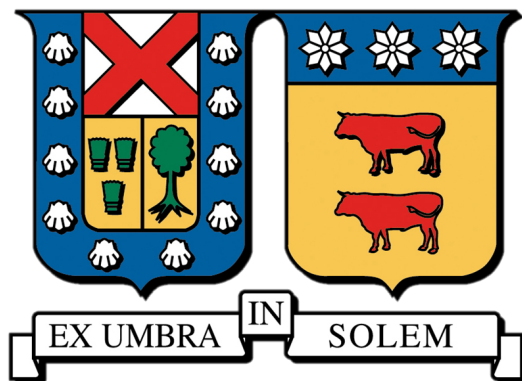


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Comparación de técnicas de diagnóstico dieléctrico utilizadas en la industria mediante análisis de descargas parciales en máquinas rotatorias

RODRIGO SANTELICES ARAVENA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

Guía: Roger Schürch Brandt

Co-referente: Juan Navarrete Alvarez

OCTUBRE-2024

Resumen

Este trabajo de título se centra en el análisis de descargas parciales (DP) en los molinos de bolas de la Minera Valle Central (MVC), con el objetivo de evaluar el estado del aislamiento de los motores de los molinos mediante métodos PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), PSA (Pulse Sequence Analysis) y PCP (Polar Coordinate Pattern).

Se utilizaron mediciones de DP obtenidas en terreno de los años 2018 a 2023, aplicando la Norma IEC 60034-27. Las mediciones se procesaron con software OMICRON, y se analizaron con Matlab y Python. Los PRPD se analizaron con técnicas de análisis estadístico. Los PSA se analizaron utilizando clustering con K-means. El análisis del método más nuevo PCP se obtuvo normalizando las descargas y graficando en coordenadas polares.

Este trabajo demuestra que el método PRPD sigue siendo fundamental para el análisis de DP, proporcionando información crucial sobre la gravedad y la fuente de las descargas. El PSA complementa el análisis del PRPD, especialmente útil para identificar patrones difíciles de distinguir debido a la gran cantidad de descargas. Sin embargo, el PSA es sensible al ruido producido por componentes electrónicos, lo que puede distorsionar los resultados. El método PCP no aportó significativamente al diagnóstico, pero mostró bajos errores en el reconocimiento de descargas, sugiriendo su potencial con mejoras adicionales. En general, los molinos de MVC se encuentran en un estado estable y confiable, con el Molino 1 en estado de observación debido a la alta gravedad de sus descargas.

Abstract

This thesis focuses on the analysis of partial discharges (PD) in the ball mills of Minera Valle Central (MVC), with the objective of evaluating the insulation condition of the mill motors using PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), PSA (Pulse Sequence Analysis), and PCP (Polar Coordinate Pattern) methods.

PD measurements obtained in the field from 2018 to 2023 were used, applying the IEC 60034-27 standard. The measurements were processed with OMICRON software and analyzed with Matlab and Python. PRPD was analyzed using statistical analysis techniques. PSA was analyzed using K-means clustering. The analysis of the newer PCP method was obtained by normalizing the discharges and plotting them in polar coordinates.

This work demonstrates that the PRPD method remains fundamental for PD analysis, providing crucial information on the severity and source of the discharges. PSA complements the PRPD analysis, especially useful for identifying patterns that are difficult to distinguish due to the large number of discharges. However, PSA is sensitive to electronic noise, which can distort the results. The PCP method did not significantly contribute to the diagnosis but showed low errors in discharge recognition, suggesting its potential with further improvements. Overall, MVC's mills are in a stable and reliable state, with Mill 1 in an observation state due to the high severity of its discharges.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, a mis amigos, profesores y a todos los que han hecho posible mi formación universitaria.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos	2
1.5. Estructura de memoria de titulación	3
1.6. Revisión bibliográfica	4
1.6.1. Estator de máquinas rotatorias	4
1.6.2. Aislación en estator de máquinas rotatorias	4
1.6.3. Sobre la naturaleza de las descargas parciales	7
1.6.4. Tipos de fallas en el aislamiento del devanado del estator	8
1.6.5. Técnicas de análisis de descargas parciales	11
1.6.6. Tipos de descargas parciales en máquinas rotatorias: PRPD	17
1.6.7. Tipos de descargas parciales en maquinas rotatorias: PSA	23
2. Procedimiento experimental	26
2.1. Máquinas rotatorias ensayadas	26
2.2. Ensayo de medición de descargas parciales	27
2.3. Resultados de medición	27
3. Metodología de análisis de descargas parciales	29
3.1. Construcción de PRPD	30
3.2. Caracterización de PRPD	32
3.3. Cuantificación de PRPD	32
3.3.1. Distribuciones estadísticas	32
3.3.2. Parámetros y momentos estadísticos descriptivos	35

3.3.3. Presentación de cálculos estadísticos	38
3.4. Construcción de PSA	39
3.5. Caracterización de PSA	40
3.6. Cuantificación de PSA	41
3.6.1. Clusterización de PSA	42
3.6.2. Análisis de gráfico número de descargas por diferencia de tensión	44
3.6.3. Implementación del método de cuantificación	45
3.6.4. Presentación de cálculos estadísticos PSA	46
3.7. Construcción PCP (Polar Coordinate Pattern)	47
3.8. Caracterización de PCP	48
3.9. Cuantificación de PCP	48
3.10. Similitud con tipos de descargas parciales	52
4. Resultados	56
4.1. Molino 1	56
4.2. Molino 2	63
4.3. Molino 3	66
4.4. Molino 4	71
4.5. Molino 5	76
4.6. Molino 6	76
4.7. Molino 7	81
4.8. Molino 8	87
5. Comentarios y Conclusiones	88
5.1. Comentarios	88
5.2. Conclusiones	91
5.3. Trabajo futuro	92
Bibliografía	93
A. Datos de placa Molinos	I
B. Perfiles de tensión aplicados	IV
C. Condiciones ambientales de ensayos a Molinos	I
D. Análisis de descargas aisladas	IV
E. Códigos utilizados	XVI

Índice de cuadros

2.1. Fecha de ensayos realizados a cada molino.	28
3.1. Tabla pesos PRPD para comparación con descargas aisladas	54
3.2. Tabla pesos PSA para comparación con descargas aisladas	54
3.3. Tabla pesos PCP para comparación con descargas aisladas	55
3.4. Ejemplo de calculo de error con descargas aisladas.	55
4.1. Parámetros PRPD Molino 1	58
4.2. Parámetros PSA Molino 1	60
4.3. Parámetros PCP Molino 1	62
4.4. Comparación de métodos de análisis Molino 1	63
4.5. Parámetros PRPD Molino 2	64
4.6. Parámetros PSA Molino 2	65
4.7. Parámetros PCP Molino 2	65
4.8. Comparación de métodos de análisis Molino 2	66
4.9. Parámetros PRPD Molino 3	67
4.10. Parámetros PSA Molino 3	69
4.11. Parámetros PCP Molino 3	70
4.12. Comparación de métodos de análisis Molino 3	70
4.13. Parámetros PRPD Molino 4	72
4.14. Parámetros PSA Molino 4	74
4.15. Parámetros PCP Molino 4	75
4.16. Comparación de métodos de análisis Molino 4	75
4.17. Parámetros PRPD Molino 6	77
4.18. Parámetros PSA Molino 6	79
4.19. Parámetros PCP Molino 6	80
4.20. Comparación de métodos de análisis Molino 6	80
4.21. Parámetros PRPD Molino 7	83

4.22. Parámetros PSA Molino 7	85
4.23. Parámetros PCP Molino 7	87
4.24. Comparación de métodos de análisis Molino 7	87
A.1. Datos de placa Molino 1	I
A.2. Datos de placa Molino 2	I
A.3. Datos de placa Molino 3	I
A.4. Datos de placa Molino 4	II
A.5. Datos de placa Molino 5	II
A.6. Datos de placa Molino 6	II
A.7. Datos de placa Molino 7	II
A.8. Datos de placa Molino 8	III
C.1. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 1	I
C.2. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 2	I
C.3. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 3	II
C.4. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 4	II
C.5. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 5	III
C.6. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 6	III
C.7. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 7	III
C.8. Condiciones ambientales de ensayos a Molino 8	III
E.1. Códigos Matlab utilizados	XVI

Índice de figuras

1.1. Fotografía de estator de un motor de 13.2kV con conexión estrella. Fuente [4]	4
1.2. Estructura de tipos de devanado. Fuente[4]	5
1.3. Cavidades en aislamiento de una bobina de estator. Fuente [4].	6
1.4. Sección transversal de una bobina de estator. Fuente [4].	7
1.5. Estructura de final de bobina.	7
1.6. Construcción de PRPD.	11
1.7. Diagrama PRPD de un árbol eléctrico obtenido en LAT UTFSM. Fuente: [13]. . . .	12
1.8. Diagrama PRPD típico. Fuente: [4].	13
1.9. Construcción de PSA. Fuente: [9].	15
1.10. Patrones PSA de diferentes defectos de descargas parciales artificiales. Fuente: [18].	15
1.11. Construcción de PCP. Fuente: [21].	16
1.12. Patrón PRPD de descargas internas. Fuente [24, 25].	18
1.13. Patrón PRPD de delaminación adyacente al conductor. Fuente [24, 25].	19
1.14. Patrón PRPD de descargas en ranura de estator. Fuente [26, 5].	20
1.15. Patrón PRPD de descargas superficiales en cabezal del devanado. Fuente [10, 25]. .	21
1.16. Patron PRPD de descargas entre fases. Fuente [26, 5].	22
1.17. Patrón PRPD de descargas corona. Fuente [26, 5].	22
1.18. Patrón PSA de descargas internas. Fuente [20].	23
1.19. Patrón PSA de descargas superficiales. Fuente [20].	24
1.20. Patrón PSA de descargas de ranura. Fuente [20].	24
1.21. Patrón PSA de descargas entre fases. Fuente [19].	25
1.22. Patrón PSA de descarga corona. Fuente [19].	25
2.1. Molino de bolas de MVC. Fuente [28]	26
3.1. Perfil de tensión y ventana de tiempo de análisis de descargas parciales.	29
3.2. Filtro de ruido en gráfico PRPD.	30
3.3. Construcción de sección de PRPD.	31

3.4. Ejemplo de construcción de PRPD con código de colores asociado a repetición de descargas.	31
3.5. Ejemplo de patrón de descarga PRPD.	32
3.6. Ejemplo de construcción de Distribución estadística.	34
3.7. Distribuciones estadísticas de PRPD	35
3.8. Distribución de momentos estadísticos descriptivos.	37
3.9. Ejemplo de Fingerprint para momentos estadísticos del patrón PRPD.	39
3.10. Ejemplo de construcción de patrón de descarga PSA con código de colores asociado a repetición de descargas.	40
3.11. Ejemplo de patrón de descarga PSA.	40
3.12. Patrones PSA generales obtenidos de ensayo a los molinos estudiados.	41
3.13. Gráficos obtenidos del análisis de secuencia de pulsos.	42
3.14. Centroides iniciales para el comienzo de la iteración con k-means.	44
3.15. Ejemplo de clusterización de patrón de descarga PSA.	44
3.16. Obtención de límites de gráfico de número de descargas parciales por diferencia de tensión.	45
3.17. Diagrama de flujo de cuantificación de PSA.	46
3.18. Ejemplo de Fingerprint para momentos estadísticos del patrón PSA.	47
3.19. Ejemplo de construcción de PCP.	48
3.20. Ejemplo de PCP con clusterización	49
3.21. Ejemplo de obtención de cuartiles de PCP.	49
3.22. Ejemplo de Finger Print para momentos estadísticos del patrón PCP.	51
3.23. Esquema de ensayo de descargas aisladas	53
3.24. PRPD de descargas aisladas	53
3.25. PSA de descargas aisladas	53
3.26. PCP de descargas aisladas	53
4.1. PRPD de descargas medidas en Molino 1	56
4.2. Finger Print PRPD Molino 1	58
4.3. PSA de descargas medidas en Molino 1	59
4.4. Finger Print PSA Molino 1	60
4.5. PCP de descargas medidas Molino 1	61
4.6. Finger Print PCP Molino 1	62
4.7. PRPD y Finger print de las descargas medidas en Molino 2	63
4.8. PSA y Finger Print PSA de las descargas medidas en el Molino 2	64
4.9. PCP y Finger print PCP de las descargas medidas en el Molino 2	65
4.10. PRPD de las descargas medidas en Molino 3	66

4.11. Finger Print PRPD Molino 3	67
4.12. PSA de descargas medidas en Molino 3	68
4.13. Finger Print PSA Molino 3	68
4.14. PCP de descargas medidas en Molino 3	69
4.15. Finger Print PCP Molino 3	70
4.16. PRPD de las descargas medidas en Molino 4	71
4.17. Finger Print PRPD Molino 4	72
4.18. PSA de descargas medidas en Molino 4	73
4.19. Finger Print PSA Molino 4	73
4.20. PCP de las descargas medias en Molino 4	74
4.21. Finger Print PCP Molino 4	75
4.22. PRPD de las descargas medidas en Molino 6	76
4.23. Finger Print PRPD Molino 6	77
4.24. PSA de las descargas medidas en el Molino 6	78
4.25. Finger Print PSA Molino 6	78
4.26. PCP de las descargas medidas en Molino 6	79
4.27. Finger Print PCP de las descargas medidas en Molino 6	80
4.28. PRPD de las descargas medidas en Molino 7	81
4.29. Finger Print PRPD Molino 7	82
4.30. PSA de las descargas medidas en el Molino 7	83
4.31. Finger Print PSA Molino 7	84
4.32. PCP de as descargas medidas en Molino 7	85
4.33. Finger Print PCP de Molino 7	86
B.1. Perfil de tensión Molino 1	IV
B.2. Perfil de tensión Molino 2	IV
B.3. Perfil de tensión Molino 3	V
B.4. Perfil de tensión Molino 4	V
B.5. Perfil de tensión Molino 5	VI
B.6. Perfil de tensión Molino 6	VII
B.7. Perfil de tensión Molino 7	VIII
B.8. Perfil de tensión Molino 8	IX
D.1. Análisis PRPD de descargas aisladas corona.	IV
D.2. Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas corona	V
D.3. Análisis PRPD de descargas aisladas superficiales.	VI
D.4. Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas superficiales	VII

D.5. Análisis PRPD de descargas aisladas internas.	VIII
D.6. Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas internas	IX
D.7. Análisis PSA de descargas aisladas corona.	X
D.8. Clusterización PSA de descargas aisladas corona.	X
D.9. Análisis PSA de descargas aisladas superficiales.	XI
D.10.Clusterización PSA de descargas aisladas superficiales.	XI
D.11.Análisis PSA de descargas aisladas internas.	XII
D.12.Clusterización PSA de descargas aisladas internas.	XII
D.13.Finger Print PCP descargas aisladas corona.	XIII
D.14.Cuartiles PCP de descargas aisladas corona.	XIII
D.15.Finger Print PCP descargas aisladas superficiales.	XIV
D.16.Cuartiles PCP de descargas aisladas superficiales.	XIV
D.17.Finger Print PCP descargas aisladas internas.	XV
D.18.Cuartiles PCP de descargas aisladas internas.	XV

Nomenclatura

Símbolo	Significado, unidades
q	Carga, C
q_{norm}	Carga, pu
V	Tensión, V
u	Tensión, pu
θ	Grados, °
ϕ	Grados, rad
Siglas	Significado
DP	Descarga Parcial
MVC	Minera Valle Central
LAT	Laboratorio de Alta Tensión
PCP	Polar Coordinate Pattern
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
PSA	Pulse Sequence Analysis
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

El buen estado de las máquinas rotatorias depende de la capacidad del sistema de aislamiento para soportar fenómenos de envejecimiento como tensiones eléctricas, mecánicas, térmicas y químicas sin sufrir daños durante su vida útil [1]. Regiones debilitadas por envejecimiento o una deficiente fabricación del aislamiento son las principales fuentes de descargas parciales (DP) [2]. La actividad permanente de descargas parciales en un sistema de aislamiento durante la operación de la máquina rotatoria puede causar una interrupción o falla no planificada de la máquina. Las fallas provocadas por daños en aislamientos son una de las más frecuentes en máquinas rotatorias [3], por lo tanto, la medición y el análisis de DP se han convertido en uno de los enfoques más importantes para identificar las regiones vulnerables en el aislamiento del devanado del estator [4].

Las mediciones de DP detectan la mayoría (pero no todos) de los problemas comunes de fabricación y deterioro en el aislamiento de devanados. El enfoque más común de análisis de DP ha sido a través de la representación de descargas parciales resueltas por fases (PRPD por sus siglas en inglés) [5]. Sin embargo, el análisis de descargas PRPD proporciona información insuficiente sobre los fenómenos físicos fundamentales para la interpretación del proceso de degradación [6, 7]. En la década de los 1990 se ha sugerido la utilización del análisis de secuencias de pulsos (PSA por sus siglas en inglés) como una alternativa a la interpretación de los fenómenos de DP en máquinas rotatorias [6, 8, 9]. Este método se basa en las fuertes correlaciones que existen entre pulsos de descarga consecutivos que están influenciados por la carga espacial y la polaridad del voltaje instantáneo [7]. Por lo tanto, el parámetro clave de PSA es el cambio de campo eléctrico entre pulsos consecutivos, que se refleja en el cambio de tensión en que ocurre la descarga debido a la forma de onda de excitación.

1.2. Motivación

Dado que se tienen bastantes conclusiones utilizando el método de análisis de descargas parciales PRPD, para el tema de memoria “Comparación de técnicas de diagnóstico dieléctrico utilizadas en la industria mediante análisis de descargas parciales en máquinas rotatorias”, se propone realizar un estudio que busca obtener nuevas conclusiones sobre descargas parciales a partir del método PSA y otros métodos de análisis que permitan aportar al tradicional método PRPD, para de esta forma dar un diagnóstico más completo del aislamiento de máquinas rotatorias.

Para realizar el estudio se dispone de mediciones de descargas parciales, obtenidas en terreno correspondientes a los diferentes devanados de los motores de los molinos de Minera Valle Central (MVC). Las mediciones fueron realizadas por el personal del Laboratorio de Alta Tensión (LAT) del Departamento de Ingeniería eléctrica (DIE) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). De esta forma, se obtienen nuevos criterios de diagnóstico de máquinas rotatorias a partir de los métodos investigados en la literatura técnica y científica que aportan al tradicional análisis de descargas parciales PRPD.

1.3. Hipótesis

La hipótesis de la investigación a desarrollar se resume a continuación:

- El método PSA y otros métodos pueden contribuir con información adicional al método tradicional PRPD, de manera de poder realizar un diagnóstico más completo del estado del aislamiento de máquinas rotatorias.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria de título es:

- Comparar métodos de análisis de descargas parciales (DP) para el diagnóstico del estado del aislamiento de máquinas rotatorias a partir de mediciones obtenidas en terreno de la secuencia de pulsos de DP.

1.4.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i. Realizar una revisión bibliográfica en busca de nuevos métodos de análisis de DP que utilicen mediciones de secuencia de pulsos y evaluar su incorporación al análisis tradicional.
- ii. Caracterizar las descargas parciales de máquinas rotatorias mediante la técnica “Phase-Resolved Partial Discharge” (PRPD) y parámetros estadísticos asociados, de forma cualitativa y cuantitativa.
- iii. Caracterizar las descargas parciales de máquinas rotatorias mediante la técnica “Pulse Sequence Analysis” (PSA), generando métodos de cuantificación de los patrones PSA.
- iv. Comparar resultados entre PRPD y PSA, evaluando la capacidad de diagnóstico de PSA y desarrollando criterios de diagnóstico de máquinas rotatorias que aporten al tradicional PRPD.

1.5. Estructura de memoria de titulación

Este trabajo de título inicia con un capítulo de Introducción: Revisión Bibliográfica, en el que se realiza un análisis bibliográfico de descargas parciales en máquinas rotatorias, además de una recopilación de información que es un aporte para el análisis de esta investigación, como fuente de fallas en el aislamiento de máquinas rotatorias, patrones PRPD y patrones PSA de distintas publicaciones.

En el Capítulo 2: Procedimiento Experimental, se detallan los métodos utilizados en la medición de molinos de la Minera Valle Central por el profesor del DIE de la UTFSM, Juan Navarrete, para obtener los datos utilizados durante este trabajo de título.

Posteriormente, en el Capítulo 3: Metodología de Análisis, se indica cómo se utilizan las técnicas de análisis de descargas parciales en este trabajo, como PRPD, PSA y otros métodos de análisis que han estado surgiendo durante los últimos años.

En el Capítulo 4: Resultados, se presentan los resultados obtenidos con los distintos métodos de análisis de descargas parciales en máquinas rotatorias y se comparan entre sí para obtener conclusiones respecto al aporte de cada uno.

Finalmente, en el Capítulo 5: Conclusiones y Comentarios, se presentan las conclusiones obtenidas en este trabajo de título.

1.6. Revisión bibliográfica

1.6.1. Estator de máquinas rotatorias

Los estatores de máquinas rotatorias están compuestos por bobinas instaladas en ranuras dentro de un núcleo de acero laminado, el cual está conectado a tierra, como se muestra en la Figura 1.1. El área activa de la bobina, que es la sección que se ve afectada por campos magnéticos, es la porción recta de la bobina ubicada en las ranuras del núcleo del estator. A su vez, las dos regiones de la bobina que quedan fuera del núcleo del estator se llaman extremos de bobina o cabezales de bobina.

Las descargas parciales pueden ocurrir en regiones de ranura (llamadas descargas de ranura) y en los cabezales de bobina (llamadas descargas superficiales), y cada una de estas descargas tiene un patrón PRPD asociado. El daño causado por descargas superficiales es más fácil de reparar en comparación con el daño que pueden ocasionar las descargas de ranura, debido a lo complicado que resulta acceder a esta zona del estator.

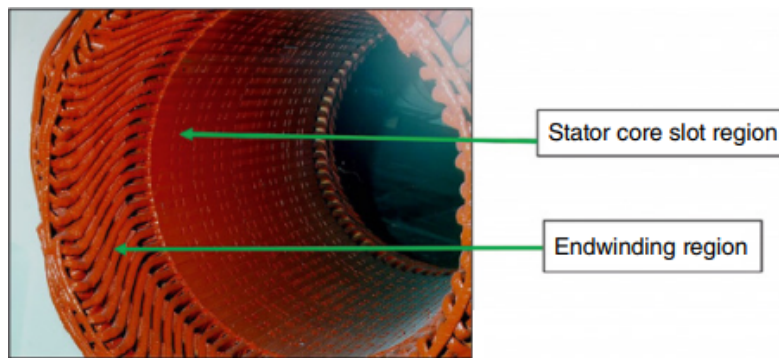


Figura 1.1: Fotografía de estator de un motor de 13.2kV con conexión estrella. Fuente [4]

1.6.2. Aislación en estator de máquinas rotatorias

Los devanados del estator pueden ser barras si se trata de máquinas rotatorias de gran potencia, o bobinas de múltiples vueltas si son máquinas de baja potencia, como se muestra en la Figura 1.2a. Esto se debe a que, en máquinas de gran potencia, el ensamblaje de devanados tipo bobina puede ser dificultoso y peligroso para la aislación debido al gran peso que implican bobinas de tal magnitud. Estos devanados, como se muestra en la Figura 1.2b, tendrán tres tipos principales de aislamiento:

- Aislamiento de los filamentos (Strand insulation).
- Aislamiento entre vueltas (Turn insulation).

- Aislamiento de la pared a tierra (Groundwall insulation).

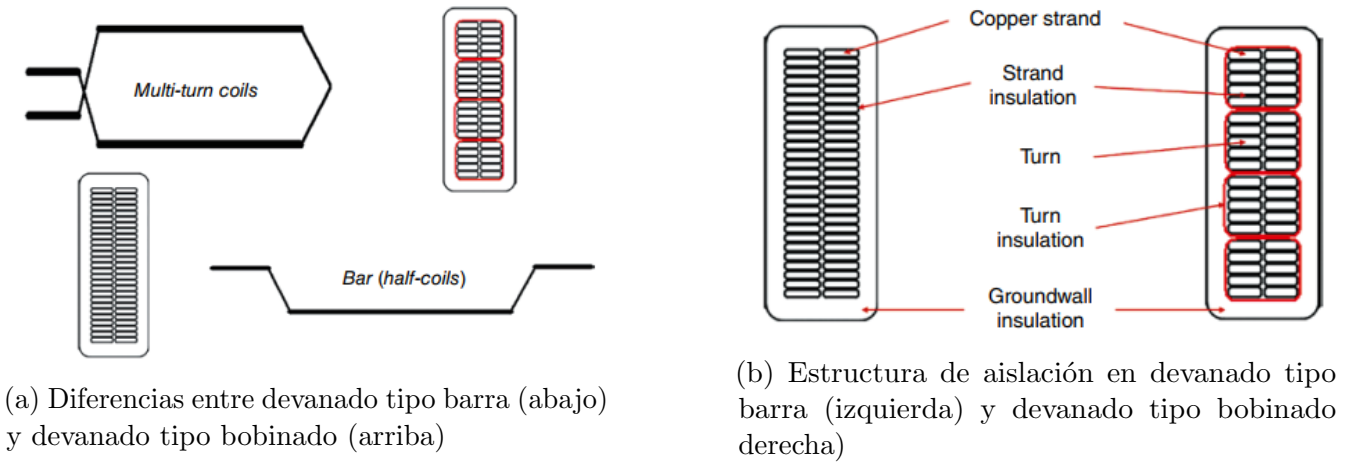


Figura 1.2: Estructura de tipos de devanado. Fuente[4]

El **aislamiento de filamentos** suele ser una película de polímero junto a una cinta de $DRACON^{TM}$ más fibra de vidrio. Esta estructura permite reducir pérdidas por corrientes parásitas y efecto skin.

El **aislamiento entre vueltas** solo está presente en devanados tipo bobina y suele consistir en una o dos capas de cinta de $DRACON^{TM}$ más fibra de vidrio o cinta de papel de mica. Este aislamiento tiene por objetivo prevenir los cortocircuitos entre vueltas.

Finalmente, en todos los tipos de devanados se encuentra el **aislamiento de la pared a tierra**, que está compuesto por muchas capas de cinta de papel de mica unidas entre sí con epoxi para prevenir cavidades en las que se puedan producir descargas parciales. Su objetivo es ser el principal aislante entre los devanados del estator y el núcleo magnético del estator.

La medición de descargas parciales permite determinar la gravedad de las cavidades que puedan existir en el aislamiento de la pared a tierra, como las que se muestran en la Figura 1.3. En la figura se ilustran cavidades en el aislamiento entre vueltas que no generan descargas parciales y cavidades en el aislamiento de la pared a tierra que sí generan descargas parciales. Las cavidades en el aislamiento entre vueltas no generan descargas parciales dado que la diferencia de potencial entre vueltas no es lo suficientemente grande para provocarlas.

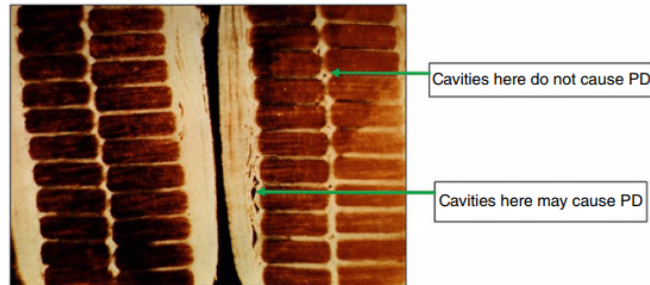


Figura 1.3: Cavitades en aislamiento de una bobina de estator. Fuente [4].

Las barras y bobinas de estator de máquinas rotatorias de 6 kV y más, generalmente tienen recubrimientos especiales en la superficie del aislamiento de pared a tierra para suprimir las descargas parciales que generan daños en el aislamiento a largo plazo. Estos recubrimientos son:

- Recubrimiento semiconductor (Semiconductive coating).
- Recubrimiento de gradiente (Grading coating).

Las descargas parciales pueden ser producidas porque, en algún punto de las ranuras del estator, siempre existen espacios de aire entre la superficie del conductor de la bobina y el núcleo del estator. Para insertar la bobina en la ranura, el ancho de esta debe ser levemente menor que el de la ranura. Este espacio de aire produce una capacitancia que queda en serie con la capacitancia del aislamiento de pared a tierra, provocando una gran diferencia de potencial en ese espacio de aire. En bobinas que operan a alta tensión, el estrés puede ser lo suficientemente fuerte para producir las llamadas descargas parciales de ranura.

El **recubrimiento semiconductor** mostrado en la Figura 1.4, consiste en una cinta o pintura de grafito. Este recubrimiento evita que se produzcan descargas parciales de ranura en cualquier espacio de aire que pueda existir entre la superficie del conductor y el núcleo del estator, ya que está conectado a tierra a través del núcleo del estator en muchos puntos a lo largo de la ranura. Esto distribuye el campo eléctrico de manera más uniforme y reduce los puntos de alta tensión que podrían iniciar descargas parciales de ranura.

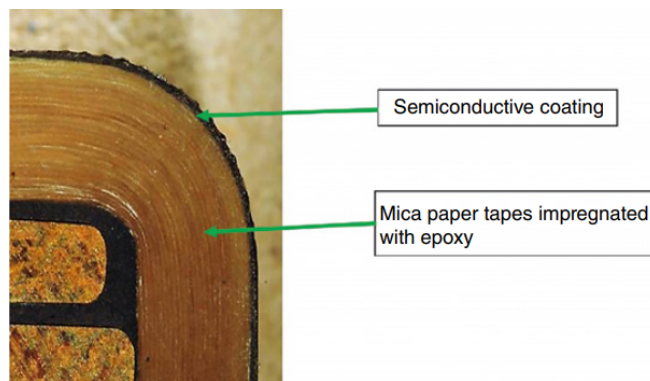
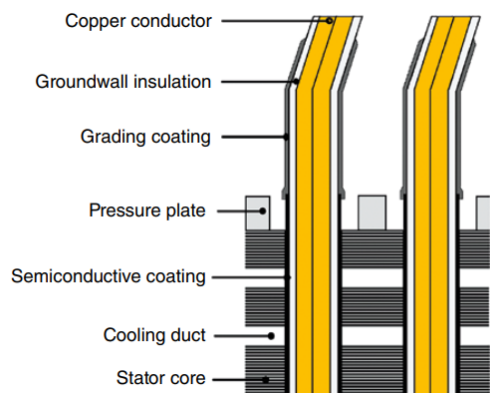
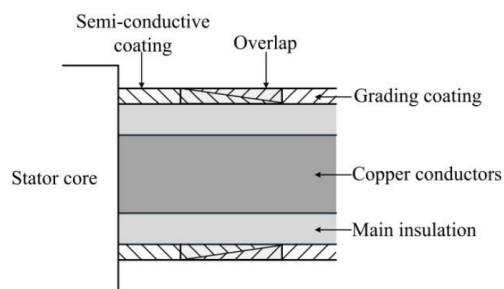


Figura 1.4: Sección transversal de una bobina de estator. Fuente [4].

El recubrimiento semiconductor cubre todo el largo de la parte recta de la bobina o barra en las ranuras del estator, extendiéndose algunos centímetros más allá del extremo del núcleo, donde se une con otro tipo de recubrimiento, tal como se muestra en la Figura 1.5a. Este otro recubrimiento es el **recubrimiento de gradiente**. Este recubrimiento previene la aparición de descargas parciales en el cabezal de la bobina, ya que está compuesto de carburo de silicio, un material muy utilizado en la industria de los semiconductores, tanto para el control del campo eléctrico como para la protección contra sobretensiones. Ambos recubrimientos se unen mediante una superposición o “**Overlap**”, como se muestra en la Figura 1.5b. Es en este punto donde existe una mayor probabilidad de tener descargas superficiales que pueden llevar a un “surface tracking” debido a la alta concentración de campo eléctrico [10].



(a) Estructura final de bobina. Fuente [11].



(b) Estructura fin de bobina, unión de revestimientos. Fuente [10]

Figura 1.5: Estructura de final de bobina.

1.6.3. Sobre la naturaleza de las descargas parciales

Las descargas parciales pueden ser descritas de manera simple como “micro-chispas” que pueden ocurrir en sistemas de aislamiento que operan con campos eléctricos elevados. Una definición más

precisa la proporciona la **Norma IEC 60270** [12], que describe las descargas parciales como “descargas eléctricas localizadas que solo atraviesan parcialmente el aislamiento entre los conductores y que pueden o no ocurrir adyacentes a un conductor”.

La actividad de descargas parciales (PD) puede llevar directamente al deterioro del aislamiento y a la falla de equipos. También es un síntoma de una fabricación deficiente o del envejecimiento del aislamiento debido a altas temperaturas, fuerzas mecánicas, contaminación, entre otros factores. Así, mediante la medición de la actividad de descargas parciales, los fabricantes de equipos pueden determinar si el sistema de aislamiento del equipo se fabricó correctamente, y los propietarios de equipos pueden identificar si está ocurriendo un envejecimiento que podría conducir a una falla.

Cada descarga parcial está acompañada por un pulso de corriente, que puede ser detectado por varios tipos de sensores e instrumentos de medición. Estos permiten realizar un post-procesamiento de la información proporcionada por las descargas parciales con respecto al estado del equipo.

1.6.4. Tipos de fallas en el aislamiento del devanado del estator

Existen varios procesos que pueden llevar a la falla del aislamiento del estator, los cuales en su mayoría están asociados con descargas parciales. Estos procesos de falla pueden estar relacionados con una fabricación deficiente, el envejecimiento del aislamiento a lo largo de los años, o una combinación de ambos. Las pruebas de descargas parciales en fábrica ayudan a identificar si estos problemas son causados por envejecimiento o por una mala fabricación. Además, estas pruebas pueden detectar fallas en curso o rastrear su progreso a lo largo del tiempo, permitiendo a los propietarios de motores y generadores anticipar y abordar posibles fallas, optimizando así las opciones de reparación y minimizando el costo y la duración de las interrupciones.

Los principales procesos de falla en el aislamiento del devanado del estator se describen a continuación (Fuente [4]):

Impregnación deficiente del epoxi

Durante la fabricación, si quedan arrugas en la mica, debido a la baja viscosidad del epoxi es posible que se formen cavidades en la pared a tierra después del secado en horno del aislamiento, como se muestra en la Figura 1.3. En estas cavidades pueden aparecer descargas parciales, también llamadas **descargas internas**. En devanados de bobinas, si estas cavidades están adyacentes al aislamiento entre vueltas (Turn insulation), la descarga parcial deteriorará gradualmente el aislamiento en esa zona, creando un camino alrededor de una o dos capas del aislamiento de la vuelta, lo que eventualmente puede resultar en una falla a tierra. Esto puede llevar a una falla del devanado en tan solo unos pocos años. En el caso de devanados tipo barra, el defecto podría causar cortocircuitos en las hebras, pero solo generará sobrecalentamiento local menor si hay pocas barras

cortocircuitadas.

Revestimiento deficiente

Un revestimiento semiconductor mal fabricado (con partículas de carburo de silicio dispersas de manera no uniforme o con una concentración inadecuada) o mal aplicado (cinta mal impregnada sobre la pared a tierra) puede causar descargas parciales aisladas, también llamadas **descargas de ranura**, entre la pared a tierra y el núcleo del estator. En máquinas refrigeradas por aire, estas descargas producen ozono, que al combinarse con nitrógeno y humedad en el aire, forma ácido nítrico que ataca químicamente el semiconductor restante, aumentando gradualmente el área de deterioro. Este problema también puede ocurrir en el revestimiento de gradiente.

En la región de superposición entre el revestimiento semiconductor y el revestimiento de gradiente, si la resistencia de conexión eléctrica es demasiado alta, la corriente capacitiva que fluye a través de la región de superposición puede causar pérdidas excesivas de I^2R y, por lo tanto, un sobrecalentamiento local. Esto puede degradar la superposición y desconectar el revestimiento de gradiente del revestimiento semiconductor, produciendo un arco eléctrico en la dirección axial entre ambos revestimientos, lo que se manifiesta como una descarga parcial de alta intensidad a través del espacio.

Devanado suelto en las ranuras del estator

Si el sistema para prevenir el movimiento y las vibraciones de las bobinas debido a las fuerzas magnéticas fue diseñado de manera inadecuada o instalado incorrectamente, las bobinas pueden vibrar contra el núcleo del estator en la ranura, lo que resulta en la abrasión de las laminaciones de acero a través del revestimiento semiconductor, causando **descargas de ranura** en bobinas que operan a alta tensión. Si no se corrige, la abrasión eliminará el aislamiento de la pared de tierra y eventualmente ocurrirá una falla. Este proceso puede ser relativamente rápido, con fallas a tierra ocurriendo después de solo unos pocos años en casos donde las bobinas han sido instaladas particularmente sueltas.

Separación inadecuada de bobinas y barras en el cabezal

Una proximidad excesiva de las bobinas en el cabezal debido a una mala fabricación del estator puede generar **descargas entre fases** en las superficies de las bobinas, lo que eventualmente puede llevar a una falla. Este tipo de descarga es más probable en estatores refrigerados por aire con una clasificación de 11 kV o superior. Si esta descarga parcial entre fases no se elimina, puede deteriorar la pared de tierra de ambas bobinas, provocando una falla de fase a fase que puede ser altamente

Capítulo 1. Introducción

destruictiva. Dado que este tipo de descarga tiene que penetrar dos paredes de tierra, el proceso de falla puede tardar entre 15 y 20 años.

Envejecimiento térmico

El envejecimiento térmico es un proceso común en todo tipo de equipos, causado por el calor. Para los devanados del estator, las fuentes de calor son principalmente las pérdidas I^2R de los conductores y las pérdidas en el núcleo del estator. A medida que la temperatura aumenta, el aislamiento envejece más rápidamente. Las altas temperaturas pueden causar la pérdida de fuerza de adhesión del epoxi en la pared de tierra, lo que provoca la separación de las cintas de mica bajo estrés termo-mecánico (calentamiento/enfriamiento). Este proceso, también conocido como delaminación de la pared de tierra, crea espacios de gas entre las capas de cinta, lo que lleva a la aparición de **descargas internas** y **descargas por delaminación** en bobinas de alta tensión, creando un calentamiento local significativo y destruyendo el sistema de aislamiento. No obstante, las máquinas rotatorias pueden tardar muchas décadas en fallar debido a este proceso.

Contaminación del devanado

En motores refrigerados por aire, es posible que entre aceite o humedad en la máquina. Cuando esta contaminación se combina con polvo o suciedad, se forma un revestimiento parcialmente conductor sobre los cabezales del devanado. Las corrientes capacitivas a través de la pared de tierra fluyen a través de la contaminación hacia tierra o a otra fase, produciendo una descarga parcial llamada **descarga superficial**. Las descargas superficiales continuas degradan la superficie del aislamiento, quemando y carbonizando los materiales en la superficie de la pared de tierra hasta crear caminos conductores o parcialmente conductores (surface tracking), lo que provoca finalmente una falla fase a tierra o fase a fase, conduciendo a una falla del motor. Dependiendo de la conductividad de la contaminación, el proceso puede tomar desde meses hasta muchas décadas para causar una falla.

Escombros metálicos

Fragmentos de escombros metálicos pueden acumularse en la superficie del aislamiento, en los cabezales del devanado o en la conexión de los conductores. Estos escombros pueden ser residuos de polvo metálico debido al desgaste por fricción del metal, herramientas u otros objetos dejados accidentalmente dentro de la máquina. Si estos escombros son ferrosos, las fuerzas magnéticas pueden hacer que vibren e incrusten en el aislamiento, provocando una posible falla relativamente rápida. Si los escombros tienen un borde o punto afilado, pueden crear un alto estrés eléctrico, suficiente para generar **descargas del tipo corona**.

1.6.5. Técnicas de análisis de descargas parciales

Phase Resolved Partial Discharge (PRPD)

El método más comúnmente utilizado para el análisis del estado de los aislamientos eléctricos es el análisis resuelto en fase de descargas parciales (PRPD, por sus siglas en inglés)[5]. Este método utiliza las siguientes variables:

- Magnitud del pulso de descarga parcial (q) en pC, mV, mA, etc.
- Posición angular de la señal sinusoidal (θ) en grados.

El análisis PRPD consiste en registrar la amplitud de la descarga parcial según el ángulo de fase de la tensión aplicada (de 0 a 360°) durante varios ciclos de la excitación alterna, superponiendo los pulsos de descargas parciales de los distintos ciclos analizados, como se muestra en la Figura 1.6.

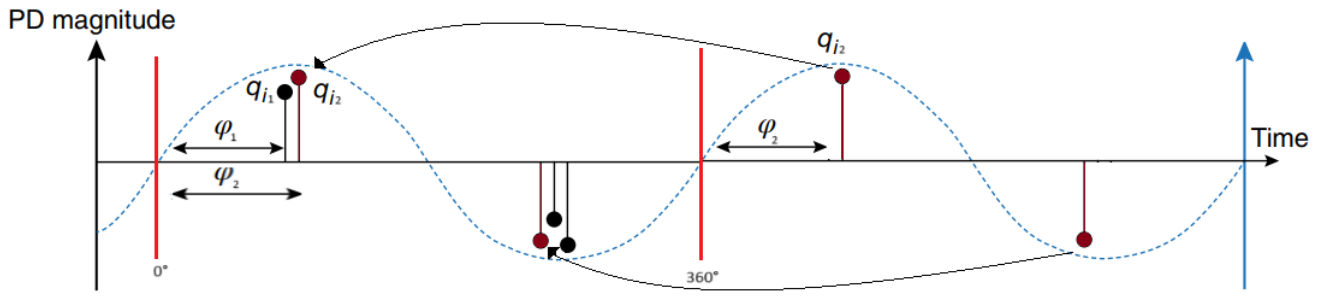


Figura 1.6: Construcción de PRPD.

En la Figura 1.7 se muestra un ejemplo de un PRPD obtenido de descargas parciales en un árbol eléctrico junto con una señal sinusoidal representativa de la tensión aplicada, donde en el eje y se indica la amplitud de la descarga parcial medida en pC y en el eje x el ángulo en que ocurre dicha descarga parcial en grados.

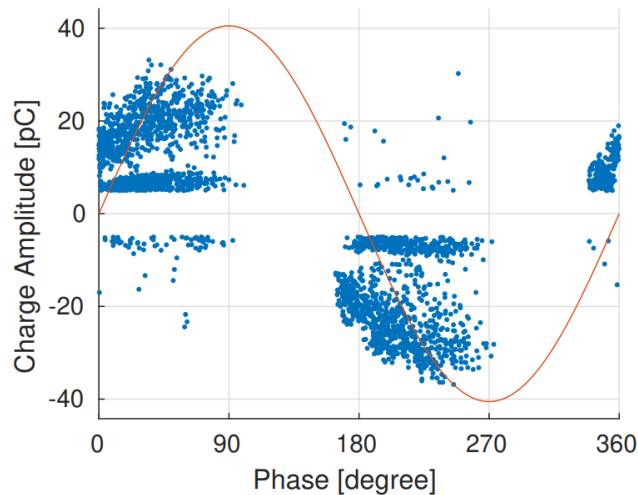


Figura 1.7: Diagrama PRPD de un árbol eléctrico obtenido en LAT UTFSM. Fuente: [13].

Debido a la alta cantidad de descargas parciales que pueden tener valores repetidos en los distintos ciclos, es necesario considerar una tercera variable: la tasa de conteo de descargas parciales, es decir, un conteo de pulsos de descargas parciales por segundo. Sin embargo, la representación de este gráfico en tres dimensiones (llamado gráfico θ -q-n) resulta difícil de interpretar [4]. Por ello, se utiliza un código de colores según la tasa de repetición de las descargas parciales por cada ventana de amplitud y ángulo de ocurrencia de la descarga, obteniendo así el gráfico típico de PRPD.

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo de PRPD completo, donde en el eje y se indica la amplitud de la descarga parcial medida en mV y en el eje x el ángulo en que ocurre dicha descarga parcial en grados. Se observa que la mayor cantidad de descargas parciales por segundo se representa en tonalidad roja, mientras que la menor cantidad se muestra en verde oscuro.

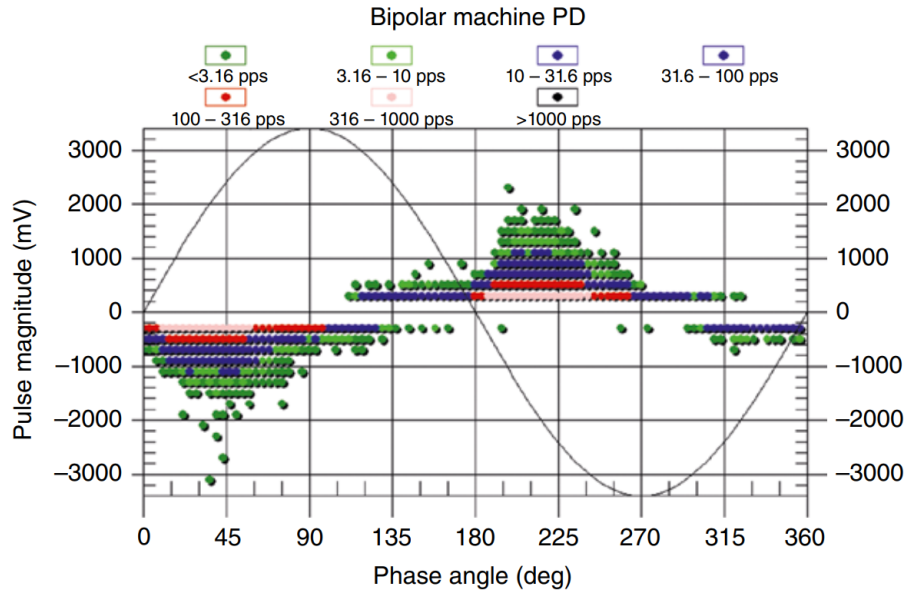


Figura 1.8: Diagrama PRPD típico. Fuente: [4].

El análisis de estos patrones PRPD permite identificar la fuente de descargas parciales en los distintos aislamientos eléctricos y realizar un diagnóstico mediante la clasificación de patrones de PRPD[14].

Análisis estadístico de PRPD

El análisis de patrones PRPD se complementa con métodos que permiten cuantificar el análisis, proporcionando conclusiones más detalladas sobre los fenómenos presentes de descargas parciales en el aislamiento eléctrico. Uno de estos métodos es el análisis estadístico [15, 16, 17].

En el PRPD de la Figura 1.8 se observa la similitud de la curva obtenida con una distribución de probabilidad normal en el ciclo positivo y negativo de la señal sinusoidal aplicada. Sobre esta base, se pueden realizar cálculos estadísticos que cuantifican el análisis del PRPD, como el valor medio, la varianza, la asimetría (skewness) y la curtosis, mostrados en las Ecuaciones (1.1)-(1.4) para las descargas parciales de la polaridad positiva y negativa de la señal de tensión.

$$\text{Media : } \mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (1.1)$$

$$\text{Varianza : } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (1.2)$$

$$\text{Asimetría : } S_k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 f(x_i)}{\sigma^3 \sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (1.3)$$

$$\text{Curtosis : } K_u = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 f(x_i)}{\sigma^4 \sum_{i=1}^N f(x_i)} - 3,0 \quad (1.4)$$

Para la construcción de las distribuciones estadísticas del PRPD, se realiza un histograma a partir de cada ángulo de fase, creando así 360 ventanas de fase. De esta forma, cada descarga parcial se asocia a la ventana de fase más cercana a su respectiva fase de ocurrencia. Las distribuciones estadísticas discretas que se pueden realizar son:

- $H_{qn}(\phi)$: Distribución del valor medio de descarga parcial en cada ventana de fase.
- $H_{qp}(\phi)$: Distribución del valor máximo de descarga parcial en cada ventana de fase.
- $H_n(\phi)$: Distribución del número de descargas parciales en cada ventana de fase.

Considerando estas tres distribuciones estadísticas para los ciclos positivos y negativos de la señal de tensión, se obtienen seis distribuciones estadísticas. Si a cada una de estas seis distribuciones se calculan los cuatro momentos estadísticos de las Ecuaciones (1.1)-(1.4), se obtiene un total de 24 momentos estadísticos que permiten cuantificar los gráficos PRPD obtenidos.

Pulse Sequence Analysis (PSA)

Debido a la superposición y pérdida de temporalidad de los pulsos de descargas parciales en el análisis PRPD, se pierde información sobre la correlación entre pulsos sucesivos [7]. Por ello, surge el método alternativo de análisis de descargas parciales llamado Análisis de Secuencia de Pulsos (PSA, por sus siglas en inglés), que permite una mejor comprensión de la física de la carga espacial y los fenómenos de degradación [6]. Este método, propuesto en la década de 1990, se basa en que, al ocurrir una descarga parcial, el espacio físico donde ocurre la descarga queda alterado con carga espacial, afectando la ocurrencia del siguiente pulso [8]. Por lo tanto, estas descargas no pueden considerarse eventos independientes entre sí.

Una forma de representar gráficamente estos eventos dependientes es utilizar la diferencia de tensión entre la ocurrencia de dos pulsos consecutivos [7]. Considerando un pulso n con tensión u_n , un pulso posterior $n + 1$ con tensión de ocurrencia u_{n+1} y un pulso anterior $n - 1$ con tensión de

ocurrencia u_{n-1} , como se muestra en la Figura 1.9a, es posible considerar dos diferencias de tensión: una para el pulso anterior $\Delta u_{n-1} = u_n - u_{n-1}$ y otra para el pulso posterior $\Delta u_n = u_{n+1} - u_n$. Estas diferencias de pulsos se pueden graficar como se muestra en la Figura 1.9b, donde en el eje y se indica la diferencia de tensión del pulso posterior y en el eje x la diferencia de tensión a la que ocurre el pulso anterior.

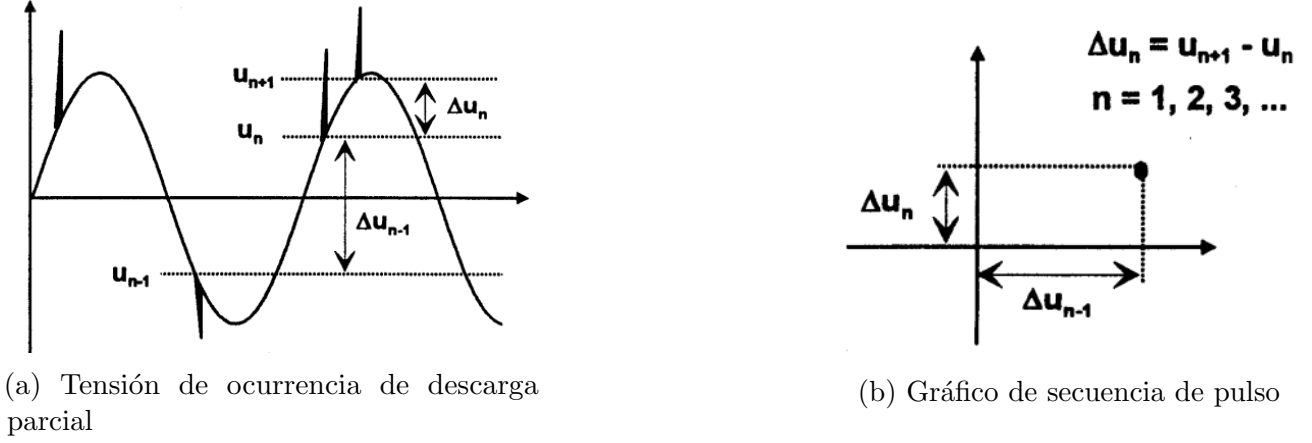


Figura 1.9: Construcción de PSA. Fuente: [9].

Si se realiza un gráfico considerando el tiempo total de medición, se puede obtener un gráfico como el mostrado en la Figura 1.10 para descargas artificiales del tipo corona, superficiales e internas [6].

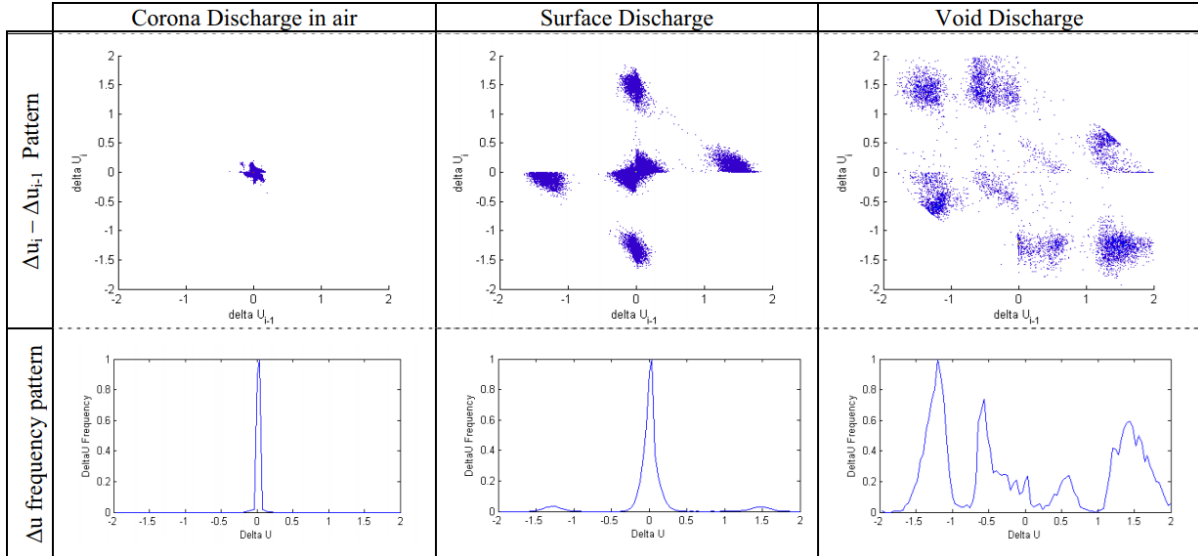


Figura 1.10: Patrones PSA de diferentes defectos de descargas parciales artificiales. Fuente: [18].

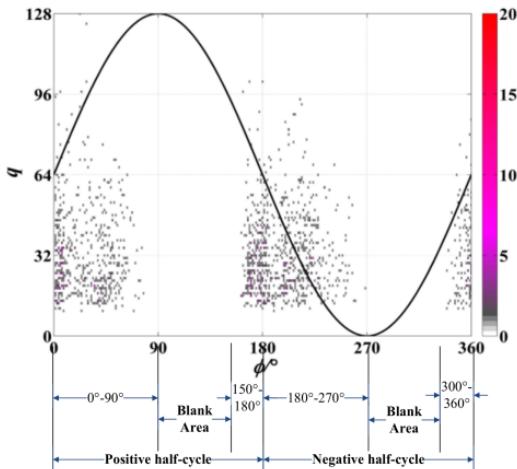
Existen otras opciones para construir gráficos de secuencia de pulsos, como Δq_n , $\Delta \phi_n$, Δt_n , $\Delta u_n / \Delta t_n$, $\Delta q_n / \Delta t_n$ y $\Delta \phi_n / \Delta t_n$.

Al igual que en el análisis de PRPD, el análisis de los patrones PSA permite identificar la fuente de descargas parciales en los distintos aislamientos eléctricos y realizar un diagnóstico mediante la clasificación de sus patrones [19, 20].

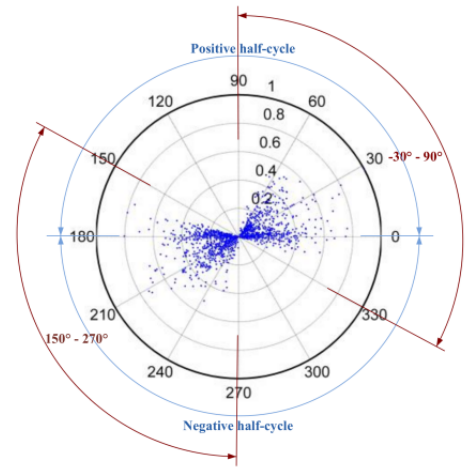
Polar Coordinate Pattern (PCP)

El patrón de coordenadas polares (PCP, por sus siglas en inglés) se basa en que el patrón PRPD tradicional provoca una discontinuidad como resultado de la partición del ciclo positivo y negativo a lo largo del ciclo. En el ejemplo de la Figura 1.11, la región de descargas para el semiciclo positivo va de -30° a 90° y para el semiciclo negativo de 150° a 270° . Al realizar el PRPD, las descargas del semiciclo positivo se dividen en -30° a 0° (330° a 360°) y 0° a 90° , pero en la práctica, esta región es continua.

Otro fundamento es que los rangos de fase en el semiciclo positivo y negativo, como en la Figura 1.11a, donde ocurren las descargas, quedan divididos por el PRPD (0° a 90° , 150° a 180° y 180° a 270° , 330° a 360° , respectivamente), lo que da como resultado que las áreas correspondientes a 90° a 150° y 270° a 330° estén en blanco. Estas áreas en blanco dividen la distribución de la descarga en los semiciclos positivo y negativo en dos partes. Debido a la existencia de esta área en blanco, los parámetros como el ancho de descarga, el centro de gravedad de la fase y el centro de gravedad de la amplitud de descarga extraídos del patrón PRPD no pueden representar su significado físico original. Los parámetros característicos estadísticos, como la asimetría, curtosis y asimetría, basados en la partición del semiciclo positivo y negativo, tampoco pueden representar el significado estadístico original debido a la existencia de esta región en blanco.



(a) PRPD



(b) Polar Coordinate Pattern (PCP)

Figura 1.11: Construcción de PCP. Fuente: [21].

Para resolver este problema, el método PCP propone graficar las descargas parciales en

coordenadas polares, tal como se muestra en la Figura 1.11b. El patrón de coordenadas polares se distingue de su correspondiente patrón PRPD por aplicar un algoritmo de agrupamiento para analizar las descargas parciales. Este enfoque no utiliza el método tradicional de análisis del semiciclo positivo y negativo. Los nuevos parámetros de descarga, en términos de cada grupo extraído del nuevo patrón de coordenadas polares, se pueden utilizar para identificar de mejor manera el tipo de defecto que presenta el aislamiento [21].

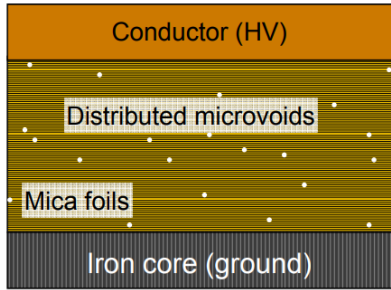
1.6.6. Tipos de descargas parciales en máquinas rotatorias: PRPD

Existen dos normas principales para la medición de descargas parciales y la presentación de descargas parciales típicas en máquinas rotatorias: la **IEEE Std 1434** [22] y la **IEC 60034-27** [23]. Esta última norma fue la utilizada para la medición de descargas parciales en los molinos estudiados, por lo que los patrones presentados a continuación corresponden a dicha norma. Las causas de los patrones PRPD de descargas parciales mostrados a continuación se describen en la Sección 1.6.4.

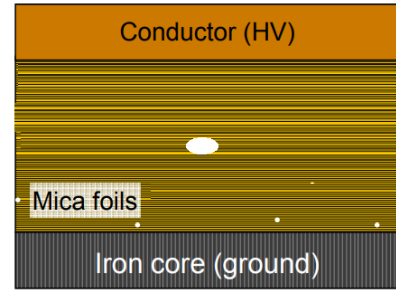
Cabe destacar que la norma **IEC 60034-27** [23] divide las descargas parciales en cuatro categorías principales: descargas internas (debido a cavidades o delaminación en el aislamiento), descargas en las ranuras, descargas en la superficie del extremo del devanado (descargas superficiales y descargas entre fases) y descargas debidas a partículas conductoras (descargas corona).

Descargas parciales por vacuolas internas PRPD

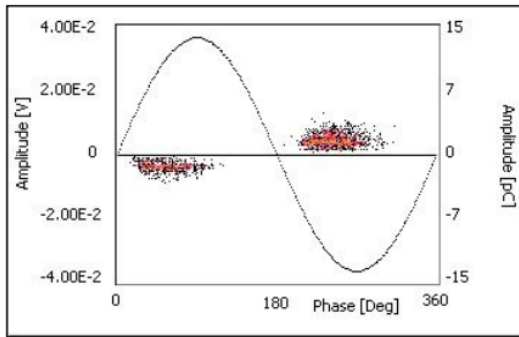
Estas descargas se deben a microvacuolas herméticas de forma casi esférica que pueden presentarse en el aislamiento de pared a tierra. Dependiendo de si las vacuolas son pequeñas o grandes, se presentarán distintos patrones PRPD. El patrón mostrado en la Figura 1.12c es para microvacuolas distribuidas y el mostrado en la Figura 1.12d es para vacuolas más grandes y herméticas. Estas descargas generalmente son debidas a **Impregnación deficiente del epoxi**.



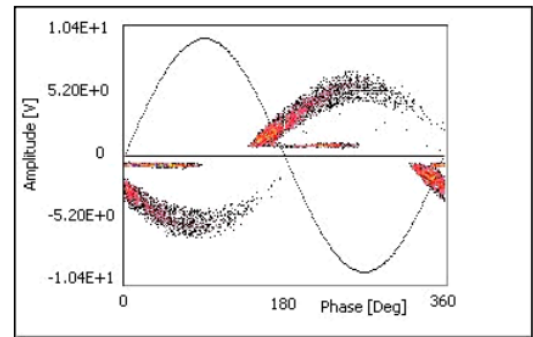
(a) Microvacuolas en la aislación de pared a tierra



(b) Vacuolas grandes en la aislación de pared a tierra



(c) PRPD de microvacuola



(d) PRPD de vacuolas grandes

Figura 1.12: Patrón PRPD de descargas internas. Fuente [24, 25].

Características PRPD microvacuolas

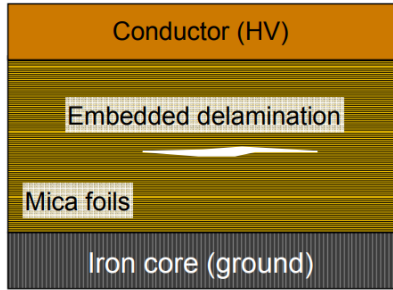
- Patrón simétrico para las descargas parciales positivas y negativas.
- Conteo de pulsos positivo y negativo similar.
- Descargas parciales con distribución normal.

Características PRPD vacuola grande

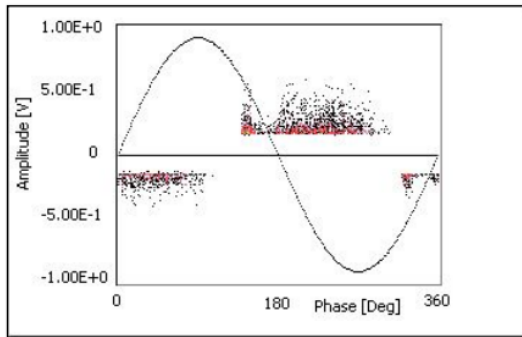
- Patrón de descargas positivas y negativas similar.
- Patrón de descargas “*Rabbit ear*”

Descargas parciales por delaminación PRPD

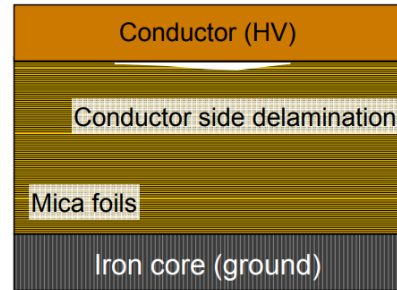
La delaminación interna también es un defecto presente en la aislación de pared a tierra, pero tiene una forma geométrica elipsoidal, como se muestra en las Figuras 1.13a y 1.13b. Este defecto puede ser causado por **Impregnación deficiente del epoxi** o por **Envejecimiento térmico** durante la operación. Dependiendo de la ubicación de la delaminación, tendrá un patrón PRPD distinto. El patrón mostrado en la Figura 1.13c es para una delaminación interna en la aislación de pared a tierra, mientras que si la delaminación está adyacente al conductor, el PRPD tendrá la forma mostrada en la Figura 1.13.



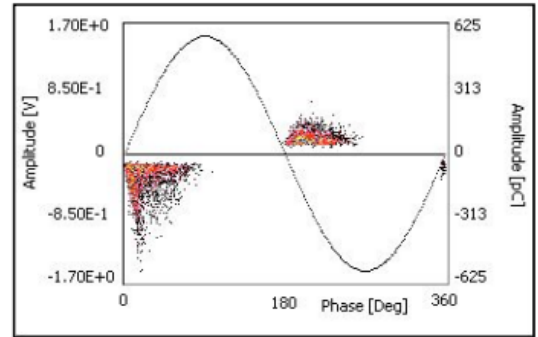
(a) Delaminación interna en la pared a tierra



(c) PRPD de delaminación interna en la pared a tierra



(b) Delaminación adyacente al conductor



(d) PRPD de delaminación adyacente al conductor

Figura 1.13: Patrón PRPD de delaminación adyacente al conductor. Fuente [24, 25].

Características PRPD delaminación interna

- Descargas similares en el semiciclo positivo y negativo.
- Descargas con un patrón plano, tendiendo levemente a triangular.

Características PRPD delaminación adyacente

- Descargas en el semiciclo positivo mayores en magnitud y conteo que las del semiciclo negativo.
- Descargas en el semiciclo positivo ocurren entre 0° y 90°, mientras que las descargas en el semiciclo negativo ocurren entre 180° y 270°.
- Generalmente, las descargas tienen distribución normal.

Descargas parciales en ranura PRPD

Estas descargas se desarrollan entre el revestimiento semiconductor y el núcleo del estator, como se muestra en la Figura 1.14. Ocurren debido al aumento del campo eléctrico local por un

Revestimiento deficiente o por tener un **Devanado suelto en las ranuras del estator**. El patrón PRPD de este tipo de descargas se muestra en la Figura 1.14b.

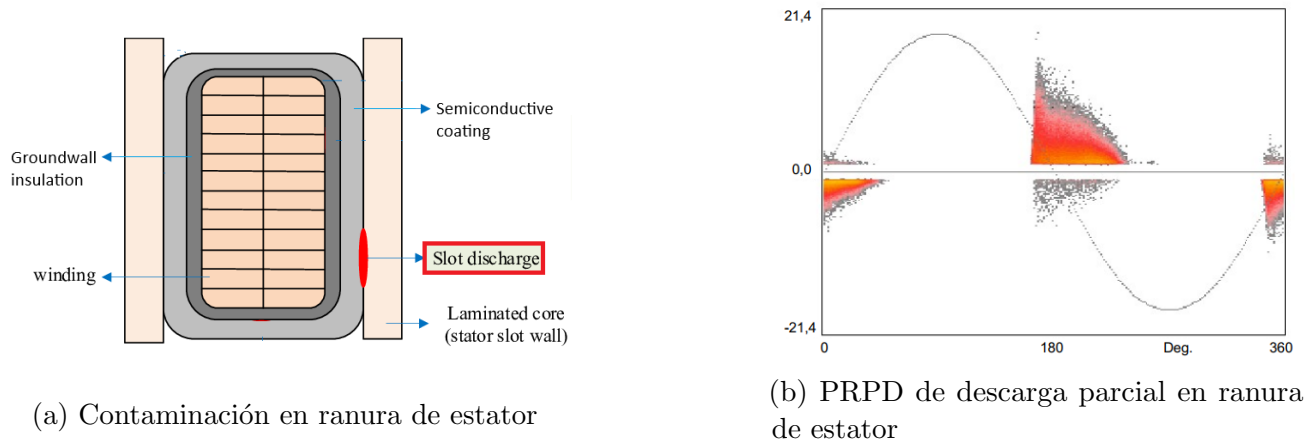


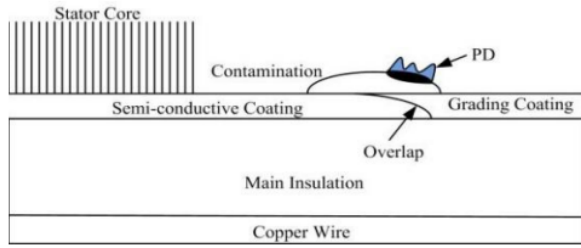
Figura 1.14: Patrón PRPD de descargas en ranura de estator. Fuente [26, 5].

Características PRPD descarga de ranura

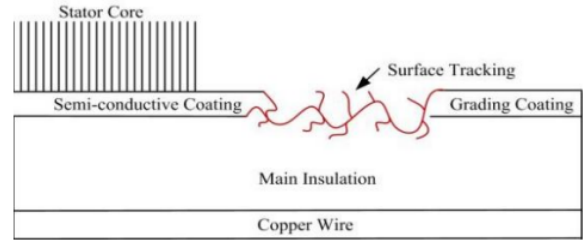
- Descargas en el semiciclo negativo mayores en magnitud y repetición que las descargas en el semiciclo positivo.
- Descargas en el semiciclo positivo tienden a comenzar cerca de 0° , y las descargas en el semiciclo negativo tienden a comenzar cerca de 180° .
- Patrón de descargas similar a un triángulo rectángulo.

Descargas superficiales en final de devanado PRPD

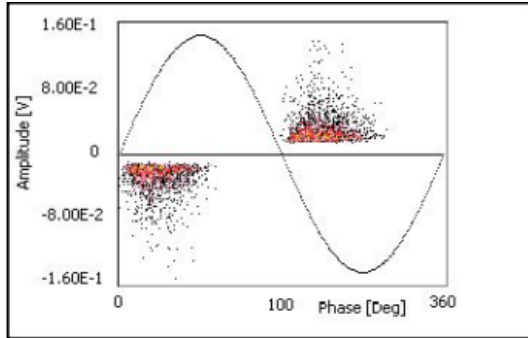
Las descargas superficiales son descargas parciales que ocurren a lo largo del cabezal de la bobina, como se muestra en la Figura 1.15a. Son causadas por **Contaminación del devanado**, es decir, polvo u otros contaminantes mezclados con humedad o aceite [27] [5]. Las descargas parciales continuas provocan la degradación de la superficie del aislamiento, generando caminos conductores o parcialmente conductores (Surface Tracking), como se muestra en la Figura 1.15b. Esto resulta en fallas fase a fase o fase a tierra, lo que conduce finalmente a una falla del motor [5]. El patrón PRPD de una descarga superficial se muestra en la Figura 1.15c y las descargas parciales del posterior Surface Tracking se muestran en la Figura 1.15d.



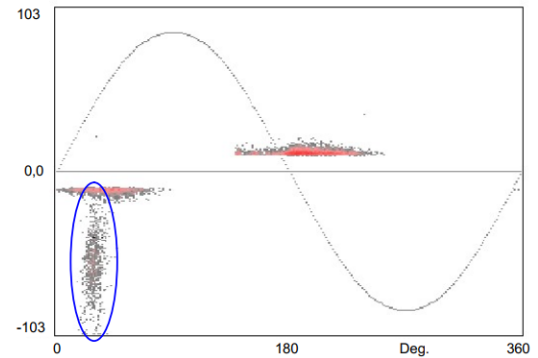
(a) Descarga superficial por contaminación



(b) Surface tracking



(c) PRPD descargas superficiales



(d) PRPD Surface tracking

Figura 1.15: Patrón PRPD de descargas superficiales en cabezal del devanado. Fuente [10, 25].

Características PRPD descargas superficiales

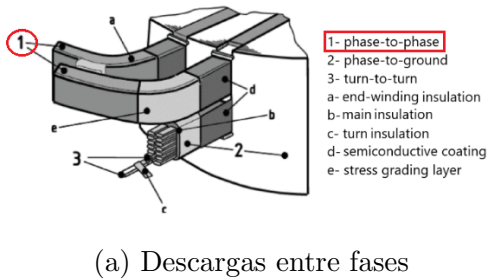
- Descargas parciales similares en el semiciclo positivo y negativo.
- Alta repetición para descargas de baja magnitud.
- Baja repetición para descargas de mayor magnitud.

Características PRPD surface tracking

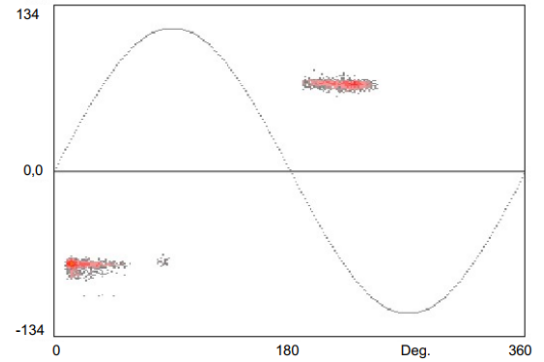
- En el semiciclo positivo, cerca de 30°, aparece un patrón de descargas de gran magnitud, baja repetición y de ventana de fase pequeña.

Descargas entre fases PRPD

Estas descargas parciales ocurren en los extremos de los devanados del estator por una **Separación inadecuada de bobinas y barras en el cabezal**. El patrón PRPD de este tipo de descarga se muestra en la Figura 1.16. También existen descargas fase a tierra, pero son menos comunes dado que la diferencia de potencial en este caso es más baja.



(a) Descargas entre fases



(b) PRPD de descarga parcial entre fases

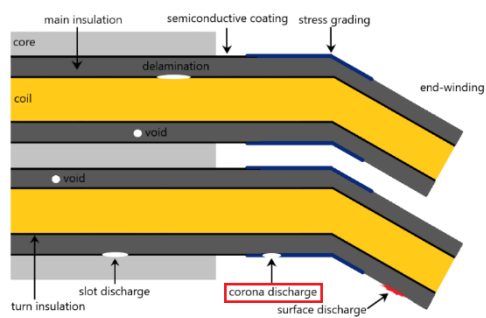
Figura 1.16: Patrón PRPD de descargas entre fases. Fuente [26, 5].

Características PRPD descargas entre fases

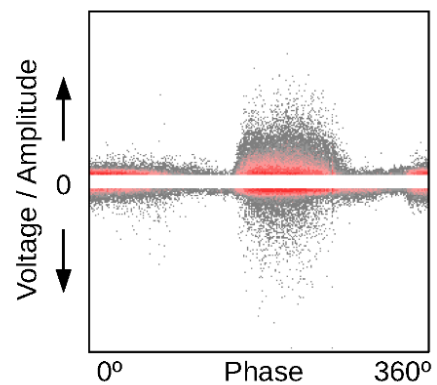
- Descargas parciales como una nube horizontal similar en el semiciclo positivo y negativo.
- Descargas de amplitud relativamente constante.
- Descargas con margen de fase amplio.

Descargas corona en final de devanado PRPD

Estas descargas parciales ocurren en los extremos de los devanados del estator por la presencia de **Escombros metálicos** que pueden entrar en el estator y ubicarse en la superficie del devanado. El patrón PRPD de este tipo de descarga se muestra en la Figura 1.17.



(a) Descargas corona



(b) PRPD descargas corona

Figura 1.17: Patrón PRPD de descargas corona. Fuente [26, 5].

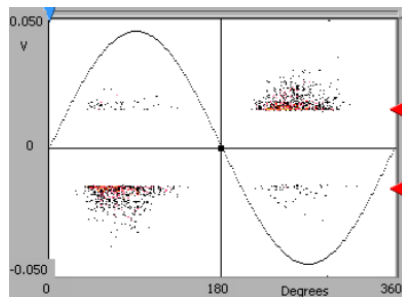
Características PRPD descargas corona

- Descargas en magnitud y repetición en el semiciclo negativo son mayores que las del semiciclo positivo.
- Descargas cercanas a 270° .

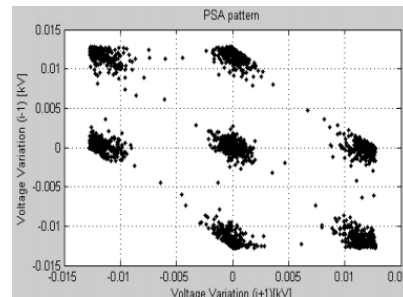
1.6.7. Tipos de descargas parciales en maquinas rotatorias: PSA

A continuación se muestran los patrones PSA de los mismos defectos en el aislamiento de máquinas rotatorias mencionados anteriormente y su comparación con sus respectivos PRPD. Fuente: [19, 20].

Descargas internas PSA



(a) PRPD descargas internas



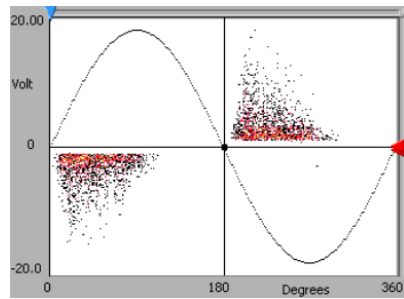
(b) PSA descargas internas

Figura 1.18: Patrón PSA de descargas internas. Fuente [20].

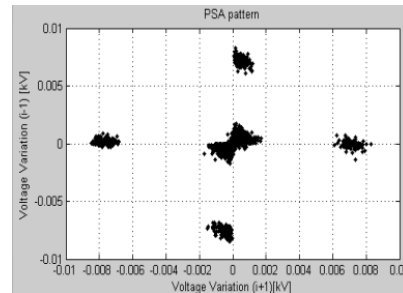
Características descargas internas PSA

- Siete grupos o clusters bien definidos
- Grupos tienen una figura casi circular y muy similares entre si.

Descargas superficiales PSA



(a) PRPD descargas superficiales



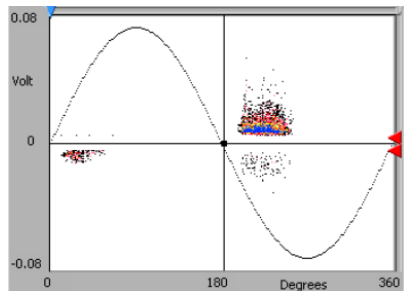
(b) PSA descargas superficiales

Figura 1.19: Patrón PSA de descargas superficiales. Fuente [20].

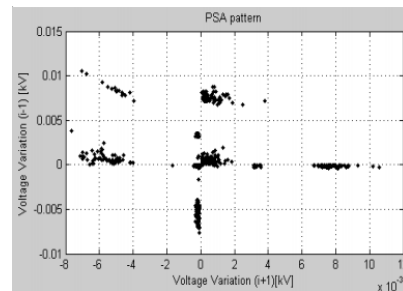
Características descargas superficiales PSA

- Cinco grupos o clusters bien definidos
- Clusters exteriores tienen una figura casi circular.
- Cluster central tiene una forma característica de doble triángulo.

Descargas de ranura PSA



(a) PRPD descargas de ranura



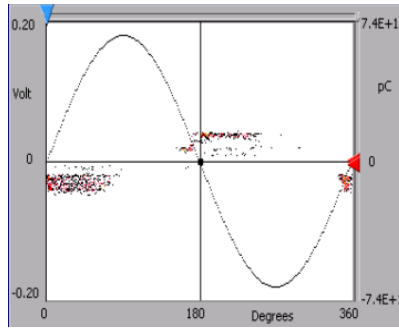
(b) PSA descargas de ranura

Figura 1.20: Patrón PSA de descargas de ranura. Fuente [20].

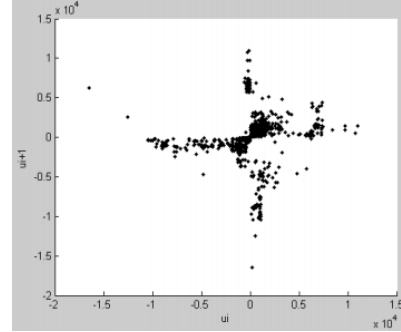
Características descargas de ranura PSA

- Seis grupos o clusters bien definidos
- Es similar al PSA de descargas superficiales pero aparece un sexto grupos o cluster alargado en la esquina superior izquierda.

Descargas entre fases PSA



(a) PRPD descargas entre fases



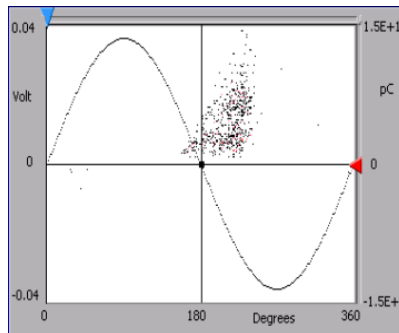
(b) PSA descargas entre fases

Figura 1.21: Patrón PSA de descargas entre fases. Fuente [19].

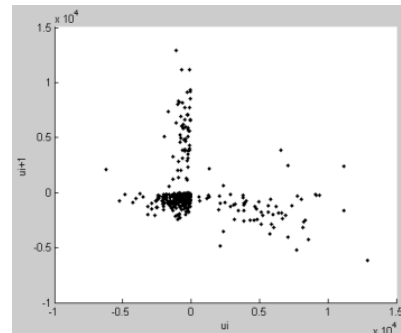
Características descargas entre fases PSA

- Cinco grupos o clusters.
- Similar al PSA de descargas superficiales pero los cluster exteriores tienden a agruparse en el centro.

Descargas corona PSA



(a) PRPD descargas corona



(b) PSA descargas corona

Figura 1.22: Patrón PSA de descarga corona. Fuente [19].

Características descarga corona PSA

- Un grupo o clusters central que acumula la mayoría de las descargas.

Capítulo 2

Procedimiento experimental

2.1. Máquinas rotatorias ensayadas



Figura 2.1: Molino de bolas de MVC. Fuente [28]

La Minera Valle Central (MVC), ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Provincia de Cachapoal, comuna de Requínoa, Chile, se dedica a la recuperación de cobre y molibdeno a partir de relaves frescos y antiguos de la División El Teniente de Codelco Chile.

Se disponen de ensayos de descargas parciales realizados desde el año 2018 hasta el año 2023 en los 8 molinos de la Minera Valle Central (En la Figura 2.1 se muestra un molino de MVC), utilizados para la reducción de los relaves gruesos. Estos son molinos de bolas de 14'x 28', con una

velocidad de giro de 200 rpm y una potencia de 2500-3500 HP, con un tamaño de bolas de $1\frac{1}{2}$ ". Los datos de placa de estos molinos se presentan en el Anexo A.

Los Molinos 1, 2, 3 y 4 consisten en motores trifásicos que tienen disponibles únicamente tres terminales, presentando internamente una conexión delta. Por lo tanto, los ensayos al aislamiento de estos molinos se efectúan simultáneamente en las tres fases contra masa. Por otro lado, los Molinos 5, 6, 7 y 8 presentan conexión estrella, por lo que se ensayan las tres fases por separado. La denominación de los terminales para estos molinos es la siguiente: Fase 1 = Roja, Fase 2 = Negra y Fase 3 = Azul.

Cabe destacar que el Molino 6 consiste en un motor trifásico con bobinas nuevas y un núcleo estático antiguo con reparaciones en su circuito magnético luego de seis años de funcionamiento.

2.2. Ensayo de medición de descargas parciales

Para ensayar el aislamiento de los molinos se sigue el procedimiento descrito en la **Norma IEC 60034-27**: "Off-Line Partial Discharge Measurement on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines" [23], el cual se refiere al análisis digital de las descargas parciales.

Previo acuerdo con los supervisores responsables de la maquinaria, se determinó que el nivel de sollicitación máxima (en valor efectivo) es de 2500 Vrms. Este nivel de tensión se consideró como la "tensión nominal de ensayo" V_{nom} . La tensión es aplicada fase-masa, y el valor V_{nom} corresponde al 60 % de la tensión nominal de clase y al 104 % de la tensión nominal de operación fase-masa.

La sollicitación se gradúa en escalones del 20 % de V_{nom} (500 Vrms) hasta alcanzar el 100 % de V_{nom} (2500 Vrms). Esta última sollicitación se mantiene durante 10 minutos para establecer un estado cuasi-estacionario en los parámetros dieléctricos del aislamiento. Finalmente, la tensión se reduce en escalones del 20 % de V_{nom} hasta llegar a cero. Para el análisis de las descargas parciales en este estudio, es relevante la medición con tensión nominal, especialmente en el último minuto antes de iniciar el descenso escalonado de tensión.

Los ensayos son realizados por el personal del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UTFSM. Los perfiles de tensión aplicados en cada ensayo se muestran en el Anexo B.

2.3. Resultados de medición

Las fechas de los ensayos realizados a cada molino se muestran en la Tabla 2.1, donde se indica el año en que se realizó el ensayo (las condiciones ambientales de cada fecha se encuentran en el Anexo C). Además, en esta tabla se indican en color verde los ensayos con descargas parciales distinguibles y en color oscuro los ensayos en los que las descargas estaban cubiertas en su totalidad por ruido electrónico. Estos ensayos en los que las descargas parciales son cubiertas por el ruido de

Capítulo 2. Procedimiento experimental

la medición son irrelevantes para este estudio de descargas parciales, aunque desde el punto de vista de la minera, estos resultados son muy convenientes, ya que indican un buen estado del aislamiento.

Mol 1					
Ensayo 2018		Ensayo 2020	Ensayo 2021	Ensayo 2022	
Mol 2					
	Ensayo 2019		Ensayo 2021		
Mol 3					
		Ensayo 2020	Ensayo 2021		Ensayo 2023
Mol 4					
	Ensayo 2019	Ensayo 2020		Ensayo 2022	
Mol 5					
		Ensayo 2020	Ensayo 2021		Ensayo 2023
Mol 6					
		Ensayo 2020	Ensayo 2021		
Mol 7					
			Ensayo 2021		Ensayo 2023
Mol 8					
				Ensayo 2022	

Cuadro 2.1: Fecha de ensayos realizados a cada molino.

Con estas mediciones es posible obtener, a través del software *OMICRON*, las señales de amplitud, ángulo y tiempo en que ocurre la descarga parcial, además de la amplitud y tiempo de la señal de tensión aplicada. Estas señales serán procesadas utilizando *Matlab* y *Python*. Los códigos utilizados en este estudio, junto con la sección relevante para comprender su funcionamiento, se indican en el Anexo [E](#).

Capítulo 3

Metodología de análisis de descargas parciales

En primera instancia, se debe considerar que el tiempo de ensayo que se utilizará para el análisis corresponde a los últimos 60 segundos antes del descenso escalonado de tensión en el ensayo de medición de descargas parciales, tal como se muestra en la Figura 3.1. Esto se realiza para obtener una medición de descargas parciales estabilizadas.

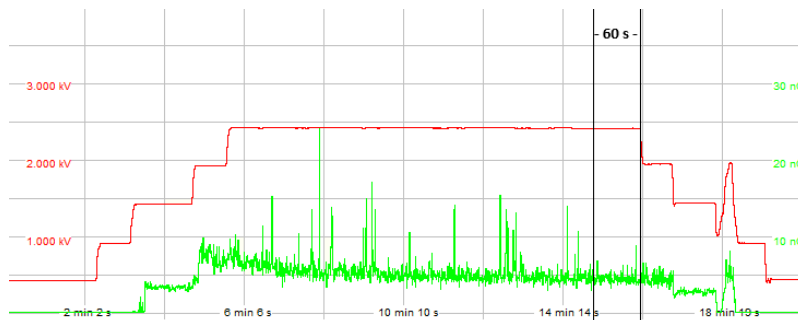


Figura 3.1: Perfil de tensión y ventana de tiempo de análisis de descargas parciales.

Cada ensayo de cada molino tiene un ruido particular en la medición, por lo que cada medición debe ser sometida a un filtro de ruido previo al análisis general del PRPD, eliminando el ruido tal como se muestra en la Figura 3.2. Este filtro de ruido permite obtener una señal en la que solo existen (o en su mayoría) descargas parciales.

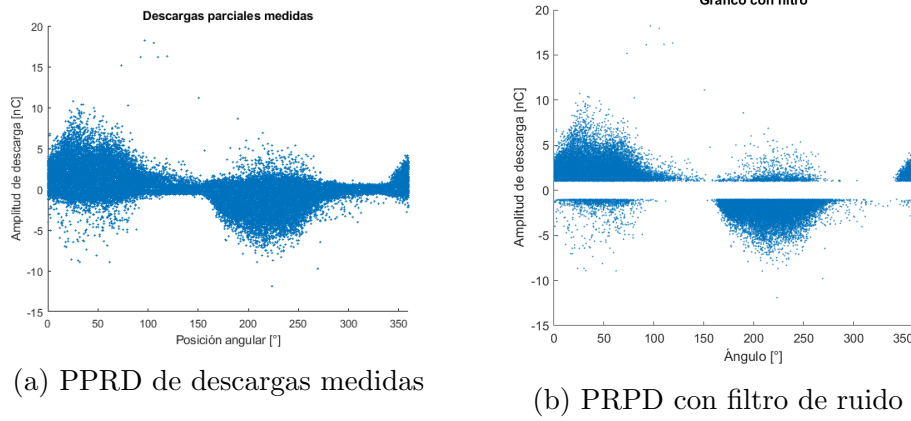


Figura 3.2: Filtro de ruido en gráfico PRPD.

Existen gráficos que presentan un tipo de ruido particular producido por equipos electrónicos conectados a las máquinas eléctricas (molinos en este caso), específicamente controladores de velocidad PWM para motores eléctricos. Este ruido tiene una frecuencia de repetición rápida y se manifiesta en secuencias repetitivas [29].

Las gráficas que presentan este ruido electrónico se indican con un comentario. Se eliminó, en la medida de lo posible, este ruido de los gráficos mediante filtros específicos para descargas parciales. Sin embargo, existen gráficos en los que el ruido está por encima de las descargas parciales medidas en los PRPD, lo que dificulta su eliminación. El ruido que no se elimina no afecta en gran medida la interpretación de los gráficos PRPD, ya que es fácil de identificar, pero altera significativamente el gráfico PSA, como se indica posteriormente en la Sección 3.5.

3.1. Construcción de PRPD

Para la construcción de los PRPD se utilizarán 360 ventanas de fase, es decir, cada ventana tendrá un ancho de 1° , donde las descargas que estén dentro de una ventana se redondearán al número entero más próximo. A su vez, para la magnitud de las descargas se utilizó una ventana de 0.1 nC con el mismo criterio de redondeo.

En la Figura 3.3 se muestra la construcción de una sección del PRPD, donde, según la cantidad de repeticiones que tiene una descarga parcial en una ventana, la descarga en el PRPD adquiere un color distinto (1 repetición adquiere un color azul, 2 repeticiones un color amarillo y 3 repeticiones un color rojo).

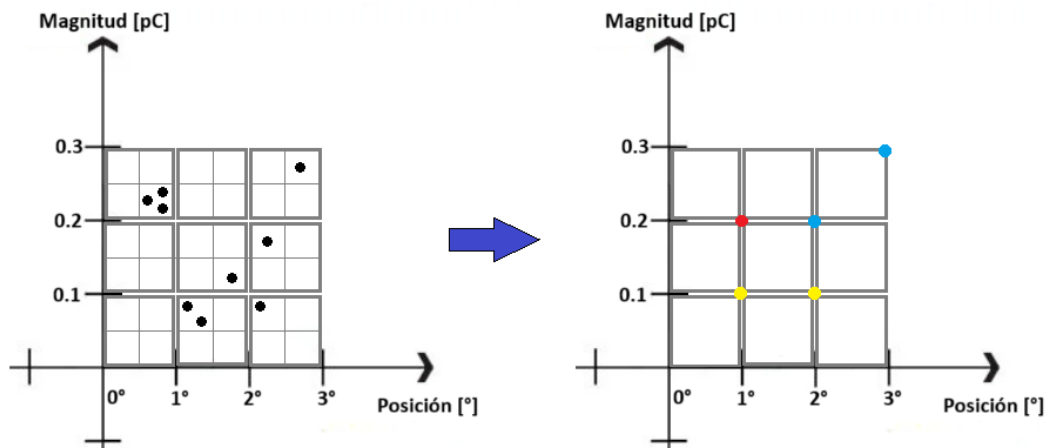


Figura 3.3: Construcción de sección de PRPD.

Cabe destacar que no existe un código de colores estandarizado [4]. Sin embargo, en el análisis de este estudio se utilizará un código de colores similar al mostrado por la interfaz del software *OMICRON*. El código de colores utilizado, que considera el número de repeticiones de descargas parciales por minuto, junto con un ejemplo del PRPD, se muestra en la Figura 3.4.

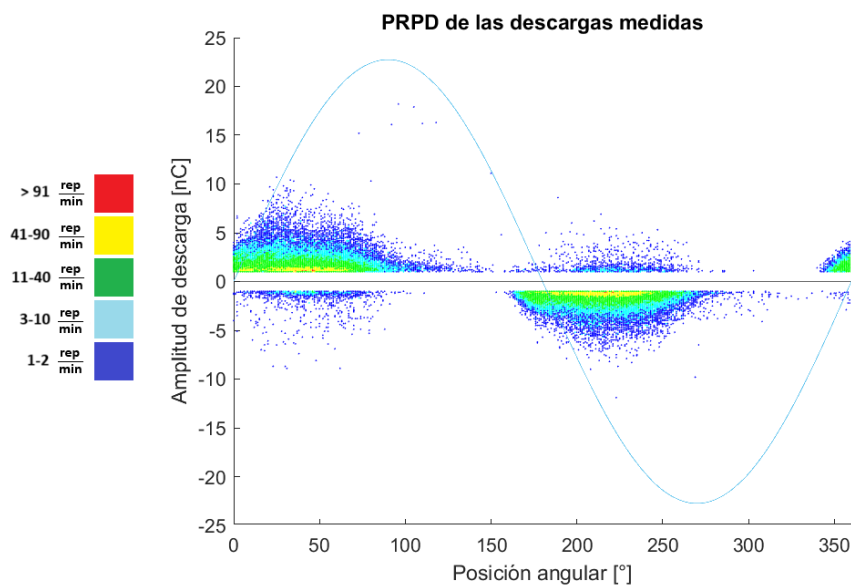


Figura 3.4: Ejemplo de construcción de PRPD con código de colores asociado a repetición de descargas.

En los PRPD obtenidos de los molinos se añade una señal de tensión sinusoidal referencial para un análisis visual de la polaridad de la tensión en la que ocurren las descargas.

3.2. Caracterización de PRPD

Inicialmente, para tener un indicio del tipo de descargas correspondientes a las medidas en los molinos, se realiza una caracterización cualitativa de los gráficos PRPD a partir de los patrones descritos en la Sección 1.6.6. En la Figura 3.5 se muestra el patrón de descargas PRPD obtenido para el **Molino 1** en el año **2018**, el detalle del análisis del patrón se realiza en la Sección 2.3.

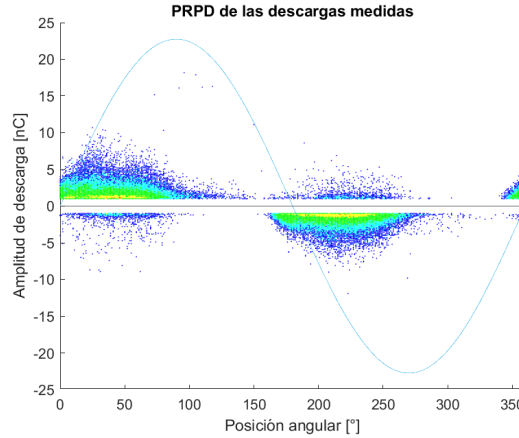


Figura 3.5: Ejemplo de patrón de descarga PRPD.

Es común que los gráficos PRPD no presenten un solo patrón, sino que generalmente muestran una combinación de dos o más patrones. Esto se debe a que el aislamiento puede presentar distintas fuentes de descargas parciales que van surgiendo a lo largo de los años de funcionamiento.

3.3. Cuantificación de PRPD

3.3.1. Distribuciones estadísticas

Para cuantificar los gráficos PRPD obtenidos, se utilizan tres distribuciones estadísticas de probabilidad derivadas del análisis de distintas características que proporciona el PRPD [15]. Estas se construyen mediante histogramas a partir de cada ángulo de fase, creando así un total de 360 ventanas de fase.

Las distribuciones que se pueden realizar son:

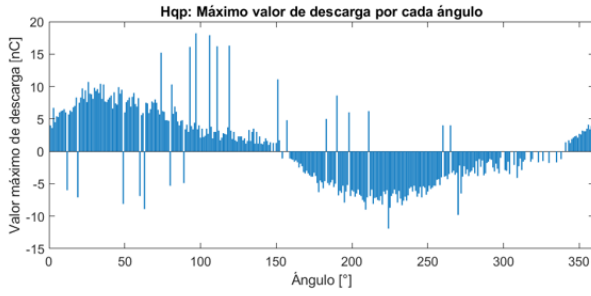
- $H_{qn}(\phi)$: Distribución del valor medio de descarga parcial en cada ventana de fase.
- $H_{qp}(\phi)$: Distribución del valor máximo de descarga parcial en cada ventana de fase.
- $H_n(\phi)$: Distribución del número de descargas parciales en cada ventana de fase.

En primera instancia, se obtiene la distribución de manera general, tal como se muestra en la Figura 3.6a para el ejemplo de la distribución $H_{qp}(\phi)$. Luego, se analiza el valor absoluto de la característica para el semiciclo positivo y negativo por separado. Es decir, para las descargas en el semiciclo positivo de la tensión solo se consideran las descargas de amplitud positiva, y para el semiciclo negativo solo se consideran las descargas de amplitud negativa. Las descargas debidas al semiciclo positivo de tensión ocurren entre los ángulos $[-30^\circ$ a $120^\circ]$, y las descargas debidas al semiciclo negativo de tensión ocurren entre los ángulos $[150^\circ$ a $300^\circ]$, según el criterio utilizado en [30]. Con esto, es posible obtener dos distribuciones (H_{qp}^+ y H_{qp}^-), como las que se muestran en la Figura 3.6b.

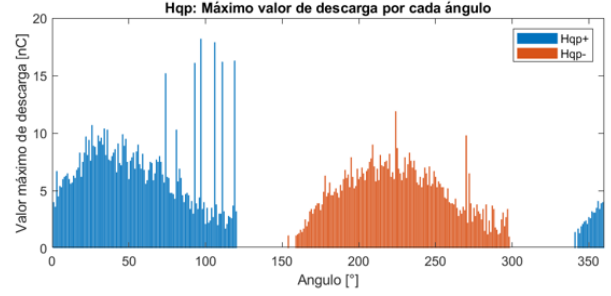
Finalmente, para cuantificar inicialmente el tipo de descarga que está ocurriendo según el patrón PRPD, se obtiene la distribución normal de la distribución analizada en cada semiciclo, junto con el **valor medio** de la distribución de cada semiciclo y su valor de **desviación estándar**, obtenidas con las Ecuaciones (3.1) y (3.2) respectivamente. Esto se muestra en la Figura 3.6c, donde x_i es el valor en el eje de las abscisas de la distribución y $f(x_i)$ es el valor que toma en el eje de las ordenadas la distribución estadística.

$$\text{Valor medio : } \mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (3.1)$$

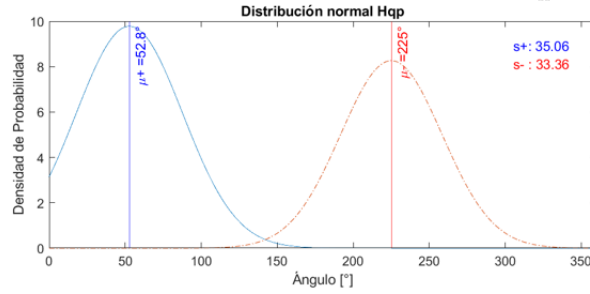
$$\text{Desviación estándar : } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)}} \quad (3.2)$$



(a) Construcción general de $H_{qp}(\phi)$.



(b) Construcción de la distribución para cada semicírculo de $H_{qp}(\phi)$



(c) Construcción de la densidad de probabilidad de $H_{qp}(\phi)$ en cada semicírculo.

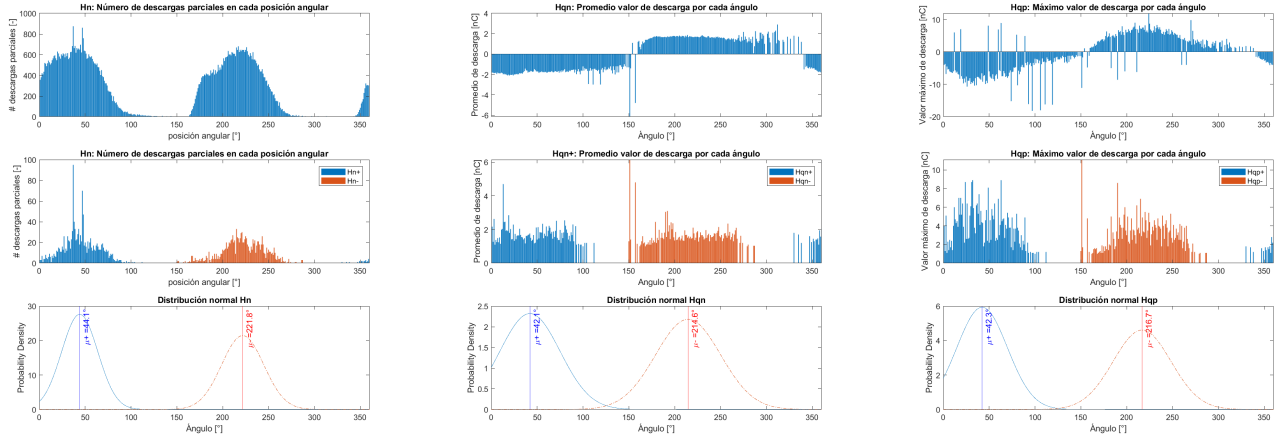
Figura 3.6: Ejemplo de construcción de Distribución estadística.

Es posible además agregar dos distribuciones estadísticas complementarias que permiten obtener una mejor caracterización de las descargas parciales [17, 31], las cuales son:

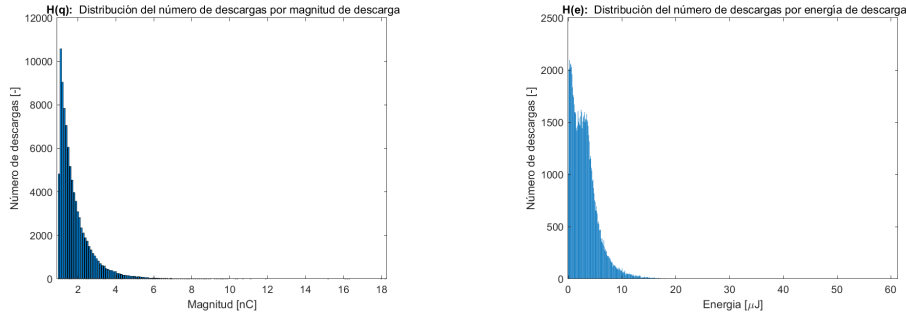
- $H(q)$: Distribución del número de descargas por cada magnitud de descarga.
- $H(e)$: Distribución del número de descargas por energía de descarga.

En la Figura 3.7 se muestran las cinco distribuciones estadísticas que pueden ser analizadas para cuantificar el patrón PRPD.

Capítulo 3. Metodología de análisis de descargas parciales



(a) $H_n(\phi)$:Distribución del número de descargas parciales en cada ventana de fase. (b) $H_{qn}(\phi)$: Distribución del valor medio de descarga parcial en cada ventana de fase. (c) $H_{qp}(\phi)$:Distribución del valor máximo de descarga parcial en cada ventana de fase.



(d) $H(q)$: Distribución de magnitud de descargas. (e) $H(e)$:Distribución de energía de descarga.

Figura 3.7: Distribuciones estadísticas de PRPD

3.3.2. Parámetros y momentos estadísticos descriptivos

Para cuantificar las distribuciones obtenidas anteriormente, se pueden utilizar una serie de momentos estadísticos adicionales al valor medio y la varianza [16]. Estos momentos se presentan a continuación junto con su interpretación al utilizarlos en las distribuciones:

Skewness (Sk):

Describe la asimetría de la distribución estadística con respecto a una distribución normal. Está descrita por la ecuación (3.3).

$$Sk = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 f(x_i)}{\sigma^3 \sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (3.3)$$

Si $Sk = 0$, es una distribución normal; si $Sk > 0$, la distribución es asimétrica hacia la izquierda; y si $Sk < 0$, es asimétrica hacia la derecha. La ejemplificación del comportamiento se muestra en la Figura 3.8a.

Kurtosis (Ku):

La Kurtosis mide la altura y anchura de la distribución estadística en comparación con una distribución normal. Está descrita por la ecuación (3.4).

$$\mathbf{Ku} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 f(x_i)}{\sigma^4 \sum_{i=1}^N f(x_i)} - 3,0 \quad (3.4)$$

Si $Ku = 0$, es una distribución normal; si $Ku > 0$, la distribución es más aguda; y si $Ku < 0$, es más achatada. La ejemplificación del comportamiento se muestra en la Figura 3.8b.

Factor de correlación cruzado (cc):

Muestra la diferencia de forma entre las distribuciones del semiciclo positivo y negativo. La fórmula que describe el factor de correlación cruzada se muestra en la ecuación (3.5).

$$\mathbf{cc} = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n] [\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \quad (3.5)$$

Siendo x_i el valor de la descarga en el semiciclo positivo, y_i el valor de la descarga en el semiciclo negativo y n la resolución de fase de cada semiciclo.

Un valor de $cc = 1$ indica que los dos semiciclos tienen la misma distribución, y un $cc = 0$ indica que son totalmente asimétricas. La ejemplificación del comportamiento se muestra en la Figura 3.8c.

Asimetría (As):

Otro factor que se puede considerar es la asimetría relativa entre las dos distribuciones, la cual se describe mediante la ecuación (3.6).

$$\mathbf{As} = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \quad (3.6)$$

La asimetría varía entre -1 y 1, siendo 0 si la distribución en ambos semiciclos tiene el mismo tamaño, -1 si la distribución positiva es más grande y 1 si la distribución negativa es más grande. La ejemplificación del comportamiento se muestra en la Figura 3.8d.

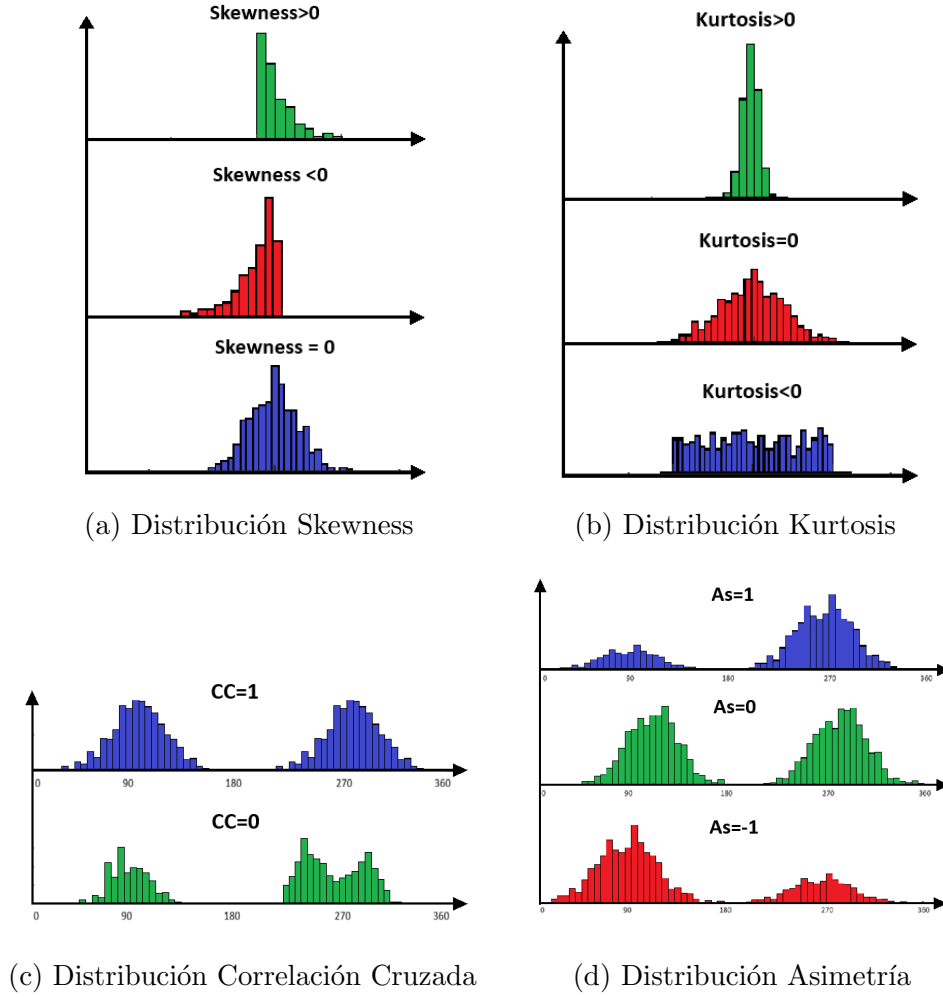


Figura 3.8: Distribución de momentos estadísticos descriptivos.

Número de Peaks

Además, es posible agregar otro parámetro que aporte a caracterizar la forma de las distribuciones estadísticas, como es el Número de Peaks que presenta cada distribución en el semiciclo positivo y negativo. Se obtiene a partir de la ecuación (3.7).

$$\frac{dy_{i-1}}{dx_{i-1}} > 0, \frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}} > 0 \quad (3.7)$$

Otros parámetros que ayudan a complementar el análisis PRPD son algunos de los presentados en el estándar **IEC 60270** [12], los cuales no necesariamente están asociados a un análisis resuelto en fase, pero sí forman parte de los análisis más clásicos de descargas parciales dado que ayudan a determinar la gravedad de las descargas en el aislamiento. Estos parámetros se indican en las Ecuaciones (3.8)-(3.13).

$$\text{Corriente de descarga promedio : } I = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N |q_i| \quad (3.8)$$

$$\text{Razón cuadrática : } D = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N q_i^2 \quad (3.9)$$

$$\text{Potencia de descarga : } P = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N q_i V_i \quad (3.10)$$

$$\text{Razón de repetición : } n = \frac{N}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$$\text{Descarga máxima : } q_{max} = \text{máx}(q_1, ..., q_N) \quad (3.12)$$

$$\text{Descarga media : } q_{av} = \sum_{i=1}^N |q_i| / N \quad (3.13)$$

3.3.3. Presentación de cálculos estadísticos

Todos estos momentos estadísticos que permiten cuantificar las distribuciones obtenidas a partir del PRPD se pueden resumir mediante un *Fingerprint* [15, 16], en el cual se indican las cinco distribuciones estadísticas obtenidas junto con los momentos estadísticos que las describen en un gráfico de barras cuyos valores van entre [-2, 2]. En la Figura 3.9 se muestra un ejemplo de la presentación de datos para el PRPD.

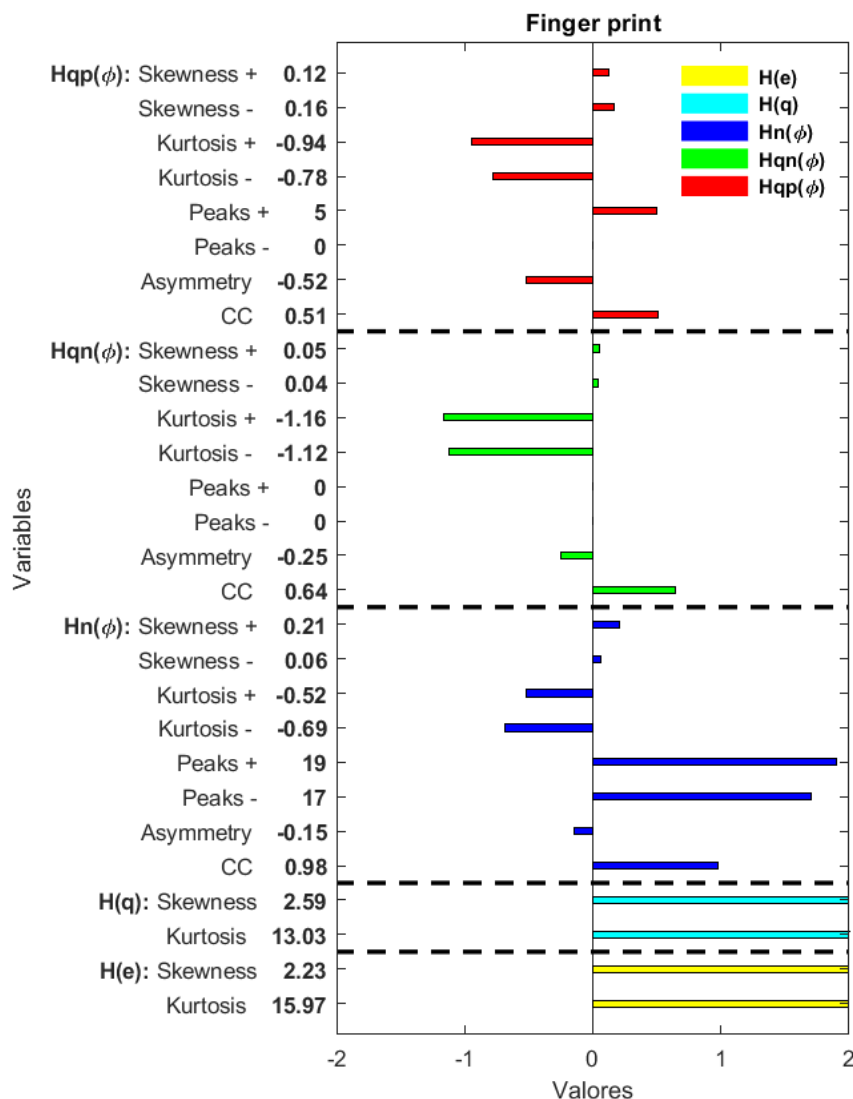


Figura 3.9: Ejemplo de Finger print para momentos estadísticos del patrón PRPD.

Los demás datos presentados en esta sección se muestran por separado en tablas para cada molino.

3.4. Construcción de PSA

Para la construcción del gráfico PSA se realiza un procedimiento similar al descrito en la Sección 3.1 para la construcción del PRPD, pero en este caso en el eje x se gráfica la diferencia de tensión anterior $v_n - v_{n-1}$ en la que ocurre la descarga y en el eje y la diferencia de tensión posterior

$v_{n+1} - v_n$ en la que ocurre la descarga. La tensión que se utiliza para la construcción de estos gráficos está en pu y la ventana de fase para ambos ejes es de 0.01 pu.

En la Figura 3.10 se muestra un ejemplo de PSA obtenido para el **Molino 1** en el año **2018**, en donde se muestra el conteo de repeticiones utilizado en el PSA, el cual es el mismo que el utilizado en el PRPD.

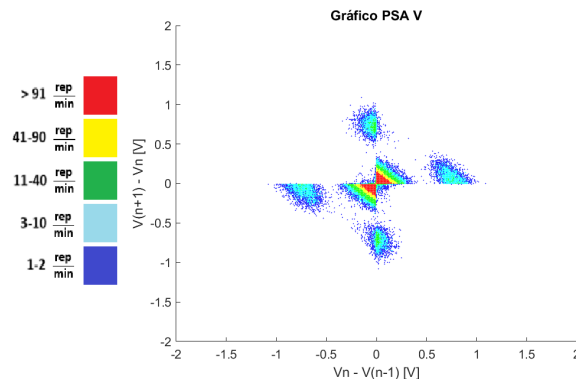


Figura 3.10: Ejemplo de construcción de patrón de descarga PSA con código de colores asociado a repetición de descargas.

3.5. Caracterización de PSA

Para la caracterización del PSA se utilizan las características de los patrones presentados en la Sección 1.6.7. En la Figura 3.11 se muestra un ejemplo de patrón PSA, el detalle del análisis del patrón se realiza en la Sección 2.3.

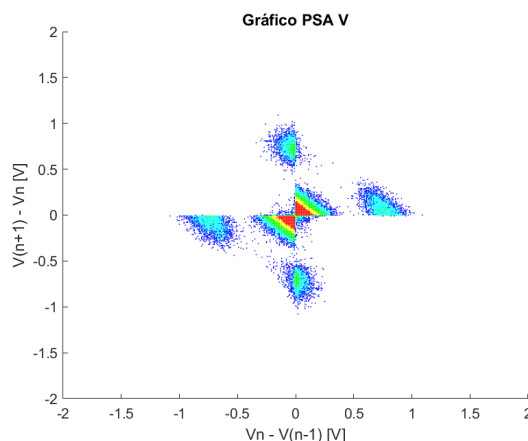


Figura 3.11: Ejemplo de patrón de descarga PSA.

Los patrones PSA obtenidos de los ensayos a los molinos son bien definidos, siendo generalmente como los mostrados en la Figura 3.12, lo que facilita su caracterización. Además, estos patrones son

muy susceptibles al ruido electrónico (como se muestra en la Figura 3.12d) debido a que los pulsos de ruido electrónico tienen una secuencia distinta (frecuencia de repetición rápida y secuencias repetitivas) a la de las descargas parciales provenientes del aislamiento.

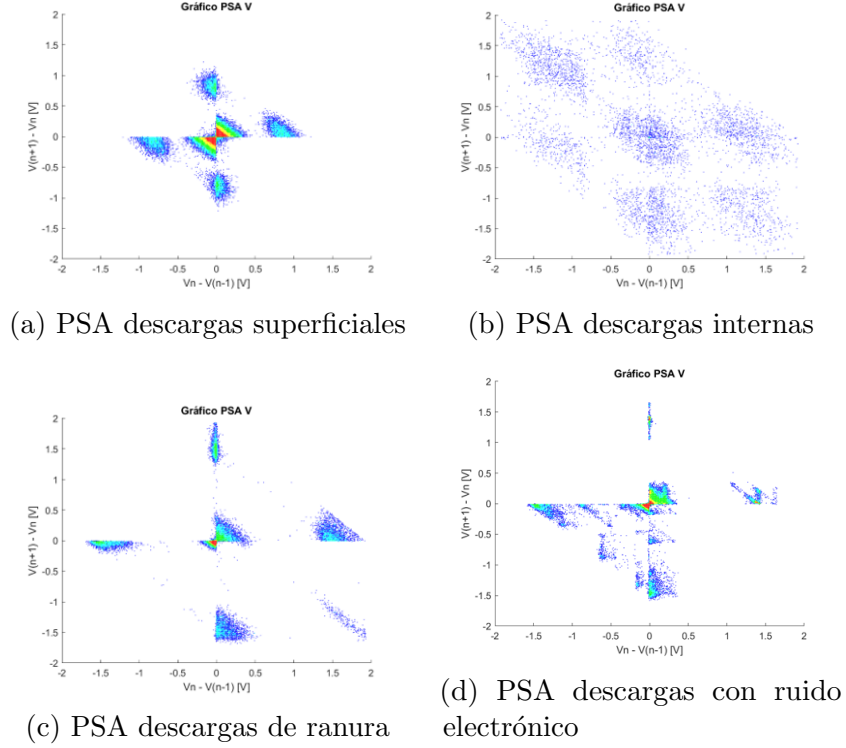


Figura 3.12: Patrones PSA generales obtenidos de ensayo a los molinos estudiados.

3.6. Cuantificación de PSA

Como se muestra en la Figura 3.13, es posible obtener dos tipos de gráficos a partir del gráfico de secuencia de pulsos con número de repeticiones: el tradicional PSA y el gráfico de Número de repeticiones vs $v_n - v_{n-1}$.

Para realizar la cuantificación del gráfico PSA se propone realizar dos tipos de análisis: uno para el tradicional PSA de la Figura 3.13b, el cual consiste en un análisis mediante clusterización, y otro para el gráfico de la Figura 3.13c mediante análisis con momentos estadísticos.

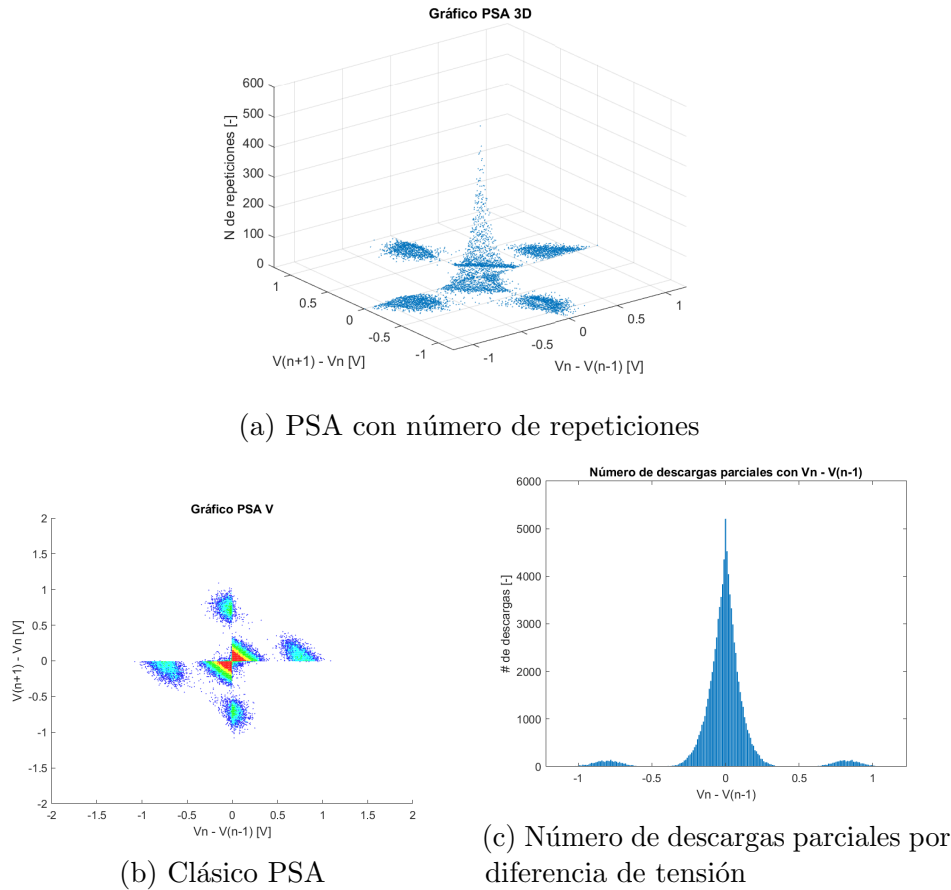


Figura 3.13: Gráficos obtenidos del análisis de secuencia de pulsos.

3.6.1. Clusterización de PSA

Para realizar un análisis de cada grupo obtenido en el PSA, se propone utilizar el método K-Means, el cual es un algoritmo de agrupamiento (clustering) no supervisado ampliamente utilizado en el análisis de datos y el Machine Learning. Su objetivo principal es dividir un conjunto de datos en k grupos (o clusters) de tal manera que los elementos dentro de un grupo sean lo más similares posible entre sí y lo más diferentes posible de los elementos de otros grupos. Este método es elegido dado que es rápido y eficiente para grandes conjuntos de datos.

El método K-Means consiste en los siguientes pasos:

- **Inicialización:** Se seleccionan k puntos iniciales llamados centroides y se colocan en una posición arbitraria del gráfico.
- **Asignación de clusters:** Cada punto de datos se asigna al centroide más cercano. Esto se hace calculando la distancia euclidiana de cada punto de datos a cada uno de los centroides y asignando el punto al centroide más cercano.

- **Recalculación de centroides:** Una vez que todos los puntos de datos han sido asignados a un cluster, se recalculan los centroides. El nuevo centroide de cada cluster es el promedio de todos los puntos en el cluster.
- **Repetición:** Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los centroides ya no cambien significativamente o se alcance un número máximo de iteraciones.

Sin embargo, este método posee tres desventajas principales:

1. Requiere especificar el número de clusters k de antemano.
2. Es sensible a la elección de los centroides iniciales.
3. No es adecuado para clusters de formas arbitrarias (mejor para clusters circulares).

La primera desventaja se puede solucionar dado el limitado y conocido rango de clusters que se tiene para los patrones PSA, en los cuales se tiene 1 cluster para descargas corona, 5 para descargas superficiales, 6 para descargas de ranura y 7 para descargas internas según lo indicado en la Sección 1.6.7. Por lo tanto, incorporando una medida que indique qué tan buenos son los clusters, es posible determinar cuál es el número de clusters óptimo para la clusterización. Una de las medidas que se puede utilizar es el llamado coeficiente de Silhouette [32], el cual es una medida de cuán similar es un dato a su propio cluster (cohesión) en comparación con otros clusters (separación). Este está dado por las Ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$\text{Coef. Silueta} = \frac{S_1 + S_2 + \cdots + S_n}{n} \quad (3.14)$$

$$S_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)} \quad (3.15)$$

Donde:

a_i : Distancia promedio del punto i a todos los puntos de su mismo cluster.

b_i : Distancia promedio del punto i a todos los puntos del cluster más cercano.

La segunda desventaja puede ser solucionada dada la naturaleza de los patrones PSA presentados en la Sección 1.6.7. Conociendo estos patrones, es posible considerar posiciones iniciales para los centroides al comienzo del algoritmo. Los centroides mostrados en la Figura 3.14 son los utilizados.

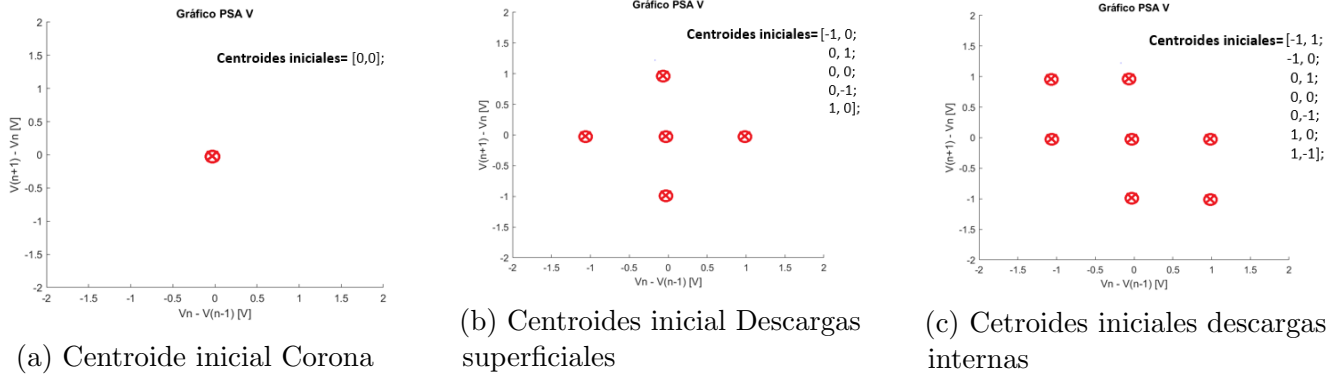


Figura 3.14: Centroides iniciales para el comienzo de la iteración con k-means.

La tercera desventaja no es un problema dado que los patrones PSA poseen clusters bien definidos, la mayoría de forma casi circular, tal como se mostró en la Figura 3.12.

Mediante este método es posible obtener una clusterización como la que se muestra en el ejemplo de la Figura 3.15, donde se marcan con una "X" los centroides obtenidos mediante el algoritmo k-means.

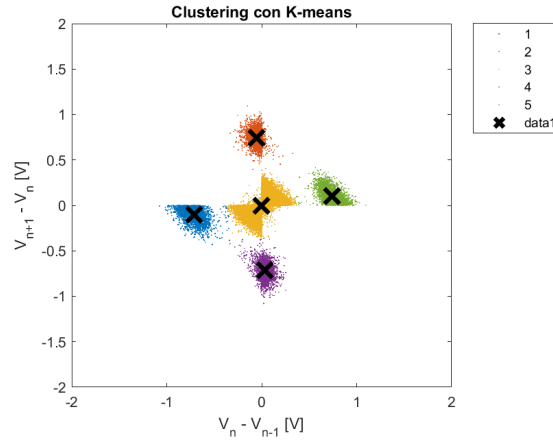


Figura 3.15: Ejemplo de clusterización de patrón de descarga PSA.

3.6.2. Análisis de gráfico número de descargas por diferencia de tensión

Para realizar el análisis del gráfico de la Figura 3.13c, se propone dividirlo en tres partes (H1, H2 y H3), donde los límites de división están dados por el final de las colas de la distribución central obtenida en H2. Este límite de división es posible obtenerlo a partir de la clusterización del clásico PSA de la Figura 3.13b, realizada anteriormente. Dado que se conoce entre qué datos está cada cluster, se puede determinar el rango de datos en el eje x del cluster central y utilizar esta información para la división en tres partes del gráfico de número de descargas por diferencia de tensión, tal como se muestra en la Figura 3.16.

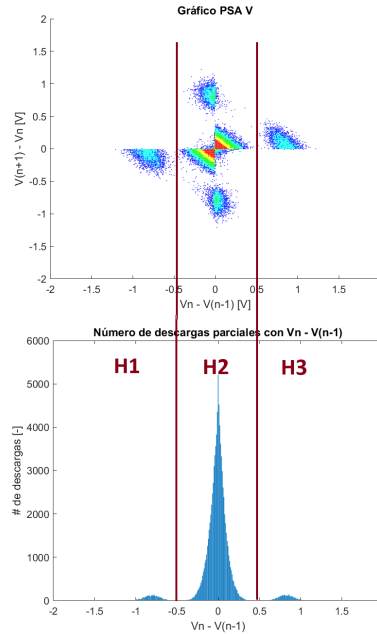


Figura 3.16: Obtención de límites de gráfico de número de descargas parciales por diferencia de tensión.

Una vez realizada esta división, es posible calcular la media, la desviación estándar, Skewness y Kurtosis de cada una de las tres distribuciones. Además, para comparar la distribución central con las otras dos, se puede agregar la comparación mediante el factor de correlación y asimetría.

3.6.3. Implementación del método de cuantificación

Los pasos para la implementación de la cuantificación se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 3.17.

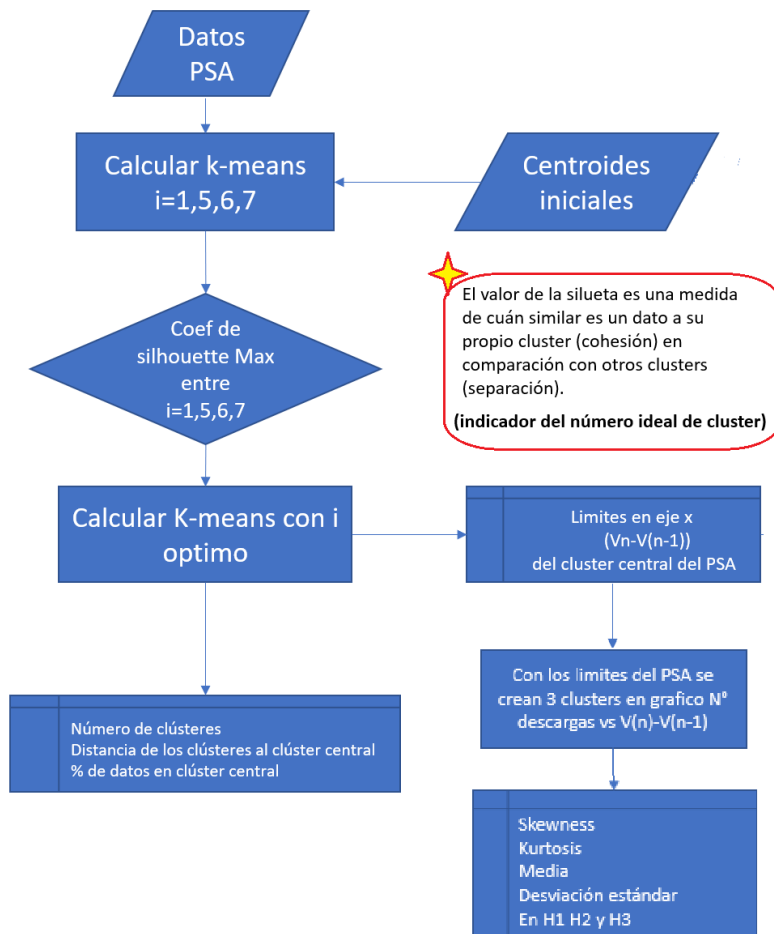


Figura 3.17: Diagrama de flujo de cuantificación de PSA.

Se utilizan los datos obtenidos del PSA y se realiza la clusterización con k-means utilizando los centroides iniciales indicados anteriormente. Con el coeficiente de Silhouette se determina cuál es el número óptimo de centroides y se vuelve a calcular la clusterización, pero esta vez con el k óptimo obtenido. De esta forma se obtiene la clusterización del patrón PSA y se calculan todos los parámetros estadísticos asociados a cada cluster por separado. De la clusterización del gráfico PSA se obtienen los límites en el eje x del cluster central, con los que se puede obtener la división del gráfico de número de repeticiones por cada diferencia de tensión. Finalmente, con la división en tres partes (H1, H2 y H3) de este gráfico, se obtiene una serie de momentos estadísticos de cada uno para poder cuantificarlo.

3.6.4. Presentación de cálculos estadísticos PSA

Los momentos estadísticos que permiten cuantificar el patrón PSA se presentan, al igual que para el PRPD, en un *Fingerprint* como el de la Figura 3.18.

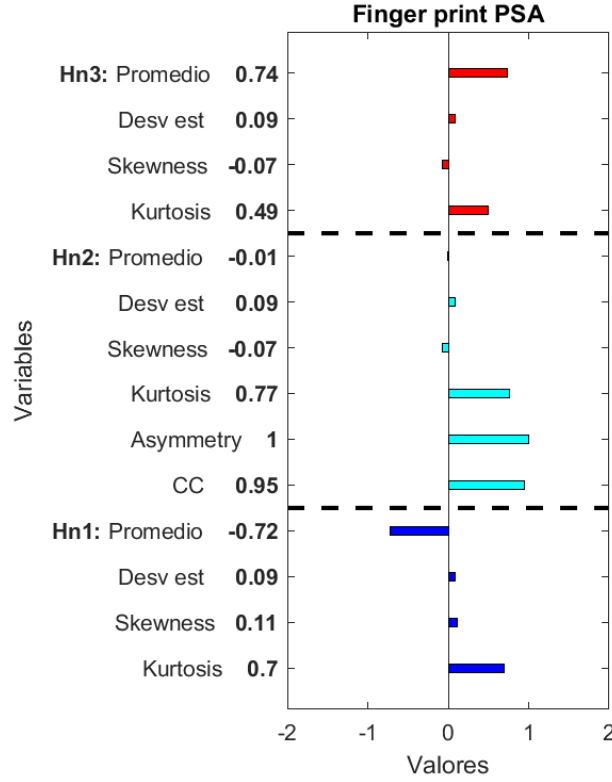


Figura 3.18: Ejemplo de Fingerprint para momentos estadísticos del patrón PSA.

Los demás datos presentados en esta sección se muestran por separado en tablas para cada molino.

3.7. Construcción PCP (Polar Coordinate Pattern)

Para la construcción del PCP se procede con los siguientes pasos indicados en [21]:

1. Se toma el valor absoluto de la magnitud de las descargas obtenidas en la medición.
2. Se normaliza la magnitud de descarga obtenida de los pulsos mediante la Ecuación (3.16) para obtener q_{norm} .

$$q_{norm} = \frac{q_i - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} \quad (3.16)$$

3. Se transforma el valor de los ángulos en donde ocurre la descarga de grados ϕ a radianes ϕ_{norm} .
4. Se grafica en coordenadas polares utilizando q_{norm} y ϕ_{norm} .

En la Figura 3.19b se muestra un ejemplo de la obtención del patrón PCP y su comparación con el PRPD para las descargas aisladas del tipo Corona.

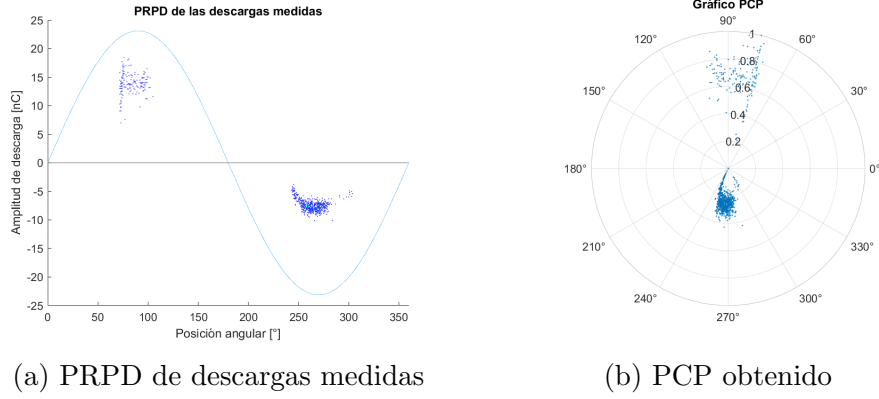


Figura 3.19: Ejemplo de construcción de PCP.

3.8. Caracterización de PCP

El método PCP no cuenta con información específica sobre la caracterización de patrones de descargas parciales en máquinas eléctricas. Por ello, se realiza una caracterización de las descargas mediante la comparación con las descargas aisladas medidas en el LAT de la UTFSM por el Profesor Jorge Ardila. La obtención de los PCP de estas descargas aisladas se presenta en la Sección 3.10, al final de este capítulo.

3.9. Cuantificación de PCP

Para realizar la cuantificación del PCP, se clasifican las descargas parciales en dos clusters utilizando el método K-means mencionado en la Sección 3.6.1. Según las características de la distribución de los patrones de descargas PCP, siempre se espera obtener 2 clusters, por lo que se escoge un K=2. El centroide de los clusters se calcula como el promedio de los puntos en el cluster, según la Ecuaciones (3.17)-(3.18).

$$\text{Centroide} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.17)$$

$$c_i = \frac{1}{N_i} \sum_{x \in C_i} x \quad (3.18)$$

Con esto es posible obtener una clusterización como la mostrada en la Figura 3.20

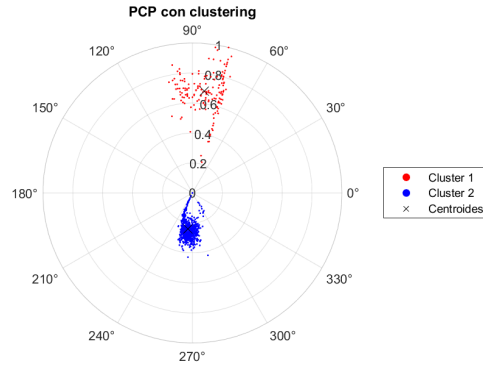
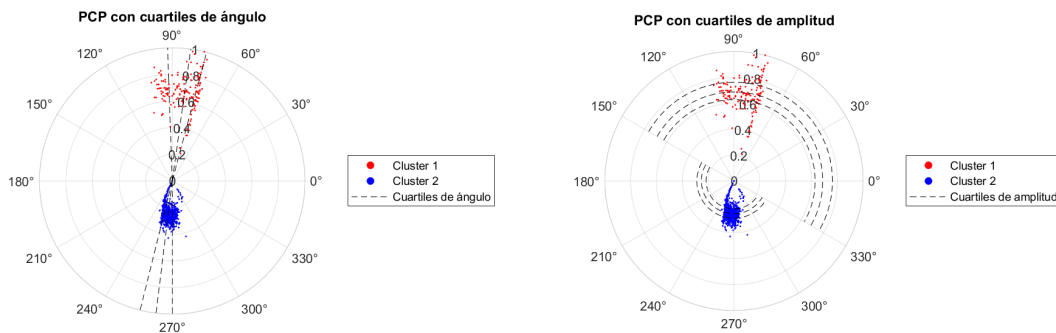


Figura 3.20: Ejemplo de PCP con clusterización

Realizada la clusterización, se pueden calcular los siguientes parámetros:

- Centroides de cada cluster.
- Rango de ángulos de fase de cada cluster (ángulo mínimo y máximo).
- Número de descargas en cada cluster.
- Ángulo medio, cuartil inferior de ángulo (25 %) y cuartil superior de ángulo (75 %) de cada cluster (Figura 3.21a).
- Amplitud media, cuartil inferior de amplitud (25 %) y cuartil superior de amplitud (75 %) de cada cluster (Figura 3.21b).



(a) Cuartiles de ángulo de PCP

(b) Cuartiles de amplitud de PCP

Figura 3.21: Ejemplo de obtención de cuartiles de PCP.

Además, para poder cuantificar el patrón PCP de mejor forma, se incluyen los siguientes parámetros estadísticos:

Similaridad de coseno entre los centroides ($Cossim$):

$$Cossim(c_1, c_2) = \frac{\langle c_2, c_1 \rangle}{\|c_1\| \|c_2\|} \quad (3.19)$$

Donde c_1 y c_2 son los centroides del cluster 1 y el cluster 2 respectivamente.

Radio de los cuartiles de amplitud (A_{ratio}):

Del cluster 1 y el cluster 2:

$$A_{ratio1} = \frac{A1_{50}}{A2_{50}} \text{ o } \frac{A2_{50}}{A1_{50}} \quad (A_{ratio1} \geq 1) \quad (3.20)$$

$$A_{ratio2} = \frac{A1_{75}}{A2_{75}} \text{ o } \frac{A2_{75}}{A1_{75}} \quad (A_{ratio2} \geq 1) \quad (3.21)$$

Donde $A1_{50}$ es el cuartil 0.5 de la amplitud del cluster 1, $A2_{50}$ es el cuartil 0.5 de la amplitud del cluster 2. $A1_{75}$ y $A2_{75}$ son el cuartil 0.75 de la amplitud del cluster 1 y el cluster 2, respectivamente.

Skewness (SK):

Del cluster 1

$$SK_x = \frac{1}{\sigma_x^3} \sum_{i=1}^{N1} (x_i - \bar{x})^3 \quad (3.22)$$

$$SK_y = \frac{1}{\sigma_y^3} \sum_{i=1}^{N1} (y_i - \bar{y})^3 \quad (3.23)$$

$$x_i = q_{normi} \cdot \cos \phi_{normi} \quad (3.24)$$

$$y_i = q_{normi} \cdot \sin \phi_{normi} \quad (3.25)$$

Donde x_i , y_i son las coordenadas de cada punto en el gráfico de coordenadas polares. $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son los valores medios en las coordenadas x y y respectivamente. σ_x y σ_y son las desviaciones estandar en las coordenadas x y y respectivamente. El Skewness del cluster 2 se calcula de la misma manera.

Kurtosis (KU):

Del cluster 1 y el cluster 2 se calcula como:

$$KU_x = \frac{1}{\sigma_x^4} \sum_{i=1}^{N1} (x_i - \bar{x})^4 - 3 \quad (3.26)$$

$$KU_y = \frac{1}{\sigma_y^4} \sum_{i=1}^{N1} (y_i - \bar{y})^4 - 3 \quad (3.27)$$

Presentación de cálculos estadísticos PCP

Los momentos estadísticos que permiten cuantificar el patrón PCP se presentan, al igual que para el PRPD en un Finger Print como el de la Figura 3.22.

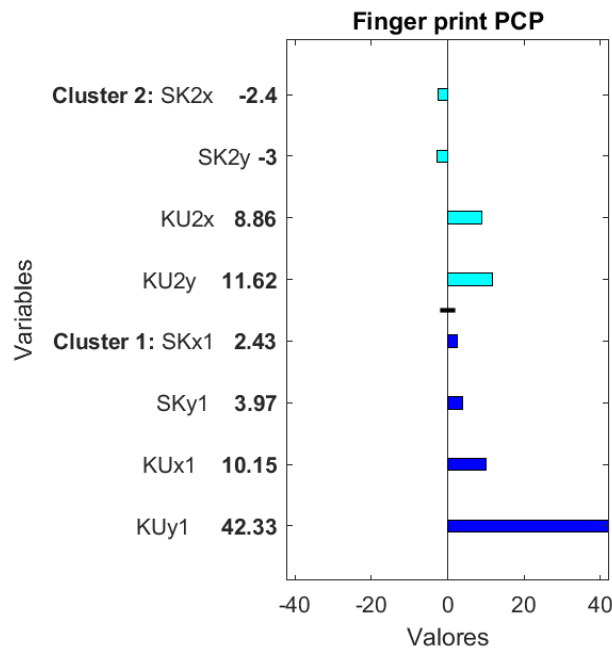


Figura 3.22: Ejemplo de Finger Print para momentos estadísticos del patrón PCP.

Los demás datos presentados en esta sección se muestran por separado en tablas para cada molino.

3.10. Similitud con tipos de descargas parciales

Para determinar cuantitativamente a grandes rasgos a qué descarga corresponde cada patrón obtenido en cada una de las mediciones analizadas, se realiza un análisis comparativo de los parámetros estadísticos. Se comparan los patrones obtenidos de las mediciones a cada molino en cada año con mediciones de descargas parciales aisladas (libres de ruido y aisladas de otras descargas) realizadas en probetas artificiales en laboratorio para obtener un indicio de a qué descarga tienen más similitud.

Las mediciones fueron obtenidas por el profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica Jorge Ardila en el Laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UTFSM, y corresponden a descargas PRPD del tipo corona, internas de grandes vacuolas y descargas superficiales.

Los patrones de descargas aisladas obtenidos con cada método de análisis se muestran en la Figura 3.26.

Los patrones PSA de las descargas superficiales e internas son los esperados según lo visto en la Sección 1.6.5 de la Revisión Bibliográfica, pero el patrón PSA corona tiene una similitud con un patrón particular de descargas corona que aparece al utilizar grandes tensiones de ensayo [18].

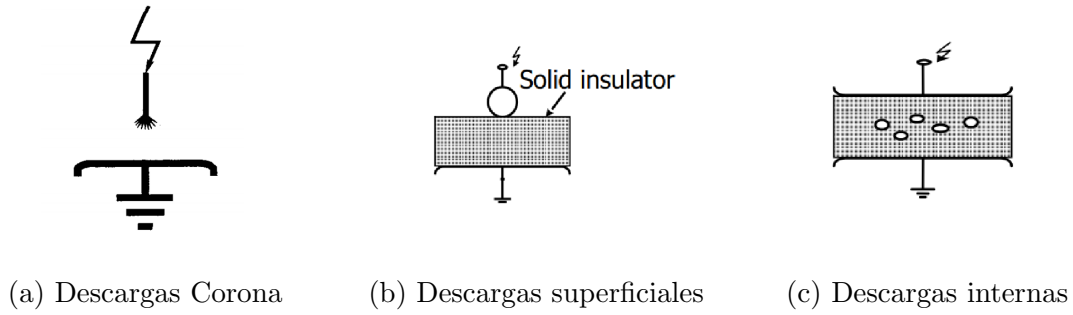


Figura 3.23: Esquema de ensayo de descargas aisladas

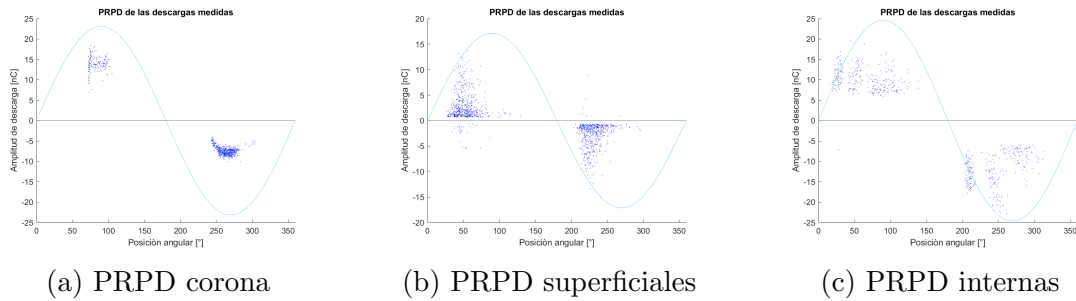


Figura 3.24: PRPD de descargas aisladas

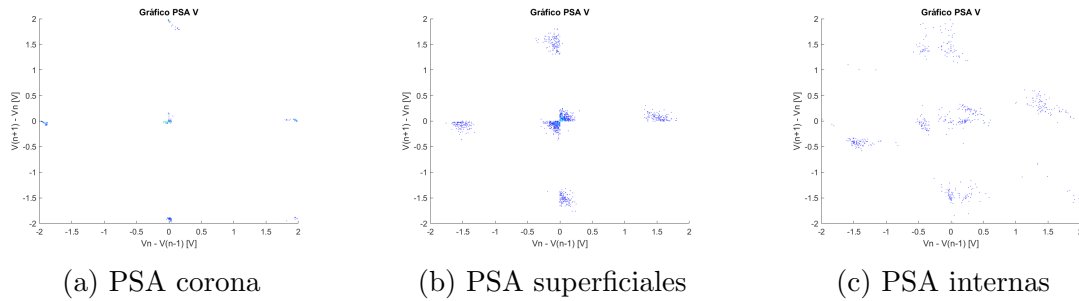


Figura 3.25: PSA de descargas aisladas

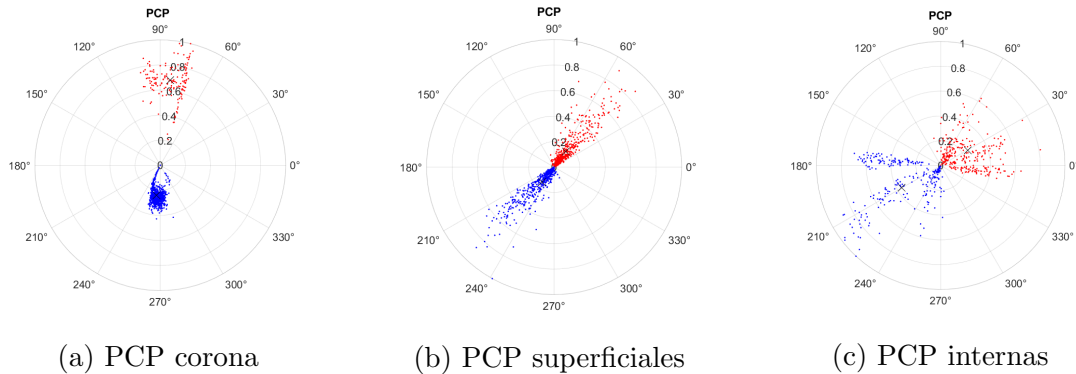


Figura 3.26: PCP de descargas aisladas

Estas mediciones permiten comparar los patrones PRPD, PSA y PCP de cada molino para determinar a cuál descarga presentan mayor parecido mediante un cálculo de error de los parámetros

obtenidos de cada descarga aislada. Más detalles del análisis a estas descargas aisladas con cada método son mostrados en el Anexo D.

Para obtener la similitud de descargas con el método PRPD, se asigna un porcentaje en la comparación de cada parámetro según la importancia de cada uno al cuantificar e identificar las descargas que ocurren en el aislamiento con métodos estadísticos [33]. Estos pesos son indicados en la Tabla 3.1.

Pesos Hqp		Pesos Hqn		Pesos Hn		Pesos Hq		Pesos He	
Skewness+	0.05	Skewness+	0.05	Skewness+	0.05	Skewness	0.01	kewness	0.01
Skewness-	0.05	Skewness-	0.05	Skewness-	0.05				
Kurtosis+	0.05	Kurtosis+	0.05	Kurtosis+	0.05	Kurtosis	0.01	Kurtosis	0.01
Kurtosis-	0.05	Kurtosis-	0.05	Kurtosis-	0.05				
Peaks+	0.01	Peaks+	0.01	Peaks+	0.01				
Peaks-	0.01	Peaks-	0.01	Peaks-	0.01				
Asymmetry	0.05	Asymmetry	0.05	Asymmetry	0.05				
CC	0.05	CC	0.05	CC	0.05				
	32 %		32 %		32 %		2 %		2 %

Cuadro 3.1: Tabla pesos PRPD para comparación con descargas aisladas

Para identificar el tipo de descarga PSA que presenta el aislamiento, el parámetro más importante es el número de clusters de cada patrón, ya que los patrones PSA solo indican la descarga predominante en la medición. Cada patrón posible tiene un número característico de clusters que lo identifica, como se indicó en la Sección 3.6.1. Por esta razón, el único dato utilizado en la identificación de descargas es este parámetro, el cual se indica en la Tabla 3.2. Sin embargo, los demás momentos estadísticos y parámetros siguen siendo considerados para identificar la gravedad de las descargas que pueden estar ocurriendo en el aislamiento [10].

Distribución H1		Distribución H2		Distribución H3		PSA	
Promedio	0.00	Promedio	0.00	Promedio	0.00	N° de clusters	1.00
Desv est	0.00	Desv est	0.00	Desv est	0.00	Distancia Cluster C	0.00
Skewness	0.00	Skewness	0.00	Skewness	0.00	% Datos Cluster C	0.00
Kurtosis	0.00	Kurtosis	0.00	Kurtosis	0.00		
	0 %		0 %		0 %		100 %

Cuadro 3.2: Tabla pesos PSA para comparación con descargas aisladas

Para identificar el tipo de descarga mediante el PCP, se asigna un porcentaje en la comparación de cada parámetro utilizando los parámetros y momentos estadísticos indicados en [21], los cuales se muestran en la Tabla 3.3. Los demás parámetros están implícitos en los utilizados en la identificación de descargas, por lo que no se utilizan (tienen un peso igual a cero); sin embargo, estos son presentados para identificar la gravedad de las descargas que pueden estar ocurriendo en el aislamiento.

Capítulo 3. Metodología de análisis de descargas parciales

Cluster 1		Cluster 2		Parámetros	
Skewness x	0.10	Skewness x	0.10	Cossim	0.10
Skewness y	0.10	Skewness y	0.10	A1 ratio	0.05
Kurtosis x	0.10	Kurtosis x	0.10	A2 ratio	0.05
Kurtosis y	0.10	Kurtosis y	0.10		
Ángulo min-max	0.00	Ángulo min-max	0.00		
Cuartiles de ángulo	0.00	Cuartiles de ángulo	0.00		
Cuartiles de amplitud	0.00	Cuartiles de amplitud	0.00		
	40 %		40 %		20 %

Cuadro 3.3: Tabla pesos PCP para comparación con descargas aisladas

El cálculo de error para identificar el tipo de descarga más similar en cada gráfico PRPD, PSA y PCP de cada ensayo para cada molino se indica en una tabla, como la mostrada en 3.4, para el ejemplo del análisis PRPD del **Molino 1**. La descarga que presenta el menor error obtenido es el tipo de descarga parcial que predomina en el ensayo.

Molino 1		2018	2020	2021	2022
Error Finger Print [%]	Internas	86.69	162.66	103.40	242.75
	Superficiales	143.27	252.26	275.87	183.17
	Corona	102.39	163.36	310.98	233.07

Cuadro 3.4: Ejemplo de calculo de error con descargas aisladas.

Capítulo 4

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las mediciones a cada molino junto con el análisis de descargas parciales mediante PRPD, PSA y PCP.

4.1. Molino 1

PRPD

En la Figura 4.1 se muestran los PRPD obtenidos para el **Molino 1** en cada ensayo.

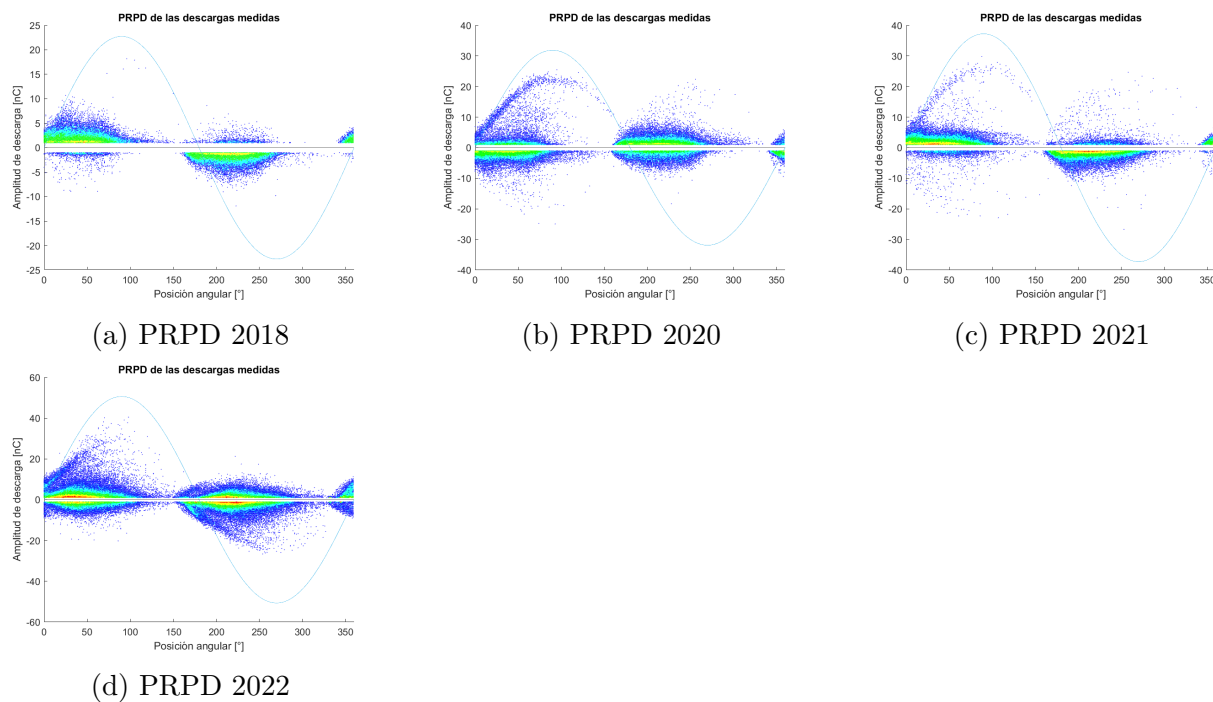


Figura 4.1: PRPD de descargas medidas en **Molino 1**.

El PRPD de las descargas medidas en el año 2018 de la Figura 4.1a muestra un patrón de descargas internas no superiores a 10 nC, lo cual es indicativo de un nivel moderado de vacuolas abiertas con carbonización incipiente y delaminaciones. Además, se observa que estas descargas son simétricas en el primer y tercer cuadrante, indicando que existe un estado homogéneo del aislamiento. Se aprecia, además, una actividad menor en repetición pero de amplitud levemente mayor a las descargas internas que corresponde a descargas del tipo corona.

El PRPD de las descargas obtenidas en el año 2020 es notoriamente mayor con respecto a las descargas del año 2018, lo que indica un envejecimiento del aislamiento. El patrón observado en la Figura 4.1b muestra un patrón típico de descargas internas producto de delaminaciones y descargas internas de vacuolas herméticas grandes (Patrón “Rabbit ear”). Al igual que en la medición del año anterior, se aprecia una actividad en menor repetición pero de amplitud levemente mayor de descargas del tipo corona.

Durante el año 2021, el PRPD de las descargas medidas se mantuvo en un rango similar al del año anterior. Como se observa en la Figura 4.1c, los patrones de descargas internas son similares a los patrones de delaminaciones y el patrón de grandes vacuolas herméticas. La actividad de descargas corona obtuvo una leve disminución con respecto al año anterior.

Finalmente, en el PRPD del año 2022 de la Figura 4.1d, se observa que las descargas mantuvieron los mismos patrones mencionados anteriormente de descargas internas y descargas corona, pero se puede observar un gran incremento en su actividad, sobre todo las descargas internas de vacuolas y delaminación adyacente al conductor.

En la Figura 4.2 se muestran los análisis estadísticos para el Molino 1 en cada ensayo. Con esta información, es posible obtener una caracterización la cual se indica en la Tabla 4.1. Se puede observar que el análisis mediante métodos estadísticos obtiene conclusiones similares a las mencionadas anteriormente, donde en los años 2018, 2020 y 2021 se indica una predominancia de descargas internas. Sin embargo, en el año 2022 se encuentra una mayor similitud con descargas superficiales.

Capítulo 4. Resultados

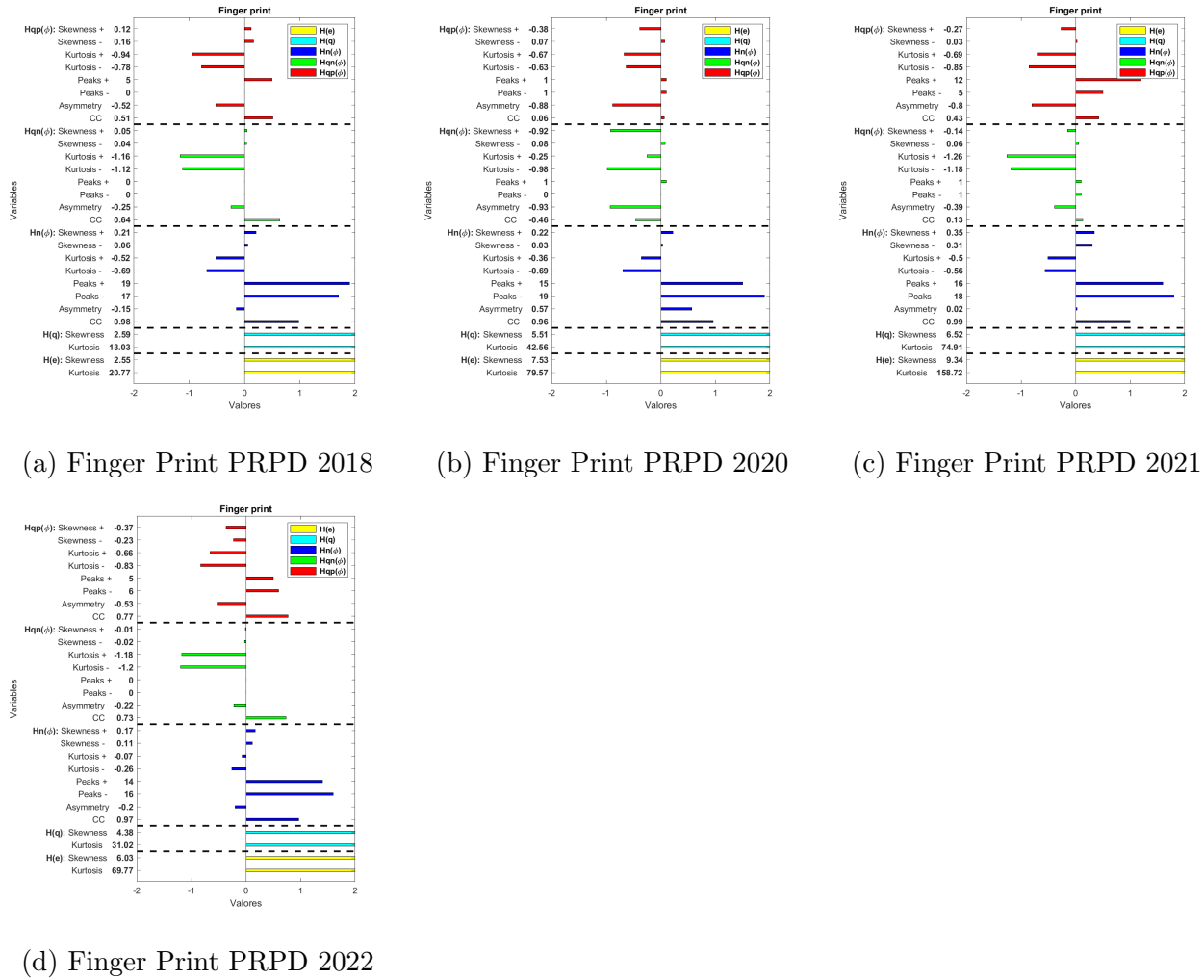


Figura 4.2: Finger Print PRPD Molino 1.

Los parámetros de la Tabla 4.1 no ayudan a caracterizar el tipo de descargas que ocurren en cada año, pero sí permiten ver cómo avanza la gravedad de las descargas a través de los años. Se observa un incremento considerable desde el año 2018 hasta el año 2022 en todos los parámetros, destacando la descarga máxima, la razón de repetición y la corriente de descarga promedio, lo que indica un posible daño progresivo en el aislamiento del Molino 1.

Molino 1	2018	2020	2021	2022
Corriente de descarga promedio [uA]	2.77	5.02	5.54	16.27
Razón cuadrática [pC^2/s]	0.0063	0.0191	0.0167	0.0679
Potencia de descarga [mW]	4.28	2.48	7.23	12.07
Razón de repetición [-/s]	1509	2315	2747	6740
Descarga máxima [nC]	18.20	25.50	29.80	40.5
Descarga media [nC]	1.83	2.17	2.02	2.41
Internas	86.69	162.66	103.40	242.75
Error Finger Print [%]	143.27	252.26	275.87	183.17
Superficiales	102.39	163.36	310.98	233.07
Corona				

Cuadro 4.1: Parámetros PRPD Molino 1.

PSA

En la Figura 4.3 se muestran los PSA obtenidos para el **Molino 1** en cada ensayo.

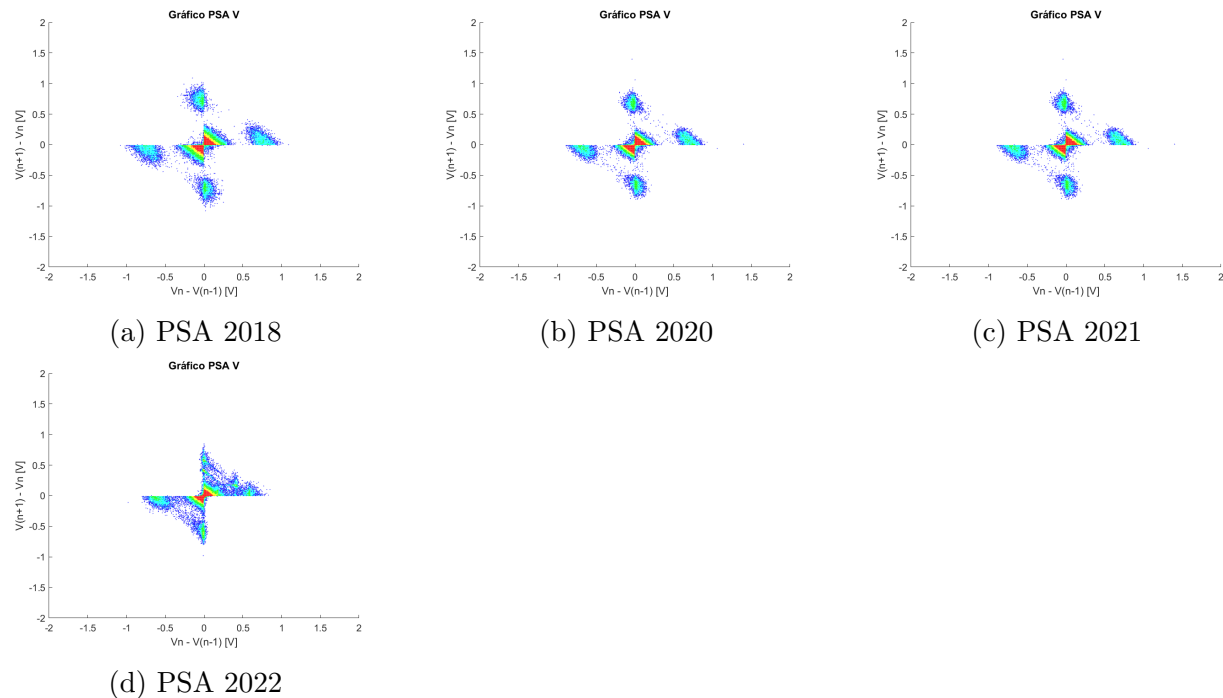


Figura 4.3: PSA de descargas medidas en **Molino 1**.

Los patrones PSA de los años 2019 hasta el 2022 mostrados en la Figura 4.3, a diferencia de lo que indica el patrón PRPD, señalan que existen descargas superficiales en el aislamiento del Molino 1, es decir, descargas en el cabezal de la bobina. Además, se puede observar cómo, a medida que avanzan los años, las descargas superficiales se vuelven cada vez más intensas en gravedad, indicado por el comportamiento de los clusters exteriores que se van acercando cada vez más al centro y el cluster central va teniendo cada vez más datos a lo largo de los años [10]. El patrón de descargas PSA al que se llega finalmente en el año 2022 deja de parecerse al patrón de descargas superficiales y se vuelve más similar al patrón de descargas entre fases.

Los análisis estadísticos de los patrones PSA se muestran en la Figura 4.4, en donde se logra apreciar cómo la distribución H2 aumenta la kurtosis y la posición de las distribuciones H1 y H3 tiende a desplazarse al centro (dado por los promedios de H1 y H3), lo que es un indicativo de un aumento de datos en el cluster central y, por lo tanto, un avance en las descargas superficiales. Esto es apreciable con mayor detalle en la Tabla 4.2, donde los datos del cluster central aumentan y la distancia de los clusters exteriores disminuye.

Capítulo 4. Resultados

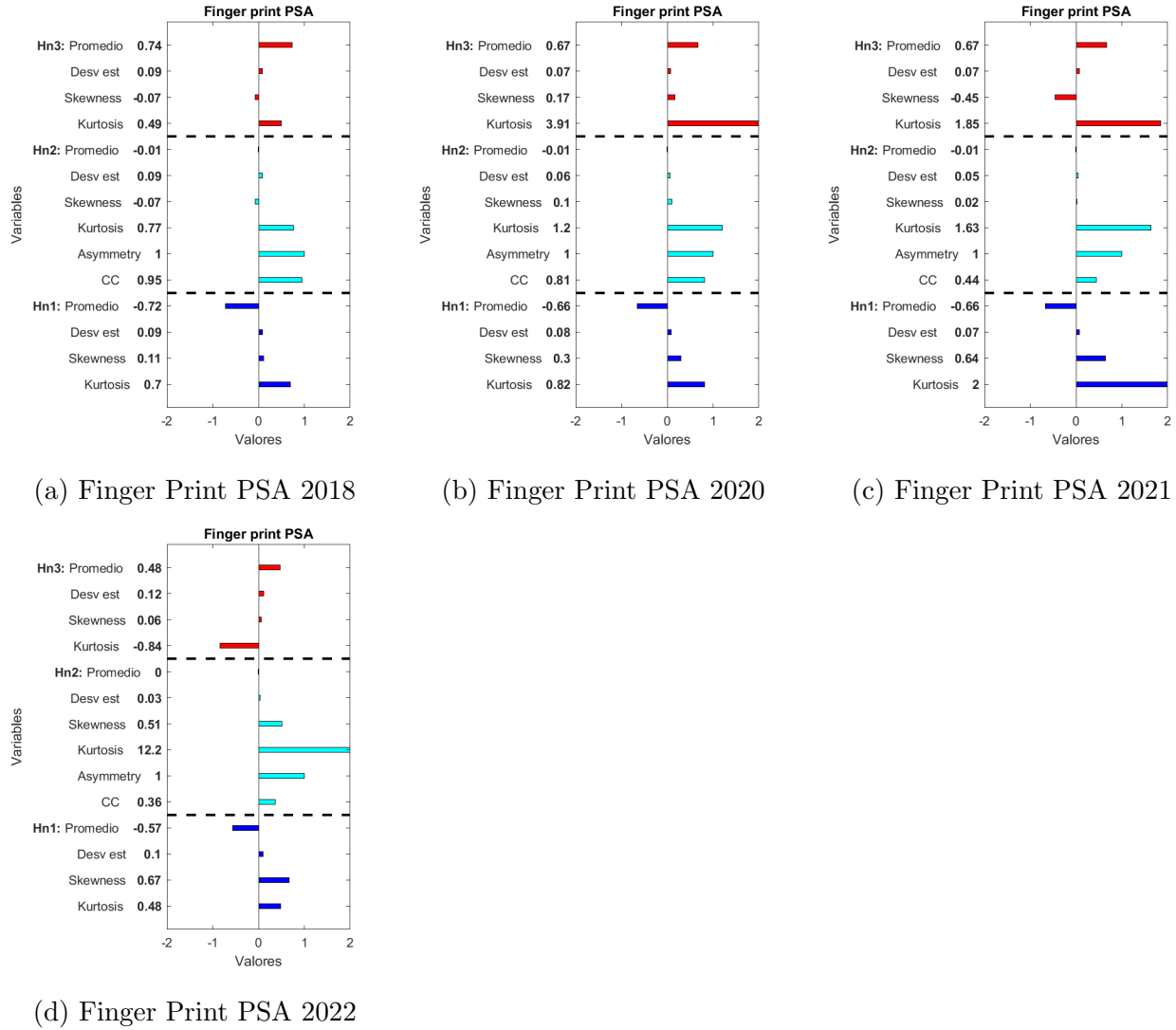


Figura 4.4: Finger Print PSA Molino 1.

La similitud del tipo de descargas PSA con las descargas aisladas es mostrada en la Tabla 4.2.

Molino 1 PSA		2018	2020	2021	2022
N° de clusters óptimo[-]		5	5	5	5
Distancia entre centroides prom [pu]		1.00	0.91	0.91	0.72
Distancia al centroide central prom [pu]		0.73	0.67	0.67	0.53
Datos en cluster central [%]		86.81	91.44	91.44	96.99
Error Finger Print [%]	Internas	0.00	0.00	0.00	0.00
	Superficiales	100.00	100.00	100.00	0.00
	Corona	0.00	0.00	0.00	0.00
	Entre fases	0.00	0.00	0.00	100.00
Ranura		0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 4.2: Parámetros PSA Molino 1.

PCP

En la Figura 4.5 se muestran los PCP obtenidos para el **Molino 1** en cada ensayo.

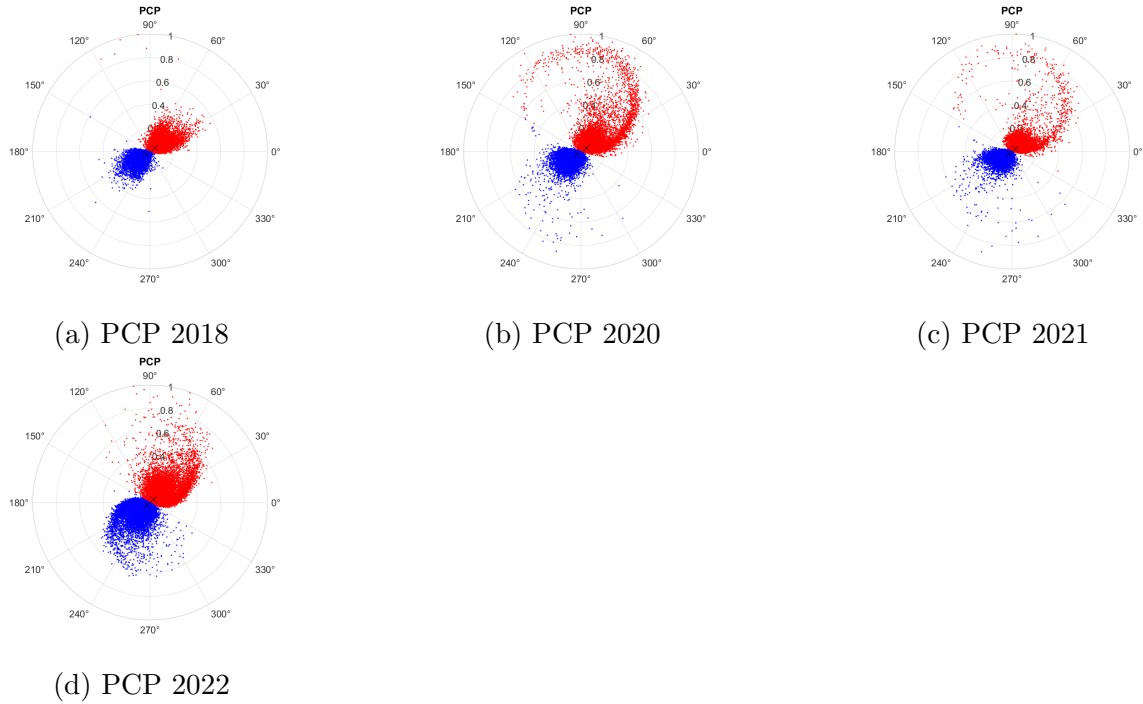
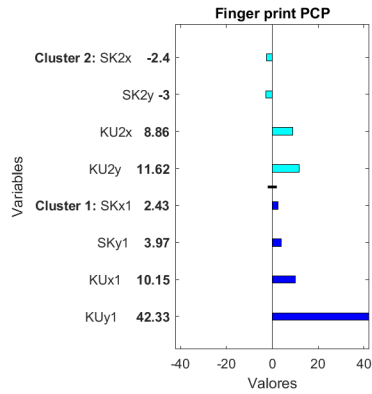


Figura 4.5: PCP de descargas medidas **Molino 1**.

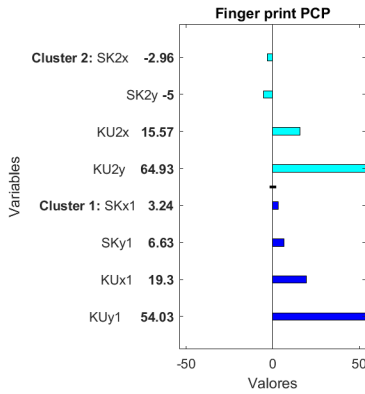
En los patrones PCP obtenidos se destaca el patrón de descargas internas de vacuolas herméticas grandes. Sin embargo, al realizar la caracterización mediante los momentos estadísticos de la Figura 4.6 y los parámetros PCP de la Tabla 4.3, se obtiene una similitud con descargas superficiales en todos los años, al igual que lo indicaba el patrón PSA, los que se muestran en la tabla 4.3.

La tabla de parámetros PCP y los momentos estadísticos no parecen mostrar un patrón apreciable que indique que exista algún indicio de daño o avance de descargas a través de los años, como lo indicaban los parámetros PSA.

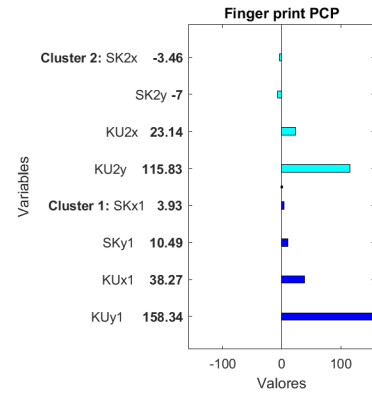
Capítulo 4. Resultados



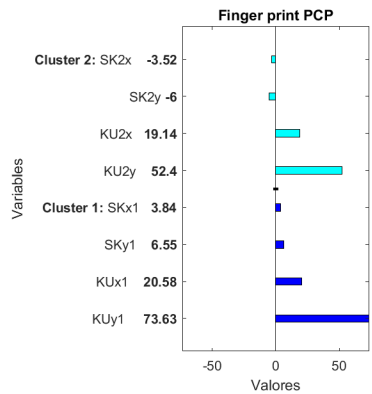
(a) Finger Print PCP 2018



(b) Finger Print PCP 2020



(c) Finger Print PCP 2021



(d) Finger Print PCP 2022

Figura 4.6: Finger Print PCP Molino 1.

Molino 1 PCP	2018	2020	2021	2022
A ratio 1 [-]	1.14	1.05	1.12	1.11
A ratio 2 [-]	1.16	1.06	1.11	1.08
Angulo min-max C1 [°]	[-26 150]	[-30 150]	[-30 150]	[-30 150]
Angulo min-max C2 [°]	[150 329]	[150 330]	[150 330]	[150 330]
Cuartiles de Ángulo C1 [°]	[17 37 55]	[13 33 52]	[14 32 52]	[23 38 55]
Cuartiles de Ángulo C2 [°]	[196 215 232]	[192 212 231]	[193 211 231]	[203 218 235]
Cuartiles de amplitud C1 [pu]	[0.01 0.03 0.07]	[0.01 0.03 0.06]	[0.01 0.02 0.05]	[0.01 0.02 0.05]
Cuartiles de amplitud C2 [pu]	[0.01 0.03 0.06]	[0.01 0.02 0.05]	[0.01 0.02 0.04]	[0.01 0.02 0.04]
Error Finger Print [%]	Internas	72.41	77.62	78.56
	Superficiales	43.48	57.74	63.82
	Corona	94.49	95.4	93.76
				94.91

Cuadro 4.3: Parámetros PCP Molino 1.

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.4 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante los análisis PRPD, PSA y PCP para el Molino 1.

	2018	2020	2021	2022
PRPD	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas
	Descargas corona	Descargas corona	Descargas corona	Descargas corona
PSA	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales
PCP	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas entre fases
	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales

Cuadro 4.4: Comparación de métodos de análisis **Molino 1**

4.2. Molino 2

El aislamiento del estator presentó un nivel bajo de descargas parciales hasta el año **2019**, estando cubierto por el ruido electromagnético que estuvo presente en la medición.

PRPD

En la Figura 4.7 se muestra el PRPD obtenido para el **Molino 2** en el ensayo del 2021 junto con su análisis estadístico.

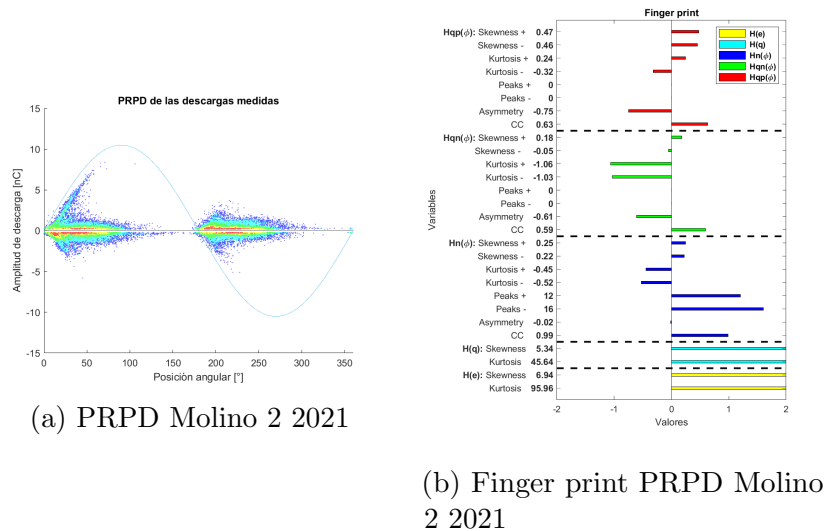


Figura 4.7: PRPD y Finger print de las descargas medidas en **Molino 2**.

El PRPD obtenido del Molino 2 en el año 2021 muestra un patrón típico de descargas internas tipo vacuolas grandes (Rabbit Ear) y delaminación cercana al conductor. Mediante los momentos estadísticos del *Finger print* de la Figura 4.7b y los parámetros de la Tabla 4.5, se obtiene una mayor similitud con descargas internas, como se indica en la Tabla 4.5.

Al observar la tabla de parámetros PRPD, se tiene que las descargas alcanzan máximas por debajo de 10 nC y descargas medias muy bajas, lo cual es indicativo de un buen estado del aislamiento.

Molino 2		2021
Corriente de descarga promedio [uA]		0.9
Razón cuadrática [pC ² /s]		0.0008
Potencia de descarga [mW]		0.21
Razón de repetición [-/s]		1925
Descarga máxima [nC]		8.40
Descarga media [nC]		0.47
Internas		140.21
Error Finger Print [%] Superficiales		329.38
Corona		396.12

Cuadro 4.5: Parámetros PRPD Molino 2.

PSA

En la Figura 4.8 se muestra el PSA obtenido para el **Molino 2** en el ensayo del 2021 junto con su análisis estadístico.

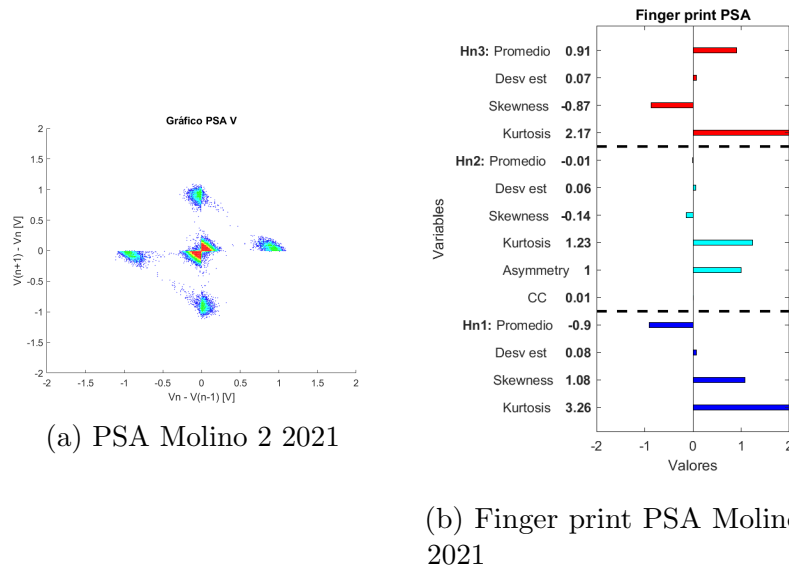


Figura 4.8: PSA y Finger Print PSA de las descargas medidas en el **Molino 2**.

El PSA de la Figura 4.8, a diferencia del PRPD, indica que existen descargas superficiales, es decir, descargas en el cabezal de la bobina lo cual también es indicado. Los parámetros PSA en la Tabla 4.6 no indican gravedad.

Molino 2 PSA		2021
N° de clusters óptimo [-]		5
Distancia entre centroides prom [pu]		1.24
Distancia al centroide central prom [pu]		0.91
Datos cluster central [%]		89.85
Error Finger Print [-]	Internas	0.00
	Superficiales	0.00
	Corona	0.00
	Entre fases	0.00
	Ranura	0.00

Cuadro 4.6: Parámetros PSA Molino 2

PCP

En la Figura 4.9 se muestra el PCP obtenido para el **Molino 2** en el ensayo del 2021 junto con su análisis estadístico.

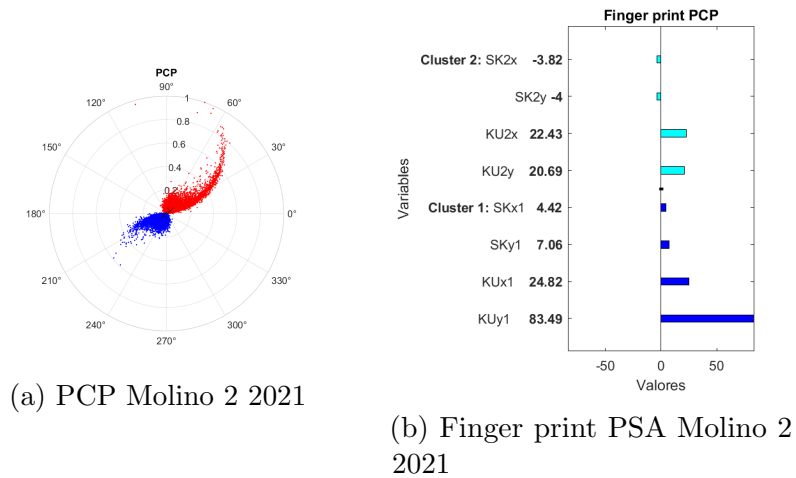


Figura 4.9: PCP y Finger print PCP de las descargas medidas en el **Molino 2**.

El patrón PCP de las descargas del Molino 2 en el año 2021, junto con los parámetros de la Tabla 4.7, indican que la mayor similitud se tiene con las descargas superficiales a pesar del patrón existente de vacuola hermética que se logra apreciar.

Molino 2 PCP		2021
A ratio 1 [-]		1.30
A ratio 2 [-]		1.28
Ángulo min-max C1 [°]		[-30 150]
Ángulo min-max C2 [°]		[150 330]
Cuartiles de ángulo C1 [°]		[21 37 53]
Cuartiles de ángulo C2 [°]		[199 216 232]
Cuartiles de amplitud C1 [pu]		[0.01 0.02 0.04]
Cuartiles de amplitud C2 [pu]		[0.00 0.01 0.03]
Error Finger Print [%]	Internas	74.71
	Superficiales	60.02
	Corona	92.26

Cuadro 4.7: Parámetros PCP Molino 2

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.8 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante los análisis PRPD, PSA y PCP para el **Molino 2**.

	2021
PRPD	Descargas internas
PSA	Descargas superficiales
PCP	Descargas superficiales

Cuadro 4.8: Comparación de métodos de análisis **Molino 2**

4.3. Molino 3

El aislamiento del estator presentó un nivel bajo de descargas parciales hasta el año **2020**, estando cubierto por el ruido electromagnético que estuvo presente en la medición.

PRPD

En la Figura 4.10 se muestra los PRPD obtenidos para el Molino 3 en cada ensayo.

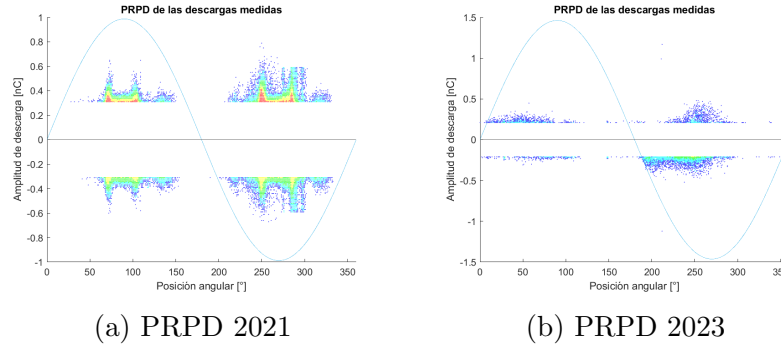
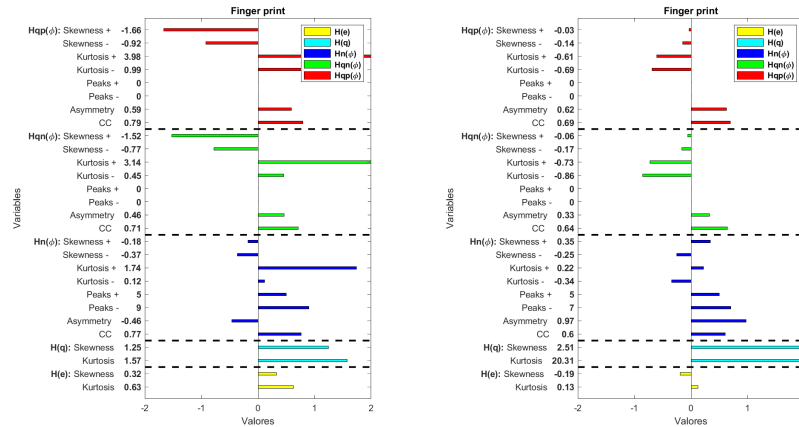


Figura 4.10: PRPD de las descargas medidas en **Molino 3**.

El patrón PRPD obtenido en el año 2021 de la Figura 4.10a muestra un patrón de descargas internas afectado por ruido electrónico, que le da una forma similar a las descargas del tipo corona. A su vez, las descargas medidas en el año 2023 indican un patrón de descargas internas tipo vacuolas distribuidas.

La Figura 4.11 muestra los análisis estadísticos para el Molino 3 en cada ensayo. Con esta información es posible obtener la similitud con las descargas aisladas para cada ensayo, las cuales se muestran en la Tabla 4.9. Este análisis indica que las descargas en el año 2021 tienen una similitud a descargas corona y las descargas medidas en el año 2023 son del tipo de descargas internas, tal como se identificó en el análisis visual.



(a) Figer Print PRPD 2021 (b) Figer Print PRPD 2023

Figura 4.11: Finger Print PRPD **Molino 3**.

Dado los patrones obtenidos (considerando que pueden estar afectados por ruido electrónico) y que los parámetros de la Tabla 4.9, como la descarga máxima y la descarga media para ambos ensayos, son muy bajos (además de presentar una disminución del año 2021 al 2023), se concluye que el aislamiento está en un muy buen estado general.

Molino 3	2021	2023
Corriente de descarga promedio [uA]	0.47	0.03
Razón cuadrática [pC ² /s]	0.0002	0
Potencia de descarga [mW]	0.15	0.03
Razón de repetición [-/s]	1317	109
Descarga máxima [nC]	0.66	0.51
Descarga media [nC]	0.35	0.24
Internas	123.01	90.62
Error Finger Print [%] Superficiales	143.71	126.36
Corona	114.11	133.29

Cuadro 4.9: Parámetros PRPD **Molino 3**

PSA

En la Figura 4.12 se muestran los PSA obtenidos para el **Molino 3** en cada ensayo.

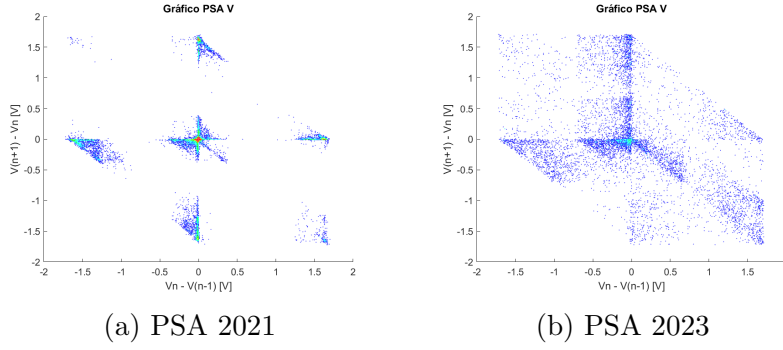


Figura 4.12: PSA de descargas medidas en **Molino 3**.

El patrón PSA del año 2021 tiene una similitud con un patrón especial de descargas corona que aparece al utilizar grandes tensiones de ensayo [18], por lo que es probable que exista un grado de descargas corona a pesar del ruido electrónico presente en la medición. Sin embargo, sigue siendo más probable que solo sean descargas del tipo descargas internas, debido al patrón de descargas que aparece en el año 2023, que tiende a parecerse más al patrón de descargas internas.

A partir del análisis estadístico con los *Fingerprints* de la Figura 4.13, en conjunto con los parámetros de la Tabla 4.10, se obtiene que el patrón PSA del año 2021 tiene una mayor similitud con las descargas internas y el PSA del año 2023 tiene una mayor similitud con las descargas internas.

Se observa del análisis estadístico de la Figura 4.13 cómo los parámetros que indican gravedad, como la kurtosis y el porcentaje de datos en el cluster central, disminuyen, lo que indica una mejora en el estado del aislamiento a través de los años.

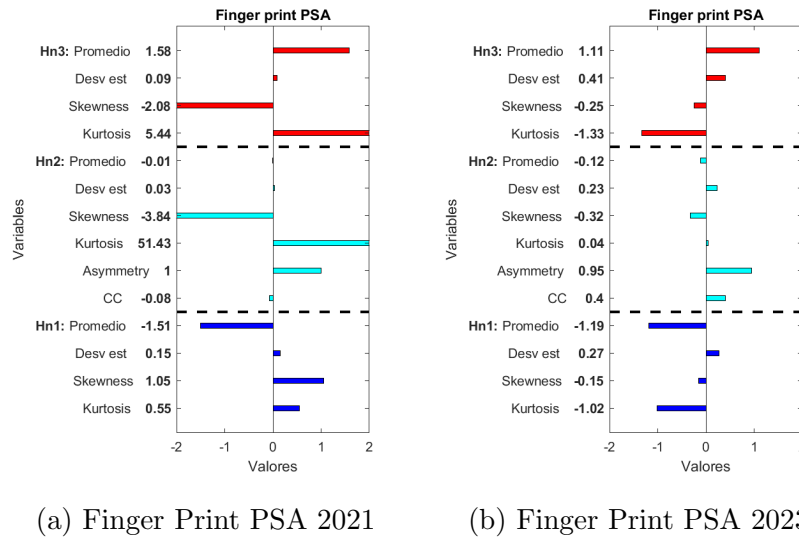


Figura 4.13: Finger Print PSA **Molino 3**.

Molino 3 PSA		2021	2023
N° de clusters óptimo [-]		7	7
Distancia entre centroides prom [pu]		2.37	1.82
Distancia al centroide central prom [pu]		1.75	1.35
Datos cluster central [%]		89.4	42.14
Error Finger Print [-]	Internas	0.00	100.00
	Superficiales	0.00	0.00
	Corona	100.00	0.00
	Entre fases	0.00	0.00
	Ranura	0.00	0.00

Cuadro 4.10: Parámetros PSA **Molino 3**.

PCP

En la Figura 4.14 se muestran los PCP obtenidos para el **Molino 3** en cada ensayo.

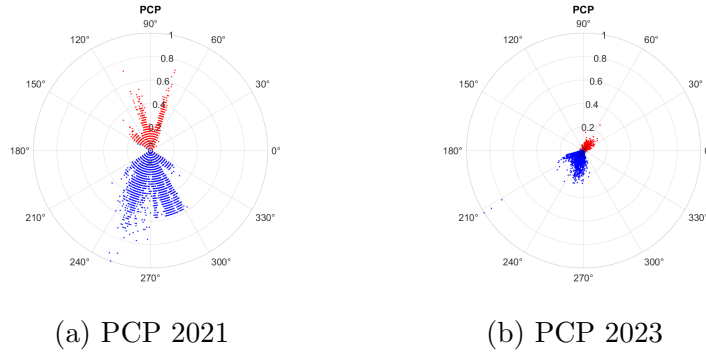


Figura 4.14: PCP de descargas medidas en **Molino 3**.

A partir de los *Finger prints* de la Figura 4.15 y los parámetros de la Tabla 4.11, se obtiene que el patrón PCP del año 2021 tiene una mayor similitud con las descargas internas, a diferencia del patrón del año 2023 que presenta una similitud con descargas superficiales.

Los cuartiles de la Tabla 4.11 del año 2023 presentan una disminución en sus valores con respecto al año 2021 y los ratios un aumento, lo que puede indicar una mejora del aislamiento.

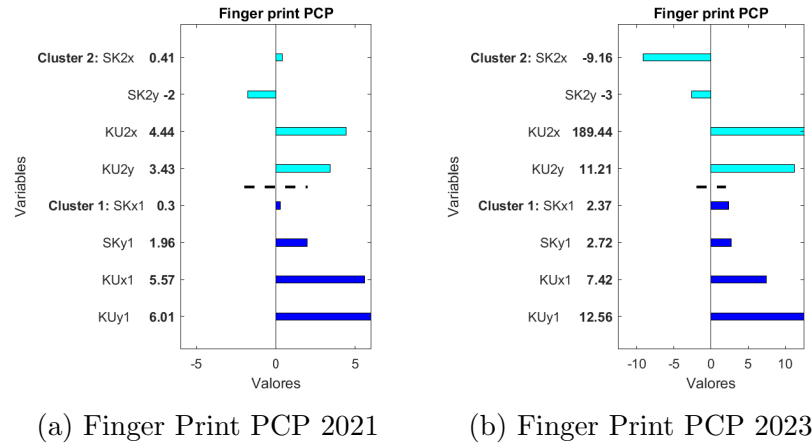


Figura 4.15: Finger Print PCP **Molino 3**.

Molino 3 PCP	2021	2023
Cossim [-]	-1	-1
A ratio 1 [-]	1.50	2.00
A ratio 2 [-]	1.75	2.50
Ángulo min-max C1 [°] [-]	[-30 150]	[-29 149]
Ángulo min-max C2 [°] [-]	[150 330]	[152 317]
Cuartiles de ángulo C1 [-]	[73 86 101]	[34 52 75]
Cuartiles de ángulo C2 [-]	[251 265 284]	[221 242 253]
Cuartiles de amplitud C1 [-]	[0.02 0.04 0.08]	[0.00 0.01 0.02]
Cuartiles de amplitud C2 [-]	[0.02 0.06 0.14]	[0.00 0.02 0.05]
Internas	78.44	69.43
Error Finger Print [%] Superficiales	126.23	50.12
Corona	119.46	81.77

Cuadro 4.11: Parámetros PCP **Molino 3**

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.12 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante los análisis PRPD, PSA y PCP para el **Molino 3**.

	2020	2022
PRPD	Descargas internas	Descargas internas
PSA	Descargas corona	Descargas internas
PCP	Descargas internas	Descargas superficiales

Cuadro 4.12: Comparación de métodos de análisis **Molino 3**

4.4. Molino 4

PRPD

En la Figura 4.16 se muestran los PRPD obtenidos para el **Molino 4** en cada ensayo.

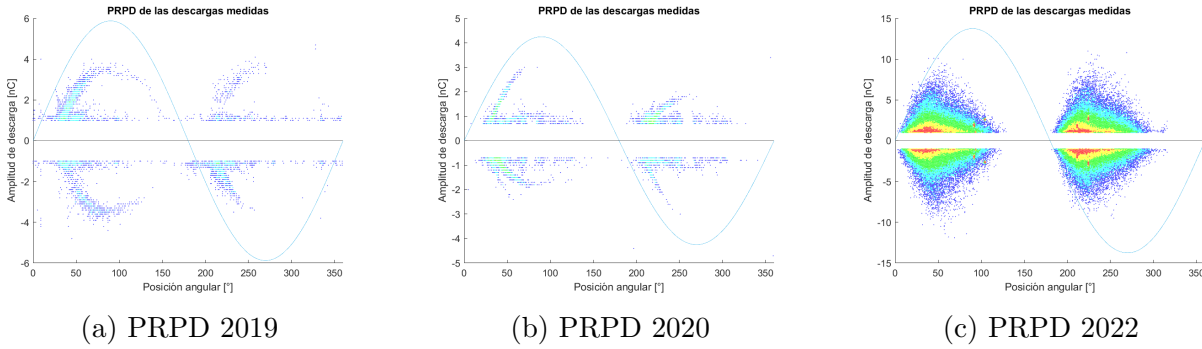


Figura 4.16: PRPD de las descargas medidas en **Molino 4**

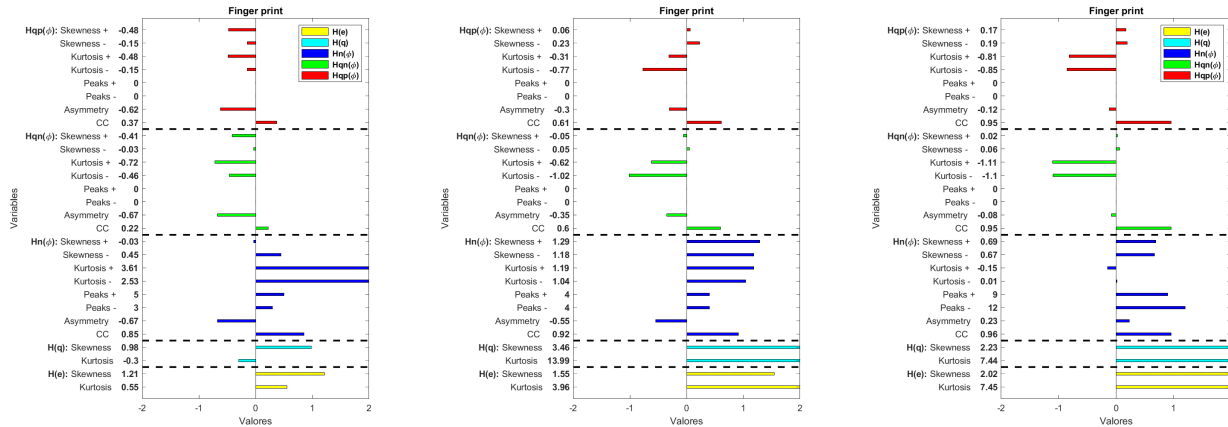
El PRPD obtenido en el año 2019, mostrado en la Figura 4.16a, muestra un patrón típico de descargas internas de vacuolas herméticas grandes. Se puede observar, además, una leve actividad de corona en aire en este patrón.

Durante el año 2020, se obtuvo el patrón de PRPD mostrado en la Figura 4.16b. Este patrón, al igual que el del año anterior, corresponde a descargas internas debido a vacuolas. También se observa en menor nivel descargas del tipo corona.

Finalmente, en las descargas medidas en el año 2022, se obtuvo un patrón de descargas internas correspondiente a delaminación en conjunto con descargas superficiales.

Mediante el análisis estadístico de cada ensayo de la Figura 4.17, es posible caracterizar las descargas de cada año. Con este análisis, se obtiene que en los años 2019 y 2020 se tiene un patrón de descargas internas, tal como se muestra en la Tabla 4.13. Además, este análisis estadístico muestra que el patrón de descargas del año 2022 es similar al de descargas superficiales.

Capítulo 4. Resultados



(a) Finger Print PRPD 2019

(b) Finger Print PRPD 2020

(c) Finger Print PRPD 2022

Figura 4.17: Finger Print PRPD Molino 4

En la tabla 4.13 se observa que durante los años 2019 y 2020 las descargas son similares y muy leves en repetición, magnitud media, magnitud máxima y corriente de descarga, lo que indica un buen estado general del aislamiento hasta ese momento. Sin embargo, en la medición del año 2022 existe un incremento considerable de estos parámetros. A pesar de esto, los valores siguen estando dentro de valores aceptables para un aislamiento sano.

Molino 4	2019	2020	2022
Corriente de descarga promedio [uA]	0.15	0.11	9.25
Razón cuadrática [pC ² /s]	0.0003	0.0001	0.0218
Potencia de descarga [mW]	0.03	0.04	1.1
Razón de repetición [-/s]	84	103	4893
Descarga máxima [nC]	4.7	9.90	11.90
Descarga media [nC]	1.76	1.03	1.89
Internas	152.84	122.35	553.87
Error Finger Print [%] Superficiales	212.54	136.36	158.88
Corona	222.74	144.34	215.51

Cuadro 4.13: Parámetros PRPD Molino 4

PSA

En la Figura 4.18 se muestran los PSA obtenidos para el Molino 4 en cada ensayo.

Capítulo 4. Resultados

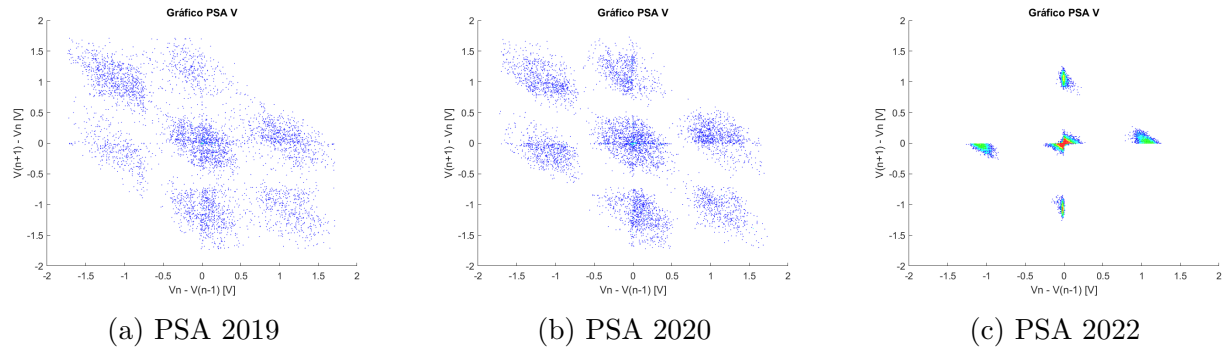


Figura 4.18: PSA de descargas medidas en **Molino 4**

Los patrones PSA de los años 2019 y 2020 indican un patrón típico de descargas internas, sin embargo, durante el año 2022 surge el patrón de descargas superficiales que predomina sobre las descargas de los años anteriores.

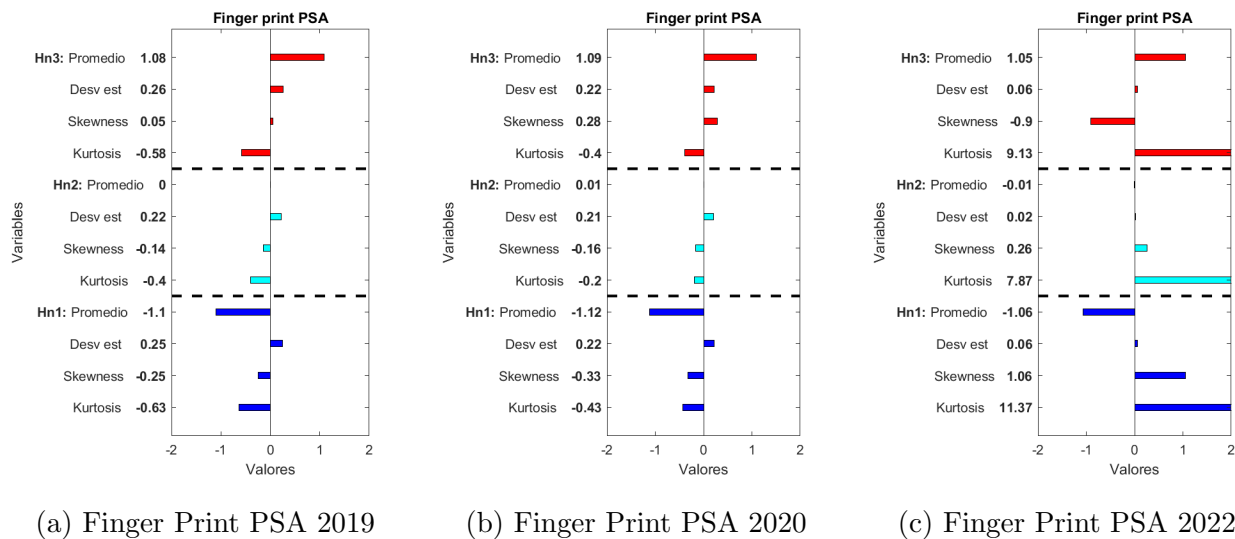


Figura 4.19: Finger Print PSA **Molino 4**

A partir de los *Finger prints* PSA de la Figura 4.19 y de los parámetros de la Tabla 4.14, se observa que los momentos estadísticos de las mediciones del año 2019 y 2020 son prácticamente idénticos, lo que indica que no hubo un cambio significativo en las descargas parciales de un año a otro. Durante el año 2022, se observa un gran cambio en estos momentos, presentando un aumento en la kurtosis y el porcentaje de datos en el cluster central, así como una disminución en parámetros como la distancia entre clusters y la desviación estándar. Esto es resultado del cambio en el tipo de descarga predominante en el patrón PSA y el empeoramiento del estado del aislamiento.

Molino 4 PSA		2019	2020	2022
N° clusters [-]		7	7	5
Distancia entre centroides prom [pu]		1.70	1.70	1.44
Distancia al centroide central prom [pu]		1.26	1.26	1.06
Datos en cluster central [%]		25.83	25.55	95.94
Error Finger Print [-]	Internas	100.00	100.00	0.00
	Superficiales	0.00	0.00	100.00
	Corona	0.00	0.00	0.00
	Entre fases	0.00	0.00	0.00
	Ranura	0.00	0.00	0.00

Cuadro 4.14: Parámetros PSA **Molino 4**

PCP

En la Figura 4.20 se muestran el patrón PCP las descargas medidas en el **Molino 4**.

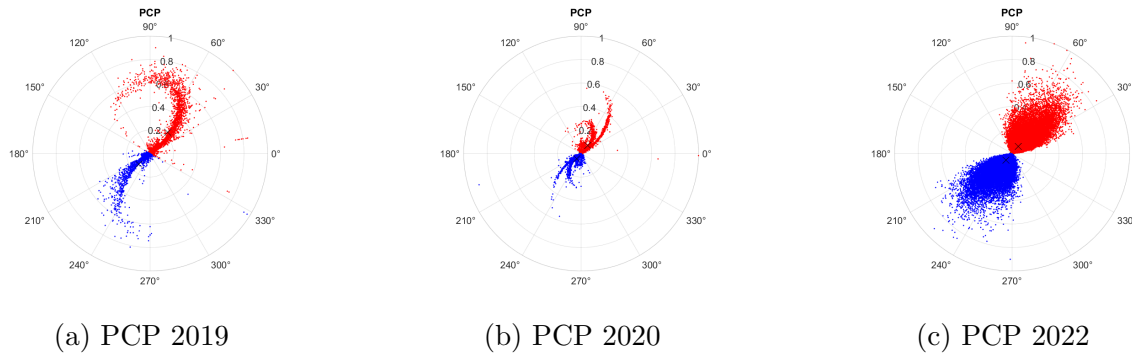


Figura 4.20: PCP de las descargas medias en **Molino 4**.

El patrón PCP del año 2019 tiene la característica particular de las descargas internas de vacuolas herméticas grandes. El patrón PCP del año 2020 se ve alterado por algunas pocas descargas de gran amplitud, aunque se logra apreciar la forma de descargas internas por vacuolas. El PCP de las descargas del año 2022 es un patrón característico de descargas superficiales.

Mediante los momentos estadísticos de la Figura 4.21 y los parámetros PCP de la Tabla 4.15, se obtiene la caracterización de las descargas, la cual indica que el patrón del año 2019 corresponde a descargas internas, pero los patrones del año 2020 y 2022 corresponden a descargas superficiales. La caracterización del año 2022 pudo haberse visto alterada por las pocas descargas de gran amplitud mencionadas anteriormente.

Capítulo 4. Resultados

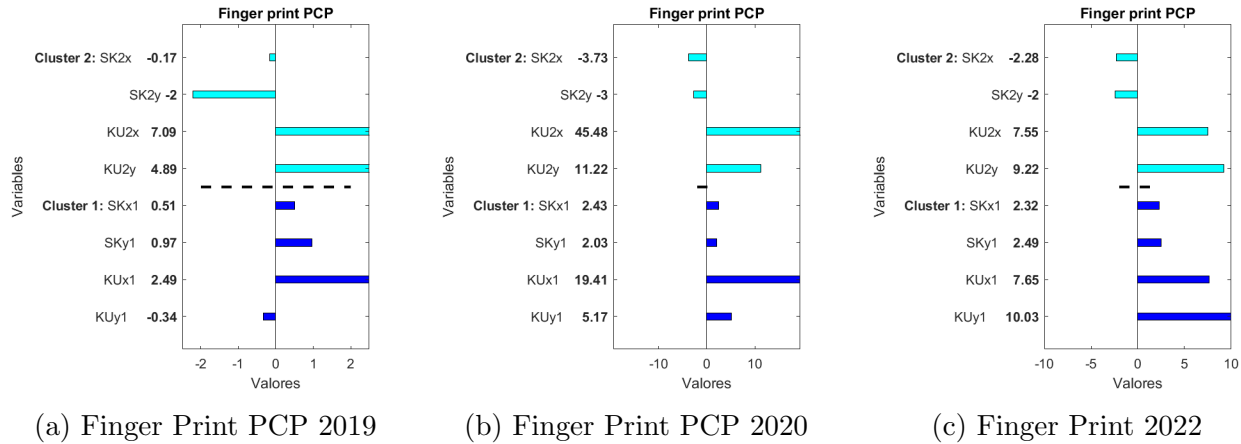


Figura 4.21: Finger Print PCP **Molino 4**.

De la Tabla 4.15 se obtiene que el principal parámetro que parece indicar deterioro del aislamiento son los ratios, que se ven disminuidos a medida que se realizan las mediciones cada año. Los cambios en los demás parámetros son propios de un cambio de patrón de descargas internas a descargas superficiales.

Molino 4 PCP	2019	2020	2022
Cosim [-]	-0.99	-1	-1
A ratio 1 [-]	2.57	1.53	1.04
A ratio 2 [-]	2.21	1.65	1.02
Ángulo min-max C1 [°]	[-29 148]	[-19 148]	[3 129]
Ángulo min-max C2 [°]	[151 329]	[167 328]	[181 316]
Cuartiles de ángulo C1 [°]	[38 48 61]	[37 43 56]	[33 45 63]
Cuartiles de ángulo C2 [°]	[213 221 233]	[216 222 236]	[213 224 239]
Cuartiles de amplitud C1 [-]	[0.03 0.14 0.43]	[0.01 0.02 0.05]	[0.02 0.05 0.11]
Cuartiles de amplitud C2 [-]	[0.02 0.06 0.19]	[0.01 0.01 0.03]	[0.02 0.05 0.11]
Internas	117.64	62.84	70.1
Error Finger Print [%] Superficiales	244.4	42.43	33.92
Corona	185.21	85.45	97.36

Cuadro 4.15: Parámetros PCP **Molino 4**

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.16 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante los análisis PRPD, PSA y PCP para el **Molino 4**.

	2019	2020	2022
PRPD	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas
	Descargas corona	Descargas corona	Descargas superficiales
PSA	Descargas internas	Descargas internas	Descargas superficiales
PCP	Descargas internas	Descargas superficiales	Descargas superficiales

Cuadro 4.16: Comparación de métodos de análisis **Molino 4**.

4.5. Molino 5

El aislamiento del estator del Molino 5 presentó un nivel bajo de descargas parciales durante los últimos años (**2020, 2021, 2023**), estando cubierto por el ruido electromagnético que estuvo presente en todas las mediciones.

En base a las mediciones dieléctricas realizadas y a la variación histórica de los parámetros, se concluye que **el motor se encuentra en un estado estable y confiable para operación estacionaria**.

4.6. Molino 6

El aislamiento del estator presentó un nivel bajo de descargas parciales hasta el año **2020**, estando cubierto por el ruido electromagnético que estuvo presente en la medición.

PRPD

En la Figura 4.22 se muestran los PRPD obtenidos para las tres fases del **Molino 6**.

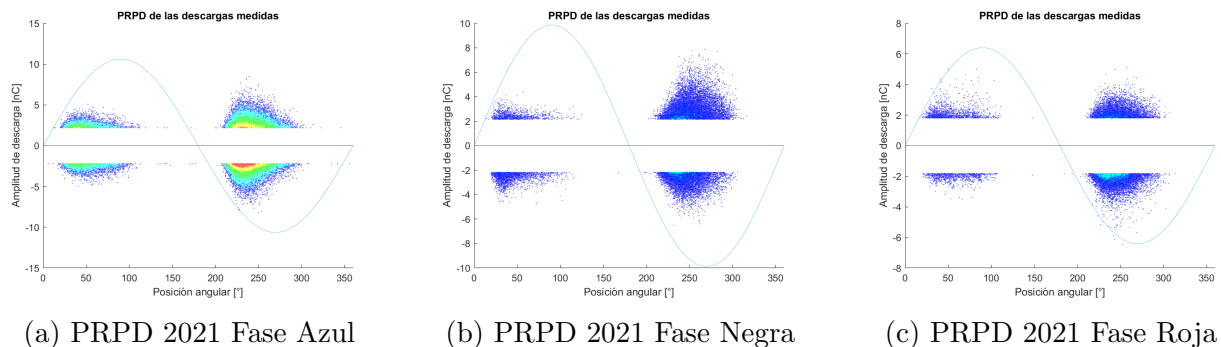
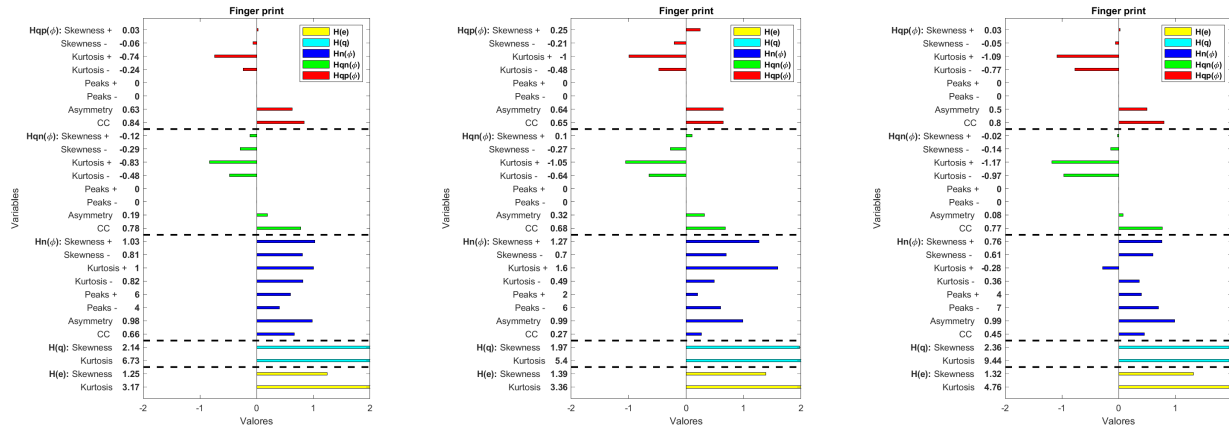


Figura 4.22: PRPD de las descargas medidas en **Molino 6**.

El patrón de descargas parciales PRPD en las tres fases para el año 2021 tiene un notorio predominio en el tercer cuadrante, además de una forma casi triangular en este tercer cuadrante. Por lo tanto, se concluye que el patrón de descargas corresponde al de descargas de ranura. A partir del análisis estadístico de la Figura 4.23 y los valores presentados en la Tabla 4.17, se indica que la mayor similitud se encuentra con las descargas superficiales para las tres fases. Sin embargo, este resultado se debe a la falta de un registro de datos de descargas de ranura, por lo que se indica el tipo de descarga aislada que presenta mayor similitud con el patrón de descargas de ranura.

Capítulo 4. Resultados



(a) Finger Print PRPD 2021 Fase azul (b) Finger Print PRPD 2021 Fase negra (c) Finger Print PRPD 2021 Fase roja

Figura 4.23: Finger Print PRPD Molino 6.

Los valores mostrados en la Tabla 4.17 de corriente de descarga, razón de repetición, descarga máxima y media son relativamente bajos (siendo la fase azul la que presenta mayores valores de descarga, pero aún así son bajos). Por lo tanto, se concluye que el aislamiento se encuentra en un estado estable y confiable.

Molino 6	2021		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
Corriente de descarga promedio [uA]	3.33	1.44	0.86
Razón cuadrática [pC ² /s]	0.0095	0.0042	0.0019
Potencia de descarga [mW]	1.44	1.02	0.68
Razón de repetición [-/s]	1220	514	396
Descarga máxima [nC]	8.20	6.53	6.47
Descarga media [nC]	2.73	2.80	2.17
Internas	118.10	73.2	157.86
Error Finger Print [%] Superficiales	111.31	57.51	148.18
Corona	124.65	91.25	164.26

Cuadro 4.17: Parámetros PRPD Molino 6.

PSA

En la Figura 4.24 se muestran los PSA obtenidos para las tres fases del Molino 6.

Capítulo 4. Resultados

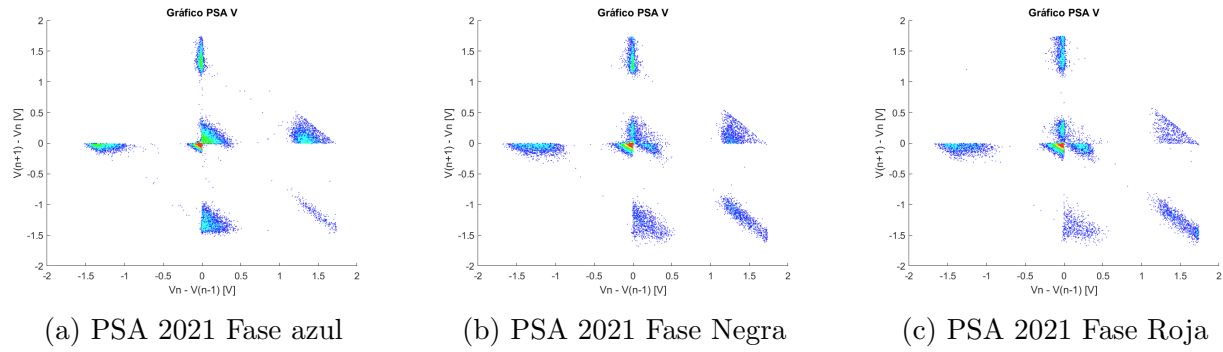


Figura 4.24: PSA de las descargas medidas en el **Molino 6**.

Los patrones PSA observados en las tres fases presentan una gran similitud con el patrón de descargas de ranura presentado en la Sección 1.6.7.

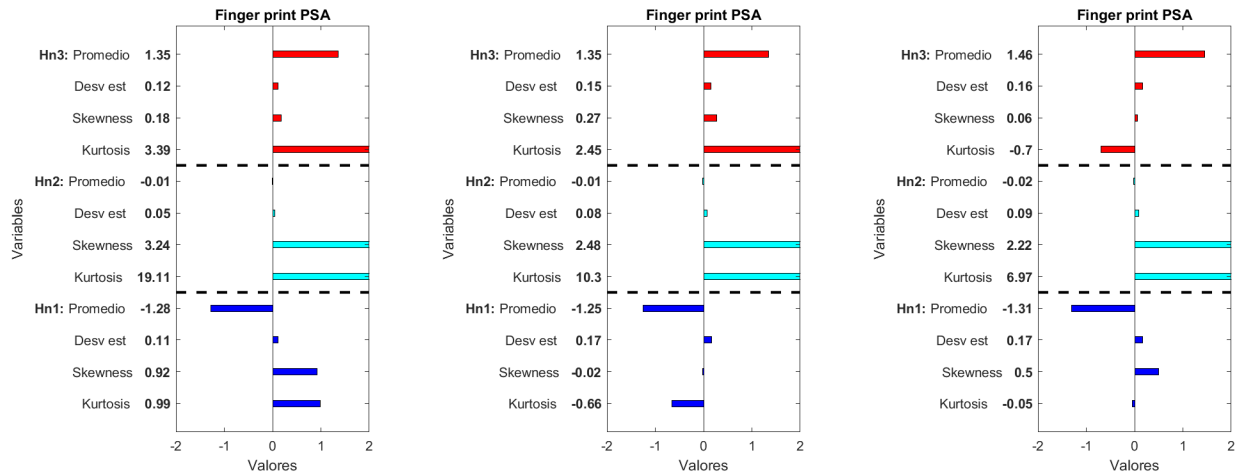


Figura 4.25: Finger Print PSA **Molino 6**.

Al comparar los valores de la Tabla 4.18, se observa que los patrones PSA de las descargas para las tres fases son muy similares, aunque el patrón de la Fase Azul destaca por un mayor número de datos en el cluster central, menor desviación estándar y mayor kurtosis en todos los clusters (H1, H2 y H3), lo que estaría directamente relacionado con la gravedad de las descargas.

Molino 6 PSA		2021		
		Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
N° de clusters [-]		6	6	6
Distancia entre centroides prom [pu]		1.90	1.87	1.99
Distancia al centroide central prom [pu]		1.79	1.78	2.18
Datos en cluster central [%]		84.4	74.54	75.63
Error Finger Print [-]	Internas	0.00	0.00	0.00
	Superficiales	0.00	0.00	0.00
	Corona	0.00	0.00	0.00
	Entre fases	0.00	0.00	0.00
	Ranura	100.00	100.0	100.00

Cuadro 4.18: Parámetros PSA **Molino 6**.

PCP

En la Figura 4.26 se muestran los PCP obtenidos para las tres fases del **Molino 6**.

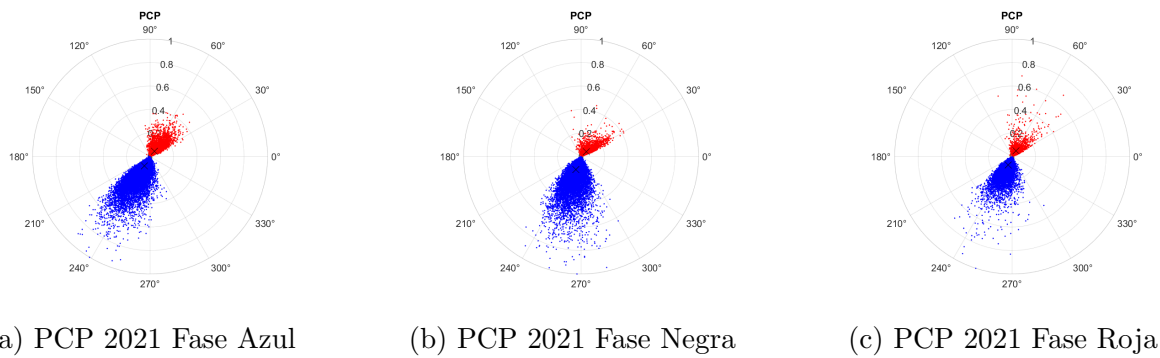
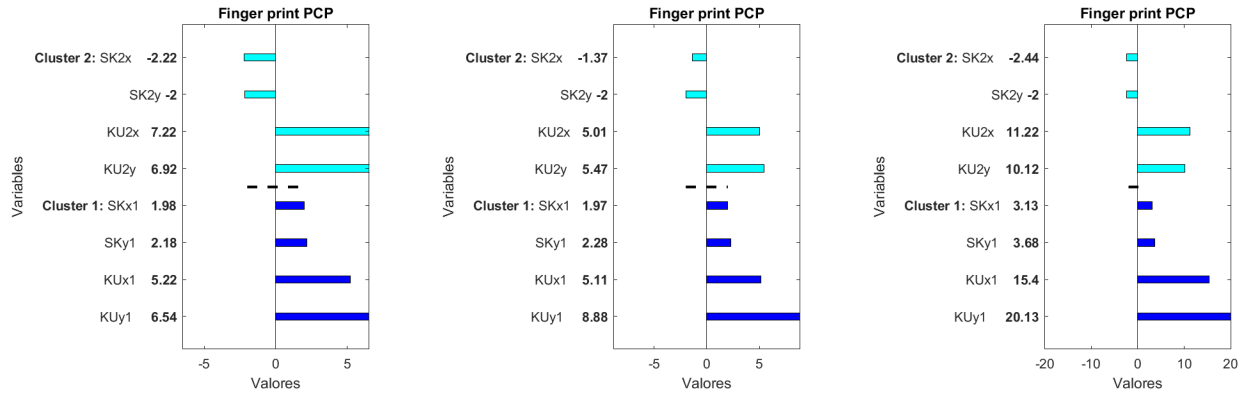


Figura 4.26: PCP de las descargas medidas en **Molino 6**.

Los patrones PCP de las descargas para las tres fases de la Figura 4.26 tienen características de descargas superficiales y son muy similares entre sí. La Tabla 4.19 muestra la similitud obtenida con las descargas a partir del análisis estadístico de los parámetros de la Figura 4.27. Este análisis indica que la mayor similitud es con las descargas superficiales. Es destacable los bajos errores que se tienen al comparar las descargas.

Capítulo 4. Resultados



(a) Finger Print PCP 2021 Fase Azul (b) Finger Print PCP 2021 Fase Negra (c) Finger Print PCP 2021 Fase Roja

Figura 4.27: Finger Print PCP de las descargas medidas en **Molino 6**.

Los momentos estadísticos de la Figura 4.27 y los parámetros de la Tabla 4.19 no muestran indicadores que señalen una mayor gravedad en una medición sobre otra.

Molino 6 PCP	2021		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
Cosim [-]	-0.99	-0.92	-0.99
A ratio 1 [-]	1.60	1.96	1.56
A ratio 2 [-]	1.61	2.00	1.46
Angulo min-max C1 [°]	[-25 148]	[14 125]	[17 148]
Angulo min-max C2 [°]	[171 323]	[168 317]	[185 314]
Cuartiles de ángulo C1 [°]	[37 46 59]	[32 39 52]	[39 50 70]
Cuartiles de ángulo C2 [°]	[228 236 246]	[236 246 258]	[233 243 254]
Cuartiles de amplitud C1 [pu]	[0.02 0.04 0.08]	[0.02 0.04 0.08]	[0.01 0.03 0.08]
Cuartiles de amplitud C2 [pu]	[0.03 0.06 0.13]	[0.03 0.08 0.17]	[0.02 0.05 0.11]
Internas	63.22	66.5	69.05
Error Finger Print [%] Superficiales	27.80	27.42	47.04
Corona	87.54	87.58	90.28

Cuadro 4.19: Parámetros PCP **Molino 6**.

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.20 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante el análisis PRPD, PSA y PCP para el molino 6.

	2021		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
PRPD	Descargas de ranura	Descargas de ranura	Descargas de ranura
PSA	Descargas de ranura	Descargas de ranura	Descargas de ranura
PCP	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales

Cuadro 4.20: Comparación de métodos de análisis **Molino 6**.

4.7. Molino 7

PRPD

En la Figura 4.28 se muestran los PRPD obtenidos para las tres fases del **Molino 7**.

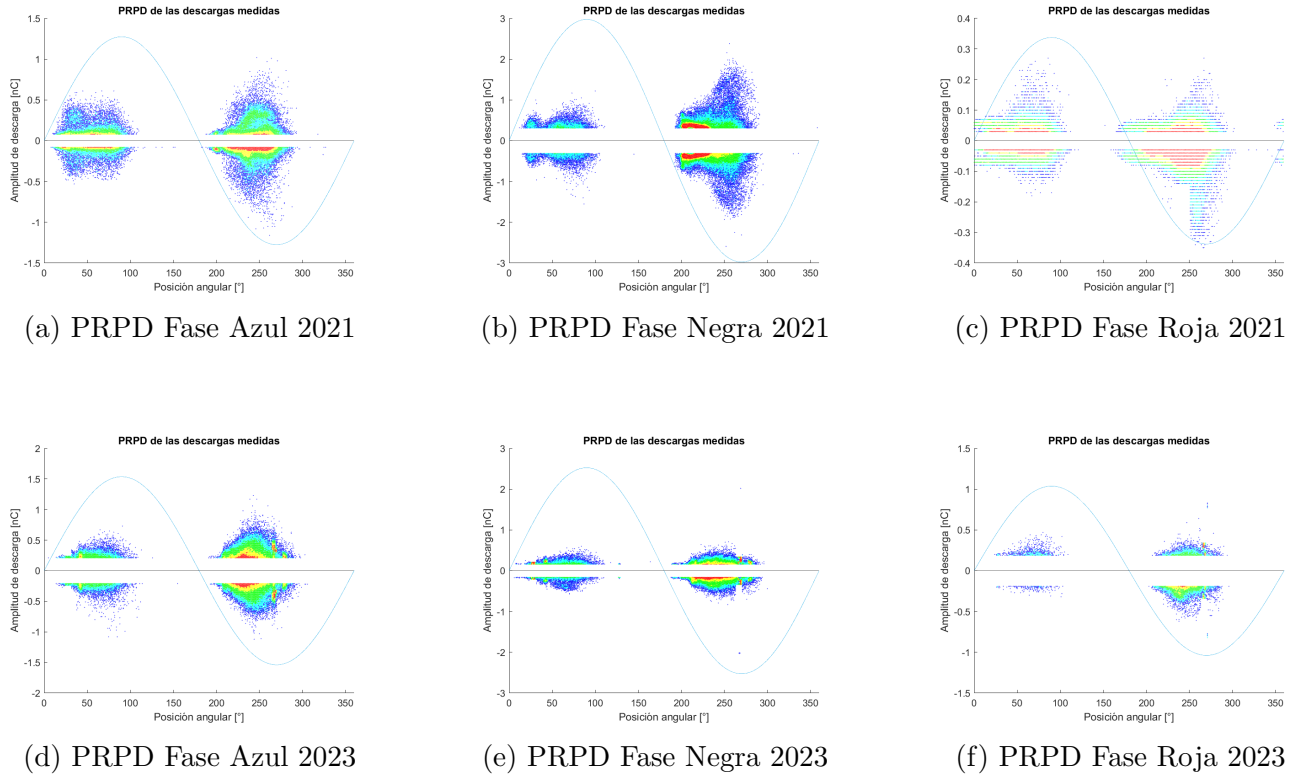


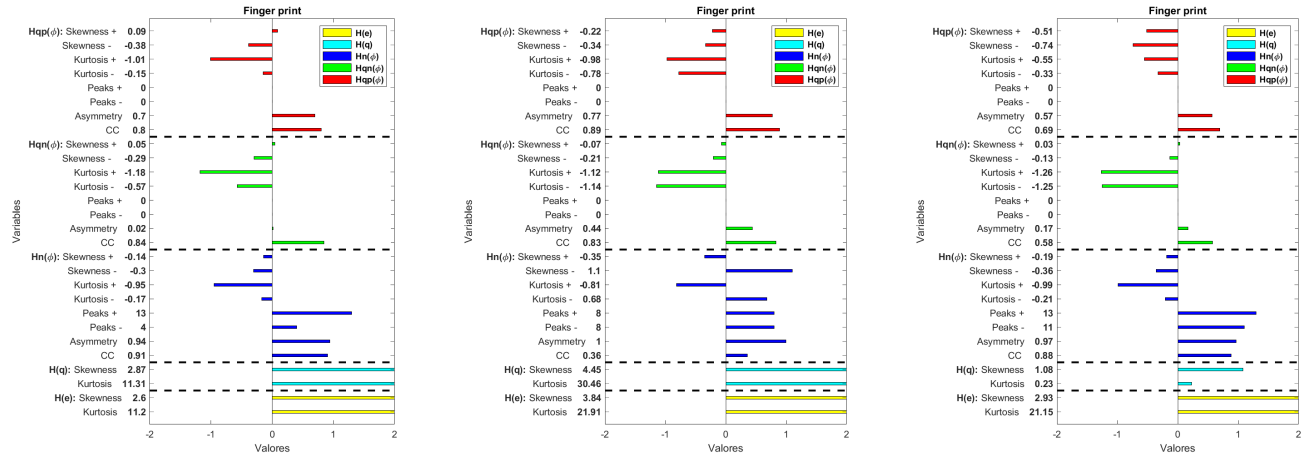
Figura 4.28: PRPD de las descargas medidas en **Molino 7**.

Las descargas parciales del Molino 7 presentaron un nivel considerable de ruido electrónico en las tres fases medidas durante ambos ensayos. Sin embargo, se logra distinguir en las descargas medidas en el año 2021 un patrón del tipo descargas internas en combinación con descargas superficiales producidas en el cabezal de la bobina.

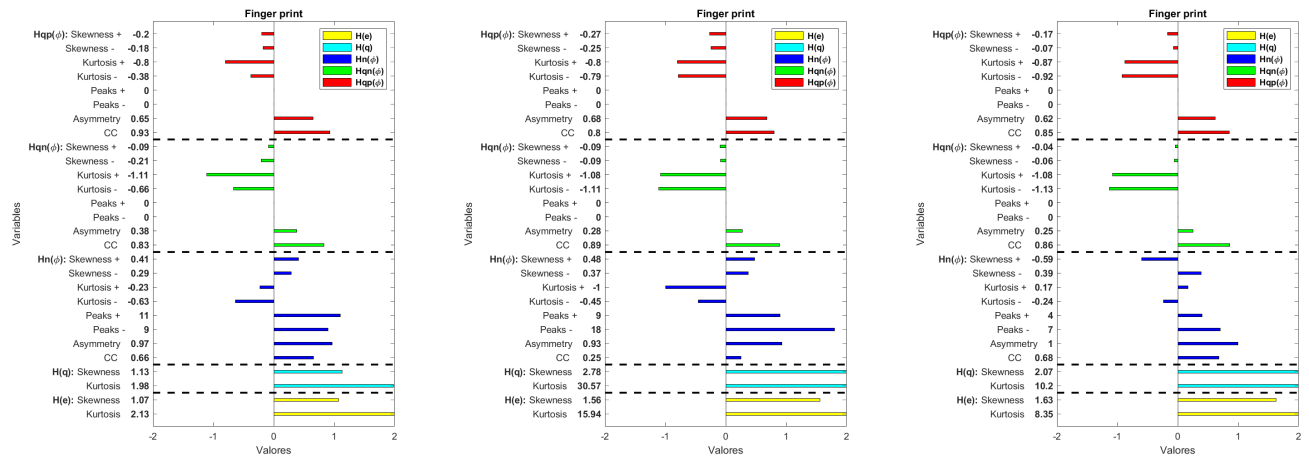
Los PRPD obtenidos de las tres fases para el año 2023 presentan el mismo patrón de descargas internas en combinación con descargas superficiales, aunque con menos ruido electrónico.

Los patrones de descargas son caracterizados a partir de los momentos estadísticos de la Figura 4.29, donde se obtienen las similitudes con las descargas aisladas que se muestran en la Tabla 4.21. Debido al ruido electrónico, se tiene una gran variabilidad en el reconocimiento de los patrones de manera estadística (aunque hay semejanza con los patrones mencionados anteriormente). Sin embargo, con el análisis visual se pueden obtener conclusiones respecto a los tipos de descargas existentes.

Capítulo 4. Resultados



(a) Finger Print PRPD Fase Azul 2021 (b) Finger Print PRPD Fase Negra 2021 (c) Finger Print PRPD Fase Roja 2021



(d) Finger Print PRPD Fase Azul 2023 (e) Finger Print PRPD Fase Negra 2023 (f) Finger Print PRPD Fase Roja 2023

Figura 4.29: Finger Print PRPD Molino 7.

De la Tabla 4.21 se obtiene que, aunque las repeticiones son relativamente elevadas (considerando que el ruido electrónico aumenta la razón de repetición), las amplitudes de las descargas y la corriente de estas son muy bajas, por lo que se puede concluir que el estado del aislamiento es estable y confiable.

Capítulo 4. Resultados

Molino 7		2021			2023		
		Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
Corriente de descarga promedio [uA]		0.30	2.26	0.16	0.74	0.48	0.09
Razón cuadrática [pC ² /s]		0.0001	0.0010	0	0.0002	0.0001	0
Potencia de descarga [mW]		0.10	0.33	0.16	0.09	0.24	0.09
Razón de repetición [-/s]		2181	5722	3801	2477	2148	395
Descarga máxima [nC]		1.15	2.58	0.34	1.11	2.02	0.61
Descarga media [nC]		0.14	0.39	0.04	0.3	0.22	0.24
Error Finger Print [%]	Internas	197.61	86.3	114.82	91.17	71.25	137.78
	Superficiales	260.28	84.56	126.99	74.42	77.49	98.71
	Corona	269.43	94.03	112.84	98.77	95.22	153.91

Cuadro 4.21: Parámetros PRPD Molino 7.

PSA

En la Figura 4.30 se muestran los PSA obtenidos para las tres fases del Molino 7.

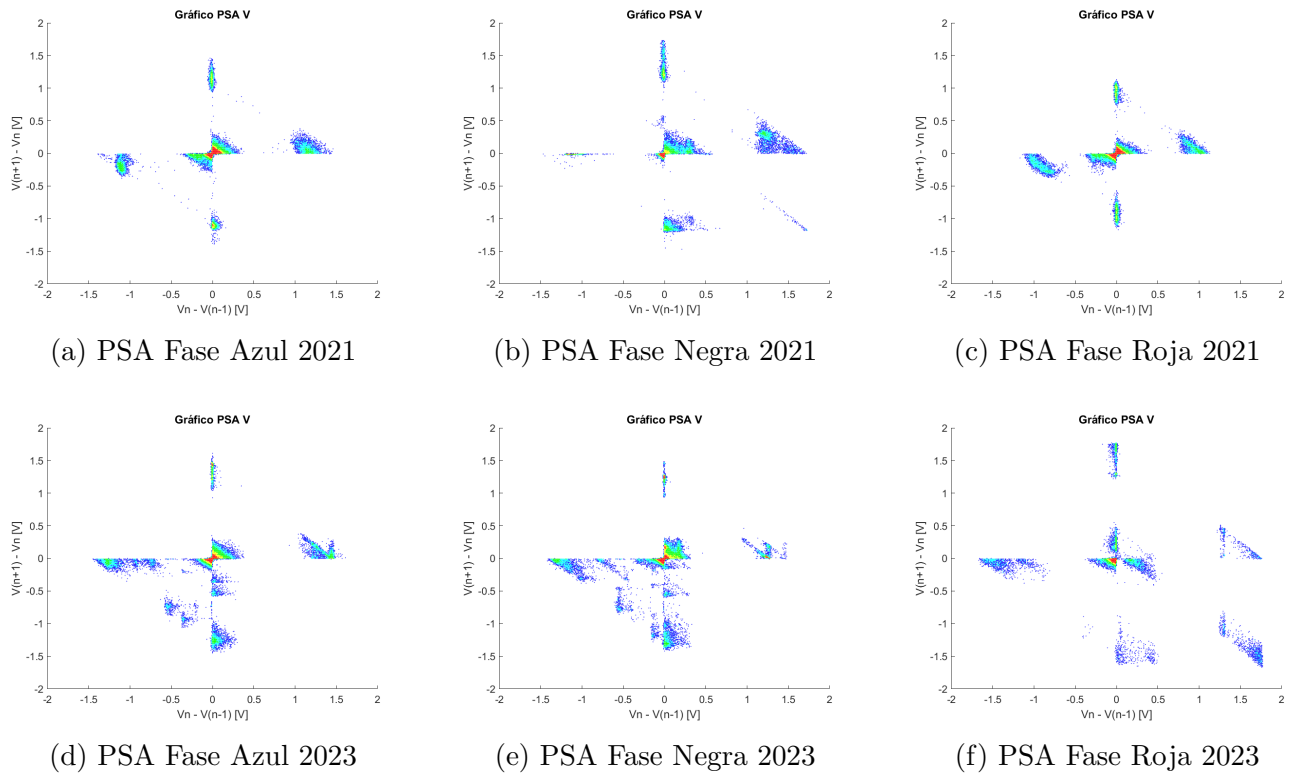


Figura 4.30: PSA de las descargas medidas en el Molino 7.

Los gráficos PSA de descargas observados de los años 2021 y 2023 muestran patrones de descargas superficiales, es decir, descargas en el cabezal de la bobina. Sin embargo, se observa que los patrones PSA se ven muy afectados por ruido electrónico (más que los patrones PRPD). Además, la Fase Negra en el año 2021 y la Fase Roja en el año 2023 parecen indicar cierto grado de descargas de ranura, aunque esto también puede ser influencia del ruido electrónico.

El análisis de momentos estadísticos de la Figura 4.31 también se ve afectado por el ruido

Capítulo 4. Resultados

electrónico, lo que puede afectar el reconocimiento de descargas de la Tabla 4.22.

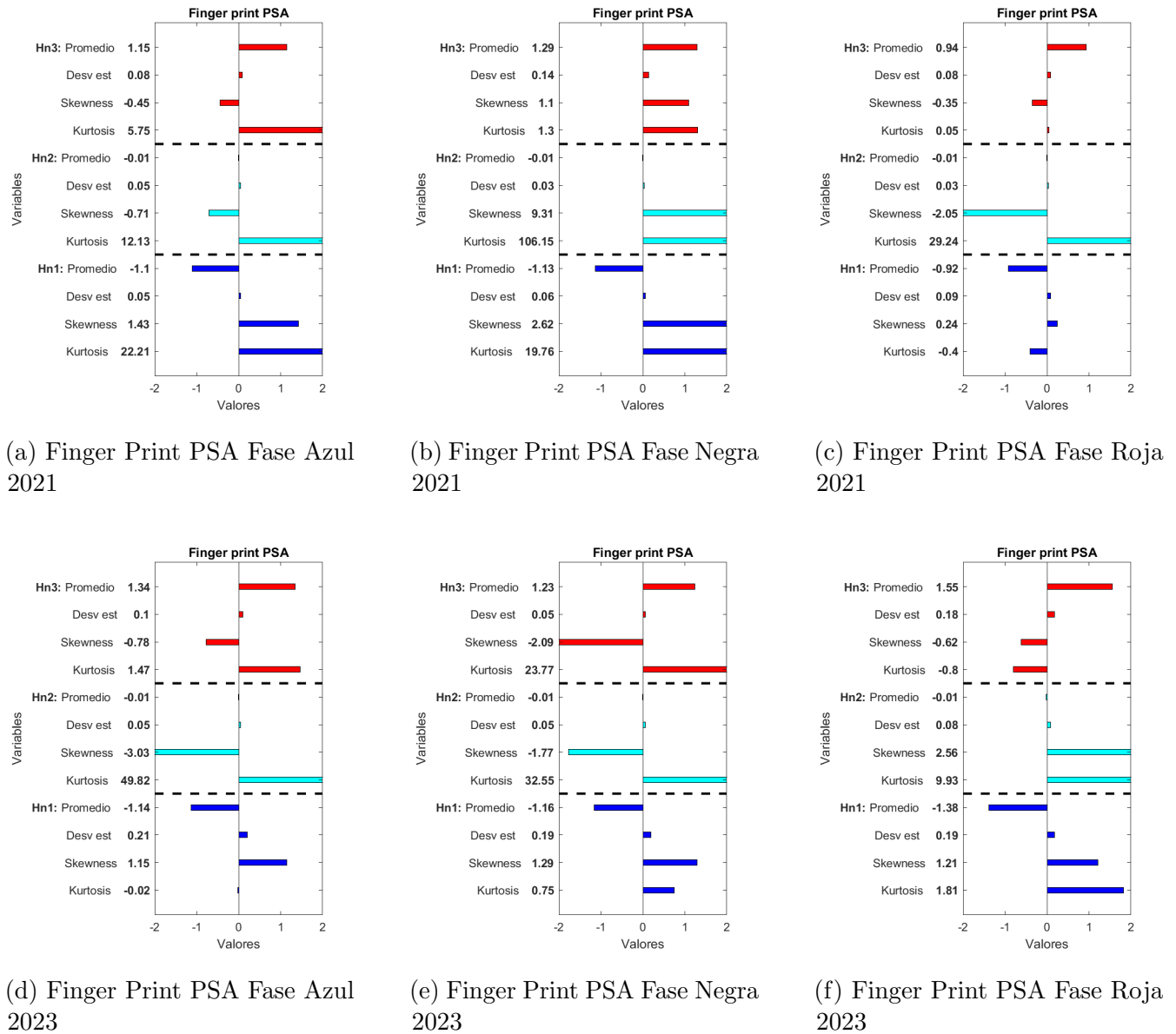


Figura 4.31: Finger Print PSA **Molino 7**.

Los parámetros de número de clusters y datos en el cluster central de la Tabla 4.22 son muy similares entre sí para todas las descargas, excepto el patrón de la Fase Roja del año 2023, que presenta un número de clusters típico de descarga de ranura y con una menor gravedad en las descargas, indicado por la poca concentración de descargas en el cluster central.

Capítulo 4. Resultados

Molino 7 PSA	2021			2023		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
N° de clusters [-]	5	5	5	5	5	6
Distancia entre centroides prom [pu]	1.54	1.66	1.27	1.70	1.64	2.11
Distancia al centroide central prom [pu]	1.13	1.21	0.93	1.25	1.20	2.33
Datos en cluster central [%]	92.14	96.71	96.20	92.35	91.62	83.98
Error Finger Print [%]	Internas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Superficiales	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
	Corona	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Entre fases	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ranura	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

Cuadro 4.22: Parámetros PSA Molino 7.

PCP

En la Figura 4.32 se muestran los PCP obtenidos para las tres fases del Molino 7.

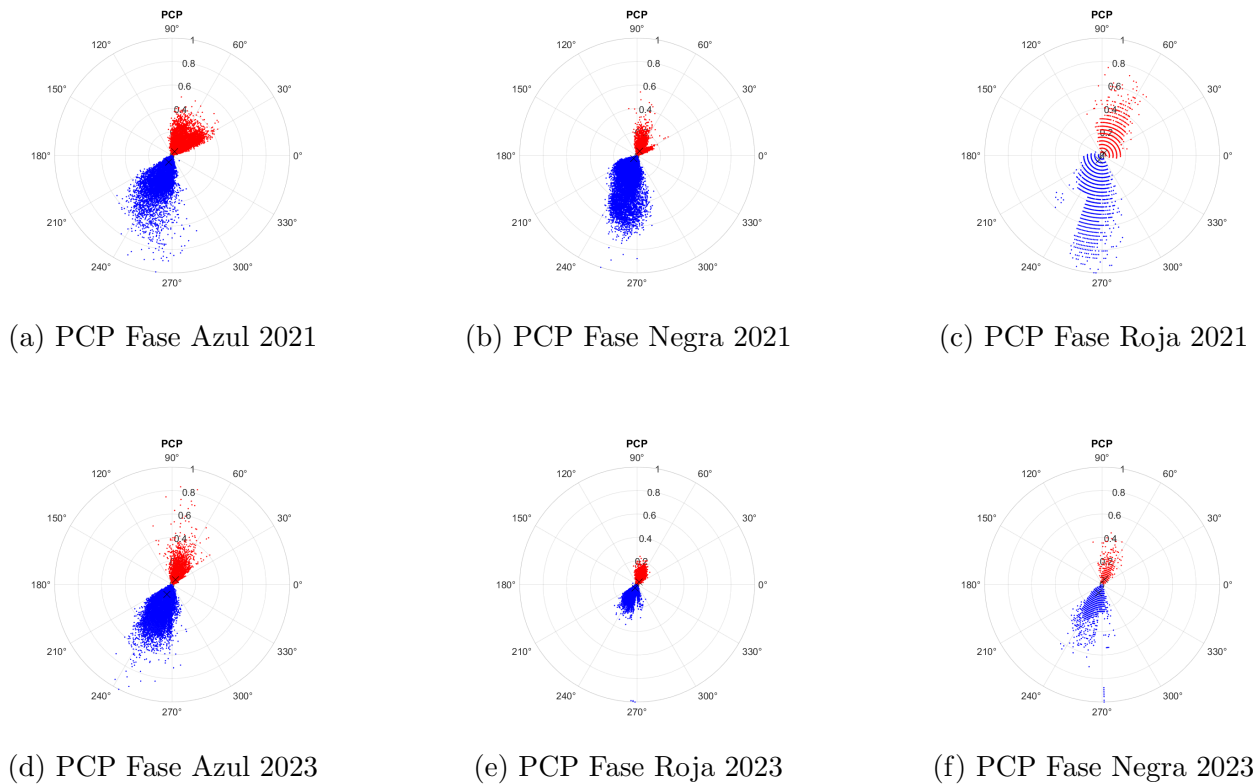


Figura 4.32: PCP de as descargas medidas en Molino 7.

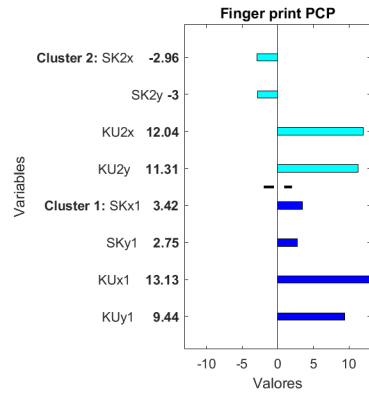
Los patrones PCP mostrados en los ensayos realizados en los años 2021 y 2023 para las tres fases son muy similares entre sí, y esto se ratifica al realizar los análisis cuantitativos de los momentos estadísticos de la Figura 4.33 y los parámetros de la Tabla 4.23, donde se obtiene que todas las descargas son similares a las descargas superficiales.

La medición que presentó más ruido electrónico no mostró un reconocimiento claro del tipo de descargas, además, el A_{ratio2} obtenido resultó infinito, lo cual indica que los parámetros PCP

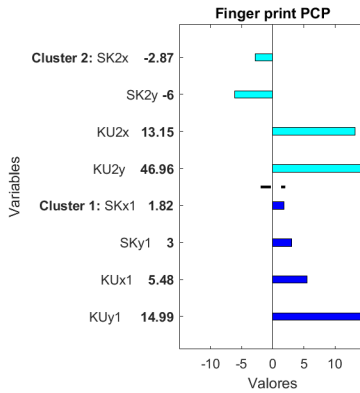
Capítulo 4. Resultados

también se ven afectados por alto ruido electrónico en la medición.

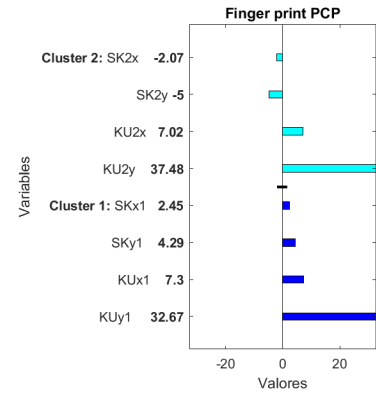
Dado que no existe un grado notable de empeoramiento del aislamiento de este molino y que las mediciones están afectadas por ruido electrónico, no se pueden obtener conclusiones relevantes respecto a la evolución de los parámetros PCP ante un eventual daño en el aislamiento.



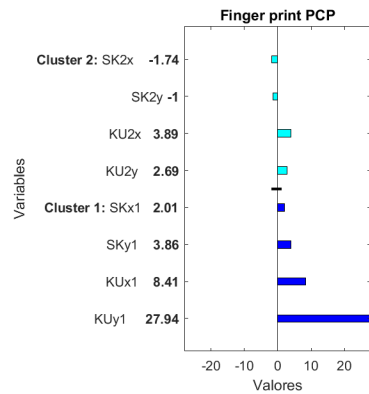
(a) Finger Print PCP Fase Azul 2021



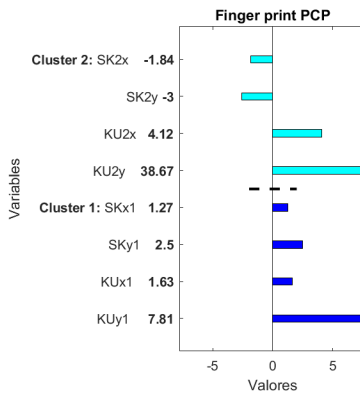
(b) Finger Print PCP Fase Negra 2021



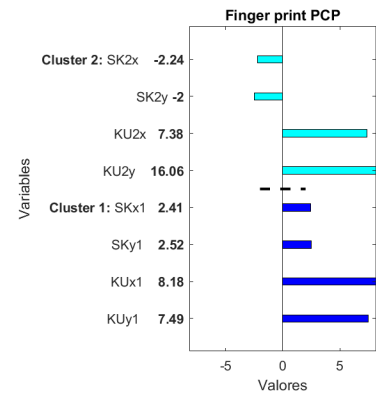
(c) Finger Print PCP Fase Roja 2021



(d) Finger Print PCP Fase Azul 2023



(e) Finger Print PCP Fase Negra 2023



(f) Finger Print PCP Fase Roja 2023

Figura 4.33: Finger Print PCP de Molino 7.

Capítulo 4. Resultados

Molino 7 PSA	2021			2023		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
Cossm [-]	-0.99	-0.95	-0.99	-0.99	-0.98	-1
A ratio 1 [-]	1.50	1.40	inf	2.33	1.67	1.50
A ratio 2 [-]	1.60	1.44	2.00	2.14	1.43	2.00
Ángulo min-max C1 [°]	[-23 140]	[-30 145]	[-21 112]	[5 126]	[6 129]	[24 128]
Ángulo min-max C2 [°]	[156 327]	[192 330]	[152 306]	166 326	[164 300]	[206 294]
Cuartiles de ángulo C1 [°]	[40 57 72]	[47 61 74]	[29 53 69]	[43 53 67]	[30 45 68]	[57 68 77]
Cuartiles de ángulo C2 [°]	[231 243 255]	[209 218 226]	[227 240 253]	[230 240 255]	[228 241 257]	[237 246 262]
Cuartiles de amplitud C1 [pu]	[0.00 0.02 0.05]	[0.01 0.03 0.06]	[0.00 0.00 0.03]	[0.01 0.03 0.07]	[0.01 0.02 0.04]	[0.00 0.03 0.06]
Cuartiles de amplitud C2 [pu]	[0.01 0.03 0.07]	[0.01 0.02 0.04]	[0.00 0.03 0.06]	[0.02 0.07 0.15]	[0.01 0.03 0.05]	[0.02 0.05 0.12]
Error Finger Print [%]	Internas	67.83	69.92	NaN	68.05	64.49
	Superficiales	46.58	47.59	NaN	40.18	45.94
	Corona	89.05	87.5	NaN	84.03	94.69
						86.92

Cuadro 4.23: Parámetros PCP Molino 7.

Comparación de métodos de análisis

En la Tabla 4.24 se muestra el resumen de los patrones identificados mediante el analisis PRPD, PSA y PCP para el Molino 7.

	2021			2023		
	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja	Fase Azul	Fase Negra	Fase Roja
PRPD	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas	Descargas internas
	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales
PSA	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas de ranura
PCP	Descargas superficiales	Descargas superficiales	NaN	Descargas superficiales	Descargas superficiales	Descargas superficiales

Cuadro 4.24: Comparación de métodos de análisis Molino 7.

4.8. Molino 8

El aislamiento del estator presentó un nivel bajo de descargas parciales durante las mediciones realizadas en los últimos años (ensayo 2022), estando cubierto por el ruido electromagnético.

En base a las mediciones dieléctricas realizadas, se concluye que el aislamiento del motor se encuentra en un estado estable y confiable para operación estacionaria.

Capítulo 5

Comentarios y Conclusiones

5.1. Comentarios

A continuación se presentan comentarios sobre las mediciones a cada molino.

- En el **Molino 1** se identificaron descargas internas de vacuolas herméticas y corona mediante el método PRPD, producto de impregnación deficiente del epoxi o envejecimiento térmico. Además, se destaca que es el molino que presenta la mayor gravedad de descargas por la alta amplitud y repetición de estas. Mediante el método de análisis PSA se identificaron descargas superficiales en el cabezal de la bobina, producto de contaminación del devanado, y se identificó un avance en gravedad a medida que se realizaban los ensayos cada año, indicado por la disminución de distancia entre clusters, aumento de datos en el cluster central y aumento de la kurtosis. Finalmente, en la medición del año 2022, se observó un posible caso de descargas entre fases o descargas superficiales altas. El patron PCP identifico descargas superficiales en todos los años, pero no se obtuvo un indicio de gravedad con este analisis. El análisis con estos métodos en conjunto con el alto nivel de descargas según el PRPD, dejan al Molino 1 en **estado de observación**.
- En el **Molino 2** se observan descargas internas de vacuolas herméticas leves, producto de impregnación deficiente del epoxi o envejecimiento térmico. El patrón PSA, al igual que el PCP, indican la existencia de descargas superficiales debido a contaminación en el devanado, lo que sugiere una combinación de ambos tipos de descargas. Dado que se realizó una sola medición, no se pudo identificar un avance en las descargas; sin embargo, por los valores presentados en el PRPD, se concluye que el aislamiento del Molino 2 se encuentra en **estado estable y confiable**.
- En el **Molino 3** se observaron patrones PRPD de descargas internas en ambas mediciones, producto de impregnación deficiente del epoxi o envejecimiento térmico. Aunque la medición

del año 2021 se vio afectada por ruido electrónico, dándole una forma de descargas corona. PSA arrojó los mismos resultados que el PRPD, ratificando la existencia de descargas producto de vacuolas. El patrón PCP indico que durante el año 2021 existieron descargas internas, pero en el año 2023 indico que existen descargas superficiales lo cual es poco probable al observar los patrones PRPD. Por el bajo nivel de descargas y el tipo de estas, se concluye que el aislamiento del Molino 3 está en **estado estable y confiable**.

- En el **Molino 4** se identificaron descargas internas de vacuolas herméticas grandes en los PRPD de los años 2019 y 2020, resultado de impregnación deficiente del epoxi o envejecimiento. Durante el año 2022, se observaron descargas internas por delaminación y descargas superficiales. Los patrones PSA de los años 2019 y 2020 indicaron descargas internas, al igual que el PRPD. Sin embargo, el patrón PSA indicó que las descargas del año 2022 son descargas superficiales debido a contaminación en el cabezal del devanado, lo que sugiere una combinación de descargas internas y superficiales. El patrón PCP indicó que durante el año 2019 existieron descargas internas pero en los siguientes años descargas superficiales, a su vez los parámetros PCP no indicaron algún grado de gravedad. Dado los bajos valores de descargas parciales, se concluye que hasta la última medición realizada, el Molino 4 se encuentra en **estado estable y confiable**.
- El **Molino 5** presentó descargas muy leves, tanto que no pudieron ser registradas por estar cubiertas por ruido eléctrico. Por ello, se concluye que el aislamiento del Molino 5 se encuentra en **estado estable y confiable** hasta la fecha de la última medición.
- En el **Molino 6** se observaron patrones de descargas de ranura en los PRPD de las tres fases, producto de un revestimiento deficiente o un devanado suelto en las ranuras del estator, las cuales fueron muy similares en amplitud de descargas. Esto fue ratificado por el análisis PSA al mostrar también patrones de descarga de ranura. El análisis PCP indico la existencia de descargas superficiales, aunque este resultado es por no tener un registro de descargas de ranura. Si bien en la Fase Azul se obtuvo mayor amplitud y número de descargas, estas y las descargas de las otras dos fases siguen siendo bajas, por lo que se concluye que el aislamiento del Molino 6 se encuentra en **estado estable y confiable**.
- El **Molino 7** presentó descargas con mucho ruido electrónico, lo que se observó en los PRPD obtenidos en las tres fases en las mediciones de los años 2021 y 2023. Sin embargo, es posible distinguir en los PRPD descargas internas de vacuolas distribuidas y descargas superficiales en el cabezal de la bobina, producto de envejecimiento térmico y contaminación en el cabezal del devanado, respectivamente. Los patrones PSA indican un predominio de descargas superficiales, y en el caso particular de la medición de la Fase Roja en el año 2023,

se observa la presencia de descargas de ranura por revestimiento deficiente o un devanado suelto en las ranuras del estator, aunque este patrón puede ser también solo un efecto del ruido electrónico en la medición que alteró el patrón PSA. Debido al ruido electrónico, no es posible obtener una conclusión confiable respecto al avance de las descargas. El análisis PCP indico la existencia de descargas superficiales, este además se vio muy afectado por ruido electrónico, al punto en que no pudo encontrar una similitud con las descargas aisladas en el año 2021. Sin embargo, observando los parámetros PRPD y PSA a grandes rasgos, no se observa un gran avance en gravedad, y debido al bajo valor en magnitud y repetición de descargas, se concluye que el aislamiento del Molino 7 se encuentra en **estado estable y confiable** hasta la medición de 2023.

- El **Molino 8** presentó descargas muy leves, tanto que no pudieron ser registradas por estar cubiertas por ruido eléctrico. Por ello, se concluye que el aislamiento del Molino 8 se encuentra en **estado estable y confiable** hasta la fecha de la última medición.

5.2. Conclusiones

PRPD sigue siendo la herramienta imprescindible para el análisis de descargas parciales, dado que entrega información muy útil sobre la gravedad de las descargas y la fuente de estas. En conjunto con parámetros de la **Norma IEC 60270** [12], pueden determinar si el aislamiento se encuentra en un estado confiable o no.

La información PSA coincide con la proporcionada por los PRPD y puede ser una herramienta complementaria importante para ratificar los patrones predominantes en la medición de descargas parciales o en casos donde existen patrones PRPD que son difíciles de identificar por la gran cantidad de descargas. Los patrones PSA son fáciles de identificar, como los patrones de descargas de ranura, descargas superficiales y descargas internas. Sin embargo, PSA solo indica el patrón predominante y no la combinación de descargas que pueden existir como lo hace el PRPD, lo que convierte al método PSA en solo una herramienta complementaria.

PSA puede proporcionar información importante sobre el avance y gravedad de las descargas superficiales o en el cabezal de la bobina que puedan estar ocurriendo en el aislamiento de la máquina. Además, permite cuantificarla a través del comportamiento de los clusters característicos de las descargas superficiales, utilizando distancia entre clusters, datos en cada cluster, y elementos estadísticos como kurtosis y skewness.

Los patrones PSA se ven muy afectados por ruido electrónico que puede estar presente en la medición. Esto se debe a la forma en que se construyen los patrones PSA, ya que la secuencia de pulsos de descargas parciales es alterada por pulsos con una frecuencia de repetición característica de elementos electrónicos, provocando patrones PSA erróneos. Si bien estos patrones de ruido electrónico pueden afectar a los PRPD, esto no afecta en gran medida la interpretación del tipo de descargas presentes, ya que sigue siendo posible identificar en el PRPD (en la mayoría de los casos) cuáles son descargas parciales provenientes del aislamiento de la máquina y cuáles son pulsos provenientes de elementos electrónicos.

El método PCP no aportó nueva información relevante para el diagnóstico del aislamiento de los molinos, indicando en la mayoría de los casos la presencia de descargas superficiales. Sin embargo, destaca de los otros métodos de análisis por los bajos errores que presenta en el reconocimiento de descargas. Si se logra identificar los parámetros estadísticos más importantes para el reconocimiento de descargas parciales (utilizando un método para ponderar los parámetros más importantes, similar al que utilizan las redes neuronales), el método PCP podría ser un aporte significativo, reduciendo el error en el reconocimiento de fuentes de descargas parciales.

5.3. Trabajo futuro

Como trabajo futuro a desarrollar es posible centrarse en el desarrollo métodos que integren las fortalezas de los análisis PRPD y PSA considerando investigaciones que siguen surgiendo con respecto al estudio del PSA para optimizar la precisión del diagnóstico de descargas parciales en el aislamiento del devanado de máquinas rotatorias. Este análisis puede ser más robusto considerando mediciones adicionales obtenidas que puedan ser recopiladas en un futuro.

Una investigación adicional podría centrarse en explorar técnicas de filtrado y procesamiento de señales avanzadas que mitiguen el impacto del ruido electrónico en los patrones PSA. Estas técnicas ayudarían a aumentar la precisión de la identificación de patrones específicos de descargas, minimizando errores en el reconocimiento de descargas parciales genuinas frente a interferencias externas.

Finalmente, otra línea de trabajo podría enfocarse en mejorar reconocimiento del método PCP mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales si se dispone de una cantidad mayor de mediciones de descargas parciales, o identificando cuales son los parámetros estadísticos críticos para optimizar su ponderación en el reconocimiento de fuente de descargas parciales. Al identificar y ponderar los parámetros con mayor relevancia para la clasificación de descargas parciales, el método PCP podría contribuir de manera más robusta al diagnóstico confiable del aislamiento, reduciendo el error en la detección de fuentes de descargas y aumentando la precisión global del análisis.

Bibliografía

- [1] IEC 65050: Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems. 2011.
- [2] J. Fuhr and T. Aschwanden. Identification and localization of PD-sources in power-transformers and power-generators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1):17–30, 2017.
- [3] Peter J. Tavner, Li Ran, Jim Penman, and Howard G. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. 2008.
- [4] Greg C. Stone, Andrea Cavallini, Glenn Bharmann, and Claudio Angelo Serafino. Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment. 2023.
- [5] C. Hudon and M. Belec. Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 12(2):297–319, 2005.
- [6] R. Patsch, M. Hoof, and C. Reuter. Pulse sequence analysis -A promising diagnostic tool. *in Proc. 8th ISH. Yokohama, Japan,*, pages 157–160, 1993.
- [7] R. Patsch and F. Berton. Pulse sequence analysis —A diagnostic tool based on the physics behind partial discharges. *Journal of Physics D. Applied Physics*, 35(1):25–32, 2002.
- [8] M. Hoof and R. Patsch. Pulse sequence analysis -A new method for investigating the physics of pd-induced ageing. *IEE Proc. Sci., Meas. Technol.*, 142(1):95–101, 1995.
- [9] R. Patsch and M. Hoof. Voltage difference analysis -A tool for partial discharge source. *Identification. IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 401–406, 1996.
- [10] Lingyan Lin, Ailiang Kang, Zhipeng Lei, Muqin Tian, Jiancheng Song, Lu Li, Zhanqing Chen, and Wei Li. Development and Discharge Characteristics of Surface Tracking on the Interface Between the PD Suppression Coatings Outside of Stator Winding Slots. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 30(1):421–428, 2022.

Bibliografía

- [11] Nicolas Dehlinger and Greg Stone. Surface partial discharge in hydrogenerator stator windings: Causes, symptoms, and remedies. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 36(3):7–18, 2020.
- [12] IEC 60270: High-voltage test techniques –Partial discharge measurements. 2020.
- [13] Pablo Donoso Daille. Análisis de descargas parciales en árboles eléctricos bajo excitación alterna de muy baja frecuencia mediante técnicas de análisis de series de tiempo no lineales. *Tesis de grado Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM, Valparaíso, Chile*, 2020.
- [14] Campbell S.R., Stone G.C., and Sedding H.G. Application of pulse width analysis to partial discharge detection. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 345–348, 1992.
- [15] E. Gulski and A. Krivda. Neural networks as a tool for recognition of partial discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 28(6):984–1001, 1993.
- [16] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda. Classification of partial discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(6):917–931, 1993.
- [17] Edward Gulski. Digital analysis of partial discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2(5):822–837, 1995.
- [18] H. R. Mirzaei, A. Akbari, M. Kharezi, and A. M. Jafari. Experimental Investigation of PD Diagnosis Based on Consecutive Pulses Data. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China*, 2008.
- [19] A. Contin and H. Al-Marzouqi. Searching for partial discharge patterns for the identification of defects of insulation systems in ac rotating machines. *IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada*, 2009.
- [20] Alfredo Contin, Andrea Cavallini, and Andrea Piccolo. Comparison of different PD patterns derived from tests on new coils for induction machines. *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2016.
- [21] Rui Yao, Meng Hui, Jun Li, Lin Bai, and Qisheng Wu. A New Discharge Pattern for the Characterization and Identification of Insulation Defects in GIS. *Energies*, 11(4):971–989, 2018.
- [22] IEEE std 1434™: Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. 2014.

- [23] IEC 60034-27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines. 2006.
- [24] TechImp Srl Training Course. Partial discharge diagnosis for rotating machines.
- [25] A. Cavallini, G.C. Montanari, F. Puletti, and A. Contin. A new methodology for the identification of pd in electrical apparatus: properties and applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(2):203 – 215, 2005.
- [26] Yuanlin Luo, Zhaohui Li, and Hong Wang. A review of online partial discharge measurement of large generators. *Energies*, 2017.
- [27] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. E. Hayward. Stator winding failures: contamination, surface discharge, tracking. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 38(2):577–583, 2002.
- [28] Minera Valle Central S.A. Procesamiento de relaves mineros minera valle central. Accedido el 10 de octubre de 2024. [En línea] Disponible: <https://mineravallecentral.cl>.
- [29] B. Florkowska, P. Zydrón, and M. Florkowski. Effects of inverter pulses on the electrical insulation system of motors. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011.
- [30] Mark Fenger and Greg Stone. Application of statistical summary numbers to rotating machine PD data for non-expert identification of multiple aging mechanisms. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2004.
- [31] Edward Gulsk and Aleksander Zielonka. Application of digital partial discharge measuring techniques for the diagnosis of high voltage generator insulation. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1996.
- [32] P. Rousseeuw. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20:53–65, 1987.
- [33] S.Ludpa, N. Pattanadech, M. Leelajindakrairerk, and P. Yutthagowith. Pattern classification of partial discharge in high voltage equipment by regression analysis. *5th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol*, 2:921–924, 2008.

Apéndice A

Datos de placa Molinos

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	General Electric
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	2500
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.1: Datos de placa **Molino 1**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	General Electric
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	2500
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.2: Datos de placa **Molino 2**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	General Electric
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	2500
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.3: Datos de placa **Molino 3**

Apéndice A. Datos de placa Molinos

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	General Electric
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	2500
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.4: Datos de placa **Molino 4**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	GULF ELECTROQUIP
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	3250
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.5: Datos de placa **Molino 5**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	GULF ELECTROQUIP
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4160
P_{Nom} [HP]	3250
ω_{Nom} [rpm]	200

Cuadro A.6: Datos de placa **Molino 6**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	GULF ELECTROQUIP
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4000
P_{Nom} [HP]	3850
ω_{Nom} [rpm]	200

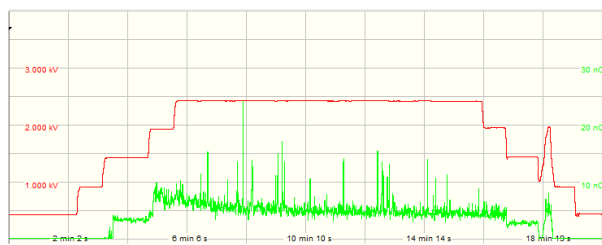
Cuadro A.7: Datos de placa **Molino 7**

Tipo	Motor Sincrónico
Marca	GULF ELECTROQUIP
Frecuencia [Hz]	50
V_{Nom} [V]	4000
P_{Nom} [HP]	3500
ω_{Nom} [rpm]	200

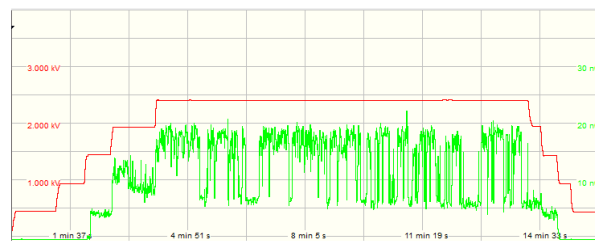
Cuadro A.8: Datos de placa **Molino 8**

Apéndice B

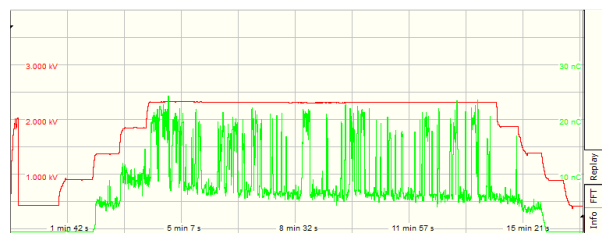
Perfiles de tensión aplicados



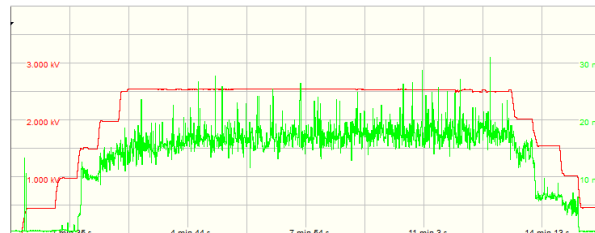
(a) 2018



(b) 2020

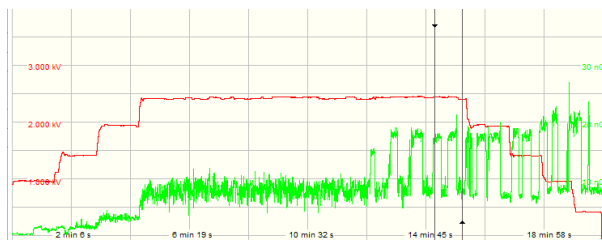


(c) 2021

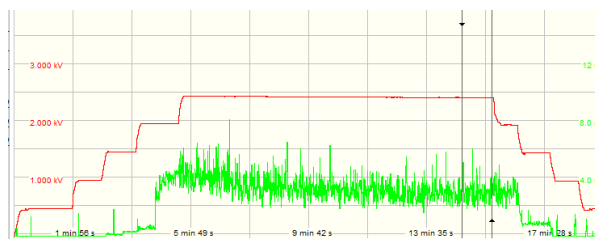


(d) 2022

Figura B.1: Perfil de tensión Molino 1



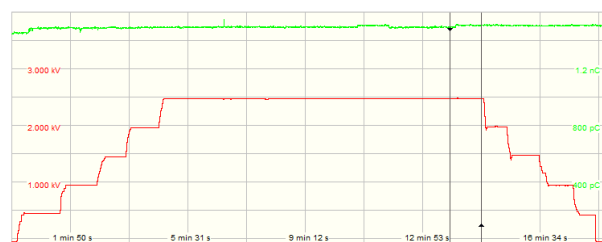
(a) 2019



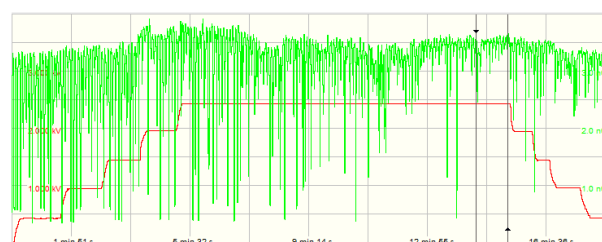
(b) 2021

Figura B.2: Perfil de tensión Molino 2

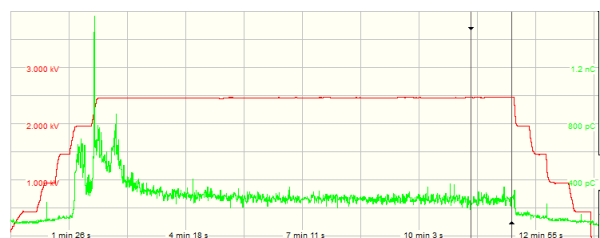
Apéndice B. Perfiles de tensión aplicados



(a) 2020

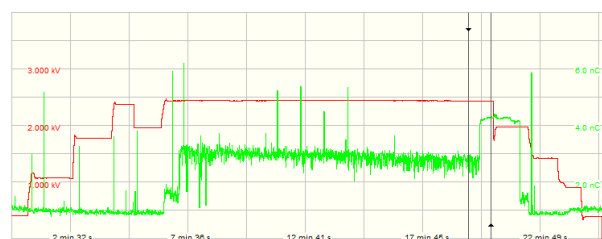


(b) 2021

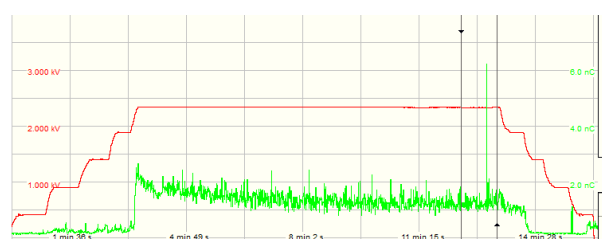


(c) 2023

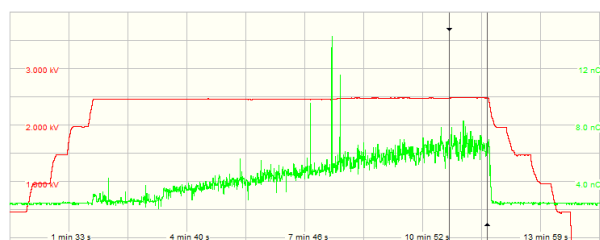
Figura B.3: Perfil de tensión Molino 3



(a) 2019



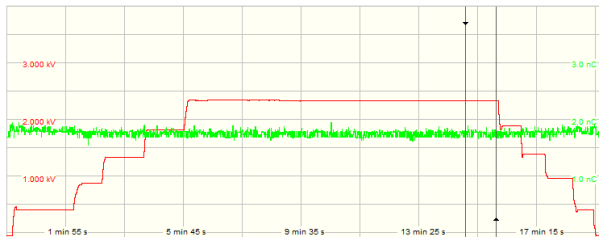
(b) 2020



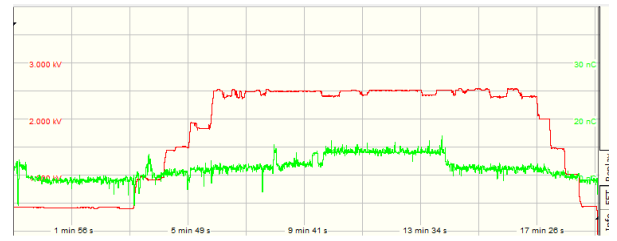
(c) 2022

Figura B.4: Perfil de tensión Molino 4

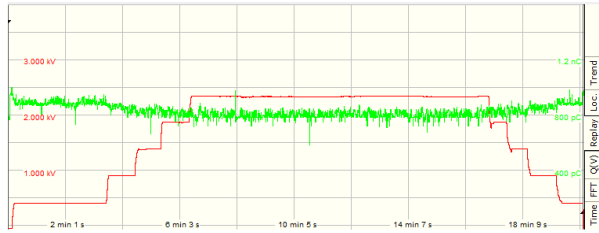
Apéndice B. Perfiles de tensión aplicados



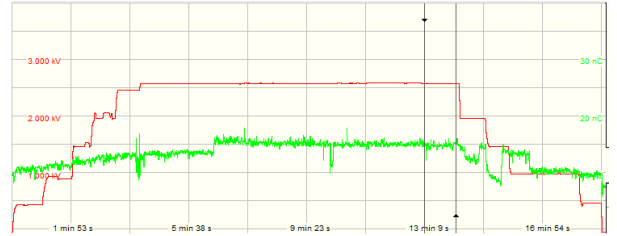
(a) 2020 Fase Azul



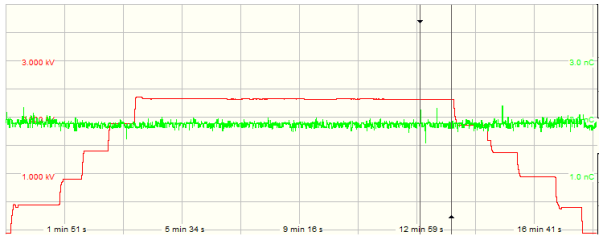
(b) 2021 Fase Azul



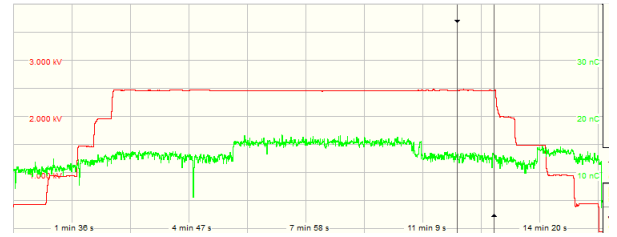
(c) 2020 Fase Negra



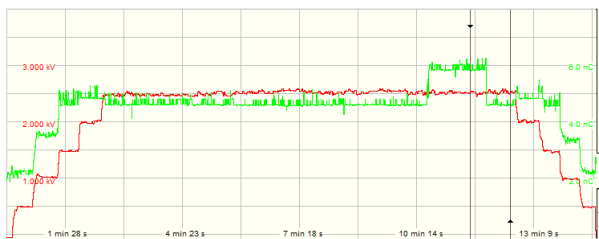
(d) 2021 Fase Negra



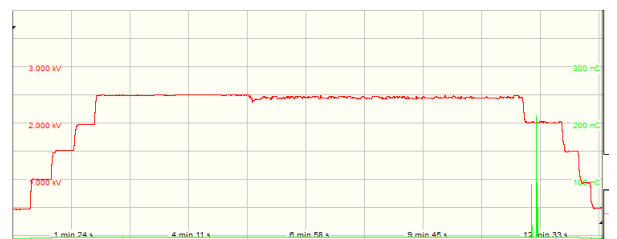
(e) 2020 Fase Roja



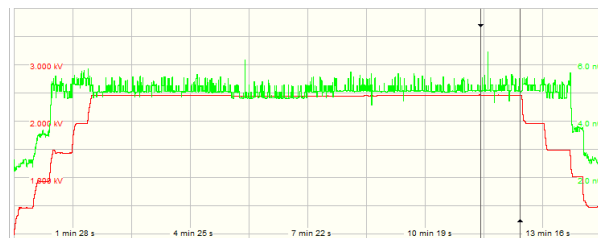
(f) 2021 Fase Roja



(g) 2023 Fase Azul



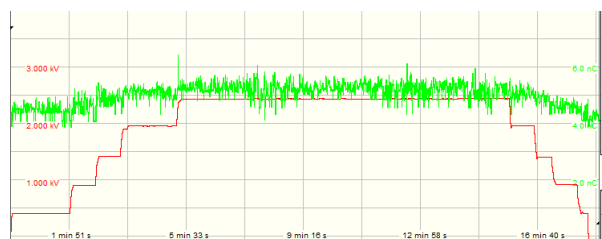
(h) 2023 Fase Negra



(i) 2023 Fase Roja

Figura B.5: Perfil de tensión Molino 5

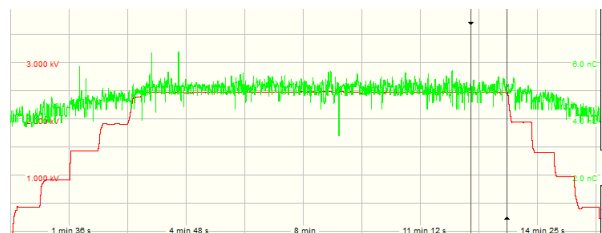
Apéndice B. Perfiles de tensión aplicados



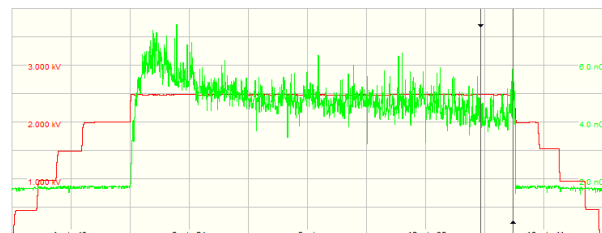
(a) **2020 Fase Azul**



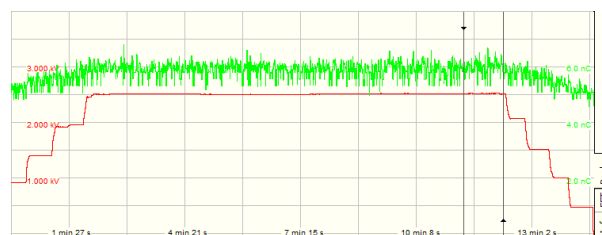
(b) **2021 Fase Azul**



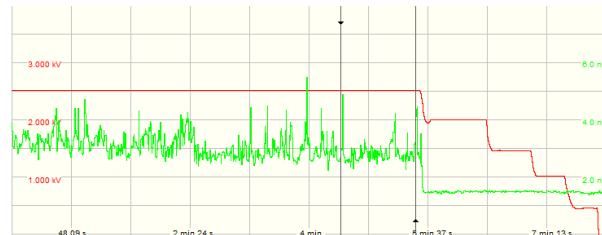
(c) **2020 Fase Negra**



(d) **2021 Fase Negra**



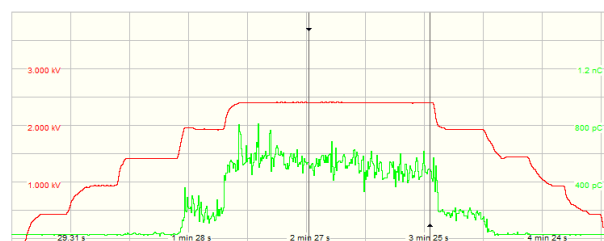
(e) **2020 Fase Roja**



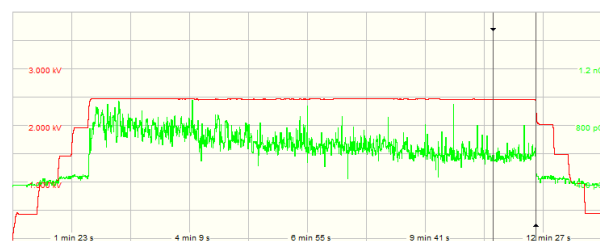
(f) **2021 Fase Roja**

Figura B.6: Perfil de tensión **Molino 6**

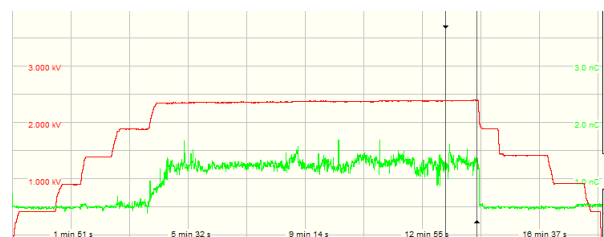
Apéndice B. Perfiles de tensión aplicados



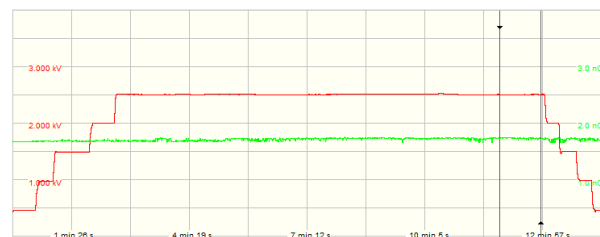
(a) **2021 Fase Azul**



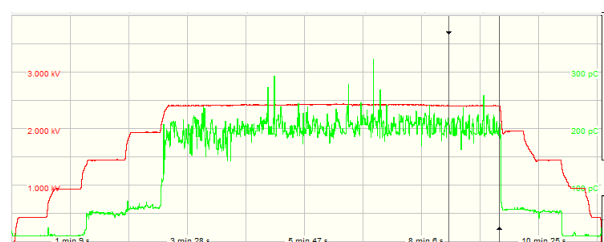
(b) **2023 Fase Azul**



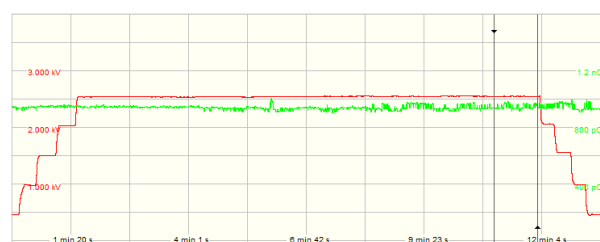
(c) **2021 Fase Negra**



(d) **2023 Fase Negra**



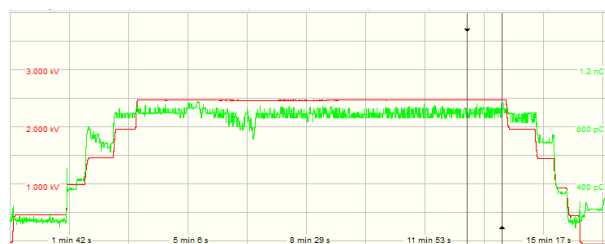
(e) **2021 Fase Roja**



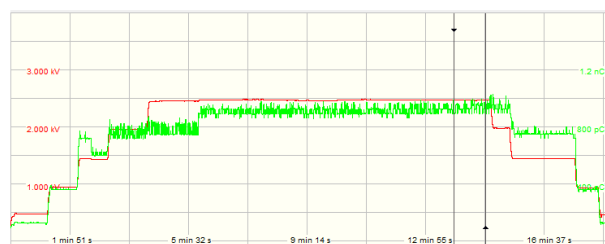
(f) **2023 Fase Roja**

Figura B.7: Perfil de tensión **Molino 7**

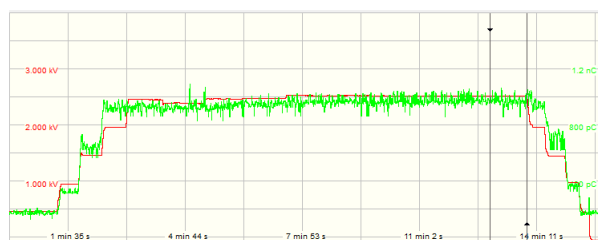
Apéndice B. Perfiles de tensión aplicados



(a) **2022 Fase Azul**



(b) **2022 Fase Negra**



(c) **2022 Fase Roja**

Figura B.8: Perfil de tensión **Molino 8**

Apéndice C

Condiciones ambientales de ensayos a Molinos

05/Oct/2018

Temperatura del ambiente [°C]	25,0
Presión atmosférica [mbar]	1.010
Humedad relativa [%]	47,0
Temperatura del devanado [°C]	46,8

(a)

03/Nov/2020

Temperatura del ambiente [°C]	30,6
Presión atmosférica [mbar]	1.010
Humedad relativa [%]	18,0
Temperatura del devanado [°C]	34,0

(b)

18/Nov/2021

Temperatura del ambiente [°C]	23,7
Presión atmosférica [mbar]	933,8
Humedad relativa [%]	35,9
Temperatura del devanado [°C]	49,0

(c)

13/Oct/2022

Temperatura del ambiente [°C]	19,2
Presión atmosférica [mbar]	944,2
Humedad relativa [%]	37,6
Temperatura del devanado [°C]	18,0

(d)

Cuadro C.1: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 1**.

13/Mar/2019

Temperatura del ambiente [°C]	27.0
Presión atmosférica [mbar]	1060
Humedad relativa [%]	26.0
Temperatura del devanado [°C]	25

(a)

28/Sep/2021

Temperatura del ambiente [°C]	22.3
Presión atmosférica [mbar]	941.4
Humedad relativa [%]	24.9
Temperatura del devanado [°C]	25

(b)

Cuadro C.2: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 2**

Apéndice C. Condiciones ambientales de ensayos a Molinos

23/Oct/2020

Temperatura del ambiente [°C]	21.3
Presión atmosférica [mbar]	1006
Humedad relativa [%]	45.7
Temperatura del devanado [°C]	19.0

(a)

28/Sep/2021

Temperatura del ambiente [°C]	24.7
Presión atmosférica [mbar]	941.1
Humedad relativa [%]	22.9
Temperatura del devanado [°C]	24.7

(b)

09/May/2023

Temperatura del ambiente [°C]	23.0
Presión atmosférica [mbar]	944.2
Humedad relativa [%]	53.9
Temperatura del devanado [°C]	33.0

(c)

Cuadro C.3: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 3**

15/ene/2019

Temperatura del ambiente [°C]	30.0
Presión atmosférica [mbar]	939.0
Humedad relativa [%]	30.0
Temperatura del devanado [°C]	30.0

(a)

10/nov/2020

Temperatura del ambiente [°C]	26.2
Presión atmosférica [mbar]	1010
Humedad relativa [%]	31.9
Temperatura del devanado [°C]	31.5

(b)

13/oct/2022

Temperatura del ambiente [°C]	29.5
Presión atmosférica [mbar]	944.2
Humedad relativa [%]	31.9
Temperatura del devanado [°C]	35.0

(c)

Cuadro C.4: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 4**

Apéndice C. Condiciones ambientales de ensayos a Molinos

16/May/2020

Temperatura del ambiente [°C]	19.8
Presión atmosférica [mbar]	940.8
Humedad relativa [%]	31.2
Temperatura del devanado [°C]	19.8

(a)

22/Jul/2021

Temperatura del ambiente [°C]	23.0
Presión atmosférica [mbar]	987.6
Humedad relativa [%]	25.2
Temperatura del devanado [°C]	28.0

(b)

25/Ene/2023

Temperatura del ambiente [°C]	29.2
Presión atmosférica [mbar]	936.4
Humedad relativa [%]	40.0
Temperatura del devanado [°C]	25.0

(c)

Cuadro C.5: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 5**

17/Nov/2020

Temperatura del ambiente [°C]	21.3
Presión atmosférica [mbar]	1010
Humedad relativa [%]	48.0
Temperatura del devanado [°C]	24.3

(a)

22/Dic/2021

Temperatura del ambiente [°C]	27.1
Presión atmosférica [mbar]	923.0
Humedad relativa [%]	29.3
Temperatura del devanado [°C]	35.0

(b)

Cuadro C.6: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 6**

28/Sep/2021

Temperatura del ambiente [°C]	26.0
Presión atmosférica [mbar]	938.12
Humedad relativa [%]	21.4
Temperatura del devanado [°C]	26.0

(a)

14/Sep/2023

Temperatura del ambiente [°C]	24.3
Presión atmosférica [mbar]	936.4
Humedad relativa [%]	8.9
Temperatura del devanado [°C]	24.3

(b)

Cuadro C.7: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 7**

06/Abr/2022

Temperatura del ambiente [°C]	26.5
Presión atmosférica [mbar]	939.4
Humedad relativa [%]	24.3
Temperatura del devanado [°C]	23.0

Cuadro C.8: Condiciones ambientales de ensayos a **Molino 8**

Apéndice D

Análisis de descargas aisladas

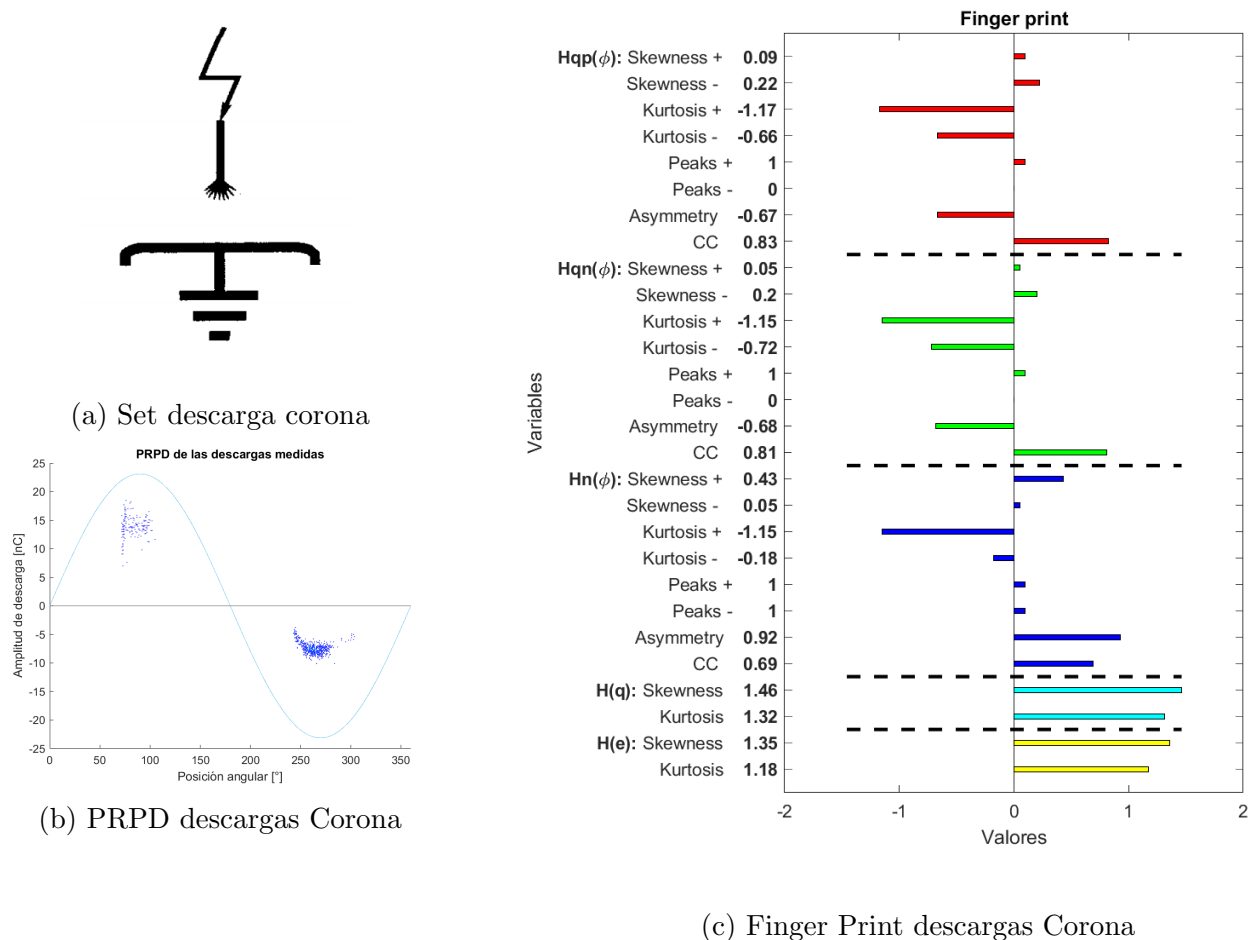
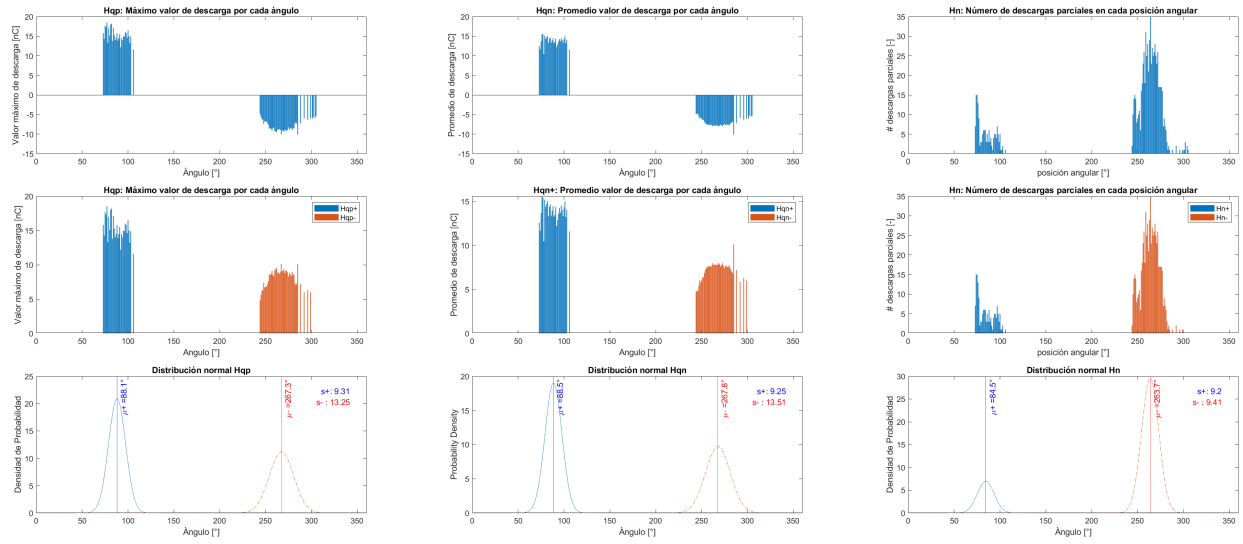


Figura D.1: Análisis PRPD de descargas aisladas corona.

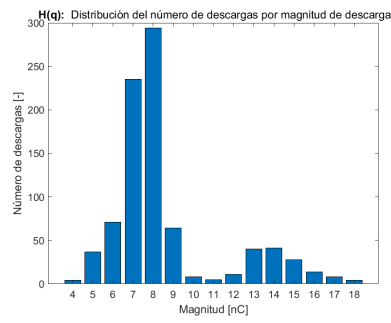
Apéndice D. Análisis de descargas aisladas



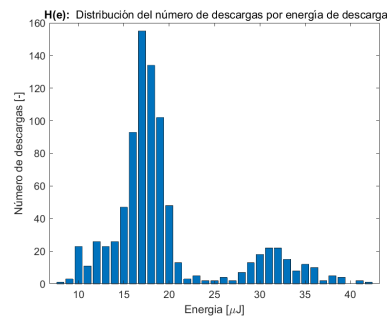
(a) Hqp descargas corona

(b) Hqn descargas corona

(c) Hn descargas corona



(d) Distribución de magnitud de descargas corona



(e) Distribución de energía de descargas corona

Figura D.2: Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas corona

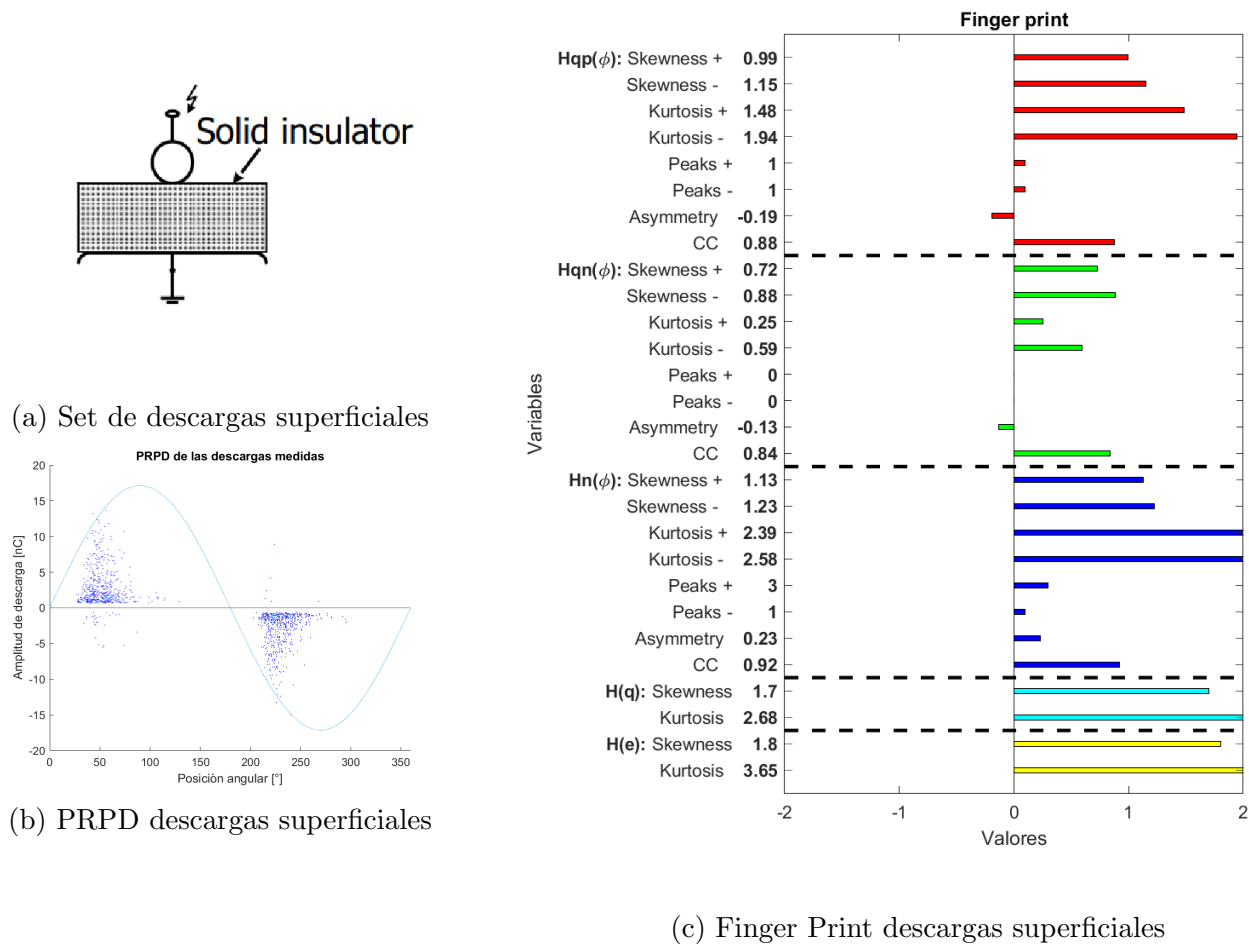
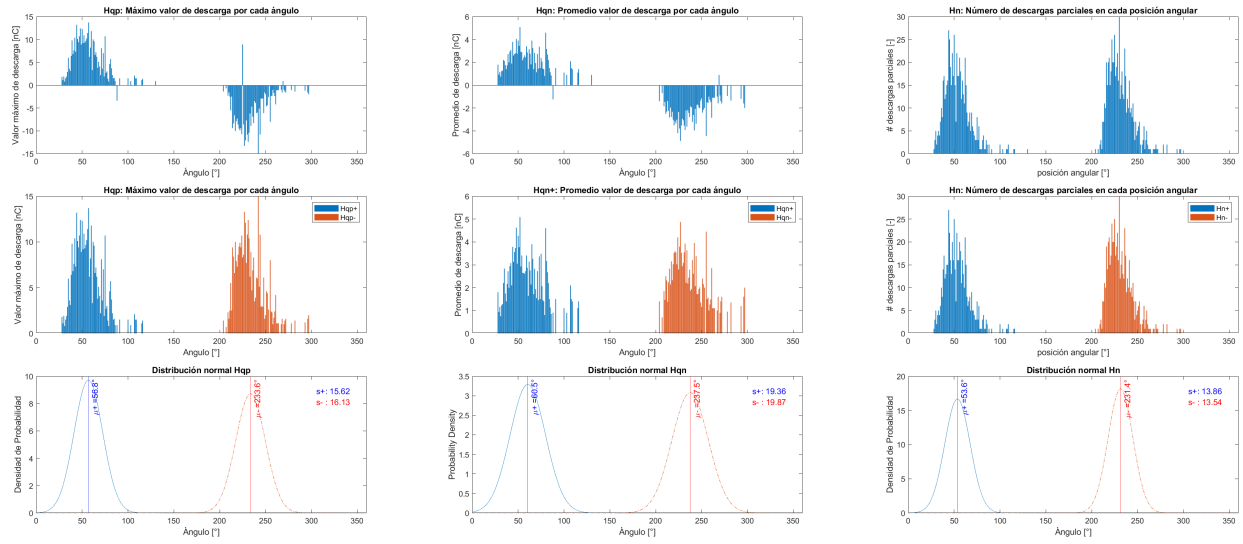


Figura D.3: Análisis PRPD de descargas aisladas superficiales.

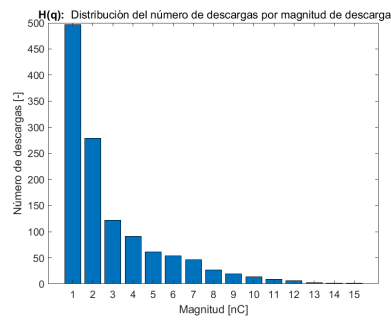
Apéndice D. Análisis de descargas aisladas



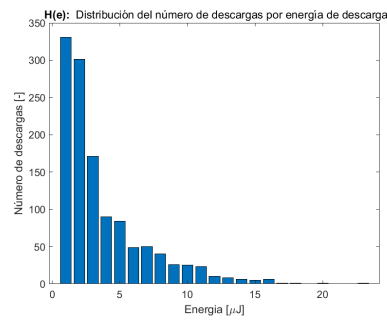
(a) Hqp descargas superficiales

(b) Hqn descargas superficiales

(c) Hn descargas superficiales



(d) Distribución de magnitud de descargas superficiales



(e) Distribución de energía de descargas superficiales

Figura D.4: Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas superficiales

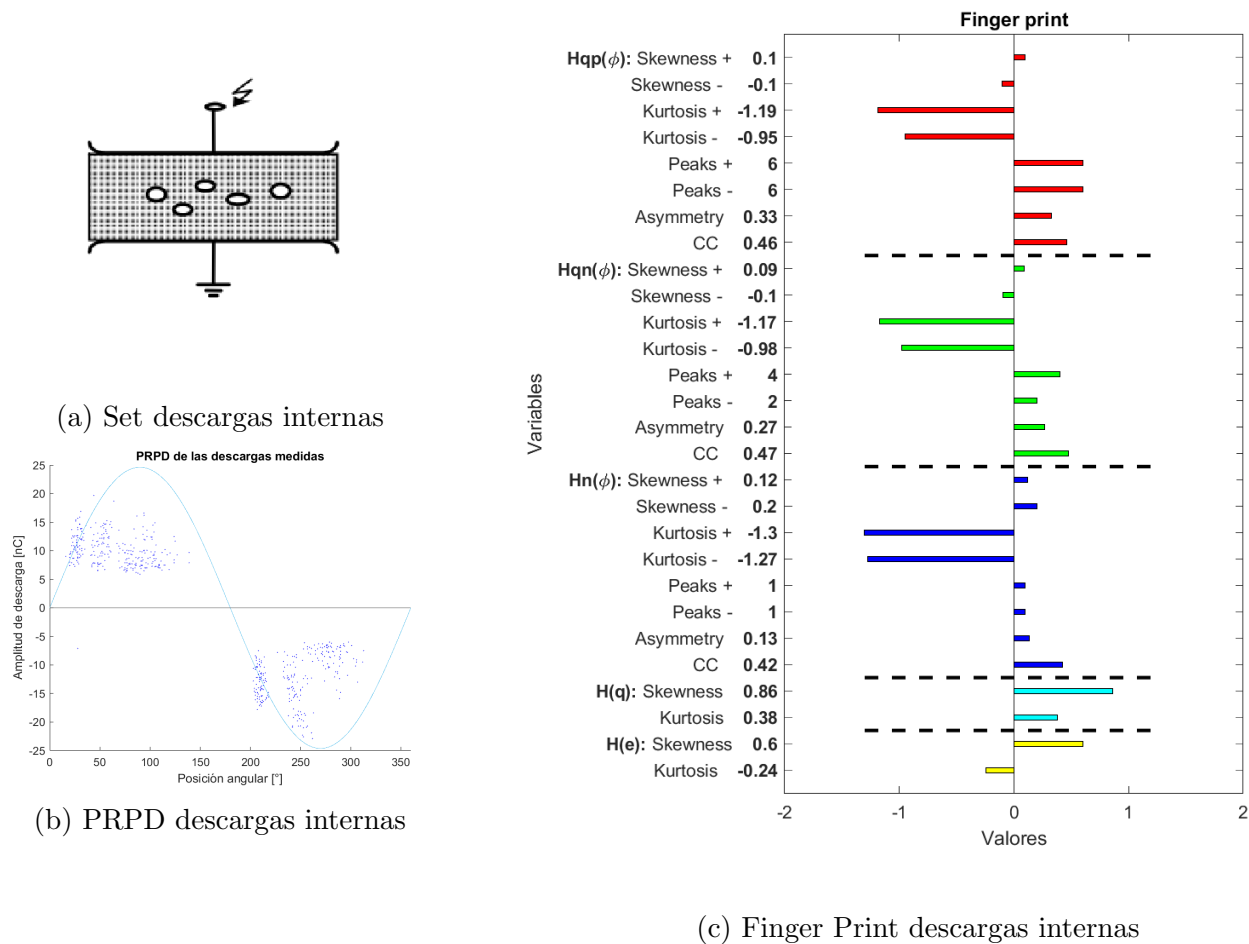
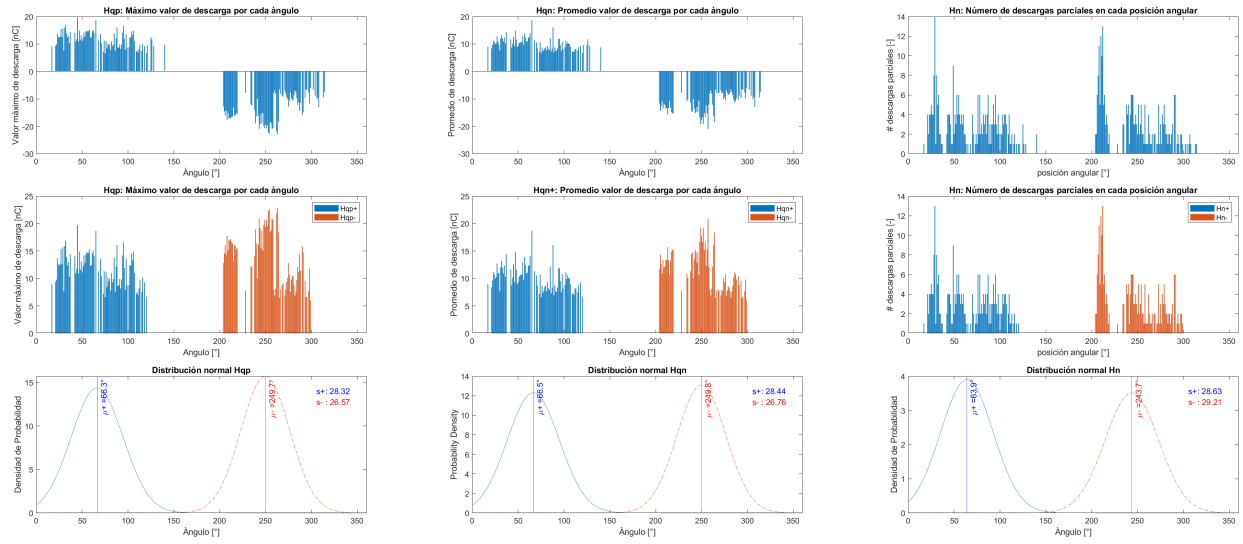


Figura D.5: Análisis PRPD de descargas aisladas internas.

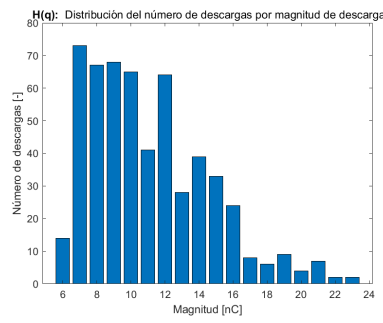
Apéndice D. Análisis de descargas aisladas



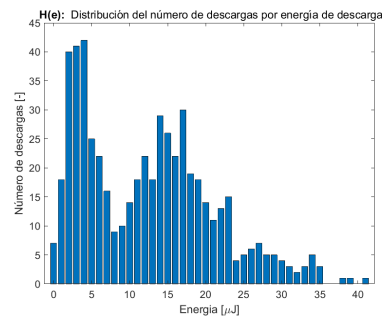
(a) Hqp descargas internas

(b) Hqn descargas internas

(c) Hn descargas internas



(d) Distribución de magnitud de descargas internas



(e) Distribución de energía de descargas internas

Figura D.6: Distribuciones estadísticas PRPD de descargas aisladas internas

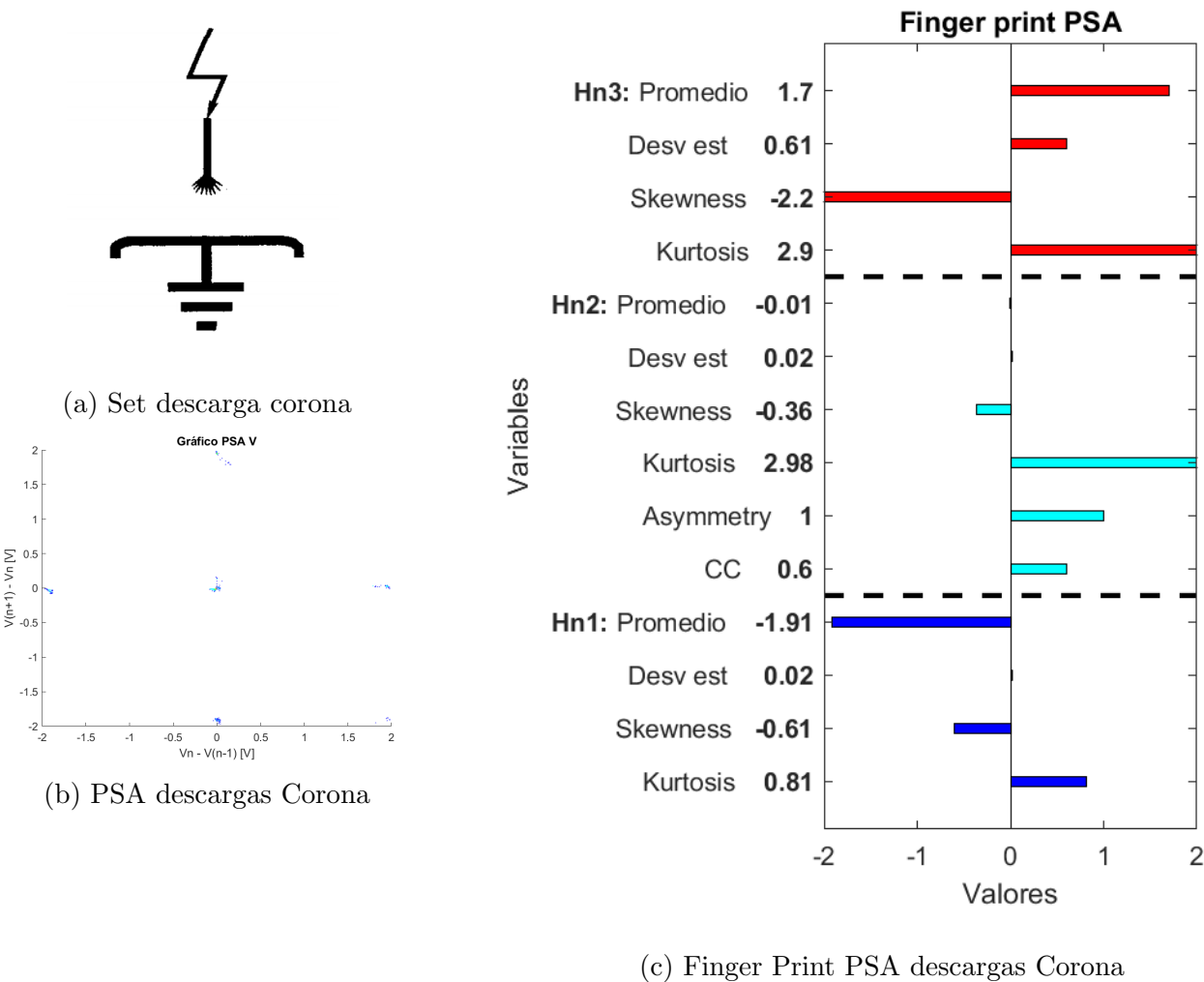


Figura D.7: Análisis PSA de descargas aisladas corona.

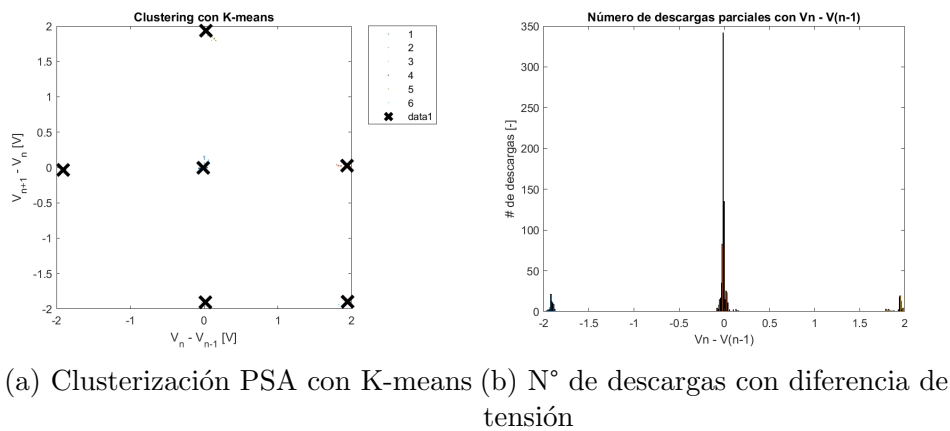
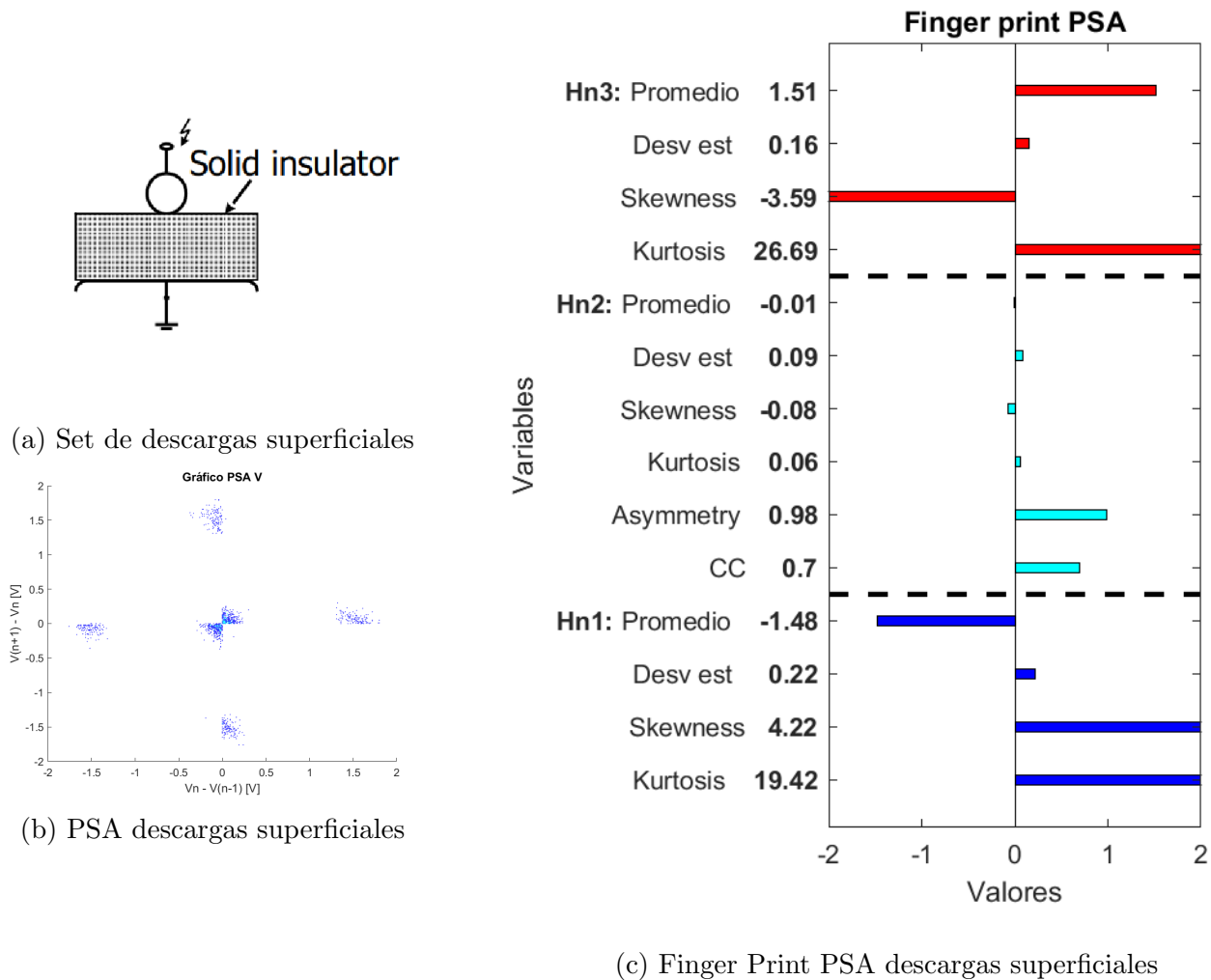


Figura D.8: Clusterización PSA de descargas aisladas corona.



(c) Finger Print PSA descargas superficiales

Figura D.9: Análisis PSA de descargas aisladas superficiales.

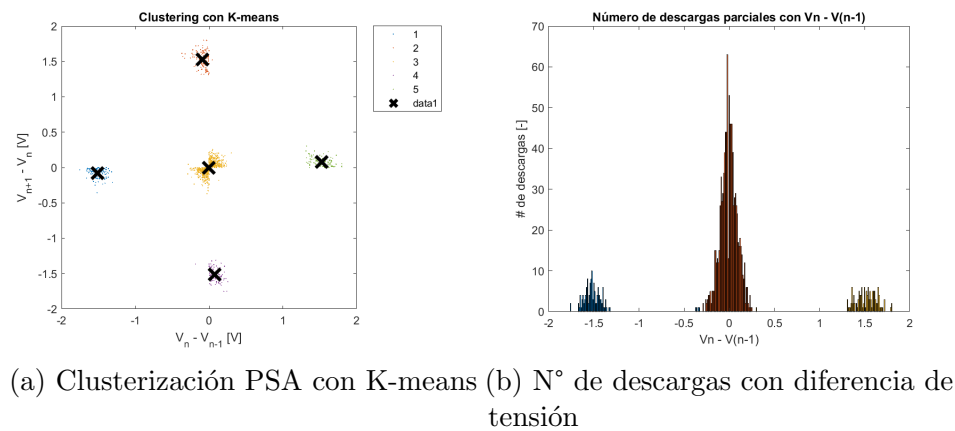


Figura D.10: Clusterización PSA de descargas aisladas superficiales.

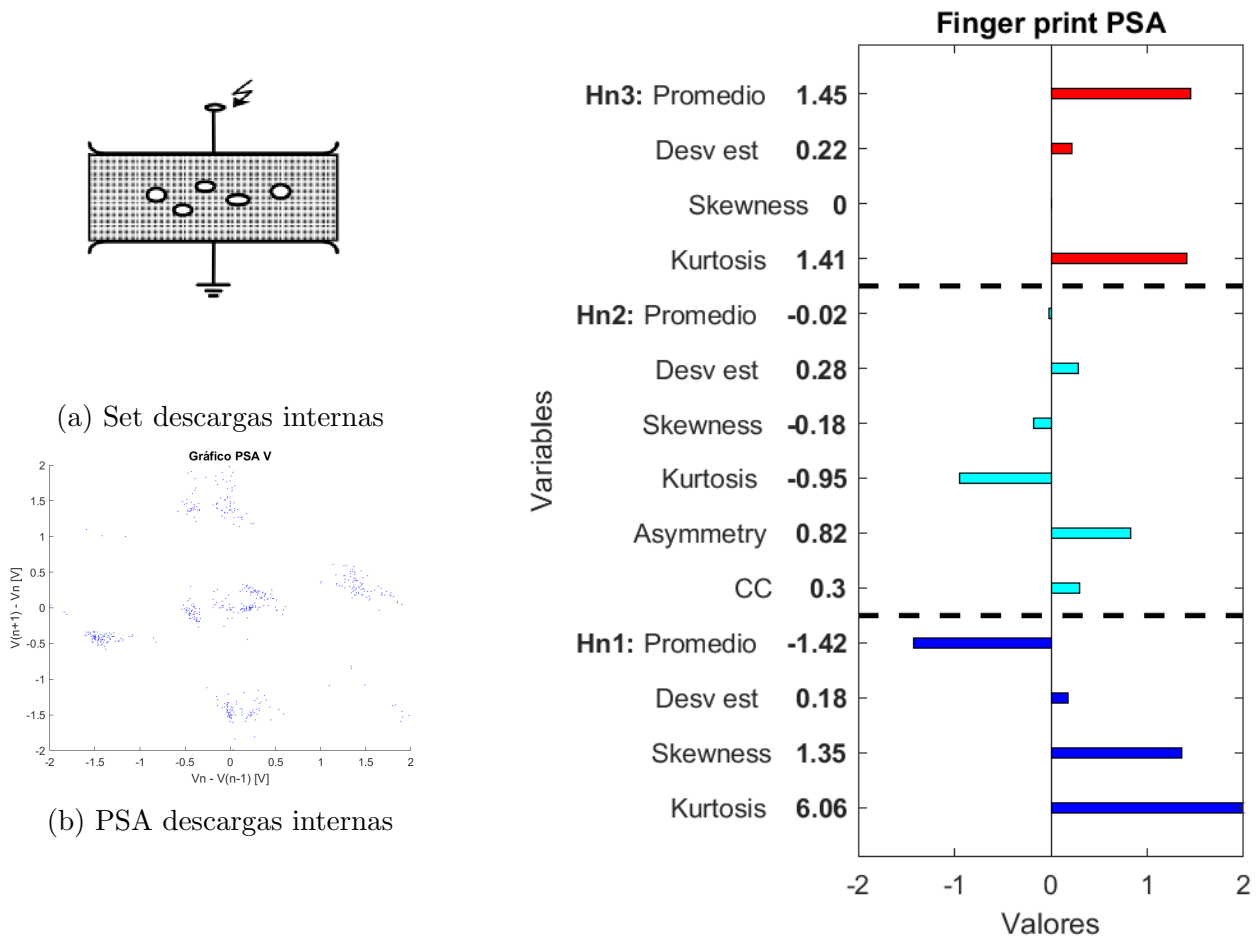


Figura D.11: Análisis PSA de descargas aisladas internas.

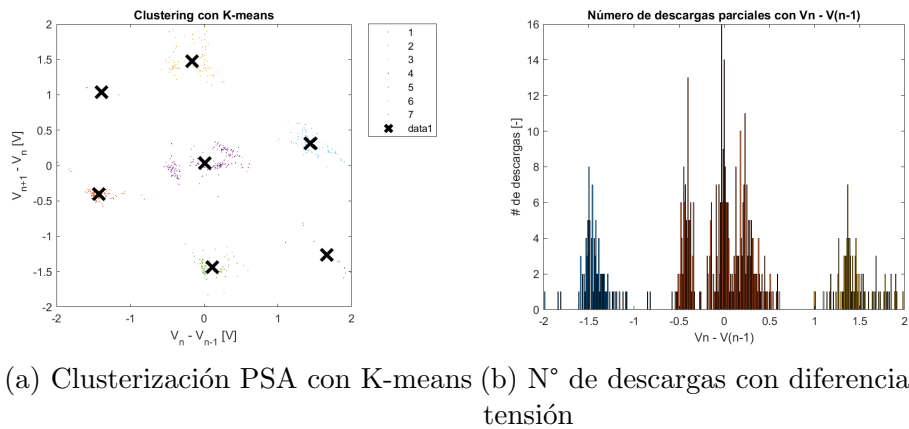


Figura D.12: Clusterización PSA de descargas aisladas internas.

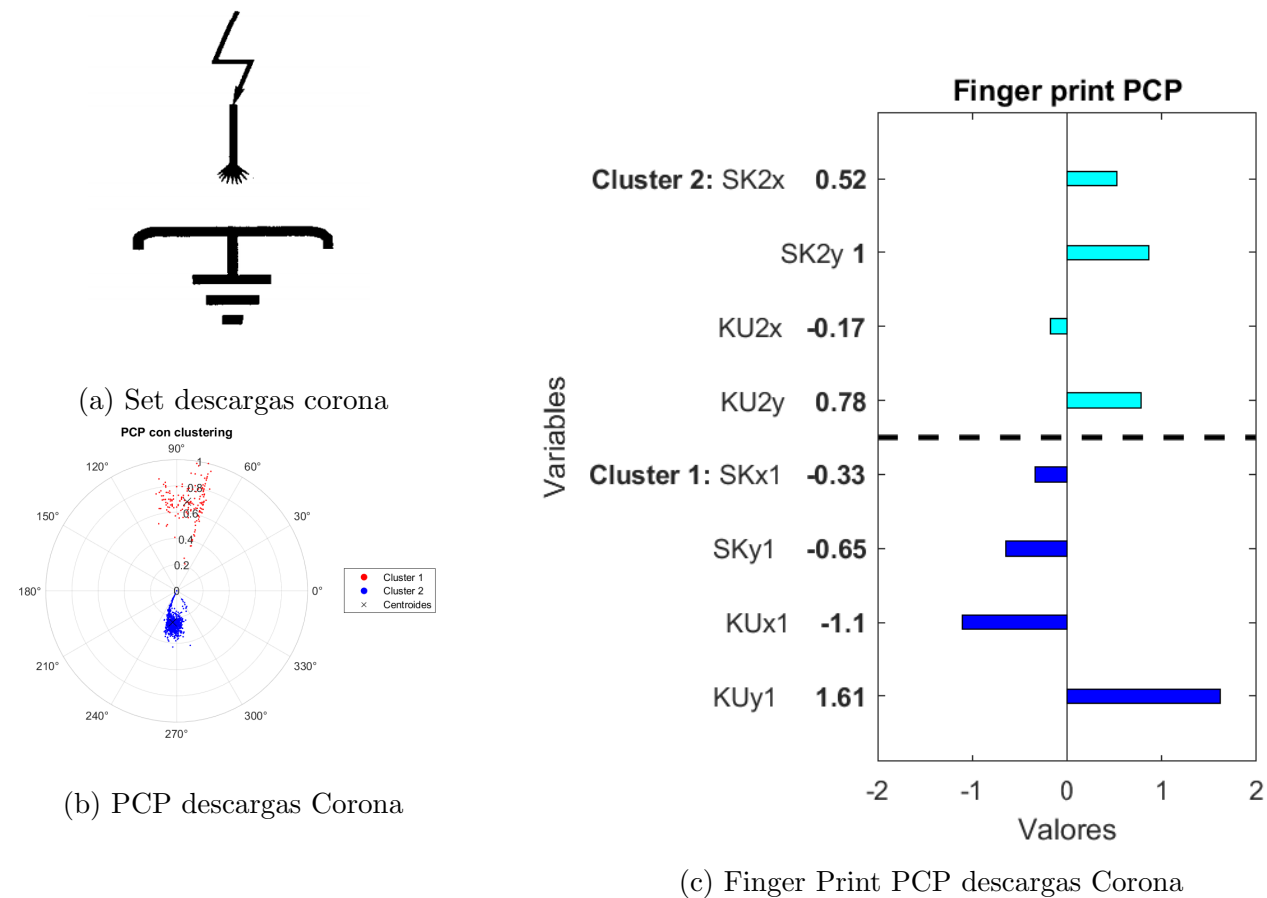


Figura D.13: Finger Print PCP descargas aisladas corona.

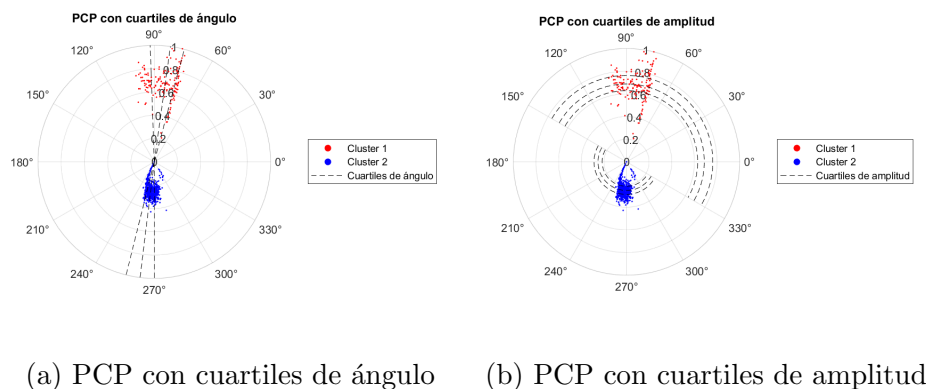
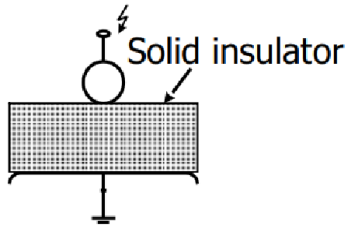
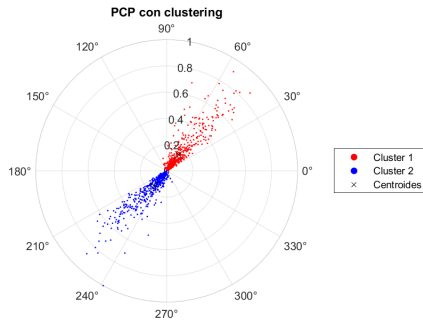


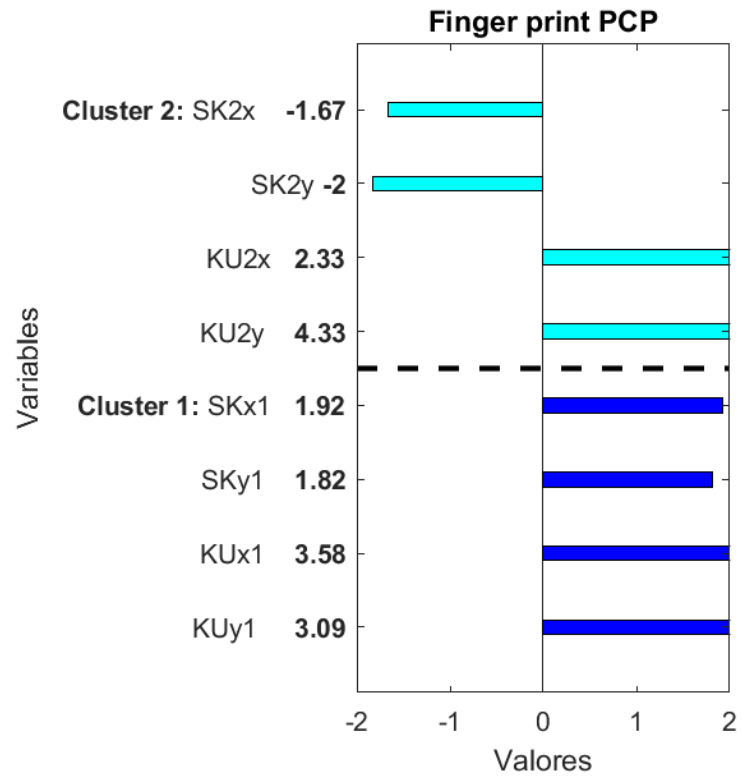
Figura D.14: Cuartiles PCP de descargas aisladas corona.



(a) Set de descargas superficiales

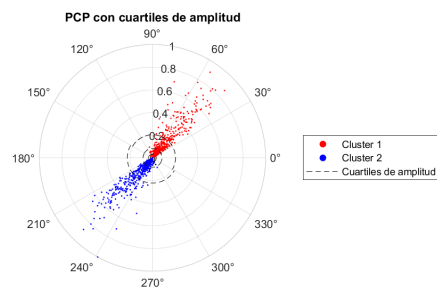
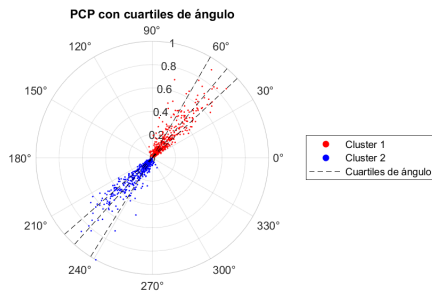


(b) PCP descargas superficiales



(c) Finger Print PCP descargas superficiales aire

Figura D.15: Finger Print PCP descargas aisladas superficiales.



(a) PCP con cuartiles de ángulo

(b) PCP con cuartiles de amplitud

Figura D.16: Cuartiles PCP de descargas aisladas superficiales.

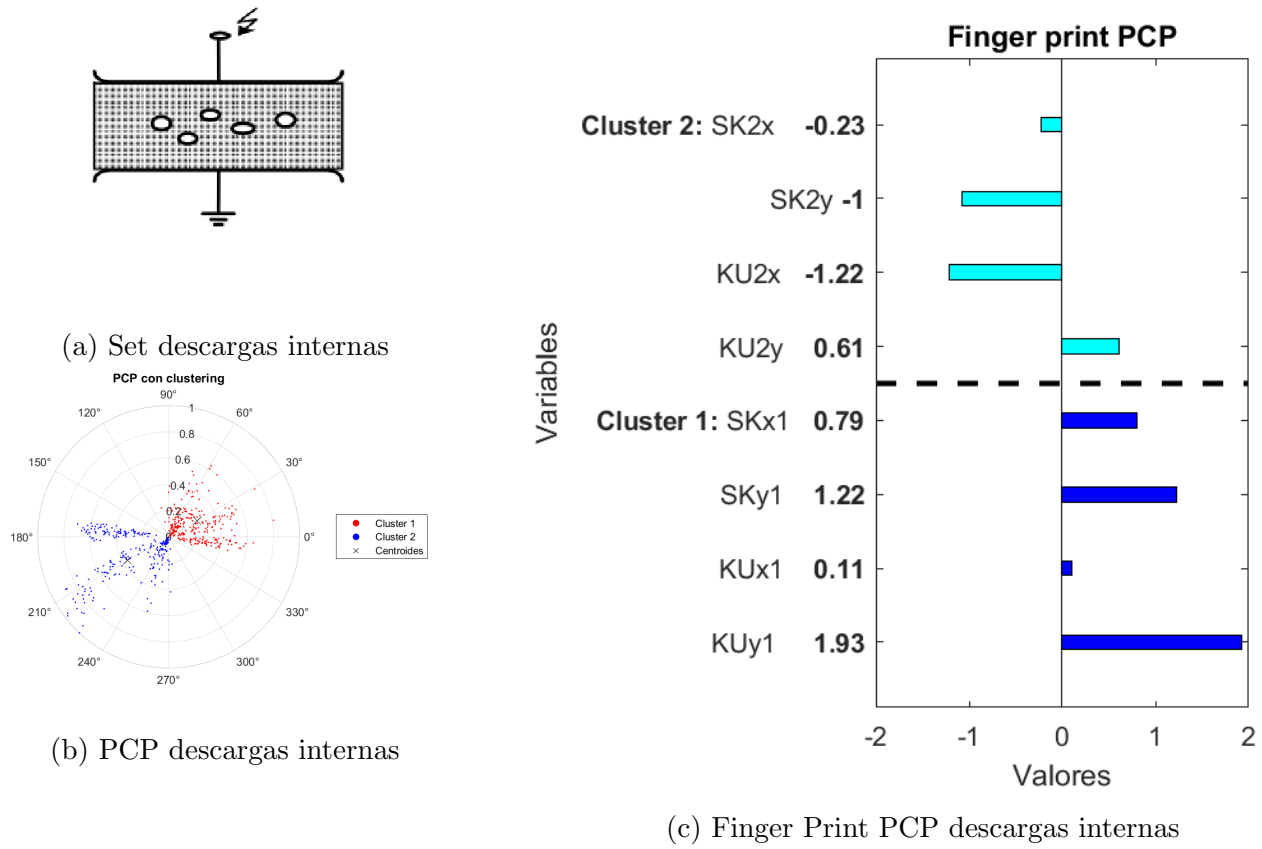


Figura D.17: Finger Print PCP descargas aisladas internas.

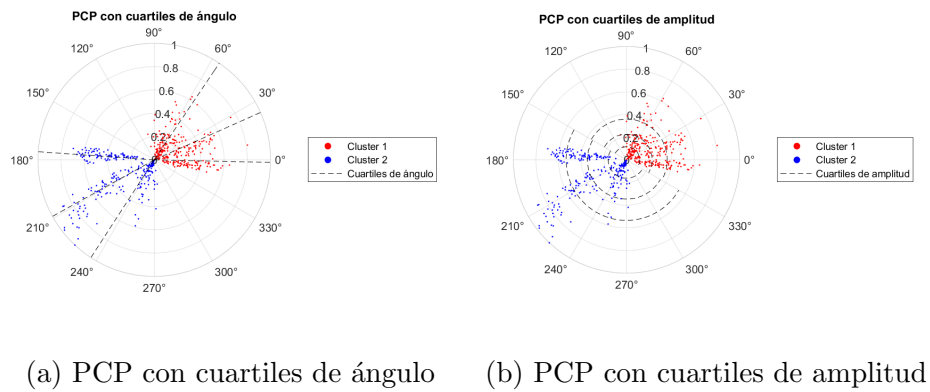


Figura D.18: Cuartiles PCP de descargas aisladas internas.

Apéndice E

Códigos utilizados

Los códigos utilizados durante este trabajo de memoria de titulación se encuentran en el siguiente [Repositorio GitHub](#) y su función es indicada en la Tabla [E.1](#).

Big_Data()	Contiene información de Tiempo de ensayo, Molinos, Ensayos y Filtro de ruido	Sección 2.3
Filtro_Ruido()	Filtro de ruido de equipos electrónicos en ensayos seleccionados	Sección 3
PRPD()	Realiza el gráfico PRPD del ensayo	Sección 3.1
Cuantificacion_PRPD()	Realiza cuantificación del PRPD mediante análisis estadístico	Sección 3.3
FingerPrint_PRPD()	Realiza el Finger Print de PRPD	Sección 3.3.3
PSA()	Realiza el gráfico PSA del ensayo	Sección 3.4
Tipos_PSA()	Realiza distintos tipos de gráficos PSA ($\Delta Q, \Delta t, \Delta V, etc.$)	Sección 3.4
Cuantificacion_PSA()	Realiza cuantificación del PSA mediante K-means y realiza el Finger print	Sección 3.6
PCP()	Realiza análisis mediante PCP (Gráfico, Cuantificación y Finger Print)	Sección 3.7 y 3.9
Error_Descargas_PRPD()	Se calcula descarga más similar descargas aisladas PRPD	Sección 3.10
Error_Descargas_PSA()	Se calcula descarga más similar descargas aisladas PSA	Sección 3.10
Error_Descargas_PCP()	Se calcula descarga más similar descargas aisladas PCP	Sección 3.10

Cuadro E.1: Códigos Matlab utilizados