



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS ARMÓNICAS DE TENSIÓN
EN EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES ELÉCTRICOS Y EN LA
EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES.”

JUAN CARLOS MANZANO VILCA.

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Profesores Guía
Roger Schurch Brandt
Jorge Ardila Rey

Valparaíso - Chile

12 de diciembre de 2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS ARMÓNICAS DE TENSIÓN
EN EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES ELÉCTRICOS Y EN LA
EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES.”

JUAN CARLOS MANZANO VILCA.

Valparaíso - Chile

12 de diciembre de 2023

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

*“Cree en ti mismo y en lo que eres.
Sé consciente de que hay algo en tu interior que es más grande
que cualquier obstáculo”.*
— *Christian D. Larson*

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, a mi madre Leonor por enseñarme el camino de esfuerzo y dedicación que me permitieron terminar esta carrera universitaria. También a mi hermanos Loreto y Rodrigo por todo su apoyo, alentándome a ser una mejor persona.

Extiendo mi agradecimiento a mi profesor Roger Schurch por su vocación y buenos consejos entregados durante el desarrollo de este trabajo, al profesor Jorge Ardila por su destacada docencia y a mis amigos que me acompañaron durante los años de estudio en la Universidad ayudándome a crecer y sentirme en familia.

Resumen

La confiabilidad del suministro de energía eléctrica depende en gran medida del estado de los conductores eléctricos y el aislamiento polimérico que los protege. Sin embargo, este aislamiento puede verse afectado por el crecimiento de árboles eléctricos, los cuales evolucionan debido a descargas parciales (DP) causando su degradación. Las DP son rupturas localizadas en el aislamiento, originadas por la aplicación de un campo eléctrico de alta magnitud, mientras que los árboles eléctricos se refieren a canales micrométricos de degradación que se desarrollan en el interior del aislamiento y pueden llevar a una falla eléctrica, interrumpiendo el servicio.

El crecimiento de los árboles eléctricos está directamente relacionado con las descargas parciales, ambos siendo influenciados por la señal de excitación a la que se expone el sistema de aislamiento eléctrico, incluyendo parámetros como la amplitud, frecuencia y nivel de distorsión armónica (THD). La alteración de la forma de onda sinusoidal pura por medio de armónicas de alta frecuencia dificulta el análisis de las DP mediante métodos tradicionales. Por lo tanto, se requiere aplicar nuevas técnicas para indagar en el fenómeno de las DP durante el crecimiento de árboles eléctricos bajo esta nueva condición de operación.

En el estudio se analizaron 20 probetas, 17 de ellas ensayadas con contaminación armónica de 150, 350 y 550 Hz más la señal fundamental de la red (50 Hz). Estas armónicas fueron desfasadas en 0° o 180° para obtener la mayor y menor variación de tensión peak en la forma de onda compuesta. Dado que las DP tienen una estrecha dependencia con la amplitud de la tensión, es que la tensión peak utilizada en todas las señales de excitación resultantes fue de $12\sqrt{2}$ kV. Las otras 3 probetas restantes se ensayaron a 50 Hz y se utilizaron como base para la comparación con los casos que presentan armónicas. Todas las probetas se fabricaron con resina epóxica y los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, en su Casa Central ubicada en Valparaíso.

En este trabajo se aplicaron técnicas que evalúan la forma de onda de los pulsos de DP para describir el crecimiento de los árboles eléctricos a través de parámetros específicos y se compararon con el método tradicional de análisis resuelto en fase (PRPD). El análisis se basó en el comportamiento de los parámetros y las tendencias observadas en las distintas etapas de crecimiento, con el propósito de diagnosticar el estado del aislamiento bajo prueba.

Las técnicas aplicadas en el dominio de la frecuencia evidenciaron claramente un comportamiento descendente-ascendente en la magnitud de los parámetros, lo cual caracteriza el desarrollo de los árboles. Además, el mapa σ_F vs PRL mostró una tendencia decreciente para el parámetro σ_F y creciente para el parámetro PRL, lo que permite correlacionarlo con el estado de avance de los árboles

eléctricos antes de que lleguen al contra-electrodo.

En cuanto al análisis general del tiempo de cruce y ruptura, los ensayos con superposición de armónicas mostraron tiempos de cruce y ruptura mayores que los ensayos realizados a frecuencia industrial. Se identificó una relación inversamente proporcional entre los tiempos de cruce y la frecuencia de las armónicas, donde los tiempos de cruce disminuyen a medida que la frecuencia de las armónicas aumenta. Por otro lado, los tiempos de ruptura presentaron una mayor variabilidad y en algunos casos fueron hasta 8 veces mayores que los tiempos de cruce.

Finalmente, el desarrollo de los árboles eléctricos se analizó mediante imágenes ópticas en todos los ensayos realizados. Se observó que los árboles que crecieron a frecuencia industrial (50 Hz) tenían una estructura tipo rama, pero al cruzar el aislamiento, comenzaron a desarrollar ramificaciones más gruesas y oscuras desde el contra-electrodo hacia la punta de la aguja, correspondientes a árboles inversos. En cambio, los árboles desarrollados bajo excitación con armónicas, en la etapa previa al cruce, presentaron una mayor cantidad de ramificaciones, aunque seguían manteniendo las características básicas de tipo rama. Posteriormente, cuando el árbol eléctrico alcanzó el contra-electrodo, se evidenció un desarrollo más abundante de árboles inversos, y en algunos casos, se produjeron estructuras tipo arbusto cerca de la punta de la aguja.

Nomenclatura.

AC	:	Corriente alterna o excitación alterna en general.
SEP	:	Sistema eléctrico de potencia.
AT	:	Alta tensión.
DP	:	Descarga parcial.
PRPD	:	Análisis resuelto en fase de descargas parciales.
HFCT	:	Transformador de corriente de alta frecuencia.
THD	:	Distorsión armónica total.
RMS	:	Valor efectivo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Estructura del documento	3
1.3. Revisión bibliográfica	5
1.3.1. Descargas parciales y árboles eléctricos	6
1.3.2. Influencia de las armónicas	7
1.3.3. Técnicas de análisis de descargas parciales.	10
2. Procedimientos experimentales	14
2.1. Elaboración de probetas	14
2.2. Resumen de las probetas ensayadas	15
2.3. Banco experimental para la medición de DP en árboles eléctricos	16
2.3.1. Generación de alta tensión	17
2.3.2. Medición en los ensayos	17
2.3.3. Circuito esquemático para el crecimiento de los árboles eléctricos	20
2.4. Iniciación de árboles eléctricos	22
2.5. Señales de excitación utilizadas en los ensayos	22
3. Metodología de análisis	24
3.1. Análisis resuelto en fase de DP	25
3.2. Técnicas basadas en la forma de onda de DP	27
3.2.1. Mapas PR y TF	28

3.2.2.	Caracterización de los pulsos de DP por medio de parámetros de frecuencia y de la envolvente	29
3.3.	Filtrado de ruido	31
4.	Resultados y análisis	34
4.1.	Tiempos de cruce y ruptura	35
4.2.	Análisis de descargas parciales resueltos en fase	38
4.2.1.	Análisis cuantitativo de los momentos estadísticos en el crecimiento de los árboles eléctricos	45
4.3.	Análisis de los parámetros de forma de onda en el crecimiento de árboles eléctricos .	54
4.3.1.	Técnica de clusterización por potencia espectral (SPCT)	54
4.3.2.	Mapas Tiempo - Frecuencia	55
4.3.3.	Caracterización de la forma de onda por medio de funciones envolventes y parámetros en frecuencia	57
4.4.	Comportamiento de los parámetros de forma de onda en etapas de <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	60
4.4.1.	Parámetros PRL y PRH	61
4.4.2.	Parámetros σ_T y σ_F	62
4.4.3.	Parámetros A_t y f	63
4.5.	Mapas Bidimensionales	64
5.	Resumen final y conclusiones	71
	Anexos	75
A.	Morfología de los árboles eléctricos	76
B.	Variación de parámetros de forma de onda	77
B.1.	Parámetro PRL	77
B.2.	Parámetro PRH	78
B.3.	Parámetro σ_T	79
B.4.	Parámetro σ_F	80

ÍNDICE GENERAL

B.5. Parámetro A_t 81

B.6. Parámetro f 82

Índice de figuras

1.1. Tipos de descargas parciales.	6
1.2. Tipos de arboles eléctricos.	7
1.3. Patrones de DP en arborización eléctrica por forma de ondas compuestas.	8
1.4. Influencia de la contaminación armónica sobre los gráficos PRPD.	9
1.5. Creación de PRPD.	10
1.6. Patrones PRPD.	10
1.7. Diagrama esquemático de la aplicación de SPCT en los pulsos de DP.	12
1.8. Separación de fuentes de DP mediante mapas PR.	12
1.9. Separación de fuentes de DP mediante mapas TF.	13
2.1. Instrumentos utilizados en la elaboración de probetas.	15
2.2. Equipos utilizados en la generación de alta tensión.	17
2.3. Equipos de medición y adquisición de DP Omicron.	18
2.4. Osciloscopio Keysight.	18
2.5. HFCT Techimp.	19
2.6. Cámara, lente y tubos extensores utilizados para capturar imágenes de árboles eléctricos durante su crecimiento.	19
2.7. Circuito esquemático de medición de DP en el crecimiento de árboles eléctricos.	20
2.8. Circuito balanceado según norma IEC 60270.	21
2.9. Circuito de sustracción (SC) implementado.	21
2.10. Señales de excitación.	23
3.1. Metodología de análisis general.	24
3.2. Diagramas PRPD en etapa de <i>post-cruce</i>	25

ÍNDICE DE FIGURAS

3.3. Etapas seleccionadas desde la serie de tiempo.	26
3.4. Evolución de los parámetros durante el crecimiento del árbol eléctrico.	28
3.5. Ejemplo de mapa PR.	28
3.6. Mapa σ_F v/s PRL.	29
3.7. Intervalo de frecuencia considerado para la estimación de f	30
3.8. Función envolvente normalizada.	31
3.9. Diagrama de la obtención de F	32
3.10. Proceso de filtrado.	33
4.1. Tiempos de cruce y ruptura.	36
4.2. <i>Box-plot</i> tiempos de cruce y ruptura.	37
4.3. PRPD a frecuencia industrial 50 Hz (b).	38
4.4. PRPD fundamental + tercera armónica sin desfase.	39
4.5. PRPD fundamental + tercera armónica desfasada en 180°	40
4.6. PRPD fundamental + séptima armónica sin desfase.	41
4.7. PRPD fundamental + séptima armónica desfasada en 180°	42
4.8. PRPD fundamental + undécima armónica sin desfase.	43
4.9. PRPD fundamental + undécima armónica desfasada en 180°	44
4.10. Q_{peak} en los distintos intervalos de análisis.	45
4.11. Q_{95} en los distintos intervalos de análisis.	46
4.12. Número de DPs en los distintos intervalos de análisis.	47
4.13. Potencia de descarga en los distintos intervalos de análisis.	48
4.14. Varianza en los distintos intervalos de análisis.	49
4.15. <i>Skewness</i> en los distintos intervalos de análisis.	50
4.16. Kurtosis en los distintos intervalos de análisis.	51
4.17. Parámetro α en los distintos intervalos de análisis.	52
4.18. Parámetro β en los distintos intervalos de análisis.	53
4.19. Variación del parámetro PRL para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

4.20. Variación del parámetro PRH para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	55
4.21. Variación del parámetro σ_F para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	56
4.22. Variación del parámetro σ_T para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	57
4.23. Variación del parámetro A_p para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	58
4.24. Variación del parámetro A_t para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	59
4.25. Variación del parámetro f para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.	60
4.26. <i>Box-plot</i> del parámetro PRL en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	61
4.27. <i>Box-plot</i> del parámetro PRH en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	61
4.28. <i>Box-plot</i> del parámetro σ_T en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	62
4.29. <i>Box-plot</i> del parámetro σ_F en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	62
4.30. <i>Box-plot</i> del parámetro A_t en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	63
4.31. <i>Box-plot</i> del parámetro f en <i>pre-cruce</i> y <i>post-cruce</i>	63
4.32. Mapa σ_F v/s PRL a frecuencia industrial 50 Hz.	64
4.33. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo frecuencia industrial 50 Hz.	65
4.34. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + tercera armónica sin desfase.	65
4.35. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + tercera armónica sin desfase.	65
4.36. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + tercera armónica desfasada en 180°.	66
4.37. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + tercera armónica desfasada en 180°.	66
4.38. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + séptima armónica sin desfase.	67
4.39. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + séptima armónica sin desfase.	67
4.40. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + séptima armónica desfasada en 180°.	68
4.41. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + séptima armónica desfasada en 180°.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

4.42. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + undécima armónica sin desfase.	69
4.43. Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + undécima armónica sin desfase.	69
4.44. Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + undécima armónica desfasada en 180°	70
4.45. Etapas 1 y 2 de los árboles eléctricos bajo fundamental + undécima armónica desfasada en 180°	70
A.1. Código QR	76

Índice de Tablas

2.1. Probetas ensayadas.	16
4.1. Tiempos de cruce y ruptura.	35
4.2. Mediana de tiempos de cruce y ruptura.	37
B.1. Variación del parámetro PRL en (%) entre pre-cruce y post-cruce	77
B.2. Variación del parámetro PRH en (%) entre pre-cruce y post-cruce	78
B.3. Variación del parámetro σ_T en (ns), entre pre-cruce y post-cruce	79
B.4. Variación del parámetro σ_F en (MHz) entre pre-cruce y post-cruce	80
B.5. Variación del parámetro A_t en (ns) entre pre-cruce y post-cruce	81
B.6. Variación del parámetro f en (MHz) entre pre-cruce y post-cruce	82

Capítulo 1

Introducción

El avance de tecnologías ha permitido el desarrollo y uso de energías limpias y sustentables beneficiando a la descarbonización del SEP, pero también ha generado nuevos desafíos como soportar niveles de tensión cada vez más elevados con la presencia de armónicas de tensión de alta frecuencia que cambian las condiciones de operación y esfuerzos en el equipamiento eléctrico, haciendo que los sistemas de aislamiento en alta tensión soporten niveles de campo eléctrico cada vez más elevados repercutiendo en su tiempo de vida útil [1].

Los materiales eléctricos aislantes generalmente son certificados y ensayados antes de su puesta en servicio, con el propósito de brindar garantías para que el SEP pueda alcanzar una confiabilidad aceptable. Estudios han demostrado que los materiales poliméricos utilizados como aislantes eléctricos han arrojado resultados satisfactorios al cumplir las exigencias actuales en el SEP [2]. Sin embargo, las imperfecciones durante la fabricación de los materiales y su exposición a campos eléctricos de elevada magnitud generan en el interior de los polímeros las condiciones propicias para el desarrollo del fenómeno conocido como arborización eléctrica, que es considerado uno de los principales mecanismos de falla en los aislamientos poliméricos en alta tensión [3].

Los árboles eléctricos corresponden a canales tubulares de degradación que se forman en el interior de los polímeros, con un crecimiento no uniforme que viene acompañado de un desarrollo dinámico y complejo de descargas parciales (DP). Estas descargas parciales se definen como rupturas eléctricas localizadas en el interior del sistema aislante eléctrico. Además, los árboles eléctricos muestran una estrecha relación con la evolución de las DP, lo que ha llevado a utilizar su análisis para monitorear el crecimiento de estos árboles como medio para diagnosticar la vida útil de conductores eléctricos que contienen aislamiento polimérico. Principalmente, el comportamiento de ambos fenómenos depende de la señal de excitación, y diversos estudios han revelado una sensibilidad a parámetros como la amplitud, la frecuencia y la distorsión armónica (THD) [4].

Hoy en día, el creciente uso de dispositivos de electrónica de potencia cambia la señal de frecuencia industrial pura (50 Hz), superponiendo armónicas de alta frecuencia, lo que a su vez repercute en el aumento de esfuerzos eléctricos al interior del material aislante. Por otro lado, se ha vuelto más complicado realizar el análisis, interpretación y diagnóstico de las descargas parciales (DP) utilizando métodos convencionales [5].

Tradicionalmente el diagnóstico de los aislamientos eléctricos se realiza a través de mediciones y análisis de DP, empleando el análisis resuelto en fase de DP (PRPD) a través de la carga aparente y la fase de ocurrencia se obtiene un resultado gráfico. Por otro parte, se han desarrollado nuevas técnicas que caracterizan la forma de onda de las DP que entregan una solución a la problemática donde se tienen mediciones con la presencia de más de una fuente de DP actuando en simultáneo o mediciones realizadas en ambientes contaminados por agentes externos, identificando los tipos de fuentes de DP (internas, coronas, superficiales, etc) y filtrando el ruido [6,7].

La caracterización de la forma de onda de los pulsos de DP considera información respecto de la física de cada descarga, a través del cálculo de parámetros matemático-estadísticos en el dominio del tiempo y/o frecuencia se generan grupos (*clusters*) en mapas 2D o 3D asociando efectivamente cada pulso a una fuente de DP o ruido electromagnético. Algunos recursos de investigaciones recientes dan a conocer técnicas de clasificación de fuentes como mapas de relación de potencia espectral (*PR - Power Ratio*) y mapas tiempo - frecuencia (*TF maps*) empleadas en la descripción de las etapas en el crecimiento de árboles eléctricos, a través de tendencias de los parámetros específicos. Considerándose una potencial herramienta de diagnóstico que puede predecir el tiempo de vida restante del aislamiento [8].

Los estudios que analizan la influencia de las armónicas de tensión en el crecimiento de los árboles eléctricos y en la evolución de las descargas parciales son escasos. Por lo tanto, resulta necesario explorar dichas técnicas basadas en la forma de onda de las descargas parciales, con la finalidad obtener una descripción del fenómeno de arborización eléctrica a través de relaciones o tendencias entre los parámetros y el crecimiento de los árboles eléctricos, para complementar los análisis resueltos en fase de DP.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de las descargas parciales producidas en el crecimiento de árboles eléctricos en aislamientos poliméricos provocadas ante sollicitación de tensión con contenido armónico.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar mediante el método tradicional de descargas parciales resuelta en fase (PRPD) las descargas parciales (DP) obtenidas en el crecimiento de árboles eléctricos bajo excitación con contenido armónico para conocer su patrón característico, magnitud y fase de ocurrencia.
- Caracterizar el crecimiento de los árboles eléctricos a través del análisis de parámetros en el plano del tiempo y la frecuencia de la forma de onda de las descargas parciales.
- Correlacionar el crecimiento de los árboles eléctricos, tanto en la estructura geométrica como en las descargas parciales, con los tipos de contaminación armónica incluidos en el estudio, para contribuir en el diagnóstico de aislamientos poliméricos.
- Comparar el crecimiento de árboles eléctricos ante excitación de frecuencia industrial pura y con contenido armónico, para determinar la influencia de las armónicas en la degradación.

1.2. Estructura del documento

Este trabajo consiste en 5 capítulos, en los cuales se dan a conocer el contexto del problema y las herramientas que se utilizarán para realizar los análisis de DP, para posteriormente evaluar su capacidad de describir el desarrollo de los árboles eléctricos ensayados bajo la influencia de las armónicas de tensión.

- En el Capítulo 2 se da a conocer el procedimiento experimental que se llevó a cabo en el laboratorio de alta tensión (LAT UTFSM) para realizar las pruebas de envejecimiento acelerado a probetas de resina epóxica.
- En el Capítulo 3 se presenta la metodología de análisis, donde se explica cómo se utilizan los métodos tradicionales de análisis y técnicas de forma de onda de DP, ambos con el fin de caracterizar el crecimiento de los árboles eléctricos.

- En el Capítulo 4 se presentan los resultados de las distintas técnicas aplicadas en el análisis de DP y comparaciones entre ensayos a frecuencia industrial pura y con contenido armónico.
- En el Capítulo 5 se resume lo realizado y se presentan conclusiones generales.

1.3. Revisión bibliográfica

Los nuevos requerimientos de la industria eléctrica crean la necesidad de mejorar la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia. Por una parte, la atención se ha puesto en los sistemas de aislamiento mediante el uso cada vez más frecuente de materiales poliméricos, donde investigaciones se han centrado en conocer sus propiedades físicas, comportamiento y desempeño como aislantes de alta tensión contribuyendo en mejoras a diseños, diagnósticos y en la predicción de vida útil [2].

La exposición de un polímero a un esfuerzo generado por los altos niveles de campo eléctrico, generalmente por la presencia de defectos en el interior del material originados en su proceso de fabricación, se dan las condiciones para desarrollarse una degradación denominada arborización eléctrica. Los árboles eléctricos se definen como canales micrométricos de degradación en el interior del aislamiento eléctrico y se caracterizan por ser defectos progresivos con una tasa de crecimiento no constante [2].

Al interior del material polimérico es posible que se desarrollen distintos tipos de árboles eléctricos dependiendo del tipo de tensión de excitación, frecuencia, temperatura y humedad del ambiente en el que se propaga. Normalmente, debido a su forma se identifican dos tipos de árboles, los denominados tipo rama (*branch*) y arbusto (*bush*) [9].

El análisis y caracterización del crecimiento de árboles eléctricos se puede realizar mediante caracterización geométrica o por análisis de descargas parciales. Este trabajo se enfocará en el estudio de las descargas parciales, las que se definen como una ruptura parcial del aislamiento y tienen un comportamiento dinámico y complejo, por lo que, para lograr entender este fenómeno de tipo estocástico se han utilizado métodos tradicionales como el análisis resuelto en fase y técnicas de separación de fuentes aplicadas a la forma de onda de cada descarga parcial [10, 11].

Debido al extensivo uso de dispositivos de electrónica de potencia la señal a frecuencia industrial pura (50 Hz) se ha contaminado con armónicas de alta frecuencia [1]. Por el motivo anterior, este estudio pretende realizar un aporte al entendimiento de los árboles eléctricos que crecen bajo tensiones con un THD del 40 %, superpuestas por la componente fundamental (50 Hz) y una componente armónica de frecuencia 150, 350 o 550 Hz, desfasadas en 0° o 180°, respecto a la fundamental.

A continuación, se dan a conocer de forma más detallada el fenómeno de las descargas parciales, las técnicas más utilizadas para su análisis y los resultados obtenidos en investigaciones de arborización eléctrica y en sus DP, que han sido producidos por tensiones con contaminación armónica.

1.3.1. Descargas parciales y árboles eléctricos

En los aislantes eléctricos de tipo poliméricos es posible que durante su fabricación queden imperfecciones en su interior como: vacuolas de aire, incrustaciones o contaminaciones, entre otras [12]. En dichas imperfecciones pueden ocurrir concentraciones de esfuerzos eléctricos dando origen a las DP, que se definen como una descarga eléctrica localizada, que puentea internamente parte del aislamiento y comúnmente se reconoce como un síntoma y un mecanismo asociado a la degradación del aislamiento [13].

Los tipos de descarga parciales se presentan en la Figura 1.1 y corresponden a:

- Descargas coronas: son producidas por electrodos puntiagudos que aumentan el campo eléctrico en su alrededor ionizando las moléculas de gas (aire).
- Descargas superficiales: son generadas por un campo eléctrico tangencial y ocurren sobre el aislamiento de alta tensión.
- Descargas internas: son un fenómeno común desarrollado al interior de vacíos o cavidades de forma esféricas o elípticas, rellenos con gases a baja presión donde la resistencia dieléctrica es menor. La actividad de DP internas pueden deteriorar las paredes del vacío en dieléctricos sólidos, dando origen al desarrollo de los árboles eléctricos [12].

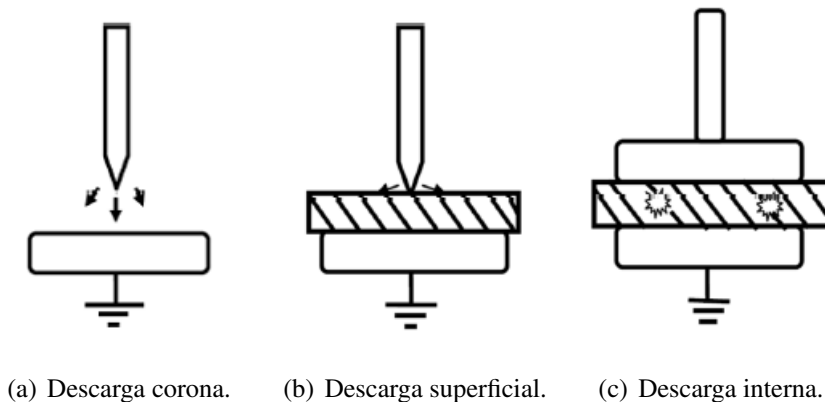
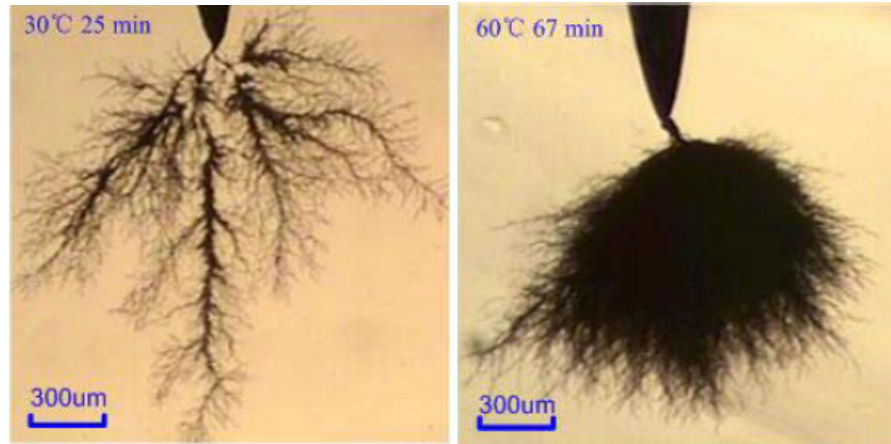


Figura 1.1: Tipos de descargas parciales. Fuente [14].

Otra consecuencia de exponer el aislamiento polimérico a campos eléctricos de elevada magnitud es el posible desarrollo de árboles eléctricos que se definen como canales micrométricos de degradación en el interior del material polimérico que se extienden hasta causar la ruptura del dieléctrico. Un árbol eléctrico se puede desarrollar de dos formas, la primera es de tipo rama (*branch*) el cual se desarrolla desde una rama principal delgada y la segunda de tipo arbusto (*bush*) se desarrolla desde un tronco de mayor tamaño expandiéndose con mayor densidad, tal como se muestra en la Figura 1.2.



(a) Árbol tipo rama.

(b) Árbol tipo arbusto.

Figura 1.2: Tipos de arboles eléctricos. Fuente [15].

1.3.2. Influencia de las armónicas

Todas las funciones periódicas pueden descomponerse mediante una suma infinita de funciones sinusoidales, así lo determinó Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) a través de un teorema conocido como Serie de Fourier [16], donde se identifican las armónicas de una onda de tensión sinusoidal que corresponden a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema (50 o 60 Hz). La contaminación armónica presente en la red es el resultado del uso de convertidores de potencia, dispositivos ferromagnéticos saturables (transformadores, máquinas de rotación y reactores), entre otros.

Las armónicas impares son las más estudiadas en el ámbito industrial de la ingeniería eléctrica debido a su mayor presencia en el sistema eléctrico de potencia (SEP), provocando un mal funcionamiento de los dispositivos eléctricos, tales como sobrecalentamiento, envejecimiento acelerado de los aislamientos y reducción del tiempo vida útil de cables de alta tensión, máquinas eléctricas, tal como motores y transformadores .

La presencia de las armónicas de tensión de alta frecuencia pueden aumentar los valores peak y rms de la señal de excitación, también la variación del campo eléctrico en el interior del aislamiento polimérico produce un aumento de las pérdidas dieléctricas por efecto Joule. Por otro lado, investigaciones realizadas dan a conocer que la contaminación armónica produce cambios en los análisis tradicionales, un ejemplo se da en cambios de patrones PRPD [10, 17] .

En [18] se da a conocer el impacto de las armónicas en la actividad de las descargas parciales durante el crecimiento de los árboles eléctricos. La contaminación armónica fue superpuesta con la frecuencia industrial (50 Hz) creando formas de onda compuestas para realizar los ensayos en probetas de resina epóxica a una tensión de 10.8 kV. Los patrones PRPD resultantes se dan a conocer

en la Figura 1.3.

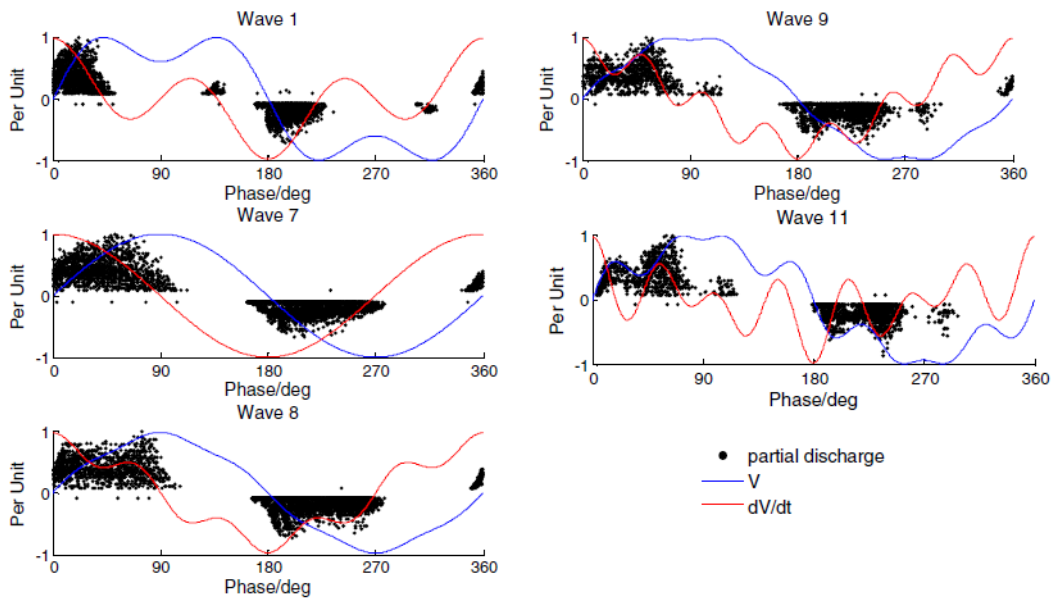


Figura 1.3: Patrones de DP en arborización eléctrica por forma de ondas compuestas. Fuente: [18].

En otra investigación de DP con tensión distorsionada por armónicas de alta frecuencia [5], se obtuvieron resultados similares a los descritos anteriormente. Las señales de excitación que se analizaron son el resultado de la superposición de una componente a frecuencia industrial (50 Hz) y componentes armónicas de tercer (150 Hz), quinto (250 Hz) y undécimo (550 Hz) orden.

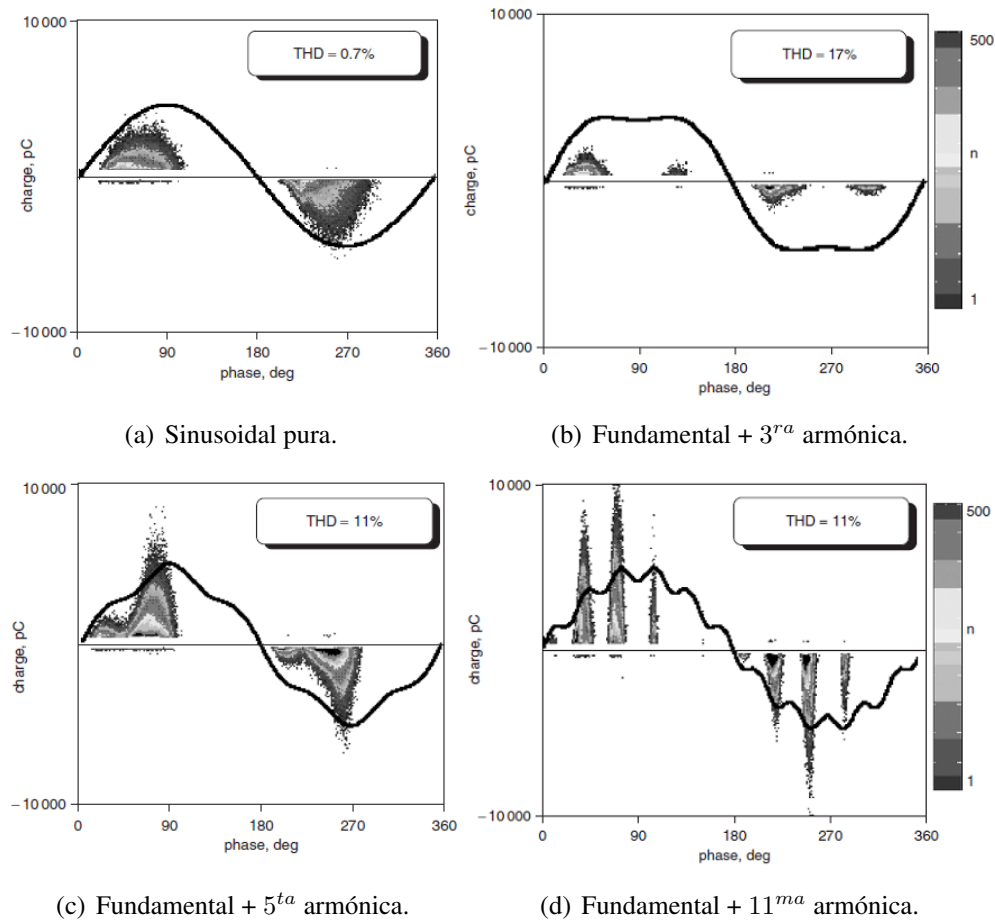


Figura 1.4: Influencia de la contaminación armónica sobre los gráficos PRPD. Fuente: [5].

Las siguientes características son observadas de los patrones PRPD en Figura 1.4:

- Cambio en la magnitud máxima de descarga. $DP_{\max}(b) < DP_{\max}(a) < DP_{\max}(c) < DP_{\max}(d)$.
- Cambio de la fase de ocurrencia en la actividad de DP.
- Cambio en la densidad de las DP.

1.3.3. Técnicas de análisis de descargas parciales.

Análisis resuelto en fase de descargas parciales

El método clásico de análisis resuelto en la fase de DP (PRPD) se utiliza comúnmente para analizar las mediciones de DP. Consiste en extraer información de la carga (q_n) y la fase de ocurrencia (φ) de las DP, producidas por una excitación de tipo periódica como señales sinusoidales. La carga y la fase de ocurrencia de cada pulso de DP se representan de forma gráfica y compacta en un solo ciclo de la señal de excitación, tal como se muestra en la Figura 1.5. Posteriormente, se pueden realizar comparaciones con patrones comunes para identificar el origen y/o tipo de descarga [19].

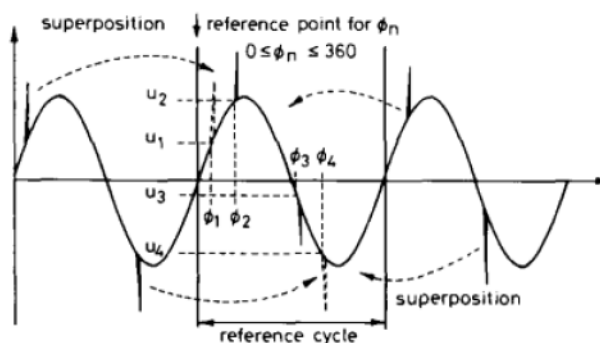


Figura 1.5: Creación de PRPD. Fuente: [19].

Estudios han reconocido patrones en diagramas PRPD de las descargas parciales más comunes de tipo interna, superficial y corona [2]. Dichos patrones se muestran en la Figura 1.6.

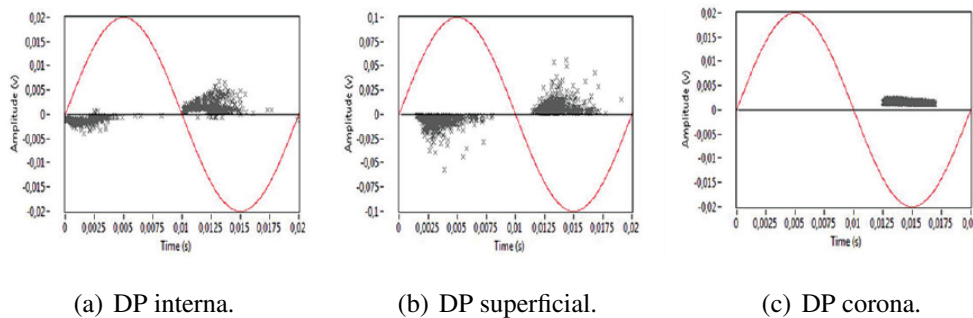


Figura 1.6: Patrones PRPD. Fuente [2].

Técnicas de forma de onda

En la práctica, los diagramas PRPD son patrones complejos, difíciles de identificar y asociar con los tipos más comunes de DP debido a la presencia de más de una fuente de DP en las mediciones, lo que genera inconvenientes al momento de realizar un diagnóstico efectivo [11].

La captura de la forma de onda de los pulsos de las DP mediante el uso de sensores como transformadores de corriente de alta frecuencia (HFTC) y sistemas de adquisición avanzados de mayor ancho de banda que almacenan toda la información relevante. Permitiendo el desarrollo de técnicas que se usan principalmente para mitigar el problema anterior, identificando las fuentes de DP y filtrando el ruido electromagnético presente en las mediciones. Principalmente, las técnicas caracterizan cada pulso de DP a través de parámetros en el dominio del tiempo o de la frecuencia y luego forman grupos (*clusters*) que se asocian con una fuente particular de DP [6].

Las técnicas aplicadas a la forma de onda incorporan la dinámica y física de las DP en los estudios. Se han realizado evaluaciones de los parámetros en el crecimiento de los árboles eléctricos con la finalidad de encontrar algún comportamiento que permita predecir el tiempo de vida restante del aislamiento o el grado de degradación [8].

A continuación, se presentan algunas de las técnicas de forma de onda

- **Técnica de clusterización por potencia espectral:**

La técnica de clusterización por potencia espectral (*SPCT* por su sigla en inglés) consiste en determinar la potencia espectral en dos bandas de la señal. Una banda corresponde a baja frecuencia (f_{1L} , f_{2L}) y otra banda a alta frecuencia (f_{1H} , f_{2H}). La potencia de estas dos bandas se normaliza dividiendo cada una de ellas por la potencia total de la señal en estudio. El resultado de estas dos operaciones se conoce como valores PRL y PRH de las bandas, tal como se definen en sus respectivas ecuaciones (1.1) y (1.2) [8].

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_t} |s(f)|^2} \quad (1.1)$$

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_t} |s(f)|^2}. \quad (1.2)$$

Donde $|s(f)|$ es la magnitud de la transformada de Fourier de un pulso de DP y f_t es la máxima frecuencia analizada. Para cada pulso de DP es posible determinar un valor PRL y PRH que se puede representar de forma gráfica como un punto en un mapa bidimensional (2D), como se detalla en la Figura 1.7.

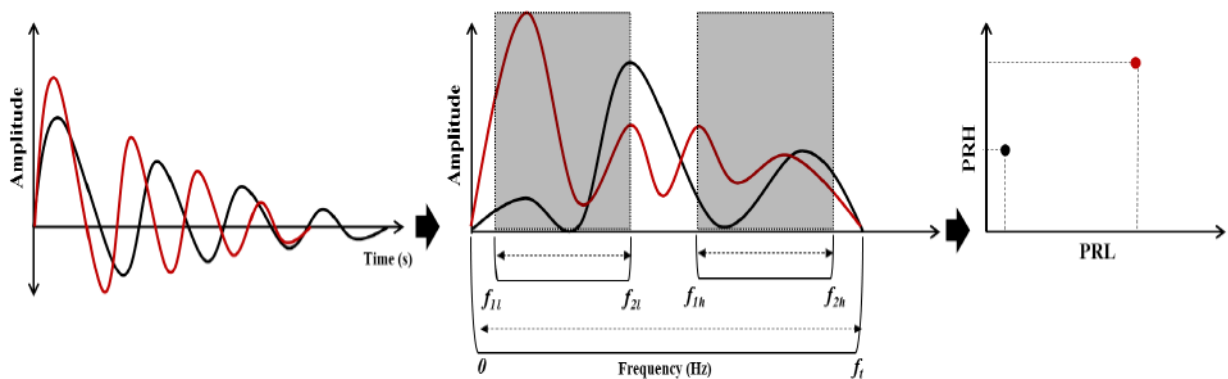
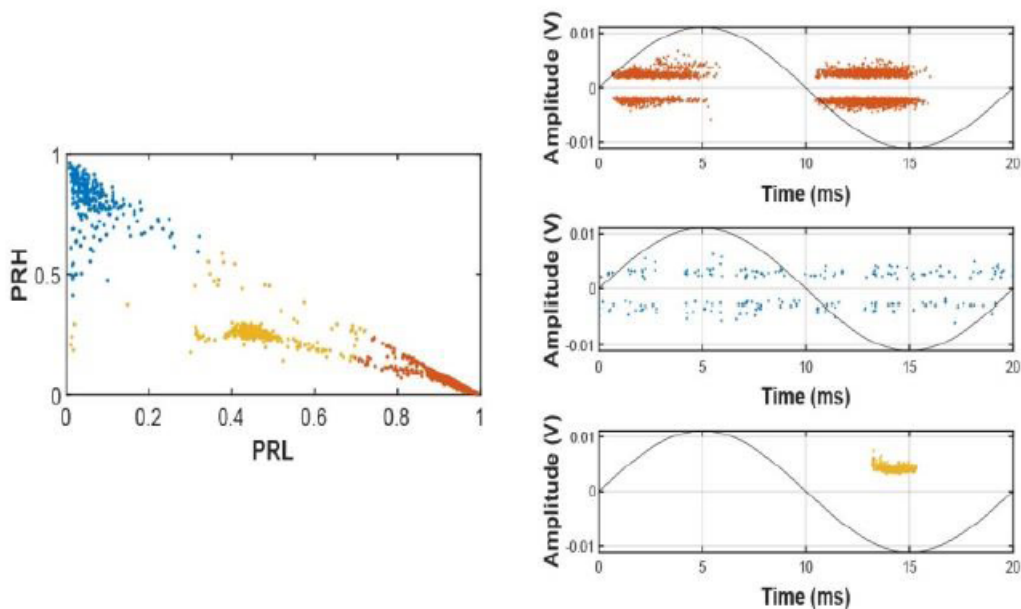


Figura 1.7: Diagrama esquemático de la aplicación de SPCT en los pulsos de DP. Fuente: [6].

Un ejemplo de la efectividad de los mapas PR para separar e identificar las fuentes de DP se da a conocer en [20]. En este trabajo se realizaron mediciones de DP a una bobina de un generador incorporando DP de tipo corona. La Figura 1.8 da a conocer el mapa PR, identificando 3 grupos o *clusters*. A partir de estos grupos, se generaron los diagramas PRPD correspondientes, permitiendo identificar las descargas de tipo internas (en color naranja), ruido electromagnético (en color azul) y descargas de tipo corona (en color amarillo).



(a) Mapa PR.

(b) Diagramas PRPD.

Figura 1.8: Separación de fuentes de DP mediante mapas PR. Fuente: [20].

■ **Mapas tiempo-frecuencia (Mapas TF):**

Los mapas tiempo-frecuencia se aplican para revelar y separar distintas fuentes de DP, su aplicación se basa en la descomposición del pulso de DP en el dominio del tiempo y la frecuencia. Un mapa tiempo-frecuencia se obtiene mediante la duración equivalente de la forma de onda (σ_T) y el ancho de banda equivalente (σ_F) del espectro de cada pulso de DP. Posteriormente, se representa en un mapa (2D) [8]. Las señales a analizar $s(t)$ corresponden a cada pulso de DP y se normalizan inicialmente en el dominio del tiempo, según la ecuación (1.3):

$$\tilde{s} = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad (1.3)$$

Luego, se calcula la desviación estándar de la señal normalizada en los dominios del tiempo y la frecuencia, según las ecuaciones (1.4) y (1.5) para determinar (σ_T) y (σ_F) respectivamente.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (1.4)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df}. \quad (1.5)$$

Los mapas tiempo-frecuencia se han utilizado en investigaciones y se aplican comercialmente para separar múltiples fuentes presentes en las mediciones de DP. Un resultado en [7] es mostrado en la Figura 1.9, en (a) están agrupadas y destacadas las descargas del primer grupo o *cluster* en color negro y del segundo en color rojo, posteriormente en el diagrama PRPD en (b) son identificadas, las primeras corresponden a descargas internas y las segundas son de tipo superficiales.

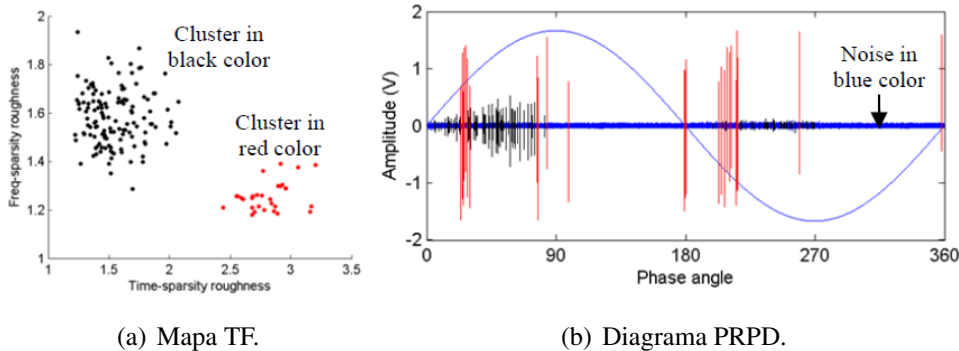


Figura 1.9: Separación de fuentes de DP mediante mapas TF. Fuente: [7].

Capítulo 2

Procedimientos experimentales

En este capítulo se describen los pasos para realizar los ensayos de envejecimiento acelerado a las probetas de resina epóxica. A pesar de que en este estudio se utilizó una data creada por el equipo del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María (LAT UTFSM), es importante explicar cómo se llevaron a cabo las pruebas experimentales, ya que son la base para el desarrollo de esta memoria enfocada en el análisis de mediciones de DP obtenida principalmente por el sistema de adquisición OMICRON MPD 600 y de forma simultánea con el osciloscopio Keysight Infiniium S-Series DSOS104A de última generación con un ancho de banda de 2.5 GHz que permite capturar la forma de onda de cada DP.

En la elaboración de las probetas se utilizó resina epóxica, que tiene la cualidad de ser altamente transparente. De esta manera, se puede realizar un seguimiento del crecimiento de los árboles eléctricos mediante la captura de imágenes ópticas aproximadamente cada 5 segundos, con una cámara DSLR ("*digital single-lens reflex*").

2.1. Elaboración de probetas

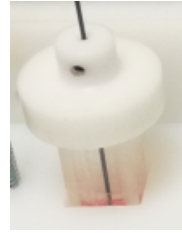
El uso de resina epóxica guarda relación con experiencias previas en el LAT UTFSM y su extenso uso como dieléctrico en equipamiento eléctrico. En la creación de las probetas se utilizó principalmente resina epóxica Mepox-1685/L y Mepox 1124(cl)/2262 que tienen las cualidades de baja viscosidad y alta transparencia, por lo que es posible visualizar en su interior el desarrollo de los árboles eléctricos mediante fotografías claras.

El dieléctrico de las probetas se conformará por una mezcla homogénea, requiriendo una proporción de dos partes de resina y una parte de endurecedor (2:1). Posteriormente, se lleva al horno de vacío mostrado en la Figura 2.1(a) para eliminar las burbujas que aparecen al mezclar ambos componentes. Dicho horno es capaz de llevar la mezcla a aproximadamente 0.004 MPa durante 20 min a temperatura ambiente de alrededor de (~ 25 °C).

Luego, la mezcla se traspa a los moldes de forma rectangular mostrados en la Figura 2.1(b), que previamente se fabrican con material acrílico. El electrodo de alta tensión corresponde a una aguja Ogura, cuyo radio de curvatura es menor a $5 \mu\text{m}$, y se sitúa mediante un sujetador de manera que el espacio entre la punta de la aguja y la base de la probeta (*gap*) sea aproximadamente de 2 mm.



(a) Horno de vacío.



(b) Molde de las probetas.

Figura 2.1: Instrumentos utilizados en la elaboración de probetas. Fuente: [21]

Posteriormente, las probetas en sus respectivos moldes se ingresan nuevamente al horno de vacío para realizar el proceso de curado a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Luego, para homogeneizar las propiedades mecánicas y eléctricas, se realiza un proceso de postcurado en el mismo horno, esta vez a una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión atmosférica.

Finalmente, se extraen las probetas de los moldes de acrílico y se verifica su estado ópticamente mediante el uso de un estereomicroscopio. Aquellas probetas cuyo estado sea aprobado tendrán en su base una cinta adhesiva de cobre para mejorar el contacto eléctrico. De esta manera, se realizará la configuración punta-plano y las probetas estarán listas para iniciar el crecimiento del árbol eléctrico.

2.2. Resumen de las probetas ensayadas

Las 20 probetas ensayadas se les da una nomenclatura con la finalidad de identificarlas y referirse a ellas de mejor manera, detallándose en la Tabla 2.1. Las tres primeras probetas corresponden a ensayos a frecuencia industrial a 50 Hz, el resto es sometida a una excitación compuesta por la superposición de la fundamental a 50 Hz más una componente armónica impar de 150, 350 o 550 Hz, desfasada en 0° o en 180° , dando como resultado señales que tienen en común la amplitud de $12\sqrt{2}$ kV y un THD del 40 %.

Probeta	Tensión (kV _{RMS})	Frecuencia (Hz)	Armónica	Desfase	Nomenclatura
P14	12	50	-	-	50 (a)
P15	12	50	-	-	50 (b)
P16	12	50	-	-	50 (c)
pca 21	13.46	50	3°	0°	3 ^{era} 0° (a)
pca 23	13.46	50	3°	0°	3 ^{era} 0° (b)
pca 30	13.46	50	3°	0°	3 ^{era} 0° (c)
pca 19	9.55	50	3°	180°	3 ^{era} 180° (a)
pca 20	9.55	50	3°	180°	3 ^{era} 180° (b)
pca29	9.55	50	3°	180°	3 ^{era} 180° (c)
pca 14	10.24	50	7°	0°	7 ^{ma} 0° (a)
pca 27	10.24	50	7°	0°	7 ^{ma} 0° (b)
pca 31	10.24	50	7°	0°	7 ^{ma} 0° (c)
pca 26	9.53	50	7°	180°	7 ^{ma} 180° (a)
pca 32	9.53	50	7°	180°	7 ^{ma} 180° (b)
pca 33	9.53	50	7°	180°	7 ^{ma} 180° (c)
pca 25	9.80	50	11°	0°	11 ^{va} 0° (a)
pca 34	9.80	50	11°	0°	11 ^{va} 0° (b)
pca 35	9.80	50	11°	0°	11 ^{va} 0° (c)
pca 24	9.55	50	11°	180°	11 ^{va} 180° (a)
pca 36	9.55	50	11°	180°	11 ^{va} 180° (b)

Tabla 2.1: Probetas ensayadas.

2.3. Banco experimental para la medición de DP en árboles eléctricos

Las descargas parciales y el crecimiento de cada árbol eléctrico son obtenidos mediante un banco de pruebas construido por un estudiante memorista [22]. Este banco de pruebas consiste en el armado de circuitos para la medición de DP y requiere el uso cuidadoso de equipos para generación de alta tensión, medición y monitoreo, detallados a continuación.

2.3.1. Generación de alta tensión

La señal compuesta requerida en los diferentes ensayos realizados en este estudio, inicialmente fueron creadas en MATLAB y luego generadas en baja tensión por un generador de señales Rigol DG-1022, mostrado en la Figura 2.2(a). Posteriormente, para alcanzar la tensión de ensayo, se utilizó un amplificador de alta tensión de la marca Trek, modelo 20/20C-HS, mostrado en la Figura 2.2(b). Este amplificador puede amplificar cualquier señal entre -10 y 10 V por un factor de 2000 V/V, lo que permite amplificar hasta 20 kV *peak*. Por último, se utilizó una resistencia entre 600 y 800 K Ω para limitar la corriente de ruptura, para proteger los equipos. En caso de que se produzca dicho suceso, las protecciones de sobrecorriente desconectarán automáticamente la energía del circuito de medición.



(a) Generador de señales.



(b) Amplificador de tensión.

Figura 2.2: Equipos utilizados en la generación de alta tensión.

2.3.2. Medición en los ensayos

La base de datos generada para el desarrollo de este estudio fue a través de mediciones de DP utilizando el equipo OMICRON y de forma simultánea el osciloscopio Keysight. El avance de los árboles eléctricos fue registrado a través de imágenes ópticas mediante una cámara fotográfica de la marca Canon T6 utilizando un lente apropiado para obtener imágenes claras.

- **Adquisición de DP mediante Omicron MPD 600**

El MPD 600 es un equipo comercial que permite la adquisición de DP y realizar su análisis, se muestra en la Figura 2.3(a) y es utilizado para identificar defectos del aislamiento que posteriormente pueden provocar fallas eléctricas. Este equipo es comúnmente utilizado en mediciones de laboratorio, puestas en servicio en terreno ayudando a la resolución de problemas de equipos eléctricos como transformadores, máquinas rotatorias y cables de potencia.

La información almacenada por el MPD 600 es entregada hacia el MCU 502 a través de un cable de fibra óptica (ver Figura 2.3(b)), quién se encarga de realizar la conversión análoga digital y traspa al computador los vectores de datos correspondientes a la carga aparente (q_n),

a la fase de ocurrencia (ϕ), al tiempo de ocurrencia en segundos (t_n), tensión de referencia (V_m) y tiempo de muestreo (V_{tm}) en segundos, el muestreo se realiza cada $48 \mu\text{s}$.



(a) Unidad MPD 600.



(b) Unidad MCU 502.

Figura 2.3: Equipos de medición y adquisición de DP Omicron. Fuente: [21]

■ Adquisición de DP mediante Osciloscopio Keysight

El Osciloscopio Keysight es un equipo de última tecnología que permite capturar la forma de onda de cada DP, dicha función es realizada a través de la medición simultánea de la señal del pulso de una DP y la referencia de tensión. Las principales características que tiene un osciloscopio Keysight modelo Infiniium S-Series DSOS104A, presentado en la Figura 2.4, son su ancho de banda de hasta 2.5 GHz, un muestreo máximo de 20 GSa/s, contando con cuatro canales de medición independientes.

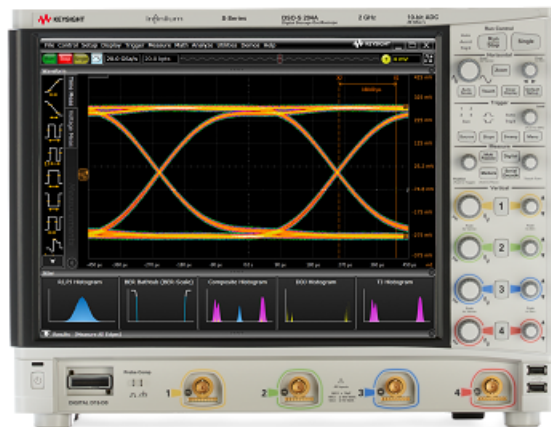


Figura 2.4: Osciloscopio Keysight.

La señal del pulso de una DP se mide en el cable de tierra de la probeta bajo ensayo mediante un sensor de VHF correspondiente a un HFCT de marca Techimp mostrado en la Figura 2.5, las mediciones se realizaron con el osciloscopio utilizando el canal 1 para las DP y el canal 3 para

la tensión de referencia, configurados con una impedancia de entrada de $1\text{ M}\Omega$. Los datos son almacenados en la memoria de forma segmentada, generando archivos de hasta 65536 pulsos de manera continua y agregando el tiempo de ocurrencia de cada DP desde la primera descarga (*tag* de tiempo).



Figura 2.5: HFCT Techimp.

■ Adquisición de imágenes

La captura de imágenes durante el crecimiento de los árboles eléctricos se realizó cada ~ 5 (s) con una cámara reflex Canon T6, como la observada en la Figura 2.6(a). El lente utilizado junto con la cámara fue el Macro lens MP-E 65mm f/2.8 1-5x en conjunto con extensores Kenko de 12, 20 y 30 mm, ambos mostrados en la Figura 2.6 (b) y (c) respectivamente.



(a) Cámara Canon T6.



(b) Lente Macro lens MP-E 65mm f/2.8 1-5x.



(c) Extensores Kenko.

Figura 2.6: Cámara, lente y tubos extensores utilizados para capturar imágenes de árboles eléctricos durante su crecimiento. Fuente: [21]

2.3.3. Circuito esquemático para el crecimiento de los árboles eléctricos

Los elementos que conforman el circuito de medición tienen su representación esquemática en la Figura 2.7, donde se muestra el montaje para llevar a cabo los ensayos. También es posible notar que el tanque en donde se colocan las probetas a ensayar se llena de aceite de silicona con el fin de evitar descargas superficiales que complicarían los análisis.

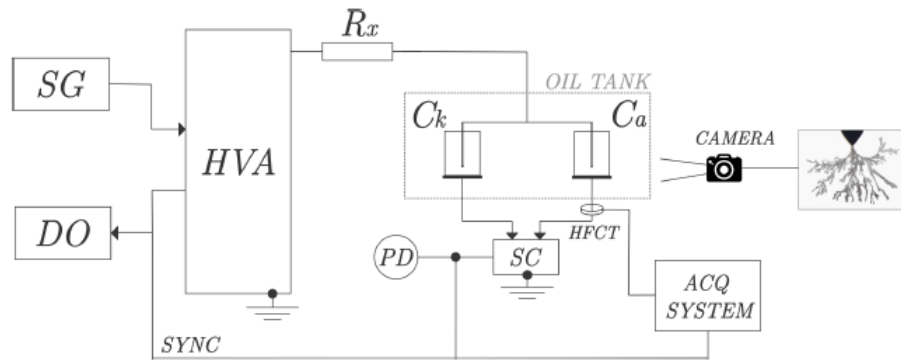


Figura 2.7: Circuito esquemático de medición de DP en el crecimiento de árboles eléctricos. Fuente: [23]

- **SG:** Generador de señales.
- **DO:** Osciloscopio digital de monitoreo.
- **HVA:** Amplificador de alta tensión.
- **Rx:** Resistencia limitadora de corriente 800 kΩ.
- **C_k** y **C_a:** Probeta libre de DP y probeta bajo ensayo.
- **PD:** Medidor de descargas Omicron.
- **SC:** Circuito de sustracción para reducción del ruido.
- **ACQ SYSTEM:** Medidor de forma de onda de DP (Osciloscopio Keysight).
- **HFCT:** Transformador de corriente de alta frecuencia.
- **CAMERA:** Cámara para obtener imágenes de árboles.

Circuito de medición

Una de las posibilidades para medir DP es recomendada en la norma IEC 60270 [13], donde se usa un esquema básico de circuito balanceado presentado en la Figura 2.8. Este circuito utiliza un circuito de acoplamiento (AC) para realizar la sustracción de las señales de ruido (SC en la Figura 2.7). El

funcionamiento se explica en detalle en el Anexo B de la norma en [13]. Se debe notar que para que el circuito funcione adecuadamente se requiere que $C_k \approx C_a$. Para cumplir este requerimiento, construyeron C_k con una geometría similar a C_a (detallado en el documento [21]), utilizando la misma distancia entre aguja y plano en ambas. Sin embargo, la probeta libre de DP se fabrica con un electrodo de punta redonda que extingue la iniciación de árboles en ella, debido a la baja concentración de campo.

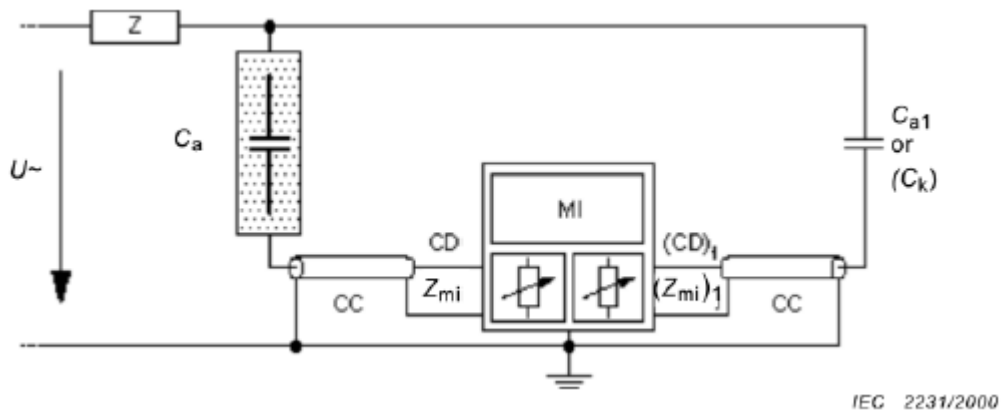


Figura 2.8: Circuito balanceado según norma IEC 60270. Fuente: [13].

El desarrollo e implementación de un circuito de sustracción se realizó en la investigación [22], donde se detallan los componentes del circuito utilizado y procedimiento para definirlo. En la Figura 2.9 se da a conocer el circuito implementado.

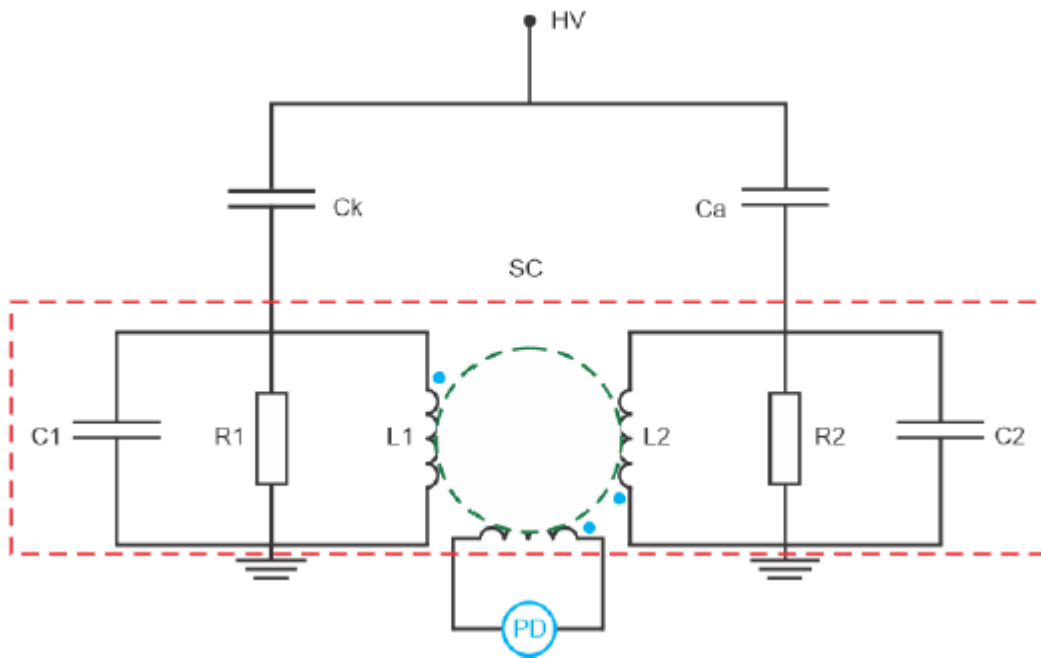


Figura 2.9: Circuito de sustracción (SC) implementado. Fuente: [22].

A continuación, se detalla cada uno de los elementos mostrados en la Figura 2.9:

- C_k : Probeta libre de descargas.
- C_a : Probeta de ensayo.
- C_1 : Condensador 1 de la probeta libre de descargas.
- R_1 : Resistencia 1 de la probeta libre de descargas.
- L_k : Inductancia 1 de la probeta libre de descargas.
- C_2 : Condensador 2 de la probeta de ensayo.
- R_2 : Resistencia 2 de la probeta de ensayo.
- L_2 : Inductancia 2 de la probeta de ensayo.
- PD : Medidor de descargas OMICRON MPD 600.

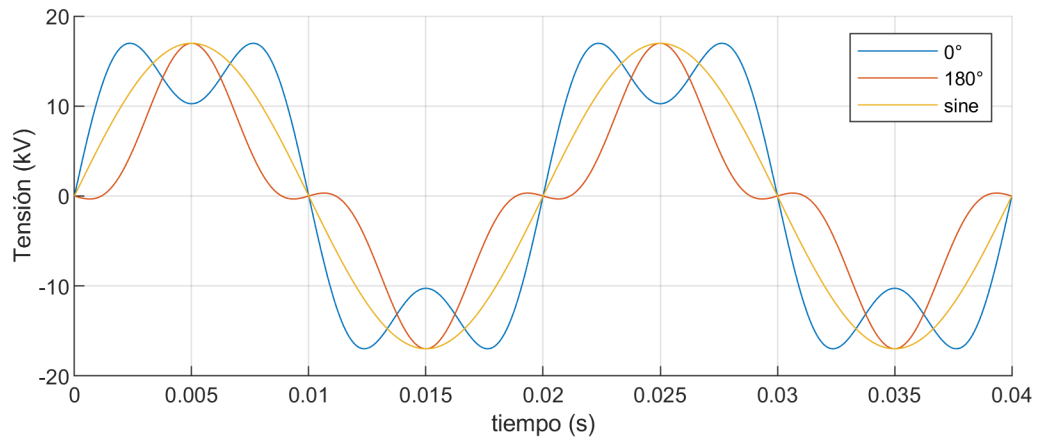
2.4. Iniciación de árboles eléctricos

Las probetas que pasan la inspección deben pasar por una iniciación del árbol eléctrico, que se lleva a cabo mediante la aplicación progresiva de una tensión sinusoidal de 50 Hz durante 5 minutos por cada escalón de tensión de 10, 12, 14 kV, hasta que inicie el proceso de crecimiento. Si no se logra iniciar el árbol eléctrico con el proceso anterior, se varía progresivamente la frecuencia en pasos de 100 Hz, con escalones de 150, 250, 350, 450, 550 Hz manteniendo la tensión a un máximo de 14 kV_{rms} durante la prueba.

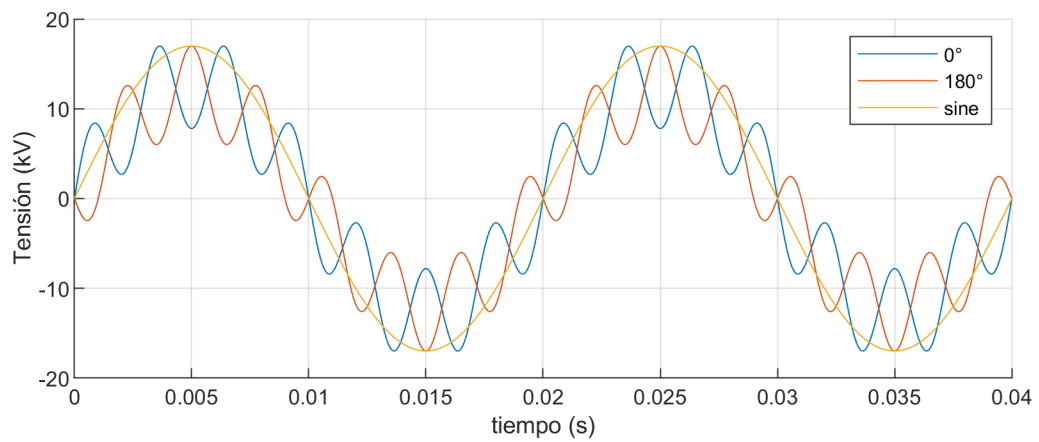
2.5. Señales de excitación utilizadas en los ensayos

A partir de investigaciones previas, se concluye principalmente que las DP tienen una estrecha dependencia con el valor *peak* de las señales de excitación. Por esta razón, se propuso una superposición de una señal sinusoidal de 50 Hz correspondiente a la señal de frecuencia industrial del sistema eléctrico, más una componente armónica de 150, 350 o 550 Hz. A su vez, cada componente armónica se desfasa en 0° para lograr una variación en el tiempo de mayor magnitud (dV/dt) o en 180° , donde la variación de tensión resultante es la menor. Se generaron seis señales resultantes, con valores *peak* idénticos de $12\sqrt{2}$ kV.

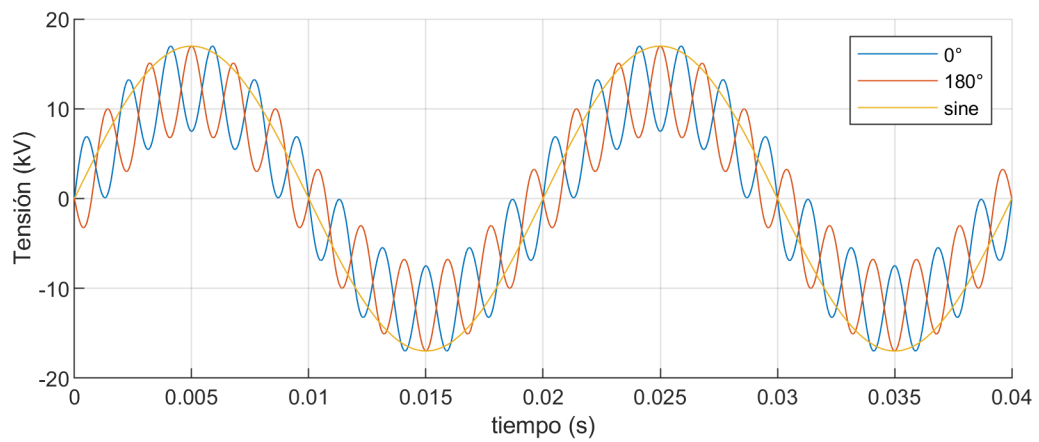
A continuación en la Figura 2.10, se muestran las señales de excitación utilizadas en este estudio:



(a) Fundamental + tercera armónica.



(b) Fundamental + séptima armónica.



(c) Fundamental + undécima armónica.

Figura 2.10: Señales de excitación.

Capítulo 3

Metodología de análisis

La metodología de análisis consiste principalmente en aplicar las distintas técnicas de forma de onda, para obtener parámetros que caracterizan cada pulso de DP, los cuales se agruparán con la finalidad de identificar las diferentes fuentes y ruido presentes en los ensayos. A través de la búsqueda de tendencias en el comportamiento del centro de masa de los grupos (*cluster*), creados por los parámetros en estudio, se comprueba si existe una relación con las etapas de crecimiento de los árboles eléctricos, así se verifica la utilidad de estas herramientas en el diagnóstico de la degradación de aislamientos poliméricos. Este procedimiento se presenta de forma esquemática en la Figura 3.1.

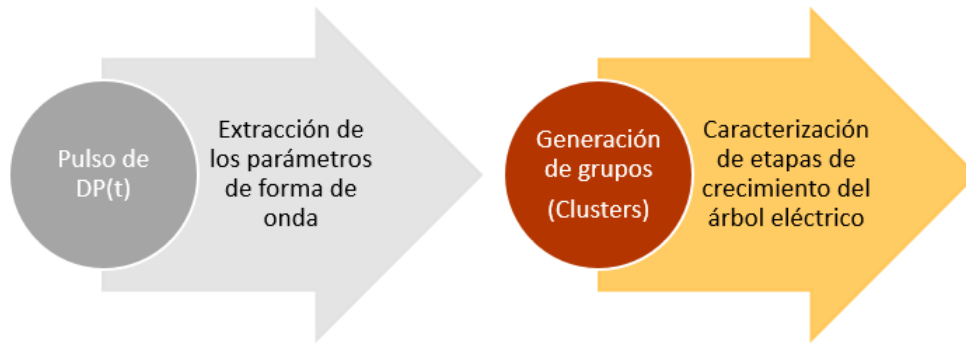


Figura 3.1: Metodología de análisis general.

Este estudio de las DP se enfoca en análisis de forma de onda, y también se utiliza el método tradicional PRPD debido a la información dada a conocer en estudios anteriores donde se han analizado señales a frecuencia industrial superpuestas con componentes armónicas. Ambos se complementan y a su vez se comparan, ya que los análisis de forma de onda son realizados con la data obtenida desde el osciloscopio y los diagramas PRPD son realizados principalmente con información obtenida de OMICRON.

3.1. Análisis resuelto en fase de DP

La descripción del método PRPD se da en la Sección 1.3.3, mediante los diagramas PRPD es posible realizar análisis cualitativos y cuantitativos, ambos enfoques son utilizados en esta memoria. La principal ventaja de este método es su fácil implementación, lo que permite una primera identificación gruesa de las fuentes de DP y en el crecimiento de cada árbol eléctrico, por ende, es posible comparar cualitativamente los diagramas PRPD con patrones típicos informados en la literatura o en las investigaciones realizadas previamente [10].

Los diagramas PRPD se obtuvieron desde el equipo de adquisición de datos de OMICRON y desde la data del osciloscopio. El primer equipo genera los vectores de carga q_n , tiempo de ocurrencia de la descarga t_n y fase ϕ , de una forma similar se trabaja con la data del osciloscopio donde los diagramas PRPD son utilizados principalmente para filtrar el ruido.

A continuación en la Figura 3.2 se muestran diagramas PRPD obtenidas desde los dos sistemas de adquisición de datos:

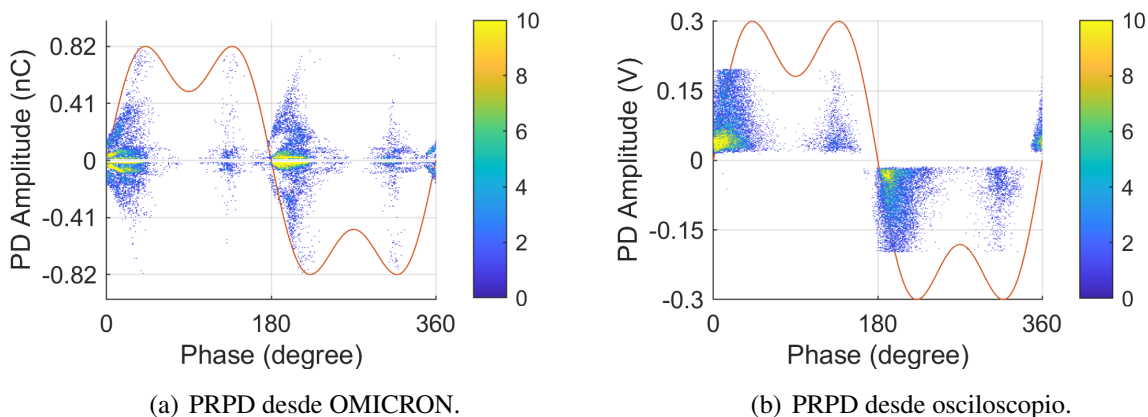


Figura 3.2: Diagramas PRPD en etapa de *post-crucce*.

La Figura 3.2(a) corresponde a un diagrama PRPD con información de OMICRON, donde se considero una muestra aproximada de 20.000 DP. En cambio la Figura 3.2(b) es un diagrama formado desde la data entregada por el osciloscopio, donde se considera una muestra aproximada de 25.000 DP en la etapa de *post-crucce*. Desde ambos diagramas se puede ver que la banda de fase de ocurrencia de las DP sucede cerca de los máximos en el semiciclo positivo de la señal de excitación y en los mínimos para el semiciclo negativo de la señal de referencia, lo que se analizará en más detalle en el Capítulo 4.

Particularmente en este trabajo se generan 4 diagramas PRPD por cada probeta ensayada, donde la serie de tiempo de las DP es utilizada para analizar las etapas de crecimiento de cada árbol eléctrico correspondientes al 30 %, 60 % y 90 % de avance hacia el contraelectro, más una etapa situada en el

post-cruce (si está bien identificada). Dichas etapas se pueden ver en el ejemplo de la Figura 3.3.

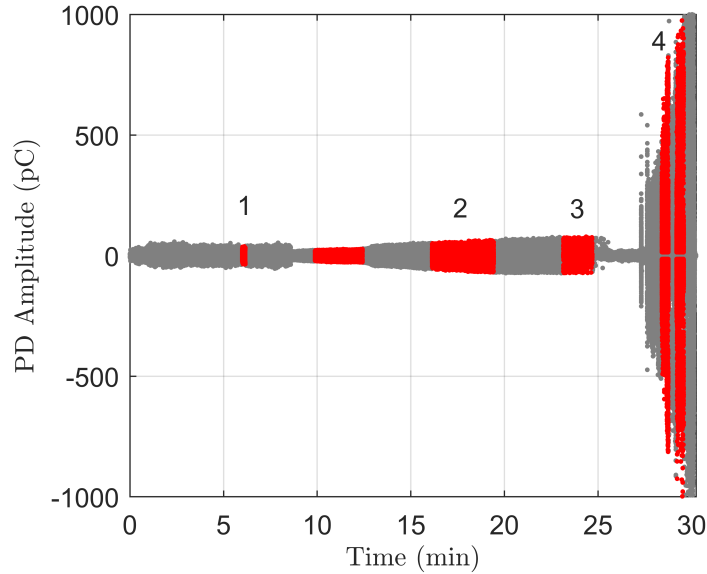


Figura 3.3: Etapas seleccionadas desde la serie de tiempo.

Cabe mencionar una desventaja de obtener los diagramas PRPD mediante los vectores de carga q_n y fase ϕ entregados por OMICRON, es que el filtrado de ruido se realiza mediante la eliminación de descargas bajo un umbral identificado en el mismo diagrama, comúnmente se utilizó un umbral de 2.5 (pC) y en algunos casos hasta 15 (pC). En cambio los diagramas obtenidos mediante los datos del osciloscopio son limpiados a través de técnicas de filtrado de ruido, que se explicarán en detalle más adelante.

Como se mencionó anteriormente los datos analizados para construir los diagramas PRPD corresponden a una muestra representativa en el crecimiento de los árboles eléctricos, por lo que a cada muestra se le pueden calcular algunos momentos estadísticos lineales con la finalidad de complementar el análisis cualitativo con parámetros cuantitativos que caractericen los conjuntos de datos analizados.

Los parámetros utilizados en este estudio se calculan según las expresiones (3.1) a (3.9):

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

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

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

$$\text{Kurtosis : } K_r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4 \sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (3.4)$$

$$\text{Potencia de descarga : } P_{dis} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N q_i V_i \quad (3.5)$$

$$\text{Razón de repetición : } n = \frac{N}{\Delta t} \quad (3.6)$$

$$\text{Descarga máxima : } Q_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(q_1, \dots, q_N) \quad (3.7)$$

$$\text{Descarga media : } Q_{av} = \sum_{i=1}^N |q_i| / N \quad (3.8)$$

$$\text{Carga del percentil 95 : } Q_{95} = \text{Percentil}_{95}(q_1, \dots, q_N). \quad (3.9)$$

Donde N : es el tamaño de la muestra de DP, q_i : corresponde a la carga aparente de la i -ésima DP y V_i : es la tensión de iniciación de la i -ésima descarga. Para mayor información consultar el documento [13].

3.2. Técnicas basadas en la forma de onda de DP

Las técnicas que utilizan la forma de onda de las DP son aplicadas a muestras pertenecientes al total de las DP medidas, el tamaño de cada muestra es mayor a 500 DP y se ubican en las franjas de color rosado claro, tal como se puede visualizar en la Figura 3.4. Posteriormente a cada grupo se le calculan los parámetros PRL, PRH, σ_T , σ_F , A_p , A_t y f que son condensados en el centro de masa para finalmente visualizar la evolución durante el crecimiento del árbol eléctrico obtenido en cada ensayo. En la Figura 3.4 se muestra un resultado del proceso descrito anteriormente.

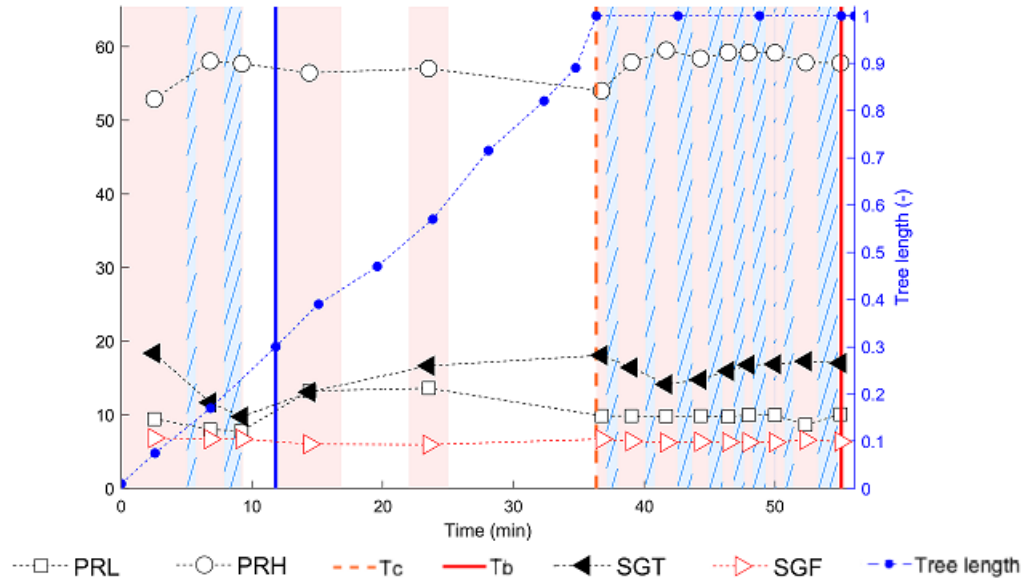


Figura 3.4: Evolución de los parámetros durante el crecimiento del árbol eléctrico.

3.2.1. Mapas PR y TF

La técnica de potencia espectral (SPTC) es aplicada en dos bandas de frecuencia de mayor interés en la señal para obtener los parámetros PRL (*Power Ratio Lower*) y PRH (*Power Ratio High*) de cada descarga. Posteriormente con dichos parámetros se realiza un mapa PR, generalmente el eje de las ordenadas se le asigna al parámetro PRH, mientras que el eje de las abscisas corresponde al parámetro PRL. Un ejemplo de los mapas PR obtenidos en este estudio se da a conocer en la Figura 3.5, y posteriormente a cada grupo o *cluster* correspondiente a una muestra representativa en el tiempo se le determina el centro de masa para evaluar su variación y a su vez se verifica la capacidad de identificar el estado de avance del árbol eléctrico.

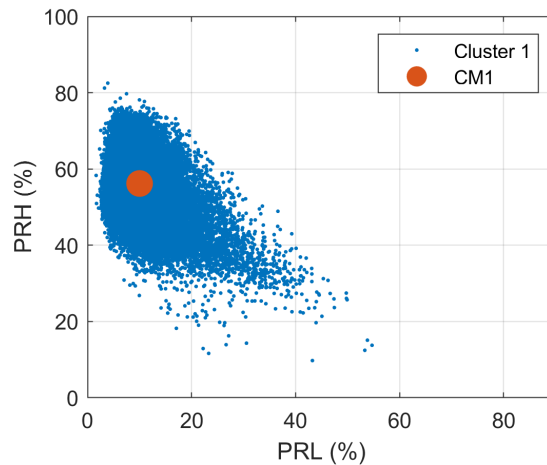


Figura 3.5: Ejemplo de mapa PR.

La técnica conocida como Mapa tiempo-frecuencia (Mapa TF) es aplicada para revelar y separar distintas fuentes de DP, basándose en la descomposición de cada pulso de DP en el dominio del tiempo y la frecuencia. Una vez obtenido los parámetros σ_T y σ_F de cada descarga se genera un mapa 2D en donde el eje de las ordenadas corresponde a σ_F y el eje de las abscisas a σ_T , luego cada grupo es representado por su centro de masa, obteniendo un mapa TF de los centros de masa, en dónde se evalúa el comportamiento de los parámetros a fin de evaluar la capacidad de identificar el estado de avance del árbol eléctrico.

El mapa de los centros de masa que mejor describe el estado de avance del árbol eléctrico fue determinado en [8], concluyendo que la combinación de los parámetros σ_F y PRL muestran tendencias que permiten identificar el estado de avance del árbol eléctrico. Este procedimiento es aplicado a los ensayos realizados a 50 Hz y con armónicas superpuestas, un ejemplo se muestra en la Figura 3.6.

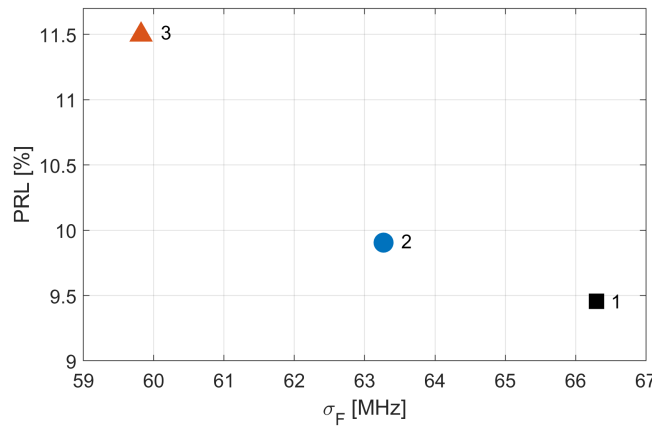


Figura 3.6: Mapa σ_F v/s PRL.

3.2.2. Caracterización de los pulsos de DP por medio de parámetros de frecuencia y de la envolvente

Esta técnica permite obtener tres parámetros que caracterizan un pulso de DP A_p , A_t y f . La caracterización del pulso en el dominio de la frecuencia se realiza mediante f , mientras que A_p y A_t son determinados a través de la envolvente normalizada en el tiempo [24].

El parámetro f se calcula mediante el espectro de frecuencia al aplicar la transformada de Fourier del pulso de DP $F(f)$, según la expresión mostrada en ecuación (3.10). Por lo que f corresponde a la media aritmética de los valores de frecuencia en el intervalo enmarcado por el 70 % del valor máximo en amplitud del espectro, donde la energía del espectro es más significativa, como se muestra en la Figura 3.7.

$$f = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f \cdot F(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} F(f) df} \quad (3.10)$$

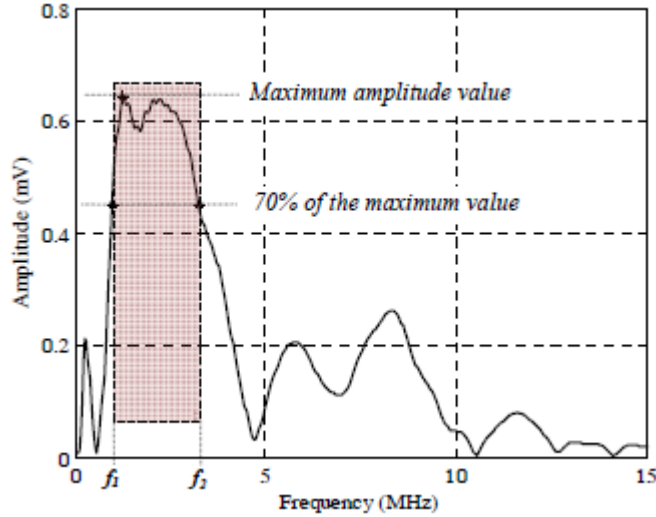


Figura 3.7: Intervalo de frecuencia considerado para la estimación de f . Fuente [24]

Los parámetros A_p y A_t se obtienen desde la función envolvente de un pulso de DP $h(t)$, en este trabajo la envolvente se obtiene a través de la transformada de Hilbert. Luego es necesario normalizar la envolvente dividiéndola por valor *peak* del pulso (I_p), para comparar todas las descargas y evitar que la energía de la señal influya en la caracterización. Por último, los parámetros son obtenidos mediante las expresiones (3.12) y (3.13).

$$h_{pu}(t) = \frac{h(t)}{I_p} \quad (3.11)$$

$$A_p = \int_0^{t_p} h_{pu}(t) dt \quad (3.12)$$

$$A_t = \int_{t_p}^{t_f} h_{pu}(t) dt \quad (3.13)$$

Es posible visualizar en la Figura 3.8 que el parámetro A_p corresponde al área bajo la envolvente normalizada ($h_{pu}(t)$) entre el tiempo inicial 0 y el tiempo de frente t_p . Mientras, A_t corresponde al área bajo dicha curva normalizada entre t_p y el tiempo de cola t_f .

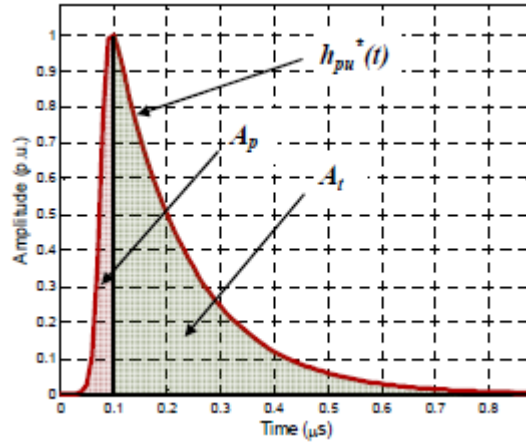


Figura 3.8: Función envolvente normalizada. Fuente [24]

La función principal de esta técnica es la separación de fuentes mediante los parámetros A_p , A_t y f a través gráficas 2D, utilizando: $A_p - f$, $A_t - f$, $A_p - A_t$ y gráfica 3D $A_p - A_t - f$, con la finalidad de agrupar las descargas y asociarlas de forma correcta a un tipo de fuente presente en la medición.

3.3. Filtrado de ruido

En las mediciones se registra las descargas parciales asociadas a la arborización eléctrica más ruido electromagnético, por lo que es necesario separar el ruido y eliminarlo de las DP de interés. La separación se realiza a través de la caracterización de los pulsos de DP obteniendo dos parámetros, el primero corresponde a la skewness (S) que mide la asimetría de los datos de DP en valor absoluto mediante la expresión (3.14) y el segundo se denomina F que caracteriza el espectro de frecuencia mediante la expresión (3.15).

$$S = \frac{\sum (s(n) - \bar{s})^3}{\sigma^3(N - 1)} \quad (3.14)$$

$$F = f_{m\acute{a}x} \frac{\int_{f_a}^{f_b} F(f) df}{\int_0^{f_{end}} F(f) df} \quad (3.15)$$

Donde $s(n)$: corresponde a cada dato muestreado en el tiempo y debe estar normalizado previamente; σ es la desviación estándar de los datos normalizados; \bar{s} es el promedio, N la cantidad total de datos; $F(f)$: corresponde al espectro de frecuencia de la señal; $f_{m\acute{a}x}$: es la frecuencia donde se ubica la máxima amplitud del espectro, la que se multiplica por la energía espectral en el rango de frecuencias entre f_a y f_b . Los valores de frecuencia f_a y f_b se obtienen cuando $F(f)$ intercepta al valor P_{5-95} , este último se calcula mediante el promedio de los datos entre el 5 % y 95 % más significativo del espectro, eliminado los datos excedentes inferiores y superiores. La Figura 3.9 destaca los valores más importantes en la obtención del parámetro F.

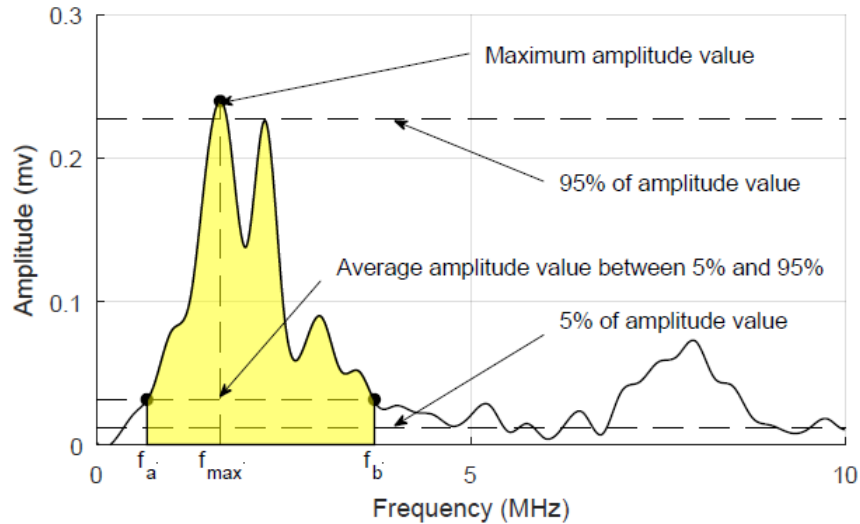


Figura 3.9: Diagrama de la obtención de F . Fuente [24]

Con los parámetros descritos anteriormente se forma un mapa SF, donde el parámetro que presenta una mayor distinción para identificar el *cluster* de ruido es S , tomando valores entre 0 a 5 (-), por lo que las DP asociadas a árboles eléctricos presentan valores de S superiores, indicando una distribución más asimétrica. Es probable que descargas de árbol sean eliminadas junto al ruido debido a su similar comportamiento. La Figura 3.10 muestra el procedimiento para separar el ruido de las descargas que ocurren al propagarse el árbol eléctrico.

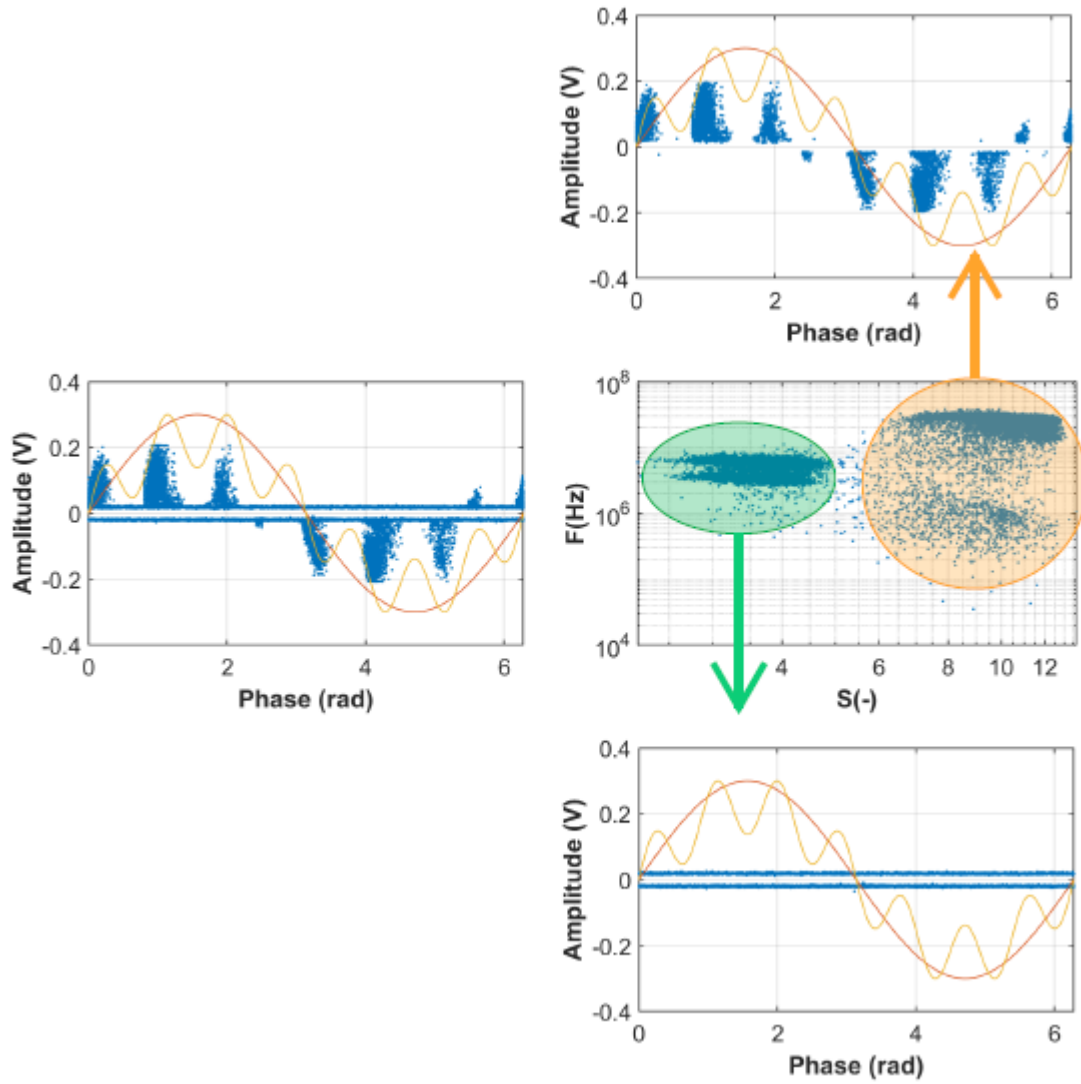


Figura 3.10: Proceso de filtrado.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En el siguiente capítulo se dan a conocer los resultados y análisis obtenidos al aplicar los métodos descritos en los capítulos 1 y 3 a la base de datos generada a través de ensayos que se realizaron en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, para estudiar el fenómeno de las DP en el crecimiento de los árboles eléctricos utilizando señales de excitación a frecuencia industrial superpuestas con armónicas de tensión de mayor frecuencia (150, 350 y 550 Hz), desfasadas en 0° o en 180° a una tensión *peak* de $12\sqrt{2}$ kV.

En primer lugar, se llevó a cabo el análisis de las DP mediante el método tradicional PRPD, lo que permitió visualizar la evolución de las DP en el desarrollo de los árboles eléctricos. Luego, se realizó un análisis cuantitativo utilizando momentos estadísticos y otros parámetros descritos en la norma IEC-60270 [13].

La segunda forma de análisis de las DP consistió en utilizar técnicas de forma de onda para obtener parámetros en el dominio del tiempo y de la frecuencia para distintos momentos durante el crecimiento de los árboles eléctricos. Luego, se evaluó la capacidad de estos parámetros para describir las etapas del crecimiento de los árboles eléctricos mediante tendencias crecientes o decrecientes. También se analizaron las variaciones recurrentes de algunos parámetros en las etapas previas y posteriores al cruce de los árboles eléctricos hasta el contra-electrodo plano, con el fin de identificar dicho suceso.

Por otra parte, se realizó una asociación de los parámetros σ_F y PRL en un mapa bidimensional, ya que estudios recientes proponen dicho mapa como una herramienta potencial para el diagnóstico en la descripción del estado de avance de los árboles eléctricos [8].

4.1. Tiempos de cruce y ruptura

A continuación, en la Tabla 4.1 se presentan los tiempos de cruce y ruptura de los ensayos realizados en este estudio. El tiempo de cruce (T_c) corresponde al tiempo que demora el árbol eléctrico en atravesar completamente el aislamiento entre la punta del electrodo de alta tensión y el contra-electrodo plano aterrizado, tomando valores entre 21 a 49 minutos. Por otro lado, el tiempo de ruptura (T_r) corresponde al momento que ocurre la falla en la probeta estableciéndose un camino de mayor conductividad entre ambos electrodos, presentando tiempos que varían de 28 hasta 294 minutos.

Ensayo	T_c (min)	T_r (min)
50 Hz (a)	26	28
50 Hz (b)	25	34
50 Hz (c)	26	47
3 ^{ra} 0° (a)	49	182
3 ^{ra} 0° (b)	36	37
3 ^{ra} 0° (c)	27	30
3 ^{ra} 180° (a)	48	184
3 ^{ra} 180° (b)	32	43
3 ^{ra} 180° (c)	36	55
7 ^{ma} 0° (a)	37	294
7 ^{ma} 0° (b)	23	23
7 ^{ma} 0° (c)	35	153
7 ^{ma} 180° (a)	28	94
7 ^{ma} 180° (b)	23	41
7 ^{ma} 180° (c)	33	50
11 ^{va} 0° (a)	21	33
11 ^{va} 0° (b)	38	44
11 ^{va} 0° (c)	38	60
11 ^{va} 180° (a)	22	52
11 ^{va} 180° (b)	31	40

Tabla 4.1: Tiempos de cruce y ruptura.

El gráfico de barras presentado en la Figura 4.1 es realizado con los datos de la Tabla 4.1, las barras azules representan los tiempos de cruce y las barras anaranjadas los tiempos de ruptura, es posible visualizar que los tiempos de cruce presentan una menor variabilidad que los tiempos de ruptura. En algunos ensayos la etapa de *post-cruce* tiene una mayor duración, por lo que su tiempo de ruptura resulta cercano a 8 veces el tiempo de cruce, lo cual es atribuido al comportamiento estocástico de las DP y al desarrollo de abundantes ramificaciones del árbol eléctrico.

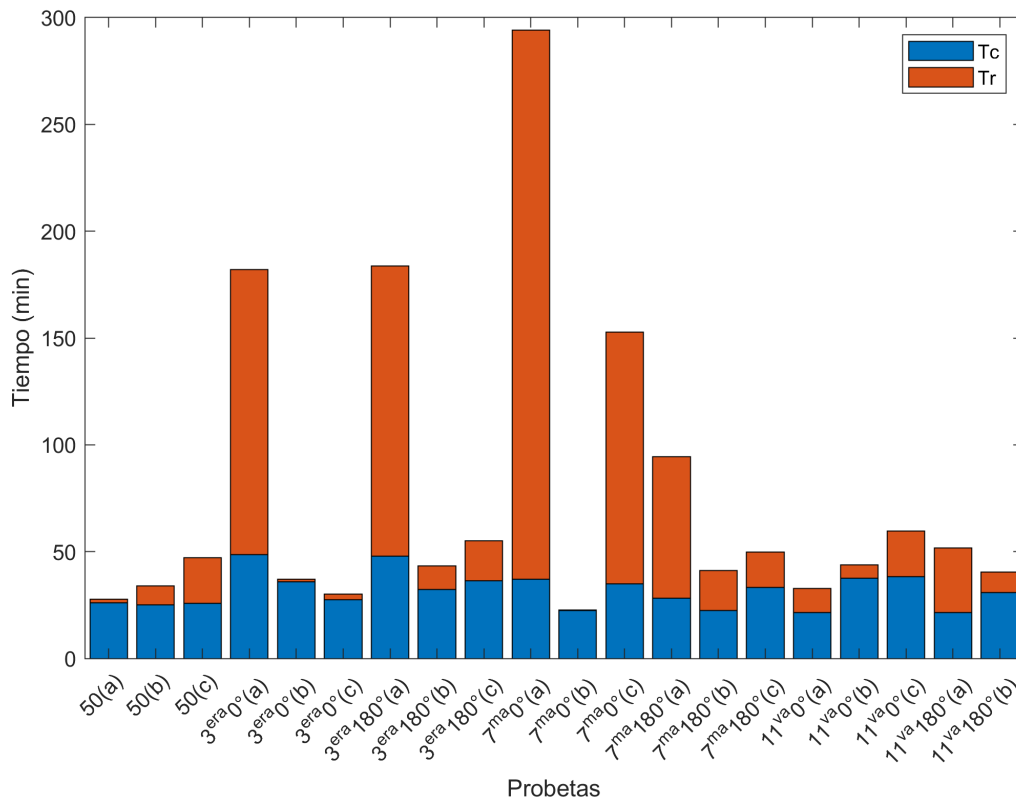
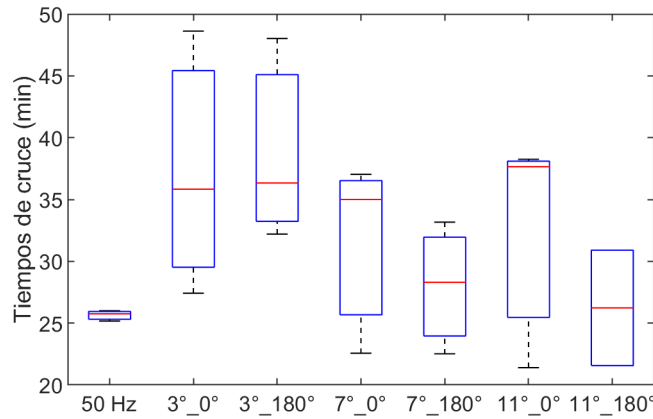


Figura 4.1: Tiempos de cruce y ruptura.

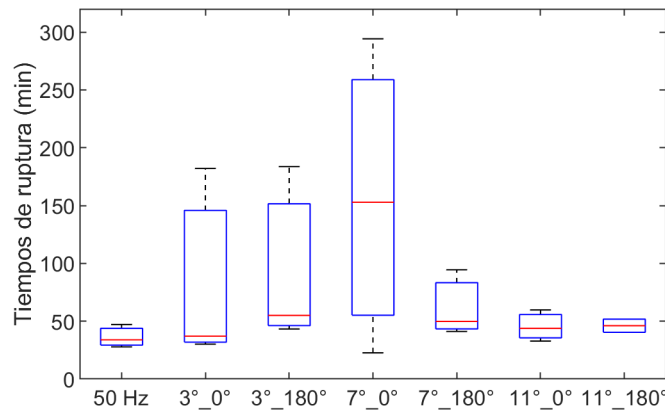
En la Figura 4.2 se presentan gráficas de tipo *box-plot*, en las cuales la mediana se muestra como el valor indicado por una línea roja dentro de las cajas. La mediana tiene la cualidad de ser menos sensible a los datos extremos, por lo que se considera un indicador más robusto. Se observa que los valores de la mediana para los tiempos de cruce y ruptura en los ensayos a frecuencia industrial pura (50 Hz) son menores en comparación con los casos que presentan contaminación armónica. Además, el tamaño de las cajas indica que en los ensayos con contaminación armónica los tiempos de cruce y ruptura presentan una mayor variación con respecto a la mediana.

En los ensayos superpuestos con armónicas, es posible notar que los tiempos de cruce disminuyen a medida que la frecuencia de dichas armónicas aumenta, esta leve dependencia no es cumplida por los casos que incluyen la undécima armónica sin desfase (11° 0°), tal como se puede ver en la Figura 4.2 (a) donde la mediana del tiempo de cruce es mayor que el resto de los casos.

Por otra parte, los tiempos de ruptura mostrados en la Figura 4.2 (b) presentaron un comportamiento creciente hasta los casos que incluyen la séptima armónica sin desfase (7° 0°), luego sigue un comportamiento decreciente, salvo en este caso es posible notar que la mediana de los tiempos de ruptura varía entre los 34 a 55 min.



(a) Tiempo de cruce.



(b) Tiempo de ruptura.

Figura 4.2: *Box-plot* tiempos de cruce y ruptura.

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de la mediana asociados a las gráficas *Box-plot* de la Figura 4.2. En los ensayos a 50 Hz, la mediana del tiempo de cruce es aproximadamente de 26 minutos y para el tiempo de ruptura es de 34 minutos, lo que indica etapas de post cruce de corta duración. En contraste, los ensayos con contaminación armónica presentan valores de mediana entre 26 y 38 minutos para los tiempos de cruce, mientras que para los tiempos de ruptura la mediana oscila entre 37 y 153 minutos.

	50 Hz	3 ^{ra} 0°	3 ^{ra} 180°	7 ^{ma} 0°	7 ^{ra} 180°	11 ^{va} 0°	11 ^{va} 180°
Med {T _c } (min)	25.75	35.83	36.33	35.00	28.30	37.65	26.23
Med {Tr} (min)	33.92	37.08	55.07	152.87	49.83	43.82	46.12

Tabla 4.2: Mediana de tiempos de cruce y ruptura.

4.2. Análisis de descargas parciales resueltos en fase

A continuación se muestran diagramas PRPD para cada una de las distintas señales de excitación presentadas en este estudio. Estos diagramas se realizaron en diferentes etapas que corresponden al 30 %, 60 % y 90 % de crecimiento de los árboles eléctricos más una etapa posterior al cruce (*post-cruce*).

- Señal a frecuencia industrial, probeta 50 Hz (b):

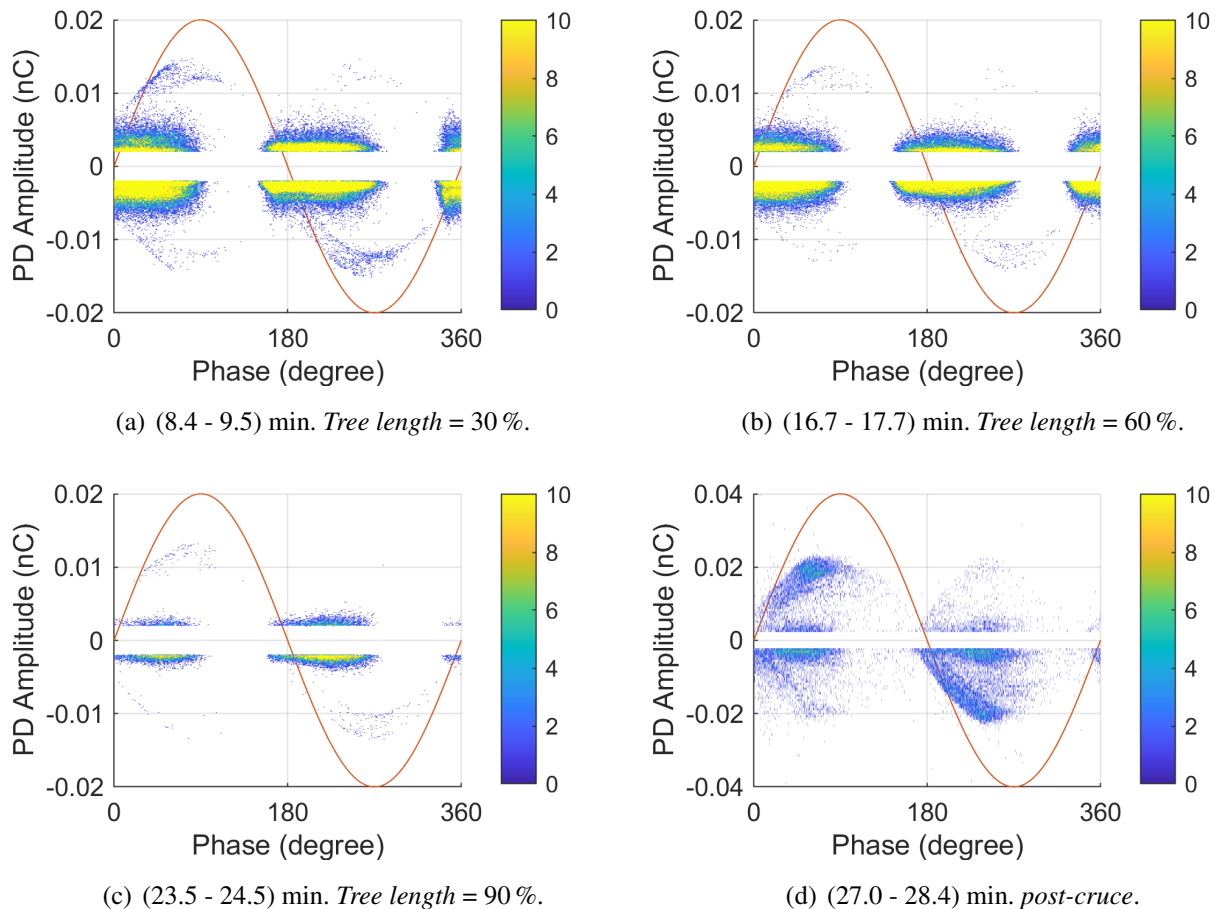


Figura 4.3: PRPD a frecuencia industrial 50 Hz (b).

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación sinusoidal de 50 Hz se presentan en la Figura 4.3. La ocurrencia de las DP en el primer intervalo se da entre el comienzo del pulso positivo y el máximo de la señal de tensión sinusoidal, mientras que en el segundo intervalo las DP ocurren entre el comienzo del pulso negativo y el mínimo de la señal de tensión (aproximadamente).

Los primeros tres diagramas (a), (b) y (c) describen el crecimiento del árbol eléctrico y muestran un patrón común asociado a "tortugas y alas" ("*turtle and wings*") [25]. En cambio, en la

etapa *post-cruce* (d), las DP duplican su magnitud, evidenciando el proceso de degradación del aislamiento. Además, en el diagrama PRPD de la etapa *post-cruce* se observa una ampliación de la fase de ocurrencia de las DP, aunque la mayor concentración de DP sigue ocurriendo en los tramos descritos anteriormente en las etapas de crecimiento.

- Señal con fundamental más tercera armónica sin desfase, probeta 3^{era}0° (c):

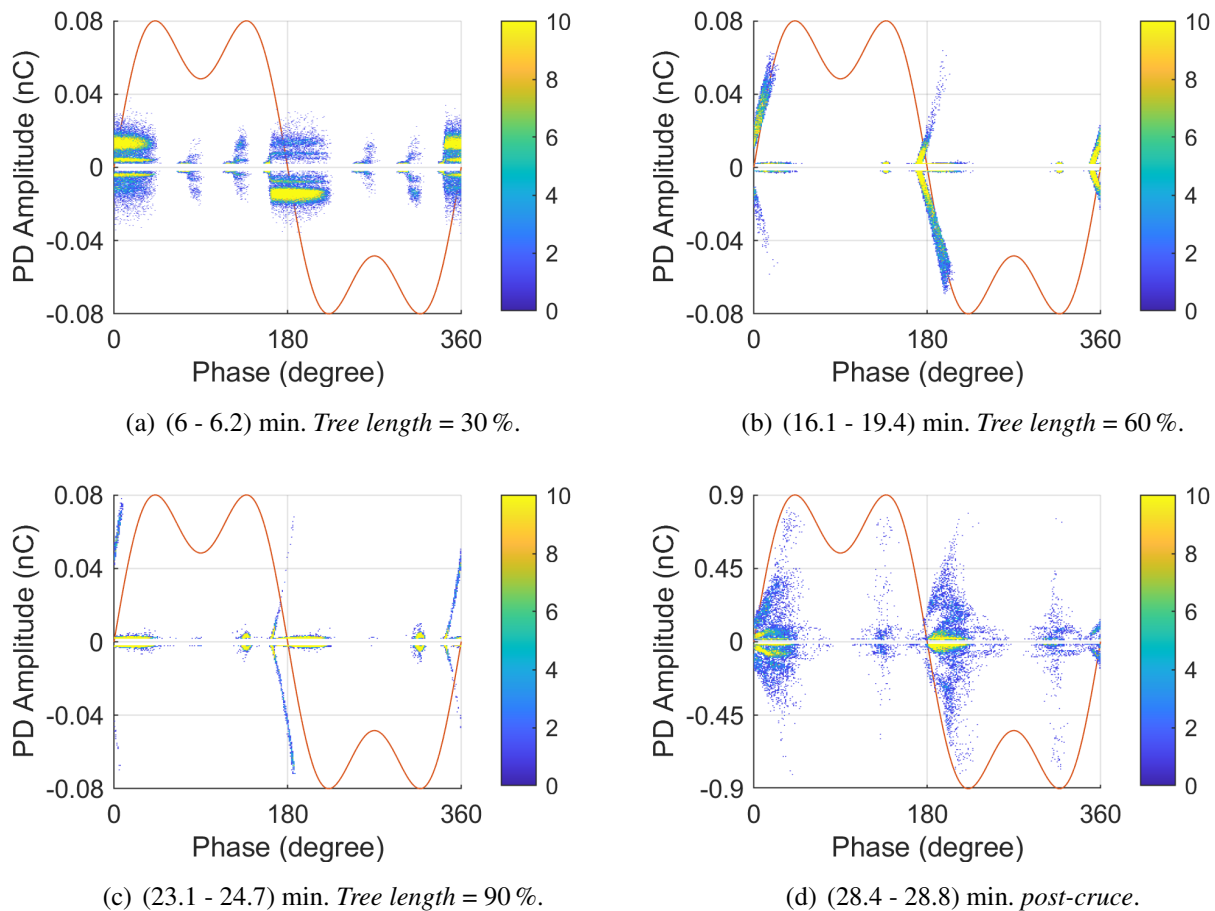


Figura 4.4: PRPD fundamental + tercera armónica sin desfase.

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación compuesta por la fundamental más la tercera armónica sin desfase se muestran en la Figura 4.4. Todos estos diagramas tienen en común la ocurrencia de las DP en intervalos cercanos a una variación de la tensión (dV/dt). Los patrones observados en la etapa de *post-cruce* en (d) son similares a los presentados en la literatura para la fundamental más contaminación de la tercera armónica sin desfase [5].

La etapa inicial en (a) destacan 2 grupos de mayor concentración de DP, donde la ocurrencia de las DP se da en los intervalos de mayor variación de tensión, mientras que los otros 4 grupos son de baja concentración.

En las etapas intermedias (b) y (c), el patrón común identificado presenta dos grupos en los intervalos donde ocurre la mayor variación de tensión. Y en la etapa *post-cruce* en (d), se identifican 4 grupos, donde 2 grupos presentan una mayor concentración, también donde ocurre la mayor variación de tensión. Las DP en (d) son aproximadamente diez veces mayores en magnitud, evidenciando así el proceso de degradación del aislamiento.

- Señal con fundamental más tercera armónica desfasada en 180° , probeta 3^{era} 180° (b):

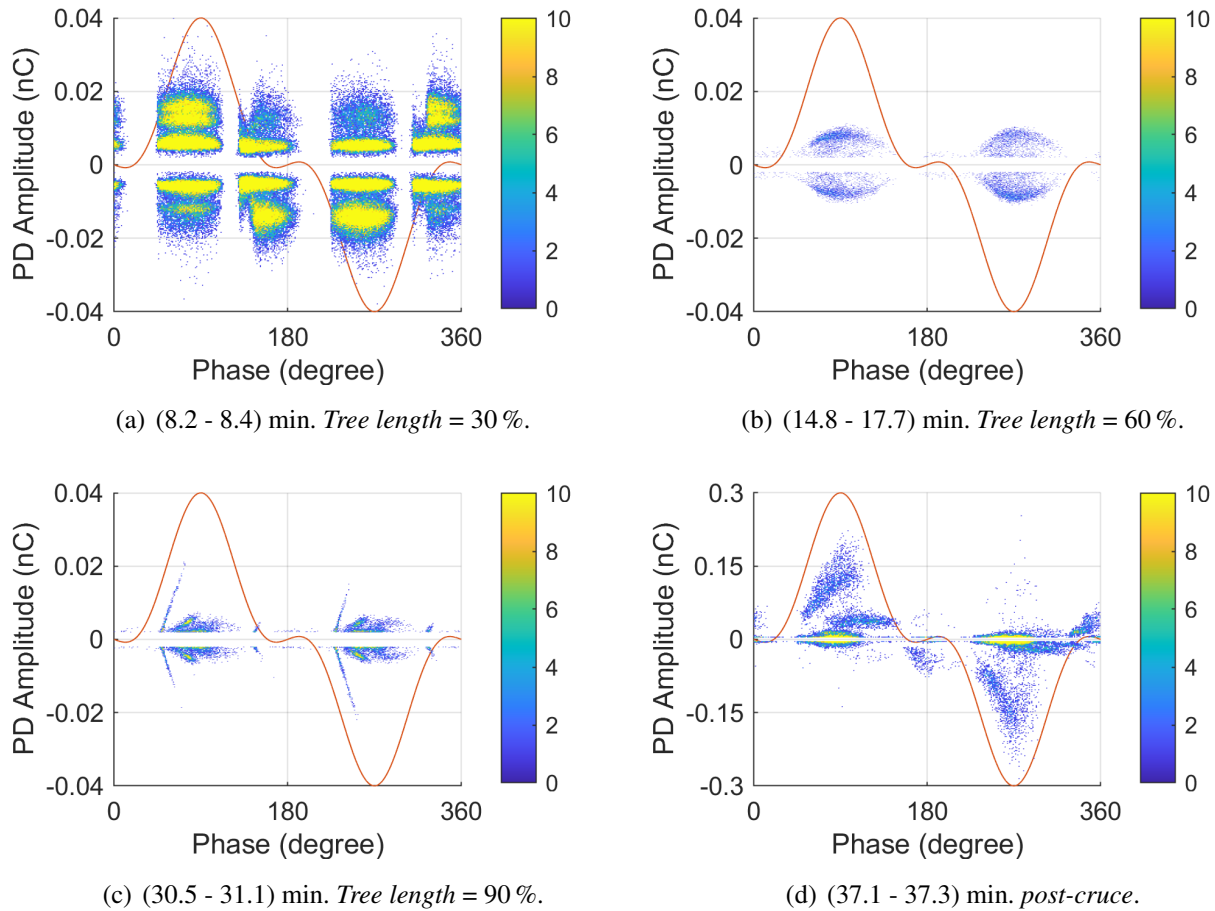


Figura 4.5: PRPD fundamental + tercera armónica desfasada en 180° .

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación compuesta por la fundamental más la tercera armónica desfasada en 180° se muestran en la Figura 4.5. Todos tienen en común la ocurrencia de las DP alrededor de los máximos y mínimos de la señal de excitación, lo cual es claramente apreciable en la etapa inicial (a) donde se observan 4 intervalos de ocurrencia de DP. Mientras que en las etapas siguientes (b), (c) y (d) se destacan 2 intervalos de ocurrencia, donde las DP se concentran en los máximos y mínimos globales de la señal.

De manera similar a los casos anteriores, en la etapa de *post-cruce* (d), las DP son hasta seis veces mayores en magnitud, evidenciando así el proceso de degradación.

- Señal con fundamental más séptima armónica sin desfase, probeta $7^{\text{ma}}0^\circ$ (a):

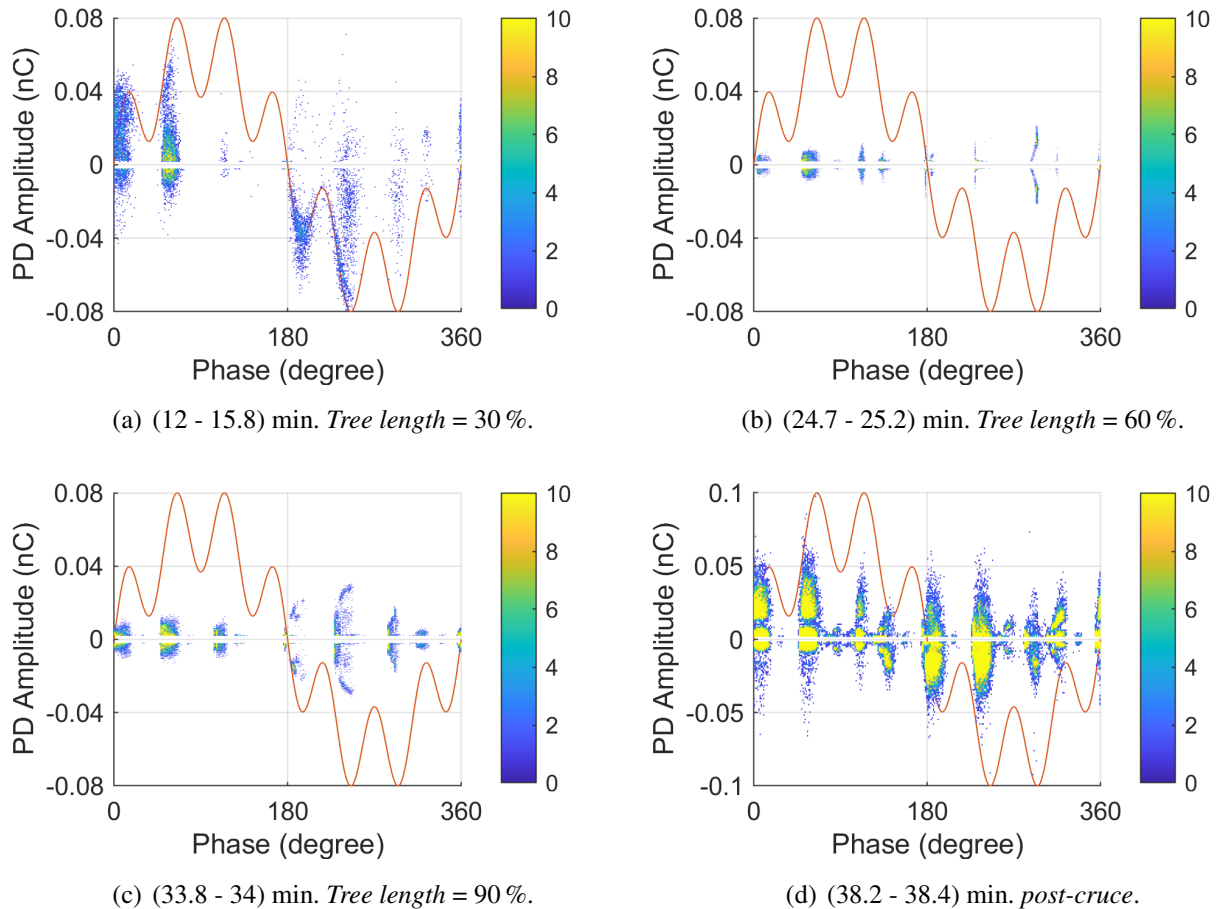


Figura 4.6: PRPD fundamental + séptima armónica sin desfase.

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación compuesta por la fundamental más la séptima armónica sin desfase se muestran en la Figura 4.6. La ocurrencia de las DP se da generalmente cuando la polaridad de la señal de tensión de excitación y su variación (dV/dt) toman un mismo valor, positivo o negativo. Es posible notar que a medida que el orden de la contaminación armónica aumenta, también lo hacen los grupos de DP como en los diagramas PRPD de la Figura 4.6, señalando un cambio dependiente del orden de la armónica presente.

De manera similar a los casos anteriores, las DP son diez veces mayores en magnitud en la etapa de *post-cruce* en (d), evidenciando así el proceso de degradación.

- Señal con fundamental más séptima armónica desfasada en 180° , probeta $7^{\text{ma}}180^\circ$ (c):

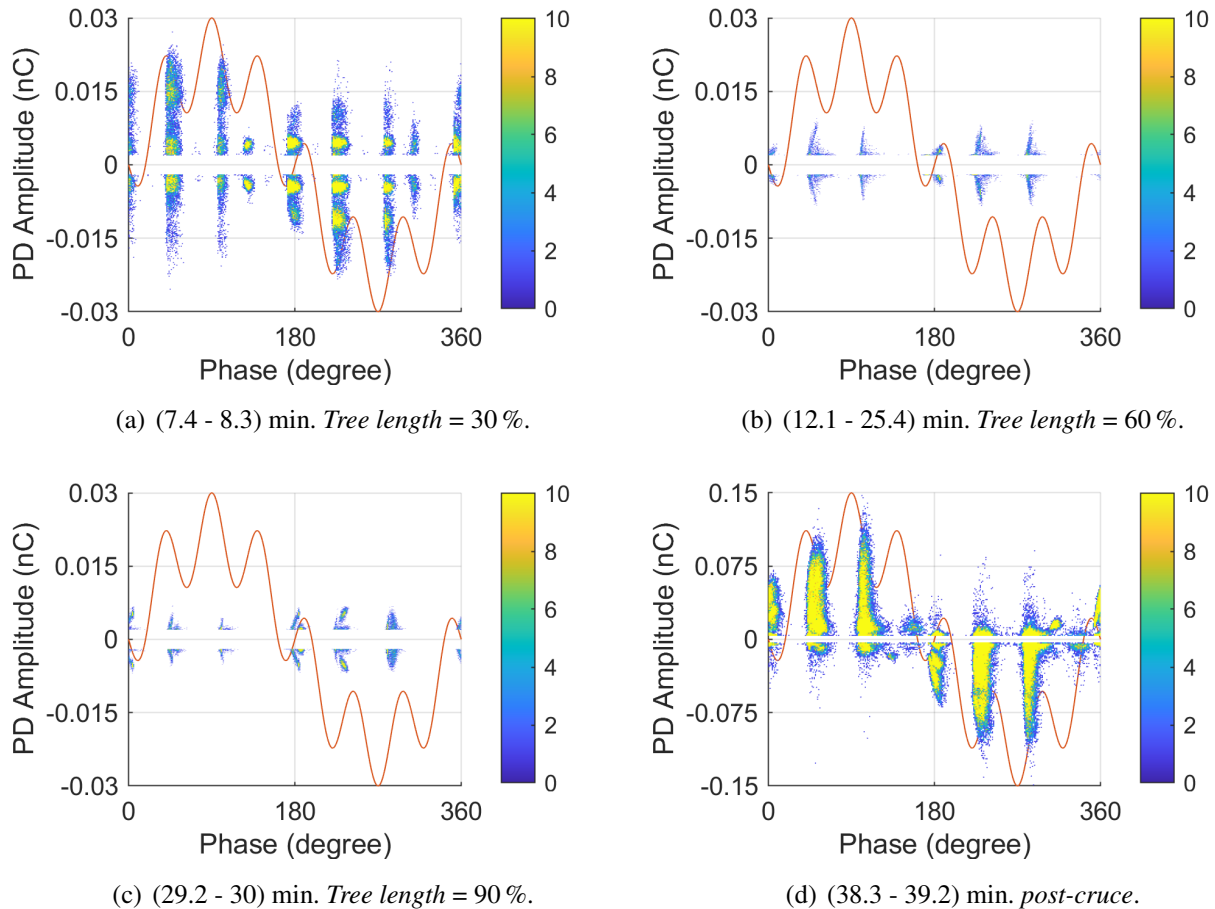


Figura 4.7: PRPD fundamental + séptima armónica desfasada en 180° .

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación compuesta por la fundamental más la séptima armónica desfasada en 180° se muestran en la Figura 4.7. Las descargas parciales (DP) ocurren después de los máximos de la señal de excitación cuando su magnitud es positiva y después de los mínimos de la señal de excitación cuando su magnitud es negativa, y estos casos se encuentran en intervalos donde hay una variación de tensión (dV/dt).

El patrón característico identificado en los diagramas PRPD (b), (c) y (d) presenta seis grupos de carga positiva y negativa, mientras que en la etapa inicial (a) se identifican 2 grupos extras en comparación con los diagramas posteriores, uno de baja magnitud y otro de baja concentración, ambos cercanos a un grupo de mayor concentración.

Por otra parte, de manera similar a los casos anteriores, las DP son seis veces mayores en magnitud en la etapa de *post-cruce* en (d), evidenciando así el proceso de degradación.

- Señal con fundamental más undécima armónica sin desfase, probeta 11^{ma}0° (b):

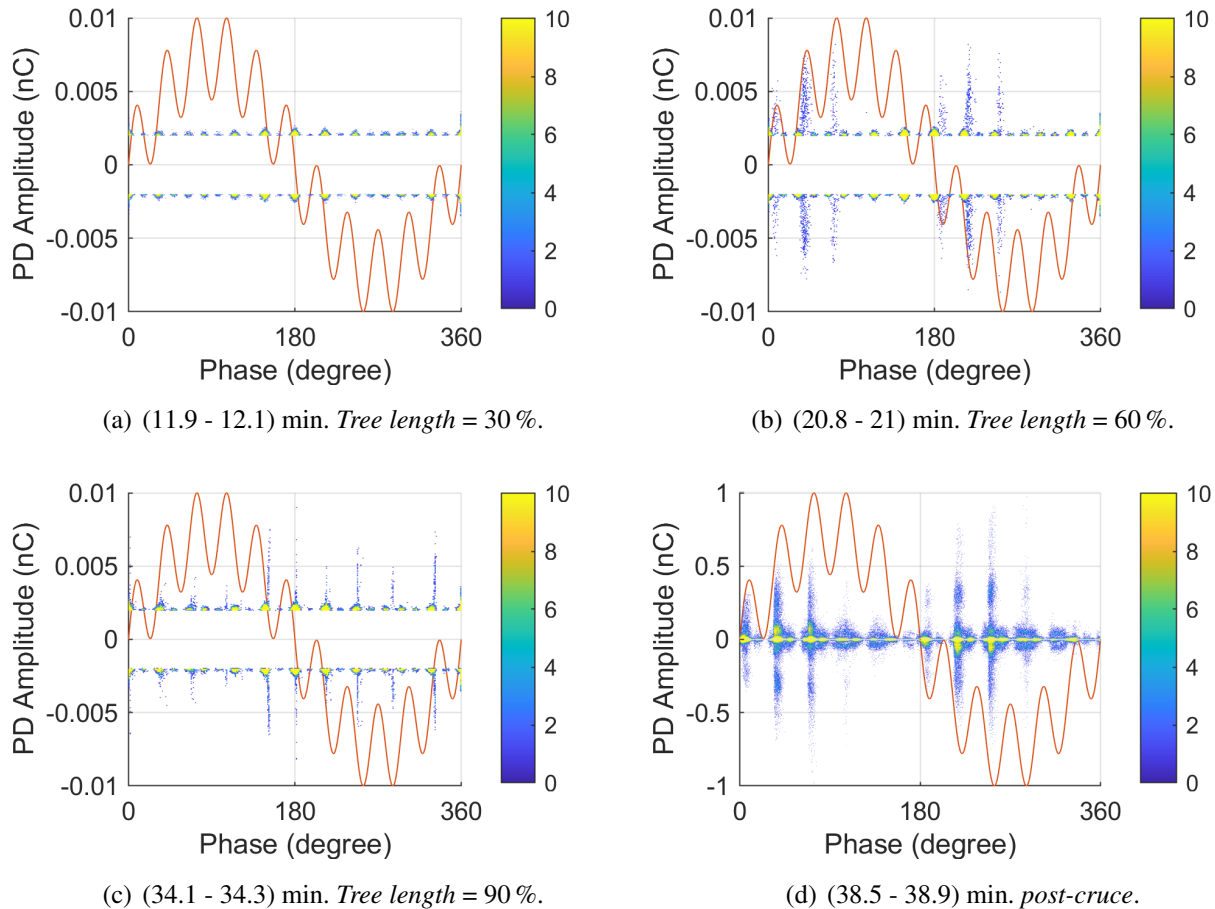


Figura 4.8: PRPD fundamental + undécima armónica sin desfase.

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal de excitación compuesta por la fundamental más la undécima armónica sin desfase se muestran en la Figura 4.8. En la etapa inicial de crecimiento (a), las DP son de baja magnitud, lo que muestra un diagrama sin un patrón bien identificado, ya que existe la posibilidad de que esté presente una segunda fuente de DP atribuida al ruido electromagnético.

En las siguientes etapas (b) y (c), se evidencia un comportamiento donde las DP ocurren en los máximos y mínimos de la señal de excitación, pero puede que también este presente la fuente de ruido, entonces no es correcto atribuir ambos diagramas como un patrón común de comparación.

En la última etapa *post-cruce* en (d), se muestra un patrón más claro en donde las DP ocurren en los máximos de la señal de excitación cuando su magnitud es positiva y en los mínimos de la señal de excitación cuando su magnitud es negativa, dicho patrón es similar a los encontrados en otras investigaciones [5].

Las magnitudes de las DP en la etapa de *post-cruce* en (d) son cercanas a 1 nC, siendo hasta 100 veces mayores que en las etapas de crecimiento del árbol eléctrico, evidenciando así el proceso de degradación del aislamiento.

- Señal fundamental más con undécima armónica desfasada en 180° , probeta 11^{ma}180° (b):

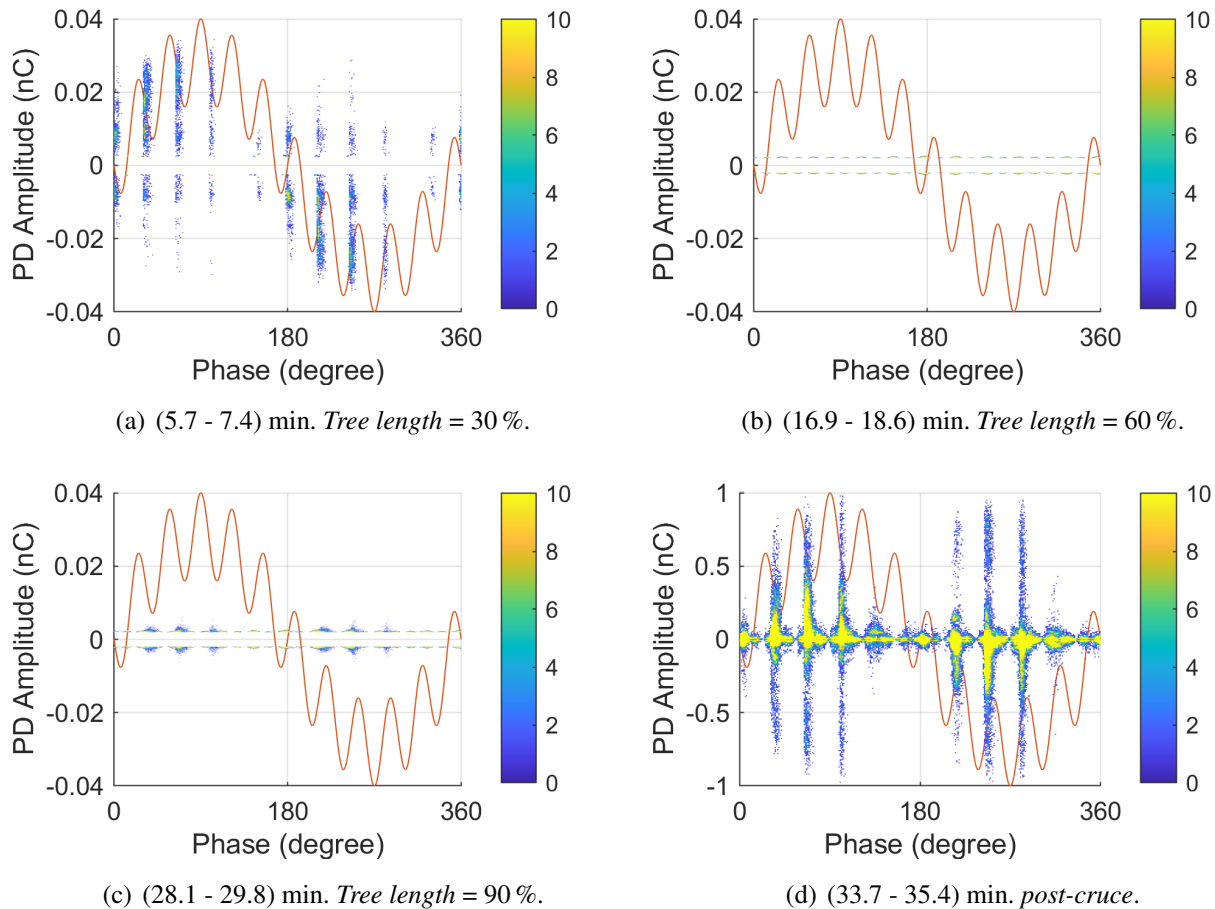


Figura 4.9: PRPD fundamental + undécima armónica desfasada en 180° .

Los diagramas PRPD obtenidos para una señal compuesta por la fundamental más la undécima armónica desfasada en 180° se muestran en la Figura 4.9. Las DP ocurren después de los máximos de la señal de tensión cuando es positiva y después de los mínimos si la señal de tensión es negativa. Un patrón característico se encontró en los diagramas PRPD (a) y (d) formado por 10 intervalos.

Por el contrario, en las etapas intermedias de crecimiento (b) y (c) no es posible identificar un patrón similar al descrito anteriormente (en (a) y (d)), porque las DP son de baja magnitud y pueden estar atribuidas a fuentes de ruido electromagnético. En estos casos, el análisis también se realizó con la data obtenida mediante osciloscopio dando resultados solo en las etapas inicial

(a) y en *post-cruce* (d), debido a que las descargas medidas en intervalos correspondientes a etapas intermedias (b) y (c) fueron asociadas a ruido, posteriormente filtrado.

Al igual que los casos anteriores en la etapa (d) correspondiente al *post-cruce*, las DP son hasta tres veces mayores en magnitud aproximadamente, evidenciando el proceso de degradación del aislamiento.

4.2.1. Análisis cuantitativo de los momentos estadísticos en el crecimiento de los árboles eléctricos

A continuación se presenta la variación de algunos momentos estadísticos y parámetros, según lo establecido en la norma IEC 60270 [13], calculados en este estudio. En cada gráfico, se analizan los mismos tramos de la Sección 4.2 que contienen el 30 %, 60 %, 90 % del crecimiento de los árboles eléctricos, así como una etapa de *post-cruce*, mostrando en dicho análisis un ensayo de cada señal de excitación diferente.

- Carga *peak* Q_{peak} :

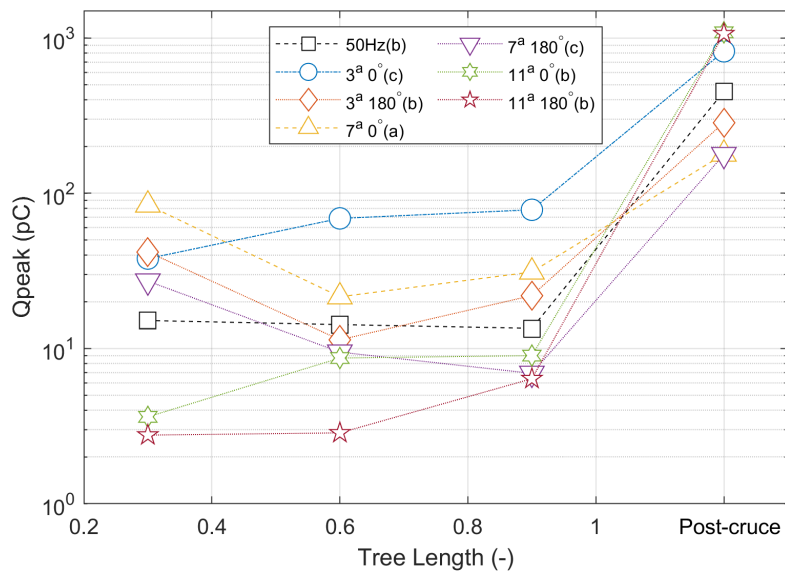


Figura 4.10: Q_{peak} en los distintos intervalos de análisis.

La Figura 4.10 muestra el valor de carga *peak* de las DP (Q_{peak}) en cada intervalo de análisis durante el crecimiento de los árboles eléctricos. Se identifica un comportamiento general en el cual las DP son de baja magnitud en la etapa inicial e intermedia. Posteriormente, el valor de carga *peak* de las DP comienza a aumentar en instantes previos al cruce del árbol eléctrico hacia el contra-electrodo. La mayoría de los ensayos realizados se pueden describir a través de

la variación del parámetro Q_{peak} , ya que inicialmente las DP presentan una leve magnitud, en la siguiente etapa intermedia presentan una menor magnitud debido a una escasa actividad de DP, y finalmente, en la etapa de *post-cruce*, es donde presentan la máxima magnitud del parámetro Q_{peak} .

Particularmente, el ensayo correspondiente a la fundamental más la tercera armónica sin desfase (en color azul) muestra una tendencia creciente en la magnitud de Q_{peak} . Este comportamiento es difícil de explicar debido a que la evolución de las DP es considerado un fenómeno de tipo estocástico.

Además, otro comportamiento que es posible apreciar en la etapa de *post-cruce*, donde la máxima magnitud de Q_{peak} se da para las señales con contaminación armónica de mayor frecuencia (550 Hz), alcanzando valores hasta 1.14 nC (en colores verde y rojo respectivamente).

- El percentil 95 Q_{95} :

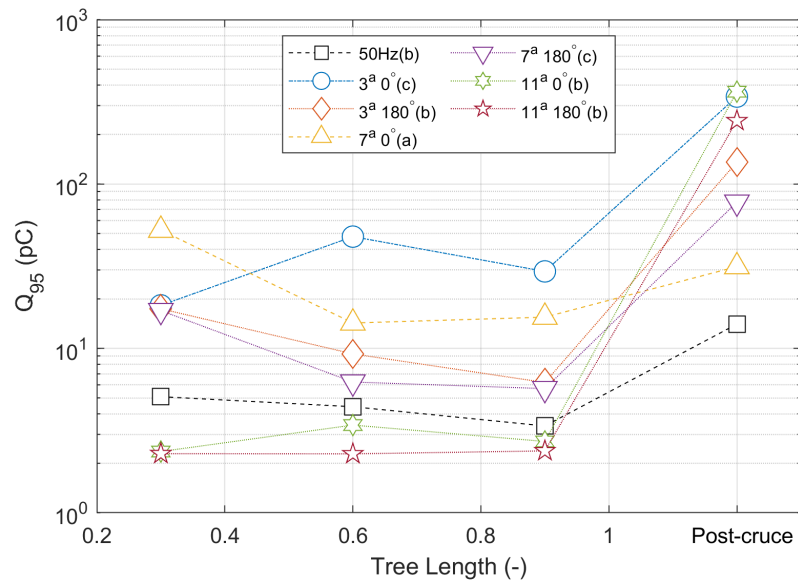


Figura 4.11: Q_{95} en los distintos intervalos de análisis.

La Figura 4.11 muestra los valores del percentil 95 (Q_{95}), que corresponde al valor bajo el cual se encuentran el 95 % de las descargas parciales que ocurren en los distintos intervalos de análisis en los ensayos realizados mediante las siete señales de excitación diferentes. Durante la etapa de crecimiento de los árboles eléctricos, se puede apreciar que Q_{95} presenta un comportamiento similar a Q_{peak} , con magnitudes bajo los 60 pC.

Sin embargo, en la etapa de *post-cruce*, la magnitud de Q_{95} aumenta considerablemente. Por ejemplo, en la etapa de *post-cruce* del ensayo a fundamental más undécima armónica sin desfase (en color verde), Q_{95} alcanza su mayor magnitud, de aproximadamente 370 pC. Este incremento significativo en Q_{95} sugiere una mayor concentración de descargas parciales de mayor magnitud indicando una posible degradación avanzada del aislamiento eléctrico.

- Número de descargas parciales por segundo:

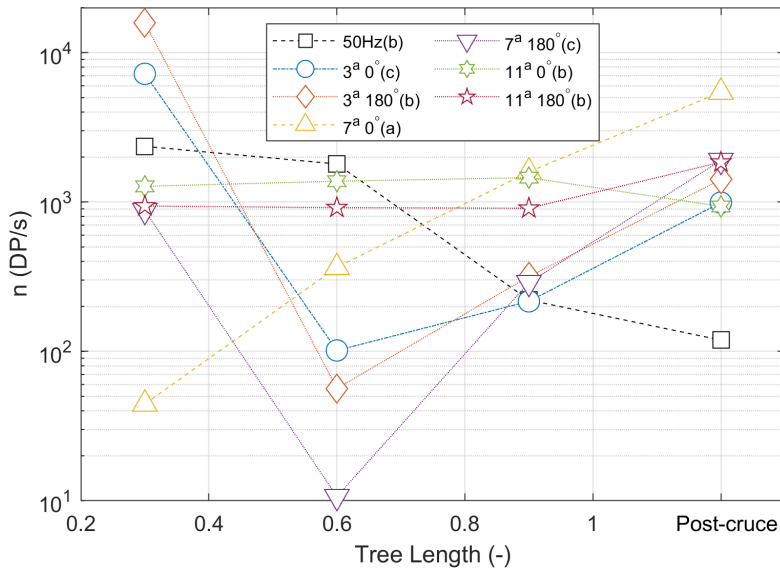


Figura 4.12: Número de DPs en los distintos intervalos de análisis.

El comportamiento del número de descargas parciales (DP) ocurridas por segundo (n) se muestra en la Figura 4.12. En las cuatro etapas analizadas, generalmente el número de DP se mantiene por debajo de las 2.200 DP/s. Sin embargo, en la etapa inicial, los ensayos a fundamental con contaminación de la tercera armónica sin desfase (en color azul) y con desfase de 180° (en color anaranjado) muestran una incidencia aproximada de 7.500 DP/s y hasta 16.000 DP/s, respectivamente.

Luego, en una etapa intermedia de crecimiento, las DP tienen una menor frecuencia, como se observa en el caso compuesto por la fundamental más séptima armónica desfasada en 180° (en color morado), lo que dificulta el análisis estadístico. En la etapa de *post-cruce*, cerca de la ruptura, en la mayoría de las mediciones la frecuencia se mantiene por debajo de 2.000 DP/s, excepto en el ensayo compuesto por la fundamental más la séptima armónica sin desfase (en color amarillo), donde se superan las 5.000 DP/s.

- Potencia de descarga:

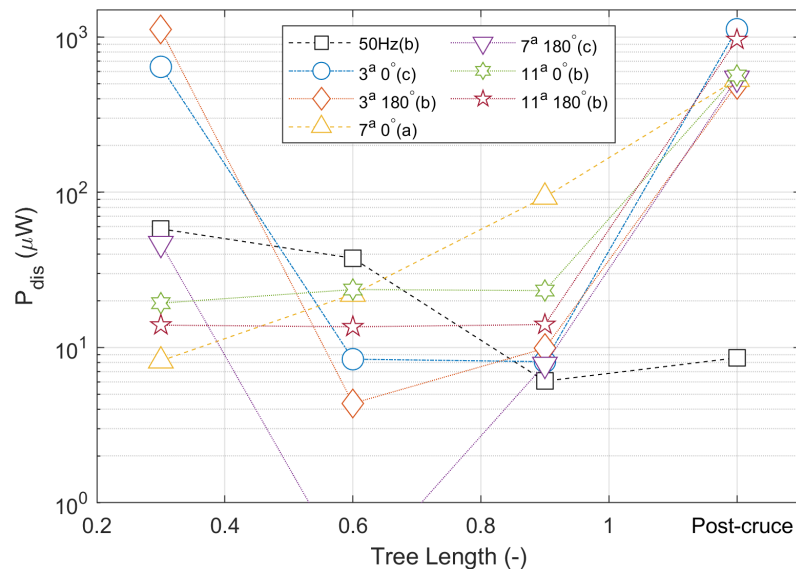


Figura 4.13: Potencia de descarga en los distintos intervalos de análisis.

La Figura 4.13 muestra la potencia de descarga para cada caso realizado con distintas señales de excitación. Se observa que desde la etapa inicial del crecimiento de los árboles eléctricos, la potencia de descarga es baja, del orden de 8 a 60 μW , a excepción de los ensayos compuestos por la fundamental más la tercera armónica sin desfase (en color azul), donde la potencia de descarga alcanza un valor cercano a los 600 μW , y los ensayos compuesto por la fundamental más la tercera armónica desfasada en 180° (en color naranja), donde la potencia de descarga alcanza aproximadamente 1.1 $m\text{W}$.

En la etapa intermedia, la mayoría de los ensayos analizados muestran un valor mínimo de potencia de descarga. Esto se debe a que generalmente en dicha etapa los ensayos realizados con aguja oruga presentan un campo eléctrico de menor magnitud, lo que resulta en una baja ocurrencia de descargas parciales.

Finalmente, la potencia de descarga alcanza su máximo valor en la etapa de *post-cruce*, con valores que oscilan entre 0.45 y 1.15 $m\text{W}$.

Es importante destacar que el ensayo a frecuencia industrial de 50 Hz (en color negro) muestra una tendencia decreciente en la potencia de descarga. Este comportamiento difiere notablemente de las otras señales que contienen contaminación armónica y puede explicarse, en términos generales, por una mayor ocurrencia de descargas parciales al inicio del ensayo, que posteriormente disminuyen en la etapa intermedia de crecimiento del árbol y en la etapa de *post-cruce*.

■ Varianza:

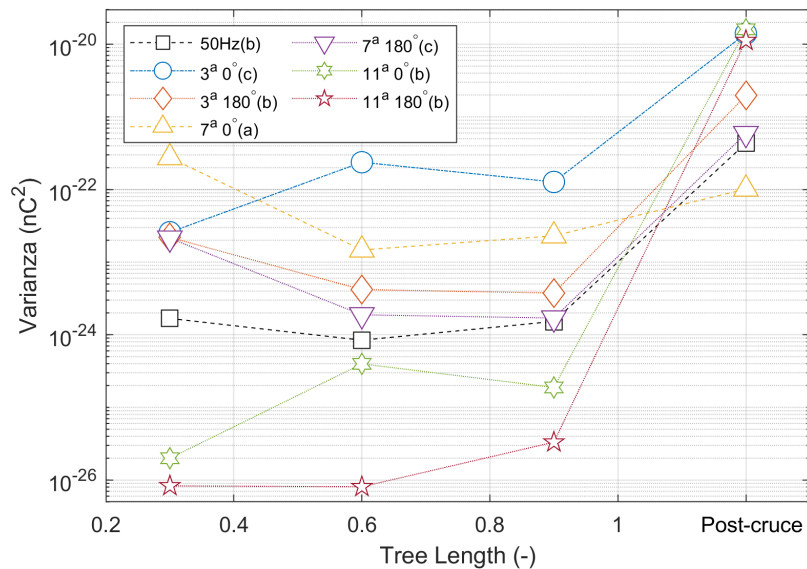


Figura 4.14: Varianza en los distintos intervalos de análisis.

La Figura 4.14 muestra la varianza de las descargas parciales para siete ensayos de distintas señales de excitación. En la etapa de crecimiento, la varianza toma valores bajo $3 \times 10^{-22} nC^2$. Sin embargo, en la etapa de *post-cruce*, los valores de varianza aumentan significativamente, alcanzando valores de hasta aproximadamente $1,6 \times 10^{-20} nC^2$, como se puede observar en el ensayo compuesto por la fundamental más la undécima armónica sin desfase (en color verde).

Es importante tener en cuenta que la varianza representa una medida de dispersión, por lo que su mayor valor en la etapa de *post-cruce* indica que las descargas parciales tienen una variación de aproximadamente ± 120 pC. En otras palabras, en esta etapa se observa una mayor dispersión de los valores de carga de las DP.

■ *Skewness*:

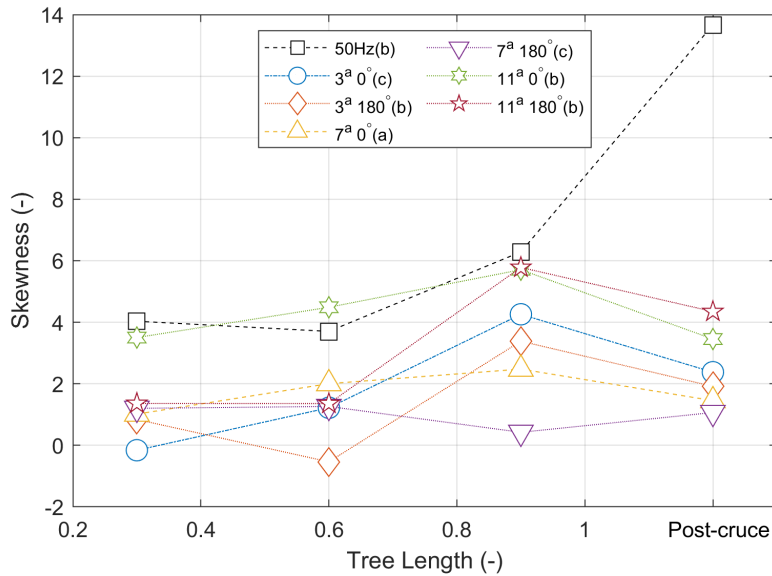


Figura 4.15: *Skewness* en los distintos intervalos de análisis.

La *Skewness* indica el grado de asimetría respecto a una distribución normal. En los casos analizados, se observa en la Figura 4.15 que la *Skewness* toma valores positivos en gran parte del progreso de los árboles eléctricos obtenidos mediante las siete señales de excitación diferentes. Esto indica una asimetría a la derecha, lo que quiere decir que las DP tienden a concentrarse por debajo de la mediana. Por otro lado, la *Skewness* es negativa en el tramo inicial del ensayo compuesto por la fundamental más la tercera armónica sin desfase (en color azul) y en un tramo intermedio del ensayo compuesto por la fundamental más la tercera armónica desfasada en 180° (en color anaranjado), lo que indica una asimetría a la izquierda, es decir, las DP tienden a concentrarse por encima de la mediana.

En general, se observa una tendencia creciente en la *Skewness* durante el desarrollo de los árboles eléctricos, y luego en la etapa de *post-cruce*, hay una disminución de la magnitud del momento estadístico *Skewness*. Sin embargo, hay dos excepciones: el ensayo a frecuencia industrial 50 Hz (en color negro), que muestra un comportamiento en general creciente, y el ensayo compuesto por la fundamental más la séptima armónica desfasada en 180°, en el cual hay una leve variación negativa de la *Skewness* antes del cruce.

- Kurtosis:

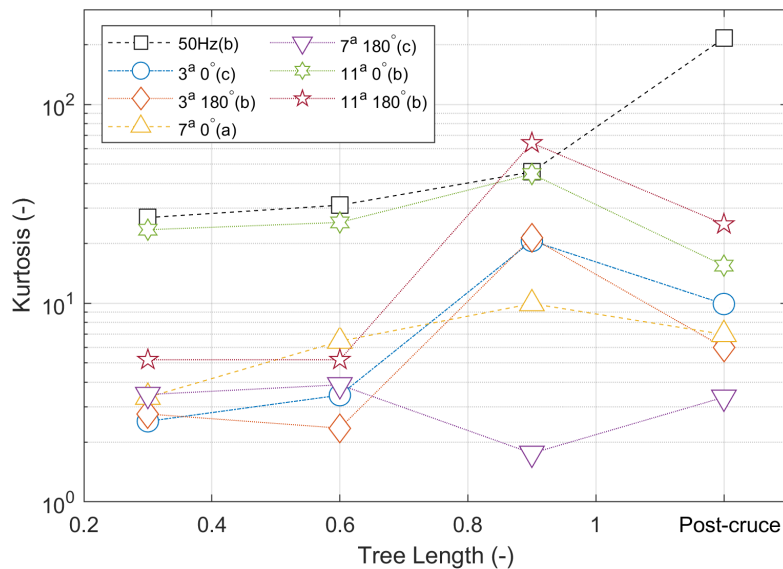


Figura 4.16: Kurtosis en los distintos intervalos de análisis.

El momento estadístico de kurtosis se muestra en la Figura 4.16, donde se puede observar que generalmente, en los ensayos realizados con contaminación armónica, la kurtosis presenta un comportamiento creciente hasta antes del cruce al contra-electrodo de los árboles eléctricos. Es importante destacar que los ensayos que contienen contaminación armónica de tercer orden (en color azul y anaranjado) inicialmente presentaron una distribución platicúrtica ($K < 3$), pasando a una distribución leptocúrtica ($K > 3$) y, posteriormente, en la etapa de *post-cruce*, los valores de kurtosis disminuyen, sin llegar a cambiar el tipo de distribución.

El resto de los ensayos con contaminación armónica, en general, presenta una distribución leptocúrtica en todas las etapas analizadas, salvo en el ensayo compuesto por la fundamental más la séptima armónica desfasada en 180° , que en la etapa previa al cruce presentó una distribución platicúrtica. Por otro lado, el ensayo a frecuencia industrial pura (50 Hz en color negro) muestra una tendencia monótona creciente durante todo el ensayo y presenta siempre una distribución leptocúrtica.

■ Parámetro α :

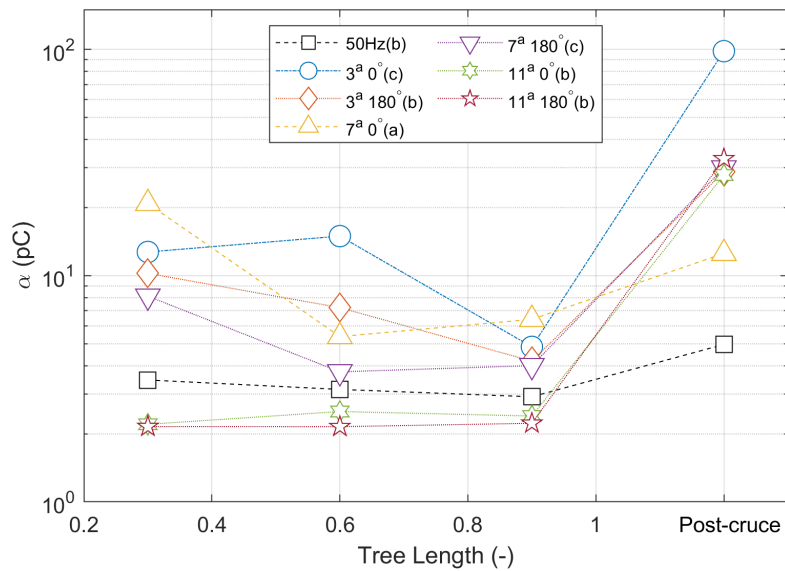


Figura 4.17: Parámetro α en los distintos intervalos de análisis.

El parámetro de escala α obtenido de la distribución Weibull se muestra en la Figura 4.17. Presenta un comportamiento similar al percentil 95 (Q_{95}), mostrando magnitudes de hasta 20 pC en la etapa inicial. Posteriormente, en la etapa intermedia de crecimiento de los árboles eléctricos, hubo un decaimiento en la magnitud de α para los distintos ensayos. Finalmente, en la etapa de *post-cruce*, hubo un incremento en los valores de α , donde es posible identificar que la mayoría de los ensayos presenta un valor alrededor de 30 pC.

■ Parámetro β :

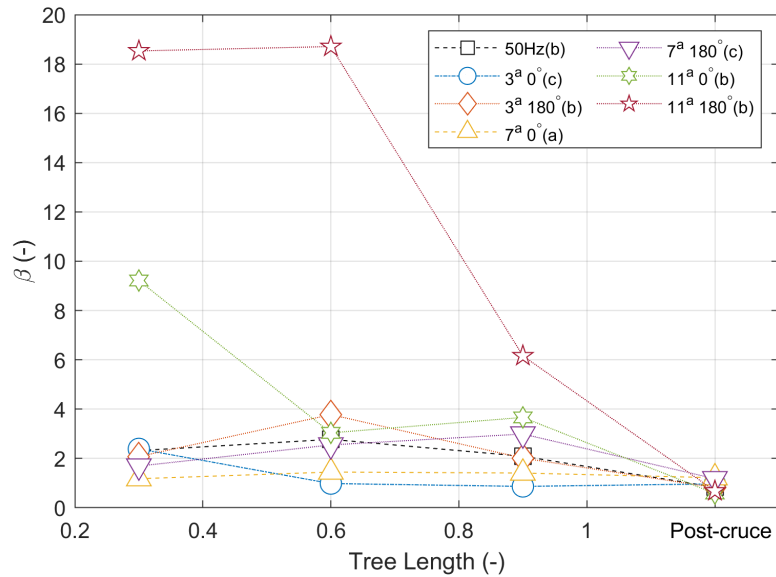


Figura 4.18: Parámetro β en los distintos intervalos de análisis.

El parámetro de forma β obtenido de la distribución Weibull se muestra en la Figura 4.18. De manera general, se observa un comportamiento con leves variaciones, tomando valores entre 0 y 4 en los distintos tramos de crecimiento analizados. En la etapa de *post-cruce*, en los siete ensayos incluidos en la comparación, se aprecia una disminución de la magnitud del parámetro de forma β , tomando valores entre 0.5 y 1.3.

Es importante mencionar que este comportamiento del parámetro β ocurre en la mayoría de los ensayos analizados, a excepción de los ensayos compuestos por la fundamental más la undécima armónica sin desfase (en color verde), donde el parámetro β presenta un valor inicial cercano a 9. También, el ensayo compuesto por la fundamental más la undécima armónica desfasada en 180° (en color rojo) toma un valor inicial extremo de aproximadamente 18, aumentando su magnitud en el siguiente tramo de análisis a 19. Estos valores atípicos contrastan con las tendencias observadas en el resto de los ensayos.

4.3. Análisis de los parámetros de forma de onda en el crecimiento de árboles eléctricos

En esta sección se muestra el comportamiento en el tiempo de los parámetros de forma de onda utilizados en este estudio, los cuales fueron explicados en el capítulo 3. De un total de 20 ensayos realizados se presenta uno de cada señal de excitación diferente, y luego se comparará el efecto de la contaminación armónica en el crecimiento de los árboles eléctricos. A continuación, se describirá la variación de los parámetros obtenidos mediante las distintas técnicas de análisis de forma de onda durante el crecimiento del árbol eléctrico.

4.3.1. Técnica de clusterización por potencia espectral (SPCT)

La técnica de clusterización por potencia espectral entrega los parámetros PRL y PRH, evaluando su variación en las distintas etapas de crecimiento de cada árbol eléctrico obtenidas a partir de los ensayos con diferentes señales de excitación.

La Figura 4.19 presenta las variaciones del parámetro PRL. En general, los ensayos con contenido armónico presentan valores de PRL menores que el ensayo a 50 Hz (en negro). Se puede identificar un comportamiento general del parámetro PRL, el cual alcanza un máximo en la etapa intermedia del crecimiento de cada árbol eléctrico analizado.

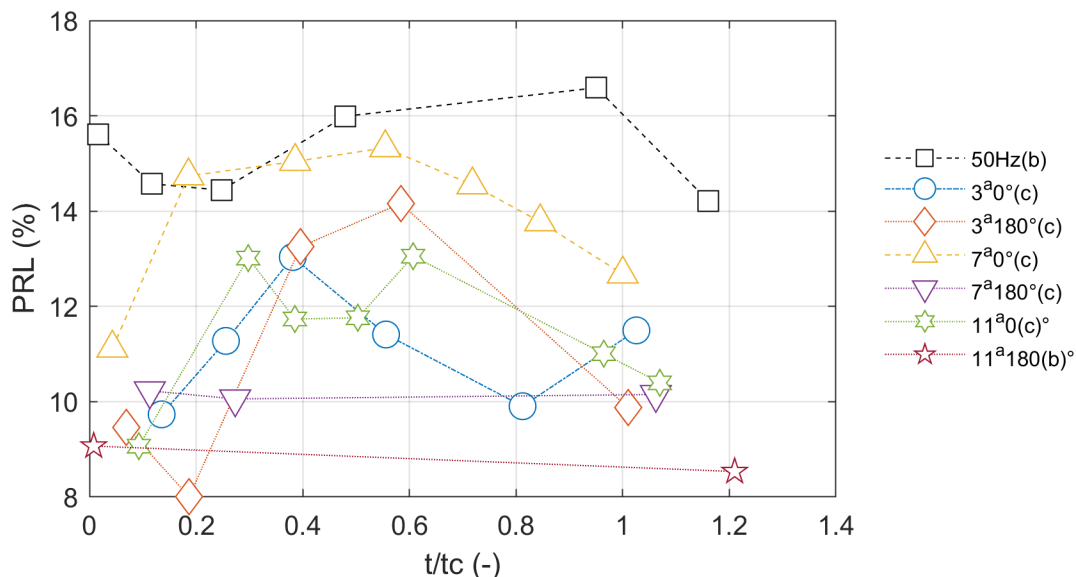


Figura 4.19: Variación del parámetro PRL para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

La variación del parámetro PRH se muestra en la Figura 4.20. En este caso, se observa un comportamiento opuesto al visto en el parámetro PRL. En general, los ensayos con contenido armónico presentan valores de PRH superiores al ensayo a 50 Hz, mostrando una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo.

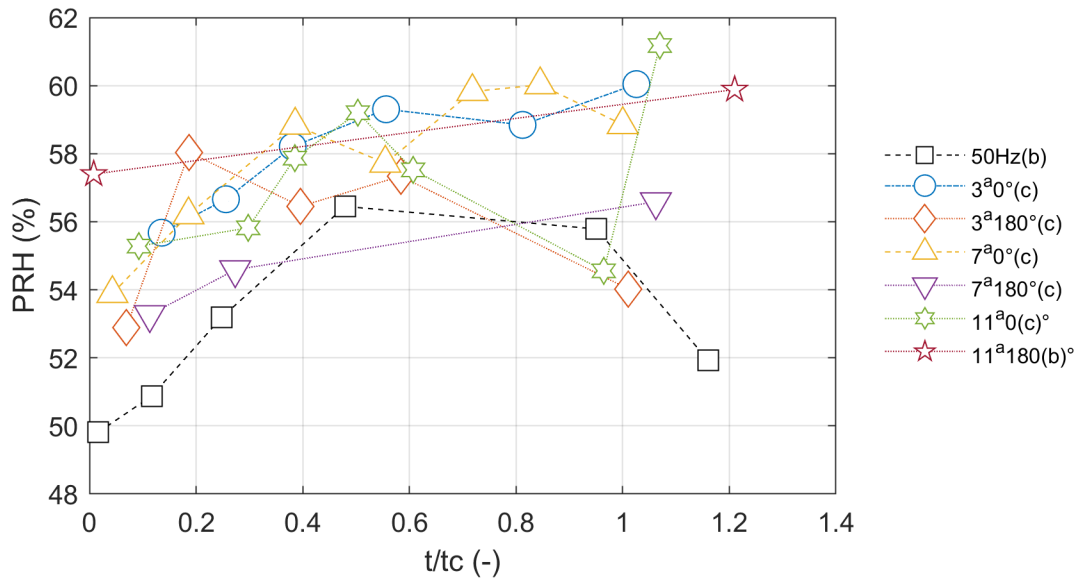


Figura 4.20: Variación del parámetro PRH para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

4.3.2. Mapas Tiempo - Frecuencia

Aplicando la técnica de mapas tiempo-frecuencia, se obtienen los parámetros σ_F y σ_T para distintas etapas del crecimiento de los árboles eléctricos excitados con contaminación armónica de diferentes frecuencias incluidas en este estudio.

En la Figura 4.21 se puede apreciar un comportamiento característico del parámetro σ_F durante el crecimiento del árbol eléctrico en cada señal de excitación incluida en este estudio. En la etapa inicial, σ_F tiene valores altos, alrededor de 65 MHz. A medida que se propagan los árboles eléctricos, su valor va descendiendo hasta llegar a un mínimo cercano a los 62 MHz. Finalmente, antes del cruce, cuando la longitud de cada árbol eléctrico está próxima a su mayor longitud, el valor de σ_F incrementa nuevamente.

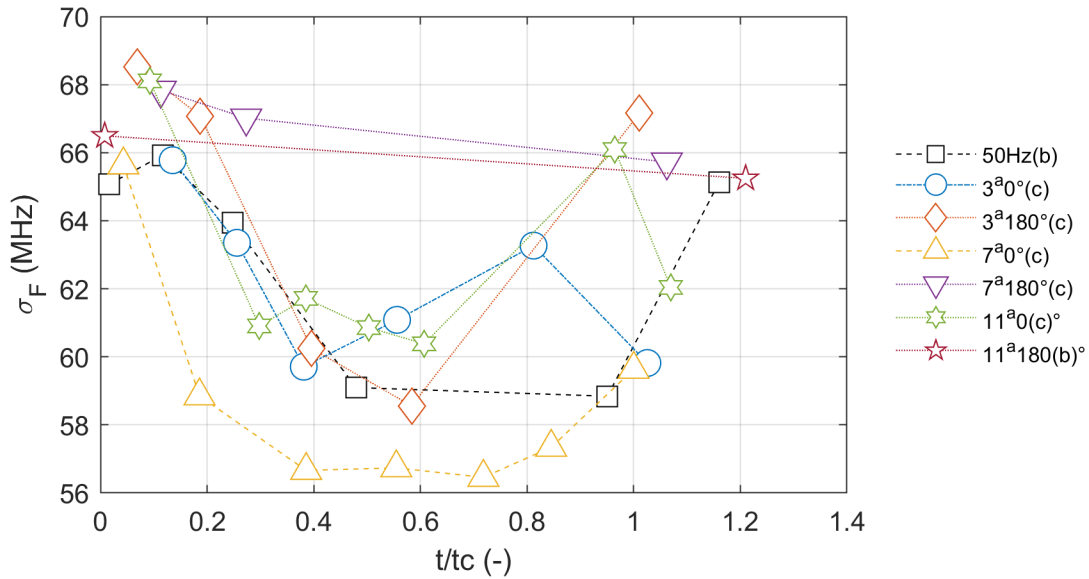


Figura 4.21: Variación del parámetro σ_F para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

El parámetro σ_T muestra un comportamiento difícil de generalizar como se muestra en la Figura (4.22). Durante la etapa intermedia del crecimiento del árbol eléctrico, se pueden observar diferencias en los distintos casos analizados. Por ejemplo, el ensayo realizado con una señal de excitación compuesta por la tercera armónica sin desfase (en color azul) presenta un comportamiento marcado por un máximo cercano a los 250 ns. En contraste, los ensayos realizados con tercera armónica desfasada en 180° (en color anaranjado) y undécima armónica sin desfase (en color verde) muestran valores mínimos cercanos a 120 y 90 ns, respectivamente. Cabe destacar que en la zona cuando cada árbol eléctrico se acerca al contra-electrodo el parámetro σ_T muestra un aumento de magnitud.

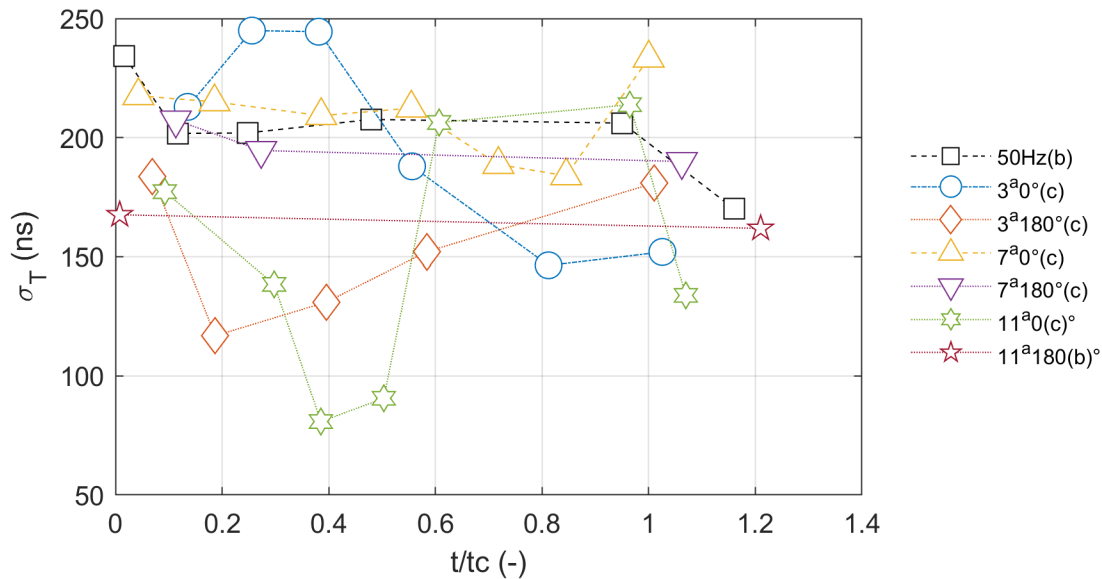


Figura 4.22: Variación del parámetro σ_T para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

4.3.3. Caracterización de la forma de onda por medio de funciones envolventes y parámetros en frecuencia

A continuación, se presentan las variaciones de los parámetros A_p , A_t y f en las distintas etapas de crecimiento de los árboles eléctricos obtenidas a partir de los ensayos con contaminación armónica y frecuencia industrial 50 Hz.

La Figura 4.23 muestra la variación del parámetro A_p durante el crecimiento de los árboles eléctricos. Los valores de A_p se encuentran en un rango de 27 a 31 ns. En los ensayos con contenido armónico, los valores de A_p son ligeramente mayores que los obtenidos a frecuencia industrial de 50 Hz (en color negro). Sin embargo, en el caso de la fundamental más la tercera armónica sin desfase (en color azul), los valores de A_p son menores que los obtenidos en el ensayo a 50 Hz en todas las etapas de comparación.

En general, se observa un comportamiento descendente-ascendente en la mayoría de los ensayos a medida que crecen los árboles eléctricos.

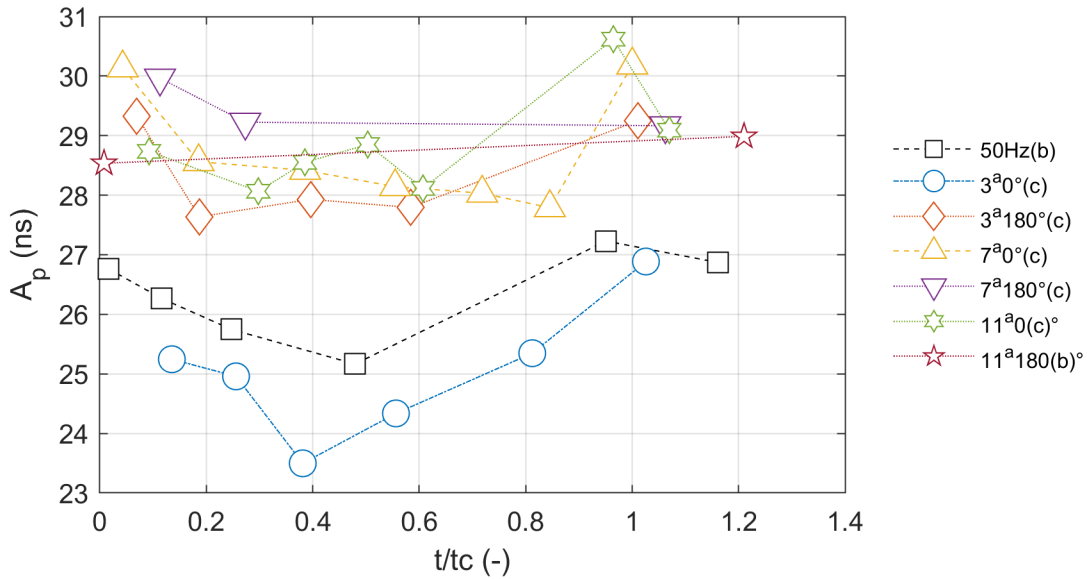


Figura 4.23: Variación del parámetro A_p para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

El parámetro A_t presentado en la Figura 4.24, muestra diferentes comportamientos según su señal de excitación, difíciles de generalizar de la misma manera que el parámetro σ_T . En la etapa intermedia del crecimiento del árbol eléctrico la señal de excitación compuesta por la fundamental más la tercera armónica sin desfase (en color azul) presenta un comportamiento enmarcado por un máximo. Por el contrario, los ensayos realizados con las composiciones de fundamental más la tercera armónica desfasada en 180° (en color anaranjado) y la fundamental más la undécima armónica sin desfase (en color verde) presentan valores mínimos. Cabe destacar que en la zona cuando cada árbol eléctrico se acerca al contra-electrodo el parámetro A_t muestra un aumento de magnitud.

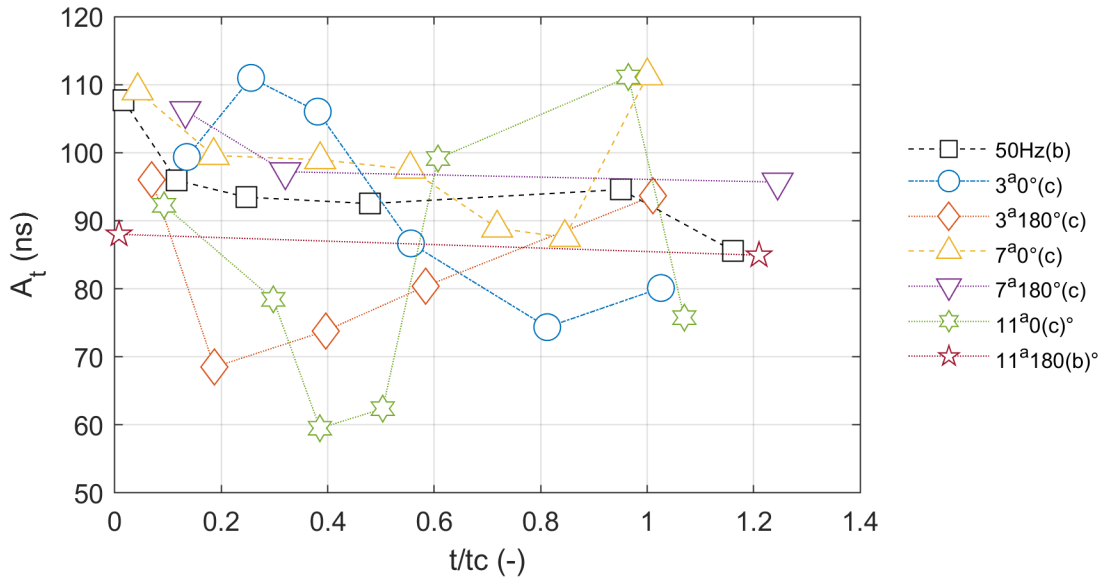


Figura 4.24: Variación del parámetro A_t para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

El parámetro f , representado en la figura (4.25), exhibe un comportamiento similar al parámetro σ_F , mostrando una tendencia descendente-ascendente. Inicialmente, los valores se sitúan alrededor de 50 MHz, pero luego disminuyen hasta alcanzar mínimos durante la etapa intermedia del crecimiento de los árboles eléctricos, ubicándose por debajo de los 30 MHz. Posteriormente, en la etapa de *post-cruce*, en algunos casos como las señales que contienen contaminación de la: tercera, séptima y undécima armónicas desfasadas en 180° (en color anaranjado, morado y rojo, respectivamente), los valores superan los 50 MHz.

En contraste, el ensayo a 50 Hz (en color negro) muestra solo leves variaciones en la magnitud del parámetro f , manteniéndose alrededor de los 30 MHz a lo largo de las distintas etapas de análisis.

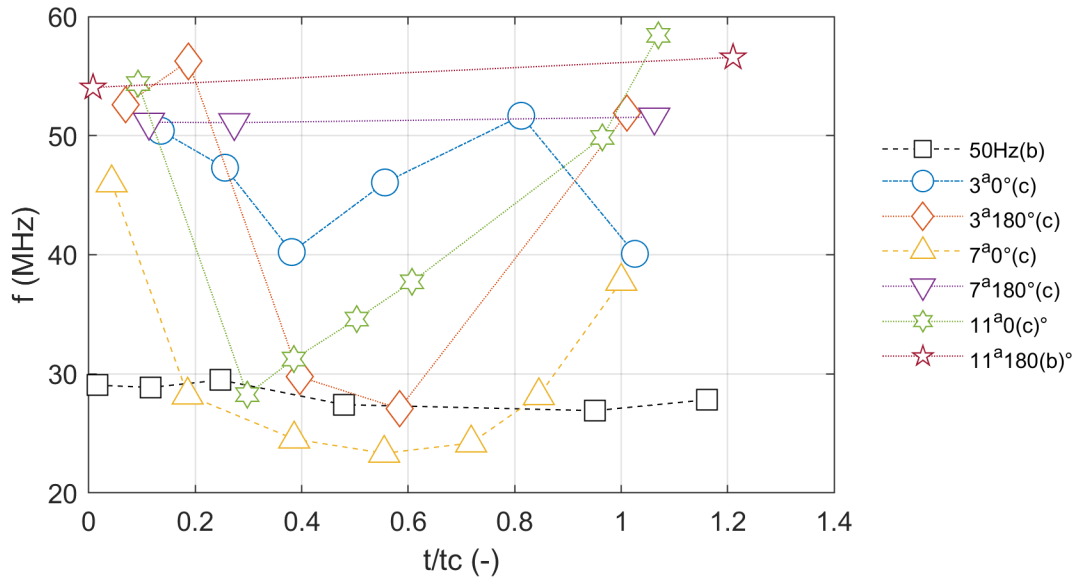


Figura 4.25: Variación del parámetro f para distintas etapas de arborización a diferentes señales de excitación.

4.4. Comportamiento de los parámetros de forma de onda en etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*

En esta sección, se evalúa la capacidad de las técnicas de forma de onda en el crecimiento de árboles eléctricos para identificar el cruce al contra-electrodo. Se analizan un total de 19 ensayos y se obtienen resultados estadísticos a través de gráficas *Box-plot*. Además, se identifican tendencias entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce* para los distintos parámetros de forma de onda.

El objetivo de las gráficas *Box-plot* es comparar el comportamiento de dichos parámetros en señales de frecuencia industrial pura y en aquellas contaminadas con armónicas. De esta manera, se busca entender cómo influye la contaminación armónica en el comportamiento de los árboles eléctricos y si las técnicas de forma de onda pueden distinguir el cruce del árbol eléctrico en presencia de esta contaminación.

4.4.1. Parámetros PRL y PRH

En la Figura 4.26, se puede observar un comportamiento decreciente del parámetro PRL entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. La variación de dicho parámetro en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) es mayor en comparación con los ensayos que contienen contenido armónico en la subfigura (b). Los detalles de las variaciones del parámetro PRL se encuentran resumidos en la Sección 1 del Anexo B.

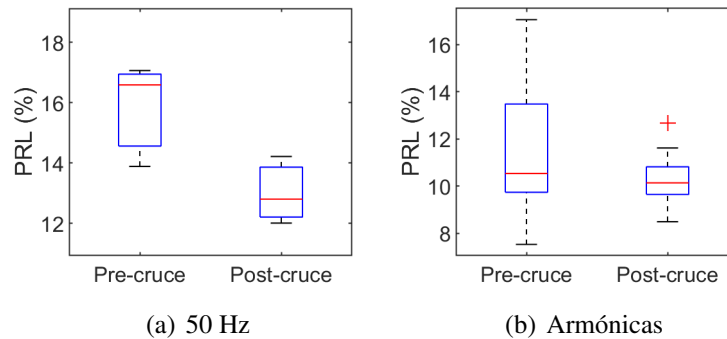


Figura 4.26: *Box-plot* del parámetro PRL en *pre-cruce* y *post-cruce*.

En la Figura 4.27, se puede observar un comportamiento creciente del parámetro PRH entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. La variación de dicho parámetro en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) es menor en comparación con los ensayos con contenido armónico en la subfigura (b). Los detalles de las variaciones del parámetro PRH se encuentran resumidos en la Sección 2 del Anexo B.

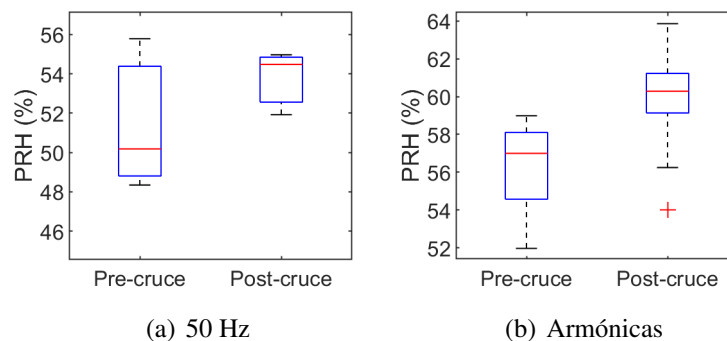


Figura 4.27: *Box-plot* del parámetro PRH en *pre-cruce* y *post-cruce*.

4.4.2. Parámetros σ_T y σ_F

En la Figura 4.28, se puede notar un comportamiento decreciente del parámetro σ_T entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. La variación de dicho parámetro en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) es mayor en comparación con los ensayos con contenido armónico en la subfigura (b). Los detalles de las variaciones del parámetro σ_T se encuentran resumidos en la Sección 3 del Anexo B.

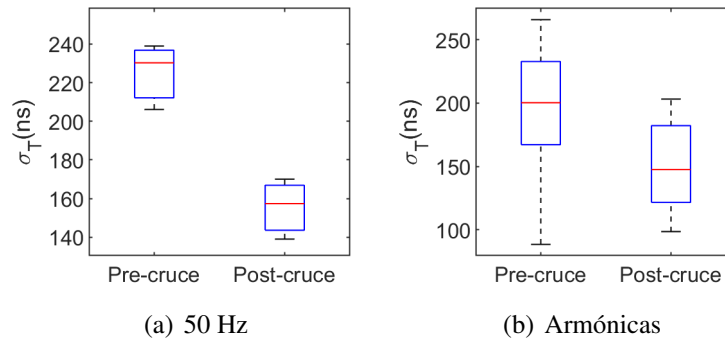


Figura 4.28: *Box-plot* del parámetro σ_T en *pre-cruce* y *post-cruce*.

En la Figura 4.29, se puede notar un comportamiento decreciente del parámetro σ_F entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. La variación de dicho parámetro en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) es menor en comparación con los ensayos con contenido armónico en la subfigura (b). Los detalles de las variaciones del parámetro σ_F se encuentran resumidos en la Sección 4 del Anexo B.

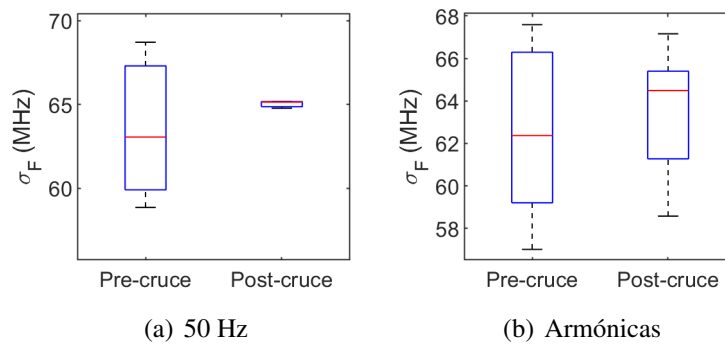


Figura 4.29: *Box-plot* del parámetro σ_F en *pre-cruce* y *post-cruce*.

4.4.3. Parámetros A_t y f

En la Figura 4.30, se puede notar un comportamiento decreciente del parámetro A_t entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. La variación de dicho parámetro en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) es mayor en comparación con los ensayos con contenido armónico en la subfigura (b). Los detalles de las variaciones del parámetro A_t se encuentran resumidos en la Sección 5 del Anexo B.

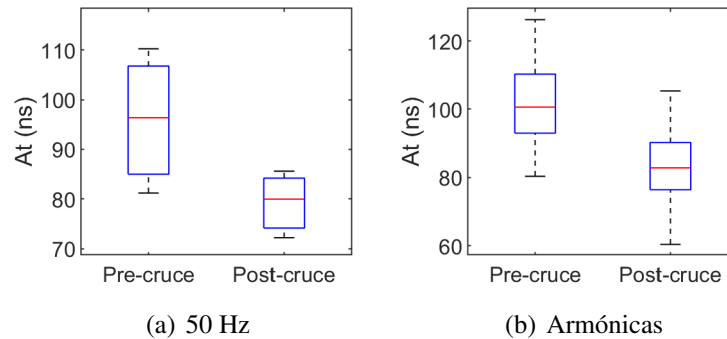


Figura 4.30: *Box-plot* del parámetro A_t en *pre-cruce* y *post-cruce*.

En la Figura 4.31, se puede notar un comportamiento decreciente del parámetro f en los ensayos a 50 Hz en la subfigura (a) entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*, contrario a los ensayos con contenido armónico en la subfigura (b) donde predomina el comportamiento creciente. Los detalles de las variaciones del parámetro f se encuentran resumidos en la Sección 6 del Anexo B.

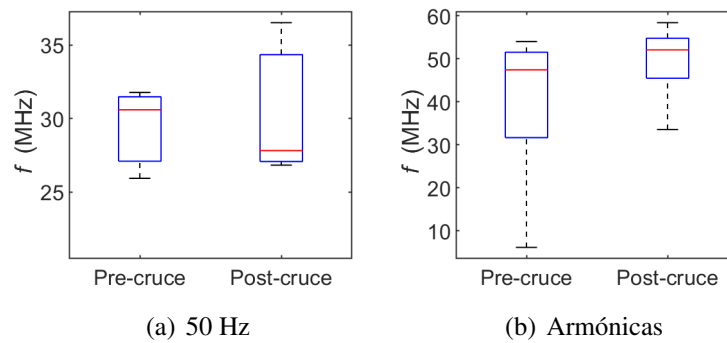


Figura 4.31: *Box-plot* del parámetro f en *pre-cruce* y *post-cruce*.

4.5. Mapas Bidimensionales

A través del análisis realizado mediante técnicas de formas de onda a las descargas parciales (DP), se obtuvieron parámetros que pueden ser representados en mapas bidimensionales (2D). Entre los distintos mapas obtenidos, el que muestra el mejor comportamiento en la caracterización del crecimiento del árbol eléctrico es el mapa σ_F v/s PRL, el cual presenta una tendencia que puede determinar el estado de avance de los árboles eléctricos hacia el contra-electrodo.

A continuación, se presentan los resultados de los mapas σ_F v/s PRL obtenidos para las distintas señales de excitación:

- Frecuencia industrial pura, probeta 50 Hz (b):

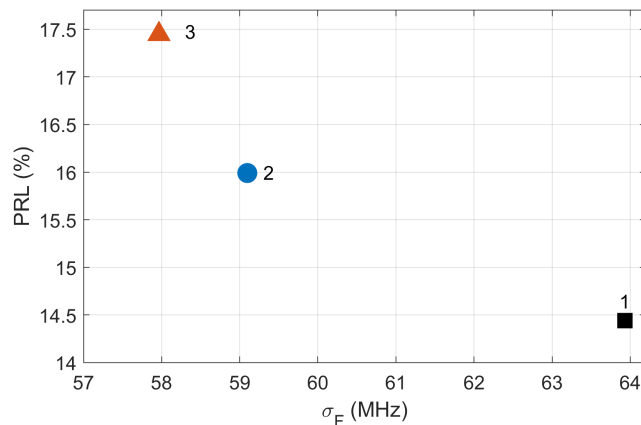


Figura 4.32: Mapa σ_F v/s PRL a frecuencia industrial 50 Hz .

En la Figura 4.32, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo a 50 Hz (b) muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 del crecimiento del árbol eléctrico se determina un 17 % de avance, en la etapa 2 un 40 %, y en la etapa 3 ha alcanzado un 95 % de su máxima longitud antes del cruce.

En la Figura 4.33, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.

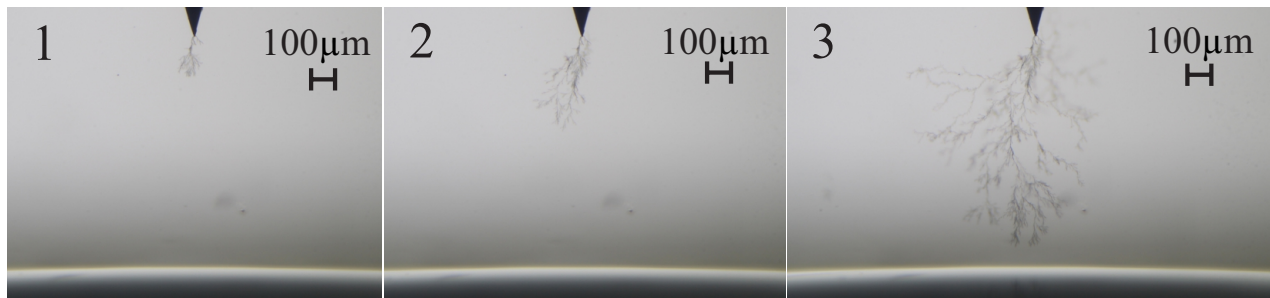


Figura 4.33: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo frecuencia industrial 50 Hz.

- Fundamental más tercera armónica sin desfase, probeta 3^{era}0° (c):

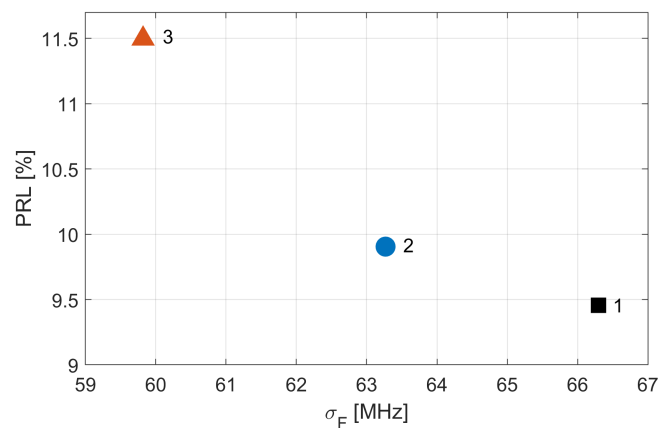


Figura 4.34: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + tercera armónica sin desfase.

En la Figura 4.34, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo 3^{era}0° (c) muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 del crecimiento del árbol eléctrico se determina un 16 % de avance, en la etapa 2 un 76 %, y en la etapa 3 ha alcanzado su máxima longitud.

En la Figura 4.35, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.

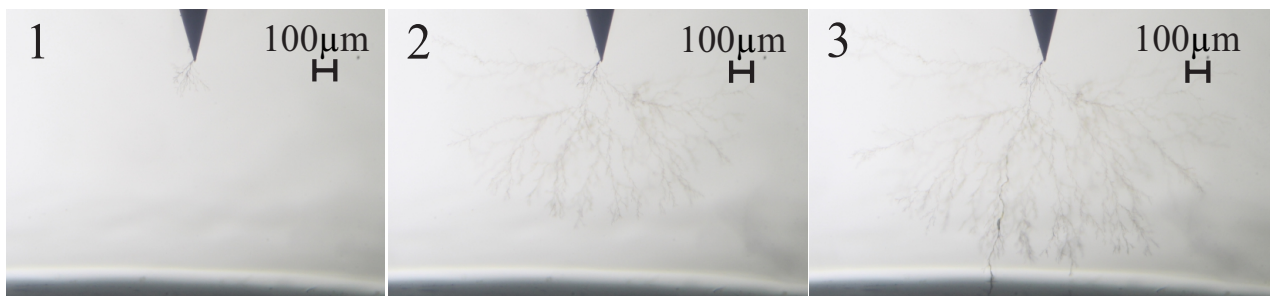


Figura 4.35: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + tercera armónica sin desfase.

- Fundamental más tercera armónica desfasada en 180° , probeta 3^{era}180° (b):

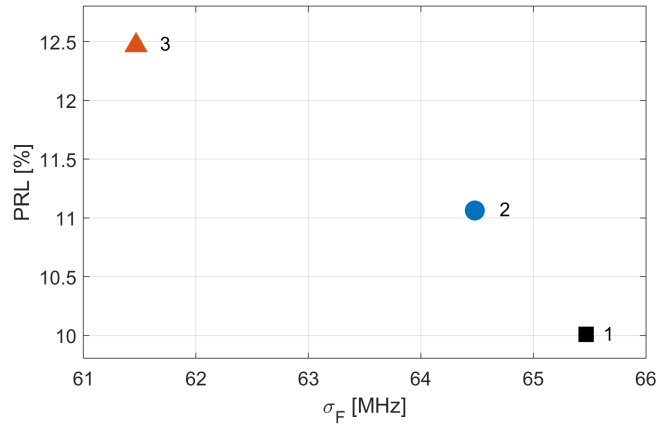


Figura 4.36: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + tercera armónica desfasada en 180° .

En la Figura 4.36, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo 3^{era}180° (b) muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 de crecimiento del árbol eléctrico se determina un 10 % de avance, en la etapa 2 un 32 % y antes del cruce, en la etapa 3, el árbol eléctrico ha alcanzado un 90 % de su máxima longitud.

En la Figura 4.37, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.

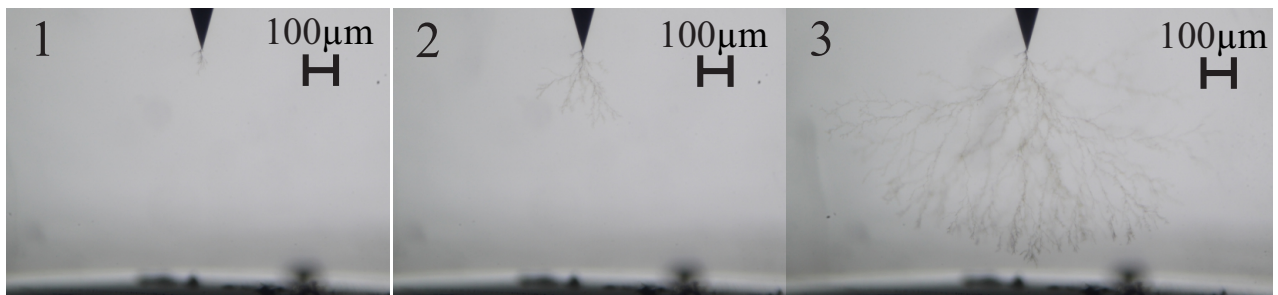


Figura 4.37: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + tercera armónica desfasada en 180° .

- Fundamental más séptima armónica sin desfase, probeta 7^{ma}0° (a):

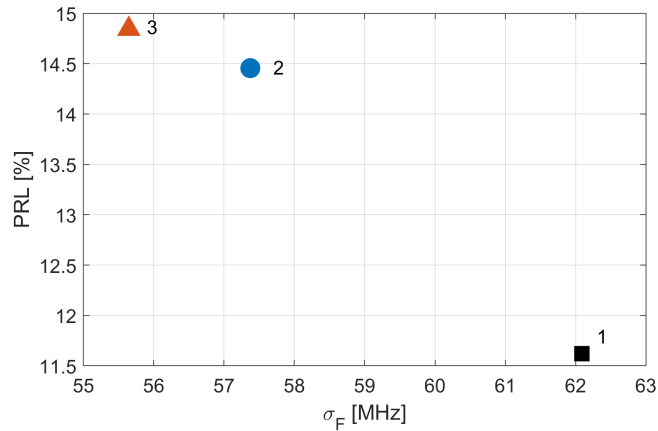


Figura 4.38: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + séptima armónica sin desfase.

En la Figura 4.38, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo 7^{ma}0° (b) muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 de crecimiento del árbol eléctrico se determina un 15 % de avance, en la etapa 2 un 39 % y en la etapa 3 ha alcanzado un 55 % de su máxima longitud.

En la Figura 4.39, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.

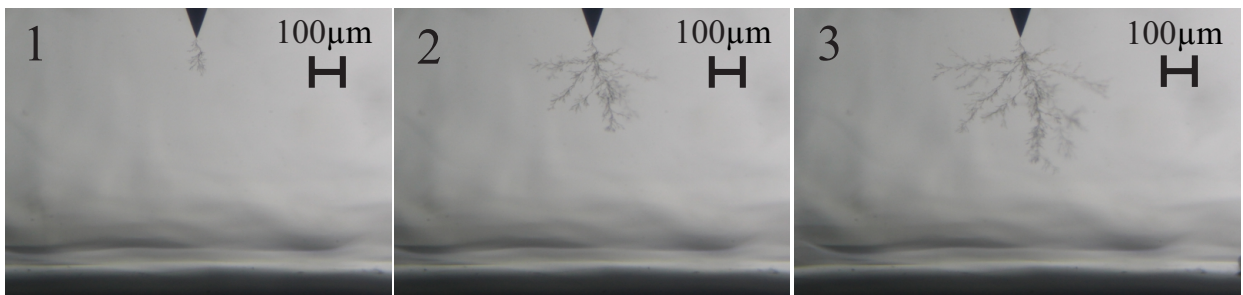


Figura 4.39: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + séptima armónica sin desfase.

- Fundamental más séptima armónica desfasada en 180° , probeta $7^{\text{ma}}180^\circ$ (c):

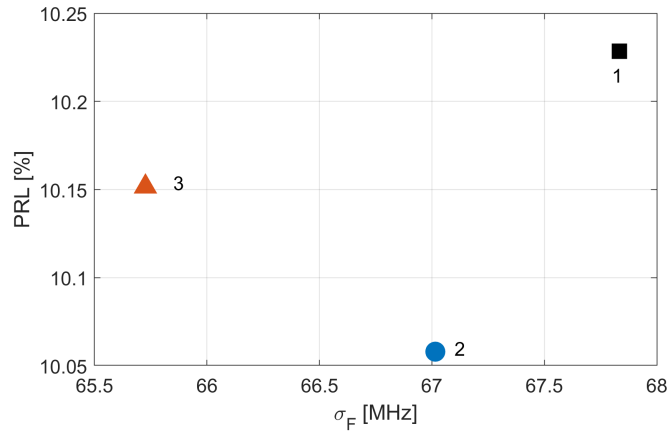


Figura 4.40: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + séptima armónica desfasada en 180° .

En la Figura 4.40, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo $7^{\text{ma}}180^\circ$ (c) muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL no presenta una tendencia clara; su comportamiento es descendente-ascendente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. Sin embargo, desde la etapa 2, el parámetro PRL muestra la tendencia creciente que se ha visto en los casos anteriores.

En la etapa 1 de crecimiento del árbol eléctrico se determina un 13 % de avance, en la etapa 2 un 35 % y en la etapa 3 ha alcanzado su máxima longitud.

En la Figura 4.41, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.

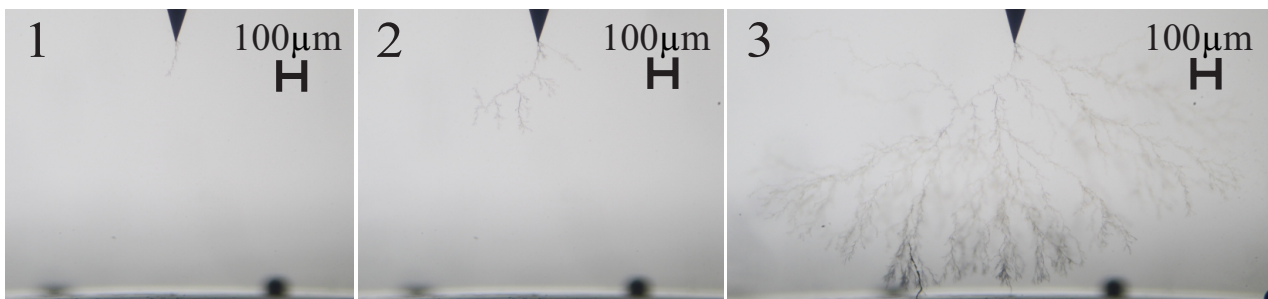


Figura 4.41: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + séptima armónica desfasada en 180° .

- Fundamental más undécima armónica sin desfase, probeta 11^{va}0° (b):

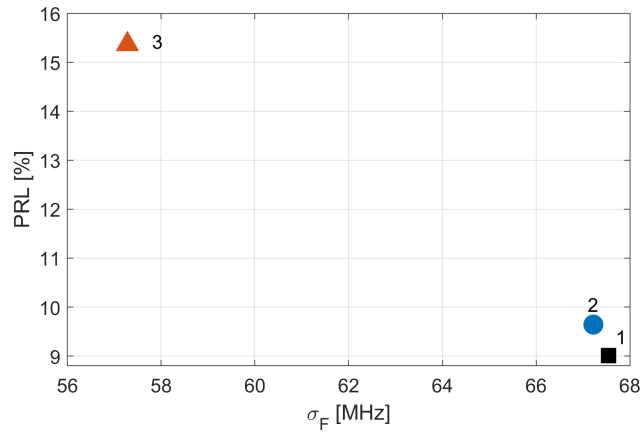


Figura 4.42: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + undécima armónica sin desfase.

En la Figura 4.42, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo 11^{va}0° (b), muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 se determina un 5% de avance, en la etapa 2 un 16% y en la etapa 3 un 66% de su longitud máxima.

En la Figura 4.43, es posible apreciar los árboles eléctricos en las tres etapas de crecimiento descritas anteriormente.



Figura 4.43: Etapas 1, 2 y 3 de los árboles eléctricos bajo fundamental + undécima armónica sin desfase.

- Fundamental más undécima armónica desfasada en 180° , probeta $11^{\text{va}}180^\circ$ (b):

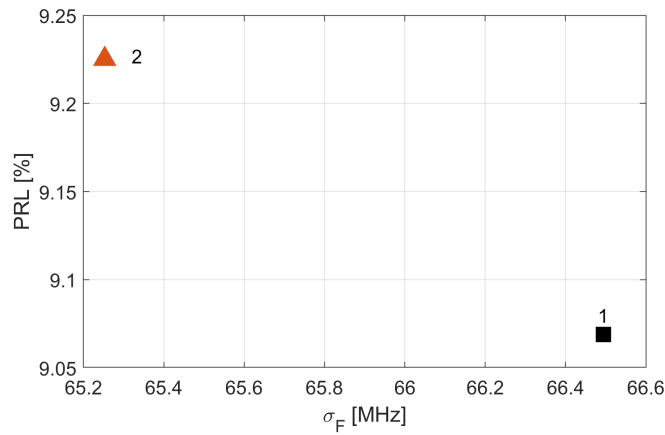


Figura 4.44: Mapa σ_F v/s PRL a fundamental + undécima armónica desfasada en 180° .

En la Figura 4.44, el mapa σ_F v/s PRL obtenido del ensayo $11^{\text{va}}180^\circ$ (b), muestra una tendencia decreciente para el parámetro σ_F , mientras que el parámetro PRL muestra una tendencia creciente a medida que el árbol eléctrico avanza hacia el contra-electrodo. En la etapa 1 se determina un 5 % de avance y en la etapa 2, el árbol eléctrico ha alcanzado su máxima longitud. En la Figura 4.45, es posible apreciar los árboles eléctricos en las dos etapas de crecimiento descritas anteriormente.

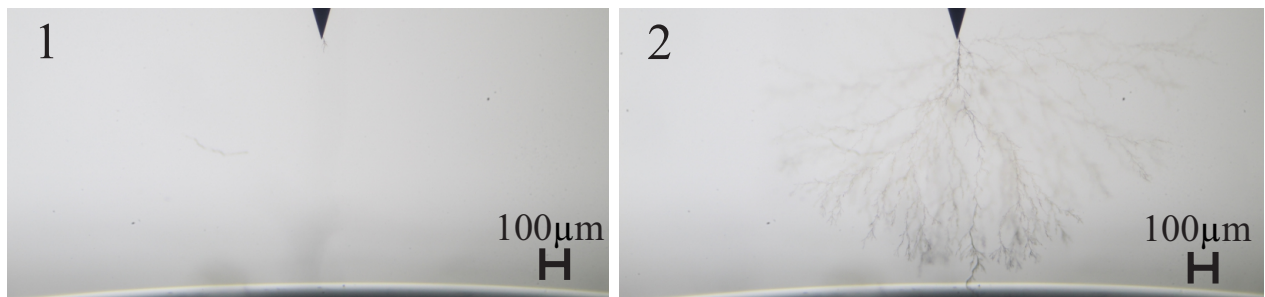


Figura 4.45: Etapas 1 y 2 de los árboles eléctricos bajo fundamental + undécima armónica desfasada en 180° .

Capítulo 5

Resumen final y conclusiones

En este capítulo, se presenta un resumen del trabajo realizado en el estudio de la influencia de armónicas de tensión en el crecimiento de árboles eléctricos. El análisis se llevó a cabo principalmente utilizando técnicas de forma de onda aplicadas a pulsos de DP, lo que permitió describir el avance de los árboles eléctricos en las diferentes etapas de crecimiento. Además, se analizaron estas DP mediante el método tradicional PRPD, con el propósito de comparar su eficacia en este estudio.

Por último, los resultados obtenidos a partir de las señales de excitación con contenido armónico se compararon con los resultados del caso base a 50 Hz. Esta comparación reveló similitudes en el desarrollo de los árboles eléctricos, así como diferencias que surgieron principalmente en la etapa de *post-cruce*.

Técnicas basadas en forma de onda

En este trabajo, se han estudiado las técnicas de identificación y separación de fuentes de DP, evaluando su capacidad para describir el avance de los árboles eléctricos. El análisis se lleva a cabo mediante el cálculo de parámetros de forma de onda de DP en el dominio del tiempo y/o frecuencia, con el propósito de encontrar tendencias que permitan describir el crecimiento de los árboles eléctricos y, en particular, el momento en que se ha alcanzado el contra-electrodo (cruce). Estas variaciones en los diferentes parámetros bajo estudio se presentaron en los gráficos de tipo *box-plot* en la Sección 4.4.

En los análisis de la magnitud del parámetro PRL, se ha observado un comportamiento ascendente – descendente que describe el desarrollo de árboles eléctricos. Por otro lado, la magnitud del parámetro PRH presentó una tendencia creciente que se relaciona de una manera más directa con el avance de los árboles eléctricos. Las variaciones de ambos parámetros se calculan entre las etapas *pre-cruce* y *post-cruce*, dando lugar a una variación negativa en PRL y una variación positiva en PRH. Estas variaciones permiten identificar el momento en que los árboles eléctricos cruzan hacia el contra-electrodo.

El mapa tiempo-frecuencia mostró su capacidad para identificar el cruce del árbol eléctrico hacia el contra-electrodo a través de la variación de sus parámetros σ_T y σ_F . La magnitud de σ_T presentó un

aumento de magnitud a medida que el árbol eléctrico se acerca al contra-electrodo, luego después del cruce disminuye su magnitud, dando a conocer una variación negativa entre la etapa de *pre-cruce* y *post-cruce* en el 70 % del total de los ensayos.

Mientras que la magnitud de σ_F exhibió un comportamiento descendente-ascendente. Sin embargo, no presentó una tendencia clara en la variación de su magnitud entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce* en el total de los ensayos, que permitan identificar el cruce del árbol eléctrico hacia el contra-electrodo.

Los parámetros obtenidos a través del análisis de la envolvente de las DP también demostraron su capacidad para identificar el cruce del árbol eléctrico. Específicamente, en el 70 % del total de casos analizados la magnitud de A_t mostró una tendencia a incrementar su valor a medida que el árbol eléctrico se acerca al contra-electrodo, luego después del cruce disminuye su valor, dando a conocer una variación negativa entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*.

Por otro lado, el parámetro f en los casos con contenido armónico muestra una tendencia clara para identificar el cruce del árbol eléctrico hacia el contra-electrodo, donde se observó una variación positiva de la magnitud de f entre las etapas de *pre-cruce* y *post-cruce*. Sin embargo, en los casos a frecuencia industrial 50 Hz, dos de tres casos analizados presentaron esta misma tendencia.

La representación gráfica mediante mapas σ_F v/s PRL, muestra el comportamiento de ambos parámetros involucrados durante el crecimiento de cada árbol eléctrico. Los resultados obtenidos al aplicar el mapa σ_F v/s PRL revelaron una tendencia decreciente de σ_F , mientras que la tendencia de PRL fue ascendente. En este estudio, la tendencia que caracteriza las etapas de crecimiento de los árboles eléctricos fue comparada con otra investigación a frecuencia variable [8].

Es relevante mencionar que la descripción del estado de avance de los árboles eléctricos tuvo éxito solo en el 30 % de las 20 probetas analizadas. En los casos restantes no se logra una descripción completa mediante las tendencias de los parámetros en el mapa σ_F v/s PRL. Concluyendo que en los ensayos realizados en este estudio no es técnica confiable para describir el crecimiento de los árboles eléctricos bajo la influencia de armónicas de tensión.

Tiempos de cruce y ruptura

En este estudio se analizaron 20 ensayos a un nivel máximo de tensión de $12\sqrt{2}$ kV. De estos, 3 se realizaron a frecuencia industrial (50 Hz) y 17 se llevaron a cabo mediante la superposición de la fundamental más armónicas de tercer, séptimo y undécimo orden, donde cada una de estas armónicas fue desfasada en 0° o 180° , respecto a la fundamental. Los tiempos de cruce (T_c) de los ensayos superpuestos con contaminación armónica fueron inferior a 50 min., en general disminuyeron a medida que la frecuencia de las armónicas aumentó, salvo en el caso de fundamental superpuesta con la undécima armónica sin desfase. Por otra parte, el tiempo de ruptura presentó mayor variabilidad

donde 5 ensayos con contaminación armónica de tercer y séptimo orden presentaron prolongadas etapas de *post-cruce* mayores a 60 min.

En general, los ensayos con contaminación armónica presentaron tiempos de cruce y ruptura mayores a los ensayos a 50 Hz, lo que puede atribuirse a que la tensión *peak* utilizada fue la misma de $12\sqrt{2}$ kV en todos los ensayos analizados en este estudio. Por lo que, la influencia de las armónicas en la señal de excitación no aumenta la tensión *peak*, la cual es considerada como un factor de estrecha relación con la evolución de las DP y en los tiempos de cruce y ruptura [4].

Morfología de árboles eléctricos

Se analizaron las imágenes de árboles eléctricos en todos los ensayos realizados, identificando sus formas y cuantificando su avance en el tiempo a través de la medición de la longitud de cada árbol. Se observó que los árboles que crecieron a frecuencia industrial de 50 Hz fueron de tipo rama. Posteriormente, una vez alcanzado el contra-electrodo, comenzaron a desarrollarse ramificaciones correspondientes a árboles inversos que surgieron normalmente desde el contra-electrodo extendiéndose hacia la punta de la aguja. Se caracterizaron por tener ramas más gruesas, visualizadas en las imágenes por su apariencia más oscura debido a una mayor concentración de carbono situado en las paredes de los canales tubulares.

En cambio, en los árboles desarrollados bajo excitación superpuestas con armónicas en la etapa previa al cruce presentaron estructuras con una mayor cantidad de ramificaciones, aún así cumplen las características base de un árbol tipo rama. Posteriormente cuando los árboles eléctricos han alcanzado el contra-electrodo, también se evidenció un desarrollo más abundante de árboles inversos y en un caso de la fundamental superpuesta con la tercera armónica desfasada en 180° cerca de la punta de la aguja se evidenció una estructura tipo arbusto.

Aporte de las técnicas de análisis

En los análisis PRPD las señales superpuestas con armónicas en etapas de *post-cruce* mostraron los patrones típicos de DP [5]. Sin embargo, se encontraron variaciones en los diagramas PRPD obtenidos en las etapas intermedias de crecimiento de los árboles eléctricos, debido a la baja ocurrencia de DP. Desde que los árboles alcanzan el contra-electrodo se evidenció un aumento de la actividad de las DP y la magnitud de las DP en *post-cruce*, a través de los análisis cuantitativos se evidenciaron cambios en las magnitudes de los distintos momentos estadísticos y parámetros expuestos en la norma IEC 60270, permitiendo identificar el cruce de los árboles eléctricos.

Por otra parte, los análisis de la forma de onda de DP mediante variaciones o tendencias se relacionaron con la longitud de los árboles eléctricos, otorgando información respecto al avance de los

árboles eléctricos o al grado de degradación del aislamiento, tal como en los mapas PRL vs σ_F . La similitud en los comportamientos de los parámetros obtenidos al aplicar las diferentes técnicas de forma de onda, indican que tienen una respuesta independiente y robusta frente a las señales de excitación con contenido armónico abarcadas en este estudio.

Se requiere aumentar la cantidad de ensayos con contenido armónico para verificar si las tendencias observadas de los parámetros podrían ser de utilidad para el diagnóstico o el monitoreo de condición de aislamientos sólidos.

Trabajo futuro y recomendaciones

Realizar ensayos de crecimiento de árboles eléctricos superponiendo más de una armónica a la señal de frecuencia industrial (50 Hz), por ejemplo, la undécima armónica junto a décimo tercera armónica están presentes de forma simultánea en partes del sistema eléctrico debido al uso de convertidores de potencia [26].

Automatizar los análisis de los parámetros obtenidos con las técnicas de forma de onda con la finalidad de generar una herramienta predictiva para caracterizar y evaluar el estado de avance de los árboles eléctricos.

En los análisis a realizar con la data del osciloscopio, para obtener la fase de ocurrencia de cada DP se recomienda que se trabaje con la fundamental de la señal de excitación compuesta, con la finalidad de no complejizar la tarea y utilizar las herramientas desarrolladas en este trabajo y en la investigación [25].

Anexos

Anexo A

Morfología de los árboles eléctricos

En el siguiente link https://drive.google.com/drive/folders/1B9tKJFUcxhi_TfzyC71j1aX6N6j1qhDA se encuentra una carpeta que contiene el desarrollo de los árboles eléctricos de las probetas utilizadas en este estudio.



Figura A.1: Código QR

Anexo B

Variación de parámetros de forma de onda

A continuación se presentan las variaciones de los parámetros de forma de onda entre las etapas de pre-cruce y post-cruce de 19 ensayos y con dichos datos fueron construidos los gráficos box-plot de la sección 4.4.

B.1. Parámetro PRL

	Pre-cross	Post-cross	Δ PRL (%)
50 Hz (a)	13,88	12,80	-1,08
50 Hz (b)	16,59	14,21	-2,37
50 Hz (c)	17,06	12,01	-5,06
3 ^{era} 0° (a)	9,69	9,30	-0,38
3 ^{era} 0° (b)	7,53	8,49	0,96
3 ^{era} 0° (c)	9,91	11,50	1,59
3 ^{era} 180° (a)	14,48	10,96	-3,53
3 ^{era} 180° (b)	12,47	10,48	-1,98
3 ^{era} 180° (c)	13,63	9,87	-3,75
7 ^{ma} 0° (a)	8,99	10,55	1,56
7 ^{ma} 0° (b)	13,33	10,67	-2,66
7 ^{ma} 0° (c)	12,98	12,67	-0,31
7 ^{ma} 180° (a)	9,79	9,66	-0,13
7 ^{ma} 180° (b)	9,89	9,75	-0,14
7 ^{ma} 180° (c)	10,06	9,63	-0,42
11 ^{va} 0° (a)	17,05	9,87	-7,18
11 ^{va} 0° (b)	15,37	8,65	-6,72
11 ^{va} 0° (c)	11,01	10,40	-0,61
11 ^{va} 180° (b)	9,07	11,62	2,55

Tabla B.1: Variación del parámetro PRL en (%) entre pre-cruce y post-cruce

B.2. Parámetro PRH

	Pre-cross	Post-cross	Δ PRH (%)
50 Hz (a)	48,35	54,48	6,13
50 Hz (b)	55,79	51,92	-3,86
50 Hz (c)	50,18	54,97	4,79
3 ^{era} 0° (a)	53,75	57,15	3,40
3 ^{era} 0° (b)	58,57	59,90	1,34
3 ^{era} 0° (c)	58,84	60,04	1,20
3 ^{era} 180° (a)	56,58	62,18	5,61
3 ^{era} 180° (b)	56,96	61,28	4,32
3 ^{era} 180° (c)	57,04	54,02	-3,02
7 ^{ma} 0° (a)	58,99	60,36	1,38
7 ^{ma} 0° (b)	53,72	60,20	6,49
7 ^{ma} 0° (c)	57,74	60,07	2,33
7 ^{ma} 180° (a)	56,94	58,36	1,42
7 ^{ma} 180° (b)	58,47	63,56	5,10
7 ^{ma} 180° (c)	54,59	60,38	5,79
11 ^{va} 0° (a)	51,97	56,25	4,28
11 ^{va} 0° (b)	57,36	60,75	3,40
11 ^{va} 0° (c)	54,56	61,18	6,62
11 ^{va} 180° (b)	57,40	63,85	6,45

Tabla B.2: Variación del parámetro PRH en (%) entre pre-cruce y post-cruce

B.3. Parámetro σ_T

	Pre-cross	Post-cross	$\Delta \sigma_T$ (ns)
50 Hz (a)	238,94	139,05	-99,89
50 Hz (b)	206,10	170,07	-36,03
50 Hz (c)	230,24	157,39	-72,85
3 ^{era} 0° (a)	192,38	203,12	10,75
3 ^{era} 0° (b)	88,50	98,60	10,10
3 ^{era} 0° (c)	146,41	152,03	5,62
3 ^{era} 180° (a)	235,35	113,93	-121,41
3 ^{era} 180° (b)	221,40	121,24	-100,16
3 ^{era} 180° (c)	166,64	180,96	14,32
7 ^{ma} 0° (a)	116,03	199,41	83,38
7 ^{ma} 0° (b)	230,16	143,09	-87,07
7 ^{ma} 0° (c)	251,79	194,52	-57,26
7 ^{ma} 180° (a)	200,00	183,30	-16,70
7 ^{ma} 180° (b)	200,53	116,91	-83,62
7 ^{ma} 180° (c)	194,60	154,28	-40,32
11 ^{va} 0° (a)	265,73	152,35	-113,38
11 ^{va} 0° (b)	239,64	141,34	-98,29
11 ^{va} 0° (c)	213,84	133,79	-80,05
11 ^{va} 180° (b)	167,62	121,98	-45,65

Tabla B.3: Variación del parámetro σ_T en (ns), entre pre-cruce y post-cruce

B.4. Parámetro σ_F

	Pre-cross	Post-cross	$\Delta \sigma_F$ (MHz)
50 Hz (a)	68,71	64,77	-3,94
50 Hz (b)	58,84	65,14	6,29
50 Hz (c)	63,05	65,18	2,13
3 ^{era} 0° (a)	67,59	65,56	-2,03
3 ^{era} 0° (b)	67,57	64,83	-2,74
3 ^{era} 0° (c)	63,27	59,82	-3,45
3 ^{era} 180° (a)	58,80	59,58	0,77
3 ^{era} 180° (b)	61,47	61,17	-0,30
3 ^{era} 180° (c)	59,55	67,16	7,61
7 ^{ma} 0° (a)	59,58	67,11	7,53
7 ^{ma} 0° (b)	58,86	61,38	2,52
7 ^{ma} 0° (c)	59,84	58,58	-1,26
7 ^{ma} 180° (a)	64,90	63,92	-0,97
7 ^{ma} 180° (b)	64,73	64,93	0,21
7 ^{ma} 180° (c)	67,02	65,73	-1,29
11 ^{va} 0° (a)	57,01	65,00	7,99
11 ^{va} 0° (b)	57,28	64,15	6,87
11 ^{va} 0° (c)	66,09	63,20	-2,89
11 ^{va} 180° (b)	66,49	65,24	-1,25

Tabla B.4: Variación del parámetro σ_F en (MHz) entre pre-cruce y post-cruce

B.5. Parámetro A_t

	Pre-cross	Post-cross	ΔA_p (ns)
50 Hz (a)	110,26	72,20	-38,06
50 Hz (b)	96,37	85,61	-10,76
50 Hz (c)	81,20	79,97	-1,23
3 ^{era} 0° (a)	96,26	105,36	9,09
3 ^{era} 0° (b)	89,73	60,44	-29,29
3 ^{era} 0° (c)	86,66	80,11	-6,55
3 ^{era} 180° (a)	109,44	64,16	-45,28
3 ^{era} 180° (b)	104,07	69,09	-34,98
3 ^{era} 180° (c)	80,37	88,53	8,16
7 ^{ma} 0° (a)	96,96	92,02	-4,94
7 ^{ma} 0° (b)	126,21	76,15	-50,06
7 ^{ma} 0° (c)	118,81	92,42	-26,39
7 ^{ma} 180° (a)	106,00	93,78	-12,22
7 ^{ma} 180° (b)	97,18	85,89	-11,28
7 ^{ma} 180° (c)	97,19	79,89	-17,30
11 ^{va} 0° (a)	124,82	80,75	-44,07
11 ^{va} 0° (b)	107,88	76,72	-31,16
11 ^{va} 0° (c)	111,12	88,01	-23,11
11 ^{va} 180° (b)	88,00	84,93	-3,07

Tabla B.5: Variación del parámetro A_t en (ns) entre pre-cruce y post-cruce

B.6. Parámetro f

	Pre-cross	Post-cross	Δf (MHz)
50 Hz (a)	30,60	26,83	-3,77
50 Hz (b)	25,93	27,82	1,89
50 Hz (c)	31,78	36,53	4,75
3 ^{era} 0° (a)	51,78	53,10	1,33
3 ^{era} 0° (b)	52,52	54,46	1,95
3 ^{era} 0° (c)	46,07	46,07	0,00
3 ^{era} 180° (a)	31,81	44,75	12,94
3 ^{era} 180° (b)	39,02	44,64	5,62
3 ^{era} 180° (c)	27,08	52,10	25,02
7 ^{ma} 0° (a)	48,85	55,18	6,33
7 ^{ma} 0° (b)	6,18	44,95	38,77
7 ^{ma} 0° (c)	35,30	33,59	-1,71
7 ^{ma} 180° (a)	51,33	50,34	-0,99
7 ^{ma} 180° (b)	52,11	52,80	0,68
7 ^{ma} 180° (c)	51,09	52,09	1,00
11 ^{va} 0° (a)	31,58	48,39	16,81
11 ^{va} 0° (b)	28,67	55,14	26,47
11 ^{va} 0° (c)	49,85	58,42	8,57
11 ^{va} 180° (b)	54,05	56,58	2,53

Tabla B.6: Variación del parámetro f en (MHz) entre pre-cruce y post-cruce

Referencias

- [1] S. Bahadoorsingh and S. M. Rowland, “Investigating the impact of harmonics on the breakdown of epoxy resin through electrical tree growth,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 5, pp. 1576–1584, 2010.
- [2] S. M. Haque, J. A. A. Rey, A. A. Masúd, Y. Umar, and R. Albarracin, “Electrical Properties of Different Polymeric Materials and their Applications: The Influence of Electric Field,” *Properties and Applications of Polymer Dielectrics*, no. May, 2017.
- [3] T. Baumann, B. Fruth, F. Stucki, and H. R. Zeller, “Field-enhancing Defects in Polymeric Insulators Causing Dielectric Aging,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 1071–1076, 1989.
- [4] I. Idrissu and S. M. Rowland, “The impact of harmonic frequencies on electrical tree growth in epoxy resin,” pp. 753–756, 2017.
- [5] M. Florkowski and B. Florkowska, “Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, pp. 171–180, March, 2006.
- [6] J. A. Ardila-Rey, M. P. Cerda-Luna, R. A. Rozas-Valderrama, B. A. De Castro, A. L. Andreoli, and F. Muhammad-Sukki, “Separation techniques of partial discharges and electrical noise sources: A review of recent progress,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 199 449–199 461, 2020.
- [7] J. C. Chan, H. Ma, and T. K. Saha, “Time-frequency sparsity map on automatic partial discharge sources separation for power transformer condition assessment,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 2271–2283, 2015.
- [8] C. Madariaga, R. Schurch, J. Ardila-Rey, O. Munoz, and S. Fingerhuth, “Partial Discharge Electrical Tree Growth Identification by Means of Waveform Source Separation Techniques,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64 665–64 675, 2021.
- [9] Y. Zhang, Y. Zhou, L. Zhang, Z. Zhou, and Q. Nie, “Electrical trees and their growth in silicone rubber at various voltage frequencies,” *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 0–12, 2018.
- [10] M. Florkowski, B. Florkowska, and P. Zydron, “High voltage harmonics induced modifications of PD phase-resolved patterns,” *Archives of Electrical Engineering*, vol. 67, no. 2, pp. 231–246, 2018.

- [11] J. A. Ardila-Rey, J. Montaña, B. A. de Castro, R. Schurch, J. A. C. Ulson, F. Muhammad-Sukki, and N. A. Bani, “A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, 2018.
- [12] J. Densley, “Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - an overview,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 14–22, 2001.
- [13] IEC, *IEC 60270- High-voltage test techniques – Partial discharge measurements Techniques*, 2015, vol. 2000, no. 40.
- [14] S. K. Haque, J. A. Ardila-Rey, Y. Umar, A. A. Masúd, F. Muhammad-Sukki, B. H. Jume, H. Rahman, and N. A. Bani, “Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment,” *Energies*, vol. 14, no. 10, pp. 1–29, 2021.
- [15] B. X. Du, Z. L. Ma, Y. Gao, and T. Han, “Effect of ambient temperature on electrical treeing characteristics in silicone rubber,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 401–407, 2011.
- [16] R. Lasser, *Introduction to Fourier Series*. CRC Press, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.cl/books?id=Bhn0DwAAQBAJ>
- [17] M. Florkowski, B. Florkowska, J. Furgał, and P. Zydrón, “Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 6, pp. 2009–2016, 2013.
- [18] J. C. Chan, H. Ma, and T. K. Saha, “Time-frequency sparsity map on automatic partial discharge sources separation for power transformer condition assessment,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 2271–2283, 2015.
- [19] M. Hoof and R. Patsch, “Pulse-sequence analysis: a new method for investigating the physics of PD-induced ageing,” *IEE Proc. - Science, Measurement and Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 95–101, 1995.
- [20] J. A. Ardila-Rey, E. Montero, and N. M. Poblete, “Application of meta-heuristic approaches in the spectral power clustering technique (SPCT) to improve the separation of partial discharge and electrical noise sources,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 110 580–110 593, 2019.
- [21] P. 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.” p. 1–107, 2020.
- [22] M. Maureira Retamales, “Implementación de un banco de pruebas de laboratorio para el monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos y sus descargas parciales asociadas a excitación a frecuencia industrial y VLF,” p. 1–156, 2017.

- [23] R. Schurch, O. Munoz, and J. Ardila-Rey, “Electrical tree growth under harmonic frequencies characterized by partial discharges waveforms,” *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, vol. 2020-Octob, pp. 168–171, 2020.
- [24] F. Alvarez, J. Ortego, F. Garnacho, and M. A. Sanchez-Uran, “A clustering technique for partial discharge and noise sources identification in power cables by means of waveform parameters,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 469–481, 2016.
- [25] O. Muñoz Bustamante, “Análisis de la forma de onda en descargas parciales durante el crecimiento de árboles eléctricos con excitación de frecuencia variable.” p. 1–114, 2022.
- [26] S. Bahadoorsingh and S. M. Rowland, “An investigation of the harmonic impact on electrical tree growth,” *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 1–5, 2010.