

Caracterización de descargas parciales de vacuolas en resina epóxica generadas a partir de diferentes tipos de gases

Gabriel Octavio Videla Santibáñez

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores Guía:
Dr. Jorge Ardila (UTFSM)
Dr. Roger Schurch (UTFSM)

Santiago, Agosto 2024.

*“La corriente alterna, especialmente de alta frecuencia, pasa con sorprendente libertad
incluso a través de gases ligeramente enrarecidos..”
— Nikola Tesla*

Agradecimientos

Esta sección debe ser una de las más especiales y complejas de este trabajo, dada la enorme cantidad de gente que me acompañó en este camino universitario. En diferente medida es muy posible que deje a más de algún personaje sin el crédito que se merece y me quiero disculpar de antemano si no te encuentras en esta sección dedicada. Si ese es el caso y estás leyendo estas líneas, quiero agradecerte por estar ahí, por el tiempo que compartimos y por aquellos momentos que nos permitieron crecer en diferentes ámbitos. Para evitar extenderme en demasía, comenzaré por quienes me han acompañado durante toda la vida, desde mi primer suspiro hasta lo que soy hoy en día. Gracias madre por traerme a este mundo y por enseñarme todo lo que me serviría para convertirme en quien soy, es tanto lo que has hecho por mi que es imposible detallar la infinidad de sucesos en este documento finito. Agradezco en igual medida a mi padre, que siempre me ha acompañado en todo momento con sus enseñanzas sobre lo que ha aprendido en la vida y con todos aquellos momentos que me acompañarán hasta el final de los días. Gracias hermana por ser la mejor compañera que he tenido en mi vida, desde el día uno que nos andamos molestando y riendo juntos por todas las travesuras que nos han salido bien y mal, de todas formas quiero que se sepa que las risas siempre son excesivas contigo, y probablemente la persona que más me ha hecho llorar de risa, así que te doy las gracias por ahorrarme la rutina de abdominales porque mientras sigamos compartiendo, seguiremos riendo por el motivo que sea.

Me gustaría agradecer a todos aquellos que me han enseñado a utilizar no solo mi cerebro, sino que también a desarrollar mis habilidades técnicas. Todos, abuelos y tíos, sin excepción me han aportado con una gran cantidad de conocimientos en diferentes áreas, desde gasfitería, herrería, carpintería, electricidad, arte y una larga lista que se podría extender durante varias líneas. Estoy eternamente agradecido con mis abuelas, por hacer que la mayoría de los fines de semana hayan sido días especiales durante muchos años, que en paz descansen. A mis tías que me enseñaron que la cantidad de habilidades que puede tener una persona son increíbles, y una de las cosas más importantes que me han regalado, además de su eterno cariño, son mis primos y primas que hicieron de mi infancia la mejor que podría imaginar y estoy feliz de que hoy en día sigamos siendo una familia unida donde todos, sin excepción, han jugado un rol importante en mi vida.

No menos importantes, quisiera hacer mención especial a mis amigas y amigos que me han acompañado incluso desde toda la vida, gracias por su apoyo incondicional y sus consejos. A pesar de que algunos amigos ya no estén tan presentes en estos momentos, su existencia me dio gran motivación por seguir adelante en muchas ocasiones e hicieron agradables incluso hasta el más difícil de los días. Me gustaría mencionar a mi buen amigo Manjar, que compartimos una infinidad de experiencias y las mejores conversaciones de música y de temas nerds, como dirían algunos. Gracias a mi querida amiga Catalina, que desde que nos

conocimos en la universidad en un partido de tenis de mesa que nos hemos acompañado en todas, desde trabajos, estudios, proyectos e incluso viajes. Gracias también a Scarlett, por tu mirada del mundo tan clara, los caluines, el cariño y por todo el apoyo que me has dado en diversos ámbitos. Gracias a Nacho por todos los buenos momentos, los paseos al sur y a los cerritos que visitamos, les deseo lo mejor a todos y todas.

Quiero agradecer a mi querida y amada Marcela, que al comienzo era una buena compañera que conocí en clases de estadística, hoy en día ya es prácticamente mi familia, probablemente la persona que más apoyo me dio en los últimos años de carrera durante los ramos más duros que he cursado en mi vida, gracias por regalarme tu valioso tiempo, preocuparte por mi y por que las cosas me salgan bien, amor y agradecimiento eterno para ti.

Quisiera agradecer también a los profesores y ayudantes, por dedicar su tiempo y compartir conocimientos que realmente considero muy importantes. En realidad me hubiera gustado retener toda la sabiduría que compartieron.

Por último, quiero dejar constancia y agradecerme a mi mismo por escuchar e incorporar aquellos aprendizajes que han forjado a la persona que en este momento está escribiendo este documento, espero seguir mejorando en todos los aspectos que me guiarán a ser una mejor versión de mi y espero leer esto alguna vez en el futuro y decir con un tono seguro, se logró.

Muchas gracias por leer esta sección y por darse el tiempo de leer este documento, les deseo lo mejor.

Gabriel Videla.

Resumen

En el presente documento, se detalla el método de fabricación de probetas de resina epóxica con vacuolas de dimensiones específicas en su interior, cada una con un contenido gaseoso diferente. El objetivo es caracterizar las descargas parciales (DP) dentro de estas cavidades. Las vacuolas son pequeñas cavidades que se generan por diversas causas al interior de los materiales aislantes creando imperfecciones en él. La composición varía en un espectro de gases donde es posible identificar algunos compuestos repetitivos. Estos defectos, generalmente se producen durante los procesos de fabricación y/o manipulación de los elementos aislantes, también durante su uso se generan compuestos volátiles característicos de los componentes utilizados. Además, al someter el material a alta tensión, el campo eléctrico al interior de estos desperfectos puede alcanzar una magnitud suficiente para provocar descargas parciales y comenzar a degradar progresivamente el aislador. Finalmente, producto de estas descargas al interior de las vacuolas, aumentan las probabilidades de que ocurra una falla que comprometa el material aislante resultando en un daño mayor.

Para identificar los efectos que tienen las descargas parciales al interior del aislador según el gas que contenga, se procede a emular vacuolas con gases específicos en probetas de resina epóxica para luego caracterizar las descargas mediante representación gráfica a través de diagramas PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) y mapas T-F (Tiempo-Frecuencia), herramientas que grafican la distribución de las descargas parciales en función de la fase y la relación entre el tiempo y la frecuencia, respectivamente, junto con análisis estadístico. Se fabricaron seis probetas, dos idénticas por cada mezcla gaseosa. Las primeras fueron de hidrógeno puro, otras dos con una mezcla de aire y metano, y las últimas con una mezcla denominada patrón, que incluye diferentes proporciones de hidrocarburos y otros compuestos presentes en transformadores eléctricos con diversos niveles de fallas.

Los resultados confirman diferencias significativas entre las descargas parciales que ocurren en cada tipo de gas, lo que sugiere la posibilidad de utilizar técnicas avanzadas de reconocimiento basadas en un mayor número de parámetros en futuras investigaciones. Además, la caracterización de las descargas según el gas contenido en las vacuolas podría permitir la estimación de la composición de estas cavidades sin necesidad de realizar análisis invasivos en el material. Este enfoque abre la puerta a una investigación más amplia, que requerirá un gran número de ensayos con un control riguroso de los parámetros para generalizar y validar los resultados. La incorporación de herramientas de análisis avanzadas, como el machine learning, podría ser clave en este proceso. Si se obtienen resultados consistentes, esto podría tener importantes implicaciones en la manufactura de materiales aislantes, permitiendo la adición de aditivos u otros métodos que mitiguen la formación de gases específicos que aceleran la degradación del material cuando se producen descargas parciales. A largo plazo, esto podría complementar el estudio del estado de los equipos eléctricos de potencia, reduciendo los costos asociados a interrupciones del servicio

o al mantenimiento no planificado debido a fallas inesperadas, e incluso extendiendo la vida útil de los componentes, lo que ofrecería un beneficio económico considerable.

Índice de Contenidos

Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VII
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo Principal	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Estructura de la memoria	4
2. Marco teórico	5
2.1. Descargas Parciales	5
2.2. Aislantes	6
2.3. Vacuolas	6
2.4. Gases presentes	7
2.5. Modelando descargas parciales al interior de una vacuola	9
2.6. Procesamiento de las señales detectadas por el sistema de adquisición	12
2.6.1. Phase Resolved Partial Discharge	13
2.6.1.a. Descargas parciales internas	13
2.6.1.b. Descargas parciales superficiales	13
2.6.1.c. Descargas corona	14
2.6.2. Plano Tiempo-Frecuencia	14
2.7. Análisis estadístico	15
2.7.1. Distribuciones estadísticas	15
2.7.2. Parámetros estadísticos	16
3. Fabricación de las probetas	18
3.1. Casos fallidos	20
3.1.1. Prototipo 1	20
3.1.2. Prototipo 2	21
3.2. Caso Exitoso	22
3.2.1. Prototipo 3	22
3.3. Dosificador de precisión y preparación de mezcla gaseosa	24
3.3.1. Preparación de la mezcla gaseosa	25

4.	Parámetros técnicos	26
4.1.	Objeto de ensayo	26
4.1.1.	Propiedades de la resina	26
4.1.2.	Gases utilizados en las probetas	27
4.1.3.	Estimación de la tensión mediante software	28
4.2.	Circuito de detección	29
4.3.	Formato de datos	31
5.	Resultados y discusión	33
5.1.	Obtención de las distribuciones	34
5.2.	Vacuolas con Hidrógeno	35
5.2.1.	Probeta 1	35
5.2.2.	Análisis estadístico	35
5.2.3.	Probeta 2	37
5.2.4.	Comparación entre ambas probetas de hidrógeno	39
5.3.	Vacuolas con Metano	41
5.3.1.	Probeta 1	41
5.3.2.	Análisis estadístico	41
5.3.3.	Probeta 2	43
5.3.4.	Comparación entre ambas probetas de metano	45
5.4.	Vacuolas con gas patrón	47
5.4.1.	Probeta 1	47
5.4.2.	Análisis estadístico	47
5.4.3.	Probeta 2	49
5.4.4.	Comparación entre ambas probetas de gas patrón	51
5.5.	Comparación general de parámetros	53
5.5.1.	Distribución de pulsos PRPD	53
5.5.1.a.	Amplitud Máxima del 95 % de la Distribución de Pulsos	55
5.5.1.b.	Amplitud media de las distribuciones de pulsos	56
5.5.1.c.	Ángulo de fase medio	57
5.5.2.	Curtosis y oblicuidad de las distribuciones	58
5.5.3.	Mapa T-F generalizado	60
5.5.3.a.	Duración y frecuencia equivalente de las señales	61
5.5.3.b.	Relación de pulsos y descargas por segundo	62
6.	Conclusiones	65
	Anexos	74
.1.	Limpieza de ruido y separación de clústeres	74
.2.	Códigos	75
.2.0.a.	Código matlab para simular la distribución de campo eléctrico en la probeta	75
.2.1.	Simulación matlab de descargas parciales internas	77
.2.2.	PRPD	78
.2.2.a.	PRPDs simultáneos	80
.2.2.b.	Parámetros estadísticos por semiciclo	83
.2.2.c.	Gráficos de barras de cada parámetro	87
.2.2.d.	Gráfico de curva normal ajustada al PRPD	88

.2.2.e.	Gráfica de distribuciones normales para resumir PRPDs	91
.2.2.f.	Gráficos TF para cada vacuola y comparación entre dos del mismo gas	93
.2.2.g.	Gráfico de la señal de una descarga individual	96
.2.2.h.	Mapas TF de todas las probetas simultáneas	97
.2.2.i.	Relación de pulsos entre semiciclos y pulsos por segundo	98

Índice de Figuras

2.1.	Modelo abc propuesto por Whitehead.	10
2.2.	Modelo abc considerando un spark gap que modela la descarga al interior de la vacuola.	10
2.3.	Esquema representativo del comportamiento de la tensión al interior de la vacuola, fuente propia .2.1.	11
2.4.	Señal de ejemplo y parámetros en los que se basa el sistema de adquisición, elaboración propia.	12
2.5.	PRPD de DP internas en una vacuola esférica [fuente [43]].	13
2.6.	PRPD característico de descargas parciales superficiales en un conductor aislado sobre un plano aterrizado [fuente [43]].	14
2.7.	PRPD característico de descargas parciales de tipo corona en un metal puntiagudo. [fuente [43]].	14
3.1.	Representación de la vacuola flotando sobre resina, en la primera fase de curado	20
3.2.	Imagen representativa de la vacuola centrada entre ambas interfases de resina	20
3.3.	Esquema que muestra parte del procedimiento para fabricar las vacuolas con el electrodo incorporado en la resina.	21
3.4.	Esquema que muestra el objeto finalizado utilizando este método.	21
3.5.	Modelo 3D del dispositivo giratorio (amarillo), sosteniendo un par de moldes cilíndricos (azules) con las vacuolas en su interior.	23
3.6.	Modelo 3D del dispositivo que se utilizó para cortar los cilindros que contenían la vacuola (azul). La herramienta Dremel se insertaba en el hilo visible en el extremo izquierdo, donde quedaba fija	23
3.7.	Visualización de la posición del cilindro interior conteniendo la vacuola.	24
3.8.	Modelo 3D del dosificador creado en Fusion 360.	25
4.1.	Esquema representativo del objeto de ensayo con la vacuola en su interior.	28
4.2.	Esquema representativo de la distribución de la tensión al interior de la probeta.	28
4.3.	Distribución de tensión en la probeta al aplicar 16300[V].	29
4.4.	Circuito indirecto de medición establecido por la norma IEC 60270.	30
4.5.	Señal almacenada por el sistema de adquisición para el pulso N°6 de la probeta 1 de hidrógeno	31
5.1.	Gráfico PRPD para la probeta 1 de hidrógeno con los límites verticales en verde, que acotan los datos en ambos semiciclos.	34

5.2.	Distribución de pulsos en el semiciclo positivo obtenido a partir del PRPD de la probeta 1 de hidrógeno.	34
5.3.	Patrón PRPD para la probeta 1 de hidrógeno.	36
5.4.	Gráfico T-F para la probeta 1 de hidrógeno.	36
5.5.	Patrón PRPD para la probeta 2 de hidrógeno.	38
5.6.	Gráfico T-F para la probeta 2 de hidrógeno.	38
5.7.	Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 de hidrógeno.	39
5.8.	Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 de hidrógeno.	40
5.9.	Patrón PRPD para la probeta 1 de metano.	42
5.10.	Gráfico T-F para la probeta 1 de metano.	42
5.11.	Patrón PRPD para la probeta 2.	44
5.12.	Gráfico T-F para la probeta 2 de metano.	44
5.13.	Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 de mezcla con metano.	45
5.14.	Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 de mezcla con metano.	46
5.15.	Patrón PRPD para la probeta 1 con gas patrón.	48
5.16.	Gráfico T-F para la probeta 1 con gas patrón.	48
5.17.	Patrón PRPD para la probeta 2 con gas patrón.	50
5.18.	Gráfico T-F para la probeta 2 con gas patrón.	50
5.19.	Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 con gas patrón.	51
5.20.	Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 con gas patrón.	52
5.21.	Curvas de distribuciones en el semiciclo positivo para todas las probetas.	53
5.22.	Curvas de distribuciones en el semiciclo negativo para todas las probetas.	54
5.23.	Gráfico de Q_{max95} para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.	55
5.24.	Gráfico de Q_{max95} para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.	55
5.25.	Gráfico de Q medio para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.	56
5.26.	Gráfico de Q medio para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.	56
5.27.	Gráfico de la fase media para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.	57
5.28.	Gráfico de la fase media para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.	57
5.29.	Gráfico de la curtosis de todas las distribuciones en el semiciclo positivo.	58
5.30.	Gráfico de la curtosis en todas las distribuciones en el semiciclo negativo.	58
5.31.	Gráfico de los valores de oblicuidad para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.	59
5.32.	Gráfico de los valores de oblicuidad para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.	59
5.33.	Gráfico T-F simplificado de todas las probetas.	60
5.34.	Duración media de los pulsos para todas las probetas.	61
5.35.	Frecuencia media de las descargas para todas las probetas.	61
5.36.	Cociente entre el numero de pulsos en S+ entre S-.	62
5.37.	Descargas por segundo al interior de cada vacuola.	62
1.	Plano T-F para la probeta 2 de la vacuola de hidrógeno, resaltando los puntos que se filtrarán.	74
2.	PRPD de la probeta 2 de hidrógeno, resaltando los puntos que serán filtrados.	74
3.	Separación de clúster para la probeta 2 de la vacuola de metano, resaltando los puntos que se indican en el PRPD.	75

4.	PRPD de la probeta 2 de metano, resaltando las clases según la separación en el mapa TF	75
----	---	----

Índice de Tablas

3.1.	Propiedades de la resina y endurecedor	19
4.1.	Propiedades eléctricas de la resina. [47]	27
4.2.	Composición de aire con metano.	27
4.3.	Composición del gas patrón.	27
4.4.	Datos de amplitud, fase, fase_t, frecuencia y tiempo para cada descarga.	32
5.1.	Parámetros estadísticos del PRPD de las descargas para la vacuola 1 de hidrógeno.	35
5.2.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 1 de hidrógeno.	35
5.3.	Parámetros estadísticos del PRPD de las descargas para la vacuola 2 de hidrógeno.	37
5.4.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 2 de hidrógeno.	37
5.5.	Parámetros estadísticos de las descargas para la vacuola 1 de metano.	41
5.6.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 1 de metano.	41
5.7.	Parámetros estadísticos de las descargas para la vacuola 2 de metano.	43
5.8.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 2 de metano.	43
5.9.	Parámetros estadísticos de las descargas para la vacuola 1 con gas patrón.	47
5.10.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 1 con gas patrón.	47
5.11.	Parámetros estadísticos de las descargas para la vacuola 2 con gas patrón.	49
5.12.	Parámetros estadísticos del plano T-F de las descargas para la vacuola 2 con gas patrón.	49

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Contexto

El estudio de los fenómenos de descargas parciales (DP) ha evolucionado a lo largo del tiempo, con la participación e interés de diversas organizaciones y sectores. Estas incluyen laboratorios independientes que realizan investigaciones y pruebas, universidades que contribuyen con estudios académicos, el sector militar interesado en la seguridad y confiabilidad de los equipos, empresas de servicios eléctricos que buscan mantener la calidad de la energía suministrada, fabricantes de productos eléctricos enfocados en la mejora de sus diseños, entre otros actores [1][2]. Estos participantes trabajan de manera independiente acorde a las necesidades de cada sector. Algunos se centran en desarrollar nuevos métodos de detección y localización de descargas parciales, mientras que otros se enfocan en realizar ensayos y pruebas para evaluar la calidad y seguridad de los componentes de los sistemas eléctricos [3][4][5]. También, existen fabricantes que se dedican a la investigación y desarrollo de materiales para prevenir, mitigar y reducir los efectos de las descargas parciales [6]. En conjunto, estos esfuerzos contribuyen a mejorar la comprensión y permiten abordar los desafíos relacionados con las descargas parciales en diversas aplicaciones eléctricas, lo cual trae beneficios de gran calibre como la prolongación de la vida útil de los distintos componentes, teniendo un impacto directo en la seguridad, confiabilidad y costos económicos de estas áreas.

La alta tensión es el resultado de la presencia de campos eléctricos intensos cuya magnitud tiene la capacidad de provocar alteraciones en el medio al que está sometido [7]. Al exponer materia bajo la influencia de un campo eléctrico, es de esperar que ocurran ciertos fenómenos relacionados con las cargas eléctricas de las partículas que las conforman. Cuando el campo eléctrico es lo suficientemente intenso, los átomos se ionizan, dando pie a una cadena de reacciones electroquímicas con la capacidad de provocar cambios en la estructura de las moléculas del medio y suele estar acompañada de un movimiento de cargas, que es acelerado debido a la existencia del campo eléctrico [8]. Cuando lo anterior ocurre en un medio dieléctrico, como puede ser una pequeña imperfección en un medio homogéneo, como una cavidad o burbuja que contiene líquido o gas, gran parte de los fenómenos ocurren al interior y/o en las fronteras de este defecto, el cual se denomina vacuola. La definición de descarga parcial según la norma internacional [9], describe al fenómeno como una descarga eléctrica localizada que solo atraviesa parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede o no ocurrir adyacente a este. Las vacuolas, o

cavidades, varían en contenido según las causas que las originan, generalmente se trata de gases pero también es posible encontrar líquidos y cristales [10]. Las descargas parciales pueden ocurrir repetidamente y pasar desapercibidas para el ojo humano. De acuerdo a distintas investigaciones, se concluyó que las DP sirven como indicador de fallas o deterioro en los materiales eléctricos [11]. Debido a esto, surge un área de estudio específicamente dedicado al análisis de descargas parciales siendo de gran relevancia para la industria eléctrica ya que permite estimar la condición y la vida útil de algunos componentes para evitar posibles fallas que pueden ser catastróficas y de gran impacto económico [11].

Las primeras evidencias que describen mediciones de descargas parciales se remontan al año 1898 [12], publicadas por el Prof. Edward Bennett en uno de los primeros artículos que se tiene registro, en donde se detectaban corrientes mediante un capacitor de acoplamiento y se registraba en papel utilizando un oscilógrafo. Luego de unos años, se comienza a utilizar la prueba RIV (Interferencia de Voltaje de Radio), que consiste en escuchar el nivel de interferencia utilizando una radio al acercarse a los equipos de alta tensión, en términos simples, se trata de un receptor de banda AM entre los 10 kHz y 100 kHz y cuando los niveles de ruido eran elevados, entonces existe una fuente de descargas parciales en las cercanías de los equipos. Dada la efectividad de este método para detectar las descargas parciales, se comenzó a aplicar esta técnica en transformadores y devanados de máquinas eléctricas y fue la más utilizada hasta al menos el año 1980 [13].

Con el paso del tiempo, y a medida que la tecnología avanzaba, los métodos de medición de descargas parciales fueron perfeccionándose. La introducción de nuevos instrumentos, como los osciloscopios digitales y los convertidores analógicos-digitales, permitió un análisis más detallado y preciso de los fenómenos relacionados con las descargas parciales. Estos avances no solo mejoraron la capacidad de detección, sino que también abrieron la puerta a nuevas técnicas que permiten no solo identificar y medir las DP, sino también localizar su origen y clasificar los distintos tipos de descargas [14].

A medida que la tecnología progresaba y los sistemas de adquisición aumentaban su capacidad de procesar muestras, se amplió el rango del espectro de radio frecuencia, extendiendo las mediciones de 1 MHz a 10 MHz . Simultáneamente comenzaron a existir los primeros osciloscopios digitales en la década de 1940 y, finalizando la década de 1950 ya existía una gran variedad de instrumentos para detectar descargas parciales que llevaron a un crecimiento exponencial en las investigaciones de este tema [13]. Producto de esta nueva era de investigación, se publicó el primer libro que hablaba de las mediciones de descargas parciales (DP) en el año 1965 y tres años más adelante se publicó la primera norma internacional para medir las DP, en ese entonces denominada la **IEC-270** y actualmente la norma **IEC-60270** [15][13].

Finalizando el siglo XX, prácticamente todos los fabricantes de equipos de alta tensión tenían en su poder algún dispositivo para medir las descargas parciales [13] y se establecieron procedimientos más detallados en la norma **IEC-60270**. Comenzando el siglo XXI, la era digital toma fuerza y se comienza a implementar la nueva tecnología para registrar las mediciones con osciloscopios digitales y computadoras. Los convertidores análogos-digitales ahora tienen la capacidad de medir un espectro de frecuencias aún más elevado y gracias a las computadoras, es posible procesar las mediciones y filtrar las fuentes, añadiendo la ventaja de que con esta técnica es posible reducir el ruido de los resultados [16]. Gracias a estos nuevos convertidores, los osciloscopios tienen la capacidad de registrar fenómenos de frecuencias extremadamente altas (UHF) con rangos mayores a 1 GHz y se

descubrió que las descargas parciales emitían radiofrecuencias en ese espectro, agregando la ventaja de que es más fácil discernir las señales de DP de otras fuentes. [17].

Actualmente, existen diversas tecnologías que permiten clasificar, detectar y/o localizar descargas parciales. Entre ellas se encuentran métodos de detección y localización mediante ultrasonido, que consisten en identificar la fuente de sonido de alta frecuencia producto de las descargas parciales y mediante triangulación encontrar el origen de estas [18]. Otro método de detección y localización es utilizando cámaras que perciben la luz ultravioleta típica de las descargas tipo corona [19]. Además, existen métodos que pueden percibir y localizar descargas parciales utilizando antenas de alta frecuencia que permiten identificar y estimar su origen [3]. También, dado que las descargas parciales implican un ligero movimiento de cargas, es posible utilizar distintos sensores tales como los transformadores de corriente de alta frecuencia, sensores resistivos, lazos inductivos, bobinas de Rogowski, entre otros [20][21][22]. Luego las señales son procesadas por sistemas de adquisición para un análisis posterior.

Finalmente, hasta hoy en día se ha desarrollado una gran cantidad de técnicas que permiten la detección de descargas parciales y se pueden caracterizar según su comportamiento como lo son las descargas internas, superficiales, corona, árboles eléctricos y otros. La tecnología sigue progresando y los nuevos descubrimientos muestran oportunidades que hace décadas era impensado, como las aplicaciones de inteligencia artificial y machine learning para predecir, localizar, filtrar e identificar descargas parciales [23]. También, avances en el área química y manufacturera de los aislantes ha llevado una mejora de sus características otorgando una mejor resistencia ante el envejecimiento de estos [6], prolongando la vida útil de los componentes y brindando seguridad y confiabilidad a los sistemas que manejan alta tensión, trayendo consigo principalmente beneficios económicos [11].

En resumen, a lo largo de la historia hemos presenciado una notable evolución en las técnicas y herramientas utilizadas para medir y comprender las descargas parciales en sistemas eléctricos de alta tensión. Desde los primeros días de las mediciones, que consistían en máquinas rudimentarias que detectaban interferencias cerca de las líneas de alta tensión, hasta la introducción de los osciloscopios que proporcionaron una visión más detallada del fenómeno. A medida que la tecnología progresaba, los instrumentos de medición se volvieron más sofisticados y precisos. Se desarrollaron técnicas que permiten una mayor resolución en la medición de descargas parciales, lo cual resultó en una comprensión más profunda de este fenómeno. Hoy en día, gracias a los avances computacionales, es posible no solo medir las descargas parciales, sino también localizar y separar las fuentes de interferencia y caracterizar diferentes tipos de fenómenos y descargas, como las internas, superficiales, corona, arborescencias y otras. Además de los avances en la instrumentación, se han mejorado significativamente los materiales aislantes utilizados en sistemas eléctricos de alta tensión gracias a los avances químicos que han permitido la creación de sistemas de aislación con características mejoradas, lo que contribuye a prevenir y mitigar las descargas parciales [24].

Este estudio se centra en la medición de descargas parciales de distintos gases encerrados en una cavidad de condiciones similares, lo que representa un enfoque innovador y valioso para comprender mejor este fenómeno cuando varía la composición de la vacuola. La caracterización de los resultados abren la oportunidad de ser una herramienta poderosa para investigar y controlar las descargas parciales en sistemas eléctricos, lo que a su vez contribuye a garantizar la confiabilidad y seguridad de nuestras infraestructuras eléctricas.

Por último, esta tesis subraya la importancia continua de la investigación y la innovación en el campo de las descargas parciales, ya que desempeñan un papel crucial en la preservación y mejora de la infraestructura eléctrica en todo el mundo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

- Caracterizar el comportamiento de las descargas parciales en vacuolas de resina epóxica que contienen diferentes composiciones gaseosas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir un método para fabricar probetas estandarizadas en cuanto a las dimensiones y formas de los electrodos.
- Crear vacuolas de dimensiones específicas con hidrógeno, metano, acetileno, etileno, etano, monóxido de carbono y dióxido de carbono.
- Ensayar los objetos y recopilar información sobre las descargas que ocurran.
- Caracterizar las descargas utilizando algoritmos de tipo clasificación.

1.3. Estructura de la memoria

La estructura de esta memoria se organiza en torno a la aplicación de diversas técnicas de análisis de descargas parciales, inducidas en probetas de resina epóxica que contienen vacuolas con diferentes gases, con el fin de caracterizar los fenómenos según el tipo de gas presente. El capítulo uno ofrece una introducción al tema y una breve historia de las descargas parciales. En el capítulo dos, se abordan los fundamentos conceptuales, físicos y matemáticos de las técnicas que se emplearán para medir, caracterizar y clasificar las descargas parciales, así como una descripción de los gases presentes en las vacuolas. El capítulo tres detalla el proceso de fabricación de las probetas y los elementos necesarios para lograr la precisión deseada. A continuación, en el capítulo cuatro, se describen los parámetros técnicos de las probetas, incluyendo las dimensiones, propiedades eléctricas de la resina y la composición de las mezclas gaseosas. Además, se presenta el cálculo de la tensión necesaria para que ocurran las descargas parciales en las probetas, junto con la descripción del circuito utilizado para su detección según la norma IEC 60270. En el capítulo cinco, se exponen los resultados obtenidos y se realiza un análisis de las mediciones utilizando los métodos previamente descritos. Finalmente, en el capítulo seis, se presentan las conclusiones de este trabajo, junto con propuestas para investigaciones futuras.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Descargas Parciales

Según la norma IEC 60270, una descarga parcial es una descarga eléctrica que solo atraviesa parcialmente el aislamiento entre conductores y puede ocurrir dentro o cerca de este. Las descargas parciales son, en general, una consecuencia de concentraciones locales de estrés eléctrico en el aislamiento o en la superficie del mismo y por lo general, estas descargas aparecen como pulsos con una duración mucho menor a $1 \mu\text{s}$ [9]. Sin embargo, pueden ocurrir descargas "continuas", también llamadas descargas sin pulsos en dieléctricos gaseosos y este tipo de descarga no es detectado normalmente por los métodos de medición descritos en la norma. Las descargas parciales suelen ir acompañadas de emisión de sonido, luz, calor y reacciones químicas [9].

Las descargas parciales se categorizan en tres tipos principales, según sus características. Estas son: descargas parciales internas, superficiales y corona. Las DP internas comúnmente ocurren al interior del material aislante, ya sea en una vacuola o un contaminante incrustado en el material. Las DP superficiales ocurren en la superficie de los aislantes, donde las componentes tangenciales del campo eléctrico son elevadas y las descargas ocurren en la interfaz principalmente debido a contaminaciones o humedad que se deposita en las superficies. Por último, se tienen las DP de tipo corona que consisten en descargas que usualmente ocurren en puntos de alta curvatura debido a la concentración de campos eléctricos con la capacidad de ionizar el medio que la rodea [9].

Un pulso de descarga parcial es un pulso de corriente o voltaje que resulta de una descarga parcial que ocurre dentro del objeto bajo prueba y este se mide utilizando circuitos detectores adecuados, introducidos en el circuito de ensayo con el propósito de la prueba. Un detector, de acuerdo con las disposiciones de la norma produce una señal de corriente o voltaje en su salida, proporcional a la carga del pulso de corriente en su entrada [9].

Los métodos no eléctricos de detección de descargas parciales incluyen métodos acústicos, ópticos y químicos, y también, cuando sea práctico, la observación posterior de los efectos de cualquier descarga en el objeto de prueba. En general, estos métodos no son adecuados para la medición cuantitativa de las cantidades de descarga parcial según se define en la norma, pero se utilizan esencialmente para detectar y/o localizar las descargas y sus efectos.

- **Detección acústica:** Las observaciones auditivas realizadas en una habitación con bajo nivel de ruido se utilizan como un medio para detectar descargas parciales. Las mediciones acústicas no subjetivas, generalmente realizadas con micrófonos u otros transductores acústicos en combinación con amplificadores y unidades de visualización adecuadas, también son de utilidad, especialmente para localizar las descargas. Los micrófonos selectivos direccionalmente con alta sensibilidad por encima del rango de frecuencia audible son útiles para localizar descargas de corona en el aire. Los transductores acústicos también se utilizan para localizar descargas en equipos aislados con gas o sumergidos en aceite, como transformadores [18].
- **Detección visual u óptica:** Las observaciones visuales suelen realizarse en una habitación oscurecida, después de que los ojos se hayan adaptado a la oscuridad y, si es necesario, con la ayuda de binoculares de gran apertura. Alternativamente, es posible realizar un registro fotográfico, pero generalmente se necesitan tiempos de exposición bastante largos. Para fines especiales, a veces se utilizan fotomultiplicadores o intensificadores de imagen [19].
- **Detección química:** La presencia de descargas parciales en equipos aislados con aceite o gas se detecta en algunos casos mediante el análisis de los productos de descomposición disueltos en el aceite o en el gas. Estos productos se acumulan durante el funcionamiento prolongado, por lo que el análisis químico también se utiliza para estimar la degradación causada por las descargas parciales [25].

2.2. Aislantes

Un aislante eléctrico, caracterizado por su alta resistencia eléctrica, ofrece una gran oposición al flujo de corriente eléctrica debido a la disposición de los electrones en los átomos del material. Estos se encuentran fuertemente ligados entre sí, siendo difícil su movimiento libre a diferencia de lo que ocurre en los conductores, donde la más ligera variación de campo eléctrico induce un movimiento de electrones. La resistividad eléctrica y la rigidez dieléctrica son las propiedades clave que permiten a un aislante soportar una diferencia de potencial sin permitir un flujo significativo de corriente eléctrica, previniendo así descargas eléctricas no deseadas o cortocircuitos. La propiedad principal que define un buen aislante es su resistividad eléctrica, que se mide en ohmios por metro [$\Omega \cdot m$]. Los aislantes típicos tienen resistividades de gran magnitud, generalmente en el rango de 10^{10} a 10^{20} [$\Omega \cdot m$] [26]. Entre algunos ejemplos comunes de materiales aislantes se tiene a los plásticos como el PVC, polietileno, polipropileno, entre otros. También existen aislantes de goma, cerámicos y materiales compuestos como el XLPE y la resina epóxica. El uso adecuado de aislantes es fundamental en instalaciones eléctricas para garantizar la seguridad y el funcionamiento correcto de los equipos y circuitos. Al mantener una adecuada separación entre conductores y componentes, los materiales aislantes previenen cortocircuitos y reducen los riesgos de electrocución y daños a equipos.

2.3. Vacuolas

El concepto de vacuolas se introdujo durante la década de 1940 mientras se estudiaban las causas de fallas en el aislamiento de los cables, antiguamente fabricado con papel

parafinado y aceite [27]. Los estudios concluyeron que las fallas en la aislación se debían a pequeñas porciones del material sin impregnar, donde ocurren descargas que degradaban el papel y el aceite, provocando el desgaste que concluye con una falla en la aislación [28].

Las vacuolas, también conocidas como burbujas o cavidades, se forman por diversas razones durante la fabricación o el uso de materiales aislantes. Estos factores incluyen la inclusión de aire durante el proceso de mezcla, la degradación del material, y la exposición a altas temperaturas y presiones [29]. Estas vacuolas son perjudiciales para las propiedades dieléctricas y mecánicas del aislante y, en ciertos casos, afectan negativamente su rendimiento y durabilidad [7]. El tamaño de estas cavidades difiere considerablemente según las causas por las que se formaron, no existe un tamaño estándar ya que sus dimensiones varían desde unos pocos micrómetros hasta algunos cuantos milímetros. Algunas de las causas que propician la formación de vacuolas en los aislantes son:

- **Inclusión de aire durante el proceso de fabricación:** Durante la fabricación de los aislantes, es posible que queden atrapadas pequeñas burbujas de aire durante el proceso de mezcla de los materiales, reacciones químicas durante el endurecimiento, el curado, y/o el proceso de moldeo. Si estas burbujas de aire no se eliminan adecuadamente, se forman vacuolas en el interior del material [29].
- **Degradación del material:** Con el tiempo y bajo ciertas condiciones, los aislantes comienzan a degradarse y liberan gases o compuestos volátiles que generan vacuolas en su interior [29].
- **Altas temperaturas y presiones:** Durante el funcionamiento o el servicio de los aislantes, especialmente en aplicaciones de alta tensión o potencia, las altas temperaturas y presiones provocan la expansión y liberación de gases disueltos en el material, lo que lleva a la formación de vacuolas [29].
- **Falta de adecuado vacío o secado:** En algunos procesos de fabricación, como el laminado de aislantes con resina, la falta de un adecuado vacío o secado posibilita la inclusión de humedad o gases que forman vacuolas una vez que el material se endurece [30].

La presencia de vacuolas disminuye la rigidez dieléctrica del aislante, ya que actúan como puntos de concentración de campo eléctrico, lo que aumenta el riesgo de ruptura dieléctrica y fallos eléctricos. Además, estas cavidades afectan la resistencia mecánica del material, disminuyendo su capacidad para soportar esfuerzos mecánicos y deformaciones [31].

2.4. Gases presentes

Las cavidades que se forman al interior de los materiales aislantes contienen una variedad de gases, cuya composición depende del proceso de formación de la vacuola. La composición de estos gases también está influenciada por el material aislante utilizado, ya que en ocasiones se liberan compuestos volátiles debido a factores como la temperatura, presión u otras condiciones mencionadas en la Sección 2.3 [29][5][32].

Existen múltiples métodos para medir compuestos químicos, cada uno con aplicaciones específicas y diferentes niveles de invasividad para las muestras. Algunos de los métodos más comunes incluyen:

- **Cromatografía de gases y líquidos:** Esta técnica es ampliamente utilizada para separar e identificar diferentes compuestos presentes en una muestra. En el contexto de las descargas parciales, la cromatografía puede ayudar a identificar los gases formados dentro de las vacuolas, permitiendo un análisis detallado de los subproductos de las reacciones químicas que ocurren durante las descargas [33].
- **Espectroscopía ultravioleta (UV) y de masa:** Estas técnicas permiten detectar y cuantificar compuestos específicos basándose en sus propiedades espectrales. La espectroscopía UV, por ejemplo, es útil para detectar la presencia de ozono y óxidos de nitrógeno, que son subproductos comunes de las descargas parciales en medios gaseosos. La espectrometría de masa, por su parte, es utilizada para analizar los fragmentos iónicos generados durante la ionización de los compuestos presentes en las vacuolas, proporcionando una identificación precisa de su composición química [34].
- **Espectroscopía de absorción y emisión atómica, fluorescencia, fotoelectrónica, de Raman y FTIR:** Estas técnicas se utilizan para identificar elementos y compuestos en función de cómo interactúan con la luz [24]. La espectroscopía FTIR (Infrarrojo por Transformada de Fourier), por ejemplo, es comúnmente utilizada para analizar los gases dentro de las vacuolas, permitiendo la identificación de grupos funcionales como el carbonilo (C=O) que se forman en las superficies internas de las cavidades durante las descargas parciales [24]. Esto es crucial para entender cómo los productos de descomposición afectan la integridad del material aislante.
- **Potenciometría y electroquímica:** Estas técnicas se aplican para medir la concentración de iones y compuestos electroactivos en soluciones, lo cual puede ser útil para analizar los subproductos líquidos formados en las cavidades durante las descargas parciales. Esto es relevante en casos donde los gases se disuelven en el medio y generan compuestos que afectan la conductividad y la estabilidad del material aislante [34].

El contenido de gas resultante de las reacciones químicas que se producen durante las descargas parciales varía según el gas inicialmente presente en la vacuola, la humedad y el material del aislante [35][2]. En algunos casos, los subproductos de estas reacciones provocan la cristalización en las paredes de la vacuola, facilitando el crecimiento de árboles eléctricos o la corrosión interna del material debido a la formación de compuestos reactivos [35]. Estos efectos tienen un impacto directo en la vida útil de los materiales aislantes y aumentan la probabilidad de fallos eléctricos [4].

Diferentes estudios han realizado mediciones de los gases que se encuentran en un ambiente que contiene aire, posterior a las descargas parciales y se determinó mediante espectroscopía UV que los gases que se producían debido a las descargas corona, son principalmente el ozono, óxidos de nitrógeno (NO_x) y ácido nítrico (HNO₃) [36][37].

También, estudios similares se han realizado en vacuolas al interior de aislantes XLPE utilizando técnicas FTIR y análisis de espectro de masa [24], donde se encontró que el gas predominante al interior de las cavidades que inicialmente contenían oxígeno y nitrógeno es el CO₂, y en la superficie de la vacuola se encontró una alta presencia del grupo funcional carbonilo C=O y metileno CH₂. Este último grupo funcional se presenta en numerosos compuestos, el más simple lleva el nombre del grupo funcional metileno, en segundo lugar

el etileno y además, es el bloque principal que forma la cadena del polímero polietileno, material principal del XLPE.

Además, otros estudios han determinado que la presión al interior de la vacuola disminuye drásticamente luego del inicio de las descargas parciales [34], indicando que las moléculas de gas reaccionan con los compuestos en las paredes de la cavidad para formar compuestos líquidos como ácidos, ésteres y otros compuestos del grupo carbonilo. Este comportamiento se observa con mayor claridad en muestras que contienen oxígeno, dado su alta reactividad este se consume para formar los compuestos mencionados y CO₂ [34].

En adición, numerosas investigaciones concuerdan con que la intensidad y frecuencia de las descargas va en disminución con el tiempo de ensayo [34], [38]. Se observa en [34] que la conductividad superficial de la cavidad aumenta en función de las horas que se ensayan las probetas, debido a los subproductos líquidos mencionados anteriormente confirmando lo establecido por [10][38]. Además, esta transición ocurre de forma más rápida aun cuando en la mezcla de gases se encuentra algún porcentaje de humedad, favoreciendo la producción de otros compuestos ácidos que incrementan aún más la conductividad superficial de la vacuola, haciendo que las descargas presente pulsos débiles en comparación a cuando no se encuentra humedad [38].

Por último, existe un espectro completo de gases que se encuentra en el interior de los transformadores, dependiendo de las condiciones a las que se sometan los componentes de estos y según el grado de intensidad de la falla [39]. Métodos como el análisis de gases disueltos (DGA) permiten identificar las causas del envejecimiento o deterioro del aceite, y se ha encontrado que los siguientes componentes son los más comunes en este medio: metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄), acetileno (C₂H₂), hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO), y dióxido de carbono (CO₂). Utilizando la técnica DGA, es posible estimar los motivos de falla o envejecimiento de la aislación de transformadores, representando las cantidades de los componentes encontrados, en esquemas como el pentágono o triángulo de Duval [25].

En resumen, la composición gaseosa en el interior de las vacuolas es un indicador crítico del estado del material aislante, y los gases más comunes que se encuentran incluyen hidrocarburos como metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄), y acetileno (C₂H₂), además del grupo funcional metileno (CH₂). También es frecuente la presencia de compuestos de carbono como monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂), junto con hidrógeno (H₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Además, se han identificado compuestos no gaseosos, como las moléculas con el grupo funcional carbonilo (C=O), que suelen formar líquidos o cristales dentro de las cavidades, así como compuestos corrosivos como el ácido nítrico (HNO₃) y subproductos de las reacciones del ozono (O₃) con las paredes de las burbujas.

La identificación precisa de estos gases y compuestos es fundamental para comprender los mecanismos de deterioro del material aislante y predecir posibles fallas en los sistemas eléctricos, subrayando la importancia de técnicas analíticas como el DGA y otras herramientas espectroscópicas en la evaluación de la salud de los transformadores y otros equipos de alta tensión.

2.5. Modelando descargas parciales al interior de una vacuola

Para comprender los fenómenos eléctricos que ocurren dentro de una vacuola, es posible modelar el conjunto aislante-vacuola como un circuito eléctrico equivalente, utilizando el

modelo de tres capacitancias propuesto por Whitehead en 1951 [40]. El esquema considera la cavidad como un condensador con un dieléctrico distinto, por lo que el resultado final contempla la capacitancia del dieléctrico sin la vacuola C_a , la capacitancia de la vacuola C_c y la del espacio restante que no ocupa la cavidad $C_{b'}$ y $C_{b''}$ respectivamente, como se indica en la Figura 2.1.

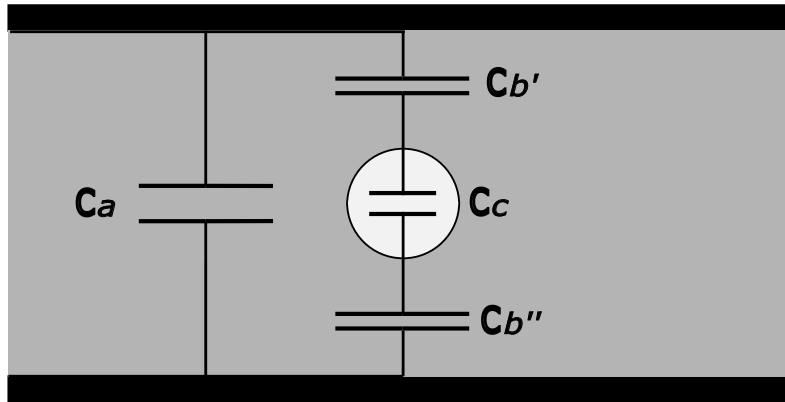


Figura 2.1. Modelo abc propuesto por Whitehead.

Según este modelo, si la rigidez dieléctrica de la cavidad es menor que la del medio que la contiene, se producirá una descarga al alcanzar un nivel de tensión específico. Representado en la Figura 2.2, al momento de ocurrir la descarga, el rápido movimiento de cargas se puede modelar como un cortocircuito donde se encuentra el gap, disminuyendo la tensión al interior de la cavidad al mismo tiempo que se extingue el movimiento de cargas [40].

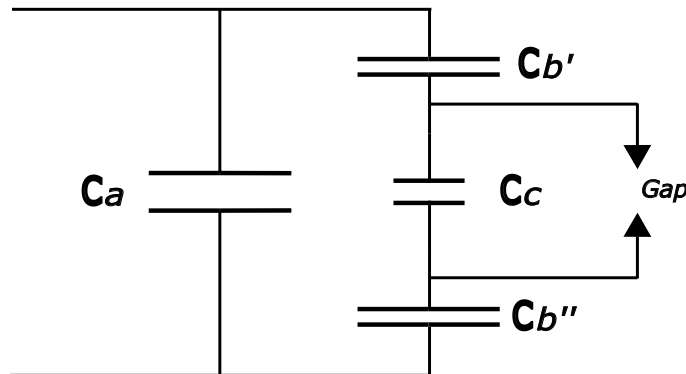


Figura 2.2. Modelo abc considerando un spark gap que modela la descarga al interior de la vacuola.

Como se mencionó anteriormente, la ionización de un medio gaseoso bajo la influencia de un campo eléctrico provoca que las partículas cargadas adquieran energía cinética y si las condiciones lo permiten, se desencadena una avalancha de electrones que concluye en una descarga [41]. Al tratarse de cavidades gaseosas, una vez ocurrida la descarga, las moléculas se reorganizan al interior de la vacuola acorde al campo eléctrico, generando pequeñas cargas localizadas en el material aislante que la rodea [30]. Cuando se trata de una tensión alterna, cada vez que la tensión cambia de polaridad, el campo eléctrico se

superpone al producido por las cargas localizadas al interior de la vacuola, produciendo nuevamente una descarga y alcanzando el equilibrio una vez más. El proceso de descargas tiene una duración típica de microsegundos, pudiendo observarse como pulsaciones rápidas de voltaje o corriente en los sistemas de detección [9]. Como se ve en la Figura 2.3, la mayoría de las descargas parciales que ocurren dentro de una cavidad, se observan cerca de los cambios de ciclo de la tensión aplicada.

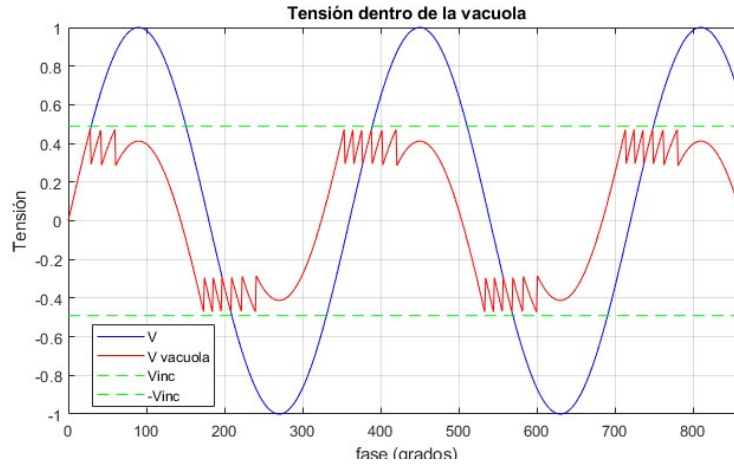


Figura 2.3. Esquema representativo del comportamiento de la tensión al interior de la vacuola, fuente propia .2.1.

La causa de la ruptura del dieléctrico se debe a que las moléculas que conforman el medio alcanzan un nivel de ionización suficiente para permitir el movimiento de electrones. En el caso de las vacuolas, el gas que contiene se ioniza debido a la presencia de un campo eléctrico intenso. El mecanismo de ionización requiere que un átomo o molécula aporte con el electrón semilla suficiente para provocar una reacción en cadena [41]. Cuando un electrón es liberado de un átomo debido a un campo eléctrico intenso, tanto el electrón como el catión resultante son acelerados en direcciones opuestas. Este movimiento genera suficiente energía para que el electrón colisione con otros átomos en el medio, y si la energía de colisión es suficiente para arrancar otro electrón y ionizar una nueva molécula o átomo, entonces se genera una reacción en cadena denominada avalancha de electrones que retroalimenta la ionización del medio y concluye en una descarga parcial o total [8].

La ionización depende de distintos factores cuando se trata de un medio gaseoso, principalmente de la distancia que separa los electrodos y la presión del gas. La Ley de Paschen describe el comportamiento de la tensión requerida para producir la ruptura en un gas, motivo por el cual se decidió utilizar esta ecuación para realizar los cálculos correspondientes y estimar la tensión a la cual comenzarán a producirse descargas parciales en las vacuolas.

Paschen determinó la curva de manera empírica, obteniendo la ecuación 2.1 que describe la tensión requerida para la ruptura en función del producto presión y distancia [42].

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \right]} \quad (2.1)$$

Donde V_B corresponde al voltaje de ruptura. A y B son constantes que tienen un valor

de $11,25 \left[\frac{Pa}{m} \right]$ y $273,75 \left[\frac{V}{kPa \cdot m} \right]$, p es la presión en [Pa] del gas y d la distancia en [m]. Por último γ_{se} es el coeficiente de emisión de electrones secundarios por cada catión incidente, este valor es probabilístico y oscila entre 0,01 y 0,2 [42].

2.6. Procesamiento de las señales detectadas por el sistema de adquisición

Las señales obtenidas por el sistema de adquisición son procesadas instantáneamente a medida que se registran los pulsos. Dado que existen diversas fuentes de ruido electromagnético externo, el sistema de adquisición puede captar interferencias que se superponen a las señales de interés. Para ello, es posible configurar parámetros en el sistema de adquisición que permiten filtrar aquellas señales indeseadas. Si se considera una señal de ejemplo como la indicada en la Figura 2.4, se observan los diferentes parámetros que toma en consideración el sistema de adquisición, tales como el nivel de disparo, pre-disparo y la ventana de adquisición [9].

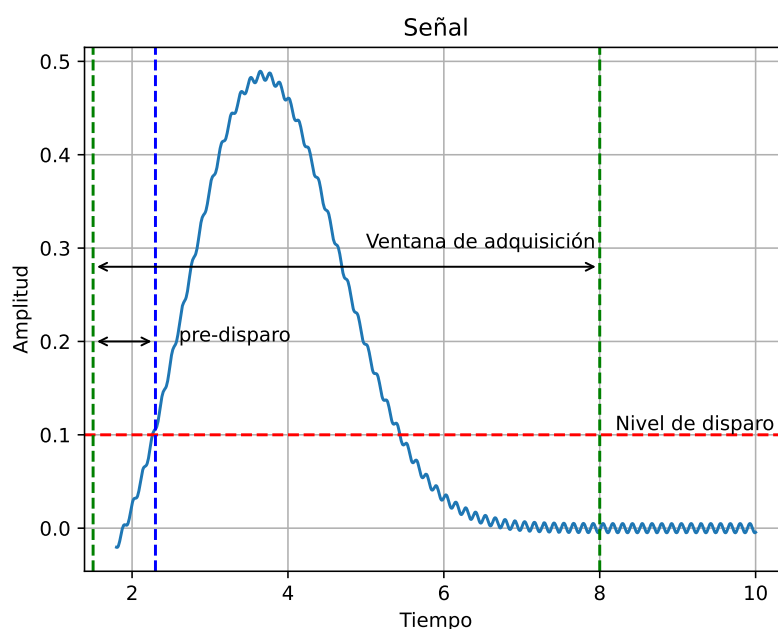


Figura 2.4. Señal de ejemplo y parámetros en los que se basa el sistema de adquisición, elaboración propia.

La configuración previa del nivel de disparo, ventana de adquisición y tiempo de pre-disparo permiten filtrar aquellas señales de baja amplitud, en su mayoría interferencias, y registrar aquellas que pueden ser relevantes para analizar posteriormente.

- Nivel de disparo: es el nivel establecido para que el sistema de adquisición considere la señal medida como válida y se guardan en la memoria del equipo.
- Tiempo de pre-disparo: Es la ventana de tiempo previo al disparo en la cual el

sistema de adquisición mantiene los datos en la memoria, de esta forma en caso de ocurrir un disparo la información previa es considerada en la medición de la señal.

- Ventana de adquisición: es el tiempo total de la señal medida, en este caso equivale al intervalo de tiempo desde el pre-disparo hasta el fin de la medición de la señal.

2.6.1. Phase Resolved Partial Discharge

El Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) es una técnica que ofrece una representación visual de las descargas parciales en relación con la tensión aplicada, compactando cada DP registrada a un punto en el plano donde su amplitud máxima corresponde al valor en el eje de las ordenadas y el instante que ocurre la descarga se asocia al ángulo de fase de la tensión de referencia. Este diagrama permite identificar el tipo de descarga que está ocurriendo, ya que cada tipo presenta un patrón característico, facilitando su clasificación mediante inspección visual [43].

2.6.1.a. Descargas parciales internas

En el caso de las descargas parciales internas, el PRPD tiende a presentar pulsos que están en fase o contrafase con la señal de referencia, concentrándose en los cambios de polaridad como se indica en la Figura 2.5 [43].

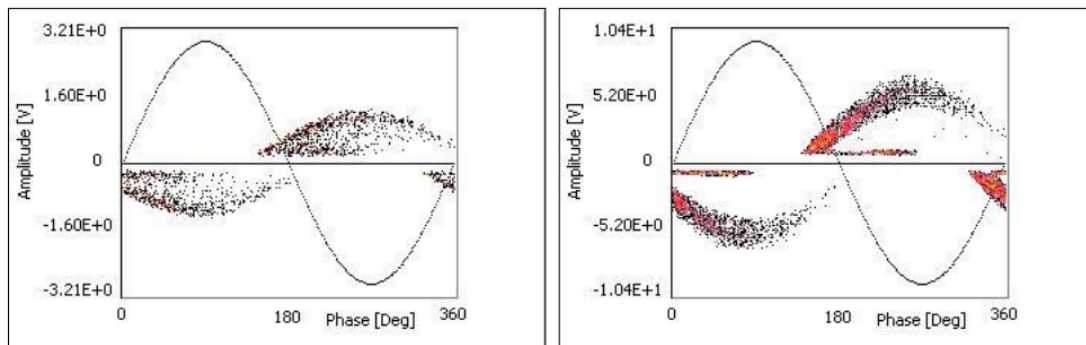


Figura 2.5. PRPD de DP internas en una vacuola esférica [fuente [43]].

2.6.1.b. Descargas parciales superficiales

En la Figura 2.6 se observa el patrón característico de las DPs superficiales, evidenciando un ligero desfase de los pulsos en comparación al PRPD observado en las descargas internas, además la amplitud tiene cierta correlación con la de la señal de referencia [43].

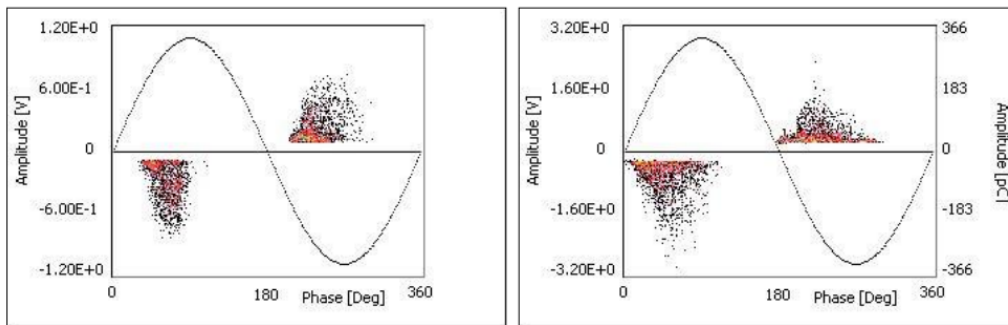


Figura 2.6. PRPD característico de descargas parciales superficiales en un conductor aislado sobre un plano aterrizado [fuente [43]].

2.6.1.c. Descargas corona

Por último, para las descargas de tipo corona, el PRPD indicado en la Figura 2.7 evidencia una cualidad que facilita el reconocimiento de este tipo de descargas, y corresponde a que estas se suelen presentar en solo un semiciclo y están centradas en el ángulo de fase correspondiente al valor máximo de la señal de referencia [43].

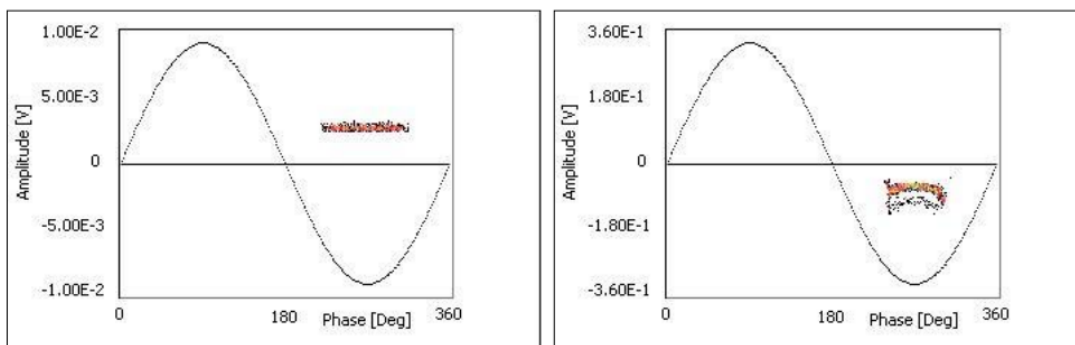


Figura 2.7. PRPD característico de descargas parciales de tipo corona en un metal puntiagudo. [fuente [43]].

2.6.2. Plano Tiempo-Frecuencia

El análisis en el plano tiempo-frecuencia (T-F) es una técnica poderosa que permite descomponer y analizar señales complejas al estudiar sus componentes en diferentes escalas de tiempo y frecuencia. Este enfoque es particularmente útil para señales que presentan variaciones temporales y de frecuencia constantes, como es el caso de las descargas parciales. Esta técnica se aplica para caracterizar señales complejas del mundo real donde sus componentes de tiempo y frecuencia varían constantemente. Mediante esta herramienta es posible comprimir la cantidad de información de la señal y representarla en un plano T-F. Además, una ventaja muy importante que ofrece la visualización de las señales en este plano es la posibilidad de eliminar o filtrar fuentes indeseadas como lo es el ruido y de esa forma mejorar la calidad de la información [44].

Para determinar los valores en el plano T-F de una señal, es necesario calcular los parámetros σ_t y σ_f , que representan las distribuciones en los ejes de tiempo y frecuencia, respectivamente. Estos parámetros son cruciales para el análisis, ya que deben ser independientes de la polaridad de la señal. Se procede a seguir la línea de cálculos propuesta por Cavallini et al. [44] para la obtención de parámetros para una señal $s(t)$.

La normalización de la señal $s(t)$ se puede conseguir mediante la ecuación 2.2:

$$1/\|s\| = 1/\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt} \quad (2.2)$$

y de esta forma definir \tilde{s}

$$\tilde{s}(t) = s(t)/\|s\| \quad (2.3)$$

Para encontrar los puntos en el plano se aplican las ecuaciones 2.5 y 2.4:

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2.4)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df} \quad (2.5)$$

Donde $|\tilde{S}(f)|$ es la transformada de Fourier de $\tilde{s}(t)$. Y t_0 corresponde al centro de gravedad de la señal normalizada $\tilde{s}(t)$ indicada en la ecuación 2.6:

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2.6)$$

A partir de la representación en el plano T-F es posible identificar cúmulos o clústeres de descargas y gracias a esta herramienta, determinar si el origen de las descargas es el mismo, o provienen de fuentes distintas y si ese fuera el caso, separar el análisis por cúmulos, también denominados clases [16].

2.7. Análisis estadístico

A continuación, se describen los principales parámetros estadísticos que se emplearán para caracterizar las descargas parciales. Estos parámetros son esenciales para comparar las diferentes características de las descargas, tales como valores máximos, promedio, ángulos de fase, duración de las descargas, entre otros.

Se procede a seguir la línea de cálculos propuesta por Krivda et al. [45] para el reconocimiento de parámetros para la discriminación y clasificación de las descargas.

2.7.1. Distribuciones estadísticas

Las distribuciones de los pulsos de descargas parciales se agrupan en tres categorías principales: $H_{qmax}(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$ y $H_n(\phi)$ [45]. Cada una de estas distribuciones ofrece una

perspectiva diferente sobre la dinámica de las descargas.

- $H_{qmax}(\phi)$: corresponde a la distribución de la máxima amplitud de los pulsos en función del ángulo de fase ϕ
- $H_{qn}(\phi)$: Corresponde a la distribución del valor medio de las descargas en función del ángulo de fase.
- $H_n(\phi)$: Corresponde a la distribución de la cantidad de descargas por cada ventana de muestreo en función del ángulo de fase.

2.7.2. Parámetros estadísticos

- Oblicuidad (Skewness en inglés): Su magnitud indica la asimetría de la distribución respecto a la distribución normal, donde un valor positivo indica que los valores están concentrados hacia la izquierda de la mediana, y el caso contrario cuando es negativo. Esta se calcula con la ecuación 2.7 [45]:

$$Sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot P_i}{\sigma^3} \quad (2.7)$$

donde x_i es el valor registrado, P_i es la probabilidad de que el valor x_i exista en la i -ésima ventana de fase, μ es el valor medio y σ es la varianza.

- Curtosis (Kurtosis en inglés): Este parámetro mide la "agudeza" o "aplanamiento" de una distribución en comparación con una distribución normal. Representa la cantidad y la magnitud de los valores atípicos, indicando cuánto difieren las colas de la distribución de la forma de una distribución normal. Cuando la curtosis es positiva, las colas son más pesadas que la distribución normal. Curtosis negativa: menos valores extremos, con colas más ligeras que la distribución normal. Curtosis igual a cero implica que la distribución tiene la forma de una distribución normal, sin colas más pesadas ni más ligeras. La expresión de la curtosis se presenta en la ecuación 2.8 [45]:

$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (2.8)$$

- Número de crestas: Se utiliza para distinguir cuando hay distribuciones con más de una cresta, respecto a la distribución normal con sólo una cresta [45].
- Factor de Correlación Cruzada (CC): Se utiliza para contrastar las distribuciones entre el semiciclo positivo contra el negativo, cuando el factor CC tiene un valor cercano a 1, ambas distribuciones son casi idénticas. Caso contrario ocurre cuando $CC = 0$. La fórmula matemática para el factor de correlación cruzada se muestra en la ecuación 2.9 [45]:

$$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{\left[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n \right] \left[\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n \right]}} \quad (2.9)$$

Donde x_i corresponde al valor medio de las descargas en la i -ésima ventana del tiempo en el semiciclo positivo, y_i corresponde al valor medio de las descargas en la i -ésima ventana del tiempo en el semiciclo negativo y n corresponde al número de ventanas de tiempo en las que son divididos cada semiciclo.

- Asimetría: Es el cociente del valor medio de la distribución en el semiciclo positivo entre el valor medio de la distribución en el semiciclo negativo. Este parámetro se puede aplicar a las distribuciones $H_{qmax}(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$ y $H_n(\phi)$. Si se calcula la asimetría para $H_{qn}(\phi)$ se tiene:

$$\text{Asimetría de } H_{qn}(\varphi) = \frac{Q_s^-/N^-}{Q_s^+/N^+} \quad (2.10)$$

Donde Q_s^- y Q_s^+ son las sumas de los valores de los pulsos de los semiciclos positivos y negativos, N^- y N^+ corresponden a la cantidad de pulsos que hay en cada semiciclo correspondiente [45].

Capítulo 3

Fabricación de las probetas

Este capítulo se centra en detallar el proceso de fabricación de las probetas de resina epóxica, un aspecto fundamental de esta investigación y uno de sus principales objetivos. La precisión en la fabricación de estas probetas es esencial, dado que las probetas son el corazón de esta investigación, su fabricación precisa es crucial para garantizar la comparabilidad de los resultados.

Para minimizar la cantidad de variables al máximo durante los ensayos, es indispensable que las probetas presenten características idénticas en cuanto a su estructura y composición. Esto es especialmente importante debido a que variables ambientales como presión, temperatura, humedad, tiempo de curado y la proporción exacta en la mezcla de las partes A y B de la resina influyen significativamente en las propiedades eléctricas del material [46].

Para garantizar un entorno de fabricación controlado, se optó por llevar a cabo todo el proceso en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alta Tensión (LIDAT). Este laboratorio ofrece condiciones ambientales con un grado de estabilidad superior en comparación con otros entornos, lo que reduce las fluctuaciones que podrían afectar la homogeneidad y las propiedades finales de las probetas.

La resina epóxica seleccionada para la fabricación de todas las probetas fue la MEPOX 1685L A+B, de MEPSYSTEM. Esta resina fue elegida por sus propiedades de endurecimiento lento, viscosidad y su capacidad para mantener la integridad estructural bajo condiciones controladas. En la Tabla 3.1 se indican las propiedades de la resina, tal como son especificadas por el fabricante.

El proceso de fabricación también involucró el uso de una serie de herramientas y materiales diseñados para garantizar la uniformidad y precisión en cada etapa. Se emplearon moldes de silicona cilíndricos de aproximadamente 9 cm de diámetro para los discos de resina, y moldes más pequeños, de 1 cm de diámetro y 5 cm de alto, para la inyección controlada de las burbujas de gas en su interior. La impresión 3D, utilizando modelos diseñados en el programa Fusion 360, permitió la creación de componentes precisos que facilitaban la manipulación y el procesamiento de las probetas.

Para la inyección del gas en las probetas, se utilizó una jeringa de insulina de 1 ml con una carrera de émbolo de 57 mm, lo que ofreció el control necesario para inyectar volúmenes exactos de gas en el interior de las vacuolas. Adicionalmente, un motor de 5 RPM se encargó de rotar lentamente los moldes durante el proceso de endurecimiento

de la resina, asegurando que las vacuolas de gas permanecieran centradas y evitando la formación de defectos.

Asimismo, para purgar la resina de vacuolas externas y realizar un degasificado efectivo, se emplearon una cámara y una bomba de vacío. Los electrodos cilíndricos de bronce se utilizaron como parte de uno de los prototipos, insertándose cuidadosamente en las probetas, aunque el resultado no fue el esperado. Finalmente, una herramienta Dremel fue utilizada para cortar los cilindros con las vacuolas, permitiendo su correcta inserción en el centro de los discos de resina.

Con esta combinación de técnicas y materiales, fue posible superar los obstáculos iniciales y desarrollar un método robusto y reproducible para la fabricación de probetas de alta calidad. A continuación, se describirá en detalle el procedimiento de fabricación, destacando los avances logrados desde los primeros intentos fallidos hasta el desarrollo del prototipo final.

Tabla 3.1
PROPIEDADES DE LA RESINA Y ENDURECEDOR

Propiedades Físicas	Valores
Resina – 1685 /A	
Aspecto	Líquido, azulino claro
Viscosidad (25°C)	600-800 ± 100 Cps
Densidad	1.12 g/cm ³
Endurecedor - 1685L /B	
Aspecto	Líquido, ambarino
Viscosidad	400-450 Cps
Densidad	0.92-0.95 g/cm ³
Relación de mezcla	
Partes en peso	Resina “A”: 100Endurecedor “B”: 50
Mezcla	Líquido claro ligeramente ambarino
Viscosidad	700 ± 100 Cps
Densidad	1.1 g/cm ³
Reactividad	
De uso (a 25°C, 300 grs)	30-40 Min
De Desmoldo	24-36 Hrs
Endurecimiento final	5-7 Días
Características Mecánicas y Térmicas	
Resistencia a la ruptura a compresión	140-150 MPa
Resistencia a la ruptura a tracción	65-75 MPa
Alargamiento elástico a 600 MPa	3.8 %
Resistencia a la ruptura en flexión	100-110 MPa
Módulo de elasticidad a flexión	3000-5000 MPa
Dureza	78-80 ± 5 Shore D
Coefficiente de dilatación térmica	70-10 mm/mm°C
Temperatura de deformación bajo carga (Tg)	93°C

3.1. Casos fallidos

En esta sección se analiza la evolución del método de fabricación de las probetas, destacando los desafíos y fallos que llevaron a descartar ciertos enfoques. Estos casos fallidos proporcionaron valiosas lecciones que permitieron refinar y optimizar el proceso en el desarrollo del prototipo final.

3.1.1. Prototipo 1

La primera probeta que se diseñó, fue la más sencilla, consistía en un molde cilíndrico de silicona de 9 [cm] de diámetro aproximado, donde se inyectó una pequeña burbuja utilizando una jeringa de insulina de 1 [ml]. Esta burbuja quedaba en la superficie debido a la flotabilidad, como se muestra en la Figura 3.1 y luego de unas horas de curado, ésta se encontraba lo suficientemente fuerte como para aguantar un segundo vertido de resina, dejando la burbuja entre ambas interfases como se aprecia en la Figura 3.2.

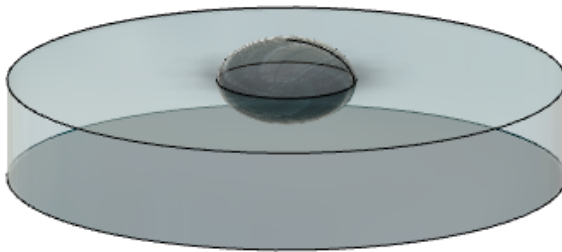


Figura 3.1. Representación de la vacuola flotando sobre resina, en la primera fase de curado

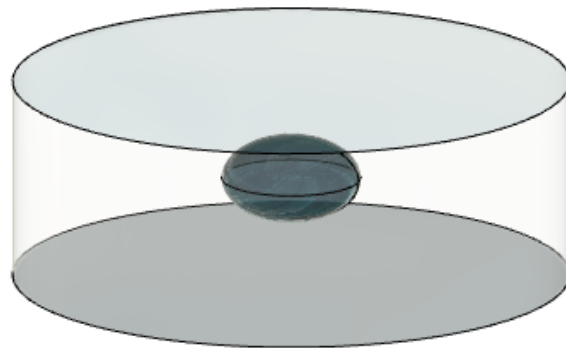


Figura 3.2. Imagen representativa de la vacuola centrada entre ambas interfases de resina

Este método presentó varios inconvenientes al momento de reproducir objetos similares. En primer lugar, se debía encontrar un rango de tiempo donde la resina alcanzara cierto grado de curado para que la burbuja no se desvaneciera en el aire, también fue muy difícil mantener la burbuja centrada, debido a pequeños desperfectos de nivelación y otros factores externos que provocaban un desplazamiento lento de la burbuja resultando en una burbuja fuera de centro. Cabe mencionar que además, la burbuja al estar flotando, cierto porcentaje se encontraba sobre el nivel de la resina y al momento de verter la otra parte de resina esta quedaba más cerca de una cara que de otra, debido a que la burbuja no flotaba en la mitad de su volumen, sino que quedaba casi por completo en la superficie de la resina. Otro problema que se detectó, es que al verter la resina dos veces, la proporción de los compuestos varía ligeramente, debido a la resolución de la pesa, al igual que la temperatura y otros parámetros ambientales, haciendo que las propiedades eléctricas de la resina puedan ser diferentes en ambos vertidos y por lo tanto alejándose de la premisa de homogeneidad entre objetos de ensayo.

3.1.2. Prototipo 2

En el segundo prototipo, se implementó la idea de adosar los electrodos de bronce al conjunto completo. También, se modificó la forma de fabricar las vacuolas, esta vez se utilizó un molde cilíndrico para preparar la burbuja de manera aislada, y luego de que ya se encuentre completamente curada, se posiciona de manera precisa en el centro del molde. También, se agrega un nuevo método para inyectar una cantidad fija de aire en cada muestra y además se suma otro procedimiento que convierte las vacuolas elipsoides del intento anterior (aplanadas por la tensión superficial de la resina), en burbujas esféricas. Este proceso se detalla en la sección 3.2.

Una vez solidificada la resina con las burbujas, se procede a cortar con precisión el pequeño cilindro, aislando la vacuola. Luego, en un molde impreso en impresora 3D se procede a llenar con resina suficiente para cubrir la vacuola que se encuentra centrada en el molde y esta vez con el electrodo de bronce descansando en el cilindro cortado que contiene la vacuola, como se indica en la Figura 3.3.

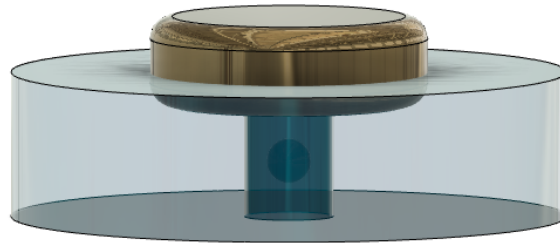


Figura 3.3. Esquema que muestra parte del procedimiento para fabricar las vacuolas con el electrodo incorporado en la resina.

Una vez solidificada la resina, se procede a invertir el conjunto para agregar el otro electrodo de bronce junto a una nueva capa de resina, como se muestra en la Figura 3.4:

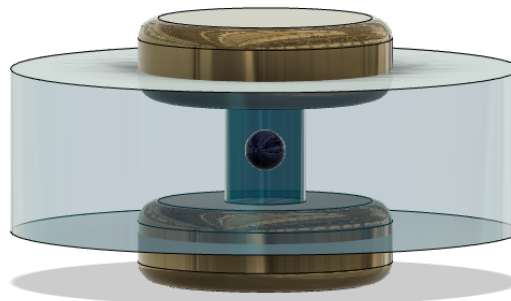


Figura 3.4. Esquema que muestra el objeto finalizado utilizando este método.

El motivo de incorporar los electrodos se hizo para minimizar las variaciones de distancia entre la vacuola y los electrodos, además de evitar la aparición de descargas parciales superficiales, pero existieron numerosos puntos en contra de este diseño, por lo que se tuvo que descartar. Entre los puntos desfavorables, el principal fue el tiempo consumido en fabricar la probeta, pues primero había que fabricar la burbuja y esperar dos días para

que se encuentre lo suficientemente solidificada para cortarla del primer molde cilíndrico, luego había que esperar dos días más para que se solidifique el conjunto vacuola-electrodo, y finalmente dos días más para el mismo proceso con el electrodo restante por lo que el proceso total tomaba más de una semana para fabricar un solo objeto. Además, se prescindió de distintos vertidos de resina, lo cual se desea evitar porque se pierde homogeneidad en las distintas capas de la probeta. Más aún, ocurría un problema mayor ya que la interfase entre el cilindro de resina con la vacuola estaba en contacto directo con los electrodos, facilitando una ruta eléctrica entre ambos conductores que incluso concluyeron con la destrucción de uno de estos objetos durante un ensayo. Estos fueron los motivos principales que hicieron descartar este tipo de objetos de ensayo, para dar paso al último método y el más efectivo de todos hasta ahora.

3.2. Caso Exitoso

3.2.1. Prototipo 3

Debido a los problemas de insertar los electrodos junto a la vacuola, como la ocurrencia de descargas en la interfase de la resina y burbujas indeseadas que quedaban adosadas a los conductores, se decidió eliminar los electrodos embebidos y también se modificó el procedimiento para evitar que la interfase conecte ambos extremos de alta tensión.

El procedimiento para fabricar la burbuja de gas se mantuvo, dado que la resolución del dosificador era más que suficiente para este fin. Esta vez se utilizó una cámara de vacío, donde se purgó la resina durante quince minutos antes de cada uso. Este paso adicional fue clave para eliminar cualquier burbuja externa que pudiera interferir con la vacuola principal.

Para minimizar las variaciones en las preparaciones de resina, se prepararon simultáneamente las vacuolas en seis moldes cilíndricos, dos para cada mezcla de gases, con solo una preparación de mezcla de resina. Esta técnica no solo garantizó una mayor uniformidad entre las probetas, sino que también redujo el tiempo total de fabricación, lo que permitió una mayor eficiencia en el proceso.

Los moldes se insertaron en un dispositivo giratorio indicado en la Figura 3.5, para evitar que las vacuolas flotaran. Este dispositivo utiliza un motor síncrono de 220 [V] con una velocidad de giro de 5 [RPM] aproximadamente, suficiente para mantener las burbujas centradas dentro del molde mientras se solidifica la resina, proceso que tarda aproximadamente un día. Las probetas fabricadas con este dispositivo mostraron una notable mejora en la estabilidad de las burbujas, logrando vacuolas visualmente esféricas. Esto no solo redujo la variabilidad entre probetas, sino que también disminuyó la probabilidad de formación de defectos internos que pudieran afectar el rendimiento durante los ensayos.

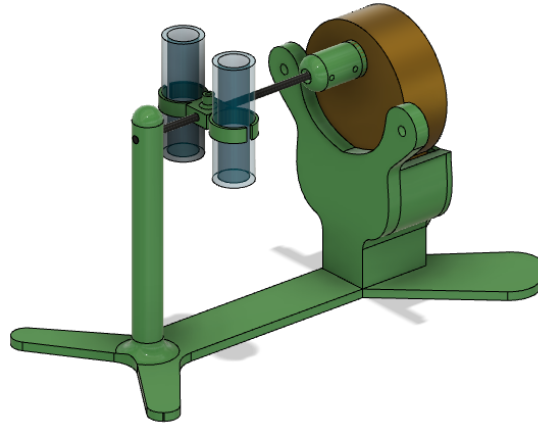


Figura 3.5. Modelo 3D del dispositivo giratorio (amarillo), sosteniendo un par de moldes cilíndricos (azules) con las vacuolas en su interior.

Una vez solidificada la resina con las vacuolas en su interior, se procede a desmoldar y a cortar de manera precisa, con otro dispositivo diseñado e impreso para este fin, presentado en la Figura 3.6. El artefacto creado es una pequeña mesa de corte para utilizar con la herramienta rotativa Dremel, donde la distancia desde la vacuola a la sierra se ajustó con un pie de metro digital con una resolución de 0,1 [mm].

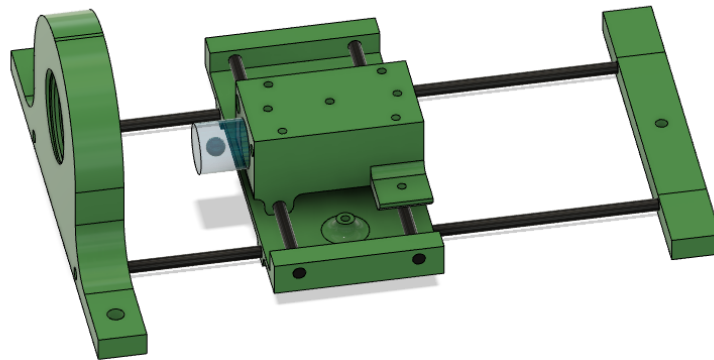


Figura 3.6. Modelo 3D del dispositivo que se utilizó para cortar los cilindros que contenían la vacuola (azul). La herramienta Dremel se insertaba en el hilo visible en el extremo izquierdo, donde quedaba fija

Esta vez, las vacuolas se cortan del molde cilíndrico, pero no quedan centradas a este para evitar que la interfaz conecte ambos electrodos al momento del ensayo, como ocurrió en el segundo prototipo. Esta asimetría es útil para verter más resina y separar la interfaz de los electrodos, como se indica en la Figura 3.7.

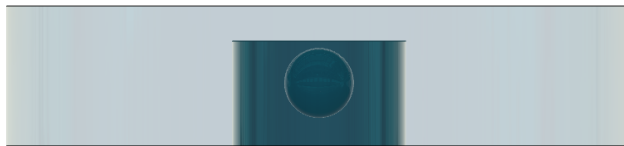


Figura 3.7. *Visualización de la posición del cilindro interior conteniendo la vacuola.*

Como se aprecia en la Figura 3.7, ahora existe una barrera de resina entre la interfaz del cilindro que contiene la vacuola con una de las caras del disco completo, evitando así posibles descargas indeseadas.

De esta forma finaliza el procedimiento para la fabricación de los objetos de ensayo. Los beneficios que destacan en este último método, son que se redujo el tiempo de espera entre cada curado y la variabilidad en la preparación de la resina, ya que solo se utilizó dos vertidos para fabricar las seis vacuolas simultáneamente. También gracias al dispositivo dosificador se pudo inyectar la misma cantidad de gas para cada vacuola, permitiendo que tengan tamaños idénticos entre ellas. Por último, al introducir la resina en la cámara de vacío, se desgasificó por completo, finalizando con un objeto de ensayo sin burbujas externas apreciables.

3.3. Dosificador de precisión y preparación de mezcla gaseosa

Uno de los componentes clave en la fabricación de probetas consistentes fue el desarrollo de un dosificador de precisión, que permitió inyectar con exactitud el gas en el interior de la resina epóxica. Este dosificador aseguró que cada vacuola tuviera un tamaño uniforme, lo cual es esencial para la reproducibilidad de los resultados experimentales. Además, la preparación adecuada de la mezcla gaseosa fue fundamental para garantizar la pureza y evitar contaminaciones que pudieran afectar la integridad de las probetas.

El procedimiento para fabricar vacuolas esféricas que contengan el mismo volumen consta de dos pasos principales, en primer lugar, se inyecta el gas a la resina mediante el dosificador de precisión indicado en la Figura 3.8, dejando una burbuja al interior del molde. En segundo lugar se coloca el molde que contiene la burbuja en el sistema motorizado indicado en la Figura 3.5, que gira a una velocidad de 5 *RPM* y mantiene la burbuja alejada de los extremos al interior del molde cilíndrico hasta que la resina se encuentra solidificada.

El dosificador fue diseñado en el programa Fusion 360 de Autodesk® y creado con una impresora 3D precisamente para ser utilizado con una jeringa de insulina de 1 *ml*, el émbolo es empujado mediante un sistema de engranajes de tipo reductor que consta de un engranaje sinfín de ratio 36:1 que a su vez hace girar un hilo que desplaza un pistón verticalmente. El sistema reductor convierte 33,7 revoluciones del tornillo sinfín en 1 *mm* de desplazamiento vertical del émbolo, lo que equivale a un volumen de 0,47 μl o a una burbuja de 0,96 *mm* de diámetro por revolución.

En la Figura 3.8 se aprecia en color amarillo el sistema de engranajes y en celeste la jeringa. El molde cilíndrico donde se inyectaba la burbuja se coloca en la parte más alta de la estructura donde hay un orificio por donde sale la aguja.

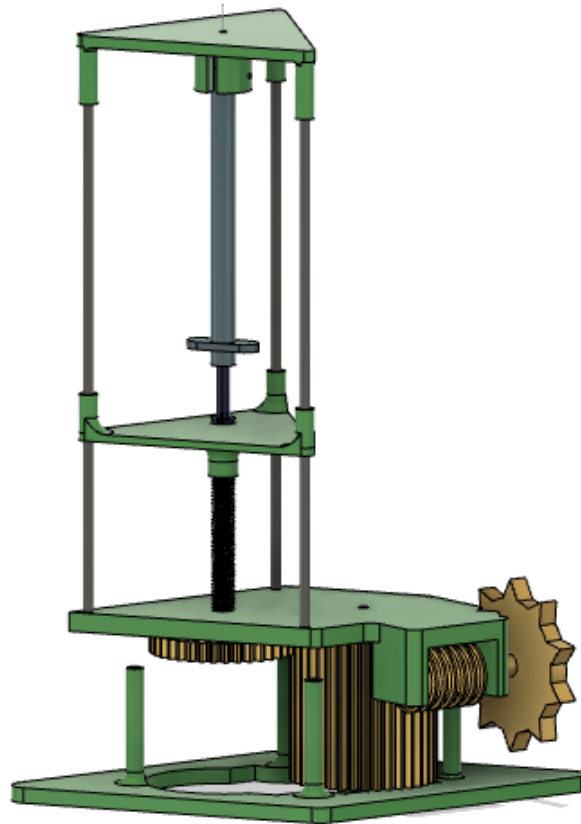


Figura 3.8. *Modelo 3D del dosificador creado en Fusion 360.*

3.3.1. Preparación de la mezcla gaseosa

Para evitar contaminaciones en la mezcla gaseosa que puedan alterar los resultados es importante mantener la mezcla pura, purgando la jeringa al menos dos veces para eliminar cualquier residuo gaseoso. En primer lugar, se vacía todo el aire de la jeringa, luego se llena mediante un conector hermético y una válvula doble se acopla a la jeringa y a la salida del cilindro de gas. Luego, se desconecta la jeringa y se expulsa el gas inyectado, repitiendo este proceso una vez más. Finalmente, luego de la tercera recarga se inserta la jeringa en el dispositivo dosificador para inyectar el gas en la resina y crear la vacuola.

Capítulo 4

Parámetros técnicos

En este capítulo se detallan los parámetros de los objetos de ensayo, las mezclas de gases, el sistema de medición y el circuito utilizado para registrar las descargas al interior de las vacuolas. Cada uno de estos elementos es esencial para garantizar que las mediciones de las descargas parciales sean precisas y confiables, permitiendo un análisis detallado y comparativo de los diferentes gases utilizados.

4.1. Objeto de ensayo

El objeto de ensayo consiste en un disco de resina epoxi, cuyas propiedades eléctricas se muestran en la Tabla 4.1. Los discos tienen un espesor de 5,2 [mm] y diámetro de 9 [cm], con una vacuola esférica de gas de 1,39 [mm] de diámetro centrada a una distancia de 2,5 [mm] de ambas caras. La ubicación precisa de la vacuola es crucial, ya que cualquier desviación podría alterar significativamente la distribución del campo eléctrico y, por ende, las mediciones de las descargas parciales.

4.1.1. Propiedades de la resina

La resina epóxica es un polímero reticulado como el XLPE, donde las cadenas moleculares individuales están unidas entre sí por enlaces químicos transversales. Estos enlaces crean una estructura tridimensional sólida en lugar de las cadenas lineales típicas encontradas en polímeros no reticulados como el poliestireno o polipropileno. Una de las ventajas más importantes de los polímeros reticulados es su baja termoplasticidad, por ende tienen mayor capacidad para conservar sus propiedades mecánicas y químicas, haciéndolos muy utilizada en el campo de la ingeniería.

La resina tiene las siguientes propiedades eléctricas [47]:

Tabla 4.1
PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LA RESINA. [47]

Propiedad	Valor
Permitividad a 1kHz y 27°C	4,25 – 6,35
tan δ a 1kHz y 27°C	0,005 – 0,30
Conductividad a 27°C	$1,67 \times 10^{-12} - 1,25 \times 10^{-9} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

4.1.2. Gases utilizados en las probetas

La composición de los gases de las vacuolas es la siguiente:

- Hidrógeno puro al 99,999 %
- Aire con metano:

Tabla 4.2
COMPOSICIÓN DE AIRE CON METANO.

Compuesto	Cantidad
Nitrógeno	76.19 %
Oxígeno	20.42 %
Metano	2.32 %
Argón	0.9 %

- Gas patrón:

Tabla 4.3
COMPOSICIÓN DEL GAS PATRÓN.

Compuesto	Cantidad
Acetileno	992.1 PPM
Metano	1006 PPM
Propileno	1026PPM
Monóxido de Carbono	1906 PPM
Etano	2003 PPM
Propano	1993 PPM
Etileno	3056 PPM
Hidrógeno	1995 PPM
Dióxido de carbono	1.010 %
Oxígeno	22.98 %
Nitrógeno	74.3123 %

Una vez preparadas las probetas, se colocan entre dos electrodos de bronce y luego se sumerge el conjunto en aceite para minimizar la aparición de descargas parciales superficiales. A continuación, en la Figura 4.1 se muestra un esquema del disco de resina epoxi con la vacuola en su interior, entre dos electrodos de bronce.

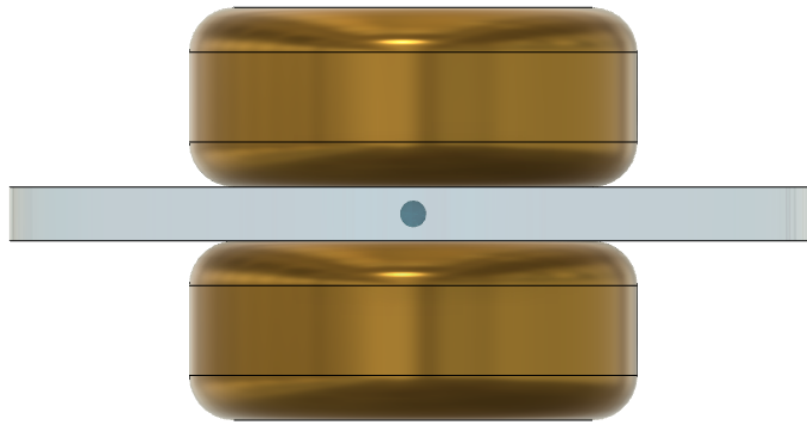


Figura 4.1. *Esquema representativo del objeto de ensayo con la vacuola en su interior.*

4.1.3. Estimación de la tensión mediante software

Para estimar la tensión necesaria para observar descargas parciales, se calcula el campo eléctrico promedio dentro de la vacuola. A partir de este valor, y utilizando la ecuación de Paschen 2.1, se determina el nivel de tensión esperado para el inicio de las descargas.

Dado que la complejidad geométrica y las variaciones en la distribución del campo eléctrico dentro de la vacuola no pueden ser fácilmente capturadas mediante métodos analíticos convencionales, se emplea FEMM para realizar una simulación precisa [47]. De esta forma se obtiene mayor exactitud y se simplifica significativamente los cálculos. En la Figura 4.2 se observa la distribución del campo eléctrico al interior de la vacuola y en la resina que lo rodea.

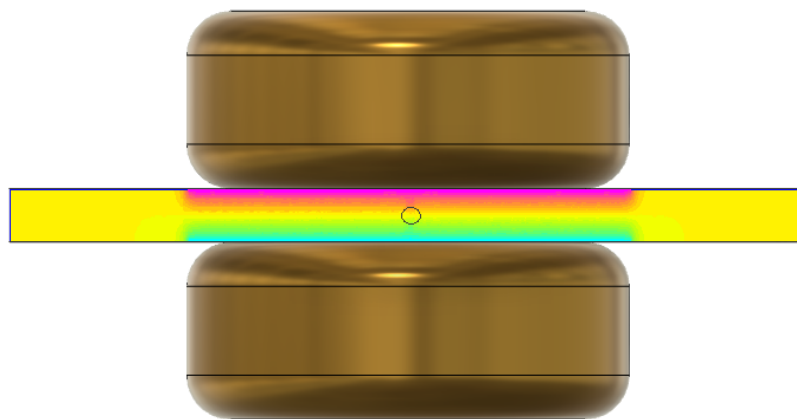


Figura 4.2. *Esquema representativo de la distribución de la tensión al interior de la probeta.*

Realizando un acercamiento, se aprecia en la Figura 4.3 con mayor detalle que el comportamiento de la tensión se ve distorsionado en la vecindad de la vacuola en comparación a lo que ocurre en el resto de la resina y por lo tanto el resultado del cálculo de la tensión utilizado análisis de elementos finitos tiene mayor precisión para estimar la tensión de inicio de descargas parciales.

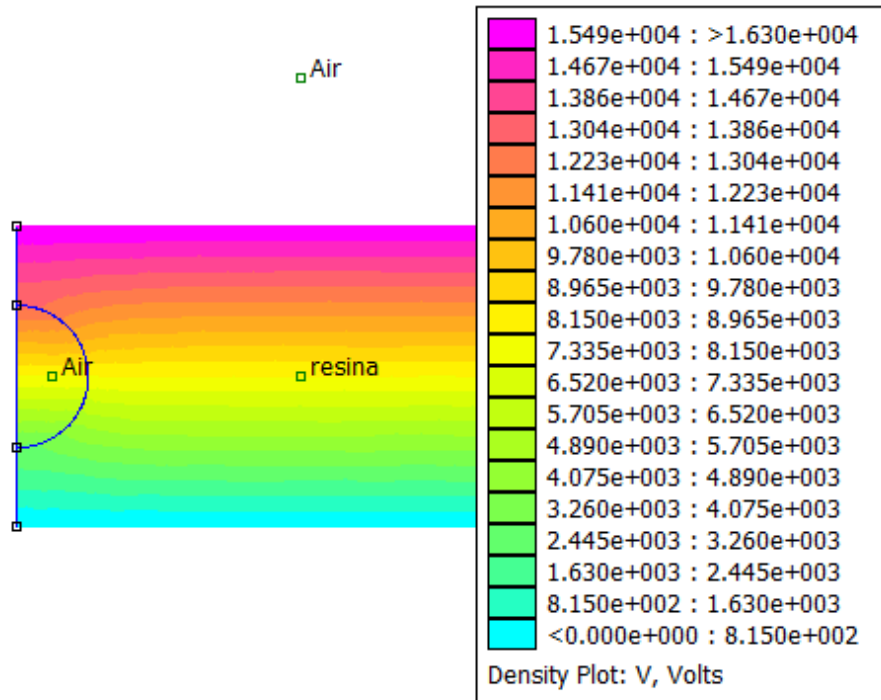


Figura 4.3. Distribución de tensión en la probeta al aplicar 16300[V].

Basándose en la Ley de Paschen y en las dimensiones de la probeta, la tensión estimada para que se inicien las descargas parciales es de 18170 [V]. Considerando que para vacuolas que nunca han sido expuestas a descargas parciales previamente, la tensión de inicio de descargas parciales (PDIV) puede ser hasta un 40% mayor que la estimada [48], por lo que un valor aproximado para la PDIV es de 25,4 [kV].

4.2. Circuito de detección

El circuito de detección, diseñado conforme a la norma IEC 60270, está compuesto por varios elementos que trabajan en conjunto para captar y medir las descargas parciales con alta precisión. A continuación, se detallan las características de cada componente clave y su función dentro del sistema.

La norma IEC 60270 establece valores normalizados para los elementos del circuito que se implementan para realizar las mediciones. En los ensayos realizados, se opta por el circuito de medición indirecto, dado que agrega cierto margen de seguridad para el sistema de adquisición evitando que alguna descarga dañe el equipo. El circuito de medición se muestra en la Figura 4.4:

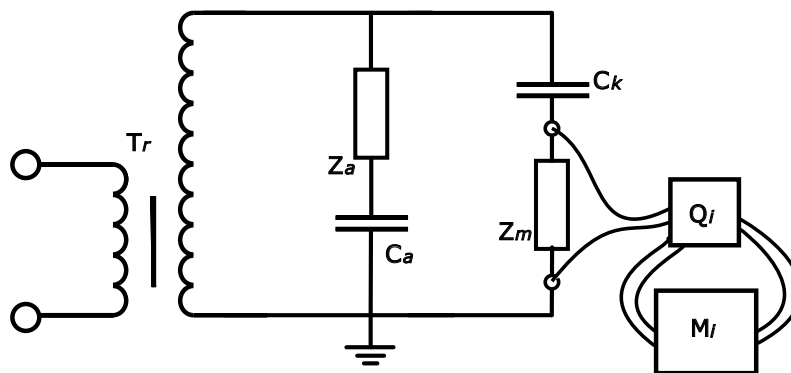


Figura 4.4. Circuito indirecto de medición establecido por la norma IEC 60270.

El detalle de los elementos utilizados y su aplicación, se explica a continuación:

1. Fuente de alta tensión (T_r):

- Modelo: TERCO HV9105
- Número de fases: Monofásico
- Frecuencia: 50/60 Hz
- Voltaje nominal: 100 kV
- Capacidad nominal: 10 kVA
- Corriente nominal: 0.1 A
- Impedancia de cortocircuito: 10 %
- Descarga parcial bajo voltaje nominal: 5 pC
- Dimensiones: 845 x 550 mm (alto x diámetro)
- Peso: 220 kg
- Aplicación: Transformador de prueba con bobinado de acoplamiento para conexión en cascada, utilizado para generar alta tensión AC. El cilindro aislante está hecho de resina epoxi con refuerzo de fibra de vidrio y recubrimiento con barniz anti-rastreo.

2. Resistencia de seguridad (Z_a):

- Tipo: Resistencia de agua
- Valor: 11.1 M Ω
- Fabricación: Fabricada en el laboratorio, fuera de la norma.
- Aplicación: Utilizada para evitar daños en los componentes del circuito en caso de fallas en las probetas que resulten en descargas totales.

3. Objeto de ensayo (C_a):

- El componente bajo prueba, que en este caso es la probeta de resina epóxica.

4. Capacitor de acoplamiento (C_k):

- Modelo: TERCO HV9146 Capacitor de acoplamiento

- Voltaje AC: 120 kV
- Capacitancia: 1 nF
- Longitud/Altura: 1.30 m
- Peso: 56 kg
- Aplicación: Capacitor de acoplamiento para medición de descargas parciales.

5. Impedancia de medición (Z_m):

- Impedancia diseñada para convertir la corriente de descarga en una señal de voltaje medible.

6. Cuadripolo (Q_i):

- Cuadripolo diseñado para separar las señales de referencia y descargas parciales, para utilizarlas con el sistema de adquisición.

7. Sistema de adquisición (M_i):

- Modelo: micro AQUILA de TECHIMP®
- Funcionalidad: El sistema entrega los valores de tiempo transcurrido en segundos y 100 valores de la señal medida con un intervalo de 10 ns entre cada punto.
- Aplicación: Utilizado para extraer información y construir los gráficos PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) y T-F (Tiempo-Frecuencia) mediante el método descrito en la Subsección 2.6.

4.3. Formato de datos

Los datos registrados por el sistema de adquisición se almacenan en dos archivos CSV. El primer archivo contiene la información de la señal capturada según la configuración descrita en la Subsección 2.6, donde se guarda la forma de onda, tal como se muestra en la Figura 4.5.

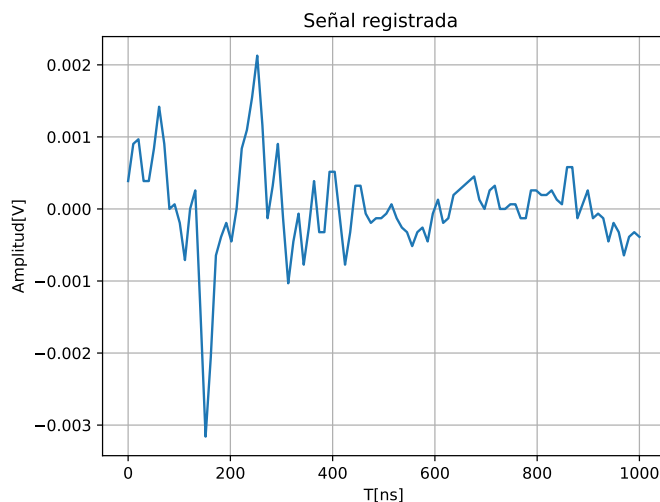


Figura 4.5. Señal almacenada por el sistema de adquisición para el pulso N°6 de la probeta 1 de hidrógeno

El segundo archivo incluye las señales del primer archivo, pero procesadas utilizando las ecuaciones descritas en el marco teórico (subsección 2.6.2). A partir de este procesamiento, se obtienen la frecuencia equivalente, el valor máximo y el tiempo equivalente para cada señal. Esta información se registra junto con el tiempo transcurrido y se almacena en un archivo CSV que se resume en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

DATOS DE AMPLITUD, FASE, FASE_T, FRECUENCIA Y TIEMPO PARA CADA DESCARGA.

N°	Amplitud [V]	Fase [deg]	Fase_t [ns]	Frecuencia [MHz]	Tiempo [s]
0	-0.003160	166.45800	257.5885	9.602267	1.137512
1	0.003096	310.88390	174.3907	7.580184	1.445738
2	-0.003676	162.00540	122.3718	3.875795	1.957791
3	0.003096	355.23760	237.5679	13.692950	3.569307
4	-0.003160	15.43423	305.3574	3.233671	3.730443
N

Con esta información procesada, es posible generar representaciones gráficas mediante los diagramas T-F y PRPD, que luego pueden ser analizados en detalle. Los códigos utilizados para la generación de estos gráficos se encuentran en el anexo .2.2 y .2.2.f.

Capítulo 5

Resultados y discusión

En esta sección se detallan los resultados acompañados de su respectivo procesamiento. Posteriormente se realiza un análisis y comparaciones por cada objeto de ensayo de manera individual y luego con la otra probeta que contiene el mismo gas, contrastando o asimilando características. Finalmente se compacta el análisis considerando todos los objetos de ensayo para así encontrar posibles patrones o cualidades distintivas que permitan clasificar las descargas según el gas contenido en la vacuola.

A continuación se detalla las condiciones ambientales del laboratorio donde se registraron las mediciones:

- Humedad relativa: 32 %
- Temperatura : 20°C

En primer lugar, se utiliza un objeto de ensayo de dimensiones idénticas pero sin vacuolas para registrar a que tensión se observa actividad de descargas parciales en otros componentes del montaje y de esta forma evitar mediciones contaminadas con otras fuentes.

Se determinó que a partir de un nivel de tensión superior a 34,5 [kV] comienzan a registrarse señales de descargas u otras fuentes, por lo que se utilizó $28 \pm 0,1$ [kV] para obtener mediciones sin estas contaminaciones. A ese voltaje no se detecta un nivel considerable de ruido, y además coincide con el valor de tensión a partir del cual debería presentarse actividad de descargas parciales internas, como fue calculado en la Subsección 4.1.3.

Los resultados se presentan indicando el patrón PRPD y la distribución tiempo-frecuencia de las descargas como se indica en las Subsecciones 2.6.1 y 2.6.2. También se calculan los parámetros estadísticos de las descargas y posteriormente se superponen las figuras para realizar una comparación visual de los fenómenos y analizar las posibles correlaciones o diferencias entre los diversos parámetros.

5.1. Obtención de las distribuciones

Las distribuciones de descargas en los patrones PRPD se separan por semiciclo y se descartan los pulsos que se encuentran fuera del área que concentra el 95% de los datos. Esto se realiza con el fin de mitigar la influencia de señales que no necesariamente corresponden a las descargas parciales que se desean caracterizar. El procedimiento consiste en definir los límites en el PRPD tal que los pulsos acotados serán los que se consideran en el posterior análisis y obtención de parámetros estadísticos. A modo de ejemplo, en la Figura 5.1 se observa el PRPD obtenido en la probeta 1 de hidrógeno.

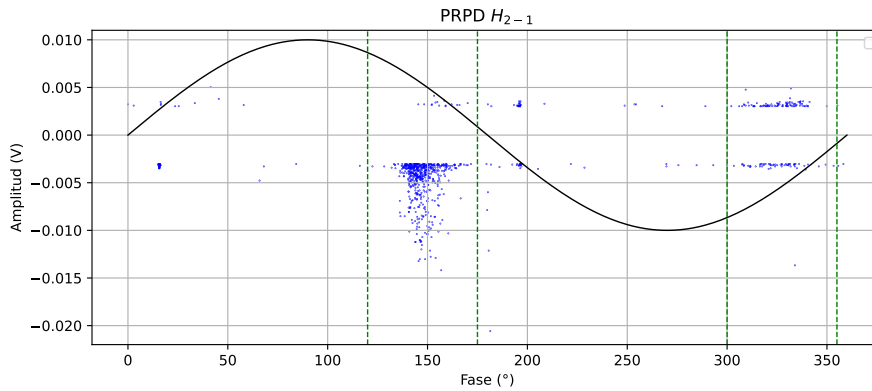


Figura 5.1. Gráfico PRPD para la probeta 1 de hidrógeno con los límites verticales en verde, que acotan los datos en ambos semiciclos.

Luego, se calcula la distribución normal de los datos acotados en cada semiciclo y se procede a obtener los parámetros estadísticos como la amplitud máxima Q_{Max} , la amplitud máxima del percentil 95 Q_{max95} , que se utiliza para filtrar pulsos con amplitud anormal y eliminar aquellos valores que se alejan considerablemente del resto, la amplitud media Q_{Medio} , el número de descargas (N), el valor máximo de fase (Max fase), el valor promedio de fase (Promedio fase), el valor mínimo de fase (Min fase), la curtosis y la oblicuidad de la distribución. En la Figura 5.2 se aprecia la distribución de pulsos acotada para el semiciclo positivo, obtenido del PRPD de la probeta 1 de hidrógeno.

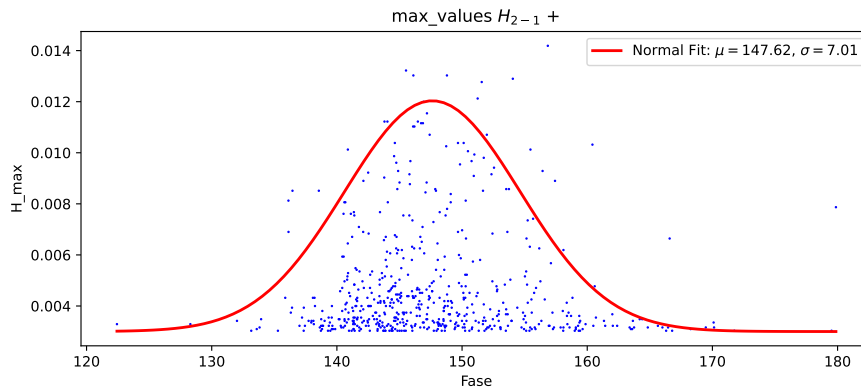


Figura 5.2. Distribución de pulsos en el semiciclo positivo obtenido a partir del PRPD de la probeta 1 de hidrógeno.

5.2. Vacuolas con Hidrógeno

5.2.1. Probeta 1

A partir del PRPD mostrado en la Figura 5.3, los resultados de las descargas ocurridas en la probeta 1 de hidrógeno revelan una predominancia de las descargas en el semiciclo positivo (s+) de la tensión aplicada. En este semiciclo, se registraron 581 pulsos, en contraste con los 141 pulsos observados en el semiciclo negativo (s-), lo que resulta en una relación de 4,12. Este predominio en s+ también se refleja en la amplitud de los pulsos, con un valor máximo de 0,0142 [V] en el semiciclo positivo y 0,0039 [V] en s-. El valor de Q_{max95} en s+ es de 0,0090 [V], mientras que en s- es de 0,0035 [V], lo que implica una relación de 2,81 entre ambas amplitudes. En cuanto a la media de la distribución de pulsos, el semiciclo positivo presenta un valor de 0,0047 [V] mientras que el semiciclo negativo tiene un valor de 0,0032 [V], resultando en una relación de 1,46. Los pulsos se encuentran en un rango entre $179,87^\circ$ y $122,43^\circ$, con una media de $147,62^\circ$ para s+ y un rango entre $302,09^\circ$ y $358,24^\circ$, con una media de $326,39^\circ$ para s-, lo que se asemeja al comportamiento de las descargas internas. La curtosis de las distribuciones en los semiciclos positivo y negativo es de 3,072 y 1,815 respectivamente, lo que indica que las descargas en el semiciclo positivo tienen una mayor concentración de pulsos alrededor de la media, presentando una distribución ligeramente leptocúrtica. Por su parte, la oblicuidad es de 1,875 para s+ y de 1,323 para s-, lo que sugiere una ligera tendencia de los pulsos a ocurrir en valores angulares menores al promedio en ambos semiciclos, pero más pronunciada en s+.

En lo que respecta al análisis en el plano T-F, observado en la Figura 5.4, se identifica un clúster predominante donde la frecuencia de las descargas se encuentra entre 2,684 [MHz] y 5 [MHz], con una duración aproximada entre 75 [ns] y 200 [ns]. Fuera de este clúster, los pulsos presentan un espectro de frecuencias más amplio, desde 3 [MHz] hasta aproximadamente 15 [MHz], con una duración entre 200 [ns] y 310 [ns] aproximadamente. En términos generales, la frecuencia media de todas las descargas es de 5,985 [MHz] con una duración media de 176,3 [ns].

5.2.2. Análisis estadístico

Tabla 5.1

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PRPD DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 1 DE HIDRÓGENO.

PRPD Probeta 1		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0142	QMax [V]	0.0039
0.0090	QMax95 % [V]	0.0035
0.0047	QMedio [V]	0.0032
581	N	141
179.87	Max fase [°]	358.24
147.62	Promedio fase [°]	326.39
122.43	Min fase [°]	302.09
3.072	Curtosis	1.815
1.875	Oblicuidad	1.323

Tabla 5.2

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 1 DE HIDRÓGENO.

T-F Probeta 1	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	2.684
Frec. Max [MHz]	14.899
Frec. Media [MHz]	5.985
Durac. Min [ns]	57.045
Durac. Max [ns]	341.334
Durac. Media [ns]	176.287

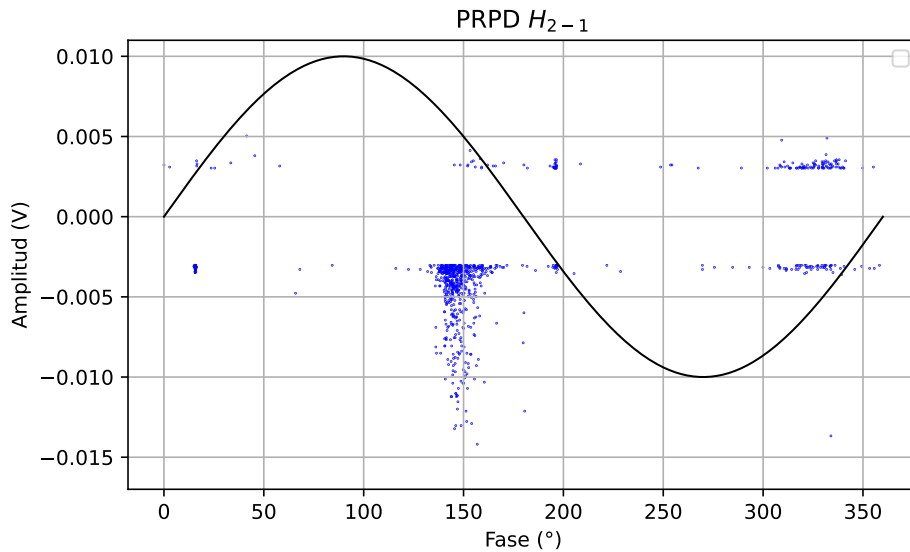


Figura 5.3. Patrón PRPD para la probeta 1 de hidrógeno.

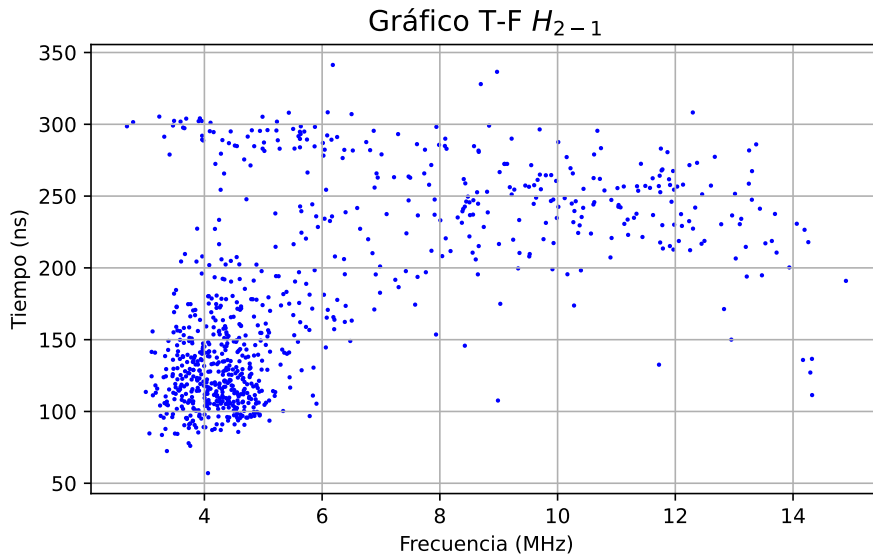


Figura 5.4. Gráfico T-F para la probeta 1 de hidrógeno.

Habiendo establecido las características de las descargas en la probeta 1 de hidrógeno, a continuación, se presentarán los resultados correspondientes a las demás probetas para explorar si estos patrones se repiten o si se observan diferencias significativas. Dado que los procedimientos y parámetros analizados serán similares para cada uno de los objetos de ensayo, el análisis de las probetas restantes seguirá un enfoque estructurado y repetitivo. Esto permitirá identificar y resaltar tanto las consistencias como las variaciones entre ellas. Para facilitar la comprensión, los resultados se presentan en tablas que condensan la información clave de cada probeta. Finalmente, esta información será resumida y visualizada en gráficos comparativos que proporcionarán una visión más clara de las tendencias observadas en el conjunto de datos, permitiendo así una interpretación más eficiente.

5.2.3. Probeta 2

Comenzando con el PRPD indicado en la Figura 5.5, los resultados de las descargas ocurridas en la probeta 2 de hidrógeno indican que al igual que en la probeta 1, hay una mayor cantidad en el semiciclo positivo de la tensión con un número de 685 y 74 pulsos en el semiciclo positivo y negativo respectivamente lo que corresponde a una relación de 9,257. La amplitud también es mayor en el semiciclo positivo, con un valor máximo de 0,0146 [V] y 0,0045 [V] en el semiciclo negativo. Q_{max95} tiene un valor de 0,0095 [V] y 0,0038 [V], lo que da una relación de 2,5 veces la amplitud de los pulsos en s+ en comparación a s-. Por último, la media de la distribución de pulsos tiene un valor de 0,0049 para s+ y 0,0033 para s- lo cual da una relación de 1,48. Los pulsos del semiciclo positivo se encuentran en un rango entre $110,42^\circ$ y $178,92^\circ$, con una media de $149,72^\circ$. Asimismo para el semiciclo negativo el rango corresponde a los ángulos entre $302,59^\circ$ y $358,59^\circ$, con una media de $327,60^\circ$ para s- confirmando que las descargas corresponden a las de tipo internas. La curtosis de las distribuciones de los pulsos de s+ y s- es respectivamente de 1,935 y 5,233, mientras que la oblicuidad es de 1,544 para s+ y 2,168 para s-.

En cuanto a la representación en el plano T-F, mostrada en la Figura 5.6, y después de filtrar una fuente de descargas no deseadas según se detalla en el anexo [6], se observa un clúster principal donde la frecuencia de las descargas se encuentra en un rango entre 1,590 [MHz] y 5 [MHz], con una duración aproximada entre 75 [ns] y 200 [ns]. Los pulsos fuera de este clúster se caracterizan por tener un amplio espectro de frecuencias desde 1,590 [MHz] hasta 15,259 [MHz], donde la duración de estas descargas está acotada a valores desde 200 [ns] hasta 332,878 [ns] aproximadamente. En términos generales, la frecuencia media de todas las descargas posterior al filtrado, es de 5,595 [MHz] con una duración media de 176,55 [ns].

Tabla 5.3

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PRPD DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 2 DE HIDRÓGENO.

PRPD Probeta 2		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0146	QMax [V]	0.00445
0.0095	QMax95 % [V]	0.0038
0.0049	QMedio [V]	0.0033
685	N	74
178.92	Max fase [°]	358.59
149.72	Promedio fase [°]	327.60
110.42	Mín fase [°]	302.59
1.935	Curtosis	5.233
1.544	Oblicuidad	2.168

Tabla 5.4

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 2 DE HIDRÓGENO.

T-F Probeta 2	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	1.590
Frec. Max [MHz]	15.259
Frec. Media [MHz]	5.595
Durac. Min [ns]	74.812
Durac. Max [ns]	332.878
Durac. Media [ns]	176.550

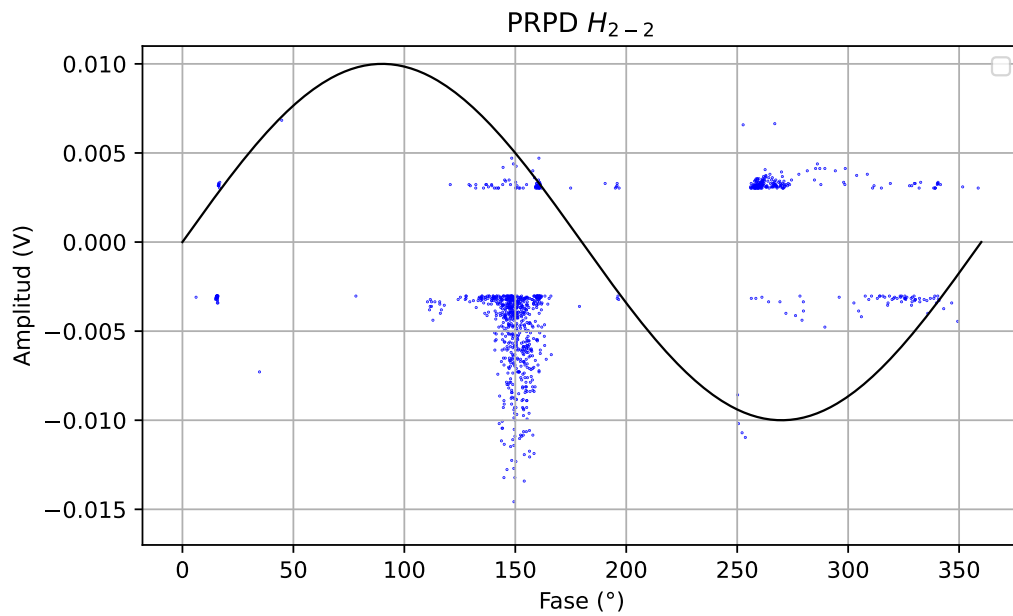


Figura 5.5. Patrón PRPD para la probeta 2 de hidrógeno.

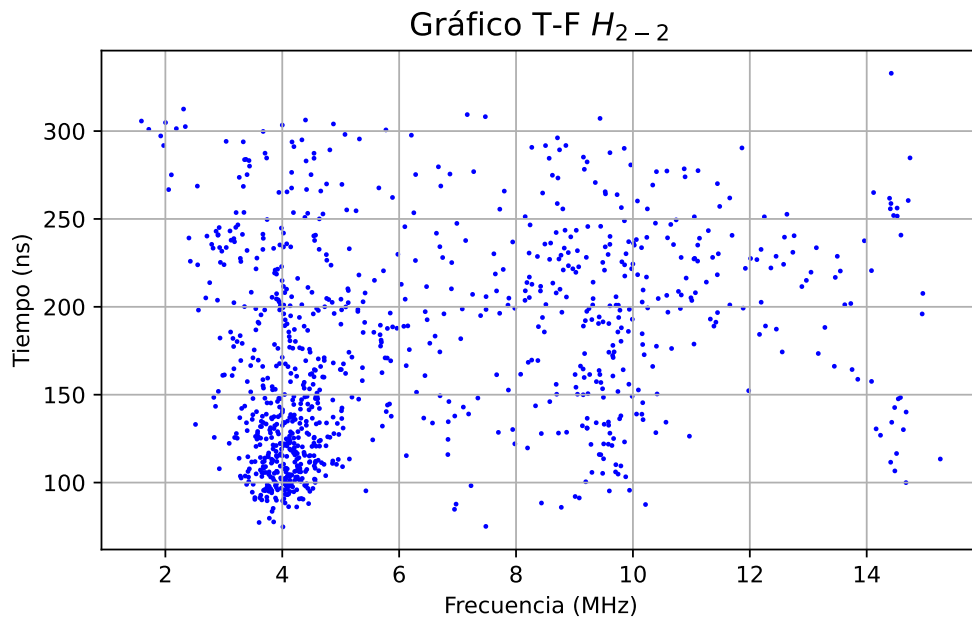


Figura 5.6. Gráfico T-F para la probeta 2 de hidrógeno.

5.2.4. Comparación entre ambas probetas de hidrógeno

Una coincidencia notable entre las probetas 1 y 2, tal como se observa en el PRPD de la Figura 5.7, es la concentración de descargas en el semiciclo positivo en ambas vacuolas. Los pulsos en s+ presentan la mayor amplitud, con valores de 0,0142 [V] y 0,0146 [V] para las probetas 1 y 2 respectivamente. De manera similar, los valores de Q_{max95} son 0,0090 [V] y 0,0095 [V], mientras que la media de los pulsos alcanza 0,0047 [V] y 0,0049 [V]. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s+ están acotadas en un ángulo mínimo de $122,43^\circ$ y $110,42^\circ$ para las probetas 1 y 2, respectivamente, y un ángulo máximo de $179,87^\circ$ y $178,92^\circ$ con medias de $147,62^\circ$ y $149,72^\circ$. La distribución de las descargas muestra un comportamiento ligeramente leptocúrtico, lo que indica que la amplitud máxima de los pulsos se concentra alrededor del valor medio de la fase, lo que también es evidente en el PRPD. La oblicuidad positiva sugiere que los pulsos tienden a ocurrir en valores ligeramente desplazados hacia la izquierda del promedio angular del rango.

Para el semiciclo negativo, después de filtrar las descargas no deseadas, como se describe en el Anexo .1, se observa que las descargas tienen una menor amplitud en comparación con s+, con valores de 0,0038 [V] y 0,0045 [V] para las probetas 1 y 2 respectivamente. Los valores de Q_{max95} son 0,0035 [V] y 0,0039 [V], y la media de los pulsos es de 0,0032 [V] y 0,0033 [V]. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s- se encuentran acotadas en un ángulo mínimo de $302,09^\circ$ y $302,59^\circ$ para las probetas 1 y 2 respectivamente, y un ángulo máximo de $385,24^\circ$ y $358,59^\circ$ con medias de $326,39^\circ$ y $327,60^\circ$. La distribución de las descargas también es leptocúrtica, lo que indica una concentración de amplitudes alrededor del valor medio de la fase, aunque esto no se aprecia con tanta claridad en el PRPD. La oblicuidad positiva sugiere que los pulsos tienden a ocurrir en valores ligeramente desplazados hacia la izquierda del promedio angular del rango.

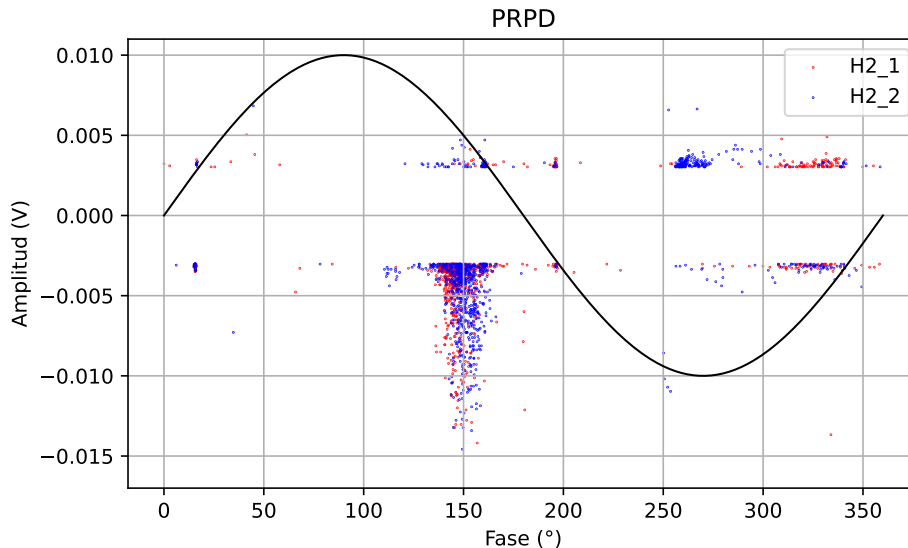


Figura 5.7. Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 de hidrógeno.

En lo que respecta al análisis en el plano T-F, mostrado en la Figura 5.8, se observa que ambas probetas comparten un clúster de descargas centrado aproximadamente en 4 [MHz] con una duración de pulsos de 125 [ns]. También se detecta una zona con des-

cargas exclusivas de la vacuola 2, que como se indica en los Anexos 1 y 2, corresponde a señales indeseadas. Descartando estos pulsos, la frecuencia media de las descargas se sitúa en 5,985 [MHz] y 5,595 [MHz] para las probetas 1 y 2, con una duración media de 176,287 [ns] y 176,550 [ns] respectivamente.

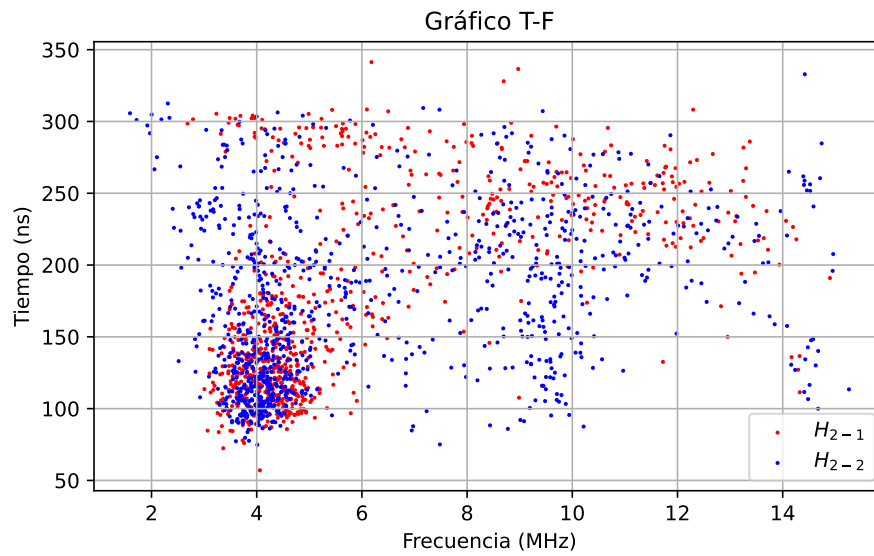


Figura 5.8. Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 de hidrógeno.

5.3. Vacuolas con Metano

5.3.1. Probeta 1

En cuanto al PRPD indicado en la Figura 5.9, los resultados de las descargas registradas en la probeta 1, que contiene una mezcla con metano, indican una notable asimetría en la cantidad de pulsos entre los semiciclos positivo y negativo. En el semiciclo positivo (s+), se registraron 4822 pulsos, mientras que en el semiciclo negativo (s-) se detectaron solo 58 pulsos, lo que representa una relación de 83,14. Este predominio de pulsos en el semiciclo positivo también se refleja en la amplitud de las descargas, con un valor máximo de 0,0088 [V] en s+, frente a los 0,0045 [V] en s-. El valor de $Q_{\max 95}$, que corresponde al valor máximo del 95 % de las descargas, es de 0,0065 [V] en s+ y 0,0039 [V] en s-, lo que indica una relación de 1,66 entre ambas amplitudes. En cuanto a la media de la distribución de pulsos, los valores son 0,005 [V] en s+ y 0,0033 [V] en s-, resultando en una relación de 1,52 entre los semiciclos. Los pulsos en el semiciclo positivo están distribuidos en un rango angular que va de $107,10^\circ$ a $168,10^\circ$, con una media de $150,87^\circ$, mientras que en el semiciclo negativo se distribuyen entre $287,02^\circ$ y $352,54^\circ$, con una media de $328,89^\circ$, lo cual es característico de las descargas internas.

La curtosis de las distribuciones de pulsos en los semiciclos positivo y negativo es de 0,452 y 5,016 respectivamente. Esto sugiere que en s+, la distribución tiene colas más ligeras y una menor cantidad de valores extremos, mientras que en s-, la distribución presenta colas más pesadas, lo que indica una mayor presencia de valores atípicos en el semiciclo negativo. En cuanto a la oblicuidad, el valor es de 0,172 para s+, lo que indica una ligera simetría en la distribución, mientras que en s-, el valor es de 2,210, lo que sugiere una mayor concentración de pulsos hacia el extremo izquierdo del rango angular, reflejando una distribución más sesgada.

Respecto a representación en el plano T-F, mostrada en la Figura 5.10, se observa un único clúster significativo de descargas, con frecuencias que oscilan entre los 4 [MHz] y los 10 [MHz], y una duración que varía entre 56,247 [ns] y 346,477 [ns]. En términos generales, la frecuencia media de las descargas en la probeta es de 7,231 [MHz], mientras que la duración media es de 151,455 [ns].

5.3.2. Análisis estadístico

Tabla 5.5

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS DESCARGAS
PARA LA VACUOLA 1 DE METANO.

Probeta 1		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0088	QMax [V]	0.0045
0.0065	QMax95 % [V]	0.0039
0.0050	QMedio [V]	0.0033
4822	N	58
168.10	Max fase [°]	352.54
150.87	Promedio fase [°]	328.89
107.10	Min fase [°]	287.02
0.452	Curtosis	5.016
0.172	Oblicuidad	2.210

Tabla 5.6

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE
LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 1 DE METANO.

T-F Probeta 1	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	1.576
Frec. Max [MHz]	15.327
Frec. Media [MHz]	7.231
Durac. Min [ns]	56.247
Durac. Max [ns]	346.477
Durac. Media [ns]	151.455

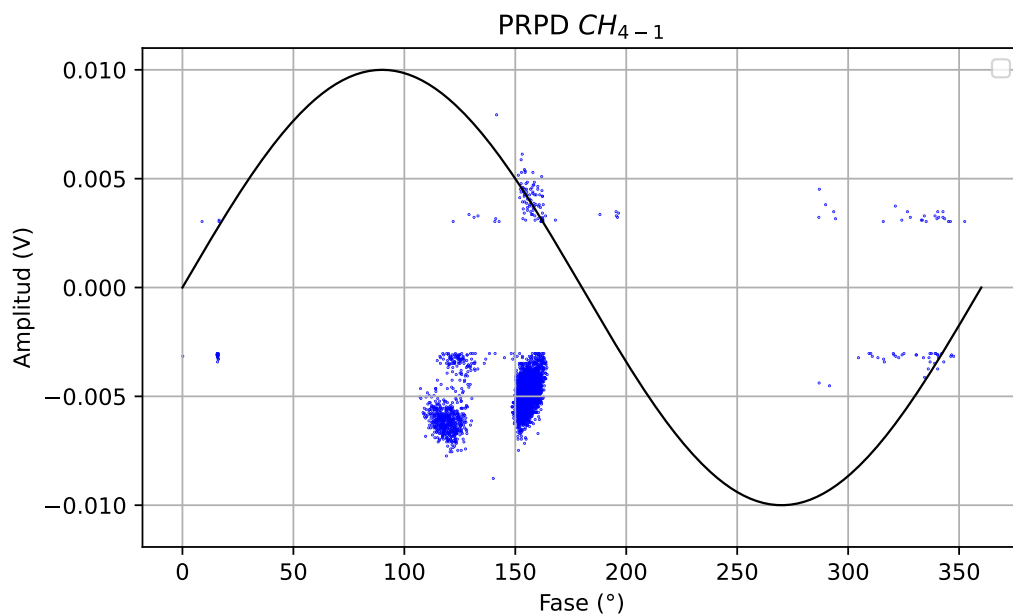


Figura 5.9. Patrón PRPD para la probeta 1 de metano.

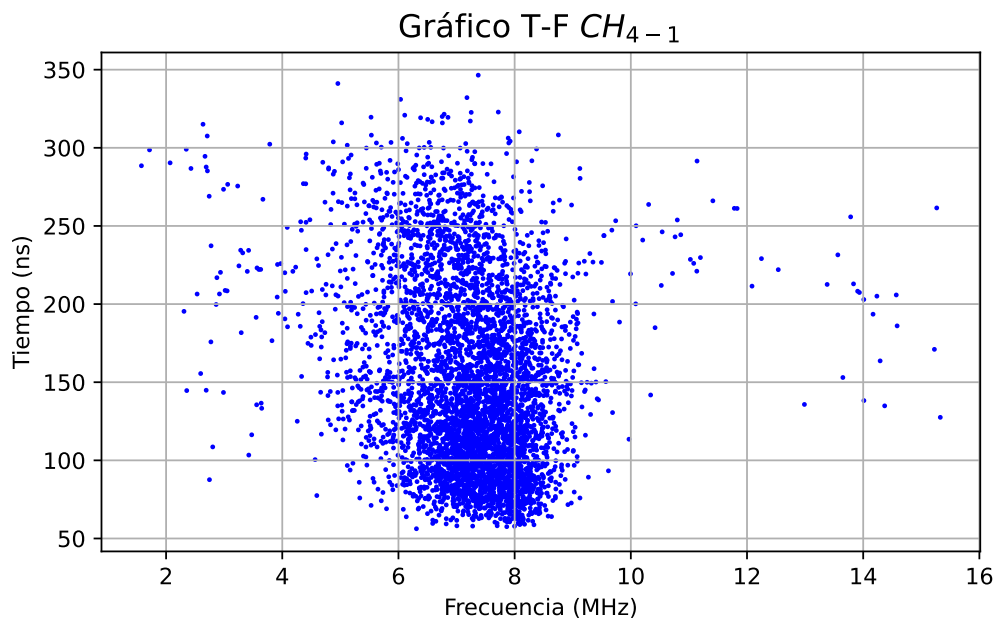


Figura 5.10. Gráfico T-F para la probeta 1 de metano.

5.3.3. Probeta 2

Comenzando con el PRPD indicado en la Figura 5.11, las descargas ocurridas en la probeta 2 de mezcla con metano indican que, a diferencia de las descargas en la probeta 1, la mayor cantidad se concentra en el semiciclo negativo de la tensión, con un número de 8950 y 876 pulsos en el semiciclo positivo, lo que corresponde a una relación de 10,22. Sin embargo, la mayor amplitud se registra en el semiciclo positivo, con un valor máximo de 0,0108 [V] y 0,0050 [V] en el semiciclo negativo. El valor de $Q_{\max 95}$ es de 0,0103 [V] y 0,0037 [V], lo que da una relación de 2,78 veces la amplitud de los pulsos en s+ en comparación a s-. Por último, la media de la distribución de pulsos tiene un valor de 0,0056 [V] para s+ y 0,0032 [V] para s-, lo cual da una relación de 1,75. Los pulsos del semiciclo positivo se encuentran en un rango de fase entre $104,55^\circ$ y $178,71^\circ$, con una media de $146,61^\circ$. De manera análoga, para el semiciclo negativo, el rango corresponde a los ángulos entre $294,69^\circ$ y $359,94^\circ$, con una media de $323,12^\circ$, comportamiento similar a las descargas internas. La curtosis de las distribuciones de los pulsos de s+ y s- es de -1,420 y 3,45 respectivamente, mientras que la oblicuidad es de 0,285 para s+ y 1,621 para s-.

Respecto a la representación en el plano T-F, indicada en la Figura 5.12, se distinguen dos cúmulos principales, donde la frecuencia de las descargas del cúmulo más significativo se encuentra en un rango aproximado entre 4 [MHz] y 9 [MHz], con una duración que varía aproximadamente entre 160 [ns] y 320 [ns]. Los pulsos que se encuentran en el clúster inferior están directamente asociados a las descargas de mayor amplitud que son apreciables en el PRPD de la Figura 5.11 y se ve con mayor detalle en Anexo 4 y 3. Estos pulsos se encuentran en un rango aproximado entre 6 [MHz] y 8 [MHz], con una duración que varía aproximadamente entre 59 [ns] y 160 [ns]. En términos generales, la frecuencia media de todas las descargas es de 6,417 [MHz] con una duración media de 237,985 [ns].

Tabla 5.7

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS DESCARGAS
PARA LA VACUOLA 2 DE METANO.

Probeta 2		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0108	QMax [V]	0.0050
0.0103	QMax95 % [V]	0.0037
0.0056	QMedio [V]	0.0032
876	N	8950
178.71	Max fase [°]	359.94
146.61	Promedio fase [°]	323.12
104.55	Min fase [°]	294.69
-1.420	Curtosis	3.45
0.285	Oblicuidad	1.621

Tabla 5.8

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE
LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 2 DE METANO.

T-F Probeta 2	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	3.022
Frec. Max [MHz]	14.015
Frec. Media [MHz]	6.417
Durac. Min [ns]	59.300
Durac. Max [ns]	341.713
Durac. Media [ns]	237.985

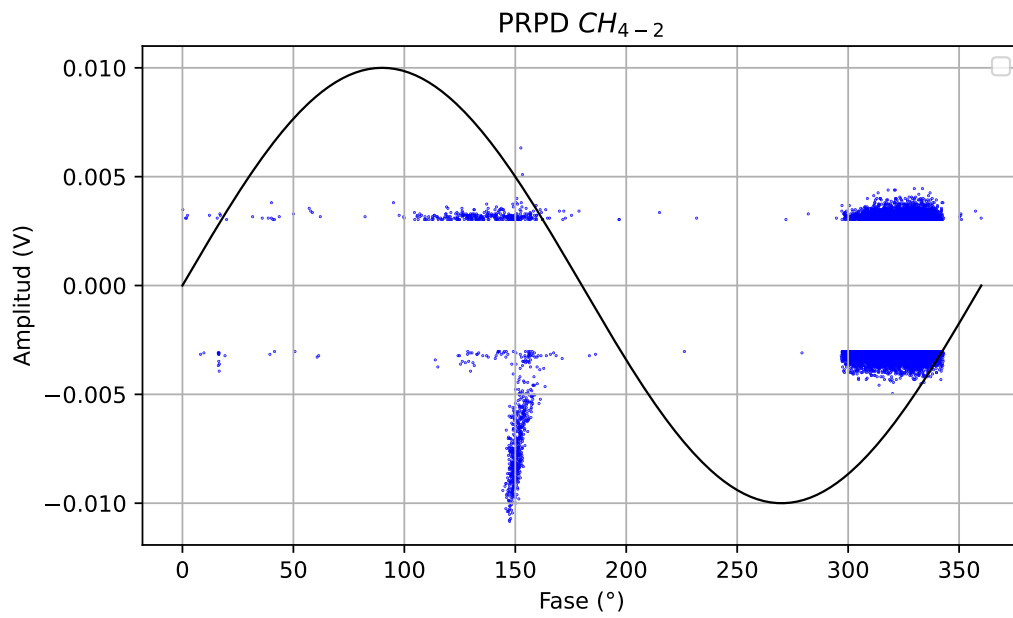


Figura 5.11. Patrón PRPD para la probeta 2.

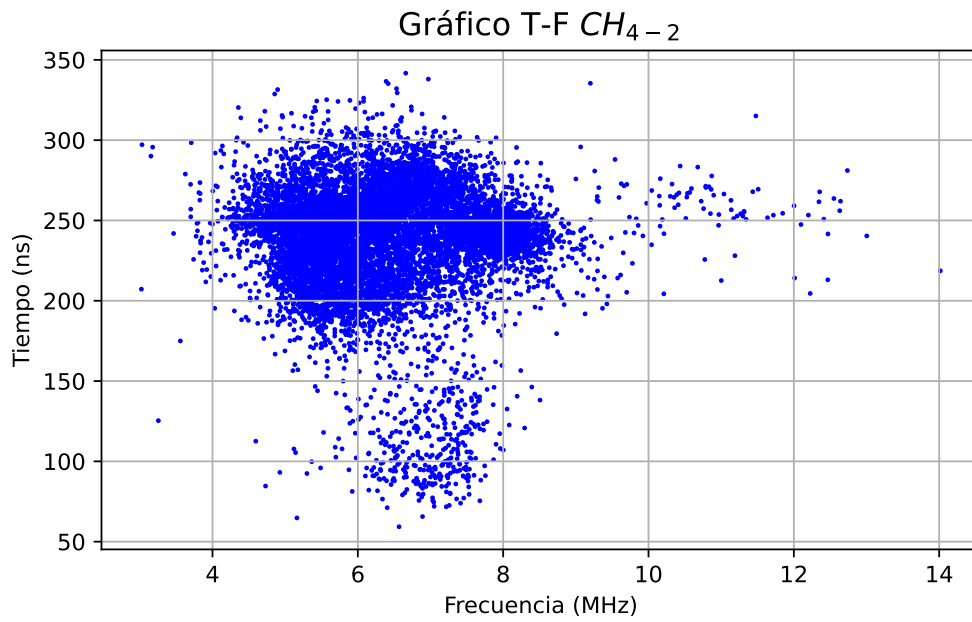


Figura 5.12. Gráfico T-F para la probeta 2 de metano.

5.3.4. Comparación entre ambas probetas de metano

En el PRPD indicado en la Figura 5.13 se observa que las descargas de mayor amplitud se concentran en el semiciclo positivo para ambas vacuolas, con valores de 0,0088 [V] y 0,0108 [V] para las probetas 1 y 2, respectivamente. Asimismo, $Q_{\max 95}$ tiene valores de 0,0065 [V] y 0,0103 [V], y la media de los pulsos es de 0,0050 [V] y 0,0056 [V]. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s+ están acotadas en un ángulo mínimo de $107,10^\circ$ y $104,55^\circ$ para las probetas 1 y 2 respectivamente, con un ángulo máximo de $168,10^\circ$ y $178,71^\circ$, y medias de $150,87^\circ$ y $146,61^\circ$. La distribución de las descargas en la probeta 1 es ligeramente leptocúrtica, con un valor de 0.4052, lo que indica una aproximación a la distribución normal. En cambio, la distribución en la probeta 2 es ligeramente platocúrtica, lo que sugiere que los pulsos tienden a concentrarse hacia la base de la distribución. Por último, la oblicuidad en ambas probetas es prácticamente nula, lo que indica que los pulsos ocurren cerca del promedio angular.

En el semiciclo negativo, la probeta 2 muestra una mayor cantidad de pulsos, superando en 10.21 veces a los de s+, lo que representa la diferencia más notable entre ambos objetos de ensayo. Sin embargo, las descargas en s- presentan una amplitud menor que en s+, con valores de 0,0045 [V] y 0,0050 [V] para las probetas 1 y 2 respectivamente. Del mismo modo, $Q_{\max 95}$ es de 0,0039 [V] y 0,0037 [V], y la media de los pulsos es de 0,0032 [V] y 0,0033 [V]. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s- están acotadas entre $287,02^\circ$ y $294,94^\circ$ para las probetas 1 y 2, con un ángulo máximo de $352,54^\circ$ y $359,94^\circ$, y medias de $328,89^\circ$ y $323,12^\circ$. La distribución de las descargas es leptocúrtica, lo que indica una mayor concentración de los pulsos cerca del valor medio de la fase. La oblicuidad positiva sugiere que los pulsos tienden a ocurrir ligeramente hacia la izquierda del promedio angular.

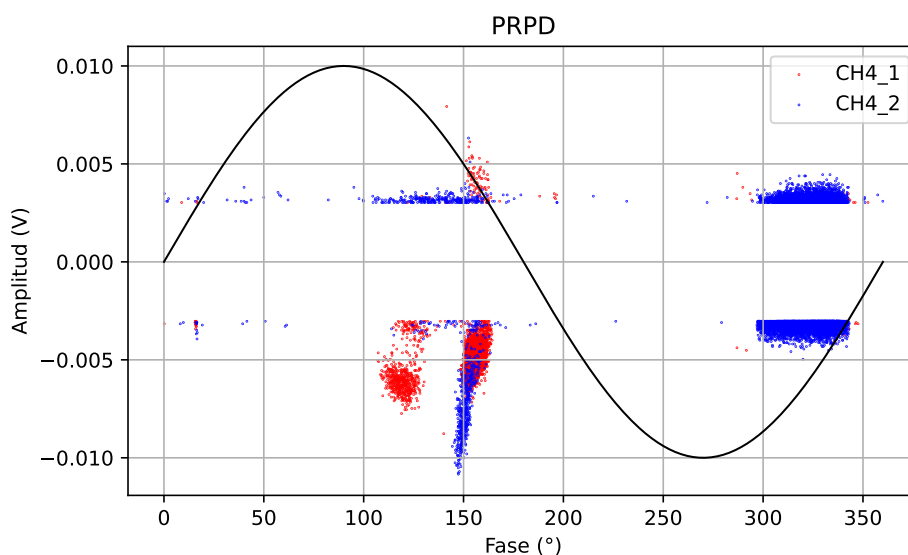


Figura 5.13. Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 de mezcla con metano.

Respecto al plano T-F indicado en la Figura 5.14, se aprecia una gran diferencia en la duración de los pulsos entre ambas probetas. Aunque coinciden en que la mayoría de las descargas ocurren en un rango de frecuencias similar, las descargas en s- son más numerosas y tienen mayor duración en la probeta 2. La frecuencia media de las descargas es de 7,231 [MHz] y 6,417 [MHz] para las probetas 1 y 2 respectivamente, mientras que la duración media es de 151,455 [ns] y 237,985 [ns], evidenciando que los pulsos en la probeta 1 tienen una menor duración.

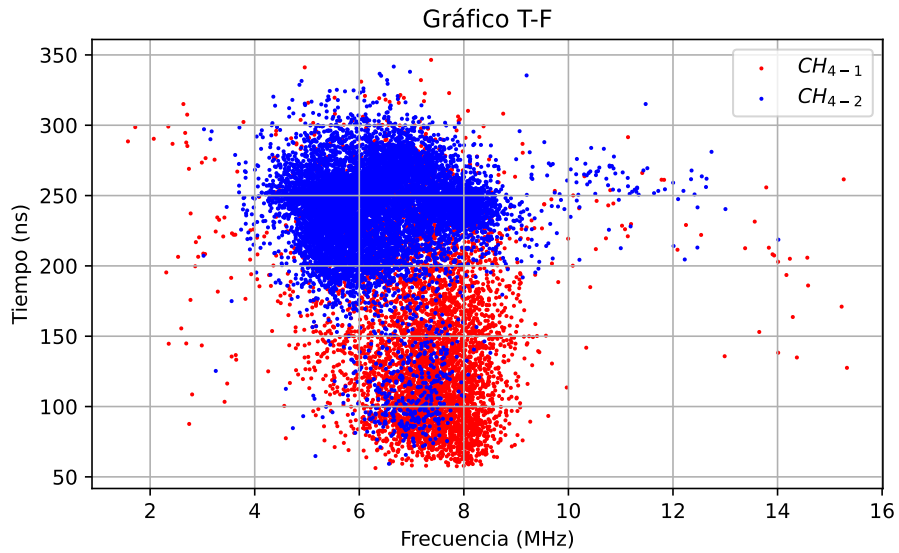


Figura 5.14. Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 de mezcla con metano.

5.4. Vacuolas con gas patrón

5.4.1. Probeta 1

Comenzando con el PRPD mostrado en la Figura 5.15, los resultados de las descargas ocurridas en la probeta 1 de la vacuola con gas patrón indican una mayor presencia de descargas en s+, con un número de 4285 y 636 pulsos en s- respectivamente, lo que corresponde a una relación de 6,73. La amplitud también es mayor en el semiciclo positivo, con un valor máximo de 0,0139 [V] y 0,0042 [V] en el semiciclo negativo. $Q_{\max 95}$ tiene un valor de 0,0127 [V] y 0,0036 [V], lo que da una relación de 3.52 veces la amplitud de los pulsos en s+ en comparación a s-. Por último, la media de la distribución de pulsos tiene los siguientes valores para s+ y s-: 0,0070 [V] y 0,0032 [V], lo cual da una relación de 2.18. Los pulsos se encuentran en un rango entre $99,82^\circ$ y $165,03^\circ$, con una media de $137,78^\circ$ para s+, y un rango entre $293,2^\circ$ y $343,2^\circ$, con una media de $316,26^\circ$ para s-, confirmando que las descargas corresponden a las de tipo internas. La curtosis de las distribuciones de los pulsos de s+ y s- es de -1,292 y 2,424, respectivamente, mientras que la oblicuidad es de 0,323 para s+ y 1,449 para s-.

Respecto a la representación en el plano T-F que se indica en la Figura 5.16, se observa un cúmulo importante donde la frecuencia de las descargas se encuentra en un rango aproximado entre 2 [MHz] y 9 [MHz], con una duración entre 55 [ns] y 175 [ns]. Los pulsos fuera de este clúster tienen una frecuencia mínima cercana a los 3 [MHz] y se extiende hasta 11 [MHz] aproximadamente, con una duración acotada entre 175 [ns] y 300 [ns]. En términos generales, la frecuencia media de todas las descargas es de 6,357 [MHz], con una duración media de 134,746 [ns].

5.4.2. Análisis estadístico

Tabla 5.9

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS DESCARGAS
PARA LA VACUOLA 1 CON GAS PATRÓN.

Probeta 1		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0139	QMax [V]	0.0042
0.0127	QMax95 % [V]	0.0036
0.0070	QMedio [V]	0.0032
4285	N	636
165.03	Max fase [°]	343.20
137.78	Promedio fase [°]	316.26
99.82	Min fase [°]	293.20
-1.292	Curtosis	2.424
0.323	Oblicuidad	1.449

Tabla 5.10

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE
LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 1 CON GAS
PATRÓN.

T-F Probeta 1	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	1.930
Frec. Max [MHz]	14.595
Frec. Media [MHz]	6.357
Durac. Min [ns]	53.554
Durac. Max [ns]	370.703
Durac. Media [ns]	134.746

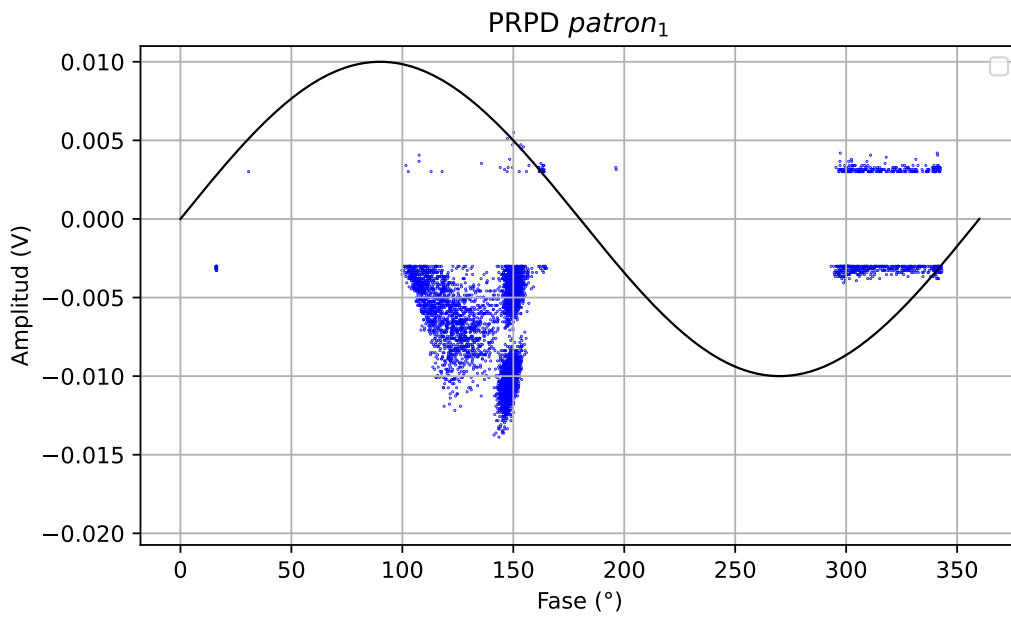


Figura 5.15. Patrón PRPD para la probeta 1 con gas patrón.

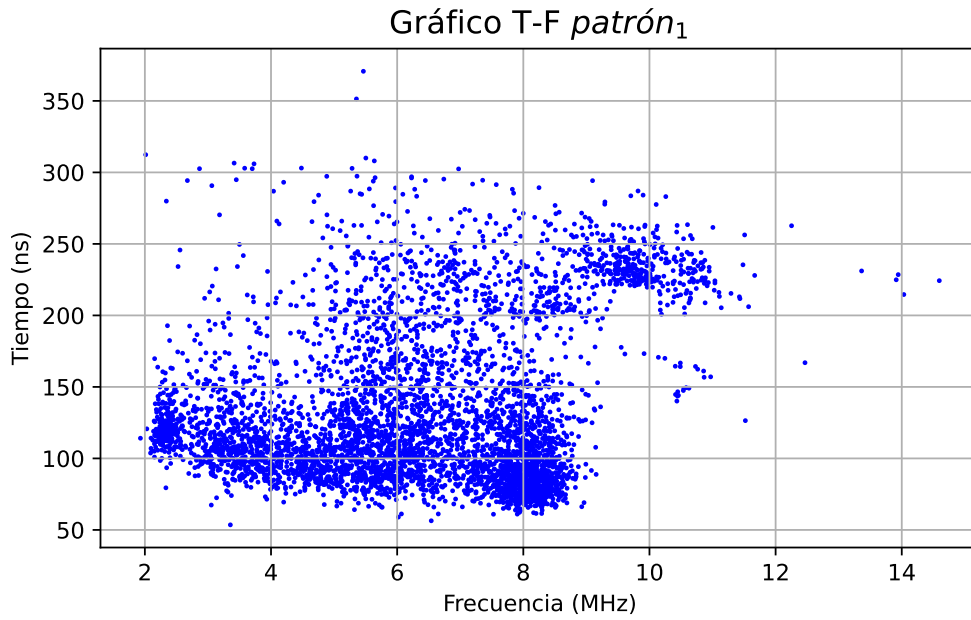


Figura 5.16. Gráfico T-F para la probeta 1 con gas patrón.

5.4.3. Probeta 2

Comenzando con el PRPD que se muestra en la Figura 5.17, los resultados de las descargas ocurridas en la probeta 2 de gas patrón indican que las descargas, al igual que en la probeta 1, superan en número al semiciclo negativo con 4884 y 46 pulsos en s+ y s- respectivamente, lo que corresponde a una relación de 106,17. La amplitud también es mayor en el semiciclo positivo, con un valor máximo de 0,0189 [V] y 0,0035 [V] en el semiciclo negativo. $Q_{\max 95}$ tiene un valor de 0,0192 [V] y 0,0034 [V], lo que da una relación de 5,64 veces la amplitud de los pulsos en s- en comparación a s+. Por último, la media de la distribución de pulsos tiene un valor de 0,0105 [V] para s+ y 0,0031 [V] para s-, lo cual da una relación de 3,39. Los pulsos del semiciclo positivo se encuentran en un rango entre 101,62° y 172,00°, con una media de 137,44°. De igual manera, para el semiciclo negativo, el rango corresponde a los ángulos entre 306,49° y 345,68°, con una media de 329,17° para s-, característica de las descargas internas. La curtosis de las distribuciones de los pulsos de s+ y s- es respectivamente de -1,305 y 0,817, mientras que la oblicuidad es de -0,130 para s+ y 1,320 para s-.

Respecto a la representación en el plano T-F indicada en la Figura 5.18, se distinguen 3 pequeños cúmulos donde la frecuencia de las descargas se encuentra en un rango entre 3 [MHz] y 7 [MHz], con una duración aproximada entre 60 [ns] y 175 [ns]. Los pulsos fuera de este clúster se caracterizan por tener un amplio espectro de frecuencias desde 1,878 [MHz] hasta 14,543 [MHz], donde la duración de estas descargas está acotada a valores entre 175 [ns] hasta 330 [ns] aproximadamente. En términos generales, la frecuencia media de todas las descargas es de 6,457 [MHz] con una duración media de 110,126 [ns].

Tabla 5.11

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 2 CON GAS PATRÓN.

Probeta 2		
Positivo	Parámetro	Negativo
0.0189	QMax [V]	0.0035
0.0192	QMax95 % [V]	0.0034
0.0105	QMedio [V]	0.0031
4884	N	46
172.00	Max fase [°]	345.68
137.44	Promedio fase [°]	329.17
101.62	Min fase [°]	306.49
-1.305	Curtosis	0.817
-0.130	Oblicuidad	1.320

Tabla 5.12

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL PLANO T-F DE LAS DESCARGAS PARA LA VACUOLA 2 CON GAS PATRÓN.

T-F Probeta 2	
Parámetro	Valor
Frec. Min [MHz]	1.878
Frec. Max [MHz]	14.543
Frec. Media [MHz]	6.547
Durac. Min [ns]	54.103
Durac. Max [ns]	329.598
Durac. Media [ns]	110.126

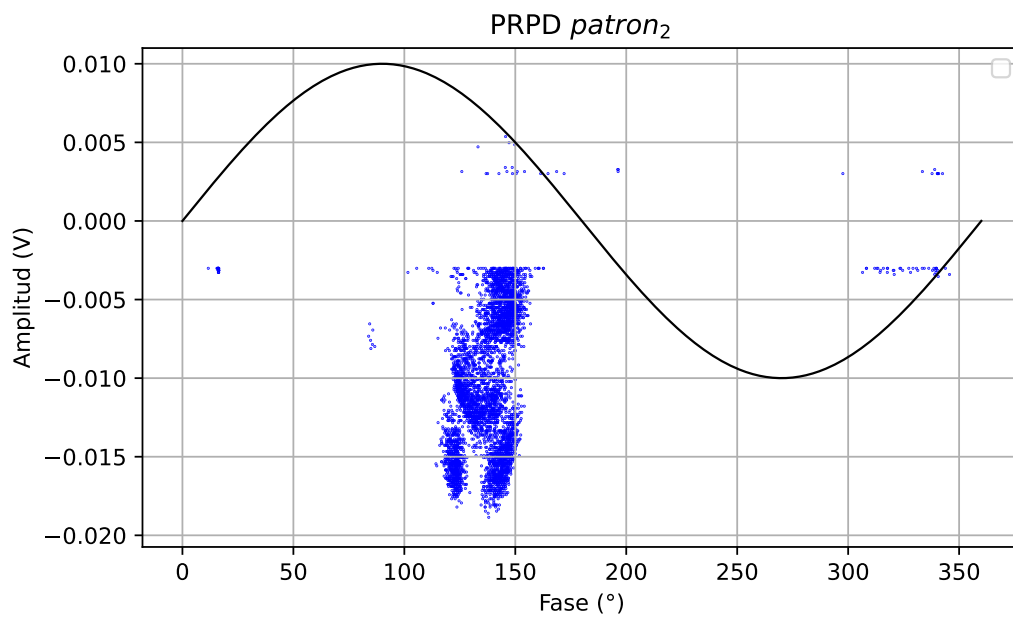


Figura 5.17. Patrón PRPD para la probeta 2 con gas patrón.

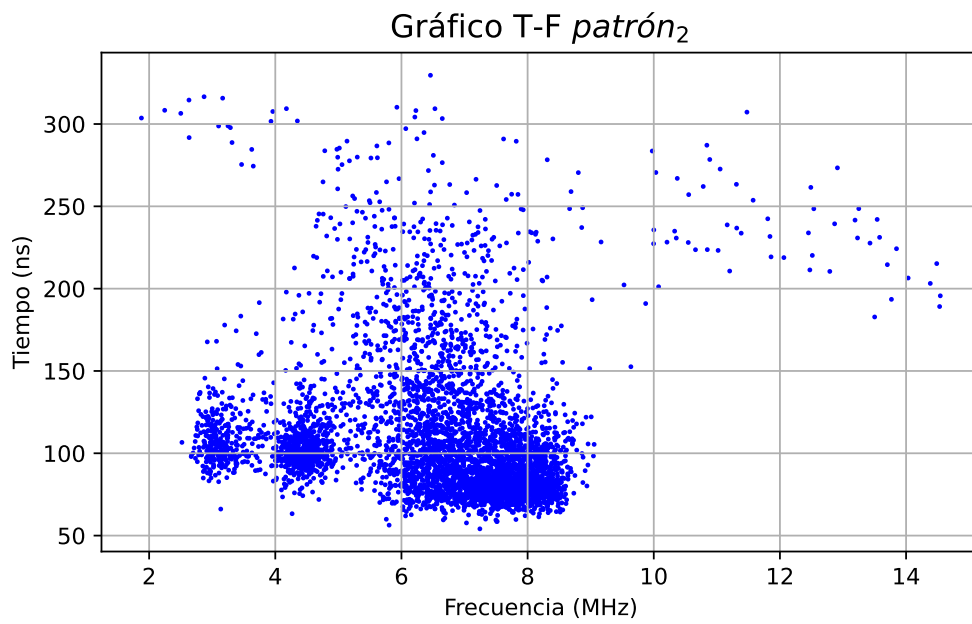


Figura 5.18. Gráfico T-F para la probeta 2 con gas patrón.

5.4.4. Comparación entre ambas probetas de gas patrón

En el PRPD del gas patrón (Figura 5.20), se observa que las descargas de mayor amplitud se concentran nuevamente en el semiciclo positivo para ambas vacuolas, con valores máximos de 0,0139 [V] y 0,0189 [V] para las probetas 1 y 2, respectivamente. De igual manera, $Q_{\max 95}$ presenta valores de 0,0127 [V] y 0,0192 [V], mientras que la media de los pulsos es de 0,0070 [V] para la probeta 1 y 0,0105 [V] para la probeta 2. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s+ están acotadas en un ángulo mínimo de $99,82^\circ$ y $101,62^\circ$ para las probetas 1 y 2, respectivamente, y un ángulo máximo de $165,03^\circ$ y $172,00^\circ$, con una media de $137,78^\circ$ y $137,44^\circ$. La distribución de las descargas muestra una ligera platicurtosis, con valores de $-1,292$ y $-1,305$ para las probetas 1 y 2, lo que indica que los pulsos tienden a concentrarse levemente hacia la base de la distribución. Por último, la oblicuidad tiene un valor cercano a cero, con 0,323 para la probeta 1 y $-0,130$ para la probeta 2, lo que sugiere que los pulsos ocurren en valores cercanos al promedio angular del rango.

De manera similar, para el semiciclo negativo, la amplitud máxima es de 0,0042 [V] y 0,0035 [V] para las probetas 1 y 2, respectivamente. Asimismo, $Q_{\max 95}$ tiene valores de 0,0036 [V] y 0,0034 [V], mientras que la media de los pulsos es de 0,0032 [V] para la probeta 1 y 0,0031 [V] para la probeta 2. En cuanto a los ángulos de fase, las descargas en s- están acotadas en un ángulo mínimo de $293,20^\circ$ y $306,49^\circ$ para las probetas 1 y 2, respectivamente, y un ángulo máximo de $343,20^\circ$ y $345,68^\circ$, con una media de $316,26^\circ$ y $329,17^\circ$. La distribución de las descargas es levemente leptocúrtica, lo que indica que la amplitud máxima de los pulsos se concentra con mayor peso en el valor medio de la fase. Finalmente, la oblicuidad tiene un valor positivo, lo que significa que los pulsos tienden a ocurrir ligeramente desplazados hacia la izquierda del promedio angular del rango.

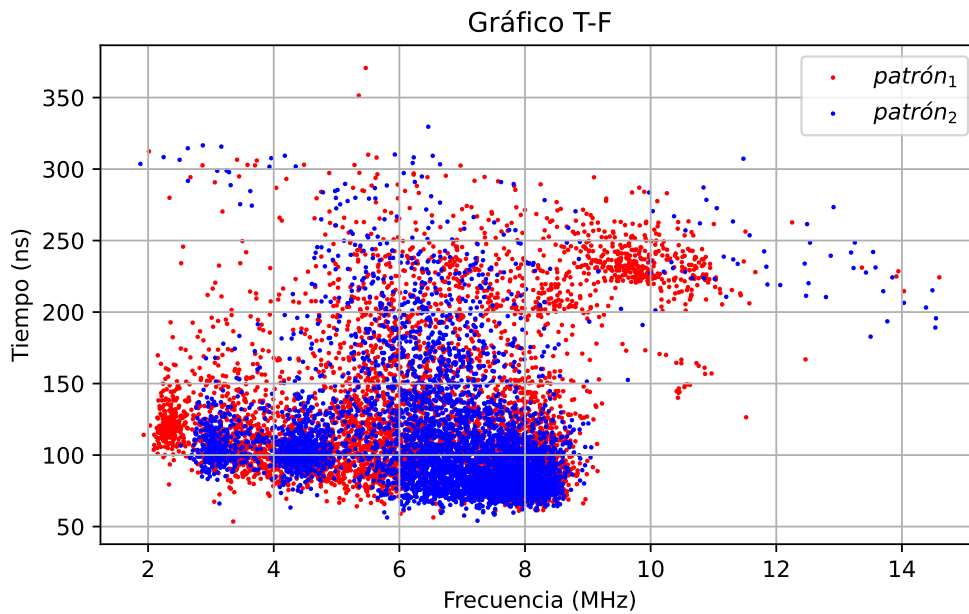


Figura 5.19. Gráfico T-F combinado para las probetas 1 y 2 con gas patrón.

En cuanto al análisis del plano T-F de los pulsos (Figura 5.19), se distingue un comportamiento similar en ambas probetas, con un clúster inferior que abarca un amplio espectro de frecuencias, desde 2 [MHz] hasta 9 [MHz] aproximadamente, y una duración de pulso menor a 200 [ns]. La frecuencia media de las descargas ocurre en 6,357 [MHz] y 6,547 [MHz] para las probetas 1 y 2, respectivamente, mientras que la duración media es de 134,746 [ns] para la probeta 1 y 110,126 [ns] para la probeta 2.

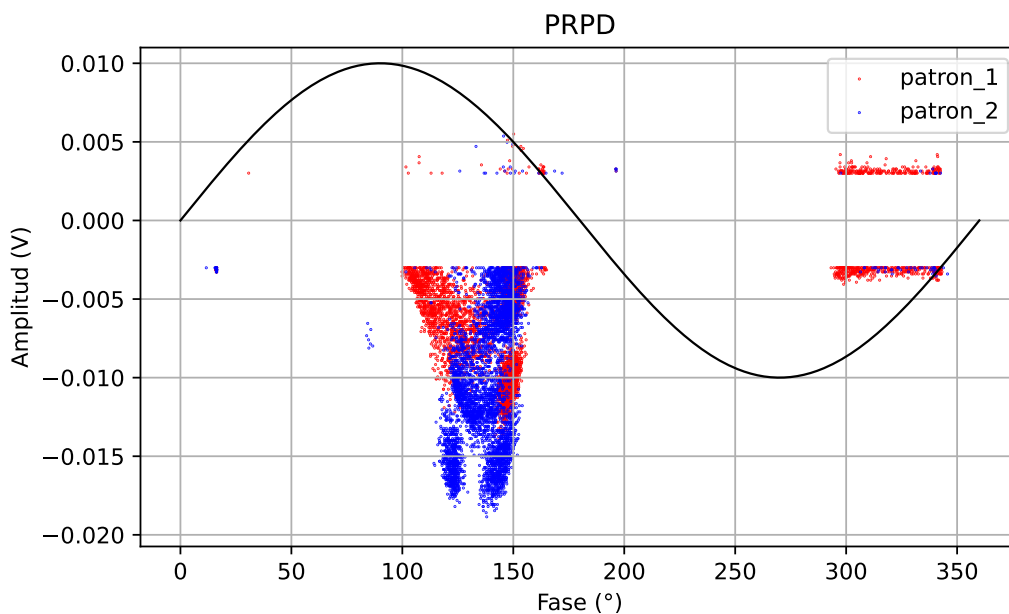


Figura 5.20. Patrón PRPD combinado para las probetas 1 y 2 con gas patrón.

Para cerrar el análisis individual de las seis probetas, se pueden identificar patrones y diferencias clave en el comportamiento de las descargas parciales según el gas contenido en las vacuolas. En términos generales, las descargas de mayor amplitud y frecuencia se concentran en el semiciclo positivo de la tensión aplicada en todas las probetas, siendo especialmente notable en aquellas con hidrógeno y gas patrón. Sin embargo, se observan variaciones significativas en la cantidad de pulsos, los valores de amplitud máxima, las medias de las distribuciones y los parámetros estadísticos como la curtosis y la oblicuidad.

Por ejemplo, las probetas de hidrógeno presentan una clara asimetría entre los semiciclos, con una mayor cantidad y amplitud de pulsos en el semiciclo positivo y valores de frecuencia y duración de pulsos relativamente consistentes. Las probetas con mezcla de metano muestran comportamientos más variables; en una de ellas, las descargas predominan en el semiciclo positivo, mientras que en la otra, se concentran en el semiciclo negativo, aunque en ambos casos, las amplitudes máximas más altas se registran en el semiciclo positivo. Las probetas de gas patrón exhiben un comportamiento consistente entre sí, con descargas de mayor amplitud en el semiciclo positivo y distribuciones de pulsos que tienden a ser platicúrticas.

Estas observaciones sugieren que los diferentes gases influyen en las características de las descargas parciales, afectando parámetros como la amplitud, la frecuencia, la duración y la distribución angular de los pulsos. Los valores estadísticos calculados proporcionan indicios de patrones distintivos asociados a cada tipo de gas, lo que abre la posibilidad de

clasificarlos según sus características eléctricas.

En la siguiente sección, se presentará un análisis más detallado utilizando gráficos comparativos que visualizan los valores y parámetros calculados. Estos gráficos permitirán identificar de manera más clara las tendencias y diferencias entre las probetas, facilitando la interpretación de los resultados y la identificación de patrones característicos para cada tipo de gas. Este enfoque gráfico complementará el análisis numérico previo y contribuirá a una comprensión más profunda de cómo el tipo de gas en las vacuolas afecta el comportamiento de las descargas parciales.

5.5. Comparación general de parámetros

En esta sección se muestra un análisis profundo de los parámetros registrados donde se revisan los resultados del conjunto de todas las probetas y se evalúa la posibilidad de agrupar o separar características y comportamientos.

5.5.1. Distribución de pulsos PRPD

Dado que los puntos del PRPD se encuentran concentrados en valores similares, se representa cada distribución con la curva normal que se adapta a cada grupo de datos, utilizando los parámetros estadísticos obtenidos en el Capítulo 5. A continuación se indican en la Figura 5.21, las curvas de las distribuciones de los PRPD de las seis probetas ensayadas.

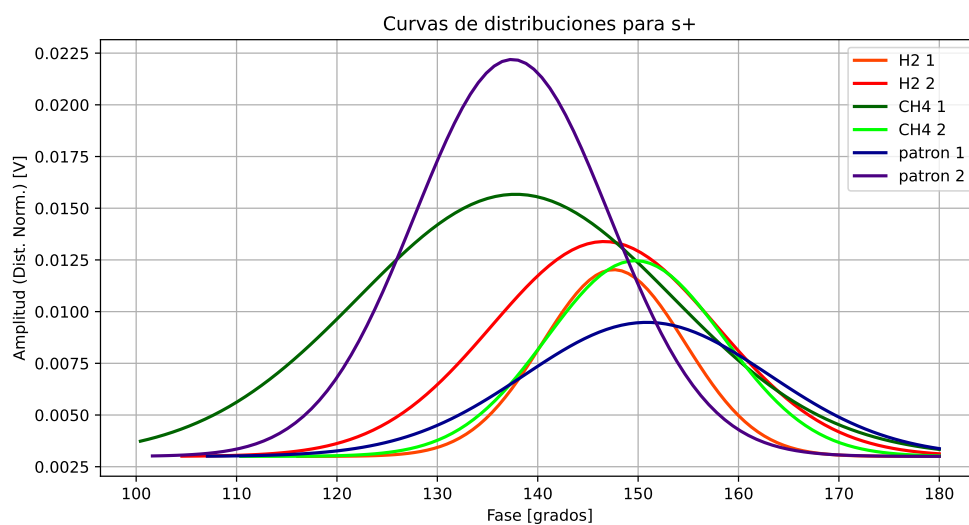


Figura 5.21. Curvas de distribuciones en el semiciclo positivo para todas las probetas.

Se observa en la Figura 5.21, que para todas las distribuciones la media angular se sitúa entre los 135° y 155° grados. Es más, todas las curvas a excepción de las obtenidas al ensayar la probeta 1 de metano y la probeta 2 de gas patrón concentran la media angular en $148,7^\circ$ con una desviación estándar de $1,7^\circ$. Ambas probetas mencionadas desplazan el promedio angular de todas las distribuciones, concentrándola en $145,0^\circ$, con

una desviación estándar de $5,4^\circ$. Basándose en la información indicada en la Sección 2.6.1, las características de las distribuciones sugieren que las descargas registradas corresponden a descargas parciales internas ya que los pulsos se concentran finalizando el semiciclo [43], mientras que las DP superficiales se concentran en la primera parte de cada semiciclo [43] y las descargas corona se concentran en la mitad de cada semiciclo, con valores aproximados de 90° para el semiciclo positivo y 270° para el semiciclo negativo [43].

De manera análoga, las curvas de distribuciones en el semiciclo negativo se muestran en la Figura 5.22

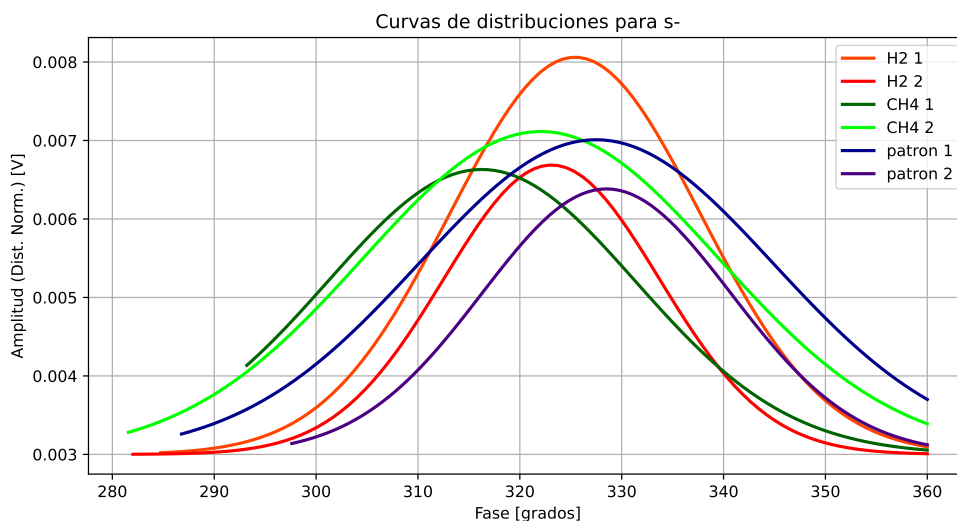


Figura 5.22. Curvas de distribuciones en el semiciclo negativo para todas las probetas

Se observa que la fase media de todas las distribuciones se encuentran entre 315° y 330° con un promedio de $323,81^\circ$ y una desviación estándar de $4,06^\circ$. Realizando el mismo análisis que se hizo para la Figura 5.21, se infiere que las descargas tienen un comportamiento similar al de las descargas parciales internas, con ciertas excepciones respecto a la simetría entre semiciclos en la amplitud de las distribuciones. Sin embargo, existe un nivel de simetría elevado en lo que respecta al promedio de los valores angulares medios de cada distribución, ya que el valor promedio angular de todos los datos se encuentra a 145° grados después del comienzo del semiciclo positivo, y a $143,81^\circ$ grados del comienzo del semiciclo negativo (considerando comienzo a los ángulos 0° y 180°).

Para realizar comparaciones de amplitud no se utiliza la representación mediante curvas de distribución ya que es más preciso utilizar los valores obtenidos con el sistema de adquisición. Para minimizar la variabilidad de los valores anormales se utiliza el percentil 95 de cada distribución de pulsos y se comparan por semiciclo en la Subsección 5.5.1.a.

5.5.1.a. Amplitud Máxima del 95 % de la Distribución de Pulsos

En la Figura 5.23 se observan las amplitudes máximas del 95 % de la distribución de pulsos (Q_{max95}) en el semiciclo positivo. El valor medio de este parámetro en las vacuolas de hidrógeno es de 9,25 [mV] con una desviación estándar de 0,25 [mV]. Para las probetas de metano, el promedio de los valores (Q_{max95}) es de 8,40 [mV] con una desviación estándar de 1,90 [mV] y por último, para las vacuolas de gas patrón, el promedio de los valores (Q_{max95}) es de 15,95 [mV] con una desviación estándar de 3,25 [mV].

Analizando los valores obtenidos, se aprecia que este parámetro en las DP que ocurren en la vacuola de hidrógeno es el que presenta mayor consistencia, ya que la desviación estándar entre amplitudes es la menor, siendo de un 2,7 % de la amplitud. Las vacuolas de metano muestran una amplitud promedio menor a las de hidrógeno pero con una desviación estándar porcentual de un 22,6 %. Es evidente que las descargas en el gas patrón tienen la máxima amplitud media en Q_{max95} con una desviación estándar porcentual de 20 % y son las únicas sobre el promedio de 11,20 [mV], representada con una línea punteada en la Figura 5.23.

Análogamente para la Figura 5.23, se observa Q_{max95} de las descargas para el semiciclo negativo. El valor medio de este parámetro en las vacuolas de hidrógeno es de 3,66 [mV] con una desviación estándar de 0,16 [mV]. Para las probetas de metano, el promedio de los valores Q_{max95} es de 3,80 [mV] con una desviación estándar de 0,10 [mV] y por último, para las vacuolas de gas patrón, el promedio de los valores Q_{max95} es de 3,50 [mV] con una desviación estándar de 0,10 [mV].

Como se puede ver, los valores de este parámetro en el semiciclo negativo presentan menores variaciones entre ellos, donde la media, representada con una línea punteada en 5.24, de Q_{max95} para todas las probetas es 3,65 [mV] con una desviación estándar de 0,12 [mV]. Incluso entre probetas del mismo tipo la desviación estándar porcentual es menor a 4,4 %, siendo las de hidrógeno las que presentan este valor.

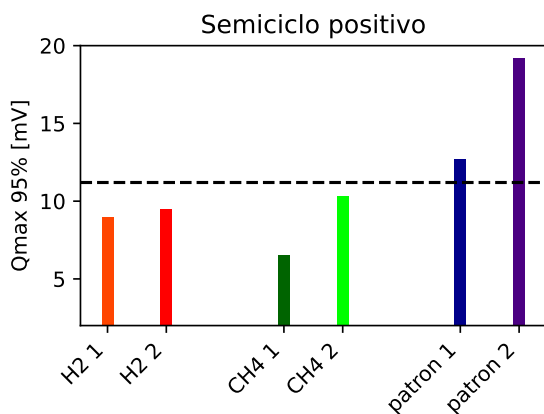


Figura 5.23. Gráfico de Q_{max95} para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.

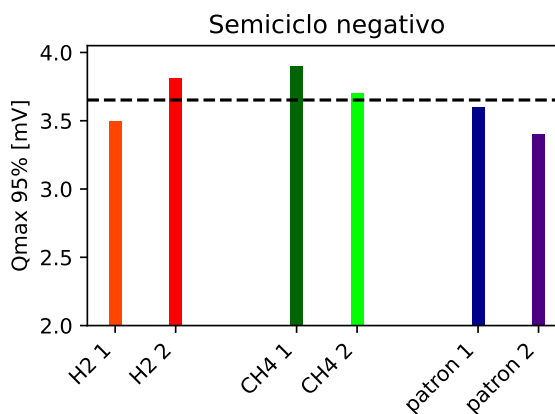


Figura 5.24. Gráfico de Q_{max95} para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.

5.5.1.b. Amplitud media de las distribuciones de pulsos

De manera similar a la Subsección 5.5.1.a, en lugar de utilizar Q_{max95} se analiza el valor medio de la amplitud de los PRPD (Q_{mean}). Comenzando por la Figura 5.25, se observa que las vacuolas de hidrógeno tienen el menor valor medio de Q_{mean} , con una magnitud de 4,80 [mV] y una desviación estándar de 0,1 [mV]. En segundo lugar se encuentran las probetas que contienen metano, con un valor medio de Q_{mean} de 5,30 [mV] y una desviación estándar de 0,3 [mV]. Finalmente se comprueba que Q_{mean} para las descargas que contienen gas patrón son aquellas que presentan el mayor valor medio, con una magnitud de 8,75 [mV] y una desviación estándar de 1,75 [mV], superando el valor promedio de las seis probetas de 6,28 [mV], indicado en la Figura 5.25 con la línea punteada.

A partir de los valores anteriores, se observa nuevamente que las descargas ocurridas en hidrógeno son las que presentan la menor desviación estándar, con un valor porcentual de 2,1 %. Seguidas por las probetas que contienen gas metano con una desviación estándar porcentual de 5,6 % y finalmente, las que presentan mayor dispersión entre valores de Q_{mean} son las descargas realizadas en las probetas con gas patrón, con una desviación estándar porcentual de 20,0 %.

Análogamente para la Figura 5.26, se observa Q_{mean} de las descargas para el semiciclo negativo. El valor medio de este parámetro en las vacuolas de hidrógeno es de 3,23 [mV] con una desviación estándar de 0,03 [mV]. Para las probetas de metano, el promedio es de 3,25 [mV] con una desviación estándar de 0,05 [mV] y por último, para las vacuolas de gas patrón, el promedio de los valores Q_{mean} es de 3,15 [mV] con una desviación estándar de 0,05 [mV].

De lo anterior, se evidencia una baja dispersión entre los valores de Q_{mean} de todas las probetas, con un promedio de 3,21 [mV] con una desviación estándar de 0,06 [mV] que corresponde a una desviación estándar porcentual de 1,9 %.

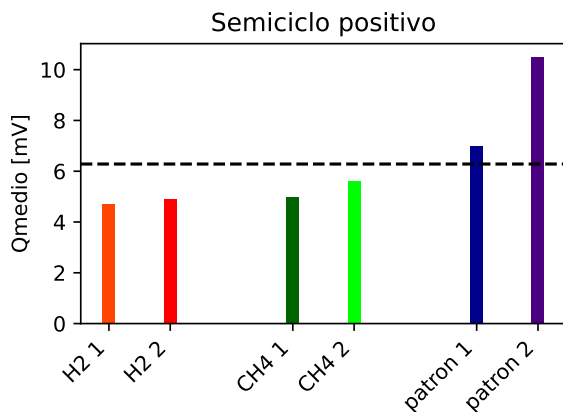


Figura 5.25. Gráfico de Q medio para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.

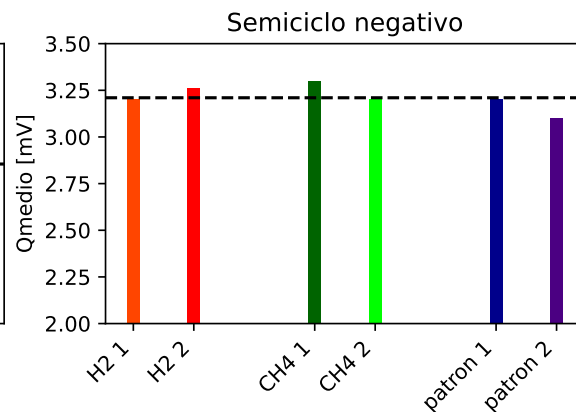


Figura 5.26. Gráfico de Q medio para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.

5.5.1.c. Ángulo de fase medio

Respecto al ángulo promedio de cada PRPD en el semiciclo positivo, los objetos de ensayo que contienen hidrógeno tienen un valor medio de $148,67^\circ$ con una desviación estándar de $1,05^\circ$. Para las descargas con mezcla de metano se tiene un ángulo medio de $148,74^\circ$ con desviación estándar de $2,13^\circ$. Por último, el valor medio de ambas probetas que contienen gas patrón es de $137,61^\circ$ con una desviación estándar de $0,17^\circ$.

Se confirma en la Figura 5.27 que el ángulo medio de las descargas en las probetas con gas patrón ocurren en valores más bajos que en los otros objetos de ensayo, pero son las que presentan la menor desviación estándar porcentual de $0,1\%$. En cambio, el valor medio angular de todas las probetas sin considerar las que contienen gas patrón es de $148,71^\circ$, con una desviación estándar de $1,68^\circ$ lo que implica una desviación estándar porcentual de $1,1\%$.

Análogamente para el semiciclo negativo, las probetas de hidrógeno tienen un valor medio de $327,00^\circ$ con una desviación estándar de $0,61^\circ$. Para las descargas con mezcla de metano se tiene un ángulo medio de 326° con desviación estándar de $2,88^\circ$. Por último, el valor medio de ambas probetas que contienen gas patrón es de 322° con una desviación estándar de $6,46^\circ$.

Se observa en la Figura 5.28 que el ángulo medio de las descargas en las probetas con hidrógeno tienen la menor variabilidad porcentual respecto a la media, con un valor de $0,4\%$. Seguidas por las de metano, con una desviación estándar porcentual de 2% . Finalmente, el valor medio angular de las descargas en gas patrón, al igual que en el semiciclo positivo, vuelve a ser el menor de todas las probetas, con una desviación estándar porcentual de $4,5\%$.

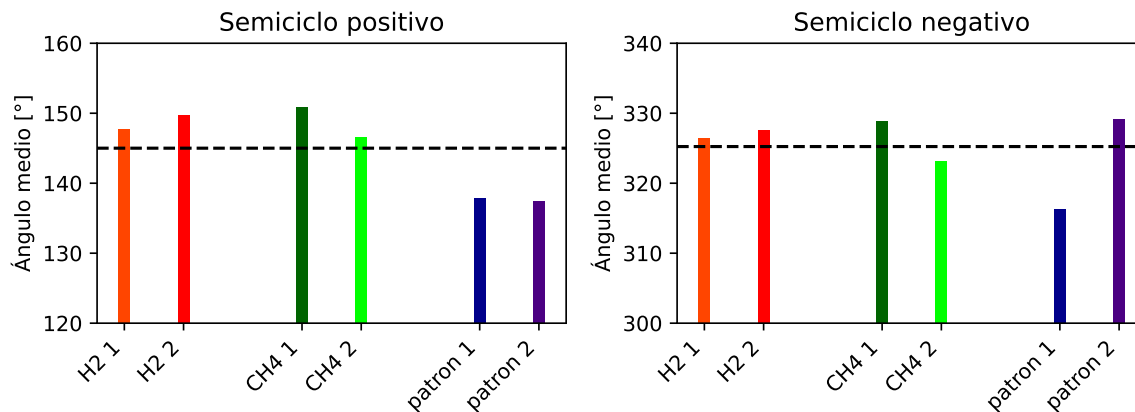


Figura 5.27. Gráfico de la fase media para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.

Figura 5.28. Gráfico de la fase media para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.

5.5.2. Curtosis y oblicuidad de las distribuciones

La curtosis es una medida estadística que describe la forma de la distribución de los datos, en particular, la presencia de colas más o menos pesadas en comparación con una distribución normal. Una curtosis positiva (leptocúrtica) indica que la distribución tiene colas más largas y delgadas, lo que sugiere una mayor concentración de datos en torno a la media y más valores extremos en las colas. Por otro lado, una curtosis negativa (platicúrtica) indica que la distribución tiene colas más cortas y gruesas, con una menor concentración de datos en torno a la media y menos valores extremos.

A partir de los resultados, se representan en la Figura 5.29 los valores de la curtosis de las distribuciones de las descargas en el semiciclo positivo, y en la Figura 5.30 los valores en el semiciclo negativo respectivamente. Como se puede ver en la Figura 5.29, la curtosis para las distribuciones en las probetas de hidrógeno es positiva, lo que significa que las descargas de mayor amplitud se concentran en el valor medio angular, mientras que en las vecindades de este valor, la amplitud disminuye rápidamente. En cambio, el valor de la curtosis para las distribuciones de descargas en las probetas que contienen gas patrón es negativa para ambos objetos de ensayo. Esto significa que la amplitud de las descargas parciales tienen una magnitud menos variable en las vecindades del promedio angular. Por último para las descargas en probetas de metano, el valor de este parámetro es positivo para la primera probeta y negativo para la segunda, con una media de $-0,484$ para ambas. Este valor indica que las descargas en vacuolas que contienen gas metano son las que más se asemejan a una distribución normal.

Por otro lado, en el semiciclo negativo, todas las distribuciones muestran una curtosis positiva. Las descargas en el gas patrón presentan la menor curtosis promedio entre las probetas, con un valor de 1,62, mientras que las probetas con hidrógeno alcanzan un valor de 3,5 y las de la mezcla con metano muestran la mayor curtosis, con 4,22.

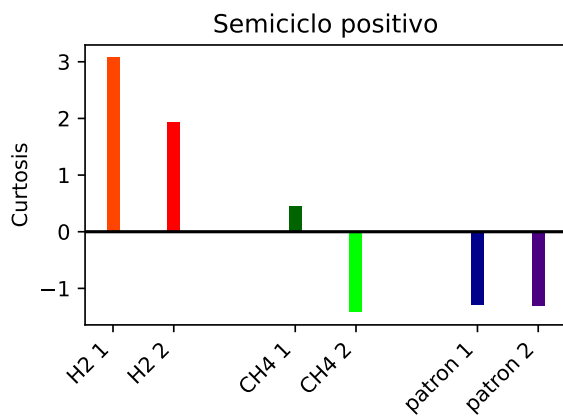


Figura 5.29. Gráfico de la curtosis de todas las distribuciones en el semiciclo positivo.

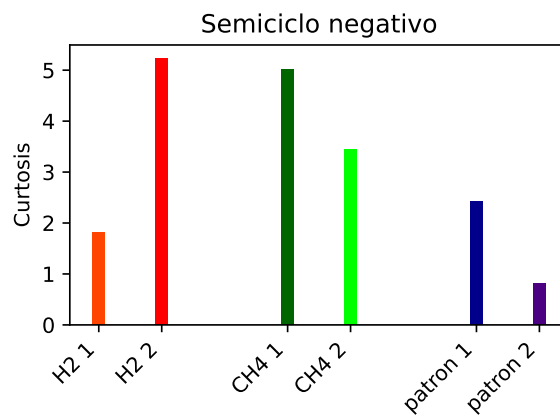


Figura 5.30. Gráfico de la curtosis en todas las distribuciones en el semiciclo negativo.

Respecto a la oblicuidad de las distribuciones, indicadas en las Figuras 5.31 y 5.32 para cada semiciclo. Comenzando por el semiciclo positivo, se observa que este valor tiene una mayor magnitud en las probetas de hidrógeno, con un valor medio de 1,71 y una desviación estándar de 0,17, lo cual representa una dispersión del 10% de la magnitud. En cambio para las vacuolas que contienen mezcla de metano, el valor de la oblicuidad es positivo para ambas probetas, con una media de 0,23 y una dispersión de 26% de la media. Por último, la oblicuidad en las descargas en probetas que contienen gas patrón, presentaron un valor medio de 0,1, pero con la mayor dispersión de todas, con un valor de 0,23 y una magnitud negativa en la probeta 2, indicando que las descargas parciales en vacuolas que contienen gas patrón, presentan una mayor cantidad de descargas cercanos al valor medio angular, en comparación a probetas que contienen otros gases, donde se observa que en aquellas que contienen hidrógeno el valor de oblicuidad indica que las descargas tienden a ocurrir en valores más cercanos al extremo izquierdo de la distribución, o lo que es lo mismo, en valores angulares más bajos que la mediana del rango.

Por último, para los valores de oblicuidad en el semiciclo negativo no se aprecian grandes diferencias, todas las distribuciones muestran un valor positivo de oblicuidad. La media de este parámetro considerando todas las probetas, es 1,68 con una desviación estándar de 0,37, lo que indica una dispersión de 22% entre ellos y una tendencia a que las descargas ocurran más cerca del inicio del rango angular en el semiciclo negativo.

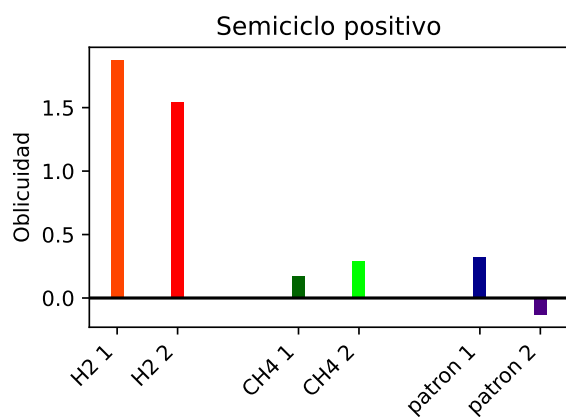


Figura 5.31. Gráfico de los valores de oblicuidad para todas las distribuciones en el semiciclo positivo.

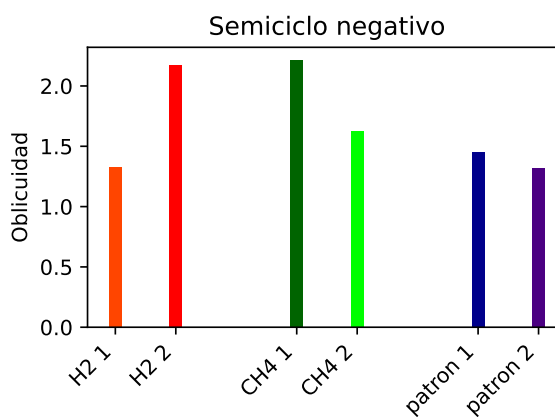


Figura 5.32. Gráfico de los valores de oblicuidad para todas las distribuciones en el semiciclo negativo.

De lo anterior se deduce que las mayores diferencias entre los valores ocurren en las distribuciones del semiciclo positivo, siendo de mayor utilidad para clasificar las descargas. En cambio, este valor en el semiciclo negativo no entrega información que posibilite una clasificación clara en base a los ensayos realizados.

5.5.3. Mapa T-F generalizado

En la Figura 5.33 se descarta un porcentaje de pulsos de cada probeta para visualizar de manera más ordenada los mapas T-F de los 6 objetos de ensayo. Representado con distintos colores cada mezcla de gases pero con matices similares para cada tipo. A continuación se resume los parámetros importantes de cada clúster como lo es la duración y frecuencia equivalente de las señales, así como los clústeres que se pueden apreciar. A grandes rasgos, se distinguen comportamientos similares entre probetas con el mismo tipo de gas. Comenzando con las de metano, graficadas con matices verdes, se aprecia que se distribuyen en un rango de frecuencias aproximado entre 5 [MHz] y 8 [MHz], con un amplio espectro de duración entre 50 [ns] y 300 [ns]. Por otro lado, las que contienen gas patrón se colorean con matices azulados y se aprecia una concentración de puntos en un rango de frecuencias entre 2 [MHz] y 9 [MHz] con un espectro de duración de señales entre 50 [ns] y 150 [ns]. Por último, los puntos que corresponden a las probetas que contienen hidrógeno se colorean con matices rojizos y se observa una distribución de puntos en un amplio rango de frecuencias entre 3 [MHz] y 14 [MHz] con un espectro de duración de señales entre 100 [ns] y 300 [ns] con una mayor densidad de puntos en los valores más bajos de ambos rangos.

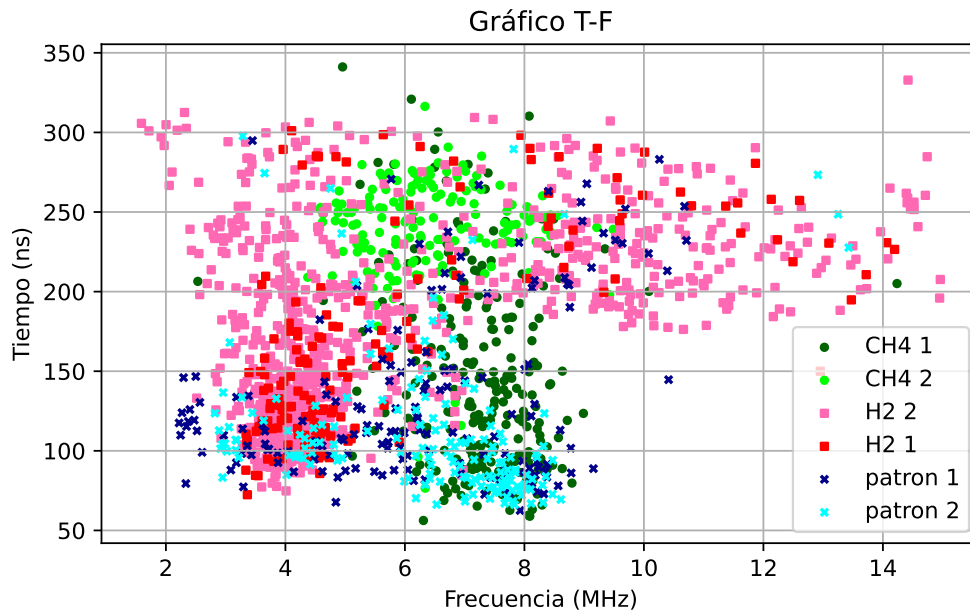


Figura 5.33. Gráfico T-F simplificado de todas las probetas.

Para caracterizar las señales existen numerosos análisis de clústeres, como por ejemplo los parámetros estadísticos clásicos como medias, desviaciones estándar, que serán las que se utilizan para clasificar grandes rasgos. En las Subsecciones 5.5.3.a y 5.5.3.b se detallan los valores medios en cada eje y la frecuencia de ocurrencia de las señales, en un intervalo de tiempo correspondiente a cada medición.

5.5.3.a. Duración y frecuencia equivalente de las señales

En la Figura 5.34 se indica la duración media de las señales de cada probeta, además, se representa el promedio de las seis probetas con una línea punteada con un valor de 164,53 [ns]. Comenzando con las descargas en las vacuolas de hidrógeno, se observa que el valor es prácticamente idéntico entre ambas probetas, mostrando una media de 176,42 [ns] y una desviación estándar de 0,13 [ns]. En cambio, para las probetas que contienen mezcla de metano el promedio es mayor, con un valor de 194,72 [ns] pero presentan una mayor dispersión de 43,27 [ns]. Finalmente las descargas en el gas patrón son las de menor duración de todo el grupo, promediando entre ellas un valor de 122,44 [ns] y una desviación estándar de 12,31 [ns].

A simple vista, se observa que las descargas en hidrógeno presentan la mayor consistencia en cuanto a la duración equivalente de las señales, mostrando la menor variabilidad entre los resultados. Le siguen las descargas en gas patrón, donde en ambas probetas se aprecia que la duración equivalente de los pulsos es la más corta del conjunto. Finalmente, debido a la alta dispersión en las mediciones de las vacuolas con metano, no es posible asignar un comportamiento tan definido como en las otras probetas.

Respecto a la frecuencia de los pulsos, la Figura 5.35 muestra claramente que las vacuolas con hidrógeno generan descargas con la menor frecuencia, promediando 5,79 [MHz], y una desviación estándar de 0,20 [MHz], mientras que el promedio general, indicado por una línea punteada, es de 6,36 [MHz]. Se observa una diferencia notable en las probetas con gas metano, que promedian 6,82 [MHz] y presentan la mayor dispersión entre vacuolas del mismo tipo, con una desviación estándar de 0,41 [MHz]. Finalmente, las descargas en el gas patrón muestran una frecuencia similar entre ambas probetas, con un promedio de 6,45 [MHz], y la menor desviación estándar de 0,09 [MHz].

Al realizar un análisis similar con la frecuencia equivalente de las señales, se observa que las descargas en las probetas de hidrógeno presentan las frecuencias más bajas. En las vacuolas con gas patrón, se aprecia una menor dispersión de los datos, lo que sugiere una mayor consistencia en los valores. Por último, las descargas en las probetas con metano muestran una alta dispersión, lo que dificulta asegurar un comportamiento definido de la frecuencia equivalente. Sin embargo, se puede destacar que estas se encuentran en un rango aproximado entre 6,0 [MHz] y 7,5 [MHz].

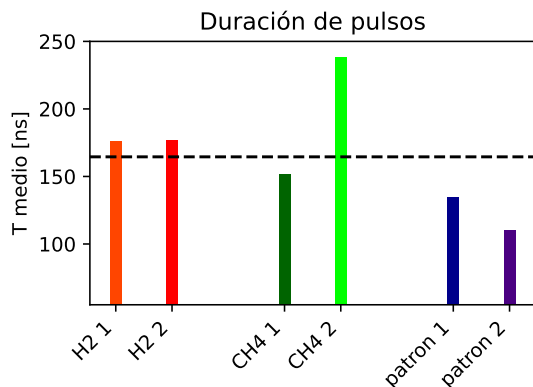


Figura 5.34. Duración media de los pulsos para todas las probetas.

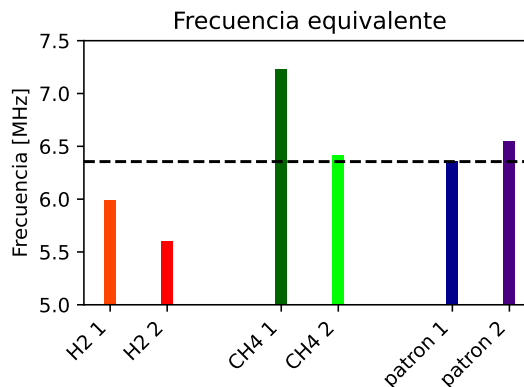


Figura 5.35. Frecuencia media de las descargas para todas las probetas.

5.5.3.b. Relación de pulsos y descargas por segundo

La últimas características que se analizaron, son la relación entre el número de descargas del semiciclo positivo y negativo, junto a la frecuencia de las descargas medidas en pulsos por segundo, indicadas en las Figuras 5.36 y 5.37 respectivamente. Comenzando con la Figura 5.36, se aprecia que una vacuola de metano y gas patrón, presentan una exagerada variabilidad en la relación de $s+/s-$, con valores de 83 y 106 respectivamente. Además, la otra vacuola de metano presentó un valor extremadamente bajo de 0,1. Para las vacuolas 1 y 2 de hidrógeno, una relación de 4,12 y 9,25 respectivamente, siendo las que presentaron la menor variabilidad. Un valor similar se obtuvo para la vacuola 1 de gas patrón con una magnitud de 6,74. Finalmente respecto a la frecuencia de ocurrencia de las descargas por segundo, no se aprecia en la Figura 5.37 la coincidencia considerable entre ambas probetas de hidrógeno, con valores de 2,45 [*pulsos/seg*] y 2,55 [*pulsos/seg*]. Se repite una extrema variabilidad entre probetas de metano, con valores de 38,7 [*pulsos/seg*] y 944,8 [*pulsos/seg*] para las probetas 1 y 2 respectivamente. Por último, para la mezcla de gas patrón se tienen los valores de 102,9 [*pulsos/seg*] y 42,1 [*pulsos/seg*].

Pese a la gran dispersión entre algunos datos, se confirma consistencia entre las probetas de hidrógeno, donde exhibieron la menor variabilidad entre sus valores. En lo que refiere a la relación de pulsos en general, se rescata que los valores de todas las descargas a excepción de la mencionada, son mayores a uno, lo que significa que para todos estos ensayos, las cantidad de descargas en el semiciclo positivo es mayor que en el semiciclo negativo. Respecto a la frecuencia de ocurrencia de las descargas, se aprecia que las descargas de hidrógeno son las que indicaron menor frecuencia, caso contrario ocurrió con las de metano y gas patrón.

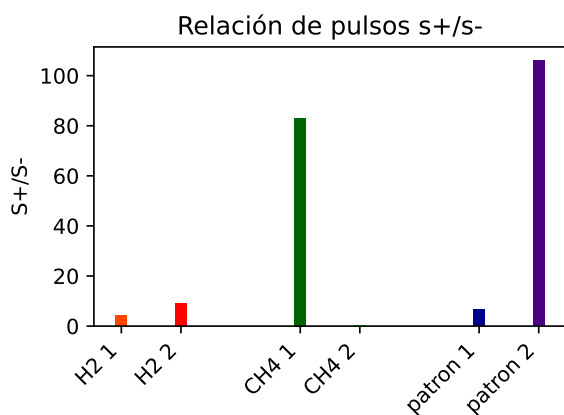


Figura 5.36. Cociente entre el número de pulsos en $S+$ entre $S-$.

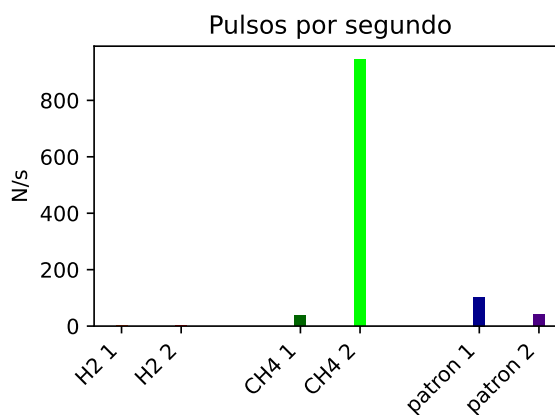


Figura 5.37. Descargas por segundo al interior de cada vacuola.

En síntesis, destaca la notoria uniformidad en los parámetros en las observaciones de las vacuolas que contienen hidrógeno. Esta uniformidad se presentaba desde la morfología de los patrones PRPD y mapas T-F, donde el área de la dispersión de los puntos era idéntica. Esto resultó en similitudes significativas en valores como la amplitud máxima, promedio, ángulo de fase, descargas por segundo, duración y frecuencia de los pulsos. En contraste, las probetas con mezcla de metano indicaron un mayor número de diferencias,

siendo el valor promedio de la amplitud de las descargas y el ángulo de fase los únicos parámetros similares.

Las discrepancias se manifestaron en la duración de los pulsos, la frecuencia equivalente, la relación de pulsos entre semiciclos y las descargas por segundo. Estas diferencias sugieren posibles interferencias durante la medición, que pudieron ser causadas por la introducción accidental de burbujas en la interfaz del aceite con los electrodos o la posible presencia no controlada de fuentes de interferencias como señales de radio. En relación a las vacuolas que contienen la mezcla con gas patrón, se observaron coincidencias en algunos parámetros, evidentes en el PRPD y los mapas T-F. Específicamente, destacaron similitudes en la frecuencia equivalente, duración de los pulsos y la cantidad de pulsos por segundo, reflejados en las Figuras 5.34 y 5.35. La única disparidad significativa fue la relación de pulsos entre el semiciclo positivo y negativo, indicando una escasez casi total de descargas en el semiciclo negativo para la probeta 2.

Al resumir las características generales, se identificó una constante: tanto el valor máximo como el promedio de las descargas en el semiciclo negativo presentan magnitudes casi idénticas para todos los gases por igual, siempre menores que los registrados en el semiciclo positivo. Sin embargo, se detectaron características distintivas en la amplitud máxima (Q_{max95}) y promedio Q_{mean} en el semiciclo positivo, donde las descargas en el gas patrón fueron las de mayor amplitud en comparación a las otras probetas. Este comportamiento es atribuible a una menor tensión de inicio de descargas para el gas patrón y la mezcla de metano, resultando en descargas más intensas al aplicar la misma tensión en todos los ensayos. Además, la interacción química entre la variedad de gases y las paredes de las vacuolas puede explicar una mayor actividad en comparación con las muestras de gas puro y poco reactivo como lo es el hidrógeno.

Con respecto al ángulo de fase de las descargas, se observaron similitudes entre la media angular para las vacuolas con hidrógeno y metano, mientras que aquellas que contienen gas patrón mostraron valores ligeramente más bajos en ambos semiciclos, lo que significa que las descargas ocurrían antes. En cuanto a la duración de los pulsos, las vacuolas con gas patrón presentaron descargas más breves, a diferencia del metano, que exhibió variaciones significativas entre las muestras, y el hidrógeno, cuyos valores fueron similares y mayores que los del gas patrón. En relación a la frecuencia equivalente de las descargas, se evidenció que los pulsos en las probetas de hidrógeno fueron las de menor magnitud de todas, seguidas por las del gas patrón y, finalmente, las del metano. Este comportamiento se atribuye a la variedad de compuestos químicos que tienen las mezclas de gases en comparación a las que contienen solo hidrógeno, ya que puede ocurrir un gran número de fenómenos químicos entre todos los compuestos existentes al interior de las vacuolas, haciendo inestable el balance de cargas y existiendo un rápido y desorganizado movimiento de electrones dentro de las cavidades que pueden traer como consecuencia un mayor número de oscilaciones.

Por último, la relación de pulsos entre s+ y s- mostró que, en la mayoría de los casos, la cantidad de pulsos en el semiciclo positivo superó significativamente al negativo, a excepción de la probeta 2 de metano. Descartando el comportamiento anormal de la vacuola mencionada, se infiere que la mayoría de las descargas ocurren en el semiciclo positivo de la señal, y una baja cantidad en el semiciclo negativo. Este comportamiento dificulta la clasificación de las descargas en la categoría de descargas parciales internas, pero dadas las diferencias con las de otro tipo, las DP internas son las que mejor se ajustan

a la categoría pese a la falta de simetría de los patrones PRPD en cada semiciclo.

Tras la comparación de múltiples parámetros estadísticos entre las diferentes vacuolas con distintos gases, emerge una gran cantidad de información que sugiere conexiones entre la naturaleza de las descargas parciales y la composición gaseosa de las cavidades. Si bien se detectaron correlaciones con un bajo valor de dispersión en algunos parámetros dentro del mismo tipo de gas, como la coherencia en las descargas de hidrógeno, la variabilidad más amplia observada en otros gases subraya la naturaleza estocástica de este fenómeno eléctrico y de la necesidad de aumentar el número de ensayos. Estos resultados preliminares, plantean la necesidad de una investigación y un análisis más detallado para capturar la verdadera diversidad de las descargas parciales incluso para probetas idénticas.

El análisis, hasta el momento ha mostrado tendencias que indican diferencias notables entre los gases examinados. La variabilidad significativa en las descargas para diferentes gases apunta a la influencia única de la composición química y las propiedades eléctricas de cada gas y sus subproductos. Sin embargo, no se descarta que esta variabilidad sea producida por eventos externos como el ruido electromagnético que pudo haberse solapado a las mediciones. Es necesaria la exploración adicional y un análisis estadístico riguroso con una muestra más amplia para validar estas observaciones iniciales y realizar un mayor filtrado de datos anormales para descartar posibles probetas defectuosas. Estos pasos son cruciales para establecer conclusiones más sólidas y generalizables sobre las descargas parciales en vacuolas con diferentes gases.

A modo de resumen, los patrones PRPD de las descargas y los mapas T-F permiten identificar diferencias visuales de los pulsos y los clústeres, pero en este caso al tener una muestra reducida de objetos no es posible afirmar con certeza que las diferencias entre las descargas corresponden a las observadas, no obstante es de gran utilidad entender la cantidad de información que es posible extraer con el sistema de adquisición y cómo abordar en el futuro un método que permita clasificar con una precisión avanzada. Además, en el caso de tener una mayor cantidad de objetos de ensayo sería de gran utilidad considerar todos los parámetros posibles, incluyendo aquellos que no se mencionaron en este trabajo como podría ser la energía de las descargas, transformadas de wavelet (una herramienta matemática utilizada para descomponer señales en componentes de distintas escalas o frecuencias), evolución temporal de frecuencia y duración de las descargas, entre otros, para entrenar algún algoritmo de aprendizaje avanzado como lo son las herramientas de machine learning y aplicar diferentes técnicas de clasificación e identificación de correlaciones. Algoritmos de categorización como random forests tienen la capacidad de establecer correlaciones en un hiperespacio de múltiples variables, para posteriormente entregar aquellas que describen con mayor exactitud los fenómenos ocurridos y crear una clasificación en base a "hipercorrelaciones", proceso que es imposible de visualizar cuando se trata de más de 3 variables por un tema dimensional, pero que se pueden simplificar mediante otras técnicas como SVM (Support Vector Machine, un algoritmo utilizado para clasificación y regresión).

Capítulo 6

Conclusiones

El desarrollo de esta investigación ha permitido avanzar en la comprensión de las descargas parciales en vacuolas de resina epóxica con diverso contenido gaseoso. A lo largo del estudio, se han identificado patrones clave y se han superado múltiples desafíos técnicos que fueron esenciales para lograr los objetivos planteados. A partir de los ensayos realizados y del análisis de los resultados, se pueden extraer varias conclusiones significativas que abarcan tanto los aspectos metodológicos como los hallazgos experimentales más relevantes.

El proceso de fabricación de las probetas desempeñó un papel crucial en el éxito de esta investigación, ya que constituyó el primer paso hacia la caracterización de las descargas parciales en vacuolas de resina epóxica con diferentes composiciones gaseosas. La precisión en la fabricación de las probetas fue esencial para garantizar que las mediciones y los ensayos subsecuentes fueran confiables y consistentes.

Al principio, se enfrentaron desafíos significativos al intentar mantener las burbujas de gas centradas y de tamaño uniforme dentro de las probetas. El primer método, que consistía en inyectar una burbuja en la superficie de la resina antes de verter el resto del material, resultó insatisfactorio debido a la dificultad de mantener la homogeneidad entre las probetas y el desvanecimiento de la vacuola. Las diferencias en la mezcla de la resina y las condiciones ambientales afectaron la consistencia entre probetas, lo que no era adecuado para los requisitos del estudio.

La evolución del proceso llevó a la creación de varios dispositivos diseñados en 3D para inyectar burbujas de gas con precisión micrométrica, lo que permitió fabricar vacuolas de tamaño uniforme. La inclusión de un motor de giro lento para mantener la burbuja centrada durante el endurecimiento de la resina fue un avance significativo, permitiendo la fabricación simultánea de varias probetas con una mayor homogeneidad. Sin embargo, la inclusión de electrodos en el segundo método introdujo nuevas complicaciones, como la formación de rutas eléctricas no deseadas, lo que resultó en fallos en algunas probetas.

El último prototipo resolvió estos problemas al eliminar los electrodos, reducir el número de preparaciones de resina y el tiempo consumido en la fabricación, logrando así una mayor homogeneidad en las probetas finales. Con estas mejoras, se estableció una base sólida para los ensayos experimentales, permitiendo una caracterización más precisa y fiable de las descargas parciales. Esta precisión en la fabricación y preparación de las probetas fue fundamental para alcanzar el objetivo principal de esta investigación, asegurando que

los datos obtenidos fueran consistentes y representativos.

En conjunto, estos desarrollos en la fabricación de las probetas permitieron una caracterización más precisa y fiable de las descargas parciales, lo que fue fundamental para alcanzar el objetivo principal de esta investigación. Las mejoras en el proceso aseguraron que las probetas utilizadas fueran consistentes y adecuadas para los ensayos, contribuyendo así al éxito general del estudio. Además, el método desarrollado no solo optimiza la fabricación de probetas actuales, sino que también ofrece la posibilidad de producir una mayor cantidad de probetas de ensayo simultáneamente. Esto es particularmente relevante dado que dos probetas por tipo de gas resultaron insuficientes para asegurar la consistencia de los resultados, debido a la considerable variabilidad observada en algunos datos durante los ensayos. Al incrementar la muestra de probetas, se espera que estas variabilidades se reduzcan significativamente, proporcionando resultados más robustos y confiables en futuros estudios.

Asimismo, se logró cumplir con el tercer objetivo de la investigación, que consistía en ensayar los objetos y recopilar información sobre las descargas que ocurren. Los ensayos se llevaron a cabo utilizando el sistema de medición propuesto por la norma, lo que permitió obtener señales de descargas parciales que luego fueron analizadas mediante diversas herramientas estadísticas y matemáticas. A partir de este análisis, se obtuvieron parámetros útiles para realizar comparaciones y categorizaciones posteriores. Si bien se identificaron parámetros clave, existe una infinidad de otros que podrían aportar información adicional. Con un mayor número de muestras y la aplicación de técnicas más avanzadas, como el machine learning y otros algoritmos de clasificación, se podría ampliar el análisis, revelando patrones más complejos y mejorando la capacidad de clasificación de las descargas parciales.

El estudio detallado de las descargas parciales en vacuolas con distintos gases reveló patrones distintivos que sugieren un método de clasificación para las DP según el contenido de las cavidades. Los resultados destacaron correlaciones entre parámetros estadísticos específicos de las descargas en cavidades que contenían el mismo tipo de gas, como ocurrió en las vacuolas de hidrógeno. Por ejemplo, las descargas en ambas probetas de hidrógeno mostraron un claro comportamiento similar entre ellas, apreciable en los patrones PRPD y mapas T-F, así como en otras variables estadísticas. Se observó, por ejemplo, que la cantidad de señales por segundo en las descargas de hidrógeno era significativamente menor en comparación con las probetas que contenían otros gases, lo que indica que la tensión de inicio de descargas en el hidrógeno es mayor. Otros parámetros, como la duración y la frecuencia equivalente de las descargas, también se distinguieron claramente de las otras mezclas gaseosas.

Por otro lado, aunque las descargas en probetas con mezcla de metano no mostraron una gran correlación entre los parámetros analizados, fue posible identificar comportamientos similares en los mapas T-F y PRPD, donde la distribución de puntos presentaba patrones comparables. Este fenómeno sugiere que, con una muestra más amplia, sería posible identificar patrones más consistentes y robustos, lo que podría permitir una clasificación más precisa de las descargas en estos gases. De manera similar, las vacuolas que contenían gas patrón también mostraron tendencias en sus descargas que podrían ser explotadas en futuros análisis.

La correlación observada entre algunos parámetros, aunque alentadora, está limitada por el tamaño de la muestra actual. Sin embargo, es prometedora porque sugiere que es

posible identificar relaciones entre parámetros que podrían permitir una clasificación exitosa. La necesidad de una muestra más amplia es evidente para validar y generalizar estas tendencias, proporcionando una comprensión más robusta de las características distintivas de las descargas para cada gas. Con los datos y métodos actuales, se ha establecido una base sólida para la clasificación de descargas parciales, cumpliendo así con el objetivo de caracterizar las descargas utilizando técnicas de clasificación. No obstante, la implementación de técnicas más avanzadas, como la inteligencia artificial, machine learning y algoritmos de agrupación, podría potenciar el análisis al revelar patrones más complejos e identificar características que hayan podido pasar desapercibidas. Esto no solo enriquecería la comprensión de las descargas en vacuolas con diferentes gases, sino que abriría la puerta a nuevas observaciones y análisis más profundos.

Los resultados respaldan, en parte, las teorías existentes, al confirmar diferencias substanciales en las descargas entre gases distintos. Además, es posible que las descargas que se registraron en las vacuolas con mezcla de metano y gas patrón se vean influenciadas por la mayor variedad de compuestos presentes en estos gases. Los diferentes grados de reactividad de los compuestos facilitan las reacciones entre ellos o incluso con las paredes de la misma cavidad, en contraste con las muestras que contienen únicamente hidrógeno puro. Asimismo, una hipótesis sugiere que la elevada composición de oxígeno y nitrógeno en estas probetas incrementa la reactividad, dado que investigaciones previas han demostrado que la interacción de estos gases suele dar lugar a la formación de ácidos y otros compuestos líquidos. En cambio, en las vacuolas que contienen hidrógeno puro, es prácticamente improbable que ocurran reacciones de oxidación a menos que el oxígeno provenga de las paredes internas de la vacuola o de compuestos volatilizados en su interior. Este comportamiento podría atribuirse a las diferentes propiedades electro-químicas de los gases y sus subproductos, añadiendo complejidad en las descargas observadas. Considerando la variedad de compuestos presentes y su potencial reactividad en función de la composición específica de cada gas hacen que el proceso completo de descargas parciales se vuelva casi estocástico y muy difícil de predecir con una muestra de información reducida como lo es en este caso.

En términos prácticos, la identificación precisa de características únicas para cada gas tiene implicaciones significativas. Por ejemplo, podría influir en la selección de materiales aislantes más efectivos o en el desarrollo de estrategias de mitigación personalizadas según el tipo de gas presente durante el manejo de los aislantes y los procesos de fabricación, como podría ser la incorporación de diferentes aditivos en los materiales. Para trabajos futuros, el método de fabricación de las probetas podría mantenerse y es posible escalarlo con facilidad a un mayor número de probetas simultáneas, ya que es sencillo y económico reproducir en masa los modelos 3D necesarios para soportar un mayor número de moldes. Además, este proceso podría mejorarse aún más, logrando una mayor precisión si se disminuye la tolerancia de los componentes y se fabrican en metal u otros materiales que resistan mejor el desgaste.

Respecto a las implicaciones de una caracterización exitosa, es posible que en el futuro se pueda aplicar un análisis de fallas en transformadores secos de manera similar al análisis de gases disueltos que se realiza en transformadores en cuba de aceite para determinar el tipo de falla que han sufrido (térmica, cortocircuito, entre otras). Dado que el compuesto principal en un transformador seco es la resina, que es el mismo material utilizado en este estudio, podría ser viable identificar el tipo de falla (térmica, mecánica, cortocircuito) mediante la caracterización de las descargas parciales en los gases específicos que podrían

formarse en vacuolas debido a estas fallas. Esto permitiría estimar el motivo de la falla del transformador y aplicar estrategias para mitigar problemas futuros. Además, la implementación de estrategias para prevenir la formación de vacuolas durante el proceso de fabricación, o la adición de aditivos a la resina, podría conducir al desarrollo de resinas especialmente formuladas para uso eléctrico que sean capaces de mitigar o atenuar las descargas parciales, extendiendo así la vida útil de los componentes eléctricos y generando significativos beneficios económicos.

Además, una vía tentadora para futuras investigaciones sería explorar el comportamiento de las vacuolas con gases puros y su respuesta ante variaciones en las concentraciones. Este camino permite revelar si existe alguna relación gradiente que dependa de la composición gaseosa, abriendo así nuevas perspectivas sobre la influencia de la concentración en las descargas parciales. Sin embargo, la implementación de este enfoque requiere una dedicación considerable en tiempo y recursos, desde la fabricación de una gama variada de vacuolas hasta la meticulosa recopilación de datos en diferentes configuraciones de concentración. Estos pasos adicionales subrayan la extensa área de investigación pendiente y la riqueza potencial de información que aún aguarda ser descubierta en este campo de estudio.

El trabajo presente subraya la necesidad de investigaciones futuras más amplias y detalladas. Explorar otras variables que podrían influir en las descargas, realizar análisis comparativos entre gases similares y considerar el impacto de factores externos podría proporcionar una comprensión más completa de este fenómeno complejo. La investigación presentada aquí sienta las bases para estas futuras exploraciones, ofreciendo tanto un marco metodológico robusto como una serie de hallazgos preliminares que pueden guiar investigaciones posteriores. Al profundizar en este campo, no solo se podrían esclarecer los mecanismos subyacentes a las descargas parciales, sino también desarrollar soluciones innovadoras para mitigar sus efectos. En última instancia, el avance en este ámbito podría llevar a mejoras significativas en la fiabilidad y durabilidad de los sistemas eléctricos, con beneficios tangibles tanto para la industria como para la sociedad en general.

Bibliografía

- [1] Z. Zakaria y R. Jaafar, “Depth penetration parameters for scanning the teeth using carbon dioxide laser and X-ray imaging,” páginas 1-3, 2009. DOI: 10.1109/ICICI-BME.2009.5417244 (véase página 1).
- [2] J. Wang, Q. Li, H. Liu et al., “ReaxFF MD Investigation on the Damage Mechanism of Epoxy Polymer Exposed to DC Corona Discharge in SF6 Gas,” en *2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO)*, 2021, páginas 1-4. DOI: 10.1109/AEERO52475.2021.9708353 (véanse páginas 1, 8).
- [3] H. R. Mirzaei, A. Akbari, M. Zanjani, K. Miralikhani, E. Gockenbach y H. Borsi, “Investigating suitable positions in power transformers for installing UHF antennas for partial discharge localization,” páginas 625-628, 2012. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416223 (véanse páginas 1, 3).
- [4] Y. Otake, T. Umemoto, K.-i. Suga et al., “Influence of Defect Size on Insulation Deterioration of Epoxy Resins with Voids,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 28, número 1, páginas 52-57, 2021. DOI: 10.1109/TDEI.2020.008990 (véanse páginas 1, 8).
- [5] Y. Zou, Z. Wang, K. Xiao et al., “Study on Thermal Aging Characteristics of Epoxy Resin in Saturable Reactor,” en *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*, 2022, páginas 01-04. DOI: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961654 (véanse páginas 1, 7).
- [6] P. Roseen, S. Gubanski y U. Gedde, “External partial discharge resistance of polyethylene and crosslinked polyethylene containing voltage stabilizers,” páginas 247-249, 1995. DOI: 10.1109/CEIDP.1995.483709 (véanse páginas 1, 3).
- [7] T. Okamoto, M. Yashima y M. Nagao, “High voltage insulating material life under partial discharge degradation,” páginas 1690-1695, 2017. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8228131 (véanse páginas 1, 7).
- [8] Q. Ye, “A Simple Analytical Method of Gas Discharge Based on Logistic Model,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, volumen 47, número 2, páginas 1413-1420, 2019. DOI: 10.1109/TPS.2018.2889796 (véanse páginas 1, 11).
- [9] Iec, *International Standard Iec 60270 High-voltage Test Techniques Partial Discharge Measurements*. Iec, 2000. dirección: <https://books.google.cl/books?id=n3xB0AEACAAJ> (véanse páginas 1, 5, 11, 12).

- [10] L. Wang, A. Cavallini, G. C. Montanari y L. Testa, "Evolution of pd patterns in polyethylene insulation cavities under AC voltage," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 19, número 2, páginas 533-542, 2012. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6180247 (véanse páginas 2, 9).
- [11] W. H. B. P.E., "Analysis of Transformer Failures," *International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm*, 2003 (véanse páginas 2, 3).
- [12] E. Bennett, *An oscillograph study of corona*. Trans AIEE, 1913 (véase página 2).
- [13] G. C. Stone, A. Cavallini y G. Behrmann, "A Review of the History of the Development of Partial Discharge Testing," en *2022 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2022, páginas 85-89. DOI: 10.1109/EIC51169.2022.9833210 (véase página 2).
- [14] N. Marukatat, T. Mai-eiam, P. Chaisiri, J. Raxsa, P. Nimsanong y P. Yutthagowith, "The Study of the Voltage Frequency Effects on Partial Discharge Characteristics," en *2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, 2023, páginas 152-155. DOI: 10.1109/ICEAST58324.2023.10156977 (véase página 2).
- [15] F. Kreuger, *Discharge detection in high voltage equipment*. American Elsevier, 1965 (véase página 2).
- [16] N. Nik Ali, W. Goldsmith, J. Hunter, P. Lewin y P. Rapisarda, "Comparison of clustering techniques of multiple partial discharge sources in high voltage transformer windings," en *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2015, páginas 256-259. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295257 (véanse páginas 2, 15).
- [17] S. A. Boggs y G. C. Stone, "Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, volumen EI-17, número 2, páginas 143-150, 1982. DOI: 10.1109/TEI.1982.298548 (véase página 3).
- [18] H. Zhang, W. Lu, H. Liu, J. Weng, W. Zhao y Z. Peng, "Three-dimensional Visualization Technology for Ultrasonic Detection of Partial Discharges in Power Transformers," páginas 107-110, 2021. DOI: 10.1109/ICPADM49635.2021.9493994 (véanse páginas 3, 6).
- [19] Y. Kim y K. Shong, "The Characteristics of UV Strength According to Corona Discharge From Polymer Insulators Using a UV Sensor and Optic Lens," *IEEE Transactions on Power Delivery*, volumen 26, número 3, páginas 1579-1584, 2011. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2131689 (véanse páginas 3, 6).
- [20] D. A. Polyakov, "Research of Partial Discharge Registration Effectiveness Using HFCT Sensor," páginas 1-5, 2022. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014796 (véase página 3).
- [21] J. Martínez-Tarifa, M. Rojas, G. Robles, B. MacPherson, P. Moore e I. Portugués, "Partial discharges and noise separation in high frequency signals using inductive sensors," páginas 1607-1611, 2012. DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229136 (véase página 3).

- [22] W. Zhang, Z. Hou, H.-J. Li, C. Liu y N. Ma, “An Improved Technique for Online PD Detection on Covered Conductor Lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, volumen 29, número 2, páginas 972-973, 2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2288008 (véase página 3).
- [23] B. Li, D. Cheng, Y. Tian, S. Zhu y S. Luo, “GIS Insulation Defect Diagnosis Method Based on Improved MFCC and PCA-SVM Model,” en *2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP)*, 2020, páginas 33-37. DOI: 10.1109/CCISP51026.2020.9273510 (véase página 3).
- [24] Y. Sekii y K. Yamauchi, “Analysis of deterioration by partial discharge of XLPE using GCMS and FTIR,” en *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, páginas 251-254. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580274 (véanse páginas 3, 8).
- [25] M. Duval y L. Lamarre, “The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, volumen 30, número 6, páginas 9-12, 2014. DOI: 10.1109/MEI.2014.6943428 (véanse páginas 6, 9).
- [26] H. L. Saums y W. W. Pendleton, “Materials for electrical insulating and dielectric functions,” (*No Title*), 1973 (véase página 6).
- [27] “The dielectric strength and life of impregnated-paper insulation — III,” *Electrical Engineering*, volumen 61, número 12, páginas 1039-1040, 1942. DOI: 10.1109/EE.1942.6435518 (véase página 7).
- [28] R. W. Atkinson, “High-voltage cable failure mechanism,” *Electrical Engineering*, volumen 68, número 7, páginas 605-609, 1949. DOI: 10.1109/EE.1949.6444879 (véase página 7).
- [29] J. Jones, J. Llewellyn y T. Lewis, “The contribution of field-induced morphological change to the electrical aging and breakdown of polyethylene,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 12, número 5, páginas 951-966, 2005. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522189 (véase página 7).
- [30] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, M. Dong y M. Ren, “Computer Simulation of Partial Discharges in Voids inside Epoxy Resins Using Three-Capacitance and Analytical Models,” *Polymers*, volumen 12, número 1, 2020, ISSN: 2073-4360. DOI: 10.3390/polym12010077. dirección: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/1/77> (véanse páginas 7, 10).
- [31] Y. Otake, T. Umemoto, K.-i. Suga et al., “Influence of Defect Size on Insulation Deterioration of Epoxy Resins with Voids,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 28, número 1, páginas 52-57, 2021. DOI: 10.1109/TDEI.2020.008990 (véase página 7).
- [32] Y. Sekii, “Degradation of low-density polyethylene and cross-linked polyethylene by partial discharge,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 17, número 1, páginas 116-124, 2010. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5412009 (véase página 7).

- [33] L. Li, Q. Yao, H. Xia et al., “Experimental Study on Partial Discharge and Breakdown Decomposition Characteristics of C5F10O under Different Background Gases,” en *2022 Asia Power and Electrical Technology Conference (APET)*, 2022. DOI: 10.1109/APET56294.2022.10073041 (véase página 8).
- [34] S. A. Shcherbanev, I. U. Nadinov, P. Auvray, S. M. Starikovskaia, S. Pancheshnyi y L. G. Herrmann, “Emission Spectroscopy of Partial Discharges in Air-Filled Voids in Unfilled Epoxy,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, volumen 44, número 7, páginas 1219-1227, 2016. DOI: 10.1109/TPS.2016.2576560 (véanse páginas 8, 9).
- [35] T. Tanaka, “Internal Partial Discharge and Material Degradation,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, volumen EI-21, número 6, páginas 899-905, 1986. DOI: 10.1109/TEI.1986.348999 (véase página 8).
- [36] L. Kang, W. Liu y Z. Guoqiang, “A New Detection Method for Corona Discharge in High Voltage Power Modules Based on Decomposition Gas Analysis,” en *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2018, páginas 3123-3128. DOI: 10.1109/POWERCON.2018.8601620 (véase página 8).
- [37] Y. Ehara, K. Aono y S. Koshio, “Degradation analysis of epoxy resin surfaces exposed to partial discharge,” en *2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2016, páginas 881-884. DOI: 10.1109/CEIDP.2016.7785545 (véase página 8).
- [38] T. Tanaka, “Internal Partial Discharge and Material Degradation,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, volumen EI-21, número 6, páginas 899-905, 1986. DOI: 10.1109/TEI.1986.348999 (véase página 9).
- [39] J.-p. Li, J.-y. Zhao, R.-r. Zheng e Y. Liu, “Fault Diagnosis System of Transformer Based on GAS Chromatography,” en *2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2006, páginas 809-813. DOI: 10.1109/ICMLC.2006.258458 (véase página 9).
- [40] ‘Whitehead’, *’S. Dielectric Breakdown of Solids’*. ‘Clarendon Press: Oxford, UK’, ‘1951’ (véase página 10).
- [41] J. Novak y R. Bartnikas, “Ionization and excitation behavior in a microcavity,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 2, número 5, páginas 724-728, 1995. DOI: 10.1109/94.469969 (véanse páginas 10, 11).
- [42] “. A. Lieberman y A. J. Lichtenberg”, *”Principles of Plasma Discharges and Materials Processing”*. “John Wiley Sons, Inc. , Second Edition”, “2005” (véanse páginas 11, 12).
- [43] Techimp, “TechImp PD Pro operator’s manual,” en nov. de 2019, páginas 77-84 (véanse páginas 13, 14, 54).
- [44] A. Cavallini, A. Contin, G. Montanari y F. Puletti, “Advanced PD inference in on-field measurements. I. Noise rejection,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 10, número 2, páginas 216-224, 2003. DOI: 10.1109/TDEI.2003.1194102 (véanse páginas 14, 15).
- [45] A. Krivda, “Recognition of discharges: Discrimination and classification,” Tesis doctoral, Delft University of Technology, sep. de 1995. dirección: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:72ba99df-ac01-48ed-b5bd-a87ac6c139e6> (véanse páginas 15-17).

- [46] J. Li, P. Guo, X. Kong, Y. Wang, F. Li y B. Du, “Curing Degree Dependence of Dielectric Properties of Bisphenol-A-Based Epoxy Resin Cured With Methyl Hexahydrophthalic Anhydride,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 29, número 6, páginas 2072-2079, 2022. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3212970 (véase página 18).
- [47] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, M. Dong y M. Ren, “Computer Simulation of Partial Discharges in Voids inside Epoxy Resins Using Three-Capacitance and Analytical Models,” *Polymers*, volumen 12, número 1, 2020, ISSN: 2073-4360. DOI: 10.3390/polym12010077. dirección: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/1/77> (véanse páginas 27, 28).
- [48] B. Yousfi e I. K. Lefkaier, “Simulation of partial discharges initiation in voids in medium voltage cables insulators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, volumen 25, número 3, páginas 892-899, 2018. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006790 (véase página 29).

Anexos

.1. Limpieza de ruido y separación de clústeres

En las figuras 1 y 2 se muestra cómo se realiza el filtrado de una fuente de descargas indeseadas, pudiendo verse en el PRPD cómo estas descargas coinciden con aquellas que se encuentran fuera de las zonas típicas de los ángulos de la mayoría de las descargas.

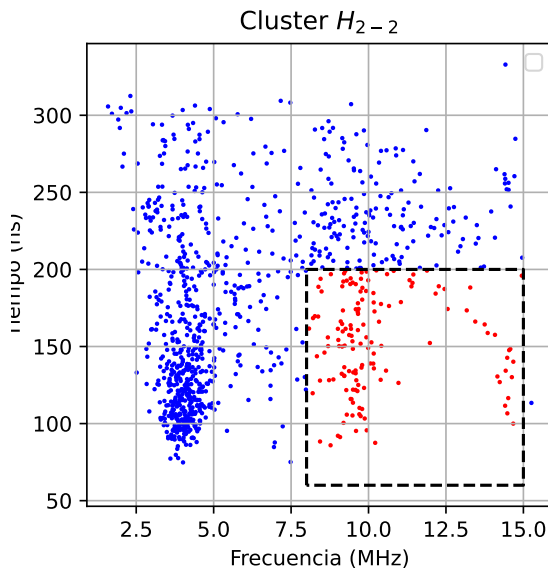


Figura 1. Plano $T-F$ para la probeta 2 de la vacuola de hidrógeno, resaltando los puntos que se filtrarán.

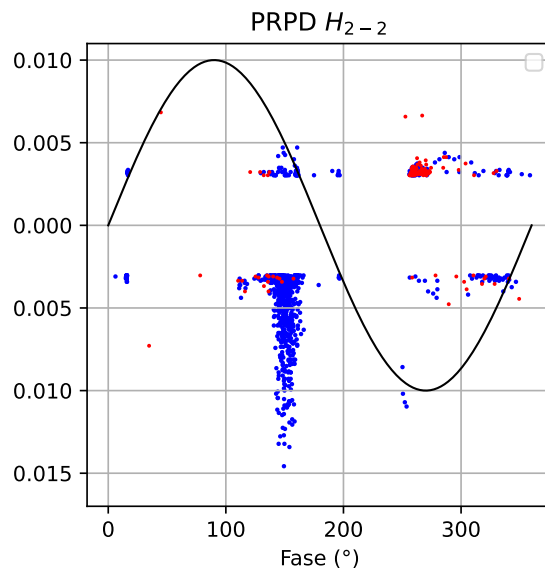


Figura 2. PRPD de la probeta 2 de hidrógeno, resaltando los puntos que serán filtrados.

En las figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento de las descargas resaltadas en un clúster en mapas TF y PRPD. Se observa que las diferentes clases tienen amplitudes mayores y una menor duración de descargas en comparación a las del clúster más grande.

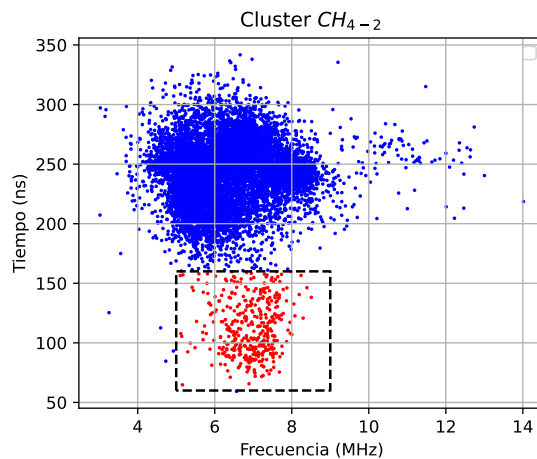


Figura 3. Separación de clúster para la probeta 2 de la vacuola de metano, resaltando los puntos que se indican en el PRPD.

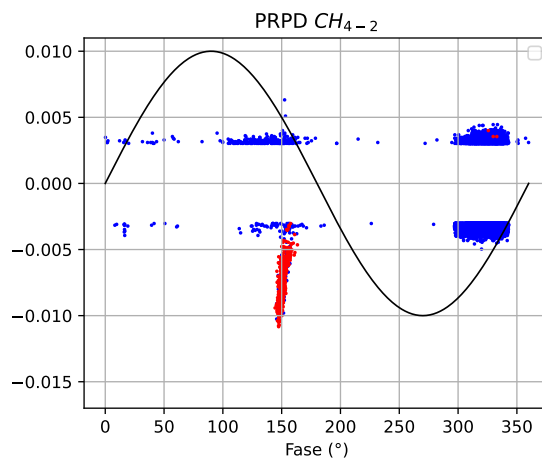


Figura 4. PRPD de la probeta 2 de metano, resaltando las clases según la separación en el mapa TF.

.2. Códigos

.2.0.a. Código matlab para simular la distribución de campo eléctrico en la probeta

El siguiente código abre y crea un nuevo archivo en el programa FEMM, luego simula y entrega el valor medio del campo eléctrico al interior de la vacuola. Útil para calcular la tensión de inicio de descargas.

```

1  openfemm();
2  newdocument(1);
3
4  cuadrado=36;
5  ei_probdef('centimeters','axi',1E-12,1,30);%parametros del programa(frecuencia,
    unidades,tipo de problema,precision,profundidad,angulo de malla,metodo de
    resolucion)
6
7  permitividad=5;
8  volumevac=1/570*1/1000;
9  DiameterInmm=(volumevac*6/pi)^(1/3)/10*1000;
10 DiameterInmm=1.42;
11 altura=0.52;
12 vac=DiameterInmm/10; %diametro de vacuola
13 electrode=5;
14 di=9;
15 tension=18170; % para vac4,3,2,1 ;16300V, 16526V, 16790V, 17350V
16 %0.1,1mm,2 y 3 :19000, 16900,15100,14500
17
18 %%casos
19
20 %materiales
21 ei_getmaterial('Air');
22 ei_addboundprop('tierra', 0, 0, 0, 0, 0); %name ''boundname, voltaje, all other
    parameters to zero.
23 ei_addboundprop('fasea', tension, 0, 0, 0, 0);

```

```
24 ei_addmaterial('resina',permitividad,permitividad,0);
25
26
27 ei_addnode(0,altura);
28 ei_addnode(electrode,altura);
29 ei_addnode(di,altura);
30 ei_addnode(di,0);
31 ei_addnode(electrode,0);
32 ei_addnode(0,0);
33 ei_addnode(0,altura/2-vac/2);
34 ei_addnode(0,altura/2+vac/2);
35
36 ei_addsegment(0,altura,electrode,altura);
37 ei_addsegment(electrode,altura,di,altura);
38 ei_addsegment(di,altura,di,0);
39 ei_addsegment(di,0,electrode,0);
40 ei_addsegment(electrode,0,0,0);
41 ei_addsegment(0,0,0,altura/2-vac/2);
42 ei_addsegment(0,altura/2-vac/2,0,altura/2+vac/2);
43 ei_addsegment(0,altura/2+vac/2,0,altura);
44 ei_drawarc(0,altura/2-vac/2,0,altura/2+vac/2,180,1);
45
46 ei_selectsegment(electrode/2,0);
47 ei_setsegmentprop('tierra', 0, 0, 1, 1,0);
48 ei_clearselected;
49 ei_selectsegment(electrode/2,altura);
50 ei_setsegmentprop('fasea', 0, 0, 1, 1,0);
51 ei_clearselected;
52
53 ei_addblocklabel(vac*2,altura/2);
54 ei_selectlabel(vac*2,altura/2);
55 ei_setblockprop('resina', 0, 0, 1);
56 ei_clearselected;
57
58 ei_addblocklabel(2*vac,altura*1.5);
59 ei_selectlabel(2*vac,altura*1.5);
60 ei_setblockprop('Air', 0, 0, 1);
61 ei_clearselected;
62
63 ei_addblocklabel(vac/4,altura/2);
64 ei_selectlabel(vac/4,altura/2);
65 ei_setblockprop('Air', 0, 0, 1);
66 ei_clearselected;
67
68 ei_saveas('C:\Users\gabel\Desktop\UNIVERSIDAD\Memoria\simulaciones\intento1.FEE
    ');
69
70 ei_analyze(1);
71 ei_loadsolution;
72
73 eo_seteditmode('area') %point, contour, area
74 eo_selectblock(vac/4,altura/2);
75
76 AverageE = eo_blockintegral(4);
77 % 0 Stored Energy
78 % 1 Block Cross-section
79 % 2 Block Volume
80 % 3 Average D over the block
81 % 4 Average E over the block
```

```

82 % 5 Weighted Stress Tensor Force
83 % 6 Weighted Stress Tensor Torque
84
85 eo_zoom(-altura/4,-0.25,altura/4, altura*2);%centrar la vista del dibujo
86 % eo_maximize
87
88 V = AverageE(2)*-DiameterInmm/1000
89
90 %%
91
92 d= DiameterInmm; %distancia en mm
93 B = 273.750;
94 p = 101000;          %Pa
95 A = 11.25;
96 gamma_se = 0.01;
97
98 % Cálculo de VB usando la ecuación
99 VB = (B * p*d/1000) / (log(A * p*d/1000) - log(log(1 + 1/gamma_se)))

```

.2.1. Simulación matlab de descargas parciales internas

A continuación, se indica el código utilizado en matlab para generar la señal teórica aproximada del comportamiento de las descargas parciales internas.

```

1      % Definición de los parámetros
2 Vinc = 0.49; % Amplitud de la señal sinusoidal
3 drop = 0.4;
4 x = linspace(0, 50*pi, 8000); % Valores de x desde 0 hasta 4*pi
5 x_degrees = x*180/pi;
6
7 % Crear la señal sinusoidal
8 sinx =sin(x);
9
10 % Inicializar chopped_sinx como la señal sinusoidal
11 chopped_sinx = sinx;
12
13 % Definir la tolerancia
14 tolerance = 0.01;
15
16 % Modificar chopped_sinx en función de las condiciones (ciclo positivo)
17
18 indiceup   = [];
19 indexedown = [];
20
21
22 for k = 1:20
23 cross_indices_up = find(abs(chopped_sinx - Vinc) < tolerance);
24 indiceup = [indiceup, cross_indices_up(1)];
25     if chopped_sinx(indiceup(k)) > Vinc*drop
26         chopped_sinx(indiceup(k):end) = chopped_sinx(indiceup(k):end) - (Vinc*
27             drop);
28     else
29         chopped_sinx(indiceup(k):end) = chopped_sinx(indiceup(k):end) + Vinc*
30             drop;
31     end
32 %indiceup = [indiceup, cross_indices_up(k)];
33
34 cross_indices_down = find((chopped_sinx + Vinc) < tolerance);

```

```

33 indexeddown = [indexeddown, cross_indices_down(1)];
34
35     % Modificar chopped_sinx en función de las condiciones (ciclo negativo)
36
37     if chopped_sinx(indexeddown(k)) > Vinc*drop
38         chopped_sinx(indexeddown(k):end) = chopped_sinx(indexeddown(k):end) - (
39     Vinc*drop);
40     else
41         chopped_sinx(indexeddown(k):end) = chopped_sinx(indexeddown(k):end) +
42     Vinc*drop;
43     end
44
45
46 % Calcular dx para a derivada
47 dx = chopped_sinx(2) - chopped_sinx(1);
48
49 % Calcular la derivada numérica utilizando diferencias finitas centradas
50 df_numerical = 0.1*diff((chopped_sinx)) / dx;
51
52 figure('Units', 'inches', 'Position', [1, 1, 7, 4]);
53 ax = axes('Position', [0.1, 0.1, 0.85, 0.85]); % Ajusta los márgenes del área
54     de trazado
55 plot(ax, x_degrees, sinx, 'b', 'DisplayName', 'V');
56 hold on
57 plot(ax, x_degrees, chopped_sinx, 'r', 'DisplayName', 'V vacuola');
58
59 % Agregar líneas punteadas
60 y_line1 = Vinc;
61 y_line2 = -Vinc;
62 line(ax, [min(x_degrees), max(x_degrees)], [y_line1, y_line1], 'Color', 'g', '
63     LineStyle', '--', 'DisplayName', 'Vinc');
64 line(ax, [min(x_degrees), max(x_degrees)], [y_line2, y_line2], 'Color', 'g', '
65     LineStyle', '--', 'DisplayName', '-Vinc');
66
67 xlabel('fase (grados)')
68 ylabel('Tensión')
69 title('Tensión dentro de la vacuola')
70 legend(ax, 'Location', 'best')
71 grid(ax, 'on');
72 hold off
73 % Acotar el eje x entre 0 y 15
74 xlim(ax, [0, 865]);
75
76 print('Testing', '-dpdf', '-r300') % Ajusta el nombre del archivo según tu
77     preferencia y la resolución ('-r')

```

.2.2. PRPD

El código utilizado para graficar los PRPD a partir de los archivos CSV es el siguiente:

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Especifica la ruta completa del archivo utilizando barras invertidas dobles

```

```
6 ruta_del_archivo = "C:\\Users\\gabel\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\Memoria\\Resultados
  \\H2_1.csv"
7
8 # Carga el archivo CSV
9 df = pd.read_csv(ruta_del_archivo, sep=';', header=None)
10 df = df.T
11
12 # Toma la primera fila como nombres de columnas
13 df.columns = df.iloc[0]
14
15 # Elimina la primera fila que contiene los nombres de las columnas
16 df = df[1:]
17
18 # Restablece el índice
19 df.reset_index(drop=True, inplace=True)
20
21 # Asigna nombres a las columnas
22 nombres_columnas = ["Amplitud[V]", "Fase[deg]", "Fase_t[ns]", "Frecuencia[MHZ]",
  "Tiempo[s]"]
23 df.columns = nombres_columnas
24 # Renombra el nombre del índice como "N°"
25 df.index.name = "N°"
26
27 # Crear un rango de ángulos desde 0° hasta 360°
28 angulos = np.arange(0, 361, 1)
29
30 # Convertir los ángulos a radianes
31 radianes = np.radians(angulos)
32
33 # Calcular los valores del seno para los radianes
34 seno = np.sin(radianes) * 0.018
35
36 # Extraer los valores de las columnas 0 y 1 de tu DataFrame (reemplaza "df" con
  el nombre de tu DataFrame)
37 x_puntos = df.iloc[:, 1]
38 y_puntos = df.iloc[:, 0]
39
40 # Ajustar el tamaño de los puntos
41 tamaño_puntos = 0.1
42
43 # Crear el gráfico
44 plt.figure(figsize=(5, 4))
45 plt.plot(angulos, seno)
46 plt.scatter(x_puntos, y_puntos, color='blue', marker='o', s=tamaño_puntos)
47 plt.title('Patrón PRPD')
48 plt.xlabel('Fase (°)')
49 plt.ylabel('Amplitud (V)')
50 plt.legend()
51 plt.grid(True)
52 #plt.savefig(f'PRPD_{archivo}_compare.pdf', format='pdf')
53 # Mostrar el gráfico
54 plt.show()
```

Código 1. Código para graficar PRPD

.2.2.a. PRPDs simultáneos

El código utilizado para graficar múltiples PRPD a partir de los archivos CSV es el siguiente:

```
1
2 # Crear el DataFrame principal vacío
3 df_principal = pd.DataFrame()
4
5 # Lista de archivos que deseas procesar
6 archivos_a_procesar = ["H2_1.csv", "H2_2.csv", "CH4_1.csv", "CH4_2.csv", "
    patron_1.csv", "patron_2.csv"]
7
8 # Nombres de columnas fijas
9 nombres_columnas = ["Amplitude", "Phase", "Phase_t", "Frequency", "time"]
10
11 # Recorre la lista de archivos y agrégalos al DataFrame principal
12 for archivo in archivos_a_procesar:
13     ruta_archivo = f"C:\\Users\\gabel\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\Memoria\\
    Resultados\\{archivo}"
14
15     # Cargar y procesar el archivo
16     df = pd.read_csv(ruta_archivo, sep=';', header=None)
17     df = df.T
18     df.columns = df.iloc[0]
19     df = df[1:]
20     df.reset_index(drop=True, inplace=True)
21
22     # Obtener el nombre base del archivo (sin la extensión)
23     nombre_base = archivo.split('.')[0]
24
25     # Agregar el nombre del archivo a las columnas
26     nombres_columnas_archivo = [f"{columna}_{nombre_base}" for columna in
    nombres_columnas]
27     df.columns = nombres_columnas_archivo
28
29     # Agregar los datos al DataFrame principal
30     if df_principal.empty:
31         df_principal = df
32     else:
33         df_principal = pd.concat([df_principal, df], axis=1)
34
35 # Restablecer el índice del DataFrame principal
36 df_principal.index.name = "N°"
37
38 # El DataFrame "df_principal" ahora contiene todos los datos de los archivos
    procesados con nombres de columnas personalizados.
39 df_principal.to_csv(f'Todo.csv')
40 # Crear un rango de ángulos desde 0° hasta 360°
41 angulos = np.arange(0, 361, 1)
42
43 # Convertir los ángulos a radianes
44 radianes = np.radians(angulos)
45
46 # Calcular los valores del seno para los radianes
47 seno = np.sin(radianes) * 0.01
48
49 # Definir una función para generar el gráfico
50 def PRPD(archivo):
```

```

51     archivo_titulos_mapping = {
52     'H2': {
53         'titulo1': r'$H_{\mathrm{2-1}}$',
54         'titulo2': r'$H_{\mathrm{2-2}}$'
55     },
56     'CH4': {
57         'titulo1': r'$CH_{\mathrm{4-1}}$',
58         'titulo2': r'$CH_{\mathrm{4-2}}$'
59     },
60     'patron': {
61         'titulo1': r'$patron_{\mathrm{1}}$',
62         'titulo2': r'$patron_{\mathrm{2}}$'
63     }
64 }
65
66 # Obtener los títulos correspondientes del diccionario y acotar rangos para
67 # filtrar ruido y descargas indeseadas de conmutación
68 if archivo in archivo_titulos_mapping:
69     titulo1 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo1']
70     titulo2 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo2']
71     if archivo == "H2":
72         ax1 = 120
73         ax2 = 175
74         ax3 = 300
75         ax4 = 355
76         ax1_2 = 107
77         ax2_2 = 168
78         ax3_2 = 250
79         ax4_2 = 355
80
81     if archivo == "CH4":
82         ax1 = 105
83         ax2 = 166
84         ax3 = 287
85         ax4 = 355
86         ax1_2 = 100
87         ax2_2 = 172
88         ax3_2 = 292
89         ax4_2 = 345
90
91     if archivo == "patron":
92         ax1 = 99
93         ax2 = 168
94         ax3 = 291
95         ax4 = 345
96         ax1_2 = 97
97         ax2_2 = 170
98         ax3_2 = 303
99         ax4_2 = 348
100 else:
101     titulo1 = f'Archivo_1'
102     titulo2 = f'Archivo_2'
103
104     archivo_suffix_1 = '_1'
105     archivo_suffix_2 = '_2'
106     phase_column_1 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_1}'
107     amplitude_column_1 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_1}'
108     phase_column_2 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_2}'

```

```
109     amplitude_column_2 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_2}'
110
111     # Extraer los valores de las columnas de fase y amplitud
112     x_puntos_1 = df_principal[phase_column_1]
113     y_puntos_1 = df_principal[amplitude_column_1]
114     x_puntos_2 = df_principal[phase_column_2]
115     y_puntos_2 = df_principal[amplitude_column_2]
116     max_values = df_principal.groupby(phase_column_1)[amplitude_column_1].max()
117
118     # Ajustar el tamaño de los puntos
119     tamaño_puntos = 0.1
120     ylim1 = min(y_puntos_2*1.1)
121     #ylim1 = -0.017
122     ylim2 = 0.011
123     # Crear el gráfico
124     plt.figure(figsize=(7,4))
125     plt.plot(angulos, seno , color='black', linewidth = 1)
126     plt.scatter(x_puntos_1, y_puntos_1, color='red', marker='o', s=
tamaño_puntos, label=f'{archivo}{archivo_suffix_1}')
127     plt.scatter(x_puntos_2, y_puntos_2, color='blue', marker='o', s=
tamaño_puntos, label=f'{archivo}{archivo_suffix_2}')
128     # Agregar líneas
129
130     plt.ylim(ylim1, ylim2)
131
132     plt.title('PRPD')
133     plt.xlabel('Fase (°)')
134     plt.ylabel('Amplitud (V)')
135     plt.legend()
136     plt.grid(True)
137     plt.savefig(f'PRPD_{archivo}compare.pdf', format='pdf')
138     plt.show()
139
140     plt.figure(figsize=(7,4))
141     plt.plot(angulos, seno , color='black', linewidth = 1)
142     plt.scatter(x_puntos_1, y_puntos_1, color='blue', marker='o', s=
tamaño_puntos)
143     plt.axvline(x=ax1, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
144     plt.axvline(x=ax2, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
145     plt.axvline(x=ax3, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
146     plt.axvline(x=ax4, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
147
148
149     plt.ylim(ylim1, ylim2)
150     plt.title(f'PRPD {titulo1}')
151     plt.xlabel('Fase (°)')
152     plt.ylabel('Amplitud (V)')
153     plt.legend()
154     plt.grid(True)
155     plt.savefig(f'PRPD_{archivo}{archivo_suffix_1}.pdf', format='pdf')
156     plt.show()
157
158     plt.figure(figsize=(7,4))
159     plt.plot(angulos, seno , color='black', linewidth = 1)
160     plt.scatter(x_puntos_2, y_puntos_2, color='blue', marker='o', s=
tamaño_puntos)
161     plt.axvline(x=ax1_2, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
162     plt.axvline(x=ax2_2, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
163     plt.axvline(x=ax3_2, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
```

```

164 plt.axvline(x=ax4_2, linestyle='--', color='green', linewidth=1)
165 plt.ylim(ylim1, ylim2)
166 plt.title(f'PRPD {titulo2}')
167 plt.xlabel('Fase (°)')
168 plt.ylabel('Amplitud (V)')
169 plt.legend()
170 plt.grid(True)
171 plt.savefig(f'PRPD_{archivo}{archivo_suffix_2}.pdf', format='pdf')
172 plt.show()
173 #Genera las figuras correspondientes de acuerdo a la función
174 PRPD("H2")

```

Código 2. Código para graficar múltiples PRPD

.2.2.b. Parámetros estadísticos por semiciclo

Para calcular los parámetros estadísticos se acotan las descargas por semiciclo y luego se calculan los parámetros correspondientes.

```

1
2 from scipy.stats import norm
3 import math
4
5 angulos = np.arange(0, 361, 1)
6
7 # Convertir los ángulos a radianes
8 radianes = np.radians(angulos)
9
10 # Calcular los valores del seno para los radianes
11 seno = np.sin(radianes) * 0.01
12
13 # Definir una función para generar el gráfico
14 def stats(archivo):
15     archivo_titulos_mapping = {
16         'H2': {
17             'titulo1': r'$H_{\mathrm{2-1}}$',
18             'titulo2': r'$H_{\mathrm{2-2}}$'
19         },
20         'CH4': {
21             'titulo1': r'$CH_{\mathrm{4-1}}$',
22             'titulo2': r'$CH_{\mathrm{4-2}}$'
23         },
24         'patron': {
25             'titulo1': r'$patron_{\mathrm{1}}$',
26             'titulo2': r'$patron_{\mathrm{2}}$'
27         }
28     }
29
30 # Obtener los títulos correspondientes del diccionario
31 if archivo in archivo_titulos_mapping:
32     titulo1 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo1']
33     titulo2 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo2']
34     if archivo == "H2":
35         ax1 = 120
36         ax2 = 175
37         ax3 = 300
38         ax4 = 355
39         ax1_2 = 107

```

```
40         ax2_2 = 168
41         ax3_2 = 300
42         ax4_2 = 355
43         filter1=0.02
44         filter2=0.0045
45         filter3=1
46         filter4=0.005
47
48     if archivo == "CH4":
49         ax1 = 105
50         ax2 = 166
51         ax3 = 287
52         ax4 = 355
53         ax1_2 = 100
54         ax2_2 = 172
55         ax3_2 = 292
56         ax4_2 = 345
57         filter1=0.01
58         filter2=0.1
59         filter3=0.1
60         filter4=0.1
61
62     if archivo == "patron":
63         ax1 = 99
64         ax2 = 168
65         ax3 = 291
66         ax4 = 345
67         ax1_2 = 97
68         ax2_2 = 170
69         ax3_2 = 303
70         ax4_2 = 348
71         filter1=0.03
72         filter2=0.01
73         filter3=1
74         filter4=0.1
75 else:
76     titulo1 = f'Archivo_1'
77     titulo2 = f'Archivo_2'
78
79
80     archivo_suffix_1 = '_1'
81     archivo_suffix_2 = '_2'
82     phase_column_1 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_1}'
83     amplitud_column_1 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_1}'
84     phase_column_2 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_2}'
85     amplitud_column_2 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_2}'
86
87     # Extraer los valores de las columnas de fase y amplitud
88     x_puntos_1 = df_principal[phase_column_1]
89     y_puntos_1 = df_principal[amplitud_column_1]
90     x_puntos_2 = df_principal[phase_column_2]
91     y_puntos_2 = df_principal[amplitud_column_2]
92     max_values1 = df_principal.groupby(phase_column_1)[amplitud_column_1].max
93     ().abs()
94     max_values2 = df_principal.groupby(phase_column_2)[amplitud_column_2].max
95     ().abs()
96
97     # Ajustar el tamaño de los puntos
98     tamaño_puntos = 0.1
```

```
97     ylim1 = min(y_puntos_2*1.1)
98     #ylim1 = -0.017
99     ylim2 = 0.011
100
101     df_half_1 = max_values1[(max_values1.index >= ax1) & (max_values1.index <=
102     180) & (max_values1.values < filter1)]
103     df_half_2 = max_values1[(max_values1.index > ax3) & (max_values1.index <=
104     360) & (max_values1.values < filter2)]
105
106     curtosis_half_1 = kurtosis(df_half_1)
107     curtosis_half_2 = kurtosis(df_half_2)
108
109     asimetria_half_1 = skew(df_half_1)
110     asimetria_half_2 = skew(df_half_2)
111
112     df_half_1_2 = max_values2[(max_values2.index >= ax1_2) & (max_values2.index
113     <= 180) & (max_values2.values < filter3)]
114     df_half_2_2 = max_values2[(max_values2.index > ax3_2) & (max_values2.index
115     <= 360) & (max_values2.values < filter4)]
116
117     # Calcular curtosis y asimetría para cada mitad
118     curtosis_half_1_2 = kurtosis(df_half_1_2)
119     curtosis_half_2_2 = kurtosis(df_half_2_2)
120
121     asimetria_half_1_2 = skew(df_half_1_2)
122     asimetria_half_2_2 = skew(df_half_2_2)
123
124     plt.scatter(df_half_1.index, df_half_1.values ,color='blue', marker='o', s=
125     tamaño_puntos)
126     plt.xlabel('Fase')
127     plt.ylabel('H_max')
128     plt.title(f'max_values {titulo1} +')
129     plt.show()
130     plt.scatter(df_half_2.index, df_half_2.values ,color='blue', marker='o', s=
131     tamaño_puntos)
132     plt.xlabel('Fase')
133     plt.ylabel('H_max')
134     plt.title(f'max_values {titulo1} -')
135     plt.show()
136
137     plt.scatter(df_half_1_2.index, df_half_1_2.values ,color='blue', marker='o'
138     , s=tamaño_puntos)
139     plt.xlabel('Fase')
140     plt.ylabel('H_max')
141     plt.title(f'max_values {titulo2} +')
142     plt.show()
143     plt.scatter(df_half_2_2.index, df_half_2_2.values ,color='blue', marker='o'
144     , s=tamaño_puntos)
145     plt.xlabel('Fase')
146     plt.ylabel('H_max')
147     plt.title(f'max_values {titulo2} -')
148     plt.show()
149
150     mean1      = sum(df_half_1.index) / len(df_half_1) # Calcular la media
151     manualmente
152     variance1  = sum((x - mean1) ** 2 for x in df_half_1.index) / len(df_half_1)
153     std_dev1   = math.sqrt(variance1)
```

```
146     mean2      = sum(df_half_2.index) / len(df_half_2) # Calcular la media
147     manualmente
148     variance2 = sum((x - mean2) ** 2 for x in df_half_2.index) / len(df_half_2)
149     std_dev2  = math.sqrt(variance2)
150
151     mean1_2    = sum(df_half_1_2.index) / len(df_half_1_2) # Calcular la
152     media manualmente
153     variance1_2 = sum((x - mean1_2) ** 2 for x in df_half_1_2.index) / len(
154     df_half_1_2)
155     std_dev1_2 = math.sqrt(variance1_2)
156
157     mean2_2    = sum(df_half_2_2.index) / len(df_half_2_2) # Calcular la
158     media manualmente
159     variance2_2 = sum((x - mean2_2) ** 2 for x in df_half_2_2.index) / len(
160     df_half_2_2)
161     std_dev2_2 = math.sqrt(variance2_2)
162
163     print (f"Positivo {archivo}{archivo_suffix_1}")
164     print ("Qmax=",df_half_1.max())
165     print ("Qmax95=",df_half_1.mean()+2*df_half_1.std())
166     print ("Qmean=",df_half_1.mean())
167     print ("N=",len(df_half_1))
168     print ("Min°=",df_half_1.index.min())
169     print ("Max°=",df_half_1.index.max())
170     print ("Mean°=",sum(df_half_1.index)/len(df_half_1))
171     print("Curtosis:", curtosis_half_1)
172     print("Skewness:", asimetria_half_1)
173     print ("FStd=",std_dev1)
174     print ("QStd=",df_half_1.std(), "\n")
175
176     print (f"Negativo {archivo}{archivo_suffix_1}")
177     print ("Qmax=",df_half_2.max())
178     print ("Qmax95=",df_half_2.mean()+2*df_half_2.std())
179     print ("Qmean=",df_half_2.mean())
180     print ("N=",len(df_half_2))
181     print ("Min°=",df_half_2.index.min())
182     print ("Max°=",df_half_2.index.max())
183     print ("Mean°=",sum(df_half_2.index)/len(df_half_2))
184     print("Curtosis:", curtosis_half_2)
185     print("Skewness:", asimetria_half_2)
186     print ("FStd=",std_dev2)
187     print ("QStd=",df_half_2.std(), "\n")
188
189     print (f"Positivo {archivo}{archivo_suffix_2}")
190     print ("Qmax=",df_half_1_2.max())
191     print ("Qmax95=",df_half_1_2.mean()+2*df_half_1_2.std())
192     print ("Qmean=",df_half_1_2.mean())
193     print ("N=",len(df_half_1_2))
194     print ("Min°=",df_half_1_2.index.min())
195     print ("Max°=",df_half_1_2.index.max())
196     print ("Mean°=",sum(df_half_1_2.index)/len(df_half_1_2))
197     print("Curtosis:", curtosis_half_1_2)
198     print("Skewness:", asimetria_half_1_2)
199     print ("FStd=",std_dev1_2)
200     print ("QStd=",df_half_1_2.std(), "\n")
201
202     print (f"Negativo {archivo}{archivo_suffix_2}")
203     print ("Qmax=",df_half_2_2.max())
```

```

200     print ("Qmax95=",df_half_2_2.mean()+2*df_half_2_2.std())
201     print ("Qmean=",df_half_2_2.mean())
202     print ("N=",len(df_half_2_2))
203     print ("Min°=",df_half_2_2.index.min())
204     print ("Max°=",df_half_2_2.index.max())
205     print ("Mean°=",sum(df_half_2_2.index)/len(df_half_2_2))
206     print("Curtosis:", curtosis_half_2_2)
207     print("Skewness:", asimetria_half_2_2)
208     print ("FStd=",std_dev2_2)
209     print ("QStd=",df_half_2_2.std(), "\n")
210
211 stats("patron")

```

Código 3. Código para obtener parámetros estadísticos

.2.2.c. Gráficos de barras de cada parámetro

Una vez obtenidos los parámetros estadísticos se procede a graficar mediante barras las características para cada probeta. En este caso se evalúa Qmax95, en caso de necesitar otro parámetro se modifican las líneas correspondientes

```

1
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4
5 variables = ['H2 1', 'H2 2', '', 'CH4 1', 'CH4 2', '', 'patron 1', 'patron 2']
6 colors = ['orangered', 'red', 'darkgreen', 'lime', 'darkblue', 'indigo']
7
8 Qmax95p = [0.0090, 0.0095, np.nan, 0.0065, 0.0103, np.nan, 0.0127, 0.0192]
9 Qmeanp  = [0.0047, 0.0049, np.nan, 0.0050, 0.0056, np.nan, 0.0070, 0.0105]
10 fmeanp  = [147.62, 149.72, np.nan, 150.87, 146.61, np.nan, 137.78, 137.44]
11 Qmax95p1 = [0.0090, 0.0095, 0.0065, 0.0103, 0.0127, 0.0192]
12 Qmeanp1  = [0.0047, 0.0049, 0.0050, 0.0056, 0.0070, 0.0105]
13 fmeanp1  = [147.62, 149.72, 150.87, 146.61, 137.78, 137.44]
14
15
16 Qmax95n = [0.0035, 0.003811, np.nan, 0.0039, 0.0037, np.nan, 0.0036, 0.0034]
17 Qmeann  = [0.0032, 0.00326, np.nan, 0.0033, 0.0032, np.nan, 0.0032, 0.0031]
18 fmeann  = [326.39, 327.60, np.nan, 328.89, 323.12, np.nan, 316.26, 329.17]
19 Qmax95n1 = [0.0035, 0.003811, 0.0039, 0.0037, 0.0036, 0.0034]
20 Qmeann1  = [0.0032, 0.00326, 0.0033, 0.0032, 0.0032, 0.0031]
21 fmeann1  = [326.39, 327.60, 328.89, 323.12, 316.26, 329.17]
22
23 print(f'Qmax95p= {np.mean(Qmax95p1):.4f}')
24 print(f'Qmeanp= {np.mean(Qmeanp1):.4f}')
25 print(f'fmeanp= {np.mean(fmeanp1):.4f}')
26 print(f'Qmax95n= {np.mean(Qmax95n1):.4f}')
27 print(f'Qmeann= {np.mean(Qmeann1):.4f}')
28 print(f'fmeann= {np.mean(fmeann1):.4f}')
29
30 bar_width = 0.2 # Ancho de las barras
31 index = np.arange(len(variables)) # Índices para las barras
32
33 # Obtener los índices donde se deben dibujar las barras
34 index_bars = [i for i, value in enumerate(Qmax95p) if not np.isnan(value)]
35
36 plt.figure(figsize=(4, 3))
37 for i, idx in enumerate(index_bars):

```

```

38     plt.bar(index[idx], Qmax95p[idx], bar_width, label='Frec. media +', color=
        colors[i])
39 plt.ylabel('Qmax 95% [V]')
40 plt.title('Semiciclo positivo')
41 plt.xticks(index[index_bars], [variables[i] for i in index_bars], rotation=45,
        ha='right')
42 plt.ylim(0.002, 0.02)
43 plt.axhline(y=np.mean(Qmax95p1), color='black', linestyle='--', label=f'
        Promedio: {np.mean(Qmax95p1):.4f}')
44 plt.tight_layout()
45 plt.savefig(f'Qmax95_p_summary.pdf', format='pdf')
46 plt.show()
47
48 plt.figure(figsize=(4, 3))
49 for i, idx in enumerate(index_bars):
50     plt.bar(index[idx], Qmax95n[idx], bar_width, label='Frec. media -', color=
        colors[i])
51 plt.ylabel('Qmax 95% [V]')
52 plt.title('Semiciclo negativo')
53 plt.xticks(index[index_bars], [variables[i] for i in index_bars], rotation=45,
        ha='right')
54 plt.ylim(0.0020, 0.004050)
55 plt.axhline(y=np.mean(Qmax95n1), color='black', linestyle='--', label=f'
        Promedio: {np.mean(Qmax95n1):.4f}')
56 plt.tight_layout()
57 plt.savefig(f'Qmax95_n_summary.pdf', format='pdf')
58 plt.show()

```

.2.2.d. Gráfico de curva normal ajustada al PRPD

Este código es una función que grafica la distribución normal que mejor se adapta a los datos de un semiciclo.

```

1 from scipy.stats import norm, kurtosis, skew, gaussian_kde
2 import math
3 import pandas as pd
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 angulos = np.arange(0, 361, 1)
8
9 # Convertir los ángulos a radianes
10 radianes = np.radians(angulos)
11
12 # Calcular los valores del seno para los radianes
13 seno = np.sin(radianes) * 0.01
14
15 # Definir una función para generar el gráfico
16 def stats(archivo):
17     archivo_titulos_mapping = {
18         'H2': {
19             'titulo1': r'$H_{\mathrm{2-1}}$',
20             'titulo2': r'$H_{\mathrm{2-2}}$',
21         },
22         'CH4': {
23             'titulo1': r'$CH_{\mathrm{4-1}}$',
24             'titulo2': r'$CH_{\mathrm{4-2}}$',
25         },

```

```
26     'patron': {
27         'titulo1': r'$patron_{\mathrm{1}}$',
28         'titulo2': r'$patron_{\mathrm{2}}$'
29     }
30 }
31
32 # Obtener los títulos correspondientes del diccionario
33 if archivo in archivo_titulos_mapping:
34     titulo1 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo1']
35     titulo2 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo2']
36     if archivo == "H2":
37         ax1 = 120
38         ax2 = 175
39         ax3 = 300
40         ax4 = 355
41         ax1_2 = 107
42         ax2_2 = 168
43         ax3_2 = 300
44         ax4_2 = 355
45         filter1=0.02
46         filter2=0.0045
47         filter3=1
48         filter4=0.005
49
50     if archivo == "CH4":
51         ax1 = 105
52         ax2 = 166
53         ax3 = 287
54         ax4 = 355
55         ax1_2 = 100
56         ax2_2 = 172
57         ax3_2 = 292
58         ax4_2 = 345
59         filter1=0.01
60         filter2=0.1
61         filter3=0.1
62         filter4=0.1
63
64     if archivo == "patron":
65         ax1 = 99
66         ax2 = 168
67         ax3 = 291
68         ax4 = 345
69         ax1_2 = 97
70         ax2_2 = 170
71         ax3_2 = 303
72         ax4_2 = 348
73         filter1=0.03
74         filter2=0.01
75         filter3=1
76         filter4=0.1
77     else:
78         titulo1 = f'Archivo_1'
79         titulo2 = f'Archivo_2'
80
81
82     archivo_suffix_1 = '_1'
83     archivo_suffix_2 = '_2'
84     phase_column_1 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_1}'
```

```
85     amplitude_column_1 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_1}'
86     phase_column_2 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_2}'
87     amplitude_column_2 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_2}'
88
89     # Extraer los valores de las columnas de fase y amplitud
90     x_puntos_1 = df_principal[phase_column_1]
91     y_puntos_1 = df_principal[amplitude_column_1]
92     x_puntos_2 = df_principal[phase_column_2]
93     y_puntos_2 = df_principal[amplitude_column_2]
94     max_values1 = df_principal.groupby(phase_column_1)[amplitude_column_1].max
95     ().abs()
96     max_values2 = df_principal.groupby(phase_column_2)[amplitude_column_2].max
97     ().abs()
98
99     # Ajustar el tamaño de los puntos
100     tamaño_puntos = 0.1
101     ylim1 = min(y_puntos_2*1.1)
102     #ylim1 = -0.017
103     ylim2 = 0.011
104
105     # Filtrar y ajustar los datos
106     df_half_1 = max_values1[(max_values1.index >= ax1) & (max_values1.index <=
107     180) & (max_values1.values < filter1)]
108     df_half_1_2 = max_values2[(max_values2.index >= ax1_2) & (max_values2.index
109     <= 180) & (max_values2.values < filter3)]
110
111     kurtosis_half_1 = kurtosis(df_half_1)
112     asimetria_half_1 = skew(df_half_1)
113
114     kurtosis_half_1_2 = kurtosis(df_half_1_2)
115     asimetria_half_1_2 = skew(df_half_1_2)
116
117     # Graficar los puntos
118     plt.figure(figsize=(10, 4))
119     plt.scatter(df_half_1.index, df_half_1.values, color='blue', marker='o', s
120     =0.5)
121
122     mu, std = norm.fit(df_half_1.index)
123     x = np.linspace(df_half_1.index.min(), df_half_1.index.max(), 100)
124     p = norm.pdf(x, mu, std) ## max(df_half_1.values) # Escalar para que la
125     gráfica se ajuste a la escala de las amplitudes
126     p=p/max(p)*(df_half_1.mean()+2*df_half_1.std()) +0.003
127
128     # Graficar la distribución normal ajustada
129     plt.plot(x, p, color='red', lw=2, label=f'Normal Fit:  $\mu={mu:.2f}$ ,  $\sigma={std:.2f}$ ')
130
131     # Etiquetas y título
132     plt.xlabel('Fase')
133     plt.ylabel('H_max')
134     plt.title(f'max_values {titulo1} +')
135     plt.legend()
136     plt.savefig(f'PRPD_example_distribution_zoom.pdf', format='pdf')
137     plt.show()
138
139     plt.scatter(df_half_1_2.index, df_half_1_2.values, color='blue', marker='o
140     ', s=0.5)
141
142     mu, std = norm.fit(df_half_1_2.index)
```

```

136     x = np.linspace(df_half_1_2.index.min(), df_half_1_2.index.max(), 100)
137     p = norm.pdf(x, mu, std) ** max(df_half_1.values) # Escalar para que la
gráfica se ajuste a la escala de las amplitudes
138     p=p/max(p)*(df_half_1_2.mean()+2*df_half_1_2.std()) +0.003
139
140     # Graficar la distribución normal ajustada
141
142     plt.plot(x, p, color='red', lw=2, label=f'Normal Fit:  $\mu={\mu:.2f}$  $,  $\sigma={\sigma:.2f}$  $')
143
144     # Etiquetas y título
145     plt.xlabel('Fase')
146     plt.ylabel('H_max')
147     plt.title(f'max_values {titulo2} +')
148     plt.legend()
149     plt.show()
150
151     mean1      = sum(df_half_1.index) / len(df_half_1) # Calcular la media
manualmente
152     variance1 = sum((x - mean1) ** 2 for x in df_half_1.index) / len(df_half_1)
153     std_dev1  = math.sqrt(variance1)
154
155     print (f"Positivo {archivo}{archivo_suffix_1}")
156     print ("Qmax=",df_half_1.max())
157     print ("Qmax95=",df_half_1.mean()+2*df_half_1.std())
158     print ("Qmean=",df_half_1.mean())
159     print ("N=",len(df_half_1))
160     print ("Min°=",df_half_1.index.min())
161     print ("Max°=",df_half_1.index.max())
162     print ("Mean°=",sum(df_half_1.index)/len(df_half_1))
163     print("Curtosis:", curtosis_half_1)
164     print("Skewness:", asimetria_half_1)
165     print ("FStd=",std_dev1)
166     print ("QStd=",df_half_1.std(), "\n")
167
168 stats("patron")

```

.2.2.e. Gráfica de distribuciones normales para resumir PRPDs

Esta función convierte los PRPD de las seis probetas en curvas de distribución normal que mejor se adaptan a los datos, y las grafica para una visualización simplificada y realizar comparaciones general

```

1 from scipy.stats import norm
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 def calcular_y_graficar_distribuciones():
6     archivos = ["H2", "CH4", "patron"]
7     variables = ['H2 1', 'H2 2', 'CH4 1', 'CH4 2', 'patron 1', 'patron 2']
8     colores = ['orangered', 'red', 'darkgreen', 'lime', 'darkblue', 'indigo']
9
10    # Filtrar solo los valores de variables y colores relevantes (sin '')
11    etiquetas = [var for var in variables if var]
12    colores = [colores[i] for i in range(len(variables)) if variables[i]]
13
14    # Diccionario para almacenar los resultados

```

```
15 resultados_1 = {}
16 resultados_2 = {}
17
18 for archivo, color, etiqueta in zip(archivos * 2, colores, etiquetas):
19     # Definir los sufijos de los archivos
20     if etiqueta.endswith('1'):
21         archivo_suffix = '_1'
22     else:
23         archivo_suffix = '_2'
24
25     # Definir los límites y filtros para cada archivo
26     if archivo == "H2":
27         ax1 = 100
28         ax2 = 280
29         filter1 = 0.02
30     elif archivo == "CH4":
31         ax1 = 100
32         ax2 = 280
33         filter1 = 0.02
34     elif archivo == "patron":
35         ax1 = 100
36         ax2 = 280
37         filter1 = 0.02
38
39     # Extraer los valores de las columnas de fase y amplitud
40     phase_column = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix}'
41     amplitude_column = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix}'
42     max_values = df_principal.groupby(phase_column)[amplitude_column].max()
43     .abs()
44
45     # Filtrar y ajustar los datos para la primera mitad (ax1 a 180)
46     df_half = max_values[(max_values.index >= ax1) & (max_values.index <=
47 180) & (max_values.values < filter1)]
48     mu, std = norm.fit(df_half.index)
49     x = np.linspace(df_half.index.min(), 180, 100)
50     p = norm.pdf(x, mu, std) * max(df_half.values)
51     p = p / max(p) * (df_half.mean() + 2 * df_half.std()) + 0.003
52
53     print(f"{etiqueta} (S+): Media = {mu:.2f}")
54
55     # Guardar los resultados para graficar después
56     resultados_1[etiqueta] = {
57         "x": x,
58         "p": p,
59         "color": color,
60         "etiqueta": etiqueta
61     }
62
63     # Filtrar y ajustar los datos para la segunda mitad (ax2 a 360)
64     df_half_2 = max_values[(max_values.index >= ax2) & (max_values.index <=
65 360) & (max_values.values < filter1)]
66     mu_2, std_2 = norm.fit(df_half_2.index)
67     x_2 = np.linspace(df_half_2.index.min(), 360, 100)
68     p_2 = norm.pdf(x_2, mu_2, std_2) * max(df_half_2.values)
69     p_2 = p_2 / max(p_2) * (df_half_2.mean() + 2 * df_half_2.std()) + 0.003
70
71     print(f"{etiqueta} (S-): Media = {mu_2:.2f}")
72
73     # Guardar los resultados para graficar después
```

```

71     resultados_2[etiqueta] = {
72         "x": x_2,
73         "p": p_2,
74         "color": color,
75         "etiqueta": etiqueta
76     }
77
78
79     # Graficar todas las distribuciones para la primera mitad (ax1 a 180)
80     plt.figure(figsize=(10, 5))
81     for etiqueta, resultado in resultados_1.items():
82         plt.plot(resultado["x"], resultado["p"], color=resultado["color"], lw
83                 =2, label=resultado["etiqueta"])
84
85     # Etiquetas y título
86     plt.xlabel('Fase [grados]')
87     plt.ylabel('Amplitud (Dist. Norm.) [V]')
88     plt.title('Curvas de distribuciones para s+')
89     plt.legend()
90     plt.grid(True)
91     #plt.savefig('distribuciones_s+.pdf', format='pdf')
92     plt.show()
93
94     # Graficar todas las distribuciones para la segunda mitad (ax2 a 360)
95     plt.figure(figsize=(10, 5))
96     for etiqueta, resultado in resultados_2.items():
97         plt.plot(resultado["x"], resultado["p"], color=resultado["color"], lw
98                 =2, label=resultado["etiqueta"])
99
100    # Etiquetas y título
101    plt.xlabel('Fase [grados]')
102    plt.ylabel('Amplitud (Dist. Norm.) [V]')
103    plt.title('Curvas de distribuciones para s-')
104    plt.legend()
105    plt.grid(True)
106    #plt.savefig('distribuciones_s-.pdf', format='pdf')
107    plt.show()
108
109    # Ejecutar la función para calcular y graficar
110    calcular_y_graficar_distribuciones()

```

.2.2.f. Gráficos TF para cada vacuola y comparación entre dos del mismo gas

Se crea una función que procesa los datos y genera gráficos para cada vacuola, mostrando un gráfico por cada una y finalmente uno que combina los datos.

```

1
2 def TF(archivo):
3     # Construir los nombres de las columnas para los archivos deseados
4     archivo_titulos_mapping = {
5         'H2': {
6             'titulo1': r'$H_{\mathrm{2-1}}$',
7             'titulo2': r'$H_{\mathrm{2-2}}$'
8         },
9         'CH4': {
10            'titulo1': r'$CH_{\mathrm{4-1}}$',
11            'titulo2': r'$CH_{\mathrm{4-2}}$'

```

```
12     },
13     'patron': {
14         'titulo1': r'$patrón_{\mathrm{1}}$',
15         'titulo2': r'$patrón_{\mathrm{2}}$'
16     }
17 }
18
19 # Obtener los títulos correspondientes del diccionario
20 if archivo in archivo_titulos_mapping:
21     titulo1 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo1']
22     titulo2 = archivo_titulos_mapping[archivo]['titulo2']
23 else:
24     titulo1 = f'Archivo_1'
25     titulo2 = f'Archivo_2'
26
27 archivo_suffix_1 = '_1'
28 archivo_suffix_2 = '_2'
29 freq_column_1 = f'Frecuency_{archivo}{archivo_suffix_1}'
30 phase_column_1 = f'Phase_t_{archivo}{archivo_suffix_1}'
31 freq_column_2 = f'Frecuency_{archivo}{archivo_suffix_2}'
32 phase_column_2 = f'Phase_t_{archivo}{archivo_suffix_2}'
33 phas_column_1 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_1}'
34 amplitud_column_1 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_1}'
35 phas_column_2 = f'Phase_{archivo}{archivo_suffix_2}'
36 amplitud_column_2 = f'Amplitude_{archivo}{archivo_suffix_2}'
37
38 # Extraer los valores de las columnas de fase y amplitud
39 x_puntos_1 = df[freq_column_1]
40 y_puntos_1 = df[phase_column_1]
41 x_puntos_2 = df[freq_column_2]
42 y_puntos_2 = df[phase_column_2]
43
44 # Ajustar el tamaño de los puntos
45 tamaño_puntos = 1
46
47 # Crear el gráfico
48 plt.figure(figsize=(7, 4))
49 plt.scatter(x_puntos_1, y_puntos_1, color='red', marker='o', s=
tamaño_puntos, label=titulo1)
50 plt.scatter(x_puntos_2, y_puntos_2, color='blue', marker='o', s=
tamaño_puntos, label=titulo2)
51 #plt.axvline(x=165+180, linestyle='--', color='purple', linewidth=1)
52
53 #plt.ylim(-0.04, 0.04)
54
55 plt.title('Gráfico T-F')
56 plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
57 plt.ylabel('Tiempo (ns)')
58 plt.grid(True)
59 plt.legend()
60
61 #plt.savefig(f'TF_{archivo}_compare.pdf', format='pdf')
62 plt.show()
63
64 # Crear el gráfico T-F
65 plt.figure(figsize=(7, 4))
66 plt.scatter(x_puntos_1, y_puntos_1, c='b', marker='.', s=5) # Puedes
ajustar el tamaño y color de los puntos
67
```

```
68 title = r'$H_{\mathrm{2-1}}$' # LaTeX
69 plt.title(f'Gráfico T-F {titulo1}', fontsize=14)
70 plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
71 plt.ylabel('Tiempo (ns)')
72 plt.grid(True)
73 #plt.savefig(f'TF_{archivo}{archivo_suffix_1}.pdf', format='pdf')
74 plt.show()
75
76 # Crear el gráfico T-F #2
77 plt.figure(figsize=(7, 4))
78 plt.scatter(x_puntos_2, y_puntos_2, c='b', marker='.', s=5) # Puedes
ajustar el tamaño y color de los puntos
79
80 plt.title(f'Gráfico T-F {titulo2}', fontsize=14)
81 plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
82 plt.ylabel('Tiempo (ns)')
83 plt.grid(True)
84 #plt.savefig(f'TF_{archivo}{archivo_suffix_2}.pdf', format='pdf')
85 plt.show()
86
87 # Definir las coordenadas del rectángulo
88 x1, x2 = 7, 16
89 y1, y2 = 60, 175
90
91 # Crear una condición para verificar si los puntos están dentro del
rectángulo
92 condicion = (x_puntos_1 >= x1) & (x_puntos_1 <= x2) & (y_puntos_1 >= y1) &
(y_puntos_1 <= y2)
93
94 # Filtrar el DataFrame para obtener los puntos dentro y fuera del
rectángulo
95 puntos_dentro = df[condicion]
96 puntos_fuera = df[~condicion]
97
98 # Crear el gráfico scatter con los puntos dentro y fuera del rectángulo
99 plt.figure(figsize=(7, 4))
100 plt.scatter(puntos_fuera[freq_column_1], puntos_fuera[phase_column_1], c='b
', marker='.', s=5)
101 plt.scatter(puntos_dentro[freq_column_1], puntos_dentro[phase_column_1], c
='r', marker='.', s=5)
102
103 # Dibuja el rectángulo
104 plt.plot([x1, x1, x2, x2, x1], [y1, y2, y2, y1, y1], 'k--')
105
106 plt.title(f'Cluster {titulo1}')
107 plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
108 plt.ylabel('Tiempo (ns)')
109 plt.legend()
110 plt.grid(True)
111
112 # Mostrar el gráfico
113 plt.show()
114
115 # Definir las coordenadas del rectángulo
116 x1, x2 = 5, 9.5
117 y1, y2 = 60, 200
118
119 # Crear una condición para verificar si los puntos están dentro del
rectángulo
```

```

120     condicion = (x_puntos_2 >= x1) & (x_puntos_2 <= x2) & (y_puntos_2 >= y1) &
        (y_puntos_2 <= y2)
121
122     # Filtrar el DataFrame para obtener los puntos dentro y fuera del
        rectángulo
123     puntos_dentro = df[condicion]
124     puntos_fuera = df[~condicion]
125
126     # Crear el gráfico scatter con los puntos dentro y fuera del rectángulo
127     plt.figure(figsize=(7, 4))
128     plt.scatter(puntos_fuera[freq_column_2], puntos_fuera[phase_column_2], c='b
        ', marker='.', s=5)
129     plt.scatter(puntos_dentro[freq_column_2], puntos_dentro[phase_column_2], c
        ='r', marker='.', s=5)
130
131     # Dibuja el rectángulo
132     plt.plot([x1, x1, x2, x2, x1], [y1, y2, y2, y1, y1], 'k--')
133
134     plt.title(f'Cluster {titulo2}')
135     plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
136     plt.ylabel('Tiempo (ns)')
137     plt.legend()
138     plt.grid(True)
139
140     # Mostrar el gráfico
141     plt.show()

```

.2.2.g. Gráfico de la señal de una descarga individual

Esta función permite graficar la forma de onda de un pulso registrado por el sistema de adquisición.

```

1
2 # Carga el archivo CSV
3 ruta_del_archivo = "C:\\Users\\gabel\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\Memoria\\Resultados
        \\H2_1_waves.csv"
4 df_waves = pd.read_csv(ruta_del_archivo, sep='\t', header=None)
5
6 # Elimina la primera fila
7 df_waves = df_waves.drop(0)
8
9 # Divide la columna de la lista en columnas individuales
10 df_waves = df_waves[0].str.split(';', expand=True)
11
12 # Establece el nombre de las columnas (puedes ajustar los nombres según sea
        necesario)
13 nombres_columnas = [str(i) for i in range(len(df_waves.columns))]
14 df_waves.columns = nombres_columnas
15 df_waves = df_waves.astype(float)
16
17 y = df_waves.iloc[6] # Esto selecciona la descarga 6 del DataFrame
18 x = np.linspace(0, 1000, 100) # Valores de x
19
20 # Graficar la fila utilizando los valores x
21 plt.plot(x, y)
22 plt.title("Señal registrada ")
23 plt.xlabel("T[ns]")
24 plt.ylabel("Amplitud[V]")

```

```

25 plt.grid(True)
26
27 plt.savefig('Reg_signal.pdf', format='pdf')
28 # Mostrar el gráfico
29 plt.show()

```

.2.2.h. Mapas TF de todas las probetas simultáneas

Esta función simplifica la enorme cantidad de puntos de cada probeta, y se compactan en una sola figura, para realizar comparaciones visuales.

```

1
2 def TFgral():
3
4     archivo_suffix_1 = '_1'
5     archivo_suffix_2 = '_2'
6     freq_H2_1 = f'Frecuency_H2{archivo_suffix_1}'
7     phase_H2_1 = f'Phase_t_H2{archivo_suffix_1}'
8     freq_H2_2 = f'Frecuency_H2{archivo_suffix_2}'
9     phase_H2_2 = f'Phase_t_H2{archivo_suffix_2}'
10    freq_CH4_1 = f'Frecuency_CH4{archivo_suffix_1}'
11    phase_CH4_1 = f'Phase_t_CH4{archivo_suffix_1}'
12    freq_CH4_2 = f'Frecuency_CH4{archivo_suffix_2}'
13    phase_CH4_2 = f'Phase_t_CH4{archivo_suffix_2}'
14    freq_patron_1 = f'Frecuency_patron{archivo_suffix_1}'
15    phase_patron_1 = f'Phase_t_patron{archivo_suffix_1}'
16    freq_patron_2 = f'Frecuency_patron{archivo_suffix_2}'
17    phase_patron_2 = f'Phase_t_patron{archivo_suffix_2}'
18
19
20    # Ajustar el tamaño de los puntos
21    tamaño_puntos = 10
22
23    plt.figure(figsize=(7, 4))
24    plt.scatter(df[freq_CH4_1][::20],df[phase_CH4_1][::20], color='darkgreen',
25    marker='o', s=tamaño_puntos, label='CH4 1')
26    plt.scatter(df[freq_CH4_2][::20*3],df[phase_CH4_2][::20*3], color='lime',
27    marker='o', s=tamaño_puntos, label='CH4 2')
28    plt.scatter(puntos_fuera['Frecuency_H2_2'], puntos_fuera['Phase_t_H2_2'],
29    color='hotpink', marker='s', s=tamaño_puntos, label='H2 2')
30    plt.scatter(df[freq_H2_1][::5],df[phase_H2_1][::5], color='red', marker='s',
31    s=tamaño_puntos, label='H2 1')
32    plt.scatter(df[freq_patron_1][::10*3],df[phase_patron_1][::10*3], color='
33    darkblue', marker='x', s=tamaño_puntos, label='patron 1')
34    plt.scatter(df[freq_patron_2][::10*3],df[phase_patron_2][::10*3], color='
35    cyan', marker='x', s=tamaño_puntos, label='patron 2')
36    plt.title('Gráfico T-F')
37    plt.xlabel('Frecuencia (MHz)')
38    plt.ylabel('Tiempo (ns)')
39    plt.grid(True)
40    plt.legend()
41
42    plt.savefig(f'TF_compare.pdf', format='pdf')
43    plt.show()
44
45    from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
46
47    fig = plt.figure(figsize=(4, 3))

```

```

42     ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
43
44     # Puntos para CH4_1 en z = 0
45     ax.scatter(df[freq_CH4_1][::20*3], df[phase_CH4_1][::20*3], zs=0, zdir='z',
46               color='darkgreen', marker='o', s=tamaño_puntos, label='CH4 1')
47
48     # Puntos para CH4_2 en z = 1
49     ax.scatter(df[freq_CH4_2][::20*3], df[phase_CH4_2][::20*3], zs=1, zdir='z',
50               color='lime', marker='o', s=tamaño_puntos, label='CH4 2')
51
52     # Puntos para H2_1 en z = 2
53     ax.scatter(df[freq_H2_1][::2], df[phase_H2_1][::2], zs=2, zdir='z', color='
54     pink', marker='s', s=tamaño_puntos, label='H2 1')
55
56     # Puntos para H2_2 en z = 3
57     ax.scatter(puntos_fuera['Frecuency_H2_2'], puntos_fuera['Phase_t_H2_2'], zs
58     =3, zdir='z', color='gold', marker='s', s=tamaño_puntos, label='H2 2')
59
60     # Puntos para patron_1 en z = 4
61     ax.scatter(df[freq_patron_1][::10*3], df[phase_patron_1][::10*3], zs=4,
62               zdir='z', color='darkblue', marker='x', s=tamaño_puntos, label='patron 1')
63
64     # Puntos para patron_2 en z = 5
65     ax.scatter(df[freq_patron_2][::10*3], df[phase_patron_2][::10*3], zs=5,
66               zdir='z', color='cyan', marker='x', s=tamaño_puntos, label='patron 2' )
67
68     ax.set_xlabel('Frecuencia (MHz)')
69     ax.set_ylabel('Tiempo (ns)')
70     ax.set_zlabel('Plano Z')
71     ax.set_title('Gráfico 3D T-F')
72     ax.legend(loc='upper left')
73     ax.view_init(elev=-15, azim=20) # Elevación y azimut ajustables
74
75     plt.show()
76     # Llamar a la función con los sufijos deseados
77 TFgral()

```

.2.2.i. Relación de pulsos entre semiciclos y pulsos por segundo

Este código realiza los cálculos y grafica la relación entre los pulsos del semiciclo negativo y positivo, además de los pulsos por segundo registrados en cada probeta

```

1
2 variables = ['H2 1', 'H2 2', '', 'CH4 1', 'CH4 2', '', 'patron 1', 'patron 2']
3 colors = ['orangered', 'red', 'darkgreen', 'lime', 'darkblue', 'indigo']
4
5 Tmean = [176.287, 176.55, np.nan, 151.455, 237.985, np.nan, 134.746, 110.126]
6 Fmean = [5.985, 5.595, np.nan, 7.231, 6.417, np.nan, 6.357, 6.547]
7 n1n2 = [581/141, 685/74, np.nan, 4822/58, 876/8950, np.nan, 4285/636,
8         4884/46]
9 n1n2s = [(581+141)/295, (685+74)/298, np.nan, (4822+58)/126, (876+8950)/10.4 ,
10          np.nan, (4285+636)/47.8, (4884+46)/117]
11
12 Tmean1 = [176.287, 176.55, 151.455, 237.985, 134.746, 110.126]
13 Fmean1 = [5.985, 5.595, 7.231, 6.417, 6.357, 6.547]
14 print(f'n1/n2mean= {581/141, 685/74, 4822/58, 876/8950, 4285/636, 4884/46}')

```

```
15 print(f'N/s = {(581+141)/295, (685+74)/298, (4822+58)/126, (876+8950)/10.4 ,
      (4285+636)/47.8, (4884+46)/117}')
16
17 bar_width = 0.2 # Ancho de las barras
18 index = np.arange(len(variables)) # Índices para las barras
19
20 # Obtener los índices donde se deben dibujar las barras
21 index_bars = [i for i, value in enumerate(Tmean) if not np.isnan(value)]
22
23 plt.figure(figsize=(4, 3))
24 for i, idx in enumerate(index_bars):
25     plt.bar(index[idx], n1n2[idx], bar_width, label='Frec. media +', color=
      colors[i])
26 plt.ylabel('S+/S-')
27 plt.title('Relación de pulsos s+/s-')
28 plt.xticks(index[index_bars], [variables[i] for i in index_bars], rotation=45,
      ha='right')
29 #plt.ylim(55, 250)
30 #plt.axhline(y=np.mean(n1n2), color='black', linestyle='--', label=f'Promedio:
      {np.mean(Tmean1):.4f}')
31 plt.tight_layout()
32 #plt.savefig(f'n1n2.pdf', format='pdf')
33 plt.show()
34
35 plt.figure(figsize=(4, 3))
36 for i, idx in enumerate(index_bars):
37     plt.bar(index[idx], n1n2s[idx], bar_width, label='Frec. media -', color=
      colors[i])
38 plt.ylabel('N/s')
39 plt.title('Pulsos por segundo')
40 plt.xticks(index[index_bars], [variables[i] for i in index_bars], rotation=45,
      ha='right')
41 #plt.ylim(5, 200)
42 #plt.axhline(y=np.mean(Fmean1), color='black', linestyle='--', label=f'Promedio
      : {np.mean(Fmean1):.4f}')
43 plt.tight_layout()
44 #plt.savefig(f'n1n2s.pdf', format='pdf')
45 plt.show()
```