2.6.	Descargas parciales corona	7
2.7.	Espectro de una DP y ancho de banda del sistema de medida	8
2.8.	Circuito de prueba y medición de DP según norma IEC 60270	9
2.9.	Circuito de calibración	10
2.10.	Patrones de diagrama por fase de descargas parciales	11
2.11.	Circuito equivalente de un filtro RLC.	13
3.1.	Sistema de medición Terco.	16
3.2.	Sistema de medición Tem.	16
3.3.	Sistema de medición Omicron.	17
3.4.	Transformador de potencia.	18
3.5.	Condensador de acoplamiento.	18
3.6.	Transformador de corriente de alta frecuencia.	18
3.7.	Probeta punta placa.	19
3.8.	Probeta vacuola en resina.	19
3.9.	Probeta aislador.	20
3.10.	Probeta bobina.	20
3.11.	Montaje experimental para medición de DP.	22
3.12.	Calibración de descargas parciales	23
3.13.	Calibración equipo Omicron.	24
4.1.	Medición de DP en probeta punta placa (Terco – Z.Terco – F.Terco)	26
4.2.	Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.Tem – F.E10)	27
4.3.	Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.Tem – F.HV)	27
4.4.	Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.HFCT – F.E10)	28
4.5.	Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.HFCT – F.HV)	28
4.6.	Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron)	29
4.7.	Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT)	31
4.8.	FFT de probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron)	33
4.9.	FFT de probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT)	34
4.10.	Valor medido de carga aparente en probeta punta placa.	35
4.11.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Terco – Z.Terco – F.Terco) .	36

4.12.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.E10) . .	37
4.13.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.HV) . .	37
4.14.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.E10) .	38
4.15.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.HV) .	38
4.16.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron) . .	39
4.17.	Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT) . . .	41
4.18.	FFT de probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron)	43
4.19.	FFT de probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT)	44
4.20.	Valor medido de carga aparente en probeta vacuola en resina.	45
4.21.	Medición de DP en probeta aislador (Terco – Z.Terco – F.Terco)	46
4.22.	Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.Tem – F.E10)	47
4.23.	Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.Tem – F.HV)	47
4.24.	Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.HFCT – F.E10)	48
4.25.	Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.HFCT – F.HV)	48
4.26.	Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.Omicron)	49
4.27.	Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.HFCT)	51
4.28.	FFT de probeta aislador (Omicron – Z.Omicron)	53
4.29.	FFT de probeta aislador (Omicron – Z.HFCT)	54
4.30.	Valor medido de carga aparente en probeta aislador.	55
4.31.	Medición de DP en probeta bobina (Terco – Z.Terco – F.Terco)	56
4.32.	Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.Tem – F.E10)	57
4.33.	Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.Tem – F.HV)	57
4.34.	Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.HFCT – F.E10)	58
4.35.	Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.HFCT – F.HV)	58
4.36.	Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.Omicron)	59
4.37.	Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.HFCT)	61
4.38.	FFT de probeta bobina (Omicron – Z.Omicron)	63
4.39.	FFT de probeta bobina (Omicron – Z.HFCT)	64
4.40.	Valor medido de carga aparente en probeta bobina.	65

Nomenclatura

DP	:	Descarga parcial
FFT	:	Fast Fourier Transform
PRPD	:	Phase-resolved partial discharge
HFCT	:	High-frequency current transformer

Capítulo 1

Introducción

Por definición, una descarga parcial (DP) es una descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre dos electrodos, y que puede producirse adyacente o no a uno de ellos [1]. Aunque la magnitud de estas descargas suele ser pequeña, provocan un deterioro progresivo y pueden provocar una falla final [2].

Con el objetivo de estudiar como influyen la impedancia de medida y la frecuencia de integración en la medición de descargas parciales, se realiza el ensayo de detección y medición de descargas parciales en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Federico Santa María, basado en las técnicas de medición de la norma internacional *Partial discharge measurement IEC 60270*.

El laboratorio de Alta Tensión cuenta con tres equipos de medición de descargas parciales: equipo Terco, equipo Tem y equipo Omicron. El equipo Terco es un equipo digital-analógico que cuenta con un cuadripolo de medida y un módulo-filtro. El equipo Tem es un equipo analógico, que posee un cuadripolo de medida y dos módulos-filtro. El equipo Omicron es un equipo digital de última generación, que posee un cuadripolo y usa software para variar la frecuencia de integración.

Las pruebas de detección y medición de descargas se realizan con distintas probetas de ensayo: punta placa, vacuola en resina, aislador y bobina. Con cada una de estas probetas se utilizan los tres equipos mencionados, y se varía la configuración de los sistemas de medida cambiando la impedancia y la frecuencia de integración, con el objetivo de ver su respuesta en frecuencia y como influyen las distintas configuraciones en la medición.

En cada ensayo realizado se obtuvo el valor medido de carga aparente que se produce ante una DP, junto a su diagrama de fase resuelta. En el caso del equipo Omicron, se cuenta con la respuesta en frecuencia de la señal de DP.

1.1. Motivación

Este trabajo de memoria se realiza con dos motivos principales.

El primero consiste en comparar los equipos actualmente disponibles en el Laboratorio de Alta Tensión, y evaluar si los equipos antiguos presentan inconvenientes para realizar pruebas de medición de DP, en contraste a los equipos modernos. Esto se debe, fundamentalmente,

a que la frecuencia de integración de los pulsos no está completamente normada, y los nuevos equipos poseen mejores capacidades, con distintos anchos de banda que pueden detectar otros rangos de frecuencia. Esta evaluación permitirá considerar si es conveniente retirar el equipo Tem, antiguo y analógico, del conjunto de equipos de uso educativo del laboratorio.

El segundo motivo es la necesidad de poder saber de antemano, de acuerdo a la fuente de DP, qué sistema de medición conviene utilizar: equipo de medida, impedancia de medida y frecuencia de integración. Esto permitiría mejorar la eficiencia de las mediciones DP en el laboratorio.

1.2. Objetivos

Los principales objetivos de esta memoria de título son:

- Analizar el comportamiento de las impedancias de detección disponibles en el laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM (Casa Central) para la medición de descargas parciales según la norma *IEC 60270*, en relación a su respuesta en frecuencia y al valor medido de carga aparente de la descarga parcial.
- Comparar los sistemas de medición de descargas parciales, utilizando distintos equipos de medición (analógico, digital y digital de última generación) y variando las frecuencias de integración, para proponer la configuración de medición más adecuada según el caso a medir.
- Analizar la sensibilidad de las distintas impedancias de detección y equipos de medición, por medio de la utilización de diferentes probetas de ensayo, y así proponer qué configuración de detección conviene implementar, de acuerdo a la fuente de descarga parcial.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se entrega una base teórica sobre el fenómeno de descargas parciales, basándose especialmente en la norma internacional *Partial discharge measurement IEC 60270*. Se definen las descargas parciales, su proceso de generación, y como se clasifican según su origen. Luego se describen las distintas técnicas de medición de descargas parciales, y los circuitos que se emplean para ello. Finalmente se detalla el análisis de descargas parciales de acuerdo a su magnitud, diagrama de fase y respuesta en frecuencia.

2.1. Descargas Parciales

Se denomina descarga parcial a una descarga de baja energía, localizada en un microvolumen del material aislante, que no compromete el espacio dieléctrico existente entre los electrodos cuando estos se someten a una sollicitación de voltaje [3]. Una descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre dos electrodos y que puede producirse adyacente o no a uno de ellos [1].

Una descarga parcial se produce ante la presencia de defectos e imperfecciones en un aislamiento (vacuolas de gas en dieléctricos sólidos, burbujas en líquidos, grietas entre estratos, etc.) y en un entorno de electrodos muy agudos. Se generan concentraciones locales de campo eléctrico en el interior o en la superficie del aislante, que desarrollan avalanchas electrónicas y iónicas produciendo pulsos transitorios de corriente.

A pesar de que la magnitud y duración de estas descargas suelen ser pequeñas, no producen una ruptura completa del aislante, sin embargo, su repetida acción altera las propiedades dieléctricas, provocando un deterioro progresivo y pueden provocar una falla final [2] [4]. Las DP pueden ser una medida efectiva del estrés eléctrico local al que está sometido un material aislante, y su medida puede ser utilizada como una variable de estado del sistema de aislamiento [5].

La Fig. 2.1 muestra un diagrama básico de una región donde se produce una DP: una vacuola en el interior de un dieléctrico sometido a un campo eléctrico [6].

Generalmente, cuando ocurren DP también se producen fenómenos secundarios como emisión de radiación, calor, sobrepresiones y reacciones químicas, que degradan rápidamente los aislamientos poliméricos. La magnitud y duración de las DP depende de las dimensiones de la inclusión, temperatura, presión de la cavidad, tensión eléctrica aplicada, retardo en

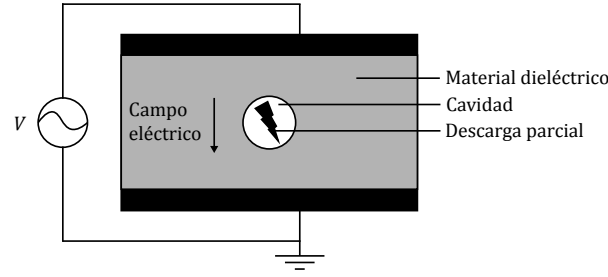


FIGURA 2.1: Diagrama básico de DP de una vacuola en un dieléctrico [6].

la aparición del electrón libre, y las condiciones y características del aislamiento. Estas variables hacen que el fenómeno de las DP sea de carácter estocástico [7].

2.2. Generación de Descargas Parciales

Una descarga parcial se produce dentro de una cavidad en un material aislante, cuando éste se somete a un nivel de tensión y se generan dos condiciones: el campo eléctrico dentro de la cavidad debe sobrepasar la intensidad eléctrica de ruptura del gas y debe haber un electrón libre que inicie la avalancha de electrones. Al producirse esto el electrón se acelera e interactúa con moléculas neutras de gas. Si el electrón que se encuentra acelerado contiene suficiente energía ionizará toda molécula de gas que se tope con éste, generando principalmente un nuevo electrón libre, un ión positivo y energía. Este proceso se denomina ionización. El nuevo electrón libre, a su vez, choca con otras moléculas neutras de gas en la cavidad; el proceso se repite continuamente, provocando un aumento de electrones. La reiteración de la ionización del gas se denomina avalancha de electrones, y provoca que el gas cambie de una condición no conductiva a una conductiva durante un periodo muy corto de tiempo.

Este fenómeno se puede representar mediante la Fig. 2.2, en donde el campo eléctrico dentro de la cavidad es [6]:

$$E_{\text{cav}} = f_c \cdot E_0 + E_s$$

y donde:

- E_0 corresponde al campo eléctrico en el material dieléctrico sólido.
- f_c es el factor de corrección del campo eléctrico, que depende de la geometría de la cavidad y la resistividad del material aislante.
- E_s es el campo eléctrico opuesto al campo eléctrico del material.

La Fig. 2.2a muestra lo que sucede antes que ocurra una DP: el campo eléctrico de la cavidad E_{cav} es igual al campo eléctrico atenuado por su factor de corrección $f_c \cdot E_0$. Cuando ocurre una descarga, cargas opuestas alcanzan el otro extremo de la superficie de la cavidad (Fig. 2.2b), desarrollándose un campo eléctrico opuesto a $f_c \cdot E_0$ (Fig. 2.2c). Este campo opuesto E_s se debe a la acumulación de carga en la superficie de la cavidad después de una DP [6]. Cuando se produce la avalancha de electrones se rompe la rigidez dieléctrica del gas, transformándolo temporalmente en un conductor.

Para que se produzca una DP debe haber una sollicitación de tensión en el defecto y una cierta cantidad de electrones libres para que se genere la avalancha. La tensión mínima

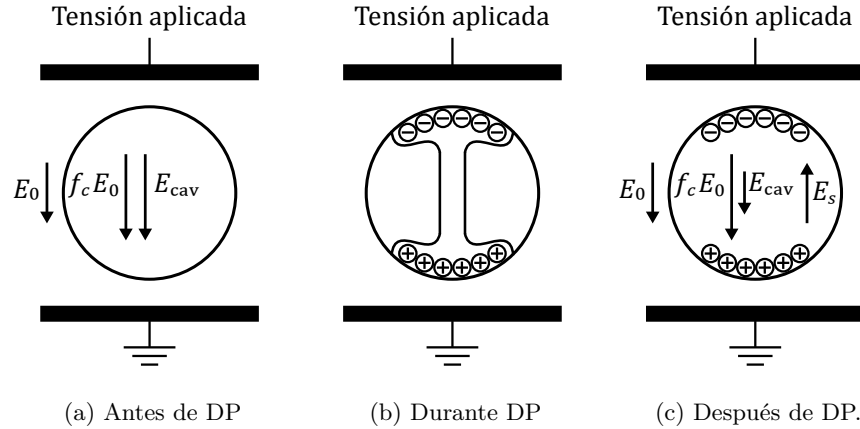


FIGURA 2.2: Diagrama esquemático de un evento de DP [6].

para que se genere la descarga se denomina tensión de ignición. Al ocurrir la descarga se produce una transferencia de carga eléctrica del defecto al aislante; esta transferencia de carga se detecta como un pulso de corriente. El valor de la tensión de ignición depende de varios factores, como el tipo de material dieléctrico que rodea el defecto, geometría, presión y temperatura de gas, etc.

En la Fig. 2.3 se muestra la relación entre la tensión aplicada al dieléctrico, la tensión de ignición y los pulsos de corriente asociados la DP. Se puede iniciar el evento de DP cuando se aplica una tensión alterna $V_T(t)$ al material dieléctrico, de tal forma que la tensión en el defecto $V_c(t)$ alcance el valor de ignición en la fase positiva $+V_i(t)$, con la condición de que haya suficientes electrones libres. Este evento genera una caída de tensión en la zona que rodea el defecto, liberando carga al aislante. Este movimiento de carga genera un pulso de corriente de una duración muy corta, menor a un microsegundo.

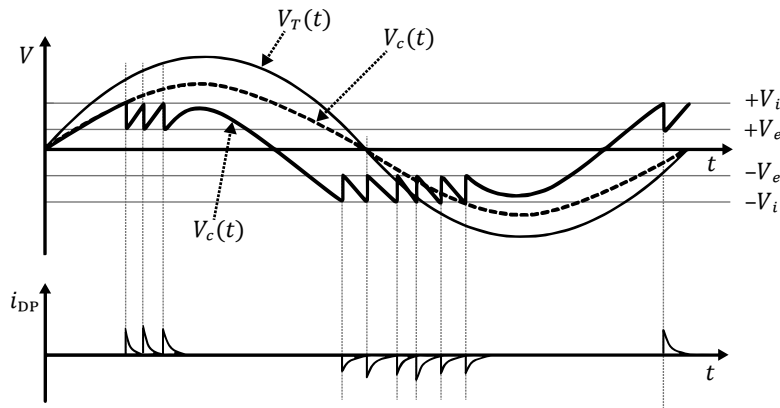


FIGURA 2.3: Gráfica de las tensiones y corriente asociadas a un evento de DP [4].

En la Fig. 2.3 hay dos curvas que representan la tensión en la cavidad $V_c(t)$: la línea continua corresponde cuando ocurre DP y la línea discontinua sin DP. Si se mantiene la tensión por encima del valor de ignición existe la posibilidad de más eventos de descarga. Si la tensión $V_T(t)$ disminuye por debajo de un valor, llamado tensión de extinción $V_e(t)$, las DP dejan de ocurrir. En la fase negativa de la onda sucede una situación similar a

la fase positiva, con la diferencia que los pulsos de corriente tienen polaridad invertida. Para las tensiones negativas existen los valores de tensión de ignición $-V_i(t)$ y tensión de extinción $-V_e(t)$ [4].

2.3. Clasificación de Descargas Parciales

Las descargas parciales, en general, se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo a su origen: internas, superficiales y corona.

2.3.1. Descargas Parciales Internas

Las descargas parciales debidas a imperfecciones en líquidos aislantes y dieléctricos sólidos, así como en gas comprimido, se clasifican como descargas internas. Las avalanchas de electrones autosostenidos solo se crean en inclusiones gaseosas. Por lo tanto, las descargas en aislamientos sólidos solo pueden encenderse en cavidades llenas de gas, como huecos y grietas, o incluso en defectos de la estructura molecular. En aislamientos líquidos pueden aparecer descargas parciales en burbujas de gas debido a fenómenos térmicos y eléctricos, y en el vapor de agua que se puede crear en regiones de campo eléctrico alto [8]. Debido a que las descargas internas provocan un envejecimiento progresivo del aislamiento, a menudo se clasifican como irreversibles.

El voltaje de inicio y extinción de las DP, así como su magnitud, no solo dependen del tipo de defecto y la presión dentro de las cavidades llenas de gas, sino también del tamaño geométrico y la ubicación del defecto dentro del material aislante como se ilustra en la Fig. 2.4a. En la Fig. 2.4b se observa que los defectos son de tamaños y formas geométricos distintos.

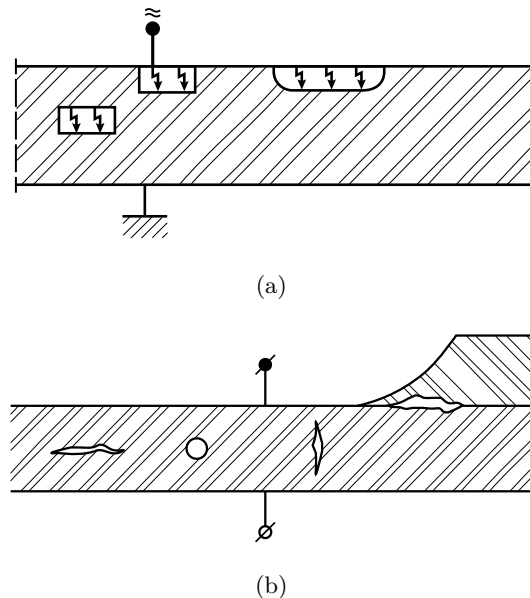


FIGURA 2.4: Descargas parciales internas [2].

2.3.2. Descargas Parciales Superficiales

Las descargas parciales superficiales ocurren en las interfaces entre dieléctricos o entre el conductor y el aislamiento, cuando existe algún tipo de contaminación en la superficie del material (lluvia, nieve, humedad, polución, salinidad, etc), ya que la presencia de componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad origina descargas que se extienden más allá de su lugar de origen (Fig. 2.5), bordeando la superficie del aislante con el fin de encontrar el camino hasta el electrodo de menor potencial [9].

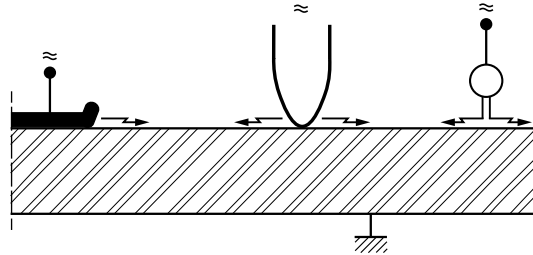


FIGURA 2.5: Descargas parciales superficiales [2].

2.3.3. Descargas Parciales Corona

Las descargas parciales corona corresponden a descargas en un gas, localizadas en una zona limitada del espacio y que no significa la pérdida completa de las propiedades aislantes del gas, ya que el resto del gas conserva sus propiedades dieléctricas originales. Se presentan en campos no uniformes, en zonas con grandes intensidades de campo, o cuando la dimensión de los electrodos es mucho menor que la distancia que los separa.

Cuando el campo eléctrico o gradiente de potencial alcanza la rigidez dieléctrica del aire, el aire se ioniza, se hace conductor y se produce una descarga local. Este fenómeno va acompañado de un efluvio luminoso. Además, se producen pérdidas de energía, un zumbido fácilmente perceptible, y ruido sobre señales de radio y televisión en las cercanías de la zona donde se localiza el fenómeno corona. También se produce ozono y, en presencia de humedad, ácido nitroso, el cual trae como consecuencia la corrosión de los conductores [10].

La Fig. 2.6 muestra una descarga corona en bordes afilados.

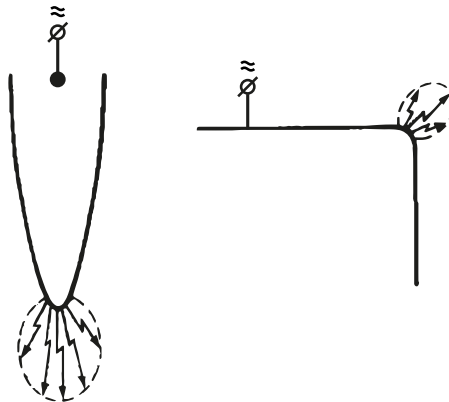


FIGURA 2.6: Descargas parciales corona [2].

2.4. Medición de Descargas Parciales

La medición de descargas parciales se realiza según el método de medida convencional que señala la norma IEC 60270, la cual realiza la evaluación de la carga de los pulsos de la descarga parcial empleando filtros pseudo-integradores. Los filtros empleados son filtros pasa-banda, que actúan como un filtro en el sentido tradicional, filtran el ruido de las mediciones efectuadas, y actúan como un pseudo-integrador. La relación entre las frecuencias de corte y el espectro del pulso hacen que el filtro se comporte como un pseudo-integrador, de manera que el valor máximo del pulso de voltaje a la salida del filtro sea proporcional al área del pulso a la entrada de éste [5] [11].

Si se analizan los componentes espectrales de un pulso de DP se observa que la mayor parte de la energía del pulso está contenida en la parte baja del espectro. Utilizar anchos de banda pequeños en comparación al ancho de banda del pulso de corriente supone una pérdida de información en la medida de la corriente, pues según la igualdad de Parseval [11], la energía del pulso en el dominio del tiempo coincide con la energía del pulso en el dominio frecuencial. Luego, si se recortan las frecuencias, se recorta la magnitud de la descarga.

El equipo de medida debe tener un ancho de banda que este contenido dentro del espectro del pulso [11], tal como se ve en la Fig. 2.7.

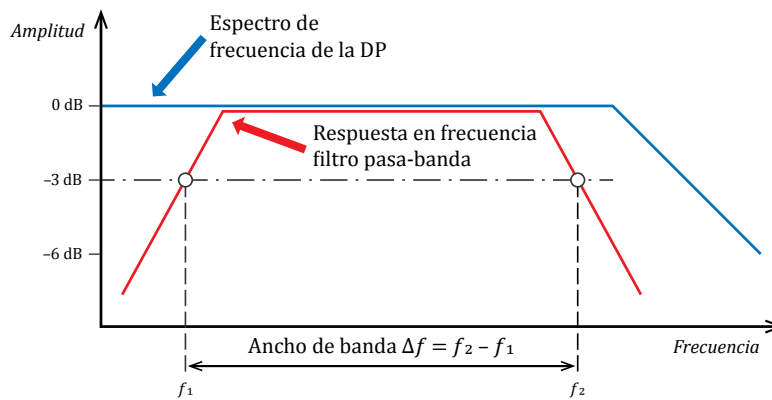


FIGURA 2.7: Espectro de una DP y ancho de banda del sistema de medida [12].

Dependiendo del ancho de banda $\Delta f = f_2 - f_1$ del filtro pasa-banda del equipo de medida, se diferencia entre instrumentos de banda ancha e instrumentos de banda estrecha [1].

Para instrumentos de medida de DP de banda ancha se deben cumplir con los siguientes valores de ancho de banda:

$$\begin{aligned} 30 \text{ kHz} &\leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \\ f_2 &\leq 500 \text{ kHz} \\ 100 \text{ kHz} &\leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz} \end{aligned}$$

en donde f_1 corresponde a la frecuencia de corte inferior, f_2 a la frecuencia de corte superior, y Δf al ancho de banda.

Para instrumentos de medida de DP de banda estrecha se debe cumplir con los siguientes valores, según [1].

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_c \leq 1 \text{ MHz}$$

en donde Δf corresponde al ancho de banda del filtro y f_c a la frecuencia central.

La selección del ancho de banda óptimo debe hacerse con el propósito de obtener la máxima relación señal-ruido. Por lo tanto, se debe conocer el espectro de frecuencias de la señal de DP para poder determinar el ancho de banda del sistema de medición con el que la relación señal-ruido sea máxima [5]. Las investigaciones de la influencia del ancho de banda de un sistema sobre la respuesta de los pulsos de DP muestran que las frecuencias de filtrado influyen sobre la longitud de tiempo de la respuesta, la sensibilidad del sistema y la determinación de la carga [5] [13].

La norma IEC 60270 propone dos tipos de circuito de detección de descargas parciales: circuito directo y circuito indirecto. Para el desarrollo de este trabajo solo se considera el circuito indirecto mostrado en la Fig. 2.8, donde:

- C_a : representa la probeta de ensayo.
- C_k : condensador de acoplamiento.
- Z_m : inductancia de medida.
- Z : impedancia.
- M : equipo de medida.

La corriente originada por la descarga circula hacia la rama capacitiva, que ofrece un camino de baja impedancia para señales de alta frecuencia, dado que la rama opuesta tiene una impedancia inductiva que bloquea su paso. Esta rama capacitiva, compuesta por el condensador de acoplamiento C_k y la impedancia de medida Z_m , facilita la circulación del pulso de la DP y actúa como un divisor de tensión protegiendo al sistema de medida. Así, la combinación del capacitor y la impedancia de medida se comporta como un filtro, donde la frecuencia de corte inferior tiene que ser sintonizada de manera que se filtre la señal de frecuencia de la red y sus armónicos. La impedancia Z evita que las DP que se producen en el objeto de ensayo circulen por el lazo de la fuente de alta tensión, y sirve de filtro ante posibles perturbaciones de la red [5].

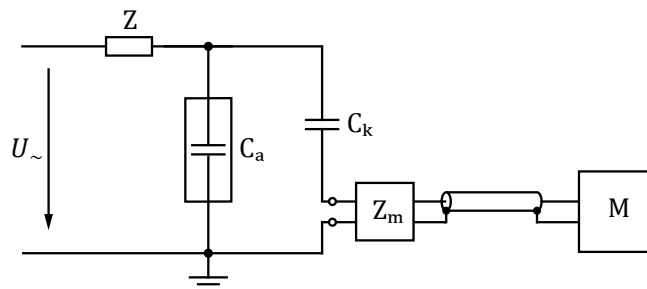


FIGURA 2.8: Circuito de prueba y medición de DP según norma IEC 60270 [14].

La medida de DP se basa en la detección de las pequeñas corrientes que circulan por el circuito de medida. Estas corrientes impulsionales son consecuencia del acoplamiento de

las avalanchas electrónicas, que se producen en el seno del aislamiento, con el circuito de medida. Puesto que la magnitud de la carga que circula por el circuito de medida no es igual a la magnitud de la carga asociada a la avalancha electrónica, es necesario definir el concepto de carga aparente. La integración del pulso de corriente se denomina carga aparente, y se define como aquella carga que, inyectada instantáneamente en bornes del objeto de prueba, daría la misma lectura en el instrumento de medida que el propio pulso de corriente de la descarga parcial [1] [5]. Habitualmente, la carga aparente se expresa en pC.

Debido a que la forma del pulso puede cambiar de un circuito de medida a otro (dependiendo de los conductores, condensadores, impedancias y demás elementos usados), la medida convencional contempla la necesidad de relacionar el valor de tensión obtenido con la carga aparente producida por la DP mediante un proceso de calibración. Este proceso se basa en una simulación de transferencia de carga interna entre la fuente de DP y los terminales del equipo bajo prueba, por medio de un calibrador externo. Este calibrador se conecta en paralelo con el objeto de prueba y con el divisor capacitivo, el cual está formado por el condensador de acoplamiento C_k y la impedancia de medida Z_m , como se puede ver en la Fig. 2.9. El calibrador de DP es un generador de pulsos de amplitud U_0 , que emite una señal de calibración constante Q_0 de magnitud conocida a través de un pequeño capacitor C_0 . El valor de la señal de calibración está dado por la ecuación

$$Q_0 = U_0 \cdot C_0$$

donde se requiere que la capacitancia del calibrador sea mucho menor a la del equipo bajo prueba $C_0 \ll C_a$.

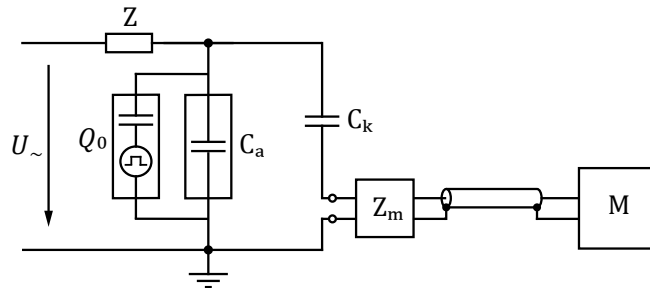


FIGURA 2.9: Circuito de calibración [14].

El objetivo de la calibración es la obtención de la constante de calibración K_{cal} del sistema de medida, que relaciona el valor máximo de la onda a la salida del sistema detector con el valor de carga inyectado por el calibrador de DP. Así, para determinar el valor de la carga del pulso, se mide el valor máximo de voltaje del pulso obtenido durante la prueba y se multiplica por la constante de calibración, como se muestra en la ecuación:

$$Q_{DP} = \frac{Q_0}{V_0} \cdot V_{DP} = K_{cal} \cdot V_{DP}$$

donde Q_{DP} es el valor de carga de las DP ocurridas en el objeto durante la prueba, la constante de calibración Q_0 es la carga inyectada en la calibración, V_0 corresponde a la magnitud del pulso de tensión a la salida del equipo de detección al inyectar el pulso calibrador, y V_{DP} es la magnitud del pulso de tensión de las DP medidas a la salida del detector durante la prueba.

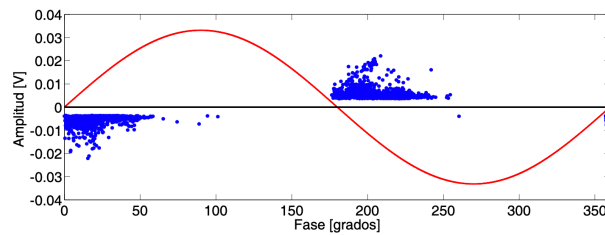
La calibración es uno de los procesos más importantes para garantizar una medición correcta. Debe realizarse antes de cada prueba y repetirse cuando se presenta algún cambio en el circuito o en su configuración [5].

2.5. Análisis de Descargas Parciales

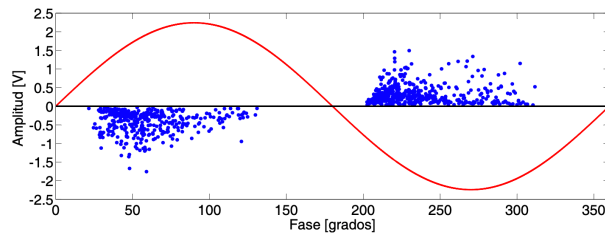
2.5.1. Diagrama de Fase Resuelta

Un método para identificar las fuentes de descargas parciales se llama patrones de fase resuelta (PRPD, sigla en inglés de *Phase Resolved Partial Discharge*) [2]. Con este método se obtiene la fase y amplitud de las descargas parciales producidas, superpuestas con un ciclo de la señal alterna [15]. Estos patrones PRPD entregan información sobre los procesos físicos que ocurren durante la descarga parcial en una región débil del sistema eléctrico.

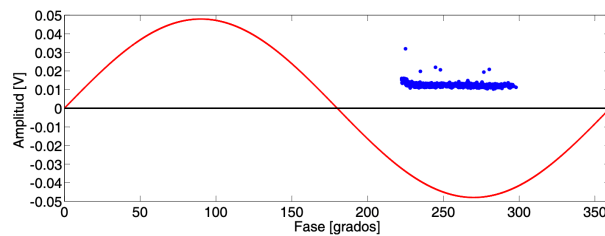
La Fig. 2.10 muestra los patrones de fase resuelta de las descargas parciales internas, superficiales y corona.



(a) Internas



(b) Superficiales



(c) Corona

FIGURA 2.10: Patrones de diagrama por fase de descargas parciales [15].

La Fig. 2.10a muestra un patrón PRPD típico de una descarga parcial interna tipo cavidad es un aislante sólido de resina. Se observa que las descargas parciales internas ocurren en los rangos 350° a 90° y 170° a 270°, la magnitud de las descargas depende de la profundidad de la cavidad y puede ser de diferente magnitud entre los semiciclos positivo y negativo

dependiendo de la ubicación de la cavidad. La repetición depende del área de la cavidad. También la forma de la cavidad tiene un efecto significativo del patrón [5].

La Fig. 2.10b muestra un patrón PRPD típico de una descarga parcial superficial. Aparecen en ambos semiciclos de la señal de tensión, con fase de ocurrencia entre 0° a 90° y 180° a 270° , el patrón de descarga parcial depende fuertemente la geometría de los electrodos. Siendo común que la magnitud de las descargas parciales sea diferente en cada semiciclo.

La Fig. 2.10c muestra un patrón PRPD típico de una descarga parcial corona. Esta descarga suele ocurrir alrededor de los 270° (90°) y ser de magnitud constante. Aparecen principalmente en un solo semiciclo, pero esto es debido a que la tensión de ignición es diferente para cada semiciclo de la señal de tensión, por lo que, si las tensiones son elevadas, pueden aparecer pulsos esporádicos en el semiciclo opuesto. Cuando la parte afilada del electrodo es la energizada las primeras descargas toman lugar en el semiciclo negativo (DP corona negativas) de la tensión de red, en el caso que la punta este a tierra las descargas aparecen en el semiciclo positivo (DP corona positivas). La frecuencia de repetición es fuertemente dependiente del nivel de tensión.

2.6. Sensores de medida

Los sensores o impedancias de medida son una parte integral del sistema de medición y del circuito de prueba, con componentes diseñados específicamente para lograr la sensibilidad óptima con un circuito de prueba específico. Por tanto, se pueden utilizar diferentes sensores junto con un solo instrumento de medición.

Los sensores o impedancias de medida suelen ser una red de cuatro terminales activa o pasiva (cuadripolo), que convierte las corrientes de entrada en señales de voltaje de salida. Estas señales se transmiten al instrumento de medición mediante un sistema de transmisión. La respuesta de frecuencia del sensor, definida por la tensión de salida a la corriente de entrada, se elige normalmente para evitar de forma eficaz que la frecuencia de la tensión de prueba y sus armónicos lleguen al instrumento [1].

Los principales sensores utilizados para la medida de descargas parciales son sensores RLC en paralelo y sensores acoplados por campo magnético (sensores inductivos).

2.6.1. Sensores RLC en paralelo

Los sensores que son sistemas pasa-alto pasivos, se comportan a menudo como circuitos RLC resonantes en paralelo, cuyo factor de calidad es relativamente bajo. Estos sensores proporcionan dos cualidades importantes. La relación entre la tensión de salida V_{out} y la corriente de entrada I_{in} que es dependiente de la frecuencia del sistema de medida, muestra que existe una supresión adecuada de las corrientes de baja y alta frecuencia en la vecindad de su frecuencia de resonancia. En segundo lugar, este circuito en paralelo también realiza una integración de las corrientes de la descarga parcial, ya que es un filtro pasa-banda y se puede utilizar como un dispositivo de integración [16].

Se analiza el filtro en función de las variables del circuito RLC en paralelo de la Fig. 2.11.

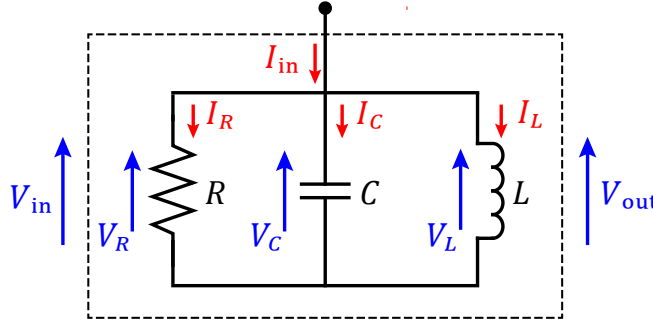


FIGURA 2.11: Circuito equivalente de un filtro RLC.

La función transferencia en el plano de Laplace es:

$$H(S) = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{in}}}$$

Se tiene del circuito:

$$I_{\text{in}} = I_R + I_C + I_L$$

$$I_{\text{in}} = \frac{V_{\text{in}}}{R} + s \cdot C \cdot V_{\text{in}} + \frac{1}{s} \cdot \frac{V_{\text{in}}}{L}$$

Simplificando y considerando que $V_{\text{out}} = V_{\text{in}}$:

$$I_{\text{in}} \cdot s = \left(\frac{L \cdot s + R + R \cdot L \cdot C \cdot s^2}{R \cdot L} \right) \cdot V_{\text{out}}$$

La función de transferencia del filtro RLC es:

$$\frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \left(\frac{R \cdot L}{L \cdot s + R + R \cdot L \cdot C \cdot s^2} \right) [-]$$

La frecuencia de resonancia también está influenciada por el condensador de acoplamiento y por el objeto de ensayo, ya que su conexión en serie contribuye al capacitor del circuito RLC en paralelo. Por lo tanto, las “unidades de entrada RLC” deben cambiarse de acuerdo con la capacitancia especificada para lograr un ancho de banda dentro de los límites requeridos [16].

2.6.2. Sensores inductivos

Los sensores inductivos actúan bajo los principios de la Ley de Ampère, que dice que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos, y de la Ley de Faraday, que dice que la variación del flujo enlazado por un circuito induce una tensión en sus bornes. Un ejemplo de estos sensores inductivos es el transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT).

Los sensores inductivos son sensibles a las corrientes de alta frecuencia por funcionar bajo inducción electromagnética. Esto se debe a que la tensión inducida es directamente proporcional a la variación de corriente que genera el campo magnético. Esta característica de los sensores inductivos es útil en la medición de descargas parciales, ya que la frecuencia de estas corrientes es del orden de los MHz.

La principal cualidad de los sensores inductivos es su respuesta en frecuencia, ya que el rango de operación de las descargas parciales es el mismo que el de los sensores. Otra importante característica de los sensores inductivos es que no poseen conexión galvánica con el equipo al que se le realizan las mediciones de DP, lo que proporciona una gran ventaja a la hora de realizar el ensayo, ya que permite realizarlo sin tener que intervenir mayormente las conexiones de los equipos a la red.

Capítulo 3

Descripción de equipos y ensayos

En este capítulo se describen los principales equipos y elementos que se necesitaron para realizar los ensayos de descargas parciales dentro del laboratorio de Alta Tensión. Se muestran los equipos, impedancias de medida y filtros utilizados para medir las descargas parciales en cada una de las probetas de ensayo, y las diferentes configuraciones que se debieron implementar. Por último, se explican los detalles del procedimiento de medición de DP, junto con una descripción del procedimiento de calibración para cada equipo de medida.

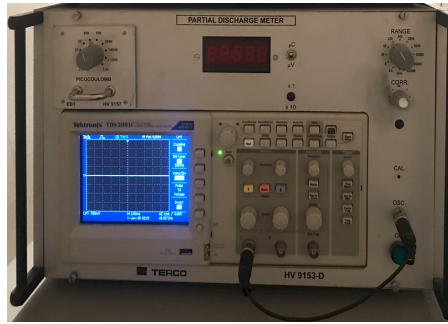
3.1. Equipos de detección de Descargas Parciales

Para el desarrollo experimental de este trabajo de título se dispuso de los siguientes equipos de detección de descargas parciales, presentes en el Laboratorio de Alta Tensión: equipo Terco, equipo Tem y equipo Omicron.

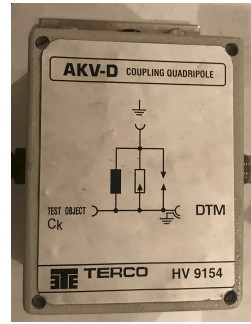
A continuación se hará una breve descripción de cada equipo de medida, con sus respectivas impedancias de medida, filtros y demás elementos utilizados.

3.1.1. Equipo Terco

El equipo *Partial Discharge Meter* de marca Terco modelo HV 9153-D, que desde ahora se nombrará equipo Terco, es un equipo digital que posee un osciloscopio integrado, el cual muestra la forma de onda de la señal de tensión y los pulsos de DPs superpuestos a dicha señal. También posee un display que arroja el valor medido de carga aparente, luego de haber efectuado la correspondiente calibración del circuito. Este equipo utiliza un cuadripolo de marca Terco modelo 9154, desde ahora nombrado cuadripolo Terco, y un módulo-filtro de marca Terco modelo HV 9157 con ancho de banda de 40 kHz–220 kHz [17], desde ahora nombrado filtro Terco. La Fig. 3.1a muestra al equipo Terco más el filtro, y la Fig. 3.1b el cuadripolo.



(a) Equipo de medida Terco



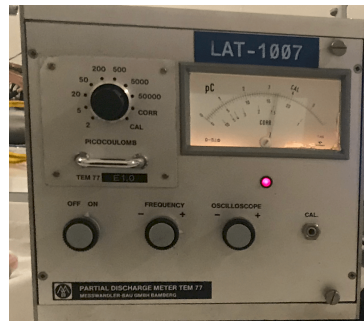
(b) Cuadripolo Terco

FIGURA 3.1: Sistema de medición Terco.

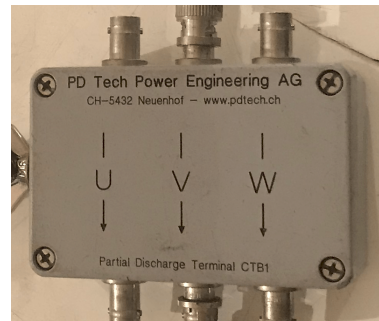
3.1.2. Equipo Tem

El equipo *Partial Discharge Meter Tem 77*, manufactured por la compañía Messwandler Bau GMBH Bamberg, que desde ahora se nombrará equipo Tem, es un equipo analógico de detección de DP. Cuenta con un cuadripolo marca PD Tech modelo CTB1, desde ahora nombrado cuadripolo Tem, y con dos módulo-filtro modelos E.10 y HV, desde ahora nombrados filtro E10 y filtro HV. La Fig. 3.2a muestra al equipo Tem más el filtro E10, y la Fig. 3.2b el cuadripolo.

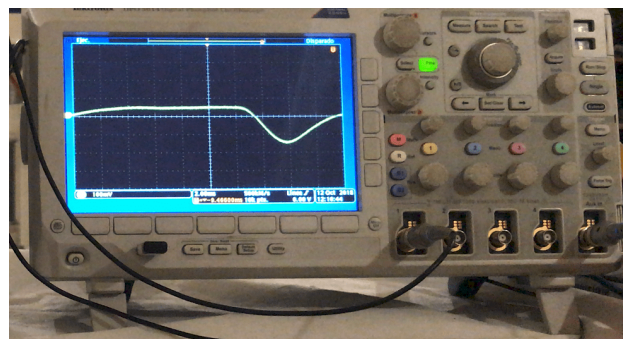
Para lograr ver la forma de onda de la tensión junto a los pulsos de DPs, se debe utilizar un osciloscopio en conjunto con el equipo Tem. El osciloscopio utilizado es un Osciloscopio digital marca Tektronix modelo 3014 (Fig. 3.2c).



(a) Equipo de medida Tem



(b) Cuadripolo Tem



(c) Osciloscopio digital

FIGURA 3.2: Sistema de medición Tem.

3.1.3. Equipo Omicron

El equipo marca Omicron modelo *MPD 600*, que desde ahora se nombrará equipo Omicron, es un equipo digital de última generación y software avanzado. Cuenta con un cuadripolo modelo CPL 542 (Fig. 3.3b) con ancho de banda de 20 kHz–5 MHz [18], desde ahora nombrado cuadripolo Omicron. La Fig. 3.3a muestra al equipo Omicron, la Fig. 3.3b el cuadripolo, y la Fig. 3.3c el software.



(a) Equipo de medición Omicron



(b) Cuadripolo Omicron



(c) Software Omicron

FIGURA 3.3: Sistema de medición Omicron.

3.2. Circuito de detección de Descargas Parciales

Para poder detectar, medir y analizar descargas parciales se implementaron diferentes ensayos de detección en el Laboratorio de Alta Tensión, según el circuito determinado por la norma IEC 60270 (Fig. 2.8).

Los elementos principales que componen el circuito de medición son:

- Equipos de medida de DP: equipo Terco, equipo Tem y equipo Omicron (Sec. 3.1).
- Transformador monofásico de 5 kVA / 50 Hz marca RHONA (Fig. 3.4).
- Condensador de acoplamiento de capacidad 1000 pF y tensión nominal 15 kV, marca PDTech modelo CC15 (Fig. 3.5) [19].
- Impedancias de medidas. Se utilizaron los cuadripolos de cada equipo de medida: cuadripolo Terco, cuadripolo Tem y cuadripolo Omicron; y un sensor inductivo: transformador de corriente de alta frecuencia, o HFCT, marca PDTech modelo CT17 (Fig. 3.6).
- Módulos-filtro: filtro Terco y filtros Tem (filtro E10 y filtro HV).
- Probetas de ensayo: punta placa, vacuola en resina, aislador y bobina (Sec. 3.2.1).



(a) Detalle del transformador RHONA

Potencia nominal	5 KVA
Frecuencia	50 Hz
Tensión nominal primaria	7820 V
Tensión nominal secundaria	231 V
Corriente nominal primario	0,7 A
Corriente nominal secundario	21,6 A
Impedancia	3,6 %
Fases	1

(b) Datos del transformador RHONA

FIGURA 3.4: Transformador de potencia.



(a) Detalle del condensador de acoplamiento PDTech

Capacidad	1000 pF @ 50 Hz / 20 °C
Tolerancia	±20 %
Voltaje máximo	15 kV rms
PD free test < 5 pC	16 kV rms
Rango de temperatura	−20 °C a +85 °C

(b) Datos del condensador de acoplamiento PDTech

FIGURA 3.5: Condensador de acoplamiento.



(a) Detalle del HFCT PDTech

BW −3 dB	0,5 – 80 MHz
Diámetro	17 mm
Corriente máxima	25 A @ 50 Hz / 60 Hz

(b) Datos del HFCT PDTech

FIGURA 3.6: Transformador de corriente de alta frecuencia.

3.2.1. Probetas de ensayo

Las probetas utilizadas en los diferentes ensayos emulan una punta o imperfección entre un medio aislante y un conductor energizado.

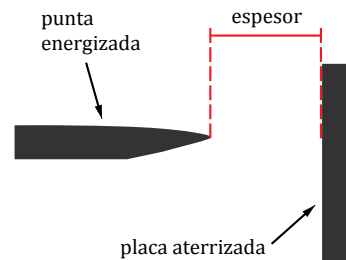
3.2.1.1. Probeta punta placa

La probeta con configuración punta placa consta de una punta y una placa metálica, ambos montadas sobre un soporte. Los electrodos se encuentran con un espesor o distanciados entre sí en 10 mm.

La punta, encargada de generar la descarga en aire, es energizada a una tensión de prueba de 4,8 kV, mientras que la placa se encuentra aterrizada. Este fenómeno es conocido como efecto corona.



(a) Montaje probeta punta placa

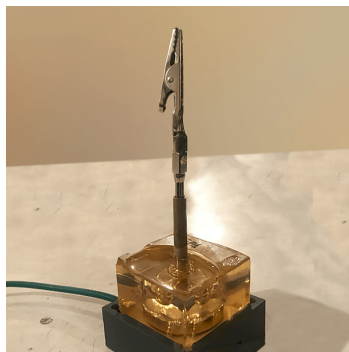


(b) Diagrama probeta punta placa

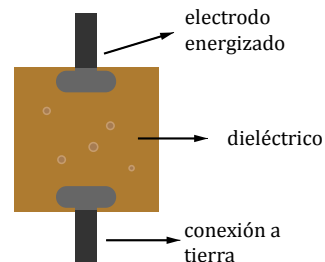
FIGURA 3.7: Probeta punta placa.

3.2.1.2. Probeta vacuola en resina

Para emular una aislación sólida con imperfecciones, se utiliza una probeta de resina con vacuolas en su interior, de un diámetro de vacuolas aproximado de 1 mm. Ambos electrodos son de forma cilíndrica. Se aplica una tensión de prueba de 7 kV.



(a) Montaje probeta vacuola en resina

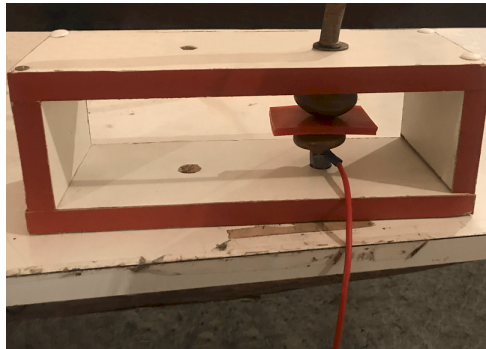


(b) Diagrama probeta vacuola en resina

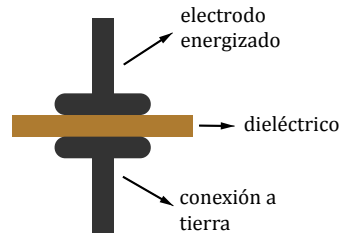
FIGURA 3.8: Probeta vacuola en resina.

3.2.1.3. Probeta aislador

Para generar descargas parciales superficiales, se utiliza una probeta de lámina de silicona entre dos electrodos semi-esféricos. Se energiza a una tensión de 4 kV.



(a) Montaje probeta aislador



(b) Diagrama probeta aislador

FIGURA 3.9: Probeta aislador.

3.2.1.4. Probeta bobina

La probeta bobina corresponde a una bobina de estátor de un motor de alta tensión recubierta de aislación. Se envuelve la aislación mediante un cable de cobre desnudo aterrizado y se aplica una tensión de prueba de 2 kV.

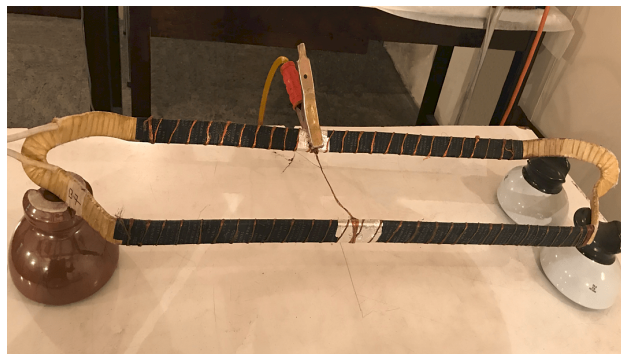


FIGURA 3.10: Probeta bobina.

3.3. Configuración del sistema de medición de Descargas Parciales

Por cada probeta de ensayo se realizaron pruebas de detección de DPs con los diferentes equipos de medida, variando la impedancia de medida y la frecuencia de integración.

- Las mediciones con el equipo Terco solo se realizaron con el cuadripolo Terco junto al módulo-filtro Terco.
- Para las mediciones con el equipo Tem se utilizaron el cuadripolo Tem y al HFCT como impedancia de medida, y dos módulo-filtro para variar la frecuencia de integración: el filtro E10 y el filtro HV.

- Para el equipo Omicron se utilizaron el cuadripolo Omicron y el HFCT como impedancia de medida, y la frecuencia de integración se modificó por medio de software. El software fue configurado para trabajar con 6 frecuencias de integración distintas, las que se muestran en la Tabla 3.1, donde f_c corresponde a la frecuencia central del rango que compone la frecuencia de integración, f_{inf} es la frecuencia de corte inferior ($f_c - 150$ kHz) y f_{sup} es la frecuencia de corte superior ($f_c + 150$ kHz). El primer rango de frecuencia escogido fue en base a las indicaciones de la norma *IEC 60270*, los siguientes fueron elegidos de manera arbitraria.

TABLA 3.1: Frecuencias de integración definidas para el equipo Omicron.

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]
$f_1 = 250$	100	400
$f_2 = 350$	200	500
$f_3 = 600$	450	750
$f_4 = 1000$	850	1150
$f_5 = 2000$	1850	2150
$f_6 = 5000$	4850	5150

La Tabla 3.2 muestra las configuraciones de los sistemas de medida para las pruebas de DPs en cada una de las probetas de ensayo.

TABLA 3.2: Configuración del sistema de medición de DPs para las distintas probetas.

Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro
Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco
Tem	cuadripolo Tem	filtro E10
	cuadripolo Tem	filtro HV
	HFCT	filtro E10
	HFCT	filtro HV
Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1
	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2
	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3
	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4
	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5
	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6
	HFCT	frecuencia integración f_1
	HFCT	frecuencia integración f_2
	HFCT	frecuencia integración f_3
	HFCT	frecuencia integración f_4
	HFCT	frecuencia integración f_5
	HFCT	frecuencia integración f_6

3.4. Procedimiento de medición y detección de Descargas Parciales

Para la medición y detección de descargas parciales, por cada combinación de probeta, equipo de medición, impedancia y filtro se realizó lo siguiente:

- Montaje del circuito de medición y detección de DP, en las dependencias de la cabina blindada del Laboratorio de Alta Tensión (Fig. 3.11).
- Calibración del circuito (Sección 3.4.1).
- Energización del circuito de medida mediante el transformador de potencia, elevando la tensión hasta que se producen las primeras descargas parciales en la probeta de ensayo.
- Las descargas producidas se midieron a través del equipo de medición, obteniendo el valor de carga aparente en pC y su correspondiente *patrón de descargas parciales resueltas en fase (PRPD)*.

En el caso del equipo de medida Omicron, el software entrega el valor medido de la carga aparente, la respuesta en frecuencia del pulso de la descarga parcial y el *patrón de descargas parciales resueltas en fase (PRPD)*.



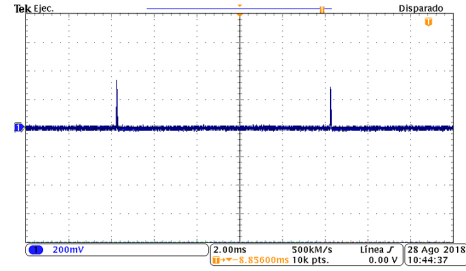
FIGURA 3.11: Montaje experimental para medición de DP en cabina blindada del Lab. de Alta Tensión.

3.4.1. Procedimiento de calibración

Para realizar la calibración del circuito de medida de descargas parciales, se realizó la conexión mostrada en la Fig. 2.9, usando el calibrador marca *PRESCO AG* modelo PD-CLSB-CD00 con cada combinación de probeta, equipo de medición, impedancia y filtro. Este calibrador genera un pulso de carga que es inyectado al circuito a través de los terminales de la probeta de ensayo. La magnitud de este pulso, denominado Q_0 , puede ser de valor 10, 100, 1000, y 100000 pC. La Fig. 3.12a muestra al calibrador, y la Fig. 3.12b un ejemplo del pulso de carga generado por este.



(a) Calibrador PRESCO AG



(b) Pulso de calibración

FIGURA 3.12: Calibración de descargas parciales.

3.4.1.1. Calibración del equipo Terco

La calibración del equipo Terco consta de dos partes: una calibración del equipo de medida y una corrección. Cuando solo se cambia la impedancia o el filtro, no es necesario volver a calibrar, sino tan solo realizar una corrección.

Para calibrar el equipo se debe llevar la perilla **CORR** a la posición **OFF**, girar la perilla de ajuste del selector de rango a la posición **CAL**, y ajustar el tornillo del equipo para que la pantalla digital muestre el número 4. Para realizar la corrección se debe inyectar una carga Q_0 y girar la perilla de ajuste **CORR** hasta que el equipo muestre el mismo valor de carga que se inyecta.

Los valores de la calibración correspondientes al equipo Terco se encuentran en la Tabla A.1 del Apéndice A.

3.4.1.2. Calibración del equipo Tem

El procedimiento de calibración del equipo Tem consiste en inyectar una carga Q_0 y proceder a tomar lectura del valor V_0 indicado en el equipo. Con estos valores se calcula el factor de corrección K_{Tem} :

$$K_{\text{Tem}} = \frac{Q_0}{V_0}$$

Luego, se realiza la medición de la descarga parcial considerando el factor de corrección, en donde el valor de carga aparente se calcula a través de la ecuación:

$$Q_{\text{aparente}} = K_{\text{Tem}} \cdot V_{\text{DP}}$$

donde V_{DP} es el valor leído en el equipo de medida cuando se produce la DP.

Los valores de la calibración correspondientes al equipo Tem se encuentran en la Tabla A.2 del Apéndice A.

3.4.1.3. Calibración del equipo Omicron

La calibración del equipo Omicron consiste en inyectar la carga Q_0 e ingresar el valor al software del equipo (Fig. 3.13). Con ello todas las mediciones posteriores se encontrarán calibradas, y el software arrojará directamente el valor de carga aparente.

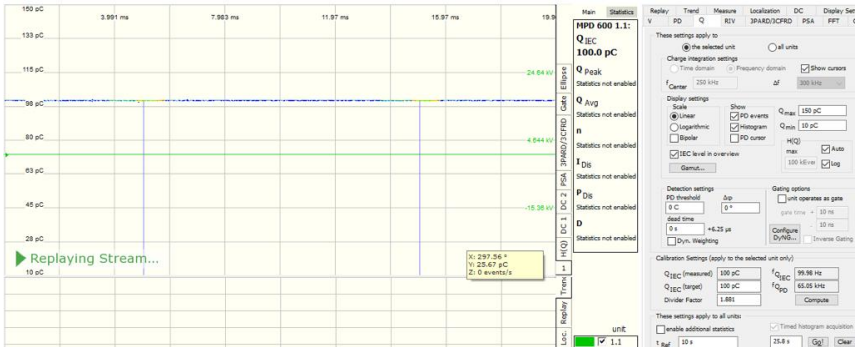


FIGURA 3.13: Calibración del equipo Omicron.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones de descargas parciales que se realizaron para las cuatro probetas de ensayo: punta placa, vacuola en resina, aislador y bobina; utilizando para ellos los tres equipos de medida: Terco, Tem y Omicron. Para la medición y posterior análisis de descargas parciales, se varió la impedancia de medida junto con la frecuencia de integración. Las distintas configuraciones del circuito de medición se muestran en la Tabla B.1 del Apéndice B.

Por cada medición de descarga parcial se obtiene un diagrama de fase resuelta, o patrón PRPD (Phase-Resolved Partial Discharge), junto con el valor medido de carga aparente o magnitud de la descarga parcial. En el caso del equipo Omicron, este entrega adicionalmente el gráfico *Fast Fourier Transform* (FFT), que muestra el contenido de frecuencia de la señal de descarga parcial.

Para cada probeta se analiza el comportamiento de las impedancias de detección y las frecuencias de integración, en base a la magnitud de la descarga parcial y a su respuesta en frecuencia. El análisis basado en la magnitud de la descarga parcial se realiza con el valor de carga aparente que entregan los equipos Terco, Tem y Omicron. Y el análisis basado en la respuesta en frecuencia de la señal de DP se realiza con el gráfico *FFT* obtenido del equipo Omicron.

Finalmente se propone, de acuerdo a la fuente de descarga parcial, qué configuración de detección conviene implementar.

A continuación, las distintas configuraciones del sistema de medida se identifican usando el esquema (*equipo – impedancia – filtro*), donde:

- El *equipo* de medida puede ser: *Terco*, *Tem* u *Omicron*.
- La *impedancia* de medida puede ser: *Z.Terco* (cuadripolo Terco), *Z.Tem* (cuadripolo Tem), *Z.Omicron* (cuadripolo Omicron) o *Z.HFCT* (HFCT).
- El *filtro* puede ser: *F.Terco* (filtro Terco), *F.E10* (filtro E10) o *F.HV* (filtro HV).

4.1. Probeta punta placa

Para el primer conjunto de ensayos en el laboratorio, se generaron descargas parciales a través de una probeta punta placa (Fig. 3.7).

Para el sistema de medida de descargas parciales, se implementaron las configuraciones definidas en la Tabla 3.2. En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos para los ensayos con cada una de las configuraciones.

4.1.1. Punta placa (Terco – Z.Terco – F.Terco)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Terco, impedancia de medida cuadripolo Terco y filtro Terco.

La Fig. 4.1 muestra el patrón de fase resuelta entregado por el equipo. Se presentan descargas de magnitud constante en el semiciclo negativo en torno a los 270° .

Se obtiene una medición de carga aparente de 161 pC.

El patrón de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el electrodo es el que se encuentra energizado.

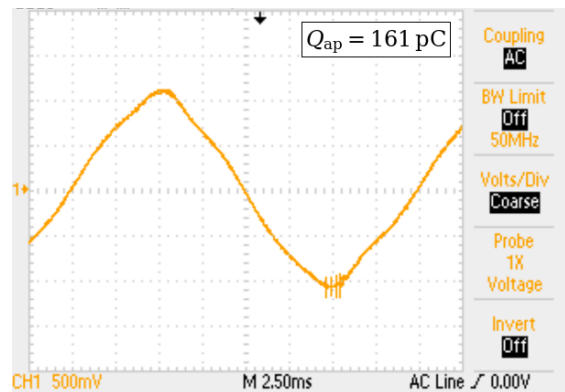


FIGURA 4.1: Medición de DP en probeta punta placa (Terco – Z.Terco – F.Terco).

4.1.2. Punta placa (Tem – Z.Tem – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro E10.

La Fig. 4.2 muestra el patrón de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP ocurren en el semiciclo negativo en torno a los 270° , de magnitud constante y de alta repetición.

El equipo entrega un valor de carga aparente de 150 pC.

El patrón de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el electrodo es el que se encuentra energizado.

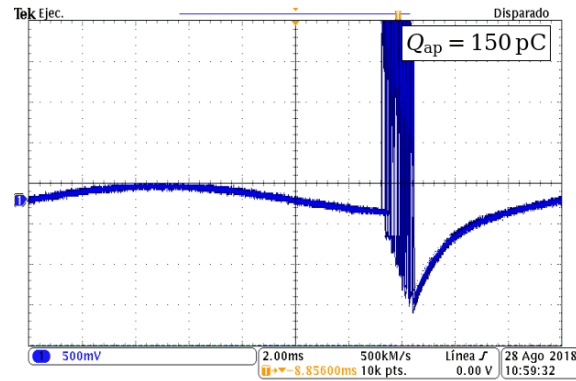


FIGURA 4.2: Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.Tem – F.E10).

4.1.3. Punta placa (Tem – Z.Tem – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro HV.

La Fig. 4.3 muestra el patrón de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP ocurren en el semiciclo negativo cercano a los 270° , de magnitud constante, de alta repetitividad y de elevada magnitud.

La medición de carga aparente es de 227 pC.

El patrón de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el electrodo es el que se encuentra energizado.

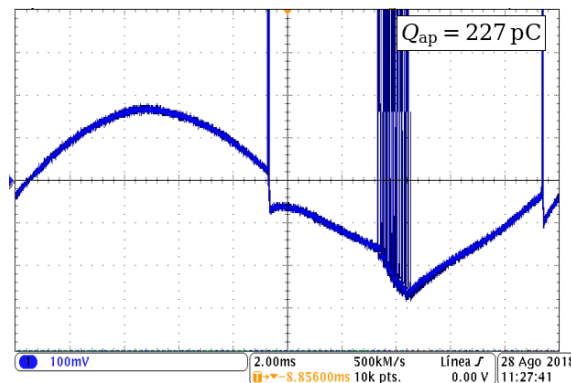


FIGURA 4.3: Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.Tem – F.HV).

4.1.4. Punta placa (Tem – Z.HFCT – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro E10.

La Fig. 4.4 muestra el patrón de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP aparecen en el semiciclo negativo en torno a los 270° . Los pulso de DP son de magnitud variable y de alta repetitividad.

El máximo valor de la carga aparente medido es de 139 pC.

El patrón de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el electrodo es el que se encuentra energizado.

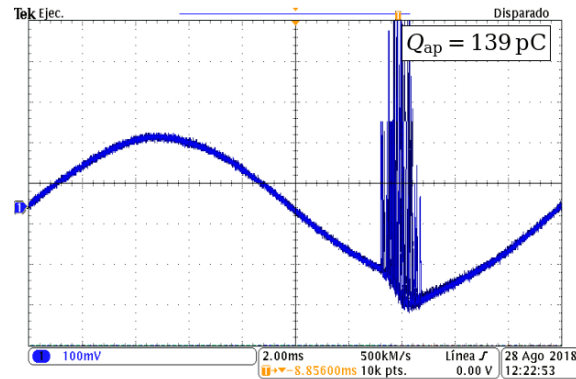


FIGURA 4.4: Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.HFCT – F.E10).

4.1.5. Punta placa (Tem – Z.HFCT – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro HV.

Como se observa en la Fig. 4.5, el equipo no logra detectar la fase donde ocurren las DP, por lo que no entrega un patrón en fase resuelta. Sin embargo, sí se logra medir la amplitud máxima de carga aparente, de valor 140 pC.

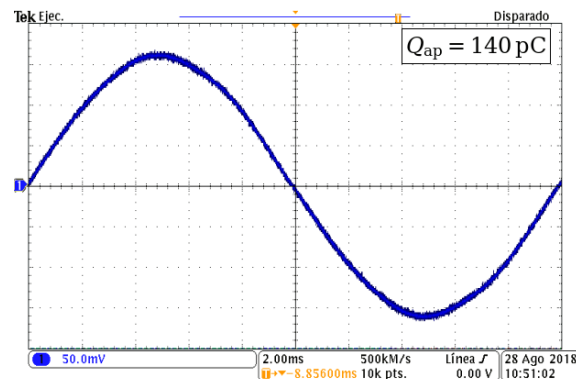


FIGURA 4.5: Medición de DP en probeta punta placa (Tem – Z.HFCT – F.HV).

4.1.6. Punta placa (Omicron – Z.Omicron)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Omicron, impedancia de medida cuádrupolo Omicron y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.6 muestra los patrones de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP aparecen en el semiciclo negativo, en torno a los 270° y de magnitud relativamente constante.

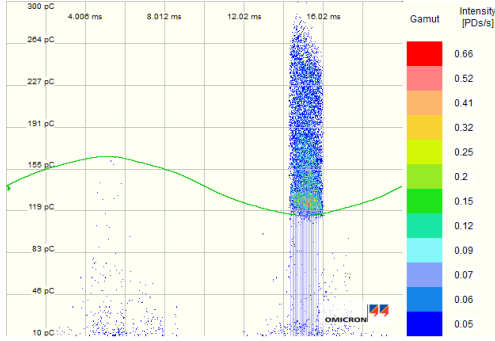
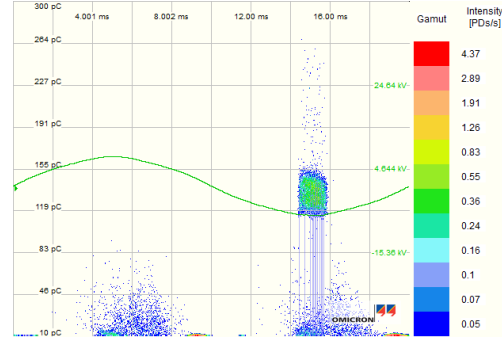
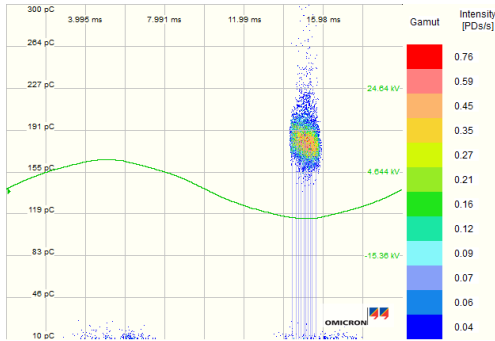
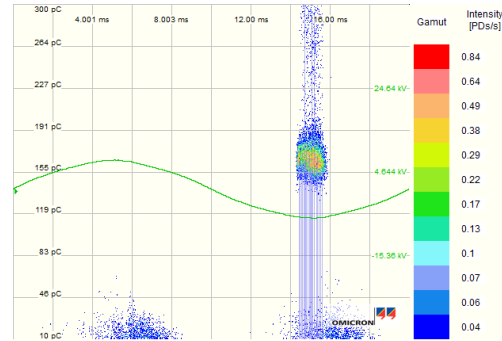
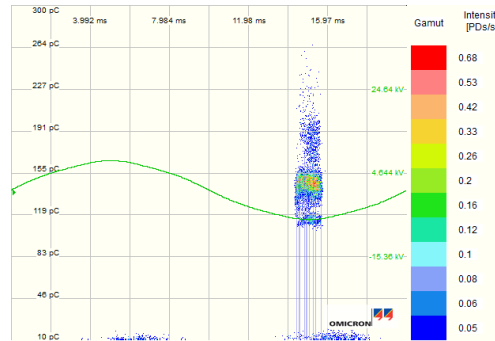
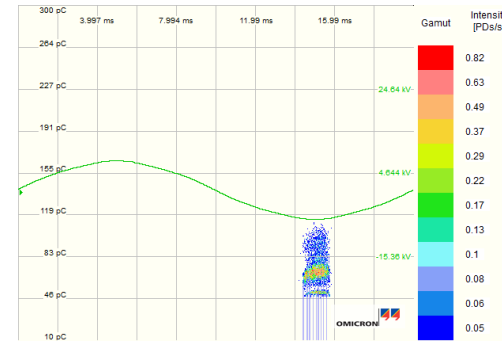
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 223,30 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 140,20 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 193,50 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 257,20 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 179,70 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 88,45 \text{ pC}$

FIGURA 4.6: Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

Los patrones de fase resuelta comprueban que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el lado del electrodo es el que se encuentra energizado.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.1. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $1000 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 5 MHz.

TABLA 4.1: Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	223,30
350	200	500	140,20
600	450	750	193,50
1000	850	1150	257,20
2000	1850	2150	179,70
5000	4850	5150	88,45

4.1.7. Punta placa (Omicron – Z.HFCT)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta punta placa, con equipo Omicron, impedancia de medida HFCT y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.7 muestra los patrones de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP aparecen en el semiciclo negativo, en torno a los 270° , de forma simétrica con baja repetitividad.

Los patrones de fase resuelta comprueban que la fuente de DP es de tipo corona, por ser un patrón característico en este tipo de descargas. Como las descargas se producen en el semiciclo negativo, se comprueba que el electrodo es el que se encuentra energizado.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.2. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $2000 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 250 kHz.

TABLA 4.2: Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	149,20
350	200	500	213,20
600	450	750	416,60
1000	850	1150	487,10
2000	1850	2150	701,00
5000	4850	5150	684,70

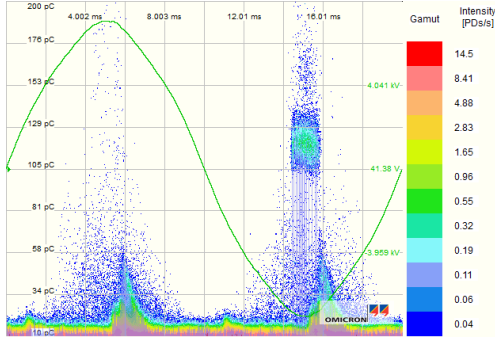
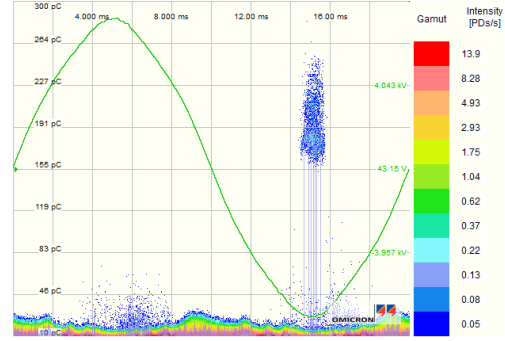
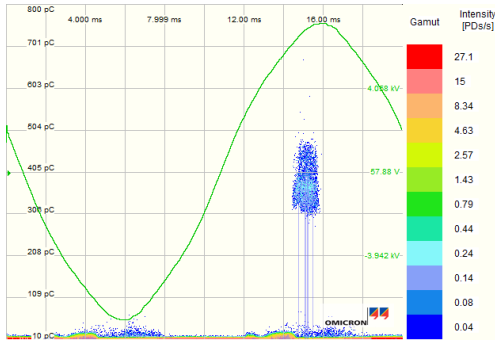
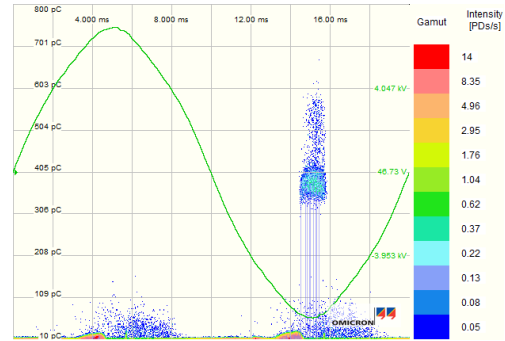
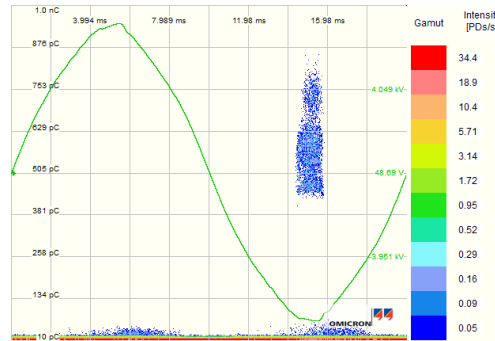
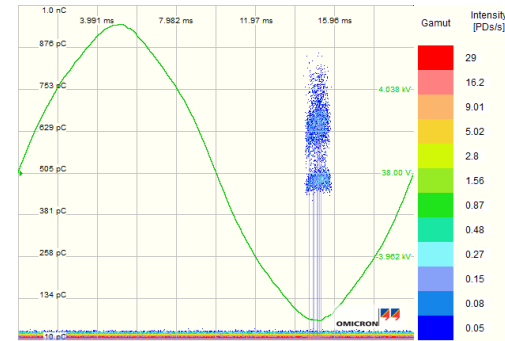
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 149,20 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 213,20 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 416,60 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 487,10 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 701,00 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 684,70 \text{ pC}$

FIGURA 4.7: Medición de DP en probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.1.8. Análisis

4.1.8.1. Omicron – Z.Omicron

De la medición de descargas parciales en probeta punta placa, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el cuadripolo Omicron, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.8, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP para la probeta punta placa, según se ve en los *FFT*, está en el rango bajo los 2 MHz. De esto se infiere que la impedancia de medida actúa como un filtro pasa banda que tiene una respuesta baja en frecuencias.

Cuando se integra la señal de DP con valores de frecuencias comprendidos bajo los 2 MHz se obtiene un mayor valor de carga aparente, ya que la amplitud es mayor en ese rango de frecuencias.

El sistema de medición de DP, al utilizar el cuadripolo interno, posee una mayor sensibilidad cuando se trabaja con frecuencias de integración en el rango de los kHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central de 5 MHz se observa que su ancho de banda no está contenido en su totalidad dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es parcialmente filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

4.1.8.2. Omicron – Z.HFCT

De la medición de descargas parciales en probeta punta placa, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el HFCT, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.9, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencia de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en el rango de los MHz. De esto se infiere que el HFCT actúa como un filtro pasabanda con respuesta en altas frecuencias.

La señal de DP se debe integrar en rangos de alta frecuencia, donde se tiene una mayor amplitud y por consiguiente una mayor sensibilidad de medida. En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utilizan frecuencias de integración sobre 1 MHz.

El sistema de medición de descargas parciales, cuando se utiliza el HFCT, tiene mayor sensibilidad cuando se trabaja con frecuencias de integración en el rango de los MHz.

Al ocupar un filtro con frecuencias en el orden de los kHz se observa que su ancho de banda no está contenido en su totalidad dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es parcialmente filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

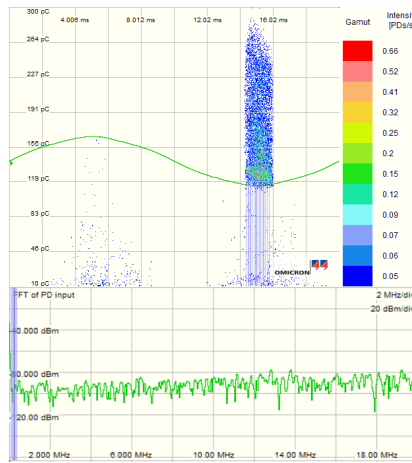
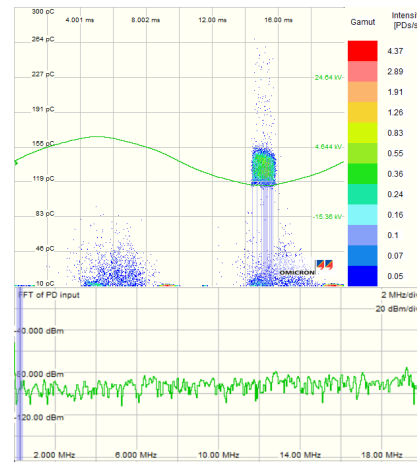
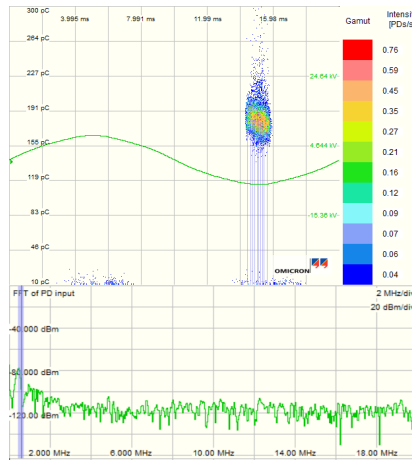
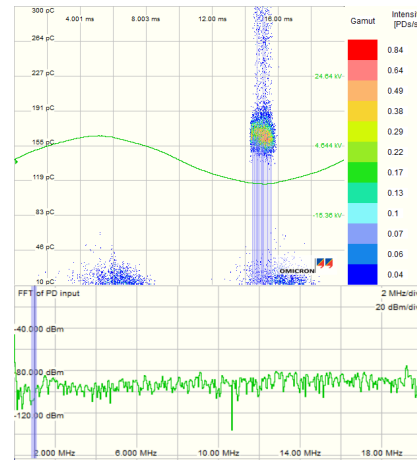
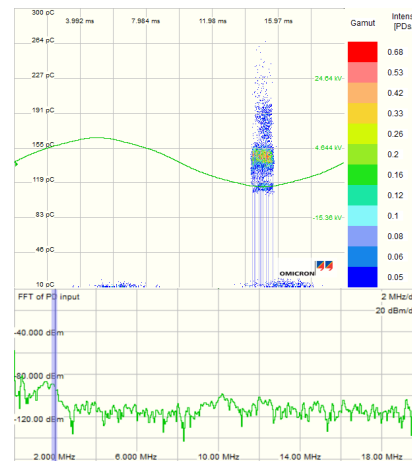
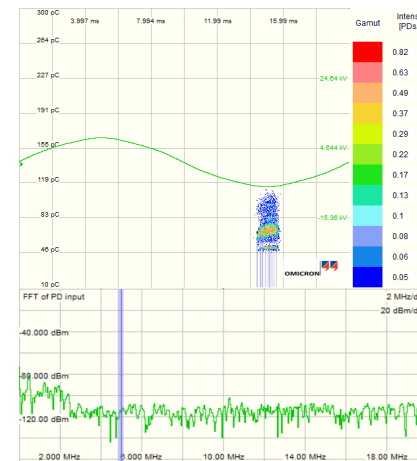
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 223,30 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 140,20 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 193,50 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 257,20 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 179,70 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 88,45 \text{ pC}$

FIGURA 4.8: FFT de probeta punta placa (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

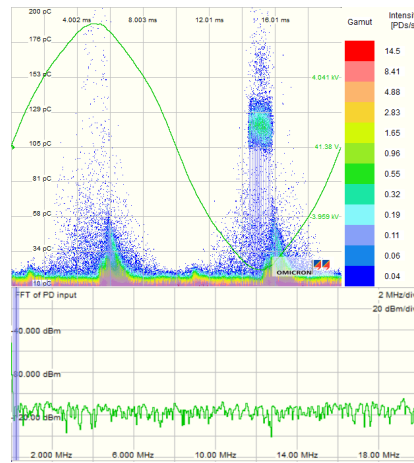
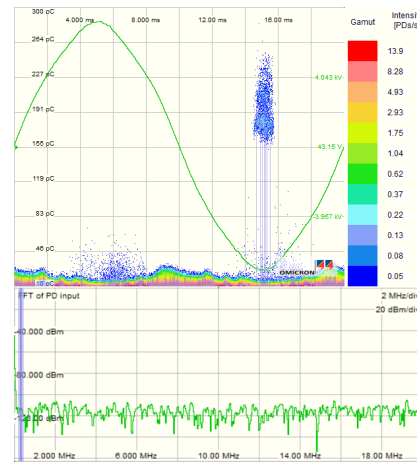
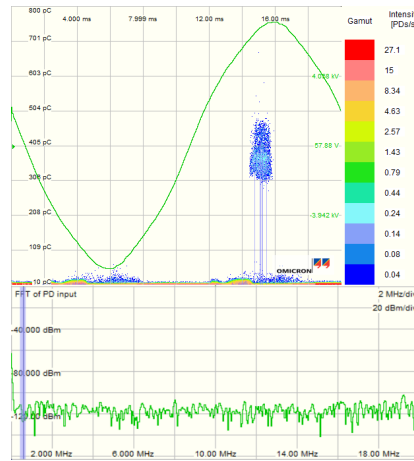
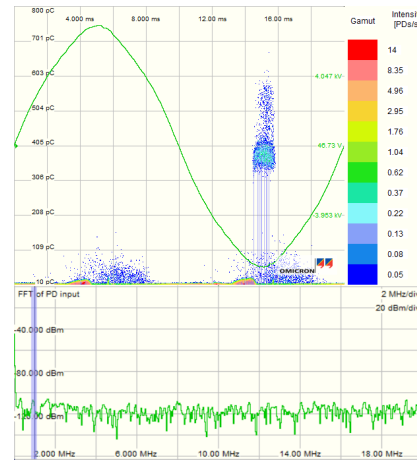
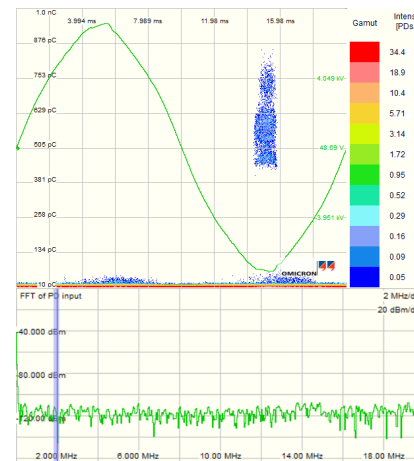
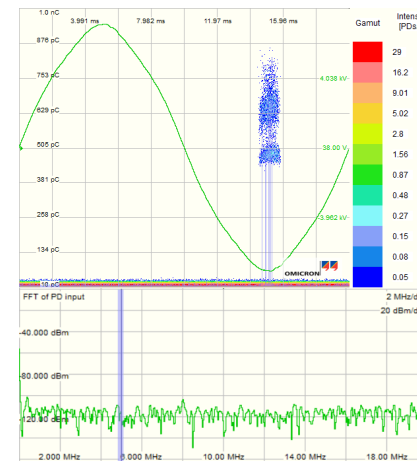
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 149,20 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 213,20 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 416,60 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 487,10 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 701,00 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 684,70 \text{ pC}$

FIGURA 4.9: FFT de probeta punta placa (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.1.9. Comparativa de los sistemas de medición

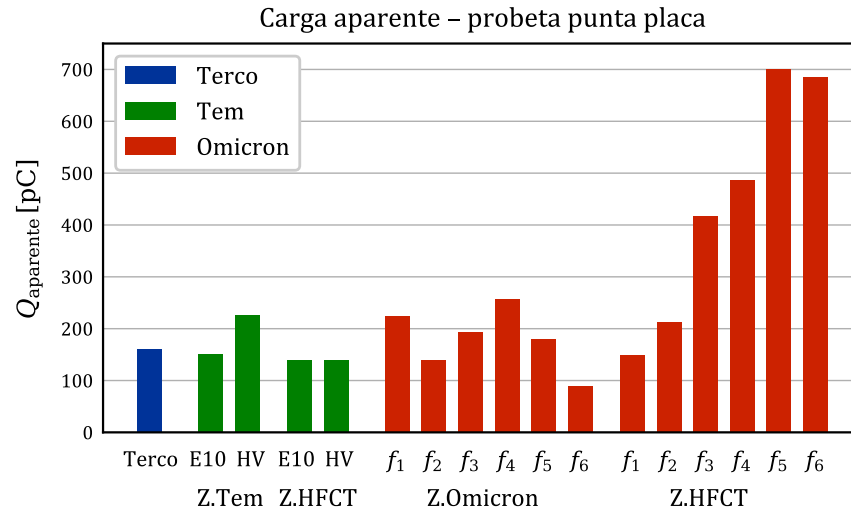


FIGURA 4.10: Valor medido de carga aparente en probeta punta placa.

En el gráfico de la Fig. 4.10 se puede observar el valor medido de la carga aparente para todas las mediciones de DP realizadas en la probeta punta placa.

Se busca la configuración más óptima para cada equipo de medida frente a la ocurrencia de descargas parciales del tipo corona.

En las mediciones del equipo Tem, la configuración más apropiada se produce cuando se tiene como impedancia de medida al cuadripolo Tem junto al filtro HV, ya que se obtiene un mayor valor de amplitud de DP. Si solo se cuenta con un HFCT como impedancia de medida, el filtro que se utilice no tiene mayor influencia dentro de la medición, ya que los valores medido de carga aparente son muy similares entre sí.

Para el equipo Omicron, se observa que la configuración más apropiada se produce al utilizar el HFCT como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 2 MHz. Si solo se cuenta con el cuadripolo Omicron como impedancia de medida, la frecuencia de integración más adecuada sería la que tiene como frecuencia central 1 MHz. Sin embargo, al utilizar el cuadripolo Omicron como impedancia de medida se genera una pérdida considerable en sensibilidad en la medición de DPs.

Con esto se puede indicar que cuando se producen descargas parciales del tipo corona, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital de última generación Omicron, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central sobre los 2 MHz.

Si no se cuenta con un equipo digital de última generación, una buena alternativa para este tipo de descargas parciales es el equipo Tem, utilizando el cuadripolo Tem como impedancia de medida junto al filtro HV.

4.2. Probeta vacuola en resina

Para el segundo conjunto de ensayos en el laboratorio, se generaron descargas parciales a través de una probeta vacuola en resina (Fig. 3.8).

Para el sistema de medida de descargas parciales, se implementaron las configuraciones definidas en la Tabla 3.2. En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos para los ensayos con cada una de las configuraciones.

4.2.1. Vacuola en resina (Terco – Z.Terco – F.Terco)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Terco, impedancia de medida cuadripolo Terco y filtro Terco.

La Fig. 4.11 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Se presentan descargas en el semiciclo positivo en torno a los 90° , y en el semiciclo negativo en torno a los 270° . Se observa simetría entre ambas polaridades.

Se obtiene una medición de carga aparente de 129 pC.

El diagrama de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es del tipo interna y, como no existe una predominancia de pulsos, el defecto debe estar ubicado en el centro del aislamiento.

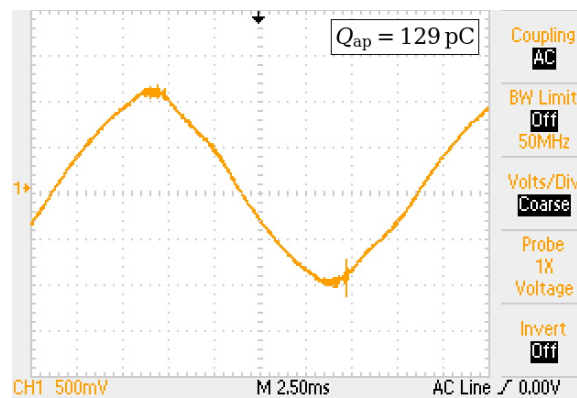


FIGURA 4.11: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Terco – Z.Terco – F.Terco).

4.2.2. Vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro E10.

La Fig. 4.12 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Se observa que las DP ocurren en ambos semiciclos en torno a los 65° y 245° , simétricas en ambas polaridades y de baja amplitud.

El sistema arroja una medición de carga aparente de 20 pC.

El diagrama de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es del tipo interna y, como no existe una predominancia de pulsos, el defecto debe estar ubicado en el centro del aislamiento.

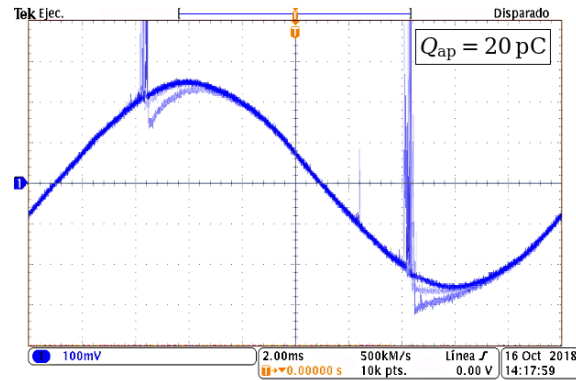


FIGURA 4.12: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.E10).

4.2.3. Vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro HV.

La Fig. 4.13 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP ocurren en ambos semiciclos en torno a los 90° y 270° , simétricas en ambas polaridades, de elevada amplitud y alta repetitividad.

La medición de carga aparente de 143 pC.

El diagrama de fase resuelta comprueba que la fuente de DP es del tipo interna y, como no existe una predominancia de pulsos, el defecto debe estar ubicado en el centro del aislamiento.

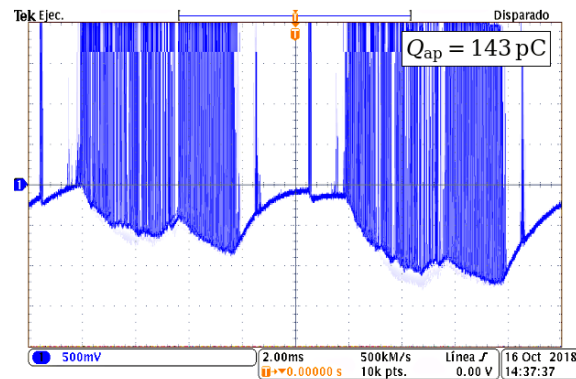


FIGURA 4.13: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.Tem – F.HV).

4.2.4. Vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro E10.

Como se observa en la Fig. 4.14, el equipo no logra detectar la fase donde ocurren las DP, por lo que no entrega un patrón en fase resuelta. Sin embargo, sí se logra medir la magnitud de la carga aparente, de valor 18 pC.

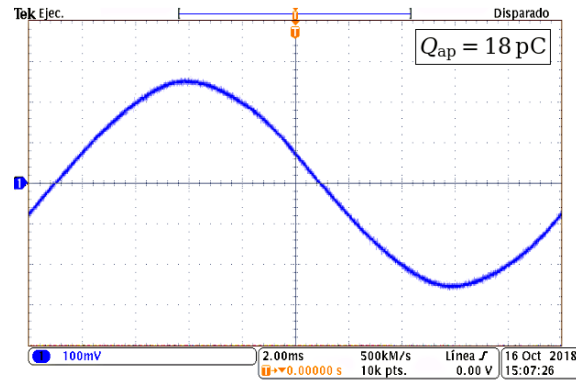


FIGURA 4.14: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.E10).

4.2.5. Vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro HV.

Como se observa en la Fig. 4.15, el equipo no logra detectar la fase donde ocurren las DP, por lo que no entrega un patrón en fase resuelta. Sin embargo, sí se logra medir la magnitud de la carga aparente, de valor 50 pC.

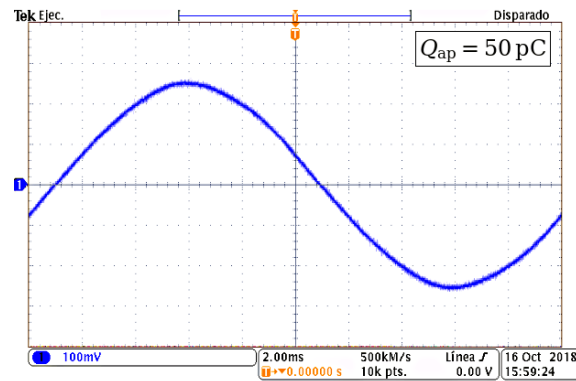


FIGURA 4.15: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Tem – Z.HFCT – F.HV).

4.2.6. Vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Omicron, impedancia de medida cuadripolo Omicron y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.16 muestra los diagramas de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP aparecen en ambos semiciclos de forma simétrica en torno a los 90° y 270°.

Los diagramas de fase resuelta comprueban que la fuente de DP es del tipo interna y, como no existe una predominancia de pulsos, el defecto debe estar ubicado en el centro del aislamiento.

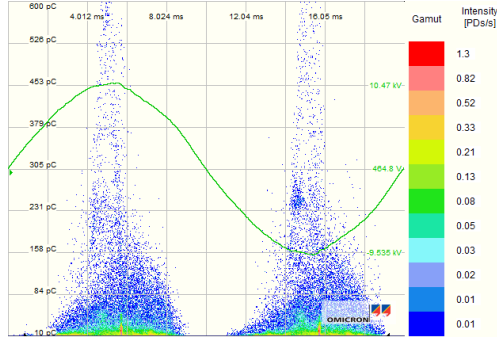
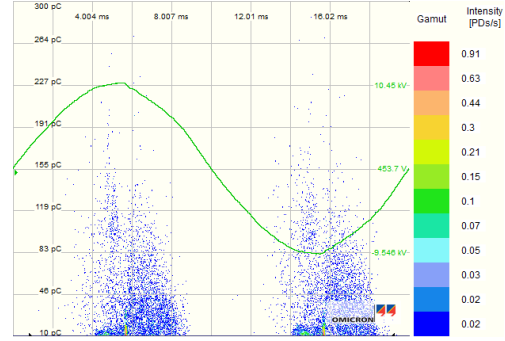
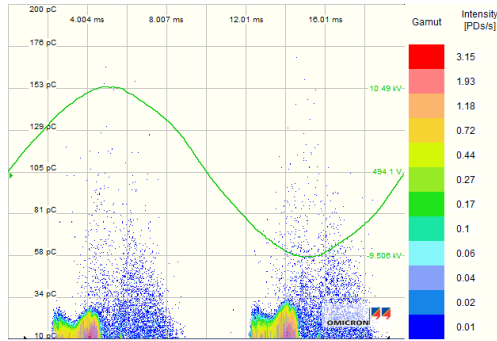
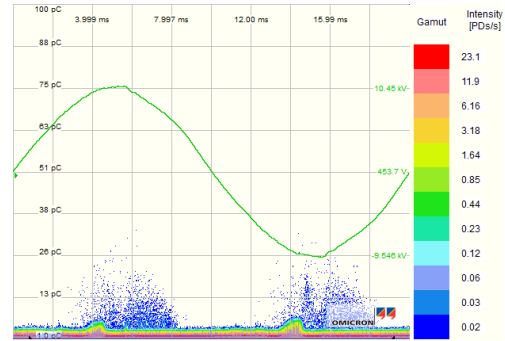
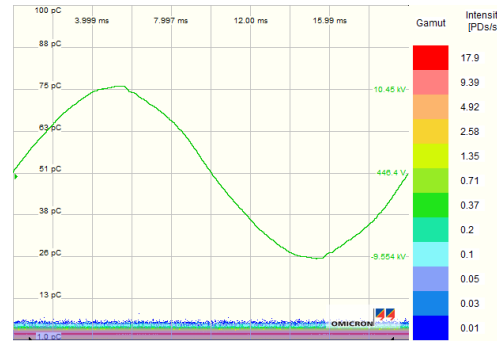
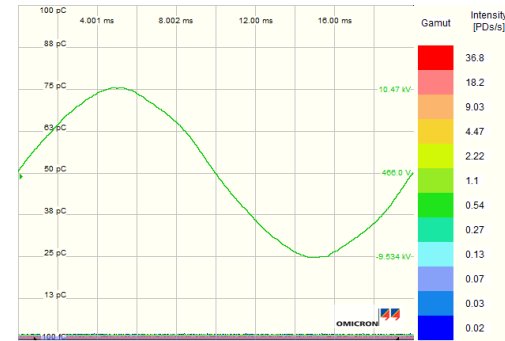
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 156,90 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 62,59 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 39,45 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 9,70 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 4,20 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 0,98 \text{ pC}$

FIGURA 4.16: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.3. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $250 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y los menores valores de carga se obtienen en el orden de los MHz.

TABLA 4.3: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	156,90
350	200	500	62,59
600	450	750	39,45
1000	850	1150	9,70
2000	1850	2150	4,20
5000	4850	5150	0,98

4.2.7. Vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta vacuola en resina, con equipo Omicron, impedancia de medida HFCT y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.17 muestra los diagramas entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP aparecen en ambos semiciclos de forma simétrica en torno a los 90° y 270° . El equipo solo entrega un diagrama de fase resuelta cuando el pulso de descarga parcial se integra en el rango de los kHz.

Los diagramas de fase resuelta comprueban que la fuente de DP es del tipo interna, y, como ya se vio en la medición anterior, al no existir una predominancia de pulsos, el defecto se ubica en el centro del aislamiento.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.4. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $250 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y los menores valores de carga se obtienen en el orden de los MHz.

TABLA 4.4: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	98,17
350	200	500	73,91
600	450	750	37,85
1000	850	1150	11,91
2000	1850	2150	3,23
5000	4850	5150	0,34

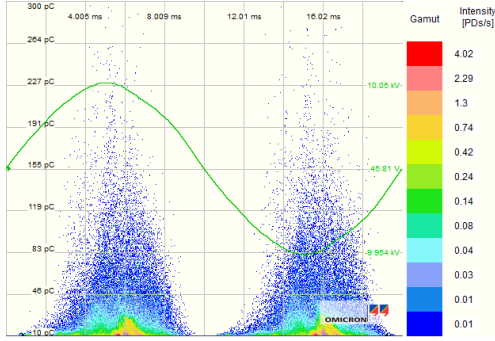
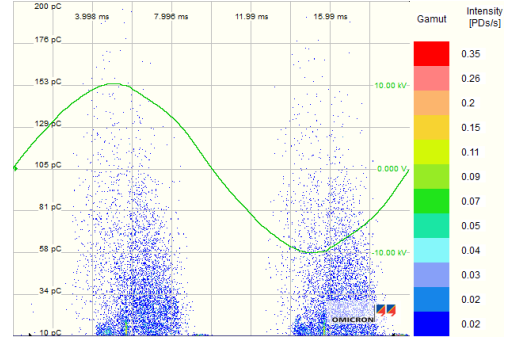
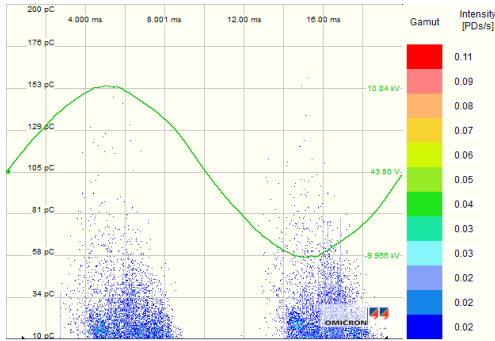
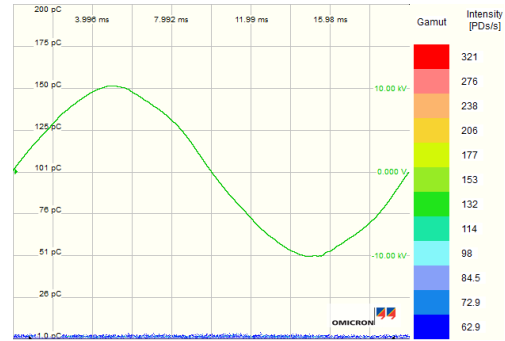
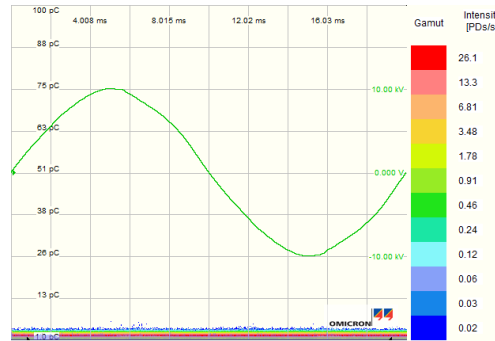
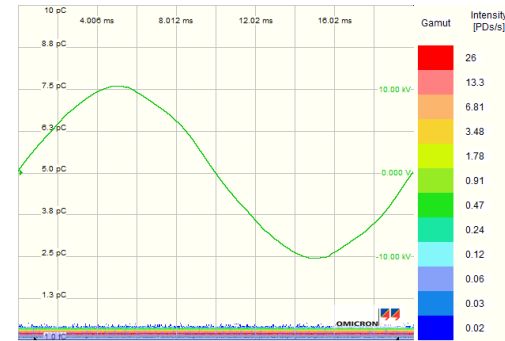
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 98,17 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 73,91 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 37,85 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 11,91 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 3,23 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 0,34 \text{ pC}$

FIGURA 4.17: Medición de DP en probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.2.8. Análisis

4.2.8.1. Omicron – Z.Omicron

De la medición de descargas parciales en probeta vacuola en resina, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida al cuadripolo Omicron, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.18, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en torno a los 250 kHz. De esto se infiere que la impedancia de medida actúa como un filtro pasa banda que tiene una respuesta baja en frecuencia.

La señal de DP se debe integrar en rangos de frecuencia en torno a los kHz para tener una mayor sensibilidad de medida.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza el filtro con frecuencia central de 250 kHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central en el rango de los MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

4.2.8.2. Omicron – Z.HFCT

De la medición de descargas parciales en probeta vacuola en resina, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el HFCT, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.19, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en torno a los kHz. De esto se infiere que el HFCT actúa como un filtro pasa banda con respuesta en bajas frecuencias.

La señal de DP se debe integrar en rangos de baja frecuencia (kHz) para tener una mayor sensibilidad de medida.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza la frecuencia de integración en torno a los 250 kHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central sobre los MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

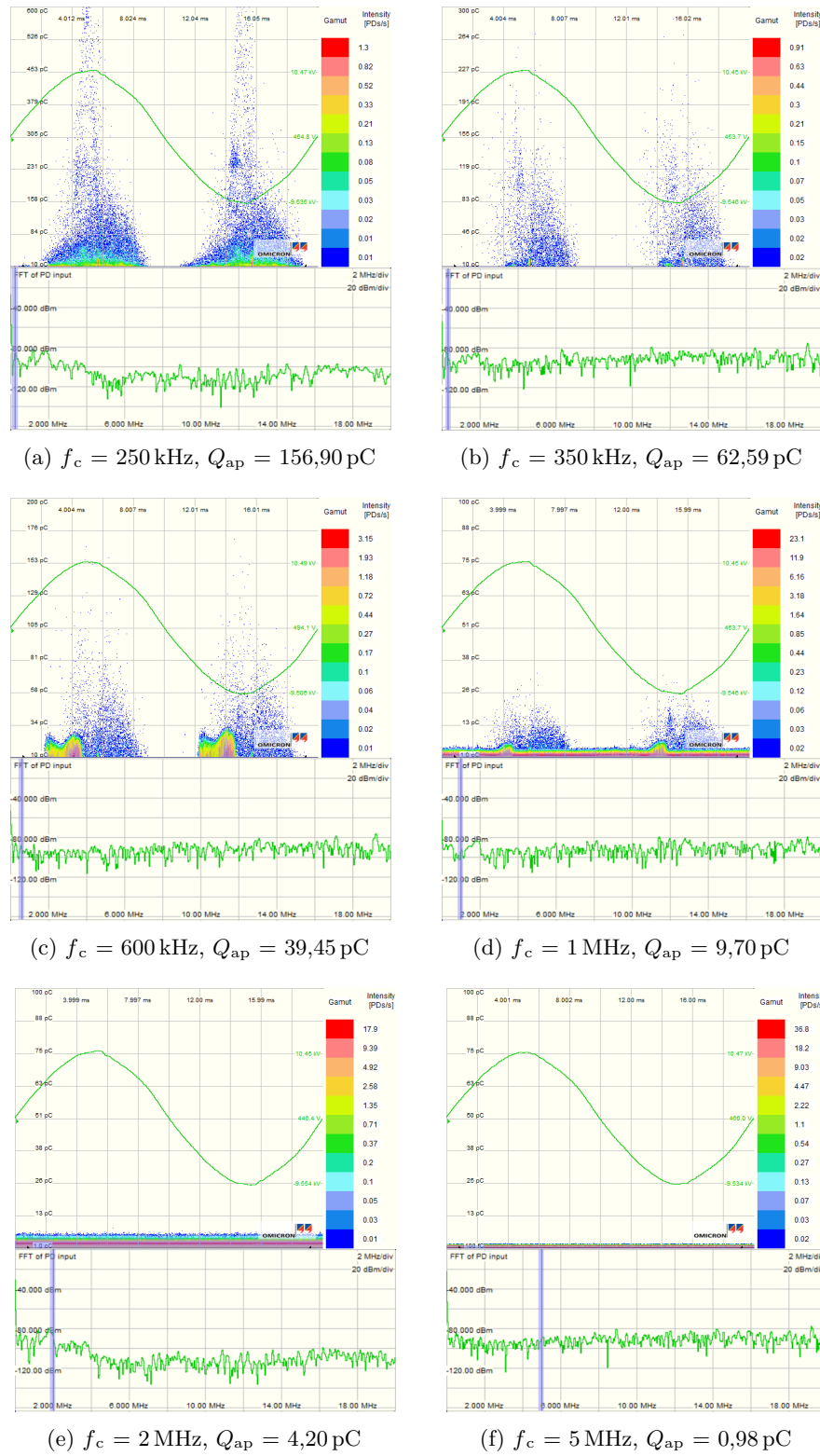


FIGURA 4.18: FFT de probeta vacuola en resina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

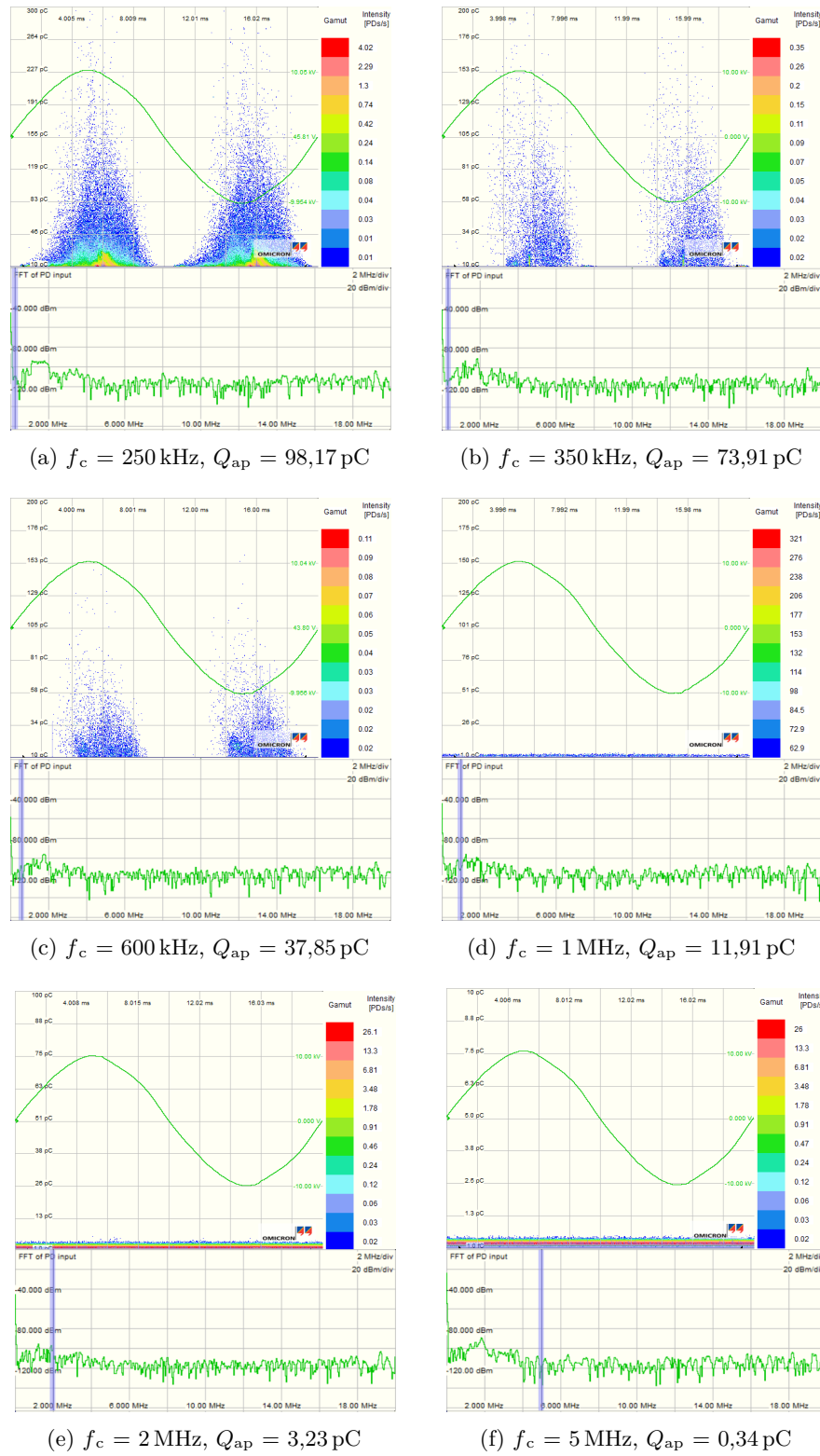


FIGURA 4.19: FFT de probeta vacuola en resina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.2.9. Comparativa de los sistemas de medición

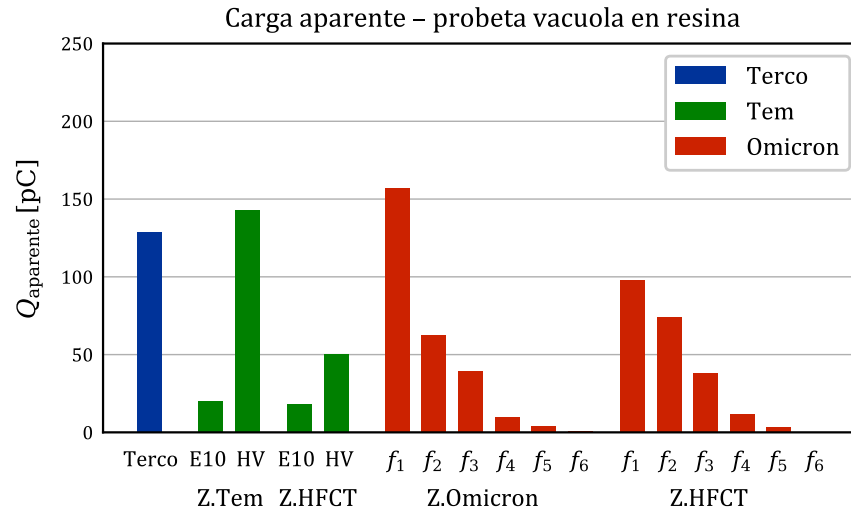


FIGURA 4.20: Valor medido de carga aparente en probeta vacuola en resina.

En el gráfico de la Fig. 4.20 se puede observar el valor medido de la carga aparente para todas las mediciones de DP realizadas en la probeta vacuola en resina.

Se busca la configuración más óptima del equipo de medida frente a la ocurrencia de descargas parciales de tipo internas.

En las mediciones del equipo Tem, la configuración óptima se produce cuando se tiene al cuadripolo Tem como impedancia de medida junto al filtro HV, ya que se obtiene un mayor valor de amplitud de DP. Si solo se cuenta con un HFCT como impedancia de medida, el filtro que se debe utilizar también es el filtro HV, con el cual se obtiene un mayor valor de carga aparente. El filtro E10 no es adecuado para este tipo de descargas, ya que filtra casi la totalidad de las DP.

Para el equipo Omicron, se observa que la mejor configuración se produce al utilizar el cuadripolo Omicron como impedancia de medida, junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 250 kHz. Si solo se cuenta con el HFCT como impedancia de medida, la frecuencia de integración más adecuada también sería con frecuencia central de 250 kHz. Las frecuencias de integración en el rango de los MHz filtran gran parte de las DP producidas, por lo que no son una buena elección.

Con esto se puede indicar que cuando se producen descargas parciales del tipo internas, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el cuadripolo Omicron como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 250 kHz.

Si no se cuenta con un equipo digital de última generación, los equipos Terco y Tem son una buena alternativa para este tipo de descargas parciales, siempre y cuando la configuración del equipo Tem sea con el cuadripolo Tem junto al filtro HV.

4.3. Probeta aislador

Para el tercer conjunto de ensayos en el laboratorio, se generaron descargas parciales a través de una probeta que contiene como objeto aislante una placa de silicona entre dos electrodos (Fig. 3.9).

Para el sistema de medida de descargas parciales, se implementaron las configuraciones definidas en la Tabla 3.2. En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos para los ensayos con cada una de las configuraciones.

4.3.1. Aislador (Terco – Z.Terco – F.Terco)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Terco, impedancia de medida cuadripolo Terco y filtro Terco.

La Fig. 4.21 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP parciales aparecen tanto en el semiciclo positivo, como en el semiciclo negativo, entre 60° – 90° y 240° – 270° . La magnitud de las descargas se visualiza levemente mayor en el semiciclo positivo. Los pulsos son de baja repetición y de baja magnitud.

Se obtiene una medición de carga aparente de 50 pC.

El diagrama de fase resuelta es el típico que se genera cuando ocurren DP de tipo superficial.

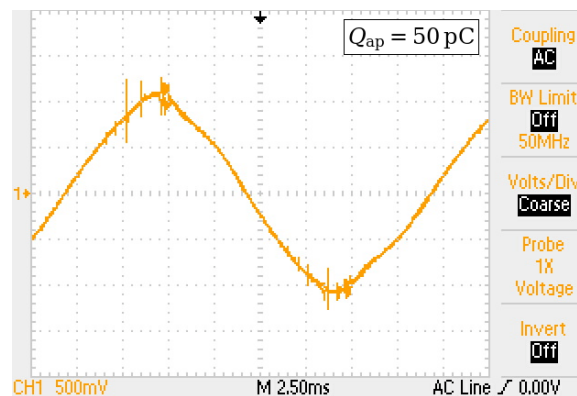


FIGURA 4.21: Medición de DP en probeta aislador (Terco – Z.Terco – F.Terco).

4.3.2. Aislador (Tem – Z.Tem – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro E10.

La Fig. 4.22 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Se observa que las DP ocurren en ambos semiciclos, entre 60° – 90° y 240° – 270° . Los pulsos que se generan son simétricos y de alta repetitividad.

Se lee del equipo una medición de carga aparente de 53 pC.

El diagrama de fase resuelta es el típico que se genera cuando ocurren DP de tipo superficial.

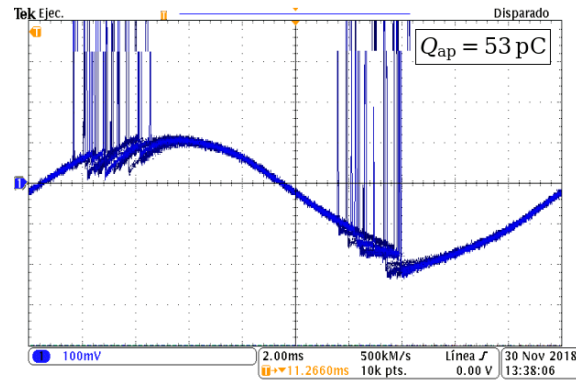


FIGURA 4.22: Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.Tem – F.E10).

4.3.3. Aislador (Tem – Z.Tem – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro HV.

La Fig. 4.23 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Se observa que las DP ocurren solo en el semi ciclo negativo entre los 240° – 270° . Los pulsos que se generan son de diferente magnitud y de muy baja repetitividad.

El valor de carga aparente que arroja el equipo de medición es de 40 pC.

Con el diagrama de fase resuelta que se obtiene no se puede inferir que el origen de las descargas sea de tipo superficial.

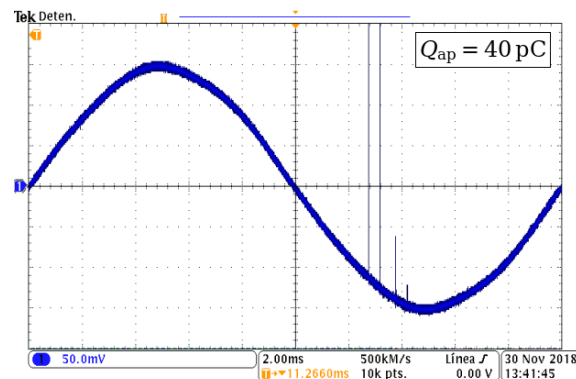


FIGURA 4.23: Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.Tem – F.HV).

4.3.4. Aislador (Tem – Z.HFCT – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro E10.

Como se observa en la Fig. 4.24, el equipo de medida no logra detectar en que fase ocurren las DP. Sin embargo, sí entrega un valor de carga aparente de 17 pC.

No se obtiene un diagrama de fase resuelta, por lo que no se puede inferir que el origen de las descargas sea de tipo superficial.

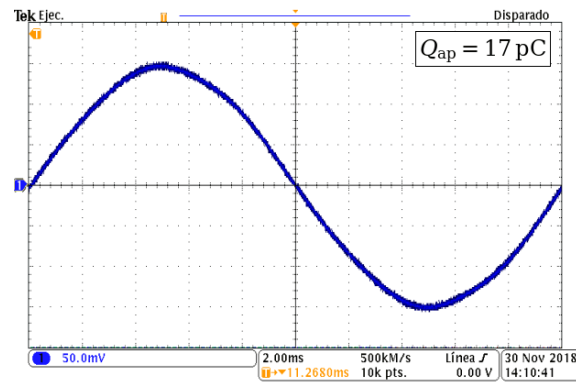


FIGURA 4.24: Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.HFCT – F.E10).

4.3.5. Aislador (Tem – Z.HFCT – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro HV.

Como se observa en la Fig. 4.25, el equipo de medida no logra detectar en que fase ocurren las DP. Sin embargo, sí entrega un valor de carga aparente de 100 pC.

No se obtiene un diagrama de fase resuelta, por lo que no se puede inferir que el origen de las descargas sea de tipo superficial.

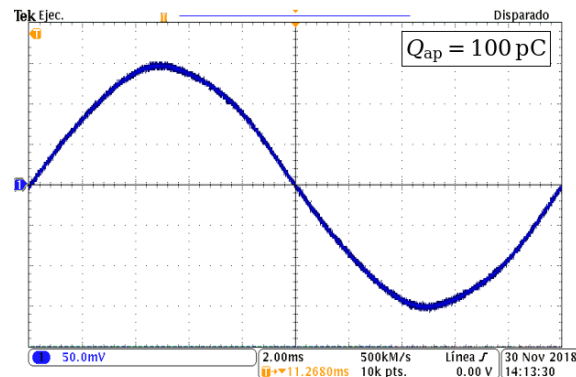
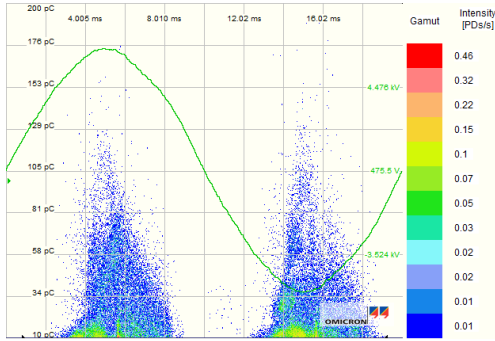


FIGURA 4.25: Medición de DP en probeta aislador (Tem – Z.HFCT – F.HV).

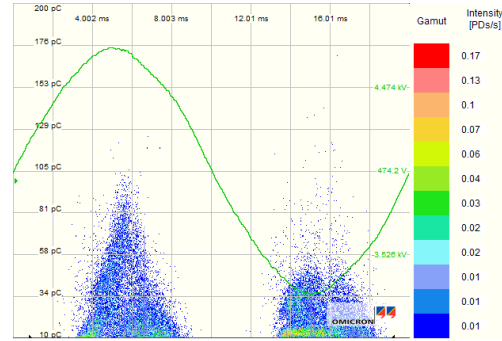
4.3.6. Aislador (Omicron – Z.Omicron)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Omicron, impedancia de medida cuadrupolo Omicron y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

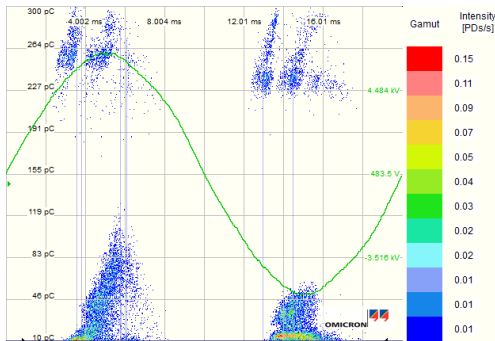
La Fig. 4.26 muestra los diagramas de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP aparecen en ambos semiciclos en torno a los 90° y 270° , produciéndose en el semiciclo positivo los pulsos de mayor magnitud. Se observa que las descargas tienen una gran repetitividad.



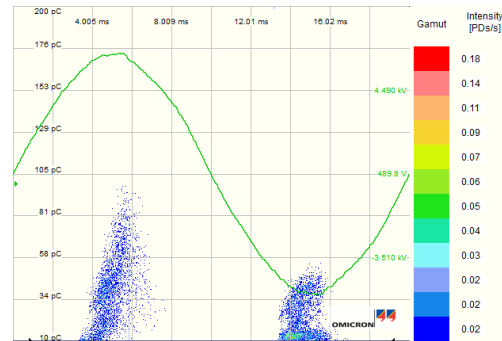
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 67,48 \text{ pC}$



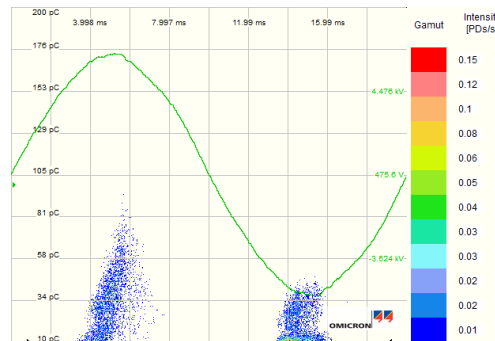
(b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 59,51 \text{ pC}$



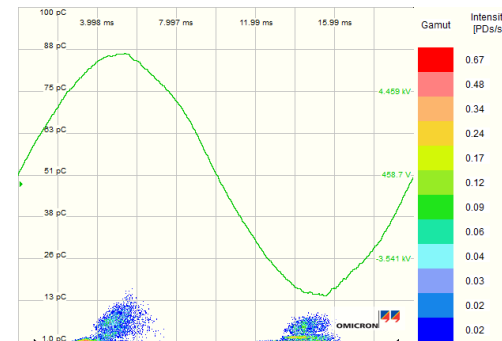
(c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 89,82 \text{ pC}$



(d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 53,03 \text{ pC}$



(e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 44,16 \text{ pC}$



(f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 7,96 \text{ pC}$

FIGURA 4.26: Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

El diagrama de fase resuelta es el típico que se genera cuando ocurren DP de tipo superficial. Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.5. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $600 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 5 MHz .

TABLA 4.5: Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	67,48
350	200	500	59,51
600	450	750	89,82
1000	850	1150	53,03
2000	1850	2150	44,16
5000	4850	5150	7,96

4.3.7. Aislador (Omicron – Z.HFCT)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta aislador, con equipo Omicron, impedancia de medida HFCT y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.27 muestra los diagramas de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP se presentan tanto en el semiciclo negativo como el semiciclo positivo, en torno a los 90° y 270° . Los pulsos tienen de alta repetitividad.

El diagrama de fase resuelta es el típico que se genera cuando ocurren DP de tipo superficial.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.6. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $350 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 5 MHz .

TABLA 4.6: Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	174,60
350	200	500	217,90
600	450	750	64,89
1000	850	1150	29,07
2000	1850	2150	27,08
5000	4850	5150	8,68

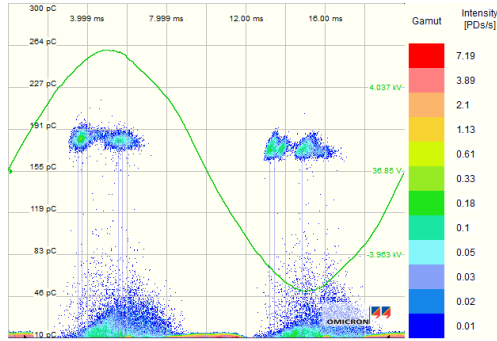
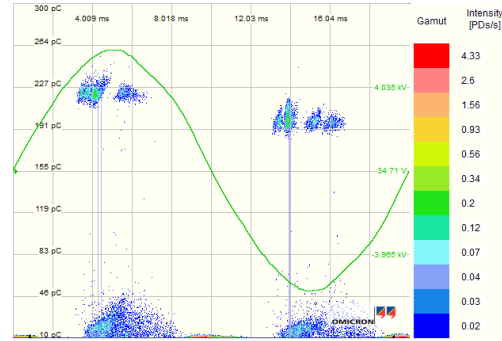
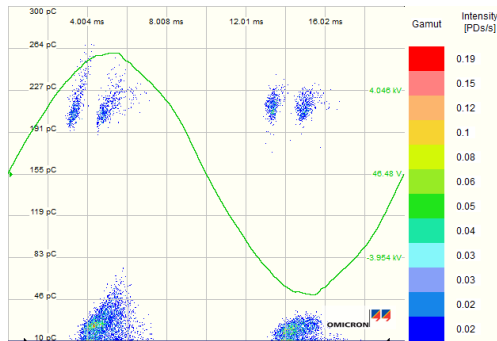
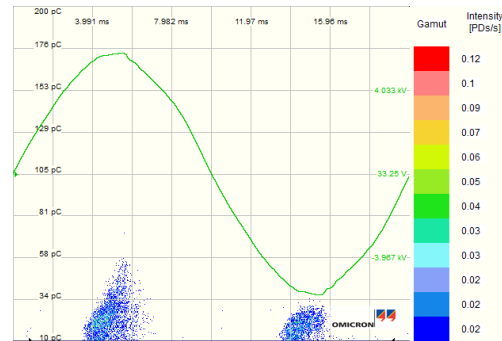
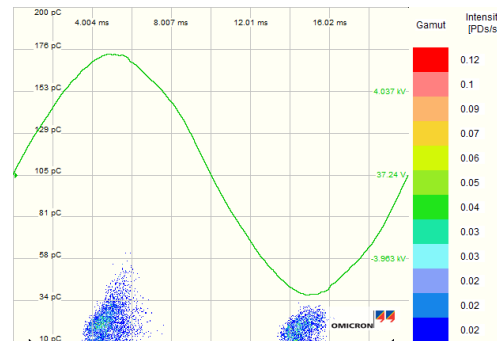
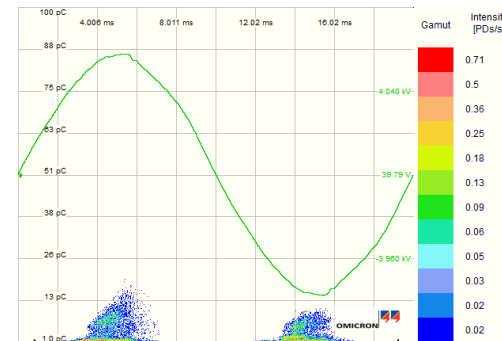
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 174,60 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 217,90 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 64,89 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 29,07 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 27,08 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 8,68 \text{ pC}$

FIGURA 4.27: Medición de DP en probeta aislador (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.3.8. Análisis

4.3.8.1. Omicron – Z.Omicron

De la medición de descargas parciales en probeta aislador, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el cuadripolo Omicron, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.28, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en torno a los kHz. Se infiere que la impedancia de medida actúa como un filtro pasa banda que tiene una respuesta baja en frecuencia.

La señal de DP se debe integrar en rangos de frecuencia en torno a los kHz para tener una mayor sensibilidad de medida.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza el filtro con frecuencia central de 600 kHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central de 5 MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

4.3.8.2. Omicron – Z.HFCT

De la medición de descargas parciales en probeta aislador, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el HFCT, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.29, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en torno a los kHz. Se infiere que el HFCT actúa como un filtro pasa banda con respuesta en bajas frecuencias.

La señal de DP se debe integrar en rangos de baja frecuencia (kHz) para tener una mayor sensibilidad de medida.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza la frecuencia de integración en torno a los 350 kHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central sobre los MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

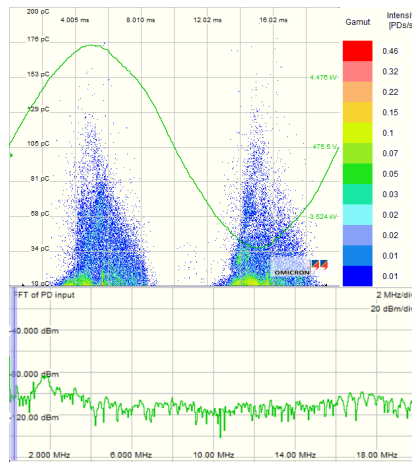
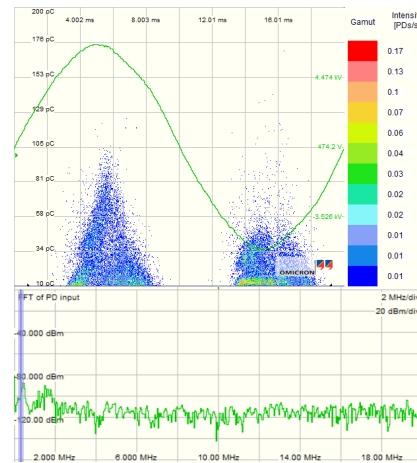
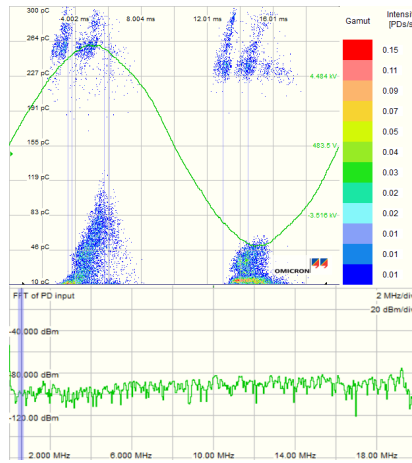
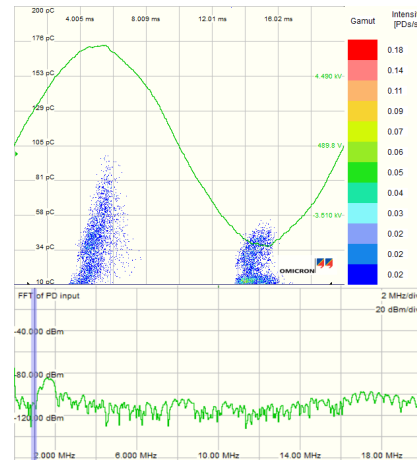
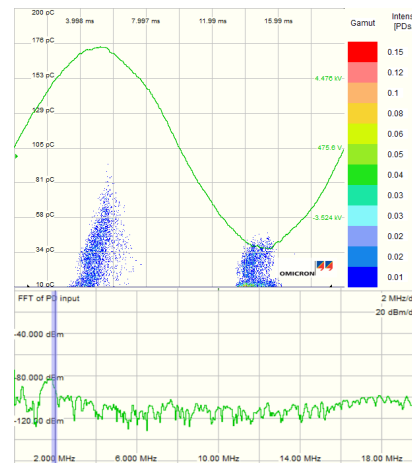
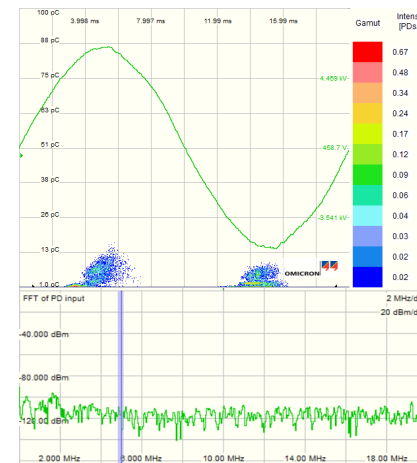
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 67,48 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 59,51 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 89,82 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 53,03 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 44,16 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 7,96 \text{ pC}$

FIGURA 4.28: FFT de probeta aislador (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

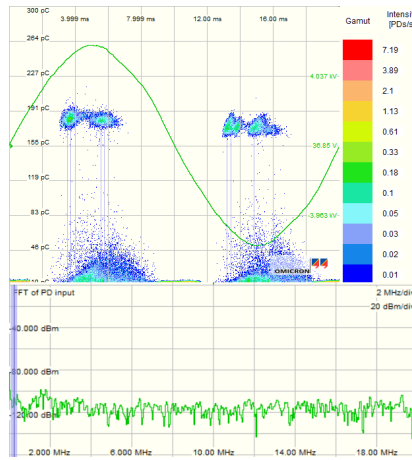
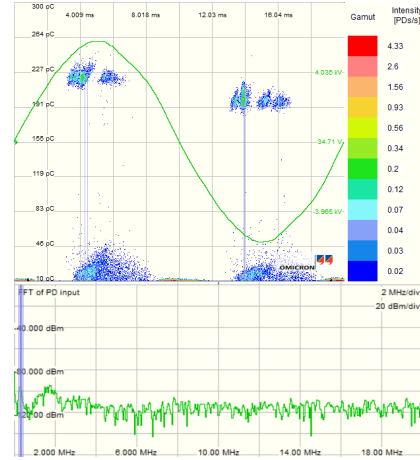
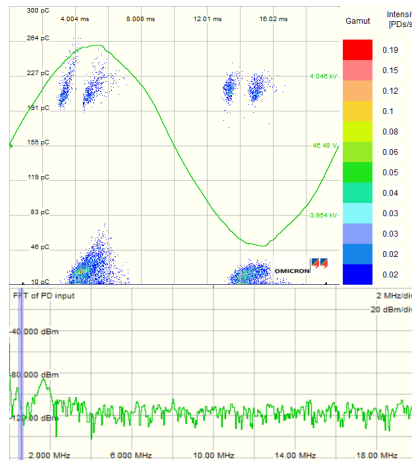
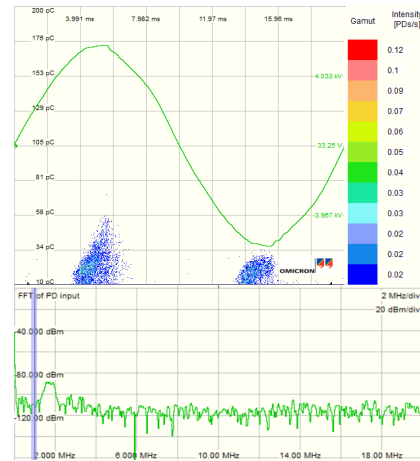
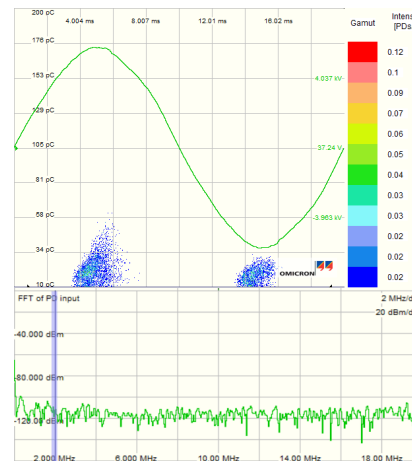
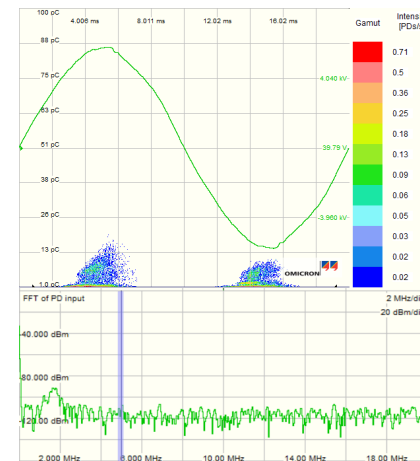
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 174,60 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 217,90 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 64,89 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 29,07 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 27,08 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 8,68 \text{ pC}$

FIGURA 4.29: FFT de probeta aislador (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.3.9. Comparativa de los sistemas de medición

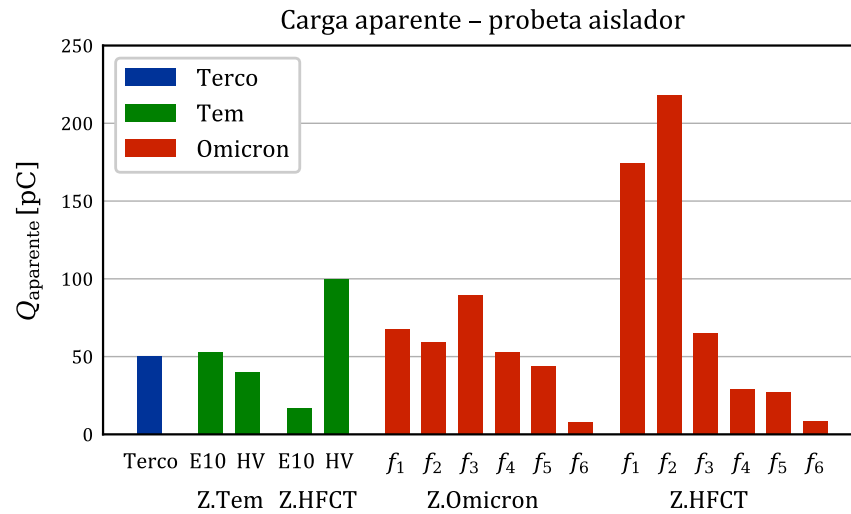


FIGURA 4.30: Valor medido de carga aparente en probeta aislador.

En el gráfico de la Fig. 4.30 se puede observar el valor medido de la carga aparente para todas las mediciones de DP realizadas en la probeta aislador.

Se busca la configuración más óptima del equipo de medida frente a la ocurrencia de descargas parciales de tipo superficiales.

En las mediciones del equipo Tem, se puede ver que la mejor configuración es cuando se tiene el HFCT como impedancia de medida junto al filtro HV, ya que se obtiene un mayor valor de amplitud de DP. Si solo se cuenta con el cuadripolo Tem como impedancia de medida, el filtro que se debe utilizar es el filtro E10, con el cual se obtiene un mayor valor de carga aparente.

Para el equipo Omicron, se observa que la mejor configuración se produce al utilizar el HFCT como impedancia de medida, junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 350 kHz. Si solo se cuenta con la impedancia de medida Omicron, la frecuencia de integración más adecuada sería la que tiene como frecuencia central 600 kHz. Las frecuencias de integración sobre los 5 MHz filtran gran parte de las DP producidas, perdiendo considerablemente la sensibilidad de medición.

Con esto se puede indicar que cuando se producen descargas parciales del tipo superficiales, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 350 kHz.

Si no se cuenta con un equipo digital de última generación, una buena alternativa para este tipo de descargas parciales es el equipo Tem, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto al filtro HV.

4.4. Probeta bobina

Para el último conjunto de ensayos en el laboratorio, se generaron descargas parciales a través de una probeta bobina de estátor de un motor de alta tensión (Fig. 3.10).

Para el sistema de medida de descargas parciales, se implementaron las configuraciones definidas en la Tabla 3.2. En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos para los ensayos con cada una de las configuraciones.

4.4.1. Bobina (Terco – Z.Terco – F.Terco)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Terco, impedancia de medida cuadripolo Terco y filtro Terco.

La Fig. 4.31 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP aparecen en ambos semiciclos entre 60° – 90° y 240° – 270° . Las amplitudes de los pulsos en el semiciclo positivo son levemente menores que en el ciclo negativo. Pulsos simétricos y baja repetitividad.

El valor de carga aparente que entrega esta medición es de 125 pC.

Con el diagrama de fase resuelta obtenido, se puede concluir que la probeta bobina posee dos fuentes de DP: internas y superficiales.

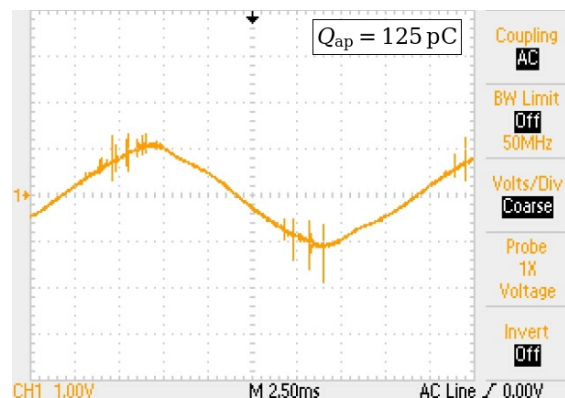


FIGURA 4.31: Medición de DP en probeta bobina (Terco – Z.Terco – F.Terco).

4.4.2. Bobina (Tem – Z.Tem – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro E10.

La Fig. 4.32 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP aparecen en ambos semiciclos antes de llegar al máximo de amplitud de tensión. Los pulsos tienen una mayor repetitividad en el semiciclo negativo, y son de elevada magnitud.

El valor de carga aparente que nos arroja el equipo de detección es de 200 pC.

Con el diagrama de fase resuelta obtenido, se puede concluir que la probeta bobina posee dos fuentes de DP: internas y superficiales.

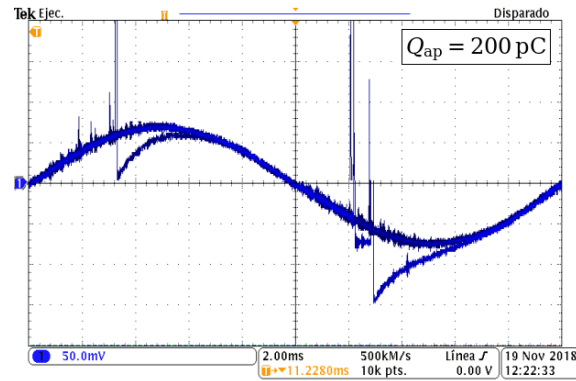


FIGURA 4.32: Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.Tem – F.E10).

4.4.3. Bobina (Tem – Z.Tem – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Tem, impedancia de medida cuadripolo Tem y filtro HV.

La Fig. 4.33 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP aparecen en el semiciclo negativo en torno a los 240° , de baja magnitud y casi sin repetición de pulsos.

El valor de carga aparente que nos entregue el equipo es de 97 pC.

Con el diagrama de fase resuelta obtenido, no se puede inferir la fuente de descarga parcial que afecta a la bobina.

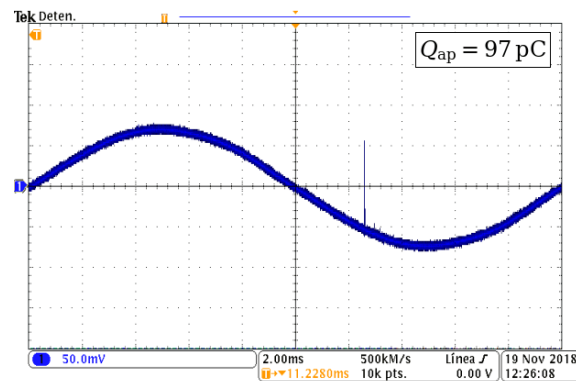


FIGURA 4.33: Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.Tem – F.HV).

4.4.4. Bobina (Tem – Z.HFCT – F.E10)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro E10.

La Fig. 4.34 muestra el diagrama de fase resuelta entregado por el equipo. Las DP aparecen en el semiciclo negativo, en torno a los 240° .

El equipo de medida arroja un valor de carga aparente de 171 pC.

Con el diagrama de fase resuelta obtenido, no se puede inferir la fuente de descarga parcial que afecta a la bobina.

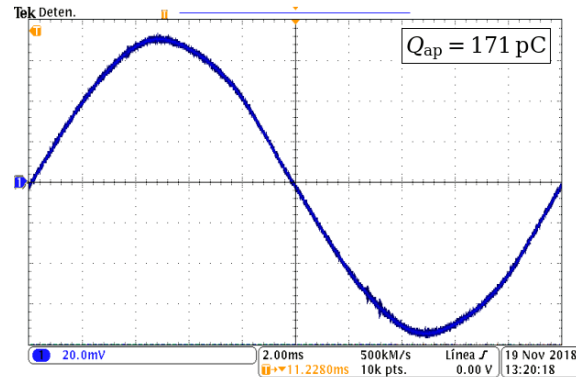


FIGURA 4.34: Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.HFCT – F.E10).

4.4.5. Bobina (Tem – Z.HFCT – F.HV)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Tem, impedancia de medida HFCT y filtro HV.

Como se observa en la Fig. 4.35, el equipo no logra detectar la fase donde ocurren las DP. Sin embargo, el equipo de medida entrega un valor de carga aparente de 111 pC.

No se obtiene un diagrama de fase resuelta, por lo que no se puede inferir el origen de las DP que afectan a la bobina.

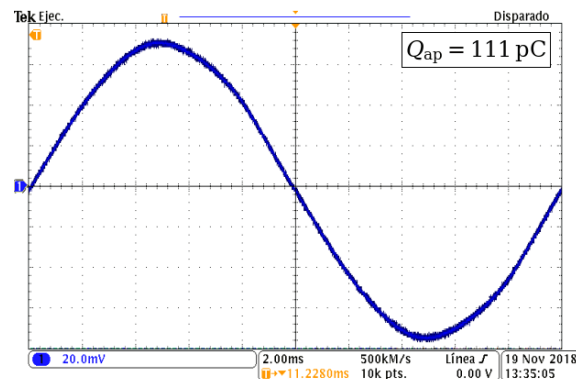
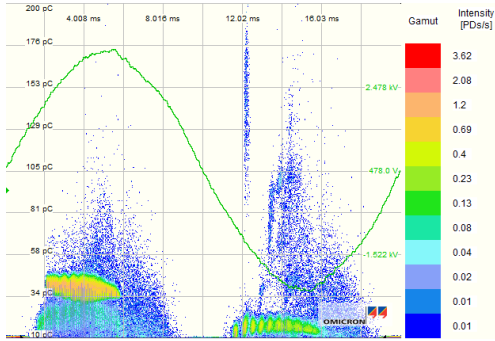


FIGURA 4.35: Medición de DP en probeta bobina (Tem – Z.HFCT – F.HV).

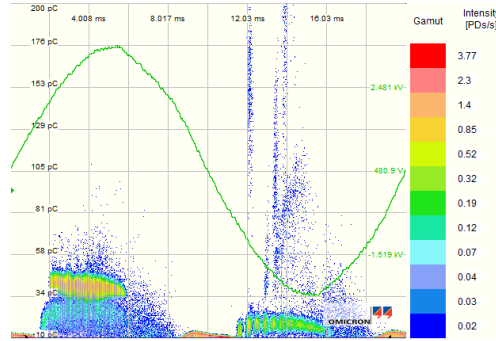
4.4.6. Bobina (Omicron – Z.Omicron)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Omicron, impedancia de medida cuadripolo Omicron y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

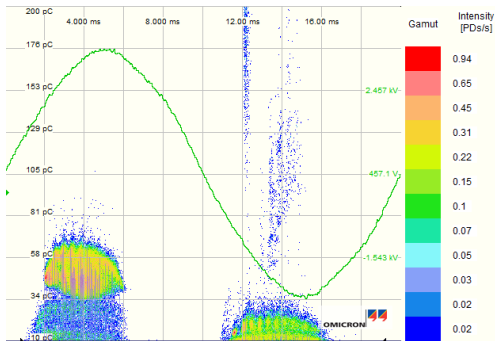
La Fig. 4.36 muestra los diagramas de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP parciales aparecen en ambos semiciclos antes de llegar a la máxima amplitud de tensión, produciéndose en el semiciclo negativo los pulsos de mayor magnitud. Se observa que las descargas tienen una gran repetitividad.



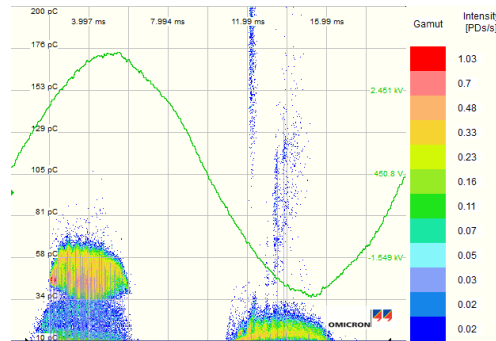
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 112,00 \text{ pC}$



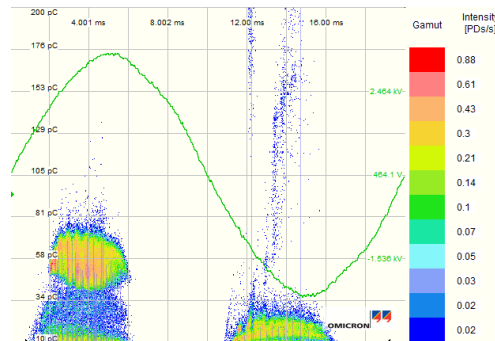
(b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 138,00 \text{ pC}$



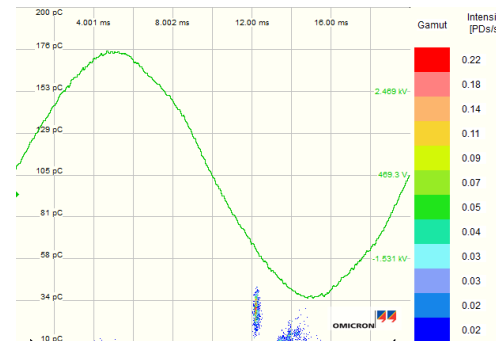
(c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 166,70 \text{ pC}$



(d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 162,80 \text{ pC}$



(e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 242,10 \text{ pC}$



(f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 26,13 \text{ pC}$

FIGURA 4.36: Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

Con los diagramas de fase resuelta obtenidos, se puede concluir que las fuentes de DP que afectan la bobina son del tipo internas, superficiales y corona.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.7. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $2\text{ MHz} \pm 150\text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 5 MHz .

TABLA 4.7: Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	112,00
350	200	500	138,00
600	450	750	166,70
1000	850	1150	162,80
2000	1850	2150	242,10
5000	4850	5150	26,13

4.4.7. Bobina (Omicron – Z.HFCT)

A continuación se muestran los resultados del ensayo de medición de DP en probeta bobina, con equipo Omicron, impedancia de medida HFCT y las 6 frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

La Fig. 4.37 muestra los diagramas de fase resuelta entregados por este ensayo para cada frecuencia elegida. Las DP se presentan tanto en el semiciclo negativo como el semiciclo positivo. En ambos semiciclos los pulsos se manifiestan antes de llegar al pico de la tensión. La magnitud de las descargas es evidentemente mayor en el semiciclo negativo. Durante el semiciclo positivo los pulsos tienen una mayor repetitividad, pero alcanzan un menor valor de amplitud máxima de carga.

Con los diagramas de fase resuelta obtenidos, se puede concluir que las fuentes de DP que afectan la bobina son del tipo internas, superficiales.

Los valores de carga aparente adquiridos en el ensayo se muestran en la Tabla 4.8. Se observa que el mayor valor de carga aparente se obtiene en torno al rango de frecuencia de integración de los $2\text{ MHz} \pm 150\text{ kHz}$, y el menor valor de carga se obtiene en torno a los 5 MHz .

TABLA 4.8: Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

f_c [kHz]	f_{inf} [kHz]	f_{sup} [kHz]	Q_{aparente} [pC]
250	100	400	126,60
350	200	500	133,30
600	450	750	141,40
1000	850	1150	161,90
2000	1850	2150	211,40
5000	4850	5150	30,67

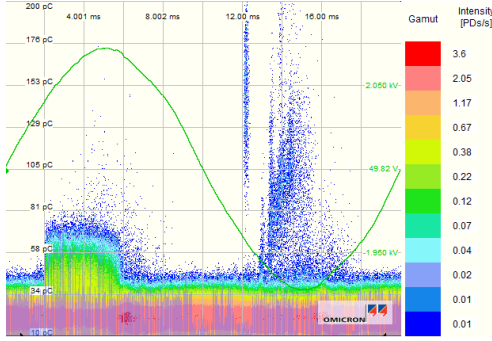
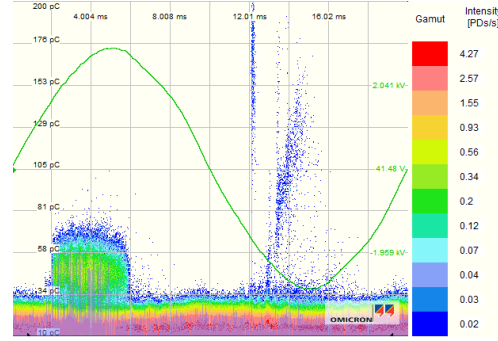
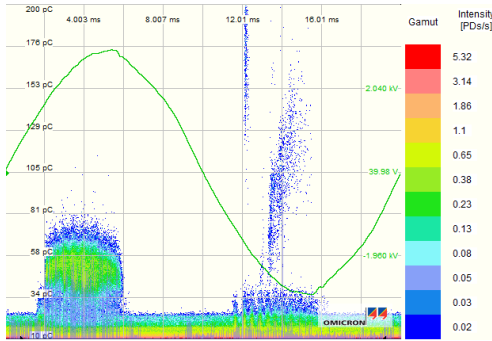
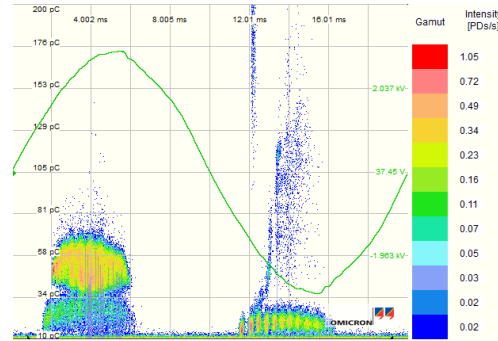
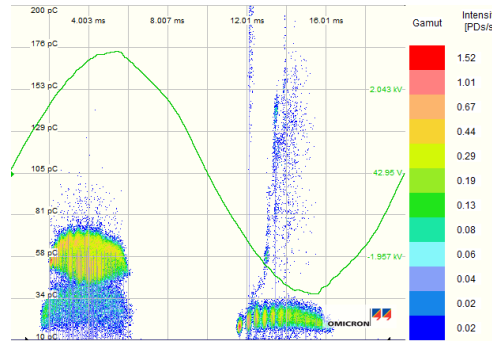
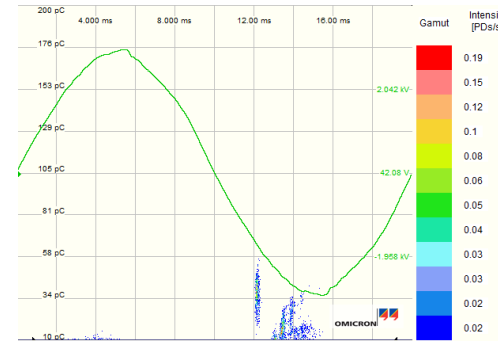
(a) $f_c = 250 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 126,60 \text{ pC}$ (b) $f_c = 350 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 133,30 \text{ pC}$ (c) $f_c = 600 \text{ kHz}$, $Q_{ap} = 141,40 \text{ pC}$ (d) $f_c = 1 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 161,90 \text{ pC}$ (e) $f_c = 2 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 211,40 \text{ pC}$ (f) $f_c = 5 \text{ MHz}$, $Q_{ap} = 30,67 \text{ pC}$

FIGURA 4.37: Medición de DP en probeta bobina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.4.8. Análisis

4.4.8.1. Omicron – Z.Omicron

De la medición de descargas parciales en probeta bobina, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el cuadripolo Omicron, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.38, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en torno a los 600 kHz. Se infiere que la impedancia de medida actúa como un filtro pasa banda que tiene una respuesta baja en frecuencia, entre los 600 kHz y 1 MHz.

Se tiene una mayor sensibilidad cuando se trabaja con frecuencias de integración en un rango menor a 2 MHz.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza el filtro con frecuencia central de 2 MHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central de 5 MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

4.4.8.2. Omicron – Z.HFCT

De la medición de descargas parciales en probeta bobina, a través del equipo Omicron utilizando como impedancia de medida el HFCT, se obtiene el contenido de frecuencia de las DP mostrado en la Fig. 4.39, para las distintas frecuencias de integración definidas en la Tabla 3.1.

El contenido de frecuencias de la señal de DP, según se ve en los *FFT*, está en el torno a los 2 MHz. Se infiere que el HFCT actúa como un filtro pasa banda con respuesta en frecuencia en el orden de los 2 MHz.

Se tiene una mayor sensibilidad cuando se trabaja con frecuencias de integración en un rango en torno a los 2 MHz.

En el ensayo se obtiene un mayor valor de carga aparente cuando se utiliza la frecuencia de integración en los 2 MHz, y disminuye sobre los 2 MHz.

Al ocupar un filtro con frecuencia central de 5 MHz se observa que su ancho de banda no está contenido dentro del espectro de frecuencia de la DP. La DP es filtrada, produciendo una pérdida de sensibilidad y una disminución de la carga aparente medida.

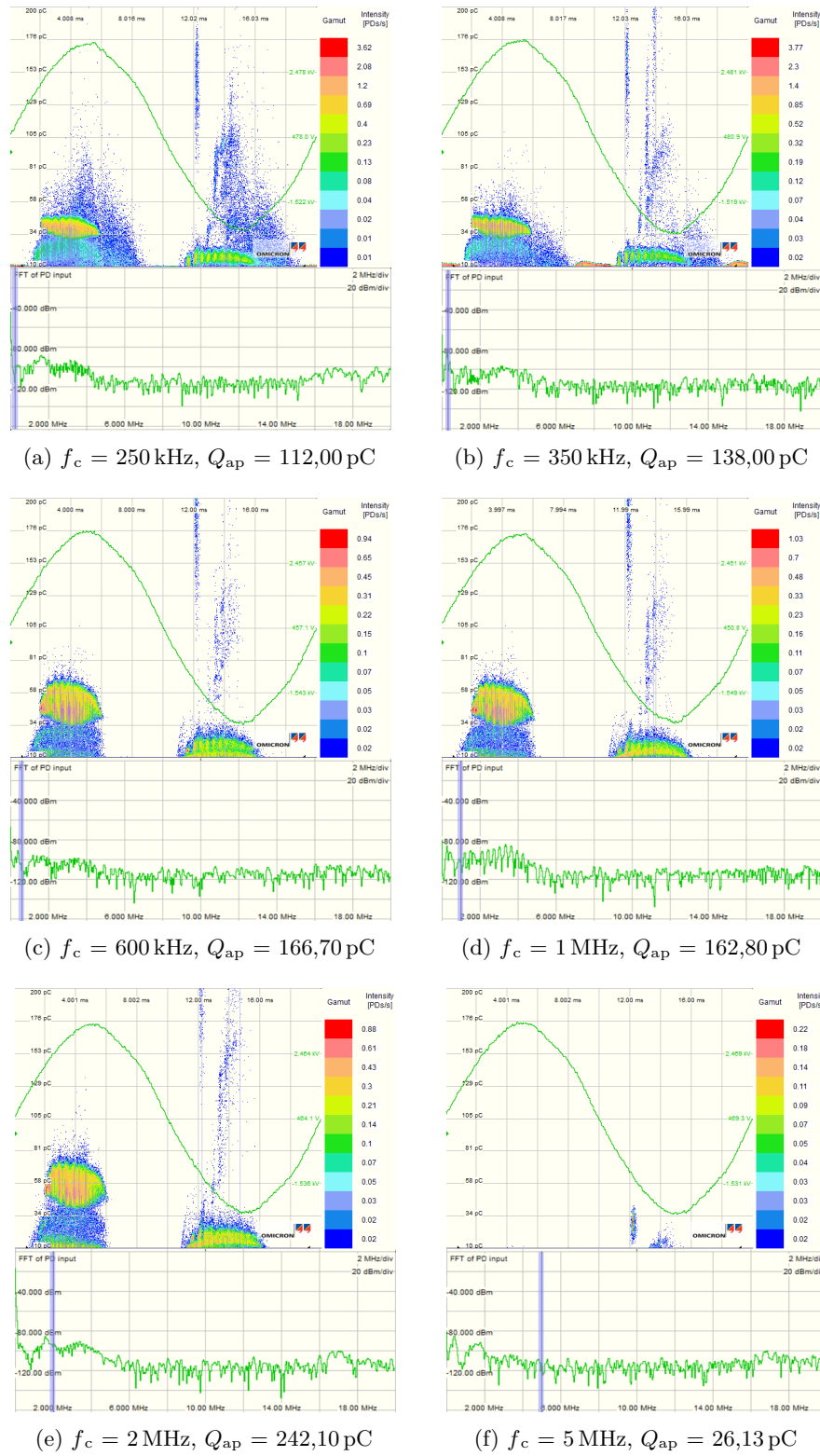


FIGURA 4.38: FFT de probeta bobina (Omicron – Z.Omicron – variando frecuencia de integración).

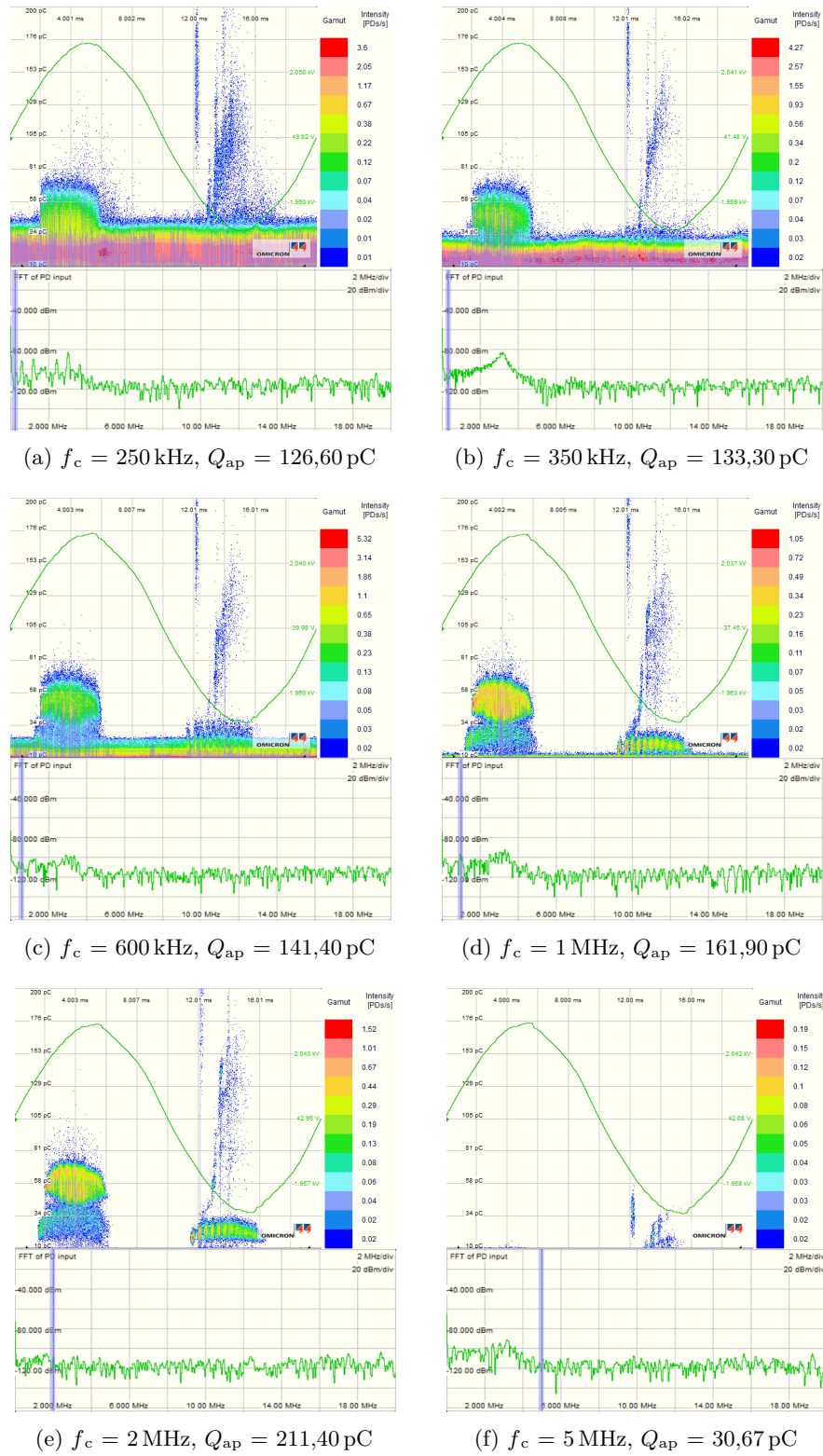


FIGURA 4.39: FFT de probeta bobina (Omicron – Z.HFCT – variando frecuencia de integración).

4.4.9. Comparativa de los sistemas de medición

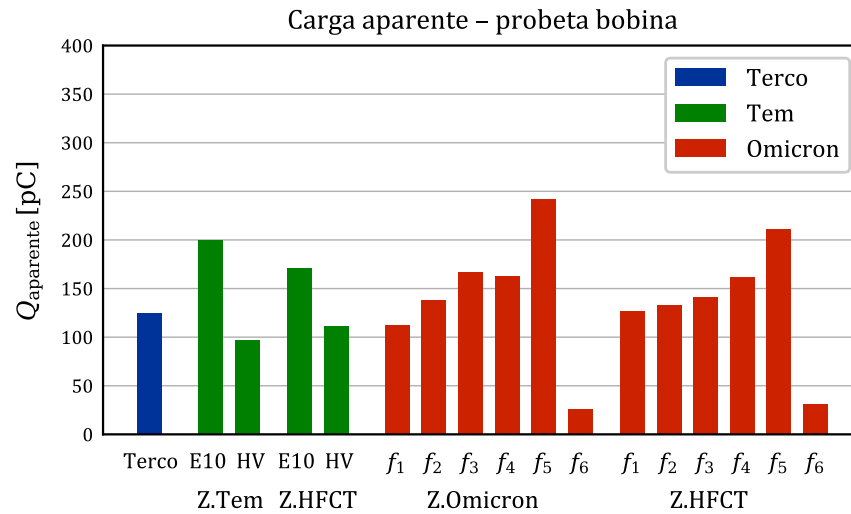


FIGURA 4.40: Valor medido de carga aparente en probeta bobina.

En el gráfico de la Fig. 4.40 se puede observar el valor medido de la carga aparente para todas las mediciones de DP realizadas en la probeta bobina.

Se busca la configuración más óptima del equipo de medida, frente a la ocurrencia de más de una fuente de descargas parciales.

En las mediciones del equipo Tem, se puede ver que la mejor configuración es cuando se tiene al cuadripolo Tem como impedancia de medida junto al filtro E10, ya que se obtiene un mayor valor de amplitud de DP. Si solo se cuenta con un HFCT como impedancia de medida, el filtro más adecuado también sería el filtro E10. En ambas impedancias de medida el sistema filtra las DP al utilizar el filtro HV, provocando una pérdida de sensibilidad en la medición.

Para el equipo Omicron, se observa que la mejor configuración se produce al utilizar el cuadripolo Omicron como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 2 MHz. Si solo se cuenta con el HFCT como impedancia de medida, la frecuencia de integración más adecuada también sería con frecuencia central 2 MHz. Independiente de la impedancia de medida, las frecuencias de integración sobre los 5 MHz filtran las DP y el equipo pierde toda sensibilidad.

Con esto se puede indicar que cuando se producen descargas parciales con más de una fuente, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el cuadripolo Omicron como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 2 MHz.

Si no se cuenta con un equipo digital de última generación, una buena alternativa para este tipo de descargas parciales es el equipo Tem, utilizando la impedancia de medida Tem junto al filtro E10.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

Las descargas parciales generan pulsos de corriente con un espectro de frecuencia que depende de factores como la fuente de las descargas parciales, el circuito de medida, los filtros pasa-banda y el ancho de banda del equipo de detección.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los sistemas de medición de descargas parciales, se realizaron diferentes ensayos de detección de descargas parciales, de los cuales se concluye:

- Cuando la fuente de DP es de tipo corona, generada en laboratorio a través de probeta punta-placa, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital de última generación Omicron, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 2 MHz.
- Cuando la fuente de DP es de tipo internas, generada en el laboratorio a través de probeta de vacuola en resina, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el cuadripolo Omicron como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 250 kHz.
- Cuando la fuente de DP es de tipo superficiales, generada en laboratorio a través de probeta aislador, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 350 kHz.
- Cuando se producen DP con más de una fuente, generada en laboratorio a través de probeta bobina de estátor, el sistema de medición más sensible es el del equipo digital Omicron, utilizando el cuadripolo Omicron como impedancia de medida junto a una frecuencia de integración con frecuencia central de 2 MHz.

En todos los casos ensayados, independiente de la fuente de descargas parciales, el equipo de medida más efectivo es el Omicron, dado que su sistema de medida tiene un ancho de banda que está contenido dentro del espectro de frecuencia de la descarga parcial, a diferencia de los sistemas de medida de los equipos Terco y Tem, que filtran gran parte de la señal de descarga parcial provocando una pérdida considerable de la sensibilidad de medida.

Cuando no se cuenta con el equipo Omicron, conviene implementar:

- Cuando la fuente de DP es de tipo corona: el equipo Tem, utilizando el cuadripolo Tem como impedancia de medida junto al filtro HV.
- Cuando la fuente de DP es del tipo internas: los equipos Terco y Tem son una buena alternativa para este tipo de descargas parciales, siempre y cuando la configuración del equipo Tem sea con el cuadripolo Tem junto al filtro HV.
- Cuando la fuente de DP es de tipo superficiales: el equipo Tem, utilizando el HFCT como impedancia de medida junto al filtro HV.
- Cuando se producen DP con más de una fuente: el equipo Tem, utilizando la impedancia de medida Tem junto al filtro E10.

Se recomienda que los estudios posteriores de DP en el Laboratorio solo sean efectuados con el equipo de medida Omicron, ya que con él se puede realizar un análisis más completo de las señales de descargas parciales. Tiene la ventaja de tener libertad a la hora de escoger una frecuencia de integración, en comparación a los otros equipos donde la forma de ajustar la frecuencia de integración es limitada. Otro motivo importante es que el equipo Omicron entrega la respuesta en frecuencia de la señal de DP directamente a través de su software, para su posterior análisis.

5.2. Trabajo futuro

Para complementar el trabajo realizado en esta memoria de título, se recomienda a futuro realizar nuevos ensayos de detección y medición de descargas parciales dentro del Laboratorio de Alta Tensión, empleando otras probetas de ensayo. De esta forma, se podrá crear una guía estandarizada a seguir sobre qué equipos de medición conviene utilizar con respecto a las distintas fuentes de descarga parciales.

También se sugiere realizar nuevamente las mediciones que se efectuaron con el equipo de medida Omicron, pero variando la frecuencia de integración y su ancho de banda, ya que en este trabajo se consideró un ancho de banda fijo. Esas nuevas mediciones permitirán comprobar los resultados obtenidos en este trabajo, y el efecto que tienen en ellas las nuevas frecuencias de integración.

Bibliografía

- [1] International Electrotechnical Committee, «High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements», IEC 60270, 2000.
- [2] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. Butterworths, 1989.
- [3] J. L. Dinamarca, «Técnicas de alta tensión», Universidad Técnica Federico Santa María, 2007.
- [4] C. Boya, «Identificación y localización de múltiples fuentes de descarga parcial usando análisis de componentes independientes», Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [5] J. Vanegas, «Desarrollo de un sistema prototipo de medición y análisis de descargas parciales generadas en laboratorio», Universidad del Valle, 2016.
- [6] H. Illias, «Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material», Tesis doctoral, University of Southampton, 2011.
- [7] International Electrotechnical Committee, «Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines», IEC 60034-27-1, 2006.
- [8] Working Group D1.33, «Guide For Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270», CIGRE, Technical Brochure 366, 2017.
- [9] J. Ardila, «Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia», Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [10] N. Morales, «Fenómeno corona en líneas aéreas», Universidad de Chile, 2006.
- [11] A. Mor, «Nueva metodología de la medida de descargas parciales en cables de alta tensión», Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [12] W. Hauschild y E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Springer, 2014.
- [13] L. W. van Veen, «Comparison of measurement methods for partial discharge measurement in power cables», Delft University of Technology, 2014.
- [14] K. Schon, *High Voltage Measurement Techniques*. Springer, 2019.
- [15] R. Albarracín, «Medida de descargas parciales en radiofrecuencia», Universidad Carlos III de Madrid, 2014.

-
- [16] E. Kuffel, W. S. Zaengl, y J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Newness, 2000.
 - [17] *HV 9000 High Voltage Modular Training Set*. Terco.
 - [18] *MPD 600 Mediciones y análisis avanzados de descargas parciales*. Omicron.
 - [19] *CC15 installation manual*. PDTech.

Apéndice A

Tablas de calibración

TABLA A.1: Calibración equipo de medida Terco

Probeta	Impedancia de medida	Filtro	Q_0 [pC]	Escala	Factor
punta placa	cuadripolo Terco	filtro Terco	10	25	1,327
			10	50	2,869
			100	250	0,985
			100	500	2,453
			1000	5000	2,562
			10 000	50 000	3,842
vacuola	cuadripolo Terco	filtro Terco	10	25	5,365
			10	50	12,034
			100	250	1,043
			100	500	2,554
			1000	5000	2,762
aislador	cuadripolo Terco	filtro Terco	10	25	1,332
			10	50	2,766
			10	250	1,200
			100	500	2,794
			1000	500	2,905
bobina	cuadripolo Terco	filtro Terco	10	25	1,688
			10	50	3,978
			100	250	1,617
			100	500	4,059

TABLA A.2: Calibración equipo de medida Tem

Probeta	Impedancia de medida	Filtro	Q_0 [pC]	Escala	V_0 [mV]	K_{Tem} [$\frac{\text{pC}}{\text{mV}}$]
punta placa	cuadripolo Tem	filtro E10	100	5000	600,0	0,17
	cuadripolo Tem	filtro HV	1000	5000	4400,0	0,23
	HFCT	filtro E10	100	200	115,0	0,87
	HFCT	filtro HV	100	5	2,7	37,04
vacuola	cuadripolo Tem	filtro E10	10	200	45,0	0,22
	cuadripolo Tem	filtro HV	100	500	700,0	0,14
	HFCT	filtro E10	10	20	10,0	1,00
	HFCT	filtro HV	10	5	0,8	12,50
aislador	cuadripolo Tem	filtro E10	10	500	90,0	0,11
	cuadripolo Tem	filtro HV	10	5	1,1	9,09
	HFCT	filtro E10	10	5	2,6	3,85
	HFCT	filtro HV	10	50	30,0	0,33
bobina	cuadripolo Tem	filtro E10	100	5000	500,0	0,20
	cuadripolo Tem	filtro HV	100	5	3,9	25,64
	HFCT	filtro E10	100	200	35,0	2,86
	HFCT	filtro HV	1000	5	1,8	555,56

Apéndice B

Tablas de mediciones

TABLA B.1: Total de configuraciones del sistema de medición de DP.

Nº de sección	Probeta	Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro
4.1.1	punta placa	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco
4.1.2	punta placa	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10
4.1.3	punta placa	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV
4.1.4	punta placa	Tem	HFCT	filtro E10
4.1.5	punta placa	Tem	HFCT	filtro HV
4.1.5	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6
4.1.6	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6

TABLA B.1: Total de configuraciones (continuación)

Nº de sección	Probeta	Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro
4.2.1	vacuola	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco
4.2.2	vacuola	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10
4.2.3	vacuola	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV
4.2.4	vacuola	Tem	HFCT	filtro E10
4.2.5	vacuola	Tem	HFCT	filtro HV
4.2.5	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6
4.2.6	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6
4.3.1	aislador	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco
4.3.2	aislador	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10
4.3.3	aislador	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV
4.3.4	aislador	Tem	HFCT	filtro E10
4.3.5	aislador	Tem	HFCT	filtro HV
4.3.5	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6
4.3.6	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6

TABLA B.1: Total de configuraciones (continuación)

Nº de sección	Probeta	Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro
4.4.1	bobina	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco
4.4.2	bobina	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10
4.4.3	bobina	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV
4.4.4	bobina	Tem	HFCT	filtro E10
4.4.5	bobina	Tem	HFCT	filtro HV
4.4.5	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6
4.4.6	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6

TABLA B.2: Valores de carga aparente resultados de las mediciones de DP.

Nº de sección	Probeta	Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro	Q_{aparente} [pC]
4.1.1	punta placa	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco	161
4.1.2	punta placa	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10	150
4.1.3	punta placa	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV	227
4.1.4	punta placa	Tem	HFCT	filtro E10	139
4.1.5	punta placa	Tem	HFCT	filtro HV	140
4.1.5	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1	223,30
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2	140,20
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3	193,50
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4	257,20
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5	179,70
4.1.6	punta placa	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6	88,45
4.1.6	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1	149,20
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2	213,20
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3	416,60
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4	487,10
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5	701,00
4.1.7	punta placa	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6	684,70
4.2.1	vacuola	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco	129
4.2.2	vacuola	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10	20
4.2.3	vacuola	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV	143
4.2.4	vacuola	Tem	HFCT	filtro E10	18
4.2.5	vacuola	Tem	HFCT	filtro HV	50
4.2.5	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1	156,90
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2	62,59
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3	39,45
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4	9,70
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5	4,20
4.2.6	vacuola	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6	0,98
4.2.6	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1	98,17
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2	73,91
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3	37,85
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4	11,91
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5	3,23
4.2.7	vacuola	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6	0,34

TABLA B.2: Valores de carga aparente (continuación)

Nº de sección	Probeta	Equipo de detección de DP	Impedancia de medida	Filtro	Q_{aparente} [pC]
4.3.1	aislador	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco	50
4.3.2	aislador	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10	53
4.3.3	aislador	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV	40
4.3.4	aislador	Tem	HFCT	filtro E10	17
4.3.5	aislador	Tem	HFCT	filtro HV	100
4.3.5	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1	67,48
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2	59,51
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3	89,82
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4	53,03
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5	44,16
4.3.6	aislador	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6	7,96
4.3.6	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1	174,60
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2	217,90
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3	64,89
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4	29,07
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5	27,08
4.3.7	aislador	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6	8,68
4.4.1	bobina	Terco	cuadripolo Terco	filtro Terco	125
4.4.2	bobina	Tem	cuadripolo Tem	filtro E10	200
4.4.3	bobina	Tem	cuadripolo Tem	filtro HV	97
4.4.4	bobina	Tem	HFCT	filtro E10	171
4.4.5	bobina	Tem	HFCT	filtro HV	111
4.4.5	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_1	112,00
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_2	138,00
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_3	166,70
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_4	162,80
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_5	242,10
4.4.6	bobina	Omicron	cuadripolo Omicron	frecuencia integración f_6	26,13
4.4.6	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_1	126,60
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_2	133,30
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_3	141,40
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_4	161,90
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_5	211,40
4.4.7	bobina	Omicron	HFCT	frecuencia integración f_6	30,67