



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Análisis del efecto de vacuolas de aire en aislamiento de resina epóxica en el crecimiento de árboles eléctricos

Bastian Marcelo Santander Divacache

Requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía:
Roger Schürch Brandt
Profesor correferente:
Jorge Ardila Rey

Valparaíso, 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Análisis del efecto de vacuolas de aire en aislamiento de resina epóxica en el crecimiento de árboles eléctricos

Bastian Marcelo Santander Divacache

Requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor guía:
Roger Schürch Brandt
Profesor correferente:
Jorge Ardila Rey

I. Resumen

Uno de los principales mecanismos de degradación en el aislamiento polimérico de alta tensión es debido a la aparición y crecimiento de árboles eléctricos. Los árboles eléctricos son estructuras tubulares microscópicas iniciadas en lugares de elevado campo eléctrico, normalmente debido a elementos contaminantes o defectos en el material. Se ha demostrado que el crecimiento de los árboles eléctricos está estrechamente relacionado a las características de las DP asociadas durante su crecimiento, siendo posible una gran variedad de análisis estudiando estas características.

Debido a la naturaleza estocástica del crecimiento de árboles eléctricos junto a la gran variedad de variables que afectan su crecimiento y su importancia para los sistemas de potencia, este fenómeno ha sido bastante estudiado en la literatura, siendo también el foco principal de esta memoria. En esta memoria se estudiará como la presencia de vacuolas de aire afectan al desarrollo de árboles eléctricos en probeta de resina epóxica, siendo un símil a el desarrollo de árboles eléctricos en aislamientos poliméricos.

Con este propósito se ensayarán probetas con configuración de electrodos punta-placa, hechas con resina epóxica a las que se les inserta una vacuola de aire, variando tanto posición y volumen de esta. Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, con equipo especialmente reunido para el estudio de arborización eléctrica. Entre los equipos disponibles se cuenta con un transformador de alta tensión para energizar ensayo (hasta 24kV), una cámara de alta definición, un osciloscopio de alta tasa de muestreo y un equipo de medición de descargas parciales comercial, todo esto conectado a través de un circuito de sustracción para mejorar calidad de mediciones. Los ensayos se llevan a cabo energizando probeta con tensión de 14kV y 50Hz, llegando hasta ruptura de aislación.

Para el análisis de datos obtenidos se tiene en cuenta el uso tanto de técnicas tradicionales PSA y PRPD, como de técnicas no tradicionales que usan la información de la forma de onda de las descargas parciales. Entre las técnicas basadas en la forma de onda de descarga parcial se encuentra el uso de mapas TF, mapas PR, parámetros de envolvente y funciones de energía acumulada principalmente, con el objetivo de intentar caracterizar probetas y vincular estos análisis al crecimiento de árboles eléctricos.

Las probetas ensayadas fueron agrupadas en 3 categorías, según distancia de vacuola a punta de alta tensión, vacuola a distancia entre 1mm y 100μm, vacuola a distancia menor a 100μm y vacuola insertada en punta.

Probetas con vacuola a distancia menor de 100μm, no pudieron desarrollar arboles eléctricos, incluso luego de varios días de ensayo. Probetas con vacuola insertada desarrollaron arboles eléctricos luego de entre 1 a 3 días de ensayo, los cuales crecían desde zona inferior de vacuola rápidamente (entre 1 a 5 horas), resultando en ruptura de aislación al tocar contraelectrodo, se identificó sensibilidad tanto en PRPD, PSA y parámetros de forma de onda durante crecimiento de árbol eléctrico. Para probetas con vacuola a distancia entre 1mm y 100μm, se identificaron 2 comportamientos, uno en que árbol no parece interactuar con vacuola y lo cual se justifica con falta de sensibilidad en técnicas de análisis, mientras que en otro comportamiento se tiene una clara interacción con vacuola, teniendo árbol eléctrico contacto con la imperfección, engrosándose sus ramas y presentando una acelerada ruptura. En el comportamiento donde árbol eléctrico

interactúa con vacuola a mitad de crecimiento se nota una gran sensibilidad y patrones tanto en PRPD, PSA y parámetros de forma de onda, los cuales presentan cambios tanto cuando el árbol llega a imperfección y durante todo el crecimiento del árbol eléctrico, siendo posible caracterizar este comportamiento según comportamiento de descargas parciales.

Junto a resultados experimentales, se desarrolla una simulación estática de campo eléctrico en software FEMM. En esta simulación se plasman 3 configuraciones mencionadas y se obtiene distribución de campo eléctrico sin considerar presencia de árbol eléctrico, esto con el objetivo de desarrollar hipótesis para resultados obtenidos. Estas simulaciones resultaron en, primero que probetas con punta insertada presentan altos campos eléctricos en superficie de vacuola, lo que posiblemente como se vio en ensayos provoca erosión de vacuola y esta erosión propicia arborización eléctrica desde vacuola. Mientras que para probetas con vacuola cercana esta distancia es suficiente para que se genere un canal hacia vacuola, pero no para generar arborización, debido a la gran inhomogeneidad de la configuración hay una disminución muy notoria de campo eléctrico hacia vacuola lo que como se vio en resultado experimental hace mucho más lento proceso de erosión de vacuola. Por último, para caso de vacuola a distancia mayor a 100 μ m, se pudo comprobar que la distorsión en campo eléctrico provocada por la vacuola es de baja magnitud, siendo menos relevante en iniciación de árbol, provocando como se vio en ensayos, que haya una probabilidad que árbol eléctrico interactúe con la imperfección, pero también puede suceder que no exista esta interacción, por la naturaleza estocástica del fenómeno de arborización.

II. Abstract

One of the main degradation mechanisms in high voltage polymeric insulation is due to the appearance and growth of electrical trees. Electric trees are microscopic tubular structures initiated in places of high electric field, usually due to contaminating elements or defects in the material. It has been demonstrated that the growth of electric trees is closely related to the characteristics of the PDs associated during their growth, making a wide variety of analyzes possible by studying these characteristics.

Due to the stochastic nature of the growth of electric trees together with the wide variety of variables that affect their growth and their importance for power systems, this phenomenon has been widely studied in the literature, and is also the main focus of this report. In this report, we will study how the presence of air vacuoles affects the development of electrical trees in epoxy resin probes, being a simile to the development of electrical trees in polymeric insulation.

For this purpose, probes with a tip-plate electrode configuration will be tested, made with epoxy resin to which an air vacuole is inserted, varying both its position and volume. These tests were carried out in the high voltage laboratory of the Federico Santa María Technical University, with equipment specially assembled for the study of electrical treeing. Among the equipment available is a high voltage transformer to power the test (up to 24kV), a high definition camera, a high sampling rate oscilloscope and commercial partial discharge measurement equipment, all connected through a subtraction circuit to improve the quality of measurements. The tests are carried out by energizing the probe with a voltage of 14kV and 50Hz, reaching insulation breakdown.

For the analysis of the data obtained, the use of both traditional PSA and PRPD techniques, as well as non-traditional techniques that use partial discharge waveform information, is taken into account. Among the techniques based on the partial discharge waveform is the use of TF maps, PR maps, envelope parameters and accumulated energy functions mainly, with the aim of trying to characterize probes and link these analyzes to the growth of electric trees.

The tested probes were grouped into 3 categories, according to the distance from the vacuole to the high voltage tip, vacuole at a distance between 1 mm and 100 μm , vacuole at a distance less than 100 μm and vacuole inserted into the tip.

Test tubes with a vacuole at a distance of less than 100 μm could not develop electric trees, even after several days of testing. Test tubes with inserted vacuole developed electrical trees after between 1 to 3 days of testing, which grew from the lower zone of the vacuole quickly (between 1 to 5 hours), resulting in insulation breakdown when touching the counter electrode. Sensitivity was identified in both PPR, PSA and waveform parameters during electric tree growth. For specimens with a vacuole at a distance between 1mm and 100 μm , 2 behaviors are identified, one in which the tree does not seem to interact with the vacuole and which is justified by a lack of sensitivity in analysis techniques, while in another behavior there is a clear interaction with vacuole, having electrical tree contact with the imperfection, thickening its branches and presenting an accelerated rupture. In the behavior where electric tree interacts with vacuole in mid-growth, great sensitivity and patterns are noted in both PRPD, PSA and waveform parameters, which present changes both when the tree reaches imperfection

and throughout the growth of the tree. electrical, being possible to characterize this behavior according to partial discharge behavior.

Together with experimental results, a static electric field simulation is developed in FEMM software. In this simulation, 3 mentioned configurations are reflected and electric field distribution is obtained without considering the presence of an electric tree, this with the objective of developing hypotheses for the results obtained. These simulations resulted in, first, that specimens with an inserted tip present high electric fields on the vacuole surface, which possibly, as seen in tests, causes vacuole erosion and this erosion promotes electrical arborization from the vacuole. While for specimens with a close vacuole this distance is sufficient to generate a channel towards the vacuole, but not to generate arborization, due to the great inhomogeneity of the configuration there is a very noticeable decrease in the electric field towards the vacuole, which, as seen in experimental result makes the vacuole erosion process much slower. Finally, in the case of a vacuole at a distance greater than $100\mu\text{m}$, it was possible to verify that the distortion in the electric field caused by the vacuole is of low magnitude, being less relevant in tree initiation, causing, as seen in tests, that there is a probability that electric tree interacts with the imperfection, but it may also happen that this interaction does not exist, due to the stochastic nature of the arborization phenomenon.

Índice de contenidos	
I. Resumen	i
II. Abstract	iii
III. Índice de figuras	vii
IV. Índice de tablas	x
V. Nomenclatura	xi
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivo general	2
1.4. Objetivos específicos	2
2. Metodología experimental	4
2.1. Creación de probetas	4
2.2. Banco de mediciones y pruebas	5
2.3. Control de ensayos	10
2.4. Iniciación de árboles eléctricos	11
2.5. Crecimiento de árboles eléctricos	12
3. Marco teórico y metodología de análisis	13
3.1. Arborización eléctrica	13
3.2. Análisis resuelto en fase (PRPD)	14
3.3. Análisis de secuencia de pulso (PSA)	15
3.4. Análisis de forma de onda	16
3.5. Filtrado de ruido	19
4. Resultados y análisis	21
4.1. Clasificación de probetas y consideraciones	21
4.2. Probetas con vacuola insertada (Tipo 1)	23
4.3. Probetas con vacuola cercana a punta (Tipo 2)	31
4.4. Probetas con vacuola a distancia media (Tipo 3)	33
5. Simulación estática de campo eléctrico	46
5.1. Probetas con vacuola insertada en punta	48
5.2. Probetas con vacuola cercana a punta	49
5.3. Probetas con vacuola a distancia media de punta	51
6. Conclusiones y trabajo futuro	52
7. Referencias	54
8. Anexos	56
8.1. MV183	56
8.2. MV184	59
8.3. MV185	62
8.4. MV187	66
8.5. MV189	70
8.6. MV124	74
8.7. MV153	79

8.8.	MV154	82
8.9.	MV167	86
8.10.	MV168	90

III. Índice de figuras

Figura 1 Modelo esquemático de probeta a ensayar (Fuente: Ensayos LAT).....	4
Figura 2 Figura esquemática de agujas Ogura (Fuente: Fabricante)	5
Figura 3 Banco de ensayo en alta tensión arboles eléctricos (Fuente: propia).....	5
Figura 4 Transformador de alta tensión usado (Fuente: propia)	6
Figura 5 Cámara Canon T6	Figura 6 Lente Canon MP-E 65mm f/2.8
Figura 7 Equipo de medición de descargas parciales Omicron (izquierda MPD 600 y derecha MCU502)	7
Figura 8 Circuito balanceado de medición DP (Fuente: [8]).....	8
Figura 9 Osciloscopio usado (Fuente: propia).....	9
Figura 10 HFCT utilizado	9
Figura 11 Cubículo de probetas y equipo de calibración	10
Figura 12 Porta probetas usados.....	10
Figura 13 Zona de control de ensayos	11
Figura 14 Clasificación de DP según origen (Fuente [12])	14
Figura 15 Ejemplo de diagrama PRPD (Fuente: propia).....	14
Figura 16 explicación grafica PSA (Fuente: [14]).....	15
Figura 17 Ejemplos de gráficos PSA.....	16
Figura 18 Ejemplo forma de onda DP (Fuente: Propia MV182)	16
Figura 19 Muestra grafica de significado de parámetros (Fuente [19]).....	18
Figura 20 Ejemplo grafico SF (Fuente: Propia MV187).....	20
Figura 21 Tipos de probeta a analizar (a Tipo 1, b Tipo 2, c Tipo 3, referencia propia)	21
Figura 22 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1h 40min a 2h 20min.....	24
Figura 23 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 1h 0min a 1d 1h 30min.....	25
Figura 24 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 2h 0min a 2d 3h 10min.....	25
Figura 25 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 22h 0min a 2d 22h 20min	26
Figura 26 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 22h 20min a 2d 23h....	27
Figura 27 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 22h 20min a 2d 23h....	27
Figura 28 MV155 parámetros de forma de onda.....	27
Figura 29 MV155 parámetros de forma de onda.....	27
Figura 30 MV155 parámetros de forma de onda.....	28
Figura 31 MV155 parámetros de forma de onda.....	28
Figura 32 Imágenes inicial-final de probetas con crecimiento desde vacuola (MV124 (a), MV153 (b), MV154 (c), MV167 (d) y MV168 (e)).....	29
Figura 33 Imágenes inicial-final de probetas con vacuola cercana a punta (MV160 (a), MV161 (b) y MV166 (c)).....	32
Figura 34 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 9 min	34
Figura 35 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 21 a 27 min	35
Figura 36 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 42 a 48 min	36
Figura 37 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 68 a 74 min	37
Figura 38 MV182 Parámetros de forma de onda	38
Figura 39 Imágenes inicial-final de probetas con interacción de vacuola (MV182, MV183 (a), MV184 (b), MV185 (c) y MV187 (d))	39
Figura 40 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4 a 10 min	40
Figura 41 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 19 a 27 min	41
Figura 42 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 63 a 69 min	42
Figura 43 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 72 a 89 min	43

Figura 44 MV186 Parámetros de forma de onda	44
Figura 45 Imágenes inicial-final de MV189.....	45
Figura 46 Diagrama de simulaciones en FEMM (Vacuola mitad (a), cercana (b), insertada (c))	46
Figura 49 Distribución de potencial vacuola distancia media.....	48
Figura 50 Magnitud de campo eléctrico interior de vacuola insertada.....	48
Figura 51 Distribución de potencial vacuola cercana.....	49
Figura 52 Magnitud de campo eléctrico entre aguja y dentro de vacuola cercana.....	49
Figura 47 Distribución de potencial vacuola distancia media.....	51
Figura 48 Magnitud de campo eléctrico entre punta y vacuola distancia media.....	51
Figura 53 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 20 a 30 min.....	56
Figura 54 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 50 a 59 min.....	56
Figura 55 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 98 a 114 min.....	57
Figura 56 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 131 a 148 min.....	57
Figura 57 MV183 Parámetros de forma de onda	58
Figura 58 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 2 min.....	59
Figura 59 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 10 a 14 min.....	59
Figura 60 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 27 a 33 min.....	60
Figura 61 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 50 a 53 min.....	60
Figura 62 MV184 Parámetros de forma de onda	61
Figura 63 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 04 a 21 min.....	62
Figura 64 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 21 a 59 min.....	62
Figura 65 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 60 a 85 min.....	63
Figura 66 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 90 a 96 min.....	63
Figura 67 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 113 a 118 min.....	64
Figura 68 MV185 Parámetros de forma de onda	65
Figura 69 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 02 a 09 min.....	66
Figura 70 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 23 a 29 min.....	66
Figura 71 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 40 a 50 min.....	67
Figura 72 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 62 a 67 min.....	67
Figura 73 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 73 a 78 min.....	68
Figura 74 MV187 Parámetros de forma de onda	69
Figura 75 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 21 min.....	70
Figura 76 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 27 a 41 min.....	70
Figura 77 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 58 a 66 min.....	71
Figura 78 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 90 a 94 min.....	71
Figura 79 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 114 a 118 min.....	72
Figura 80 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 118 a 149 min.....	72
Figura 81 MV189 Parámetros de forma de onda	73
Figura 82 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 30 min.....	74
Figura 83 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 187 a 290 min.....	74
Figura 84 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h 50 min a 1d 3h 10min	75
Figura 85 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 30 min a 1d 4h 0min	75
Figura 86 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 6h 30 min a 1d 7h 0min	76
Figura 87 MV124 Parámetros de forma de onda	78
Figura 88 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 30min a 4h 0min.....	79
Figura 89 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 30min a 1d 4h 0min.....	79

Figura 90 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 4h 0min a 2d 4h 30min	80
Figura 91 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 13h 50min a 2d 14h 30min	80
Figura 92 MV153 Parámetros de forma de onda	81
Figura 93 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 0min a 3h 20min	82
Figura 94 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 0min a 1d 3h 20min	82
Figura 95 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 3h 10min a 2d 4h 10min	83
Figura 96 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 3h 30min a 3d 4h 50min	83
Figura 97 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 9h 50min a 3d 10h 50min	84
Figura 98 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 11h 30min a 3d 12h 0min	84
Figura 99 MV154 Parámetros de forma de onda	85
Figura 100 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 20min a 4h 0min	86
Figura 101 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h 50min a 1d 4h 0min	86
Figura 102 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 1h 0min a 2d 5h 10min	87
Figura 103 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 20h 15min a 2d 23h 20min	87
Figura 104 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 0h 0min a 3d 0h 30min	88
Figura 105 MV167 Parámetros de forma de onda	89
Figura 106 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 30min a 1h 0min	90
Figura 107 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h a 1d 1h 40min	90
Figura 108 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 0h 10min a 2d 0h 30min	91
Figura 109 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 2h 40min a 3d 6h 40min	91
Figura 110 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 8h 50min a 3d 15h 0min	92
Figura 111 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4d 12h 0min a 4d 13h 0min	92
Figura 112 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4d 13h 30min a 4d 15h 0min	93
Figura 113 MV168 Parámetros de forma de onda	94

IV. Índice de tablas

Tabla 1 Datos constructivos, probetas con vacuola insertada	23
Tabla 2 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola insertada	23
Tabla 3 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola insertada	23
Tabla 4 Datos constructivos probetas con vacuola cercana a punta	31
Tabla 5 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola cercana a punta	31
Tabla 6 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola cercana a punta ...	31
Tabla 7 Datos constructivos, probetas con vacuola a distancia media	33
Tabla 8 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola a distancia media (Tipo 3)	33
Tabla 9 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola distancia media (Tipo 3)	33

V. Nomenclatura

AT : Alta tensión
DP : Descarga parcial
PRPD : Phase resolved partial discharge (análisis resuelto en fase)
PSA : Pulse sequence analysis (análisis de secuencia de pulsos)
LAT : Laboratorio de alta tensión
HFCT : High frequency current transformer (transformador de corriente de alta frecuencia)
FFT : Fast Fourier transform (transformada rápida de fourier)

1. Introducción

1.1. Contexto

Actualmente se tiene un gran compromiso con la confiabilidad de los sistemas eléctricos, la cual es exigida por los usuarios y por distintas normativas. Debido a esto, es muy importante estudiar fenómenos de degradación en el aislamiento eléctrico, ya que una falla de aislamiento generalmente provoca un evento de falla catastrófica que involucra el reemplazo de equipo involucrado y posiblemente falta de suministro eléctrico. Un factor importante en la calidad del aislamiento eléctrico es la existencia de imperfecciones, las cuales están presentes en mayor o menor medida, debido a que los procesos de fabricación no son perfectos.

El desarrollo de árboles eléctricos es uno de los mecanismos de degradación principales en los aislamientos poliméricos sometidos a alta tensión [1]. Estos son estructuras tubulares microscópicas iniciadas en lugares de elevado campo eléctrico, normalmente debido a elementos contaminantes o defectos en el material, que crecen en el tiempo siendo posible medir descargas parciales (DP) asociadas a su crecimiento [2]. El fenómeno de arborización es un fenómeno complejo, en el cual se ha podido comprobar que las imperfecciones en el aislamiento tienen un efecto en el crecimiento, ya que cambian la distribución de campo eléctrico [3]. Las imperfecciones de aislamiento más comunes son vacuolas de aire, impurezas metálicas y protuberancias [1].

La literatura disponible respecto al efecto de imperfecciones es escasa y los estudios realizados poco sistemáticos, debido al reducido número de publicaciones y la gran cantidad de imperfecciones posibles a analizar. En dos trabajos se estudió por medio de simulación en modelo “Cellular Automata”, primero el efecto de partículas conductoras y vacuolas de aire (mismo defecto que se busca analizar) en la arborización eléctrica [3], siendo un punto importante que se considera que ambos tipos de defectos hacen más proclive al material a presentar erosión por arborización eléctrica y la dirección de crecimiento apunta a la imperfección. Mientras que, el otro trabajo [4], analiza el efecto de vacuolas de forma arbitraria en el aislamiento eléctrico, llegando a una conclusión similar, considerando peligrosos los vacíos en el aislamiento, por el aumento de campo eléctrico local y árboles eléctricos secundarios que se pueden generar. Estas publicaciones estudiaron el efecto de imperfecciones en el aislamiento eléctrico a través de simulaciones, no realizando la importante contrastación experimental de los resultados.

En esta línea, distintos autores realizaron ensayos experimentales similares a las simulaciones mencionadas. En una investigación se realizaron ensayos con espacios de aire de forma cónica en la punta de la aguja de la probeta [5], los cuales provocaron aumento en magnitud y cambio de fase de DP. Además, se observó que en general iniciaban antes y generaban árboles eléctricos con más ramas, en comparación a probetas normales de referencia. Por otro lado, también se estudió el efecto de canales de aire e interfaces en probetas [6], observándose que se generaban ramas del árbol eléctrico que seguían estos canales y según la posición del canal o interfaz, el tiempo de vida de la probeta resultaba muy importantemente alterado, llegando a ser menor o incluso hasta 4 veces mayor que el tiempo base. Los mismos autores proponen como la causa de esto el cambio en distribución de carga, debido a estos canales e interfaces, pero resaltando que

es necesaria mayor investigación. Este hecho resalta los importantes efectos de espacios de aire en el fenómeno de arborización eléctrica y cómo el crecimiento de árboles varía según la forma y ubicación de este espacio de aire. Finalmente, también relacionado a imperfecciones en aislamiento eléctrico y lo estudiado en una simulación, se estudió el efecto de partículas conductoras de óxido de hierro (Fe_3O_4) en probetas de resina epóxica [7]. Ese estudio concluye que el añadir estas partículas resultaba en mayor degradación por arborización, cambiando características del árbol eléctrico según el tamaño de estas partículas y analizando el efecto de aplicar campos magnéticos en la probeta.

1.2. Motivación

Como resultado de la revisión bibliográfica, se puede observar que en general la presencia de algún tipo de imperfección tiene un efecto en el crecimiento del árbol eléctrico, alterando sus características (número de ramas, dirección de crecimiento, etc) y el tiempo de vida del aislamiento, llegando a acortarlo o incluso aumentarlo. Además, debido al amplio número de imperfecciones y características posibles de estas, existe mucho espacio no explorado a analizar y es necesaria más investigación para entender mejor los mecanismos que ocurren debido a las imperfecciones. Uno de los casos más interesantes es la presencia de vacuolas de aire en aislamientos eléctricos, debido a que es una situación esperable en la fabricación de materiales poliméricos. En este sentido, es necesario analizar experimentalmente el efecto de vacuolas de aire con forma esférica o elipsoide, con distinto volumen y posición, siendo también estudiado en vacuolas insertadas en la punta de la probeta, las cuales son interesantes porque es una forma común de vacuola en la fabricación de aislamiento polimérico.

En esta memoria se buscará analizar el fenómeno de arborización eléctrica mediante probetas de resina epóxica con vacuolas de aire, variando tamaño, forma y ubicación de estos defectos artificiales, y usando configuración de electrodos punta-placa. Estas probetas, serán ensayadas iniciando el árbol y registrando crecimiento hasta ruptura de aislamiento, para luego ser comparadas entre sí. Para esto se usarán criterios y obtención de parámetros, basadas en imágenes ópticas del árbol eléctrico y mediciones de descargas parciales durante el crecimiento de los árboles. Como objetivo final, se busca analizar el efecto de vacuolas de aire en aislamiento de alta tensión, y contribuir en el diagnóstico de equipamiento eléctrico y con recomendaciones para el diseño y fabricación de aislamientos eléctricos poliméricos.

1.3. Objetivo general

- Análisis del efecto de las vacuolas de aire en el crecimiento de árboles eléctricos en probetas de resina epóxica, mediante medición de descargas parciales y estructura de árbol.

1.4. Objetivos específicos

- Medir y almacenar datos de descargas parciales e imágenes ópticas en distintas etapas del crecimiento de árboles eléctricos, para probetas de resina epóxica con vacuolas de aire controladas, en cuanto a su posición y volumen.

- Caracterizar el crecimiento de los árboles eléctricos mediante cálculo de parámetros derivados de la forma de onda de las DP e imágenes del árbol, para correlacionar la respuesta en DP con la degradación producida por los árboles.
- Analizar el efecto de vacuolas de aire en aislamiento en la iniciación y crecimiento de árboles eléctricos, según tamaño y posición de vacuola entre punta y plano, desde el punto de vista de respuesta en descargas parciales y tiempo de falla del aislamiento.
- Comparar y plantear hipótesis sobre efecto de vacuolas de aire en aislamiento eléctrico al comparar con simulaciones estáticas de campo eléctrico de probetas de resina epóxica.

2. Metodología experimental

En esta sección se discutirán los procesos experimentales realizados para el desarrollo de esta memoria. Incluyendo creación de probetas con defectos de interés, revisión de equipo de medición disponible en LAT y por último procedimientos durante ensayos de crecimiento de árboles eléctricos.

2.1. Creación de probetas

Debido a los largos tiempos de iniciación y desarrollo involucrados en la aparición de árboles eléctricos de manera espontánea en aislamientos eléctricos, además de la necesidad de tener un ambiente controlado y el mayor número posible de equipos de medición para seguir el análisis de este fenómeno, surge la necesidad de desarrollar procedimientos experimentales que permitan el estudio de la arborización eléctrica. Para esto se sigue un procedimiento de creación y ensayo de probetas, el cual ha sido desarrollado gracias a memoristas y proyectos dados a laboratorio de alta tensión (LAT).

Es importante mencionar que probetas a utilizar en esta memoria fueron realizadas por otro memorista, como parte de su investigación de métodos para creación de probetas con defectos y que al momento de escribir este párrafo su investigación no está disponible para citar, ya que documento no ha sido entregado.

En esta memoria se utilizaron probetas hechas con resina epóxica (Mepox 1124UV resina y endurecedor), esto debido a la transparencia de este material (para vincular datos a etapas de crecimiento), su relativamente baja viscosidad (para ajustes y en este caso inserción de vacuolas) y además de sus propiedades de aislamiento eléctrico equivalente a otros aislamientos poliméricos comerciales.

Las probetas tienen una configuración de electrodos punta-plano, la cual es una configuración común en la literatura sobre análisis de árboles eléctricos, como se puede ver en mayoría de papers de referencia. Sus características son (Figura esquemática en Figura 1):

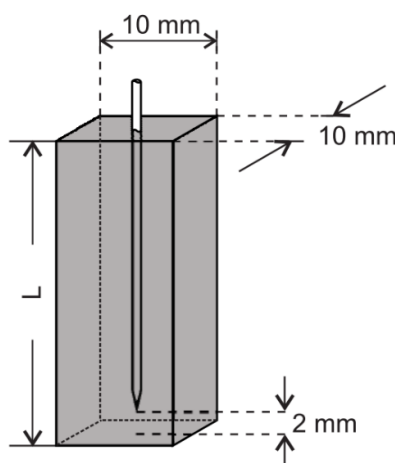


Figura 1 Modelo esquemático de probeta a ensayar (Fuente: Ensayos LAT)

- La punta en alta tensión está compuesta de una aguja Ogura (debido a nombre de fabricante Ogura Jewel Industry CO., LTD, características en Figura 2), presentando radio de curvatura de punta $3\mu\text{m}$ y grosor de la aguja 1mm de diámetro. Las cuales debido a sus bajos radios de curvatura y ausencia de defectos son adecuadas para la creación de árboles eléctricos.

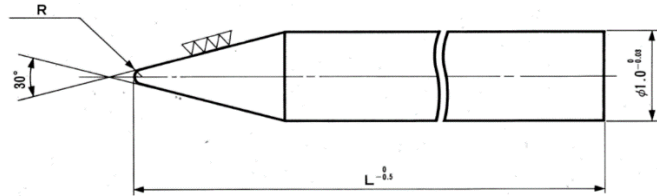


Figura 2 Figura esquemática de agujas Ogura (Fuente: Fabricante)

- El plano aterrizado es dado por contacto de estructura de soporte a base de probeta.
- Existen 2 milímetros de separación entre punta de aguja y plano, donde existe una vacuola a cierta distancia de la punta en alta tensión y con volumen variable.
- Altura de probeta varía según nivel de relleno de esta (no significativo para ensayo).

Para realizar probetas se mezclan 2 partes (resina y endurecedor), se desgasifica (en vacío a temperatura ambiente) y se vierte en moldes de acrílico. Para el caso de esta memoria se inserta vacuola mientras existe curado parcial de resina, esto para evitar que esta se mueva de posición durante resto de curado. Luego la resina se cura a 25°C durante 24 horas, para luego realizar un post-curado de 15 horas a 50°C , esto para homogeneizar propiedades de probeta. Finalizado proceso de curado son desmoldadas, revisadas en busca de imperfecciones y se les adhiere en la base una cinta conductora, esto para homogeneizar y mejorar contacto con tierra en base de probeta.

2.2. Banco de mediciones y pruebas

Con el objetivo de realizar la energización, control y medición de datos se usa banco de pruebas realizado por memorista de LAT [8]. Este banco de pruebas está enfocado en ensayos de árboles eléctricos y ha tenido modificaciones en aspectos que serán discutidos.



Figura 3 Banco de ensayo en alta tensión arboles eléctricos (Fuente: propia)

En Figura 3, se observan los distintos componentes y el estado de banco de pruebas para año 2022-2023, donde se realizan ensayos. En las subsecciones siguientes se listarán elementos principales y sus funciones en el entorno de ensayo.

2.2.1. Fuente alta tensión AC

La energía primaria para alimentación de los ensayos proviene de tablero localizado en laboratorio a tensión estándar 380V línea-línea. Esta es conectada a un variac y luego a un transformador de alta tensión (Figura 4), lo cual permite tener un rango de tensión útil entre 0 a 24kV regulando a través de variac



Figura 4 Transformador de alta tensión usado (Fuente: propia)

En cableado de variac se cuenta con un medidor de corriente, el cual permite llevar ensayos hasta ruptura siendo desenergizados automáticamente al ocurrir esta según límites de corriente dependientes del ensayo específico. También se cuenta con una resistencia de 1 M Ω para limitar corriente de falla, la cual está en serie con transformador hacia probeta.

2.2.2. Cámara óptica réflex

Tanto el registro de imágenes y visualización durante procedimiento de iniciación, fue realizado con cámara marca Canon modelo T6 (Figura 5), en conjunto a lente Canon MP-E 65mm f/2.8. Esta combinación de cámara y lente a mostrado buena calidad de imagen para ensayos anteriores en LAT.



Figura 5 Cámara Canon T6



Figura 6 Lente Canon MP-E 65mm f/2.8

2.2.3. Equipo de medición de DP

El equipo encargado de medir y mandar información de descargas parciales hacia computador, corresponde a equipo marca Omicron modelo MPD 600 junto a MCU502 (Figura 7). Equipo MPD 600 se encarga de medir pulsos de corriente debidos a descargas parciales comparando a tensión de referencia, luego envía esta información a MCU502 a través de cables de fibra óptica, siendo este último el encargado de transmitir información digital vía USB a computador. Información almacenada en computador incluye, magnitudes, tiempo de ocurrencia, fase según tensión de referencia y tensión relacionada a DP, el cual es visualizado y exportado a matlab con software Omicron.



Figura 7 Equipo de medición de descargas parciales Omicron (izquierda MPD 600 y derecha MCU502)

Para generar camino de baja impedancia hacia equipo de medición y así detectar las DP con alta sensibilidad, se usa circuito basado en circuito balanceado de norma IEC 60270 [9], cuyo diagrama se presenta en Figura 8:

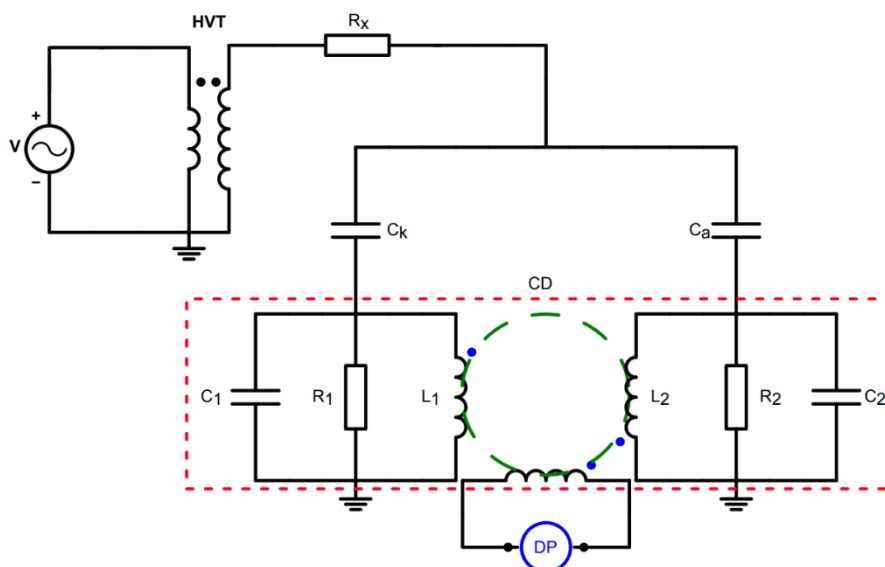


Figura 8 Circuito balanceado de medición DP (Fuente: [8])

Donde:

Rx: Resistencia de protección sobrecorriente $1\text{M}\Omega$.

Ck: Probeta sin descargas parciales.

Ca: Probeta a ensayar.

C1: Condensador 1 del dispositivo de acoplamiento de Ck.

R1: Resistencia 1 del dispositivo de acoplamiento de Ck.

L1: Inductor 1 del dispositivo de acoplamiento de Ck.

C2: Condensador 2 del dispositivo de acoplamiento de Ca.

R2: Resistencia 2 del dispositivo de acoplamiento de Ca.

L2: Inductor 2 del dispositivo de acoplamiento de Ca.

DP: Equipo de medición y adquisición de DP OMICRON MPD 600.

En este circuito se encuentran conectadas en paralelo hacia alta tensión, tanto la probeta a ensayar como una probeta de acoplamiento, esta última presenta una geometría muy similar a probeta a ensayar, pero tiene una aguja con punta redonda (radio de curvatura mucho mayor) en vez de punta aguda. La probeta de acoplamiento presenta esta diferencia con el objetivo de ser similar a probeta a ensayar, pero no generar descargas parciales en punta a los mismos niveles de tensión, con esto se logra solo medir descargas parciales debido a arboles eléctricos, atenuando efectos externos debido a conexiones, ruido u otros que puedan presentarse.

Dispositivo de acoplamiento (encerrado en cuadro rojo punteado), se comporta como filtro pasabanda, también sustrayendo efectos comunes a ambas probetas, entregando señal final a ser medida por equipo Omicron. Detalles del ajuste y pruebas de este dispositivo se encuentran en [8].

2.2.4. Medición formas de onda DP (osciloscopio)

Para medir forma de onda de DP se necesita equipo con alta tasa de muestreo y alta precisión, para esta tarea se cuenta con osciloscopio marca Keysight modelo Infiniium S-

Series DSOS104A con ancho de banda de 2.5GHz y un muestro máximo de 20 GSa/s (Figura 9):

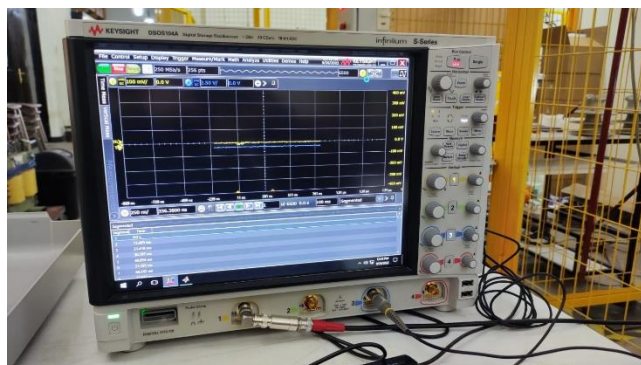


Figura 9 Osciloscopio usado (Fuente: propia)

Este equipo funciona en el modo de memoria segmentada, pudiendo guardar hasta 65536 formas de onda de DP y los tiempos de ocurrencia de cada una. Se configura para monitorear la señal de corriente asociada a descargas parciales, luego si la magnitud de la señal supera cierto valor (“threshold”), este mide la forma de onda que supere este límite en un segmento, midiendo continuamente hasta llegar al número máximo de segmentos. Equipo mide también la tensión de referencia asociada a cada DP, esto para poder obtener fase de DP en post-proceso.

El pulso de DP se midió en el cable a tierra, esto a través un transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT por sus siglas en ingles) de marca Techimp (Figura 10), enviando señal resultante por cable coaxial hacia canal 1 de transformador, siendo canal 3 tensión de referencia.



Figura 10 HFCT utilizado

2.2.5. Cubículo de probetas

Con el objetivo de que la probeta a ensayar este en posición estable para obtener imágenes con cámara réflex, que se tenga buen contacto tanto con la aguja en alta tensión como con la base aterrizada, además buscando que se eviten descargas corona en contactos y conexiones, se dispone de cubículo y aparatos porta probetas que se muestran en Figura 11:

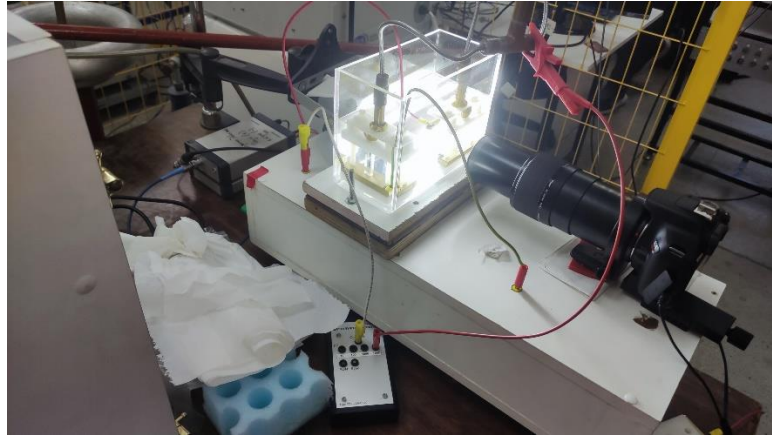


Figura 11 Cubículo de probetas y equipo de calibración

En Figura 11 se muestra cubículo de acrílico que contiene tanto probeta a ensayar como probeta de acoplamiento, estas se encuentran sumergidas en aceite de silicona para evitar efecto corona y descargas superficiales. Estas probetas están puestas en dispositivos porta-probetas (Figura 12), los cuales aseguran buen contacto tanto con aguja y tierra evitando descargas parciales corona gracias a su forma, pasando además por un vacío en el horno para extraer aire atrapado en electrodos.

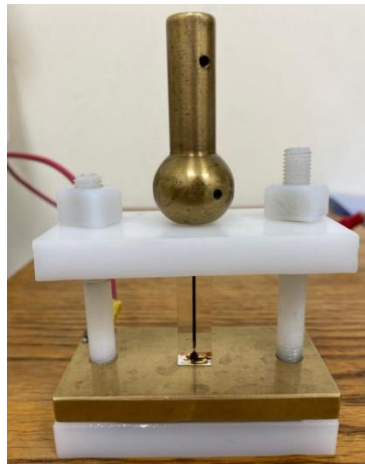


Figura 12 Porta probetas usados

2.3. Control de ensayos

Para poder monitorear variables y controlar ensayos en alta tensión realizados, se cuenta con zona de control, la cual está separada con una reja de protección de la zona de ensayos.



Figura 13 Zona de control de ensayos

Como se muestra en Figura 13, durante ensayos de árboles eléctrico se puede controlar y monitorear correcta medición de variables de interés. Por medio de osciloscopio se puede variar trigger para disminuir porcentaje de ruido medido según nivel de magnitud de DP, mejorando calidad de mediciones, esto es importante debido a que durante ensayos nivel de ruido y magnitud de descargas presentan variaciones significativas posiblemente debido a interacciones de árbol y cambios de propiedades físicas. Por medio de computador se pueden visualizar imágenes de árbol eléctrico y mediciones de equipo Omicron, pudiendo observar etapas de crecimiento, niveles de DP y nivel de tensión, las que son variables de interés para comprobar que ensayo se desarrolle de manera correcta y datos son adecuados para realizar un análisis adecuado. Por último, también se tiene acceso a variac, con lo que es posible variar la tensión de ensayo fácilmente.

2.4. Iniciación de árboles eléctricos

Previamente a los ensayos se realizó iniciación de probetas, en este proceso se aplica tensión a probetas nuevas sin árbol eléctrico, solo hasta que sean visibles por cámara las primeras ramas de este fenómeno, luego parando y llevando a cabo el crecimiento otro día. En este procedimiento solo se necesita que funcione cámara captando en tiempo real, además de equipo que provee alta tensión, sin otro equipo de medición.

El procedimiento de iniciación consiste en energizar probetas nuevas desde 0 a 24 kV en 50Hz (aprovechando rango dado por transformador), subiendo en pasos de 2kV cada 2 min, para lograr subida paulatina de tensión, visualizando en todo momento punta de probeta con cámara y desenergizando inmediatamente al visualizar comienzo de crecimiento de árbol eléctrico. Se destaca lo importante que es la atención constante, ya que a mayor tensión el crecimiento del árbol eléctrico es acelerado y si crece mucho podría llegar a cambiar resultados de esa probeta. En caso de que se llegue a 24kV (en 24 min) y no se presente iniciación, se esperaron 10 min extra a esta tensión para quitar probeta y probar rutas alternativas.

Procedimiento llevo a buenos resultados, logrando iniciar múltiples probetas que no tuvieron resultados al usar amplificador de alta tensión (máximo 14kV y 550 Hz en procedimientos usados anteriormente).

2.5. Crecimiento de árboles eléctricos

Para realizar ensayos de crecimiento de árboles eléctricos, se debe primero preparar probeta, ajustándola en porta probeta y sumergiéndola en cubículo con aceite de silicona, al cual debe ser aplicado vacío por 30 min con probeta a ensayar y probeta de acoplamiento, esto para evitar descargas parciales debido a burbujas de aire dentro de contactos. Probetas en este contenedor luego se conectan a circuito de medición (Figura 8) y a equipo de generación de alta tensión.

Luego se debe revisar conexión correcta de todos los equipos de medición y realizar calibraciones correspondientes:

- Equipo Omicron: Se deben ajustar límites mínimos de magnitud de DP para medición, para minimizar medición de ruido además de calibrar equipo para valores de 10pC, 100pC y 1nC con software Omicron.
- Osciloscopio: Se debe ajustar configuración de canales a usar, junto a trigger con canal de DP según magnitudes de DP al iniciar y durante el desarrollo del ensayo en lo posible. Se debe elegir también el número de segmentos a guardar (a través de script de Matlab en equipo), esto se ajusta según velocidad de variación en comportamiento, buscando optimizar trigger antes de medir mayor número de DP. Se debe correr script de Matlab de manera cíclica, ya que equipo mide hasta número máximo de segmentos para luego detenerse y guardar resultados, lo cual se hace de manera manual verificando triggers o de manera automática para ensayos controlados remotamente.
- Cámara: Se debe ajustar posición y enfoque para imagen lo más clara posible, además de captar árbol en su totalidad desde mejor ángulo, luego se ajusta para que tome fotos cada cierto tiempo (entre 5 s a 1 min normalmente) según largo esperado de ensayo.

Se inicia ensayo elevando tensión hasta 14kV (50Hz), empezando tomas en cámara, primer registro en osciloscopio e iniciando grabación en software Omicron. Tensión y frecuencia son constantes para todos los ensayos.

Debido a ensayos largos, de más de un día de manera continua (hasta una semana), se controla tanto PC y osciloscopio con programa de escritorio remoto (AnyDesk), además se realiza script para medición de nuevos segmentos de osciloscopio de manera automática, para poder medir durante la noche.

3. Marco teórico y metodología de análisis

En esta sección se explicará la teoría y técnicas utilizadas para caracterizar cada probeta ensayada, mostrando el proceso de cálculo de parámetros y gráficos vinculados al desarrollo de árboles eléctricos en cada probeta ensayada.

3.1. Arborización eléctrica

Al estresar un material dieléctrico polimérico con campos eléctricos elevados no homogéneos o si este presenta imperfecciones de cualquier tipo, se pueden presentar en estos canales de degradación, los cuales crecen y se propagan en forma de árbol (el origen del nombre del fenómeno) [1]. Este fenómeno de degradación es afectado por una variedad de variables, tales como la tensión o frecuencia de excitación, hasta la temperatura ambiental [10], siendo extremadamente difícil de predecir de manera determinista, lo cual muestra lo difícil de su prevención y el interés científico en su estudio.

Los árboles eléctricos son conocidos por desarrollarse a una tasa no uniforme de manera progresiva, mostrando ser afectados por múltiples fenómenos fisicoquímicos [11] durante su crecimiento, tales como cambios de conductividad en canales o cambios de distribución de campo eléctrico durante el crecimiento de estos, siendo estos factores mencionados como hipótesis para explicar algunos comportamientos que serán identificados más adelante.

Como se mencionó anteriormente uno de los principales fenómenos de degradación en el aislamiento polimérico de alta tensión son los árboles eléctricos, los cuales se ha demostrado tienen una estrecha relación al comportamiento de DP presentado durante su crecimiento [2]. Las DP son provocadas por campos eléctricos que superan la rigidez dieléctrica del material en zonas localizadas, provocando rupturas parciales y que pueden ser detectadas como pulsos de corriente.

Existen varios tipos de DP clasificadas según su origen:

- Efecto corona: generada debido a conductores con forma afilada o irregular que provoca campos inhomogeneos y ruptura dieléctrica local en aire.
- Superficial: generada en las fronteras de distintos dieléctricos, debido a componente tangencial de campo y baja rigidez dieléctrica de fronteras.
- Internas: generadas dentro de material dieléctrico en imperfecciones, tales como grietas, vacuolas o zonas con material debilitado.

Como se puede apreciar en Figura 14:

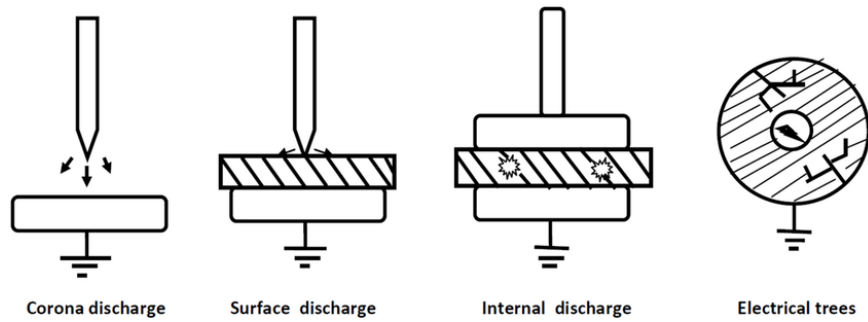


Figura 14 Clasificación de DP según origen (Fuente [12])

Siendo los árboles eléctricos y el estudio de las DP asociadas a estos crecimientos, el principal tema de análisis de este documento. Debido a la naturaleza estocástica de las DP, es importante un mejor entendimiento de las técnicas asociadas al análisis de estos fenómenos. En este documento se usarán tanto técnicas consideradas “clásicas” como técnicas un tanto más contemporáneas de análisis, las cuales serán explicadas a continuación.

3.2. Análisis resuelto en fase (PRPD)

Tradicionalmente una DP puede ser caracterizada primero por su magnitud, lo cual mide la cantidad de carga eléctrica asociada al fenómeno durante su duración, luego por su fase, según la fase de la sinusoidal de tensión con que se alimenta el sistema se manifiesta la DP.

Al graficar cada DP como un punto según su valor de carga y superponiendo los ciclos de excitación alterna en un solo gráfico, se obtiene el método más clásico de análisis llamado análisis resuelto en fase o PRPD por sus siglas en ingles [13]. Un ejemplo se puede ver en la Figura 15.

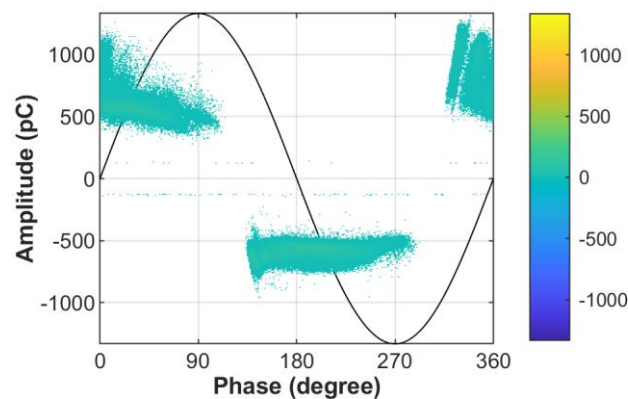


Figura 15 Ejemplo de diagrama PRPD (Fuente: propia)

El análisis PRPD normalmente se usa para identificar las fuentes de DP (internas, corona, etc) involucradas y hacer diagnósticos en equipos eléctricos, siendo la técnica más tradicional existe bastante literatura con la cual comparar.

Para llevar a cabo esta técnica se usaron datos de equipo de medición DP Omicron, obteniendo de este equipo, magnitud, fase y tiempo de descargas parciales para luego graficar en código de Matlab. Cabe destacar que en algunas mediciones, especialmente probetas con desarrollo mayor a un día se tuvieron que usar datos de formas de onda adaptados, calculando la magnitud como el valor máximo y la fase según valores de tensión medidos (interpolando fase según valor de tensión y pendiente de esta).

3.3. Análisis de secuencia de pulso (PSA)

Una desventaja del análisis PRPD debido a la superposición realizada, es la pérdida de la información asociada al tiempo de ocurrencia de las DP y con esto información de la secuencia en que ocurren los pulsos, las diferencias de tiempo y magnitud involucradas entre una y otra. Con el fin de aprovechar esta información, justificando en que las cargas espaciales dejadas por una DP pueden afectar a la siguiente DP generada, teniendo valor de la física de las descargas, se propuso el método de análisis de secuencia de pulsos o PSA por sus siglas en inglés [14].

El análisis PSA tradicionalmente grafica diferencias de tensión entre pulsos de DP consecutivos, en el caso de este análisis es interesante en una primera versión del grafico tener en las ordenadas la diferencia $\Delta U_n = U_{n+1} - U_n$ de tensiones, entre la descarga parcial n-esima y la consecutiva a esta (como se aprecia en Figura 16), luego en las abscisas tener la diferencia $\Delta U_{n-1} = U_n - U_{n-1}$, graficando cada punto en el grafico según estas coordenadas. Una segunda versión del grafico que resulta de interés consiste en tener en las ordenadas $\Delta U_n / \Delta t_n = (U_{n+1} - U_n) / (t_{n+1} - t_n)$, luego en las abscisas considerar el valor $\Delta U_{n-1} / \Delta t_{n-1} = (U_n - U_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})$, teniendo diferencias de tensión normalizadas según periodos de tiempo transcurridos

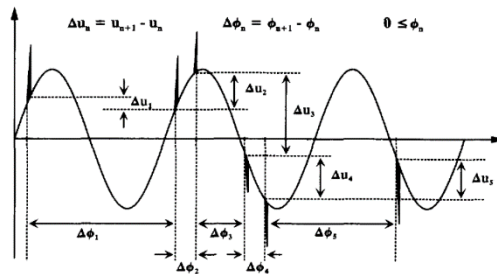


Figura 16 explicación grafica PSA (Fuente: [14])

Un ejemplo de gráficos con esta metodología se presentan en Figura 17:

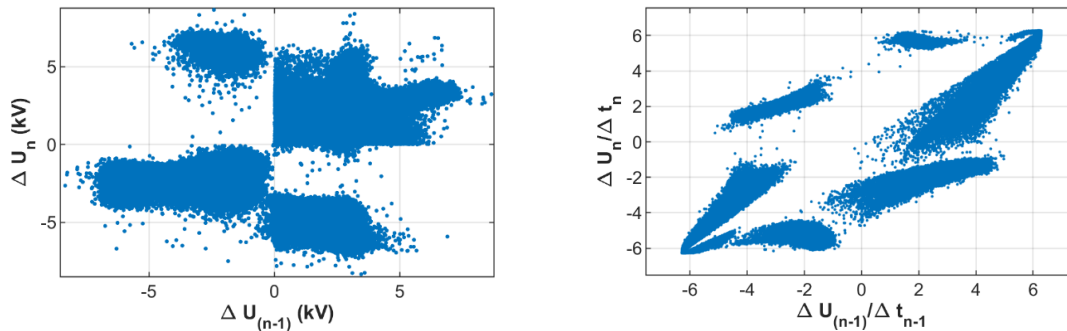


Figura 17 Ejemplos de gráficos PSA

Este tipo de análisis es útil en el reconocimiento de patrones de distintos tipos de PRDP y es usado conjuntamente con este último.

3.4. Análisis de forma de onda

Debido a la disponibilidad amplia actualmente de equipos de medición muy precisos y con altas frecuencias de muestreo, se han desarrollado nuevas técnicas de análisis de DP, que aprovechan el análisis de la forma temporal de la DP como una nueva fuente de información. Esta forma de onda temporal que transcurre comúnmente en las decenas o centenas de nanosegundos, ha mostrado ser útil para identificar la naturaleza física de cada DP [15], pudiendo calcular parámetros para identificar la fuente física y naturaleza de cada DP por separado, pudiendo por ejemplo separar las DP del ruido aleatorio sin tener que analizar el PRPD, donde si hubiera mucha superposición de fuentes sería difícil de identificar, por ejemplo en un entorno muy ruidoso. En esta memoria se calcularán estos parámetros en tramos de actividad DP y se evaluarán valores promedio graficados mientras va creciendo el árbol.

Esta técnica de análisis se basa en calcular parámetros de análisis de señales, graficar estos de manera conveniente y identificar patrones o tendencias interesantes. Esta técnica ya es usada en la industria para separar fuentes de ruido, existiendo múltiple literatura relacionada, la cual será revisada a continuación (En Figura 18 se puede apreciar un ejemplo de forma de onda DP)

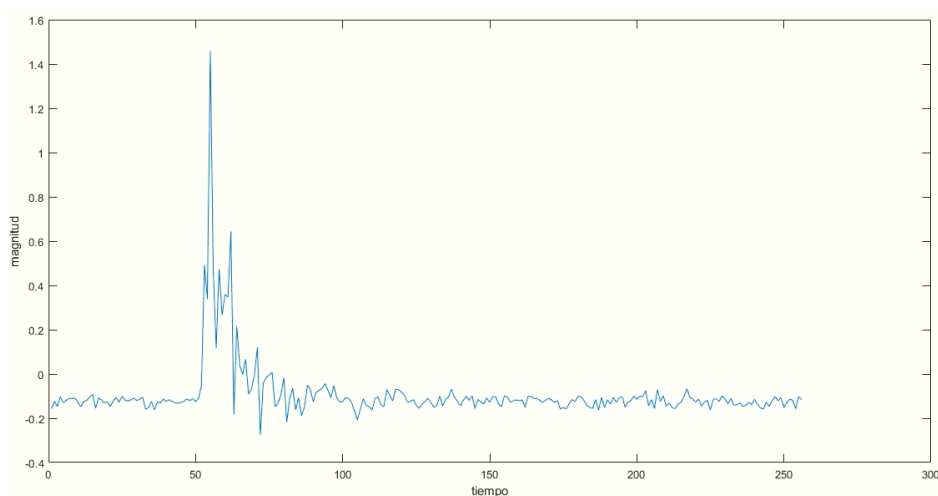


Figura 18 Ejemplo forma de onda DP (Fuente: Propia MV182)

3.4.1. Mapas TF (Time-Frequency)

La primera técnica de análisis de formas de onda presentada, corresponde a los mapas tiempo-frecuencia (TF), se denomina así porque se calculan 2 parámetros, uno con la forma de onda de DP en el plano del tiempo y otro parámetro llevando esta forma de onda al plano de la frecuencia (ecuaciones 1 y 2 [16]). La forma en que se usan estos parámetros es graficar en un mapa 2D, donde se grafica un parámetro en cada eje y se pueden separar

las fuentes de DP observando clusters que se forman, siendo cada cluster separado DP con características similares y presumiblemente igual fuente.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (1)$$

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

Donde:

$\tilde{s}(t)$: Forma de onda normalizada en plano del tiempo.

$\tilde{S}(f)$: Forma de onda normalizada en plano de la frecuencia.

t_0 : Centro de gravedad en el tiempo de señal normalizada

3.4.2. Mapa PR (Power Ratio)

En esta técnica consiste en el cálculo de la potencia espectral en ciertas bandas de frecuencia en comparación a la potencia total. Consiste en 2 parámetros, PRL donde se considera energía en bajas frecuencias y PRH donde se considera potencia en alta frecuencia (ecuaciones 3 y 4 [17]). El modo de uso de estos parámetros es similar a caso anterior, realizando un mapa 2D con estos para identificar formación de clusters con características similares.

$$\%PRL = \frac{\sum_{F1L}^{F2L} |s(f)|^2}{\sum_0^{FT} |s(f)|^2} \times 100 \quad (3)$$

$$\%PRH = \frac{\sum_{F1H}^{F2H} |s(f)|^2}{\sum_0^{FT} |s(f)|^2} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

F2L y F1L: Rangos de baja frecuencia

F2H y F1H: Rangos de alta frecuencia

FT: Rango total de frecuencia analizado

3.4.3. Parámetros de envolvente y frecuencia

Para este enfoque se calcula la envolvente de la forma de onda de DP [18], usando transformada de Hilbert, la cual es un tipo especial de convolución entre dos señales como se muestra en ecuación 5, la ecuación 6 muestra la envolvente, la ecuación 7 muestra la media de frecuencia donde la energía es más significativa. Finalmente, esta envolvente se filtra para tener un resultado más acorde.

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \quad (5)$$

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (6)$$

$$F = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f * F(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} F(f) df} \quad (7)$$

Se calcula con la envolvente parámetros A_p y A_t , siendo las áreas de la envolvente antes y después del peak, como se muestra en la Figura 19.

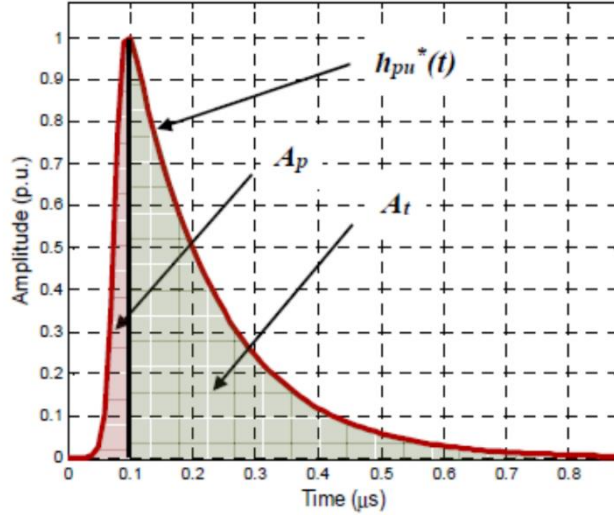


Figura 19 Muestra grafica de significado de parámetros (Fuente [19])

3.4.4. Función de energía acumulada

Técnica se basa en obtención de parámetros a partir de la función de energía acumulada (CE) aplicada a las formas de onda de DP [20], las cuales obtienen parámetros tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

La función de energía acumulada tiene una versión en el tiempo (TCE(t), ecuación 8, con k de 1 a N) y otra en la frecuencia (FCE(f), ecuación 9, con k entre 1 a N/2), estas se obtienen a partir de la forma de onda de DP (v(t)) y espectro de frecuencia de este (F(f)), siendo TCE la energía acumulada hasta un tiempo t y FCE energía acumulada hasta frecuencia f respectivamente.

$$TCE(t) = \frac{\sum_{i=1}^k v(t_i)^2}{\sum_{i=1}^N v(t_i)^2} * 100 \quad (8)$$

$$FCE(f) = \frac{\sum_{i=1}^k F(f_i)^2}{\sum_{i=1}^{N/2} F(f_i)^2} * 100 \quad (9)$$

Donde:

N: Número total de puntos de muestreo

Ambas funciones se dividen en energía total para normalizarlas y que la amplitud no tenga influencia. Finalmente se pueden obtener los parámetros de forma de onda de DP, T_w (duración de tiempo, ecuación 10) y F_w (ancho de banda, ecuación 11).

$$T_w = t_{TCE=80} - t_{TCE=20} \quad (10)$$

$$F_w = f_{FCE=80} \quad (11)$$

Como nota, si se aplica a estas funciones de energía acumulada el gradiente de morfología matemática es posible extraer 4 parámetros extra, lo cual se ha realizado en investigaciones anteriores en la UTFSM [21], pero se prefirió omitir esto, debido a que se concluyó que información obtenida es similar a parámetros ya calculados en caso de análisis de árboles eléctricos y la complejidad de cálculo es bastante mayor, limitando su uso.

3.4.5. Parámetros estadísticos y otros

Para la realización del filtrado de ruido y como otro set de parámetros interesantes de calcular, se desarrolló el cálculo de parámetros estadísticos para formas de onda de descarga parcial, esto aplicando formulas clásicas de esta rama de las matemáticas. Se calcula skewness (sesgo de datos, ecuación 12), kurtosis (dispersión de datos, ecuación 13) y frecuencia máxima ponderada (ecuación 14).

$$S = \frac{\sum_0^N (x(n) - \bar{x})^3}{(N-1)\sigma^3} \quad (12)$$

$$K = \frac{\sum_0^N (x(n) - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4} \quad (13)$$

$$F = f_{max} \frac{\int_{f_a}^{f_b} F(f) df}{\int_0^{f_{end}} F(f) df} \quad (14)$$

Donde:

$x(n)$: Puntos de forma de onda normalizados

$\bar{x}$: Promedio de datos

N : Número total de datos

σ : Desviación estándar de datos

$F(f)$: Espectro de frecuencia

f_{max} : Frecuencia de máxima amplitud

f_{end} : rango total de espectro

f_a y f_b : Rango de 5 y 95%

También para datos de ómicron se calculan valores de percentil 95 de carga (Q_{95}), promedio de carga (Q_{mean}), potencia disipada por estas (según tensión y carga) y numero de descargas parciales por minuto.

3.5. Filtrado de ruido

En las mediciones realizadas se mide tanto ruido como DP, esto debido especialmente porque los niveles de ruido cambian durante las mediciones y que los periodos de tiempo largos no permiten una evaluación constante de los rangos de filtrado. Debido a que en

general el ruido es mucho más frecuente que las DP y que se calcularan parámetros según formas de onda DP, es especialmente importante filtrar las señales cuyo origen es ruido, debido a que parámetros tienen valores bastante dispares según la fuente y esto puede afectar bastante a los resultados del análisis.

El criterio de separación de fuentes de DP, se realiza caracterizando cada DP con el cálculo de 2 parámetros, skewness (S, ecuación 12) y frecuencia máxima ponderada (F, ecuación 14), aplicando estas fórmulas y calculando estos dos parámetros para cada forma de onda de PD. Estos parámetros son usados porque son muy sensibles a las diferencias entre señales con origen de ruido y de DP, en general las formas de onda de DP son asimétricas, tienden a llegar a su peak de manera rápida y decrecer de manera exponencial, tienen curtosis marcadamente distinta de cero como se puede apreciar en Figura 18.

Al haber calculado ambos parámetros se grafican en un mapa 2D, donde se podrán notar claramente clusters diferenciados, siendo el de skewness positiva el que es de origen DP. Luego de haber anotado los rangos tanto de F y S visualmente estos se incluyen en código y se filtran mediciones fuera de estos rangos, efectivamente aislando este cluster (se puede ver un gráfico de ejemplo en Figura 20)

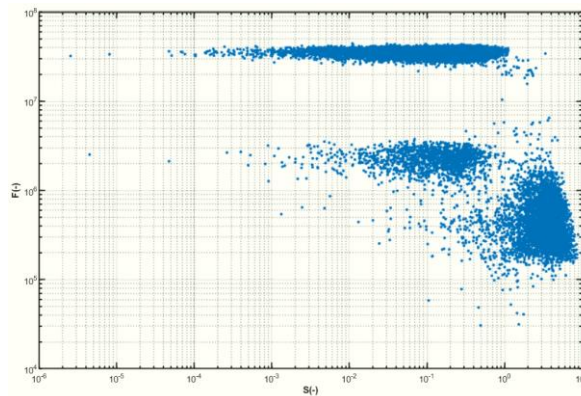


Figura 20 Ejemplo grafico SF (Fuente: Propia MV187)

4. Resultados y análisis

En esta sección se explica la clasificación de probetas, detalles sobre el ensayo y consideraciones para el análisis. Luego se presentan para cada tipo de probeta una tabla resumen y análisis de probetas que presentan tendencias comunes.

4.1. Clasificación de probetas y consideraciones

Las probetas realizadas y el enfoque de estudio de esta memoria esta sobre las vacuolas y su efecto en la arborización eléctrica. Para esto se ensayaron probetas de resina epóxica, las cuales presentan una vacuola insertada a distancias controladas de la punta de la probeta, variando la vacuola entre estar insertada a la punta o a media distancia entre la punta y el electrodo aterrizado, las categorías usadas se presentan a continuación (indicando en paréntesis rangos de distancia entre punta y vacuola, además en Figura 21 se presenta ejemplo visual de probeta):

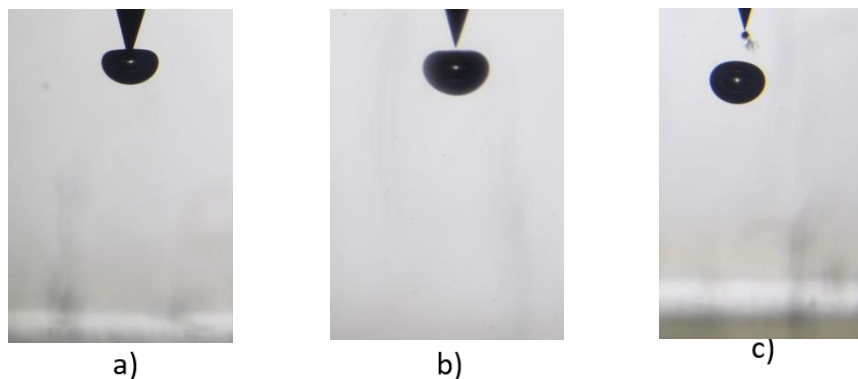


Figura 21 Tipos de probeta a analizar (a Tipo 1, b Tipo 2, c Tipo 3, referencia propia)

- Punta insertada en vacuola (Tipo 1): Probetas donde parte del electrodo de alta tensión penetra en la vacuola, estando la punta de esta dentro de la vacuola.
- Vacuola cercana a punta ($MV < 100\mu M$) (Tipo 2): Probetas donde la vacuola se encuentra muy cercana a electrodo de alta tensión, pero sin existir contacto físico entre estas dos estructuras, distancias menores a $100\mu M$.
- Vacuola a distancia media de punta ($100\mu M < MV < 1mm$) (Tipo 3): Probetas donde la vacuola se encuentra a una distancia mayor a $100\mu M$, pero menor a $1mm$ de la punta de electrodo de alta tensión.

Para cada clasificación de probeta se mostrarán tablas resumen de probetas ensayadas, conteniendo estas tablas datos constructivos de la probeta (incluyendo volumen aproximado de vacuola y distancia a punta), características de iniciación y del crecimiento del árbol eléctrico. Esto con el objetivo de mostrar una vista global al subconjunto de probetas

Todas las probetas son tratadas de iniciar como se explica en sección 2.4 y se realiza crecimiento de árbol eléctrico a 14kV 50Hz de tensión sinusoidal hasta llegar a ruptura dieléctrica en probeta. Para el caso de probetas que no pudieron ser iniciadas por sus características (lo cual se discutirá), estas fueron ensayadas a 14kV 50Hz durante días continuos según disponibilidad de laboratorio, siendo descartadas en caso de no presentar iniciación de árbol eléctrico en este tiempo. Esto con el objetivo de presentar iniciación luego de una exposición prolongada, como método alternativo y siguiendo ensayo hasta ruptura igualmente.

Durante todos los ensayos de crecimiento y también en el caso de ensayos con exposición prolongada se midieron con equipos mencionados en sección 2.2, registrando imágenes de cámara, formas de onda de DP de osciloscopio y datos de DP de medidor de DP Omicron. Con estos datos se eligen tramos de tiempo interesantes, para los cuales se mostrarán las imágenes al comienzo y final de tramo, acompañado de PRPD, PSA y evolución de parámetros de forma de onda durante tramo (incluyendo también medición de largo vertical de árbol eléctrico). Esto se verá en detalle para probetas “tipo”, las cuales representan una estructura de crecimiento y tendencias comunes a un grupo de probetas, detallando las características de estos.

Los intervalos interesantes donde se grafican datos son definidos según distribución de mediciones y etapas de crecimiento, buscando captar tramos en cada etapa de crecimiento para llevar seguimiento de cambios. Las etapas de crecimiento se definen según el tamaño del árbol en relación con posición de vacuola, para poder estimar efectos de este defecto en el crecimiento. En gráficos de evolución de parámetros de forma de onda se usan colores para identificar zona hasta donde a crecido árbol eléctrico, como se muestra a continuación:

- Verde: Crecimiento inicial, no ha llegado a zona con vacuola
- Amarillo: Crecimiento atraviesa zona donde se encuentra vacuola, pudiendo ser afectado directamente por esta
- Rojo claro: Crecimiento sobrepasa zona donde se encuentra vacuola.
- Rojo: Árbol eléctrico interactúa con contraelectrodo, en algunas probetas al tener contacto árbol eléctrico con contraelectrodo la falla es instantánea y no se puede apreciar esta etapa. Línea vertical punteada punto donde se llega a electrodo inferior

Por último, cabe mencionar que probetas mostradas a continuación no son todas las probetas ensayadas, se dejaron fuera probetas con comportamiento anómalo debido a fallas estructurales (por ejemplo, gaps de aire indeseados en la punta de la probeta). También se ensayó grupo de probetas con vacuolas en electrodo aterrizado, pero debido a baja cantidad y fallas al ensayar en algunas, se prefirió no analizar este tipo de probeta.

4.2. Probetas con vacuola insertada (Tipo 1)

Tabla 1 Datos constructivos, probetas con vacuola insertada

Nombre probeta	Datos constructivos		
	Fecha creación	Volumen vacuola (nL)	Distancia vacuola-punta (mm)
MV124	18-ago	1,7	Introducida
MV153	11-nov	32,1	Introducida
MV154	11-nov	35,8	Introducida
MV155	11-nov	28,1	Introducida

En Tabla 1 se muestran probetas ensayadas con la característica común de presentar la vacuola insertada a la punta. Se puede apreciar que todas las probetas menos la MV124 fueron creadas el mismo día y presentan similares volúmenes de vacuolas.

Tabla 2 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola insertada

Nombre probeta	Datos Iniciación			
	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo
MV124	05-may	50	hasta 24kV	Prolongado
MV153	05-jun	50	hasta 24kV	Prolongado
MV154	31-may	50	hasta 24kV	Prolongado
MV155	30-jun	50	hasta 24kV	Prolongado

En Tabla 2 se muestra que ninguna probeta en esta clasificación pudo ser iniciada con el procedimiento explicado, esto se piensa es debido a presencia de vacuola. Debido a esto se lleva a cabo iniciación durante ensayo de extendida duración

Tabla 3 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola insertada

Nombre probeta	Datos Crecimiento				
	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo ensayo	Resultado
MV124	05-may	50	14	1d 7h	Ruptura
MV153	05-jun	50	14	2d 14h	Ruptura
MV154	31-may	50	14	3d 12h	Ruptura
MV155	30-jun	50	14	3d	Ruptura

En Tabla 3 se aprecian tiempo de ruptura de probetas, los cuales incluyen tanto tiempo de iniciación como crecimiento y se discutirá en detalle más adelante, se tiene un promedio de 2d con 14 horas para desarrollar rupturas.

A continuación, se estudiarán los patrones de crecimiento (tendencias, estructuras, comportamientos, etc) observados, siendo estos resumidos en solo una tendencia que agrupa de manera adecuada a todas las probetas según los datos analizados.

4.2.1. Crecimiento desde vacuola

En probetas MV124, MV153, MV154, MV155, MV167 y MV168 se observaron patrones y etapas de crecimiento similar, lo cual será analizado revisando crecimiento de probeta MV155.

MV155:

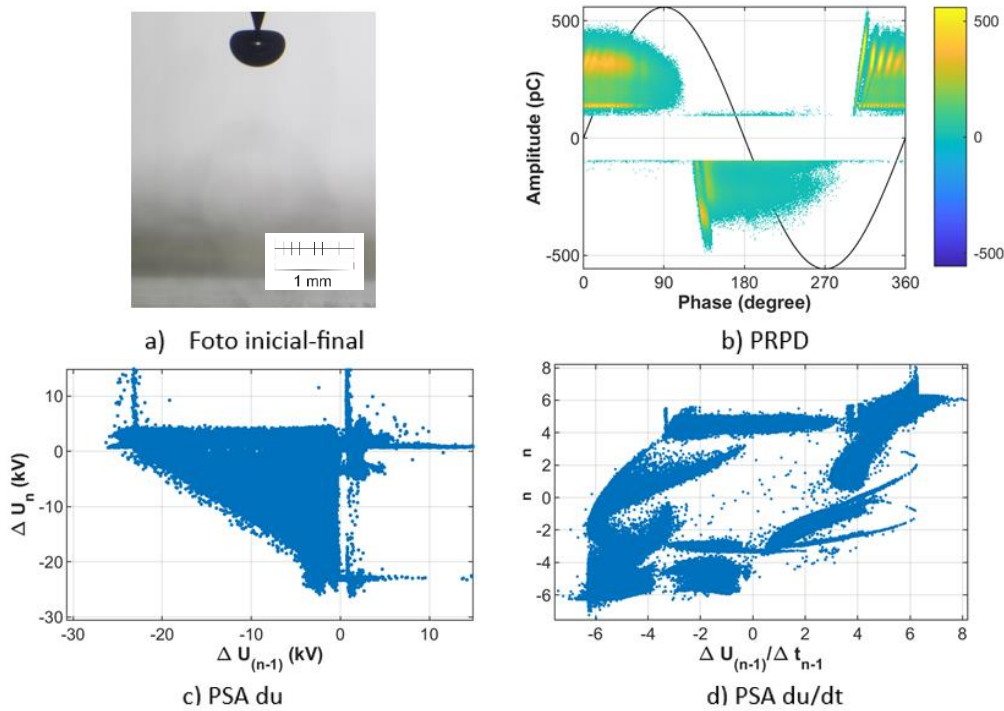


Figura 22 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1h 40min a 2h 20min

En Figura 22 se muestran primeras horas de ensayo, no se aprecia cambio en vacuola insertada. PRPD muestra patron de descarga parcial interna con una magnitud menor a 500pC. En PSA c) se puede observar cluster con forma triangular el cual se repite al inicio de todas las probetas. En PSA d) se aprecian alrededor de 6 clusters bien definidos, similares a Figura 36.

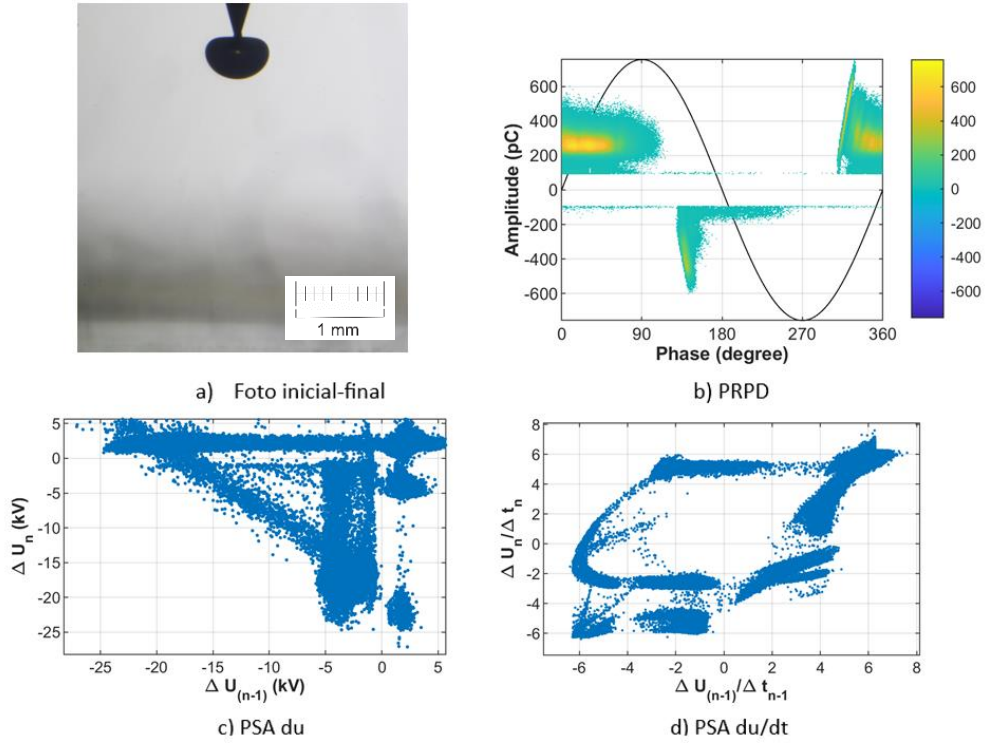


Figura 23 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 1h 0min a 1d 1h 30min

En Figura 23 se puede observar que no hay cambios aparentes en vacuola. En PRPD se mantiene forma, solo bajando magnitud en polaridad negativa. PSA se mantienen con pocos cambios.

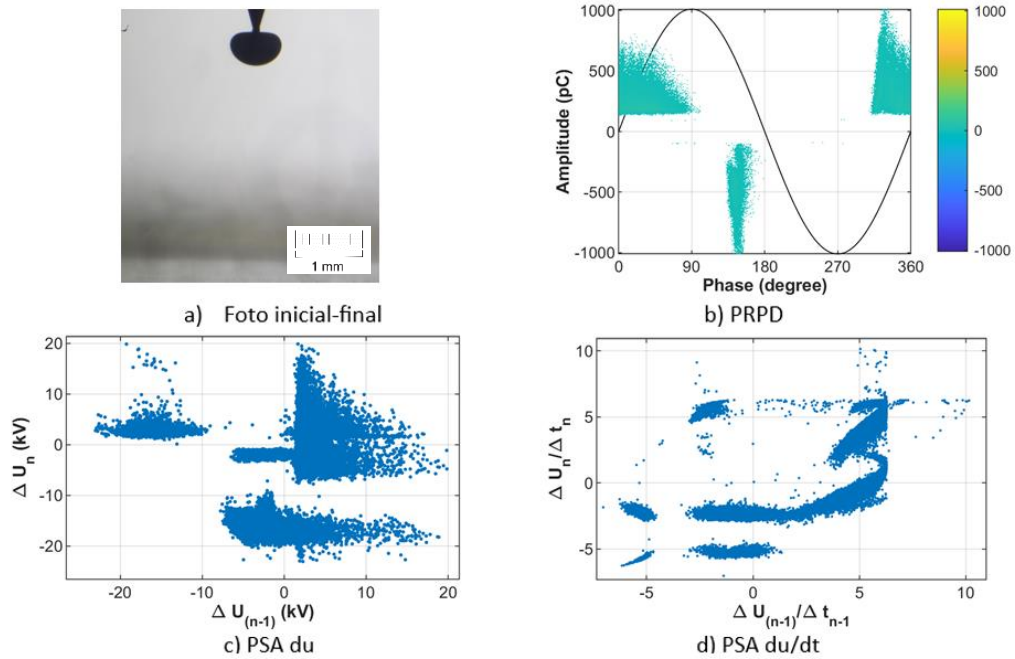


Figura 24 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 2h 0min a 2d 3h 10min

En Figura 24, nuevamente no se aprecian cambios en vacuola y PRPD mantiene patrón. En PSA c) se aprecia cambio de patrón, ahora mostrándose 3 clusters, en d) se aprecia parte de clusters observados en tramo anterior, pero con ausencia de otros.

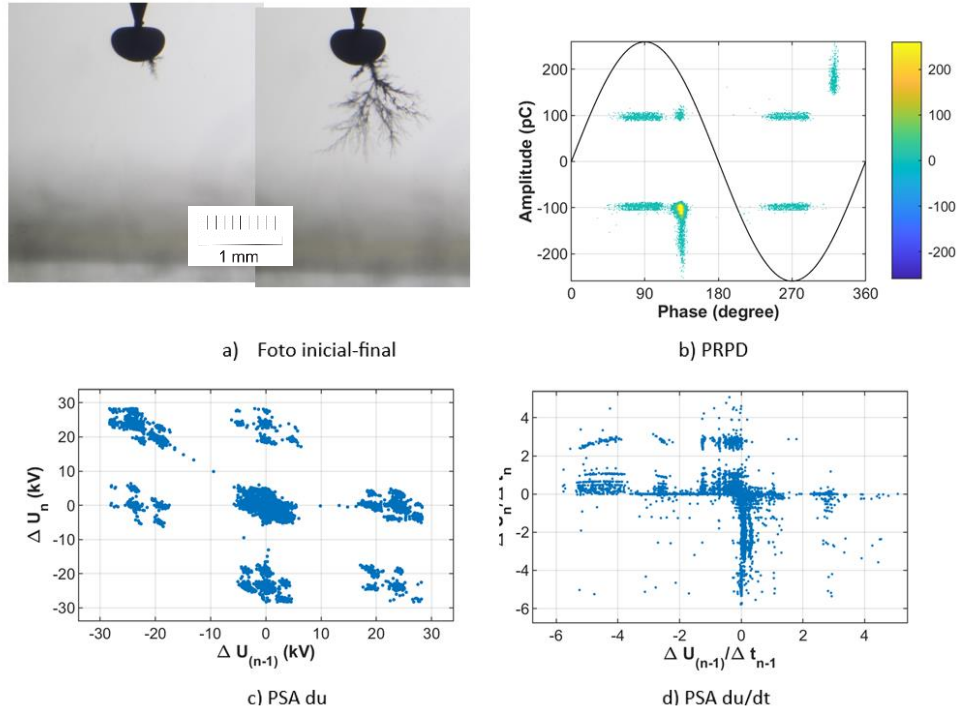


Figura 25 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 22h 0min a 2d 22h 20min

En Figura 25 se aprecia comienzo de crecimiento de árbol eléctrico desde vacuola casi llegando al tercer día, el árbol crece de manera rápida pero con magnitud de descargas parciales baja como se ve en PRPD, esto repitiéndose al comienzo de crecimiento de otras probetas. En PSA c) se nota cambio nuevamente de patrón, siendo manifestado patrón de 7 clusters visto en comienzo de probetas anteriores, pero con una mayor robustez de canales, en d) no se aprecia patrón debido a bajo número de descargas.

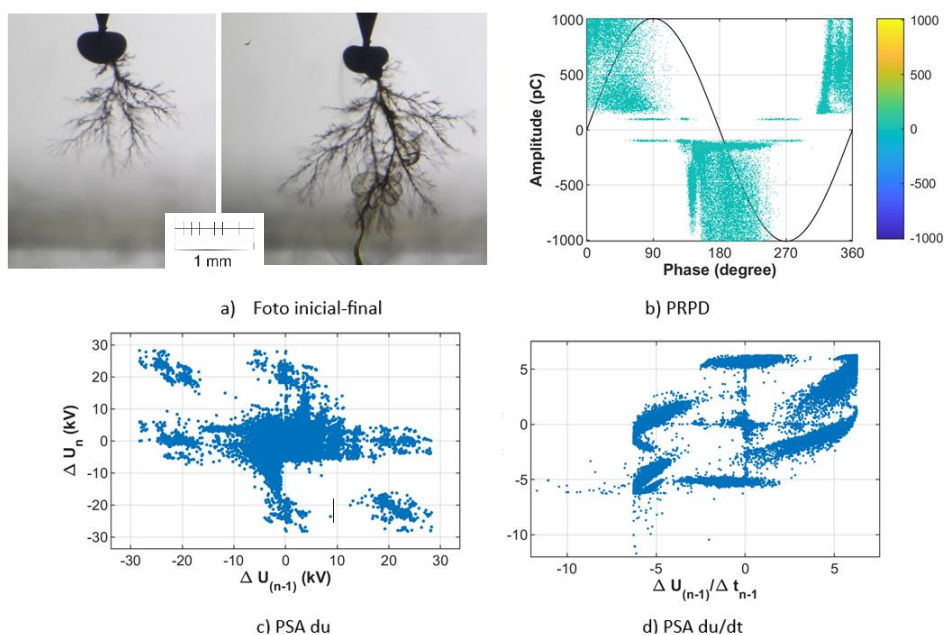


Figura 27 MV155 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 22h 20min a 2d 23h

En Figura 27 se aprecian últimos momentos antes de ruptura, árbol eléctrico mantiene crecimiento desde vacuola con ramas gruesas hasta contacto con contraelectrodo. Es relevante apreciar que luego de empezado el crecimiento del árbol eléctrico desde vacuola, este llega a ruptura en solo una hora. En PRPD se aprecia aumento de magnitud de descargas parciales en comparación a tramo anterior, esto con patrón de descarga parcial interna. En PSA c) se mantiene patrón de 7 clusters pero con estructura central posiblemente debido a ruido, mientras que en d) se aprecia patrón de 6 clusters ya visto al comienzo de análisis.

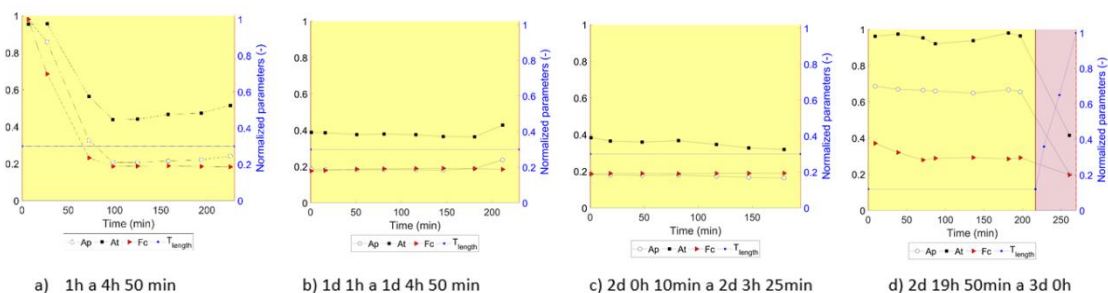


Figura 28 MV155 parámetros de forma de onda

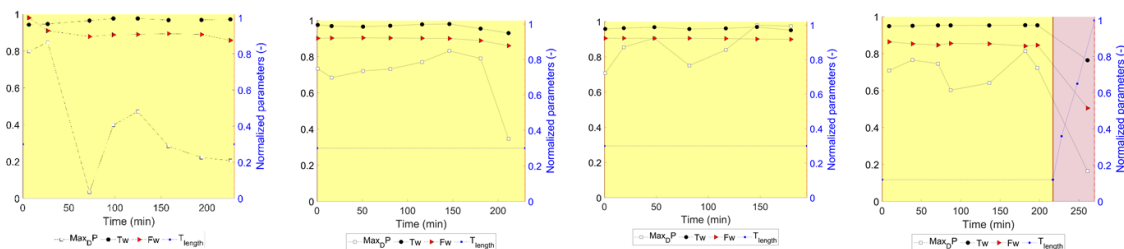


Figura 29 MV155 parámetros de forma de onda

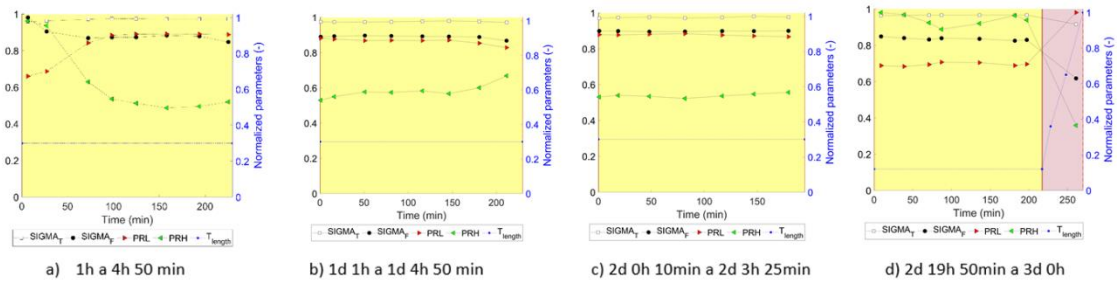


Figura 31 MV155 parámetros de forma de onda

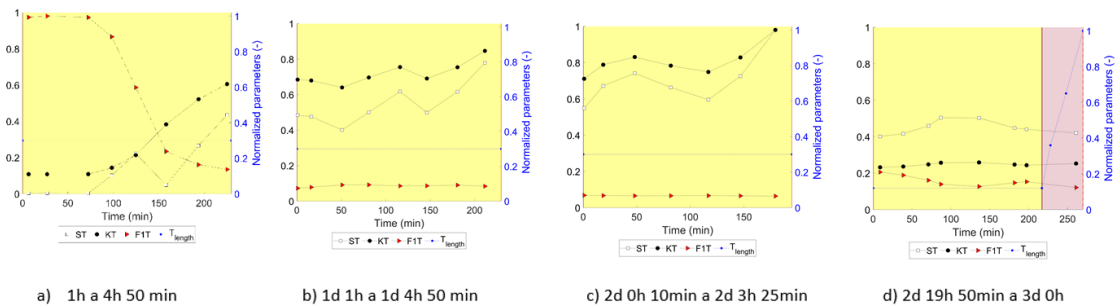


Figura 30 MV155 parámetros de forma de onda

En Figura 28 a Figura 30 se encuentra evolución de parámetros de forma de onda, siendo cada figura un conjunto distinto de parámetros, los cuales se grafican en intervalos de tiempo no continuos por la longitud del ensayo. En general parámetros tienden a estar estables hasta momento donde empieza a crecer árbol eléctrico desde vacuola. Se pueden visualizar las siguientes tendencias:

- Parámetros A_p y A_t , suben al acercarse el inicio del crecimiento del árbol desde imperfección (color rojo claro), para luego bajar de manera abrupta mientras crece.
- Parámetros Tw , Fw , $SigmaF$ y PRH , se mantienen constantes para disminuir al empezar a crecer árbol.
- Parámetro PRL se mantiene constante hasta finalmente subir cuando empieza a crecer árbol.

El comportamiento observado en probeta MV155 ya mostrado, presenta tendencias comunes con probetas MV124 (a), MV153 (b), MV154 (c), MV167 (d) y MV168 (e). En Figura 32 se pueden observar imágenes que muestran tanto iniciación como ultima imagen antes de ruptura, comprobándose que se tienen árboles que crecen desde vacuola, pero presentando tanto ramas gruesas como estructuras tipo arbusto. En los anexos se pueden observar los análisis completos realizados a cada probeta y comprobar comportamientos similares.

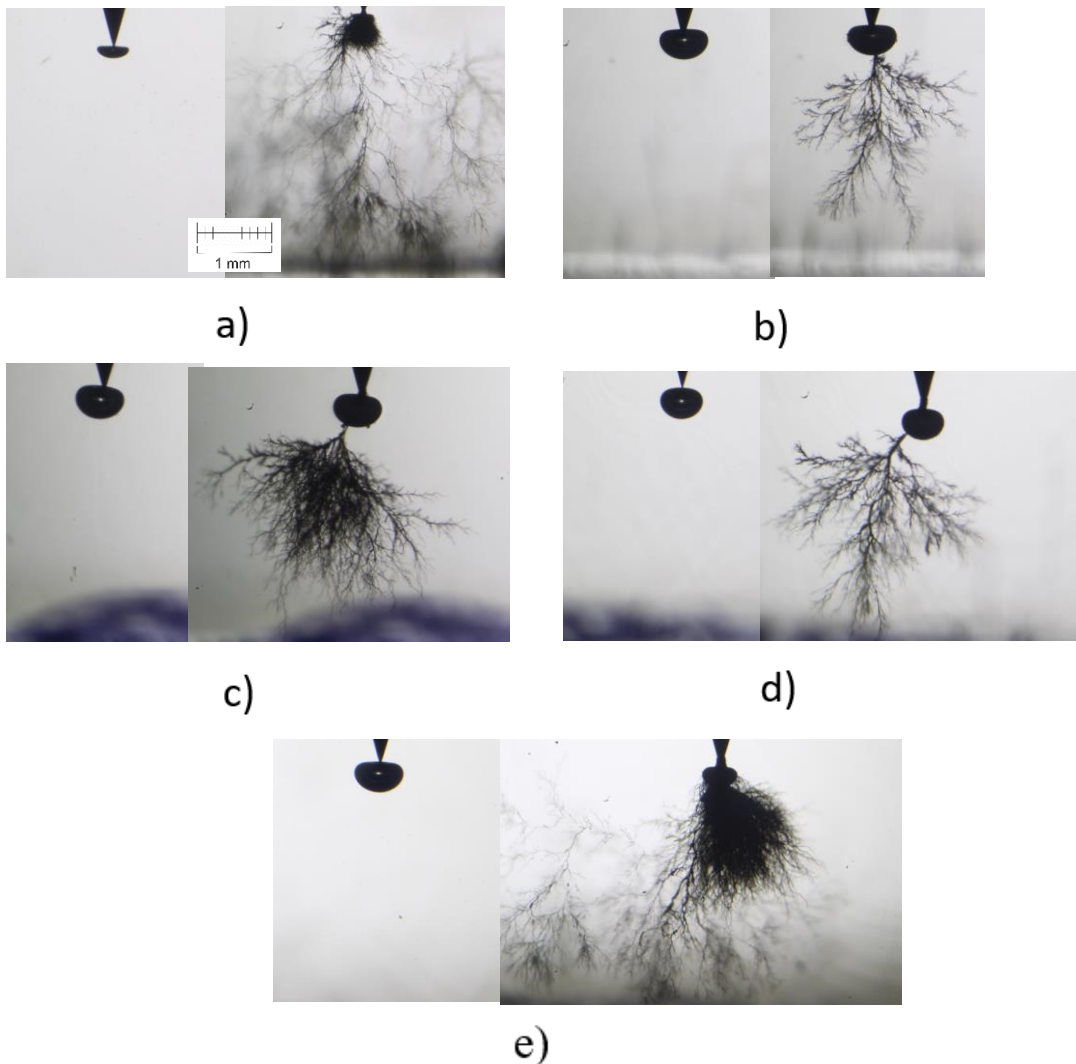


Figura 32 Imágenes inicial-final de probetas con crecimiento desde vacuola (MV124 (a), MV153 (b), MV154 (c), MV167 (d) y MV168 (e))

Se aprecia que mayoría de probetas con vacuola cercana a punta se comporta de manera muy similar, visualmente como se puede apreciar en fotos, durante 2 o 3 días se engrosa canal de contacto de electrodo a vacuola y se erosiona vacuola siendo muy visible en varias probetas. Luego de esta fase empieza un crecimiento rápido empezando desde la vacuola, que varía entre 1 a 5 horas derivando a falla de probeta.

En PRPD se aprecia que primera fase de erosión de vacuola antes que crezca árbol tiene formas de PRPD y magnitudes similares, en torno a 200-500pC, luego al empezar a crecer el árbol se alternan fases de bajo número y magnitud de DP, esto con crecimiento más filamentario o estancamiento de crecimiento y fases con alto número y magnitud de DP, que resultan en crecimiento rápido de tipo arbusto.

Para PSA se aprecia que el que presenta derivada del tiempo en primera fase de erosión presenta clusters muy definidos e iguales entre tramos, mientras que al empezar a crecer árbol presenta algunos de estos clusters iniciales, pero con más ruido. Mientras que versión de PSA sin derivada del tiempo presenta más sensibilidad, al en primera fase antes de crecimiento presentar una forma triangular de baja magnitud, para luego de empezar a crecer el árbol tender a presentar forma con 7 clusters homogéneamente separados.

En cuanto a parámetros se puede notar que en fase de erosión de vacuola parámetros son constantes sin variaciones notables, pero al empezar a crecer árbol desde vacuola los parámetros Tw, Fw, SigmaF, PRH y PRL presentan sensibilidad.

Probeta MV168 difiere ligeramente de otras en las etapas mostradas, debido a que luego de empezar a crecer el árbol y formar estructura de arbusto similar a otras probetas, crecimiento se estanca durante un día, para acabar en crecimiento filamentario similar a probeta MV124. En PRPD, PSA y parámetros sigue tendencias presentadas, solo que con fases extra y más largas, también presentando etapas con bajas y otras con altas DP en número y magnitud.

4.3. Probetas con vacuola cercana a punta (Tipo 2)

Tabla 4 Datos constructivos probetas con vacuola cercana a punta

Nombre probeta	Datos constructivos		
	Fecha creación	Volumen vacuola (nL)	Distancia vacuola-punta (mm)
MV160	17-nov	34,1	0,044
MV161	17-nov	30,9	0,022
MV166	18-nov	13,5	0,031
MV167	18-nov	18,4	0,001
MV168	18-nov	8,8	0,001

En Tabla 4 se muestran probetas ensayadas con la característica común de presentar la vacuola a una distancia menor de 0,1 mm de la punta. Se puede apreciar que grupo de probetas fueron hechas en 2 días distintos, además probetas MV167 y MV168 tienen una distancia hacia vacuola mucho menor al resto de probetas.

Tabla 5 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola cercana a punta

Nombre probeta	Datos Iniciación			
	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo
MV160	06-abr	50	hasta 24kV	Prolongado
MV161	03-may	50	hasta 24kV	Prolongado
MV166	04-may	50	hasta 24kV	Prolongado
MV167	11-may	50	hasta 24kV	Prolongado
MV168	11-may	50	hasta 24kV	Prolongado

En Tabla 5, se aprecia que igualmente que probetas con vacuola insertada no fue posible llegar a una iniciación de forma rápida, por lo que se intenta llevar a cabo iniciación y crecimiento en ensayo prolongado.

Tabla 6 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola cercana a punta

Nombre probeta	Datos Crecimiento				
	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo ensayo	Resultado
MV160	12-jun	50	14	7d	Solo erosión
MV161	23-jun	50	14	3d 12h	Solo erosión
MV166	17-may	50	14	2d	Solo erosión
MV167	09-jun	50	14	3d 30 min	Ruptura
MV168	02-ago	50	14	4d 15h	Ruptura

En Tabla 6 se aprecia resumen de datos de crecimiento, se aprecia que solo 2 de las 5 probetas pudieron crecer arboles eléctricos visibles y llegar a la ruptura, mientras que primeras 3 solo engrosaron el canal de contacto con vacuola y sufrieron erosión sin desarrollar arborización.

Las 2 probetas que desarrollaron árbol eléctrico (MV167 y MV168) tienen tendencias similares a probeta con vacuola insertada y por eso fueron analizadas en sección anterior. Se podría suponer según la distancia hacia vacuola (Tabla 4), que estas pudieron iniciarse en ensayo prolongado debido a la cercanía a vacuola, siendo similares a probetas de vacuola insertada en términos de distribución de campo eléctrico. Esto se podría justificar en que todas las probetas de vacuola insertada pudieron desarrollar árbol eléctrico, mientras que solo las probetas con la aguja más cercana a vacuola lo desarrollaron.

Probetas MV160 (a), MV161 (b) y MV166 (c), no mostraron crecimiento de árbol eléctrico en los tiempos disponibles en laboratorio, en vez de eso desarrollaron un canal de conexión a vacuola y engrosaron este canal con el pasar de los días, también desarrollando erosión en superficie de vacuola (aunque menos que probetas con vacuola insertada), como se ve en Figura 33.

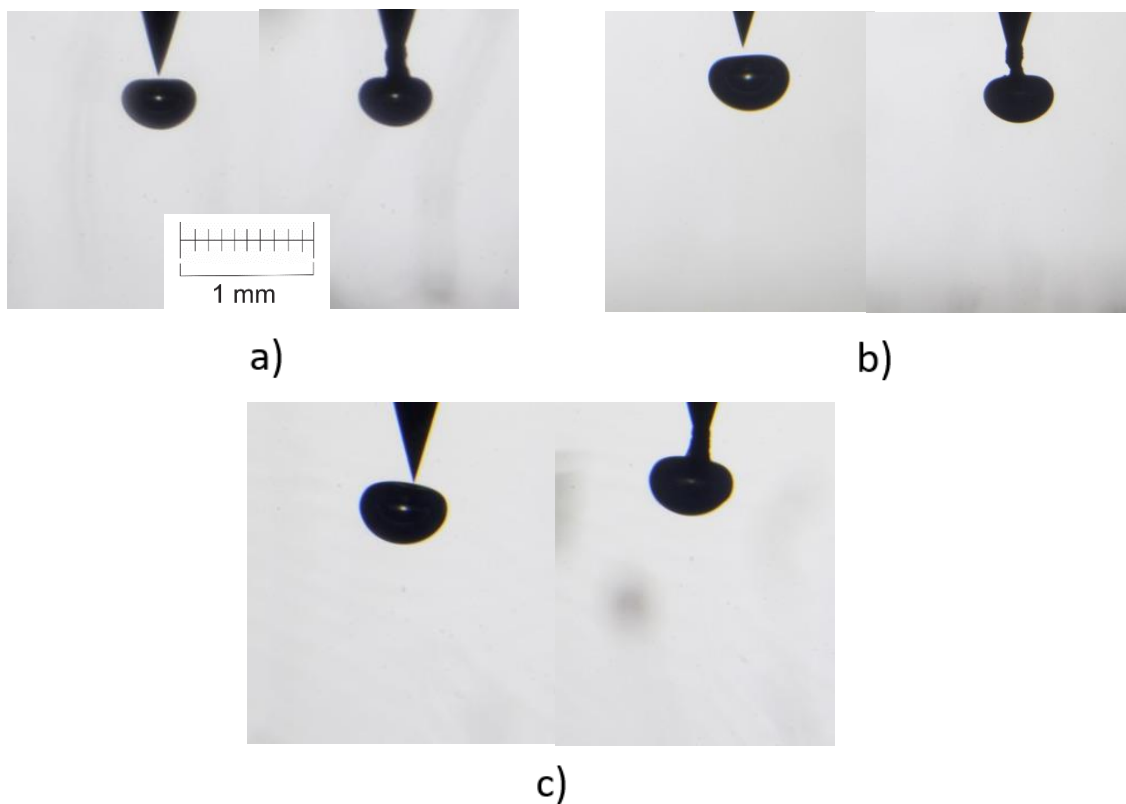


Figura 33 Imágenes inicial-final de probetas con vacuola cercana a punta (MV160 (a), MV161 (b) y MV166 (c))

4.4. Probetas con vacuola a distancia media (Tipo 3)

Tabla 7 Datos constructivos, probetas con vacuola a distancia media

Datos constructivos			
Nombre probeta	Fecha creación	Volumen vacuola (nL)	Distancia vacuola-punta (mm)
MV182	24-nov	53,2	0,2759
MV183	24-nov	37,8	0,2903
MV184	24-nov	54,7	0,303
MV185	24-nov	52,2	0,3636
MV186	24-nov	48,5	0,3333
MV187	24-nov	84,1	0,3333
MV189	24-nov	25,3	0,484

En Tabla 7 se muestran probetas ensayadas con la característica común de presentar la vacuola a una distancia entre 0,1 mm a 1 mm respecto a la punta. Se puede apreciar que todas las probetas fueron fabricadas el mismo día, lo cual significa que la resina es del mismo lote de creación y fueron llevadas al horno el mismo tiempo, lo cual descarta multitud de variables que podrían afectar a la comparación entre estas. Además, tanto volúmenes de vacuolas y distancias a punta presentan los mismos ordenes de magnitud.

Tabla 8 Datos de iniciación árbol eléctrico, probetas con vacuola a distancia media (Tipo 3)

Datos Iniciación				
Nombre probeta	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo
MV182	20-mar	250	14	15 min
MV183	23-mar	50	20	22 min
MV184	27-mar	50	24	26 min
MV185	27-mar	50	16	17 min
MV186	27-mar	50	16	17 min
MV187	27-mar	50	20	21 min
MV189	27-mar	50	24	25 min

En Tabla 8 se aprecia que solo un ensayo de iniciación fue hecho con el amplificador de alta tensión, esto debido a la mayor facilidad de iniciación a mayor tensión que ofrece transformador. También los tiempos de iniciación están distribuidos sin algún patrón apreciable, pero siempre a tensiones mayores a 14kV.

Tabla 9 Datos de crecimiento árbol eléctrico, probetas con vacuola distancia media (Tipo 3)

Datos Crecimiento					
Nombre probeta	Fecha	Frecuencia	Tensión	Tiempo ensayo	Resultado
MV182	10-abr	50	14	1h 14 min	Ruptura
MV183	05-abr	50	14	2h 27 min	Ruptura
MV184	17-abr	50	14	53 min	Ruptura

MV185	05-abr	50	14	1h 58 min	Ruptura
MV186	13-abr	50	14	1h 28 min	Ruptura
MV187	14-abr	50	14	1h 18 min	Ruptura
MV189	04-may	50	14	2h 29 min	Ruptura

En Tabla 9 se puede apreciar que todos los ensayos tuvieron tiempos de ruptura entre 1 a 2 horas y media, con promedio 1 hora y 44 minutos.

A continuación, se estudiarán los patrones de crecimiento (tendencias, estructuras, comportamientos, etc) observados, siendo estos resumidos en 2 marcadas tendencias que agrupan de manera adecuada a todas las probetas según los datos analizados.

4.4.1. Crecimiento con interacción de vacuola

En probetas MV182, MV183, MV184, MV185 y MV187 se observaron patrones y etapas de crecimiento similar, lo cual será analizado revisando crecimiento de probeta MV182.

MV182:

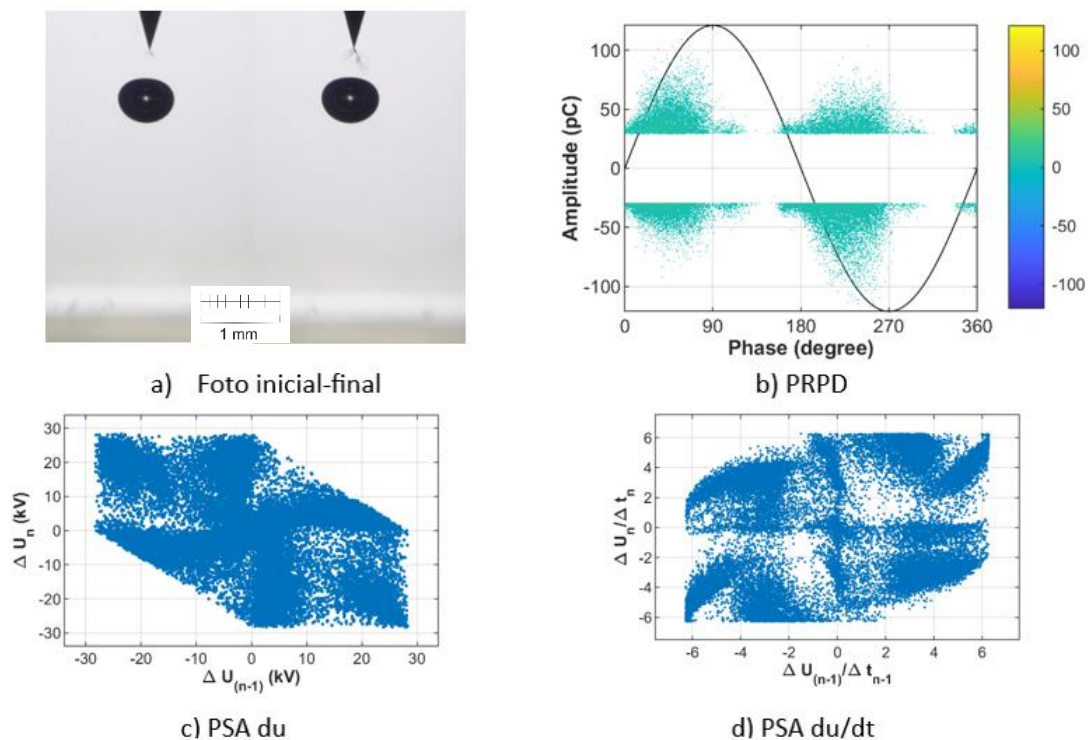


Figura 34 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 9 min

En Figura 34 se puede observar crecimiento inicial de probeta (antes de imperfección), empezando este desde estructura de iniciación en punta, propagándose con ramas delgadas. En PRPD se puede apreciar una baja magnitud (alrededor de 70pC) de descargas parciales, lo cual se asocia al alto nivel de ruido que no pudo ser filtrado debido a esto mismo, también se aprecia un patrón con DP sin polaridad dominante. En PSA c) se aprecia una estructura con 7 clusters pero con bastante ruido, mientras que en PSA d) se muestran clusters centrales debido a ruido y varios clusters alrededor.

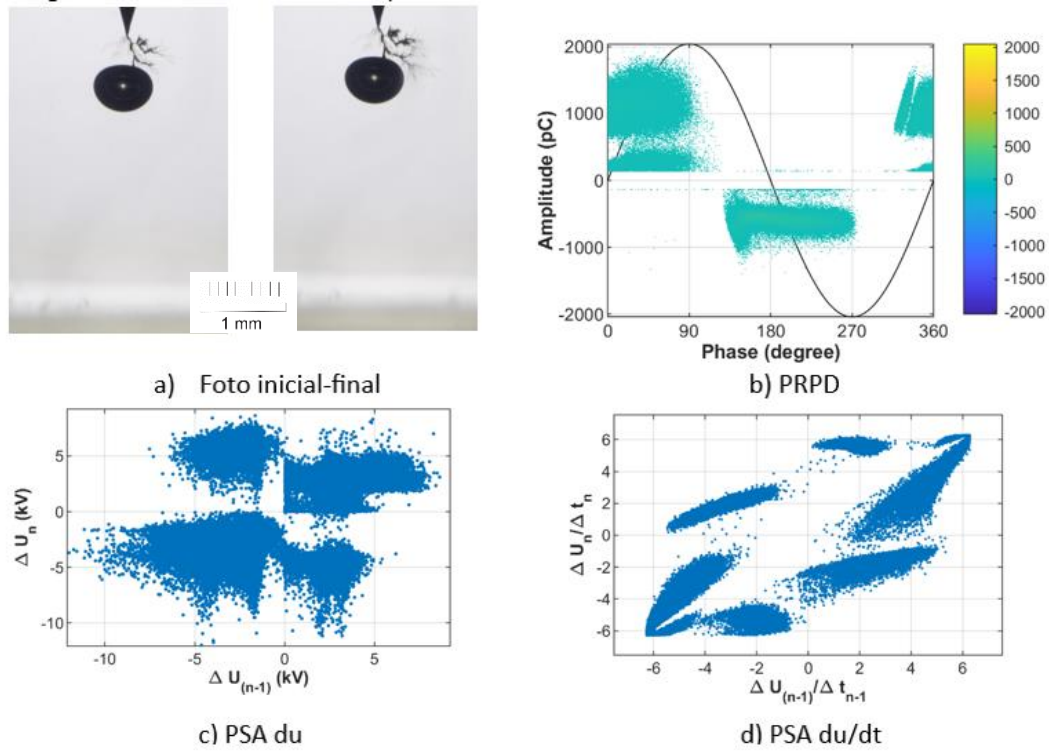


Figura 35 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 21 a 27 min

En Figura 35, primero por las imágenes, se puede suponer que árbol eléctrico interactúa con vacuola, esto debido a que se aprecia un punto de unión a la vacuola, además se empieza a rodear vacuola engrosándose sus ramas y por último cambia comportamiento de descargas parciales de manera muy notoria, lo cual se puede tomar como indicativo de una interacción con la vacuola. PRPD muestra un notorio aumento en magnitud pasando de 50pC a llegar a 1500pC, además cambiando su forma para asemejarse a patrón clásico de descarga parcial interna. PSA en c) muestra un cambio de patrón, pasando de tener 7 clusters a tener 4 de estos, con magnitudes menores pasando de escala máxima de 30 a escala de 5. Por último en PSA en d) se aprecian 7 clusters de manera muy marcada los cuales tienden a asemejarse a tramo anterior.

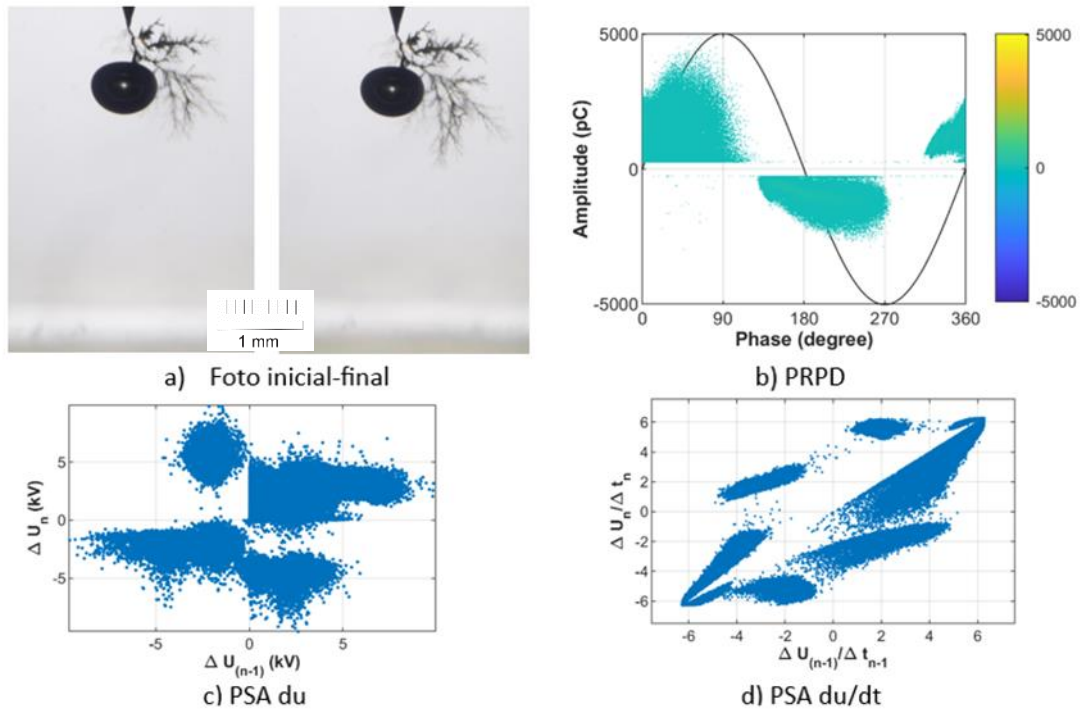


Figura 36 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 42 a 48 min

En Figura 36 se puede apreciar que árbol crece de manera rápida y con ramas gruesas, también que árbol rodea la vacuola tendiendo hacia contraelectrodo. Se nota un patrón PRPD, solo que con una forma menos definida de cluster y estando superpuesto al ruido en comparación a lo visto en tramo anterior, pero con un aumento de magnitud de descargas parciales, llegando ahora hasta 2500pC. En PSA c) se mantiene patrón anterior con 4 clusters, pero siendo estos un poco mas definidos ahora. PSA d) sin cambios evidentes.

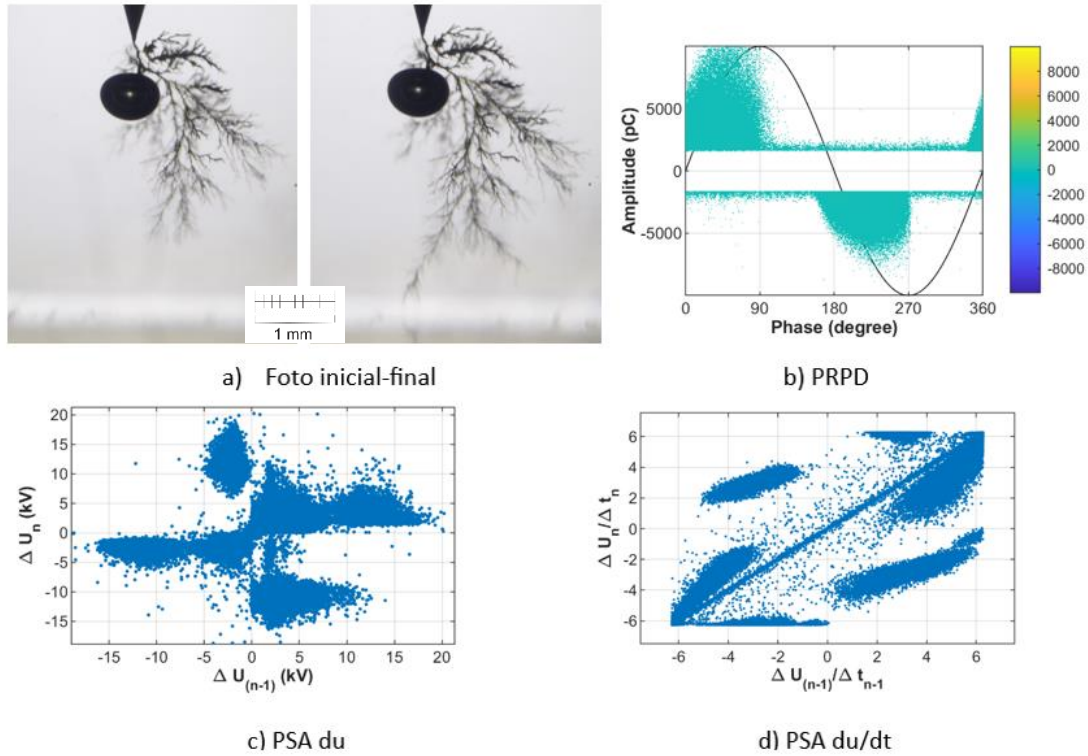


Figura 37 MV182 técnicas tradicionales periodo de tiempo 68 a 74 min

En Figura 37 se aprecia último tramo de análisis, llegando a unos pocos minutos antes de la ruptura de probeta. En cuanto al crecimiento se puede apreciar que sigue misma estructura de ramas gruesas tendiendo a contra electrodo, generándose la ruptura de la probeta en el instante que toca contraelectrodo, esto debido al grosor de las ramas. En PRPD se aprecia patrón similar a tramo anterior pero con un nuevo aumento de magnitud, sobrepasando los 5000pC, también es muy importante notar que nivel de ruido base también aumenta. En cuanto a PSA c) se aprecia patrón de 4 clusters que se vio en tramos anteriores, pero con escalas mayores, pudiendo ser debido a los aumentos de magnitud abruptos. En PSA d) se aprecian sin cambio los 7 clusters vistos en tramos anteriores, aunque notablemente se aprecia una recta diagonal, la cual es conocida en la literatura por marcar la cercanía a ruptura lo cual se cumple también en este caso.

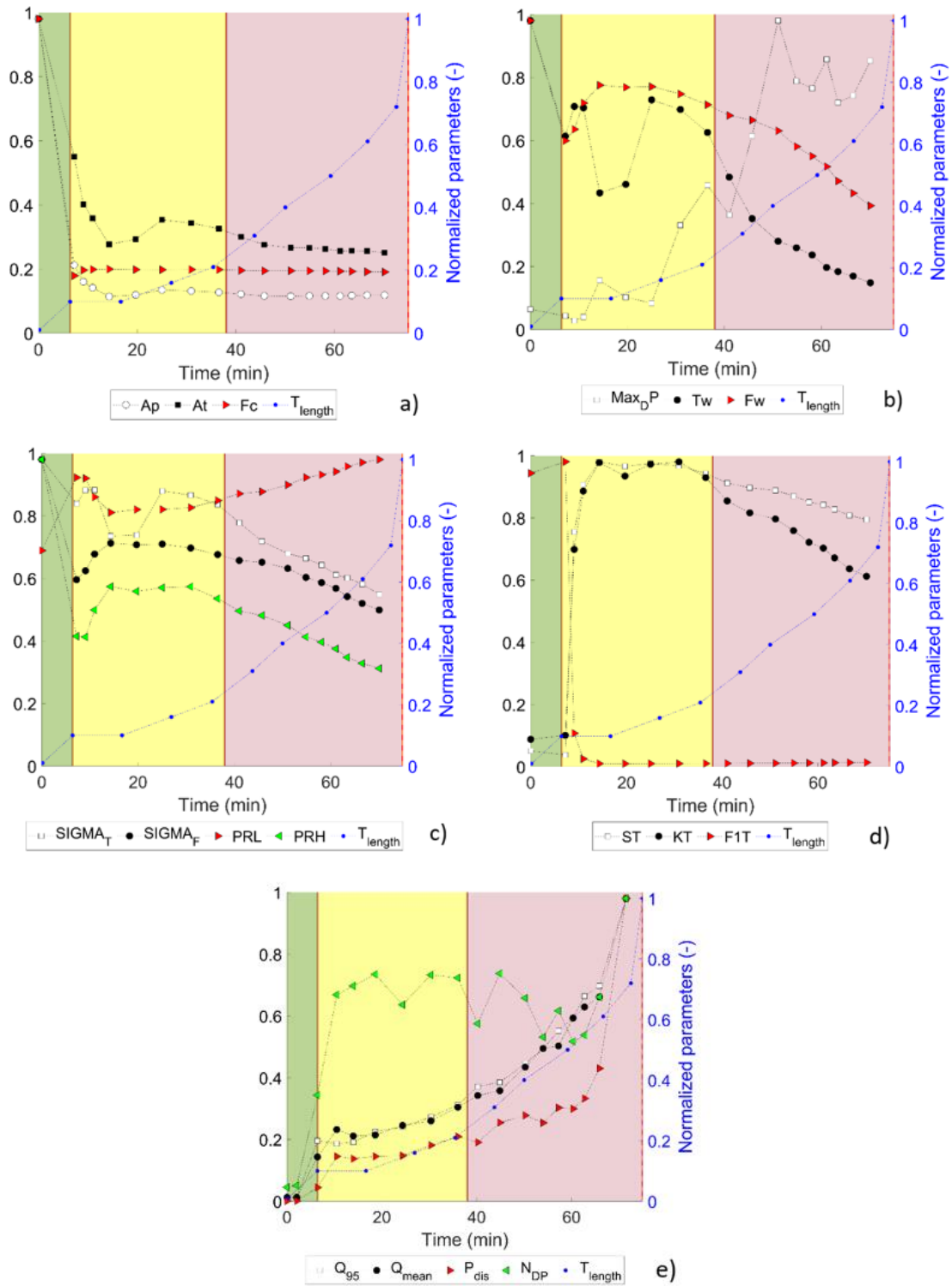


Figura 38 MV182 Parámetros de forma de onda

De gráficos en Figura 38 se puede resaltar:

- Se puede notar que Fw, σF , PRH, ST y KT son bastante sensibles al crecimiento, al comienzo de la interacción con la vacuola presentan crecimiento notable para luego de 20 min decaer constantemente mientras crece árbol, siendo parámetros relacionados a la frecuencia. También es muy interesante notar que variables

presentan un drop en el momento que árbol eléctrico empieza a interactuar con la vacuola, mostrándose sensibles al comienzo de interacción con vacuola.

- Por otra parte, T_w y σT (parámetros relacionados al dominio del tiempo) presentan comportamiento similar a parámetros anteriores, decayendo luego de 20 min, solo que estos presentan incluso otro declive y aumento extra en zona amarilla mientras se está cruzando vacuola, para luego empezar a decaer de manera constante hasta que se llega a ruptura.
- PRL presenta también sensibilidad, pero tiende a aumentar mientras crece árbol, además al llegar a imperfección (entre zona verde y amarilla), presenta un aumento temporal en su valor para disminuir poco después, al contrario de otros parámetros sensibles.
- Parámetros de ultimo grafico relacionados a carga y potencia, aumentan de manera constante, concordante con el aumento de magnitud visto en PRPD y el grosor de canales.

El comportamiento observado en probeta MV182 ya mostrado, presenta tendencias comunes con probetas MV182, MV183 (a), MV184 (b), MV185 (c) y MV187 (d). En Figura 39 se pueden observar imágenes que muestran tanto iniciación como ultima imagen antes de ruptura, comprobándose que se tienen arboles eléctrico con ramas robustas, que presentan puntos de interacción con vacuola y crecen rodeando a esta, siguiendo tendencias mostradas. En los anexos se pueden observar los análisis completos realizados a cada probeta y comprobar comportamientos similares.

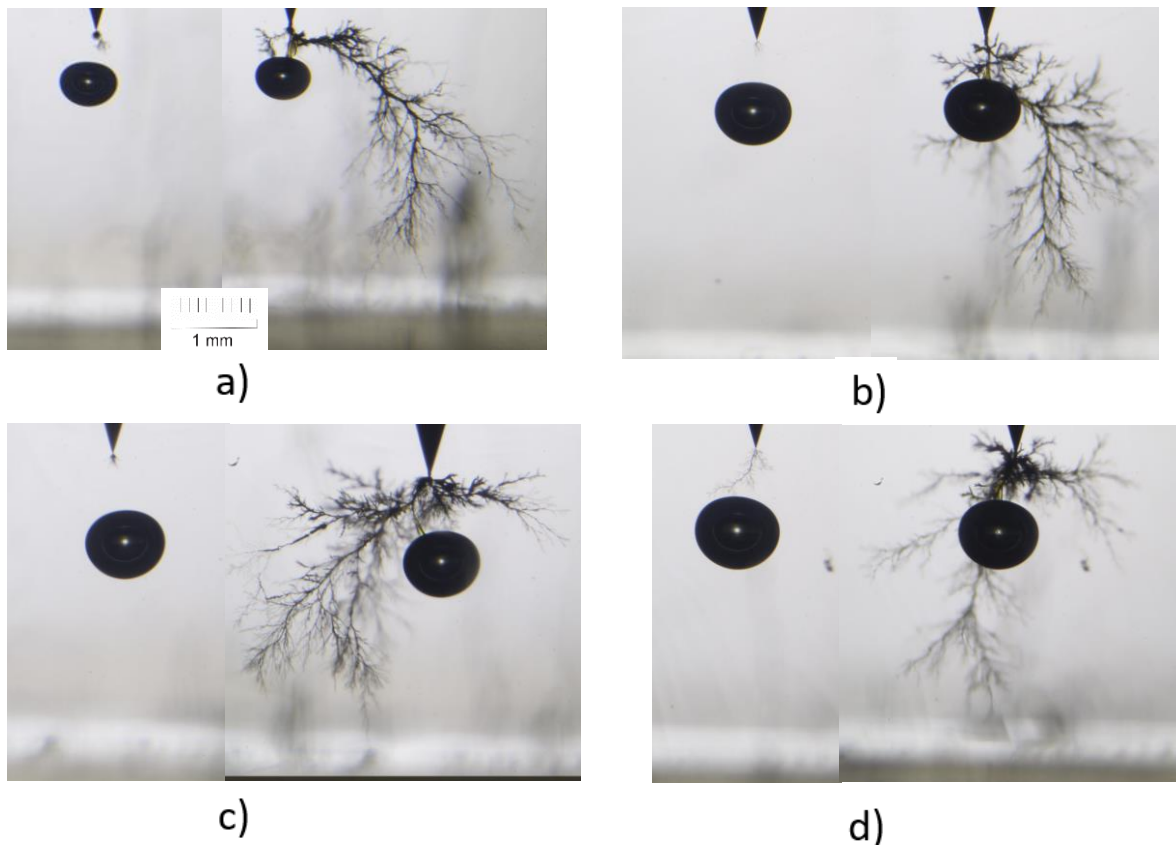


Figura 39 Imágenes inicial-final de probetas con interacción de vacuola (MV182, MV183 (a), MV184 (b), MV185 (c) y MV187 (d))

Estas probetas muestran el comportamiento más común observado y detallado anteriormente. Al inicio se presenta baja magnitud de descargas y canales delgados, con PSA similar a probetas filamentosas, sin embargo, al interactuar con vacuola engrosan sus canales, tanto magnitud de DP como ruido aumentan y forma de PRPD, luego de lo cual crecen rápidamente hacia contraelectrodo aumentando paulatinamente su magnitud de DP y generando ruptura inmediata al hacer contacto con contraelectrodo. Este tipo de comportamiento resulta en un promedio de tiempos de ruptura de 94 min.

En cuanto a PSA, la versión sin considerar derivadas de tiempo es interesante, esto debido a que al empezar a interactuar con la vacuola el patrón cambia de uno con 7 clusters a uno con 4 clusters, que se mantiene hasta el final del crecimiento, siendo este grafico sensible a la presencia de la vacuola.

En cuanto a formas de onda se pudieron identificar varios parámetros sensibles al crecimiento del árbol eléctrico de manera notoria, además de sensibilidad al intercepto con vacuola.

4.4.2. Crecimiento sin interacción de vacuola

En probetas MV186 y MV189 se observaron patrones y etapas de crecimiento similar, lo cual será analizado revisando crecimiento de probeta MV186.

MV186:

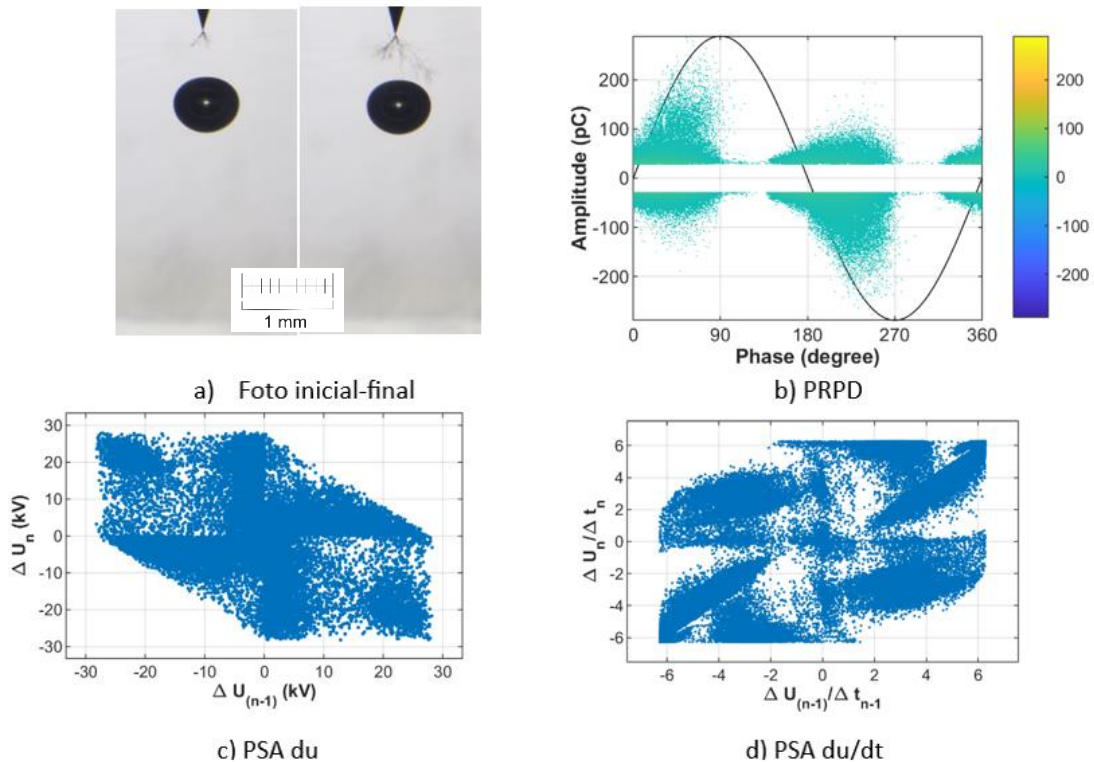


Figura 40 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4 a 10 min

En Figura 40, se aprecia primeros minutos de crecimiento de árbol eléctrico, se presentan ramas delgadas que tienden a rodear vacuola. En PRPD se aprecia patrón similar a Figura 34, con magnitud de descargas baja, llegando a 150pC y patrón sin polaridad definida. En

PSA c) se puede ver patrón de 7 clusters pero con bastante ruido que provoca que estos no sean definidos. PSA d) se aprecian 6 clusters además de un cluster central debido al ruido, los clusters no se aprecian de manera definida.

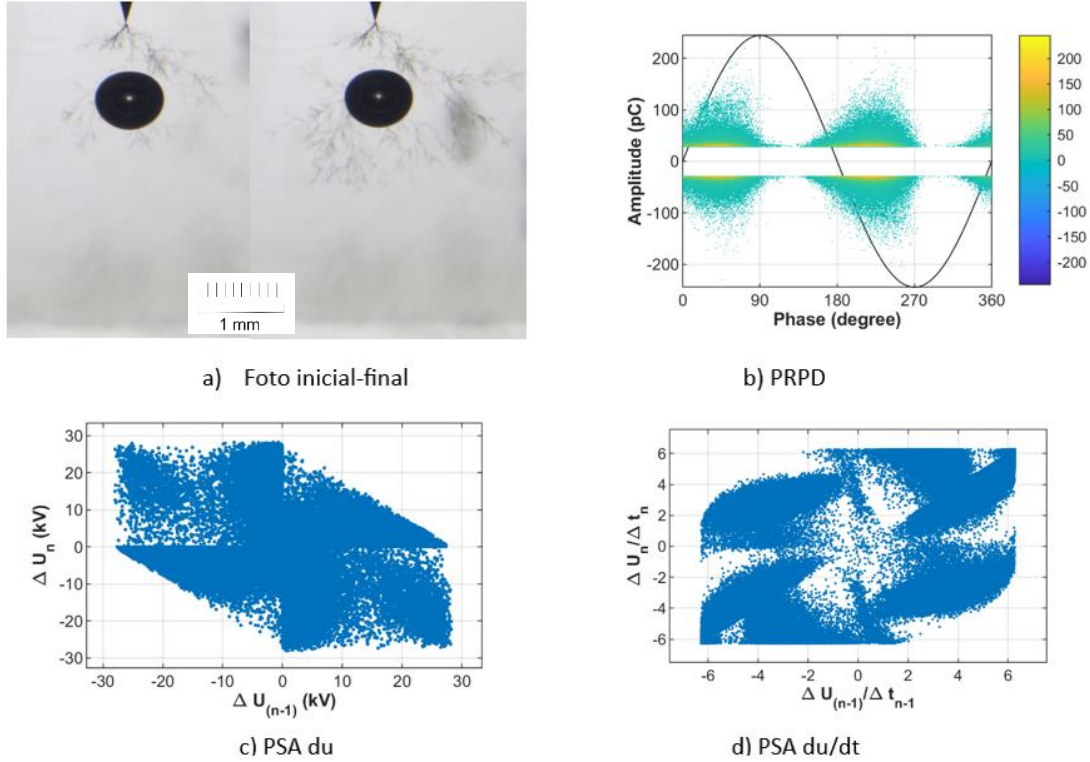


Figura 41 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 19 a 27 min

En Figura 41 se muestra un crecimiento del árbol eléctrico, donde ya se encuentra a nivel de imperfección, sin embargo, se rodea la vacuola y no se aprecia ningún canal que este en contacto directo con la imperfección. Se piensa no se interactúa con vacuola ya que PSA y PRPD, se mantienen iguales en forma y magnitudes en comparación a Figura 40.

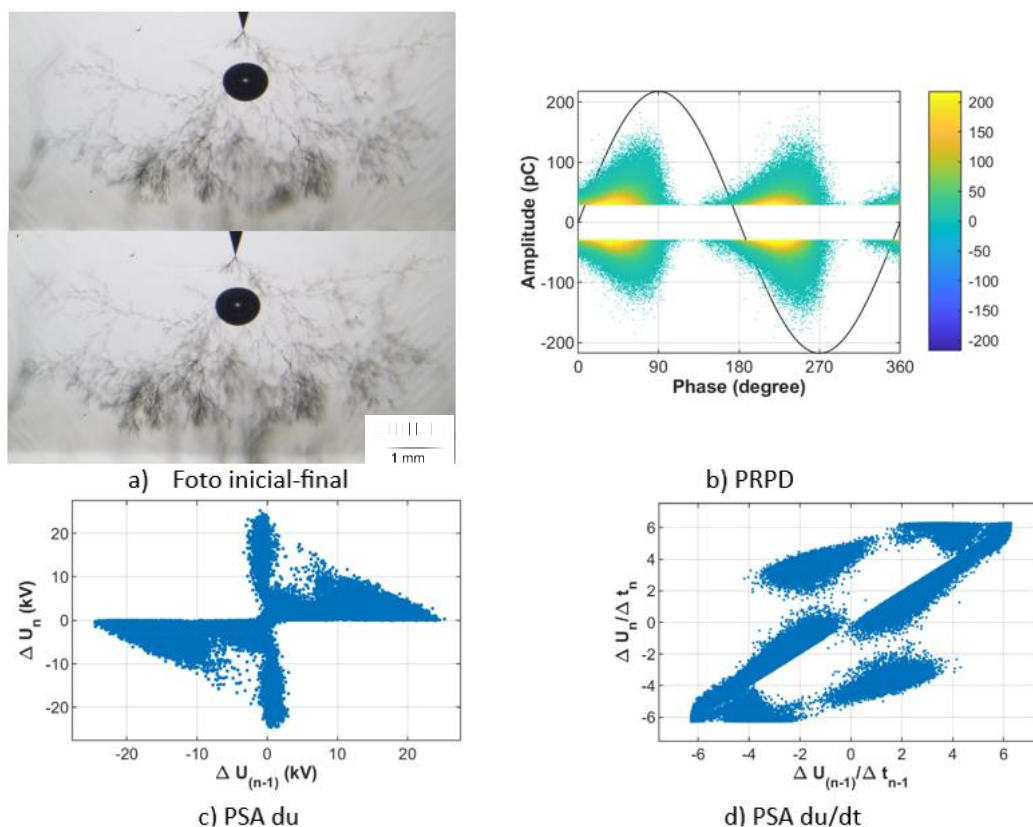


Figura 42 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 63 a 69 min

En Figura 42, se aprecia que árbol eléctrico supera nivel de imperfección y tiene contacto con contraelectrodo, tiene canales delgados y distribuidos en una zona amplia. El PRPD no presenta cambios notables. Ambas versiones de PSA cambian, mostrando menos clusters, en c) mostrando varios clustes unidos y bien definidos, en d) se muestran 6 clusters pero con distinta forma a la vista anteriormente, se podría pensar por interacción con contraelectrodo.

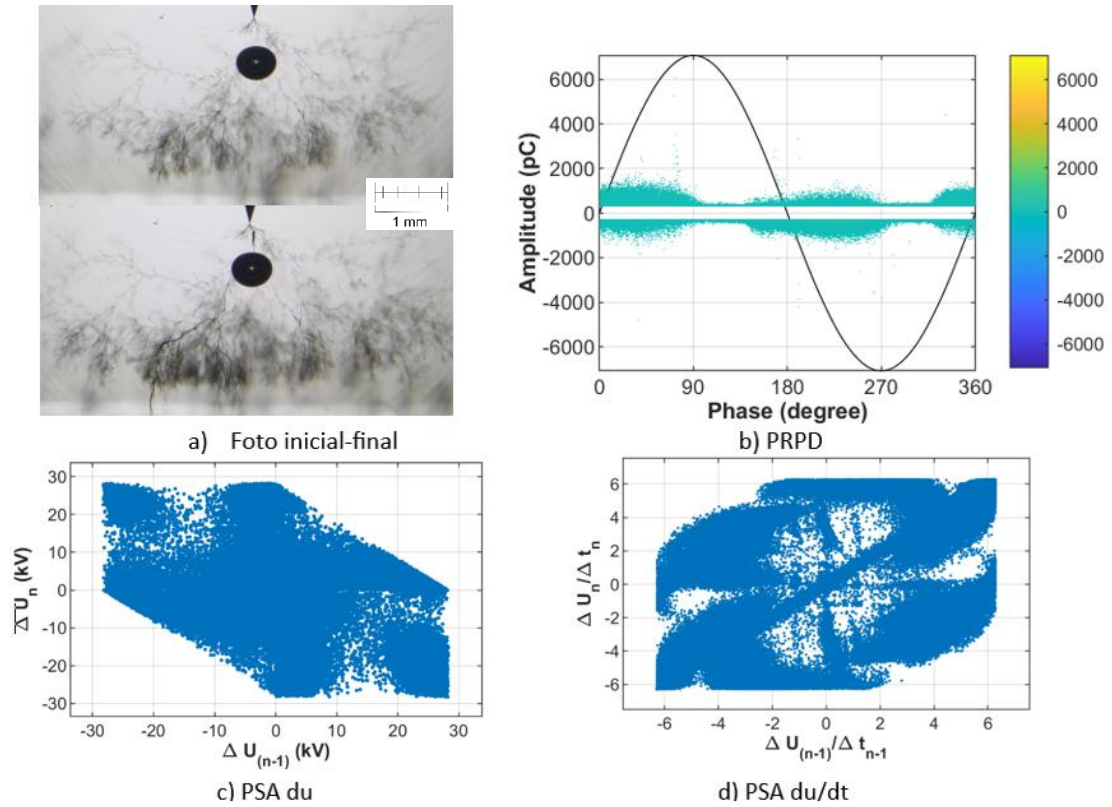


Figura 43 MV186 técnicas tradicionales periodo de tiempo 72 a 89 min

En Figura 43 se aprecia que árbol eléctrico engrosa notablemente canales ya existentes y se generan algunos nuevos interactuando con contraelectrodo. PSA aumenta su magnitud, llegando a valores de 1000pC, pero con patrón similar a anterior, esto posiblemente a engrosamiento de canales. Patrones de PSA son muy similares a vistos en Figura 40, en c) se aprecian 7 clusters unidos por ruido y en d) se aprecian 7 clusters y una línea en diagonal debido a cercanía a ruptura, similar a Figura 37.

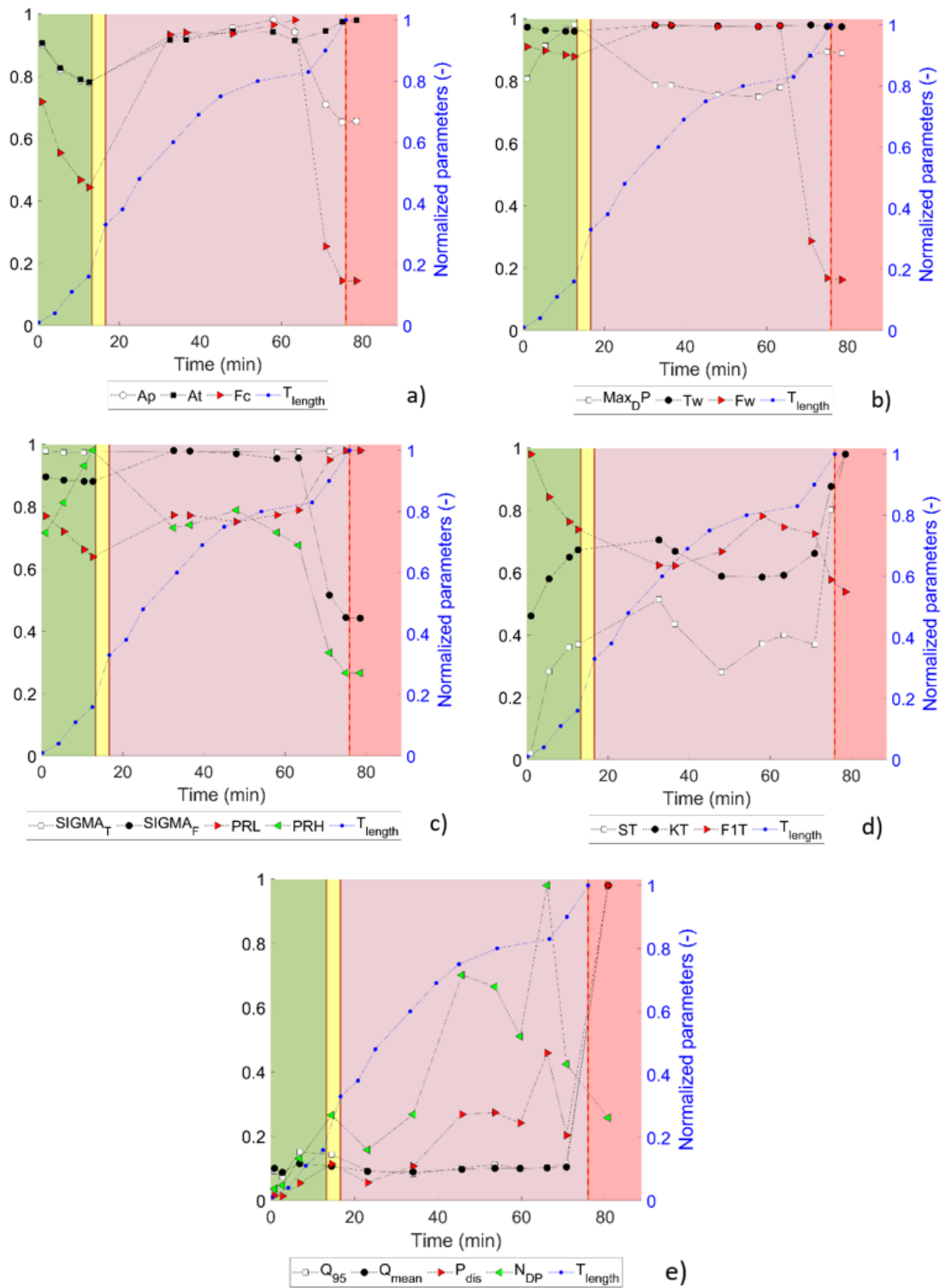


Figura 44 MV186 Parámetros de forma de onda

Desde Figura 44 se presentan parámetros en general bastante constantes, Ap, Fc, Fw, Sigma F y PRH presentando cambio brusco al llegar ramas a contra electrodo. Por otro lado Ap, Fc y At presentan mínimos locales cuando se empieza a interactuar con vacuola (frontera zona verde y amarilla), mientras que PRH presenta un máximo local en mismo punto.

El comportamiento observado en probeta MV186 ya mostrado, presenta tendencias comunes con MV189. En Figura 45 se pueden observar imágenes que muestran tanto iniciación como ultima imagen antes de ruptura, comprobándose que se tienen arboles eléctrico con ramas delgadas y una estructura que rodea la vacuola, siguiendo tendencias mostradas. En los anexos se pueden observar los análisis completos realizados a cada probeta y comprobar comportamientos similares.

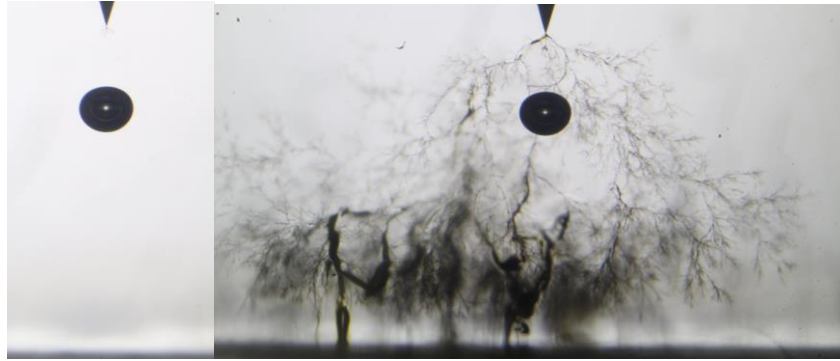


Figura 45 Imágenes inicial-final de MV189

Se aprecia que probetas 186 y 189 se comportan de manera muy similar en cuanto a imágenes y gráficos, siendo estructuras filamentosas y sin mostrar aumento de magnitud de DP hasta llegada a contra electrodo. Se podría decir que en este caso árbol no fue atraído por vacuola y no se interactuó con ella, también en promedio sus tiempos hasta ruptura fueron más largos (promedio 118.5 min, mayor a primer tipo de comportamiento) y con crecimientos sin etapas definidas (crecimiento constante, poca diferencia entre tramos estudiados). En PRPD presentan descargas de ambas polaridades en ambos ciclos de sinusoidal y de baja magnitud. En PSA se aprecia solo cambio al contactar contraelectrodo, manteniéndose en resto de tramos.

En parámetros de forma de onda se presenta menor sensibilidad a tipo de comportamiento anterior, mostrándose sensibilidad en llegada a vacuola y llegada a contraelectrodo.

5. Simulación estática de campo eléctrico

Con el objetivo de relacionar distribución aproximada de campos eléctricos con resultados experimentales y proponer hipótesis de efecto de imperfecciones en el crecimiento de árboles eléctricos, se desarrolla simulación estática en software FEMM.

En esta simulación se plasmará geometría de probetas y materiales usados vistos en sección “2.1 Creación de probetas”, para observar las distribuciones de campo aproximadas sin considerar la influencia de la estructura del árbol eléctrico.

Se revisarán 3 simulaciones según la clasificación de las probetas de las que se basan, vacuola a mitad de camino de punta (distancia 0,8mm a punta), vacuola cercana a punta (distancia 0,05mm a punta) y vacuola insertada en punta. Se considerará un volumen de vacuola promedio de 35nL según datos, aproximando está a una esfera de radio 0,2 mm, la aguja de alta tensión tendrá un radio de curvatura de $3\mu\text{m}$ en punta de forma semi esférica, la aguja un diámetro de 1mm, llevando todo esto a un modelo de FEMM con simetría axial en el centro de la aguja.

Materiales usados son aire que se encuentra en biblioteca de software y se crea el material de resina epóxica, con valor de permitividad relativa de 3 [22]. Base de probeta se fija como conductor en 0 V, aguja en 14000 V y se agregan materiales en zonas respectivas, resultando lo visto en Figura 46:

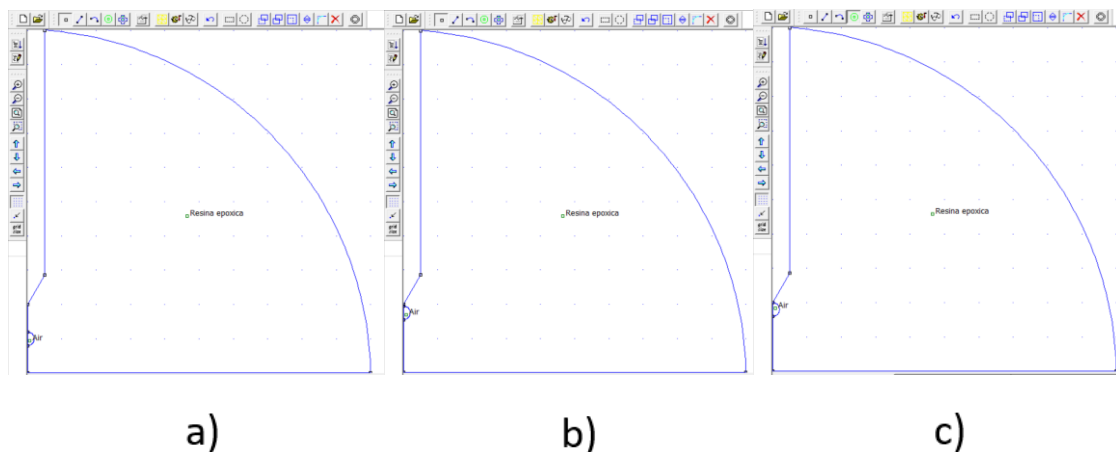


**Figura 46 Diagrama de simulaciones en FEMM
(Vacuola mitad (a), cercana (b), insertada (c))**

5.1. Probetas con vacuola insertada en punta

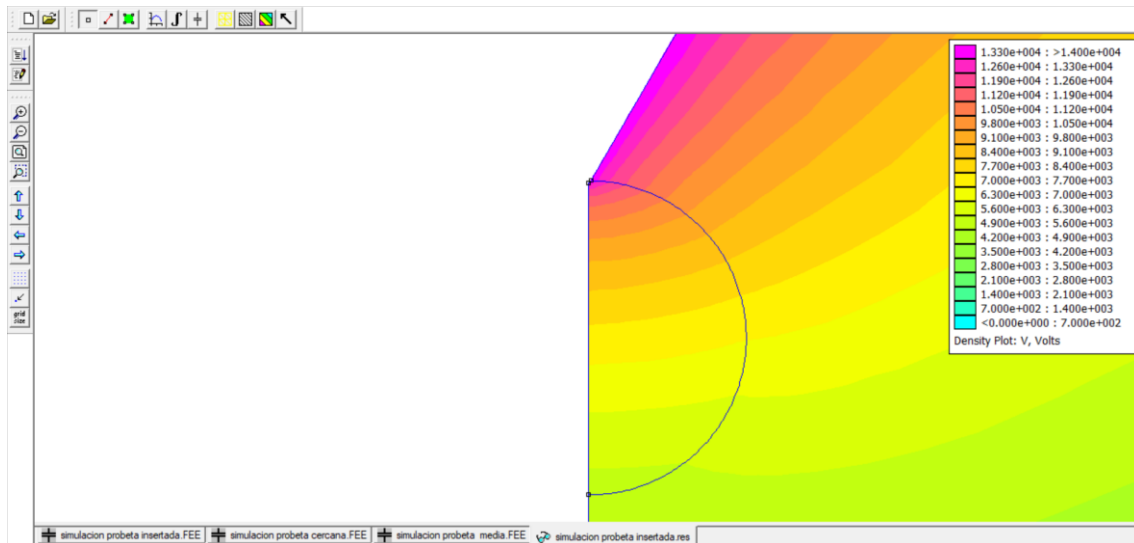


Figura 47 Distribución de potencial vacuola distancia media

En Figura 47, se aprecia zoom a distribución de potencial en punta de probeta. Como era de esperar existe una amplificación de campo eléctrico al interior de vacuola ya que su permitividad eléctrica es menor a la resina epóxica y esta se encuentra en zona con alta concentración de campo eléctrico, en se grafica distribución de magnitud de campo eléctrico al interior de vacuola.

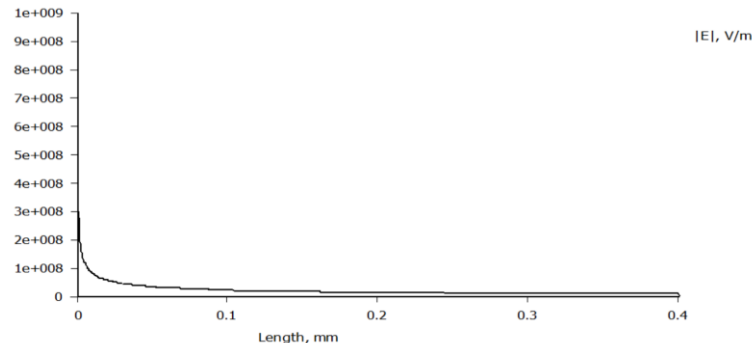


Figura 48 Magnitud de campo eléctrico interior de vacuola insertada

Según lo visto en Figura 47, se puede apreciar que superficie de vacuola tiene una alta presencia de campo eléctrico (por la gran inhomogeneidad de campo eléctrico debido a configuración punta-placa), debido a esto se tiene la hipótesis de que debido a la baja rigidez dieléctrica esperada en la frontera entre aire y resina pueden existir arboles eléctricos superficiales que ayudan a erosionar vacuola y con esto permiten el crecimiento eventualmente de arborización desde la imperfección. Esta idea se apoya en la alta erosión que presentan probetas con vacuola insertada y el crecimiento de árboles desde zonas con mayor cantidad de este fenómeno, como se aprecia en Figura 25. Siendo crecimiento de árbol eléctrico propiciado por alta presencia de campo eléctrico y con esto alta erosión de vacuola.

5.2. Probetas con vacuola cercana a punta

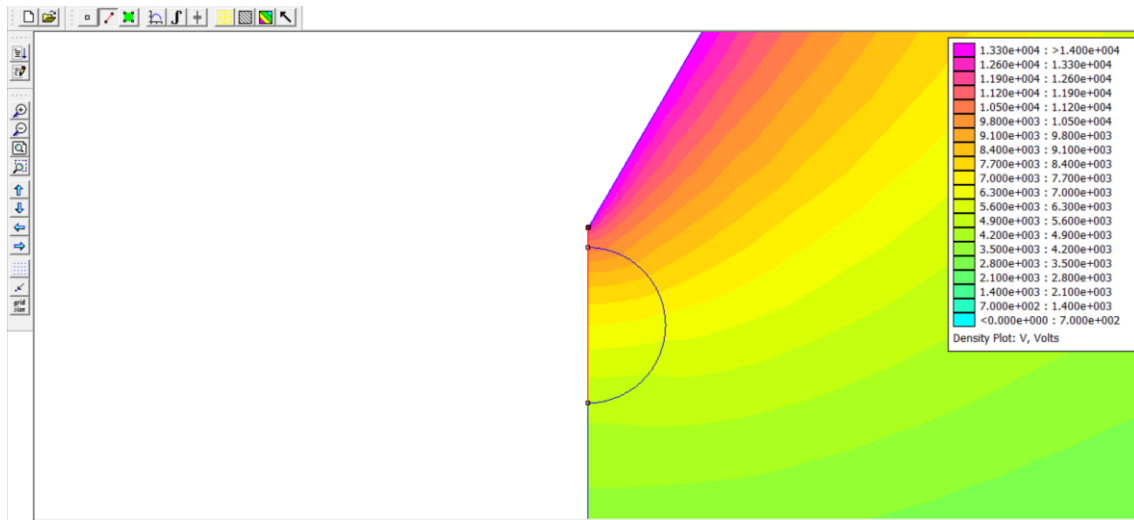


Figura 49 Distribución de potencial vacuola cercana

En Figura 49 se muestra distribución de potencial para caso de vacuola cercana, donde se parecía que vacuola no esta expuesta a alta tensión de manera directa a diferencia de Figura 47, pero igualmente presenta notoria amplificación de campo en su interior.

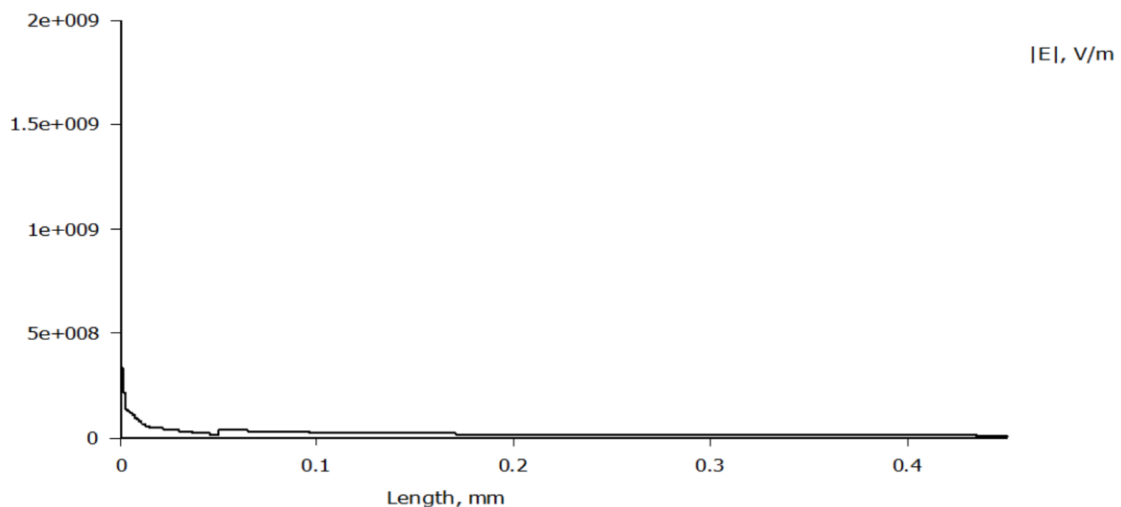


Figura 50 Magnitud de campo eléctrico entre aguja y dentro de vacuola cercana

En Figura 50 se muestra distribución de campo eléctrico, se puede apreciar efecto de vacuola en discontinuidad de grafico en 0,05mm, donde empieza vacuola, se aprecia que la vacuola está expuesta a una magnitud mucho menor de magnitud de campo eléctrico que en Figura 48. Siguiendo con hipótesis mostrada en sección anterior, se propone que este tipo de probeta no logra provocar crecimiento de árbol eléctrico desde vacuola debido a bajo nivel de campo eléctrico en vacuola. Aunque se cree un canal desde aguja a vacuola y árbol eléctrico tienda su crecimiento hacia vacuola (ya que no se aprecian ramas que rodeen vacuola), no se alcanza a erosionar vacuola para provocar un crecimiento con mecanismo explicado anteriormente, solo lográndose en probetas con la vacuola muy

cercana a punta, como son MV167 Y MV168 las cuales logran una mucho mayor magnitud de campo eléctrico en superficie de vacuola. Se podría pensar que exposiciones más largas a alta tensión podrían provocar crecimientos desde vacuola, lo cual puede requerir más investigación en este tipo de probeta.

5.3. Probetas con vacuola a distancia media de punta

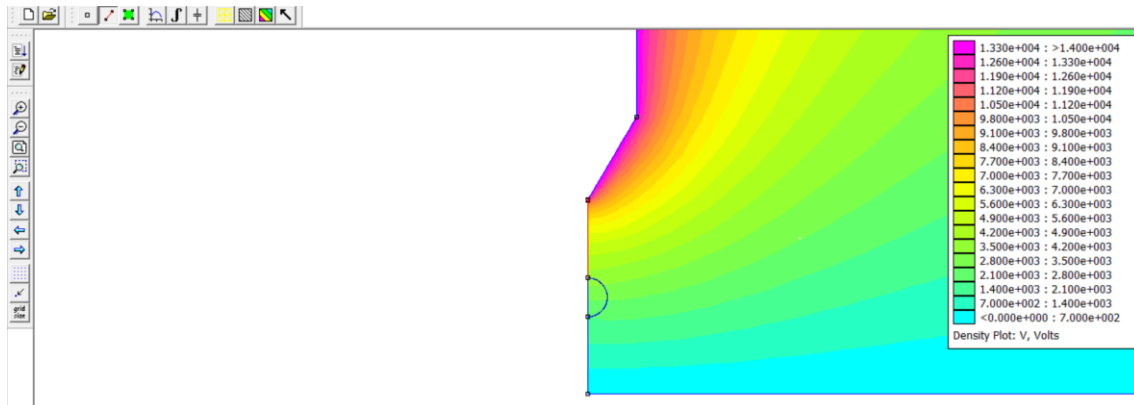


Figura 51 Distribución de potencial vacuola distancia media

En Figura 51, se muestra distribución de potencial centrado en vacuola y aguja, no se muestra mayor distorsión causada por imperfección, lo cual se puede apreciar en grafico de magnitud de campo eléctrico entre punta de aguja y vacuola (line roja en Figura 51).

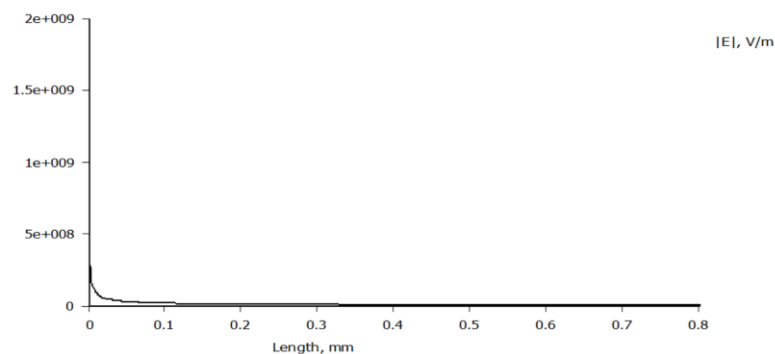


Figura 52 Magnitud de campo eléctrico entre punta y vacuola distancia media

La pequeña perturbación de la vacuola puede explicar crecimiento normal de árbol eléctrico (según otros trabajos en LAT) desde punta de aguja e interacción solo cuando árbol durante su crecimiento se acerca a la imperfección, pudiendo ramas interactuar con vacuola durante su recorrido o también no ocurrir, como se mostró en sección “4.1 Probetas con vacuola a distancia media”. Como se pudo apreciar en sección mencionada árbol eléctrico presenta en algunos casos atracción por vacuola interactuando con ella pero en otros casos árbol eléctrico puede crecer teniendo baja o nula interacción con defecto, esto posiblemente a la baja perturbación de campo eléctrico debido a vacuola, al ser la vacuola pequeña en comparación a la gran inhomogeneidad del campo eléctrico presente, siendo más aleatoria la presencia de interacción con imperfección.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Durante el desarrollo de esta memoria se analizó el crecimiento de árboles eléctricos en presencia de una vacuola de aire, esta presentando distintos volúmenes de vacuolas y distancias entre la vacuola y la punta del electrodo agudo. Se presentaron metodologías experimentales, usadas en primeras etapas del desarrollo para ensayar probetas y cuyos resultados (imágenes, datos de DP y formas de onda) fueron almacenados para posible uso en trabajos posteriores, lo cual es un aporte a la base de datos experimentales para el desarrollo de la investigación de árboles eléctricos y futuros trabajos en LAT de UTFSM.

Se presentaron múltiples técnicas de análisis, con un breve resumen de la teoría detrás de estas para ser usadas en caracterización de probetas de base de datos obtenida. El uso de estas técnicas resultó en gráficos y diagramas a ser analizados, basados en la creación de intervalos de interés con imágenes obtenidas de cámara, acompañados de diagramas PRPD, PSA y gráficos de cambio en parámetros de forma de onda.

Al comparar resultados y caracterizar el crecimiento de cada probeta se pudieron agrupar estas, llegando a tendencias comunes observadas. La mayoría de las probetas con vacuola insertada a la punta (tipo 1) exhiben un comportamiento similar, mostrando un engrosamiento del canal de contacto del electrodo a la vacuola seguido de una erosión de la misma, visible en varias probetas tras 2 o 3 días. Posteriormente, se observa un rápido crecimiento, que oscila entre 1 y 5 horas, derivando en la falla de la probeta. En el caso de PRPD, la primera fase de erosión de la vacuola antes del crecimiento del árbol muestra formas y magnitudes de descargas parciales (DP) similares, seguidas por fases alternas de bajo y alto número y magnitud de DP durante el crecimiento del árbol. Para PSA, la fase inicial de erosión muestra clusters definidos, mientras que durante el crecimiento del árbol estos clusters se presentan con más ruido. Los parámetros como T_w , F_w , ΣF , PRH y PRL muestran sensibilidad al inicio del crecimiento del árbol desde la vacuola.

Para probetas con vacuola cercana (tipo 2), se tiene que las que tienen la vacuola mas cercana al electrodo se comportan de manera similar a tipo 1, pero las que presentan una distancia mayor a 0,02 mm no han podido ser iniciadas incluso con tensión aplicada de manera constante durante hasta 7 días, solo presentando erosión de vacuola y engrosamiento del canal formado hacia vacuola.

Para probetas con distancia media a punta (tipo 3) se muestran 2 tipos de tendencias claramente distintos. Por un lado para 5 de las 7 probetas muestran un comportamiento típico consistente, primero una fase inicial de baja magnitud de descargas y canales delgados, con características de PSA similares a las probetas filamentosas. Sin embargo, al interactuar con la vacuola, los canales se engrosan y tanto la magnitud de las descargas parciales como el ruido aumentan, junto con cambios en la forma de las PRPD. Posteriormente, experimentan un crecimiento acelerado hacia el contraelectrodo, con un aumento gradual en la magnitud de las descargas parciales y resultando en una ruptura inmediata al hacer contacto con el contraelectrodo. Este comportamiento conduce a un tiempo promedio de ruptura de 94 minutos. En relación con el análisis de PSA, la versión que no considera las derivadas de tiempo revela un cambio en el patrón de clusters al interactuar con la vacuola, pasando de 7 a 4 clusters, lo que se mantiene hasta el final del

crecimiento, siendo este gráfico sensible a la presencia de la vacuola. Además, se identificaron varios parámetros de formas de onda sensibles al crecimiento del árbol eléctrico (F_w , σF , PRH, ST, KT, T_w , σT , PRL), así como a la interacción con la vacuola.

Probetas restantes de tipo 3 exhiben un comportamiento similar entre ellas, con estructuras filamentosas y sin un aumento notable en la magnitud de las descargas parciales hasta alcanzar el contraelectrodo. Esto sugiere una falta de interacción con la vacuola. Sus tiempos de ruptura promedio son más largos (118.5 minutos en promedio) y muestran un crecimiento constante. En el análisis de PRPD, se observan descargas de ambas polaridades y de baja magnitud. En el PSA, solo hay un cambio al entrar en contacto con el contraelectrodo. Los parámetros de la forma de onda muestran menor sensibilidad al tipo de comportamiento, pero son sensibles a la llegada a la vacuola y al contraelectrodo.

Se puede notar que ambos comportamientos tan distintos observados en probetas de tipo 3, se pueden explicar por la interacción con la vacuola en un caso y la ausencia de interacción en el otro, comprobándose visualmente y a través de gráficos realizados en el momento de que ramas tocan vacuola.

Se puede notar que cercanía de vacuola afecta en gran medida crecimiento de árbol eléctrico, teniendo probetas de tipo 1 y de tipo 3 comportamientos muy distintos. Siendo las primeras de iniciación sumamente larga y crecimiento que inicia desde vacuola, mientras que segundo tipo inicia desde punta y presenta un crecimiento paulatino en el tiempo, presentando también distintos patrones PRPD y PSA.

Finalmente, con simulaciones estáticas de campo eléctrico se lograron desarrollar hipótesis y analizar resultados desde otra perspectiva, pudiendo utilizar conocimientos teóricos adquiridos durante la formación académica y teniendo un respaldo teórico para el análisis. Para probetas con vacuola a distancia media (tipo 3), no presenta importantes perturbaciones en el campo eléctrico debido a vacuola, explicando iniciación normal y que no haya una certeza de interactuar con vacuola, debido a que su efecto no es lo suficientemente grande para asegurar esto siendo por el contrario algo un tanto incierto si durante el crecimiento existirá esta interacción o no. Por otro lado, para probetas insertadas (tipo 1) se mostró que estas son sometidas a altos campos eléctricos en interfaz de vacuola, lo que puede explicar la erosión sufrida por la vacuola y el crecimiento de árboles eléctricos desde esta, mientras que para probetas con vacuola cercana (tipo 2) se explica el que no haya crecimiento de árbol eléctrico, ya que campo baja drásticamente por la inhomogeneidad de la configuración.

Todo lo presentado en esta memoria servirá como base para aportar al estudio de árboles eléctricos en presencia de imperfecciones, de lo cual se encontró como un área con bastante poco desarrollo como se menciona en capítulos iniciales. Se espera también que se continúen las investigaciones en esta misma área en entorno académico de UTFSM, pudiendo analizar otras variables o tipos de imperfecciones, también desarrollando y probando métodos de diagnóstico en áreas comerciales para llevar esta investigación a una aplicación práctica en la industria.

7. Referencias

- [1] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, vol. 9. Iet, 1992.
- [2] R. M. Eichhorn, “Treeing in solid extruded electrical insulation,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, no. 1, pp. 2–18, 1977.
- [3] D. Pitsa and M. G. Danikas, “Electrical degradation due to treeing in nanocomposite dielectric materials with impurities,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2012. doi: 10.1109/ICPADM.2012.6318970.
- [4] M. G. Danikas, I. Karafyllidis, A. Thanailakis, and A. M. Bruning, “Simulation of electrical tree growth in solid dielectrics containing voids of arbitrary shape,” *Model Simul Mat Sci Eng*, vol. 4, no. 6, p. 535, 1996.
- [5] H. Zheng, F. Liu, S. Rowland, S. Chen, and Z. Lv, “The impact of air gaps between needle and polymer on electrical treeing in needle-plane samples,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 3, pp. 739–747, Jun. 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008538.
- [6] S. Bahadoorsingh, R. Giussani, and S. M. Rowland, “The influence of interfaces and channels on electrical tree growth in epoxy resin,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2010. doi: 10.1109/CEIDP.2010.5724010.
- [7] M. Y. Wang, B. X. Du, X. X. Kong, and T. Tanaka, “Effects of ferromagnetism particles on electrical tree growth in epoxy/Fe₃O₄ composites in magnetic field,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 4, pp. 1291–1299, 2021.
- [8] 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 de frecuencia industrial y VLF,” UTFSM, 2017.
- [9] “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements Techniques,” IEC Standards, 2015.
- [10] B. X. Du, T. Han, and J. G. Su, “Effect of low temperature on tree characteristics in silicone rubber with different power frequency,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 4, pp. 1880–1886, 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.004312.
- [11] L. A. Dissado, “Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 4, pp. 483–497, 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1024425.
- [12] S. Haque *et al.*, “Application and Suitability of Polymeric Materials as Insulators in Electrical Equipment,” *Energies (Basel)*, vol. 14, p. 2758, May 2021, doi: 10.3390/en14102758.
- [13] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, “Classification of partial discharges,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 917–931, 1993, doi: 10.1109/14.249365.
- [14] R. Patsch and M. Hoof, “Pulse-sequence-analysis, a way to get a better insight into the physics of discharges,” in *1993 International Conference on Partial Discharge*, 1993, pp. 49–51.

- [15] H. Okubo, N. Hayakawa, and A. Matsushita, "The relationship between partial discharge current pulse waveforms and physical mechanisms," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 38–45, 2002, doi: 10.1109/MEI.2002.1014966.
- [16] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin, and F. Pulletti, "A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 23–30, 2003, doi: 10.1109/MEI.2003.1192033.
- [17] J. A. Ardila-Rey, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, and M. V Rojas-Moreno, "Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 4, pp. 1436–1443, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6571466.
- [18] C. Gavilán Moreno, "El uso de la transformada de Hilbert para el diagnostico de vibraciones. Análisis de transitorios.," *Dyna (Bilbao)*, Jan. 2007.
- [19] 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, doi: 10.1109/TDEI.2015.005037.
- [20] M.-X. Zhu *et al.*, "Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 482–493, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005481.
- [21] R. Schurch, O. Munoz, and J. Ardila-Rey, "Electrical tree growth under harmonic frequencies characterized by partial discharges waveforms," in *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2020, pp. 168–171. doi: 10.1109/CEIDP49254.2020.9437511.
- [22] S.-C. Su and T.-H. Chang, "Manipulating the permittivities and permeabilities of epoxy/silver nanocomposites over a wide bandwidth," *Appl Phys Lett*, vol. 116, no. 20, p. 202904, May 2020, doi: 10.1063/5.0006835.

8. Anexos

8.1. MV183

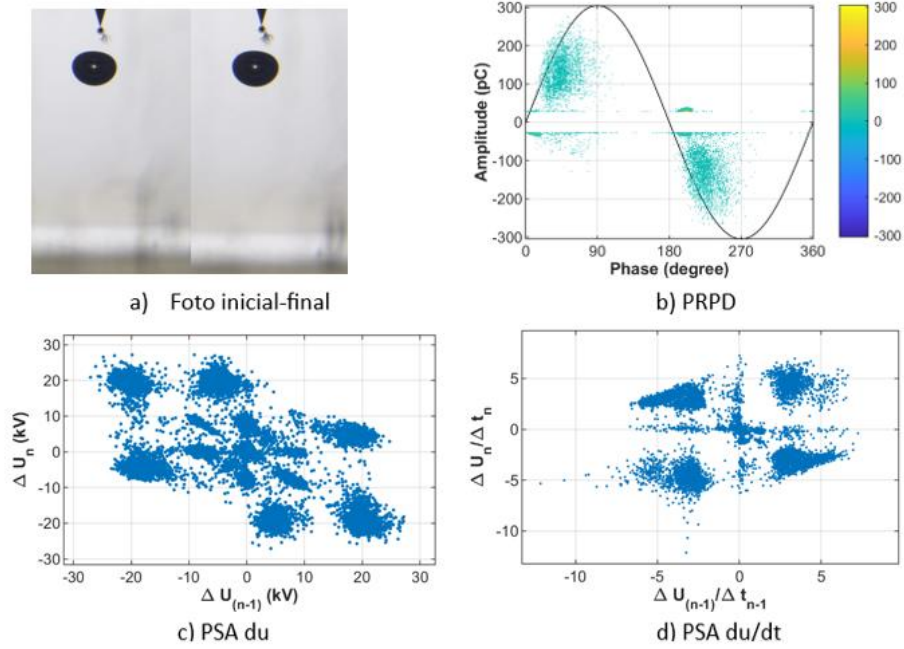


Figura 53 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 20 a 30 min

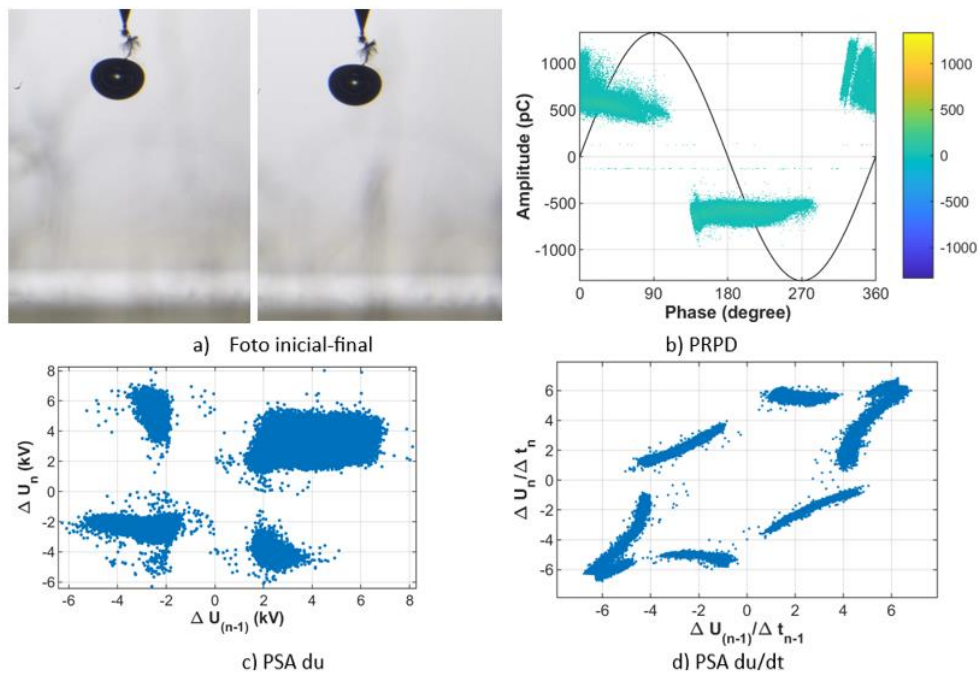


Figura 54 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 50 a 59 min

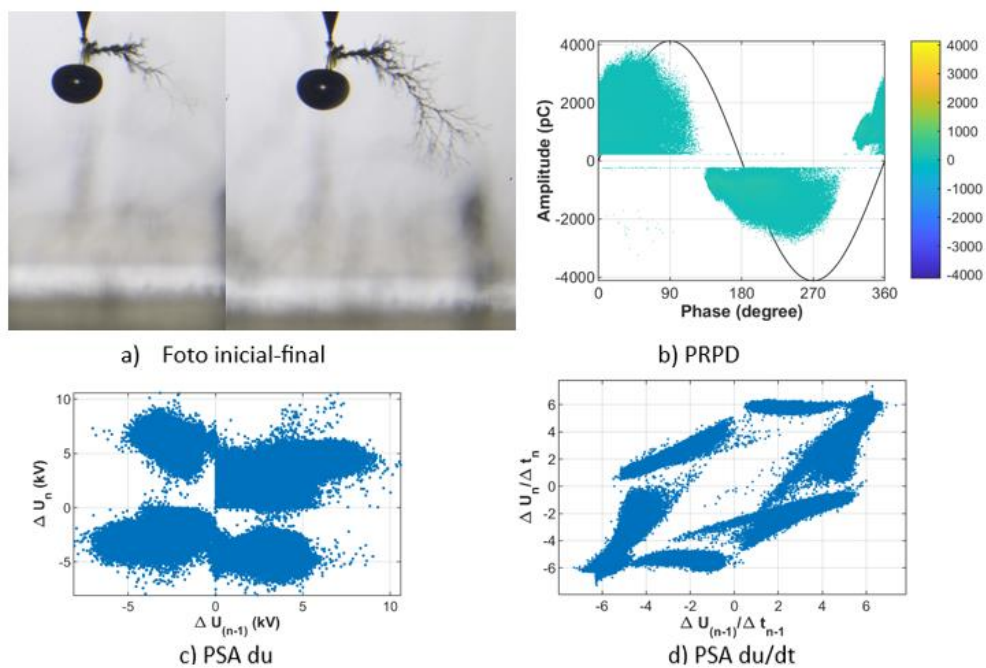


Figura 55 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 98 a 114 min

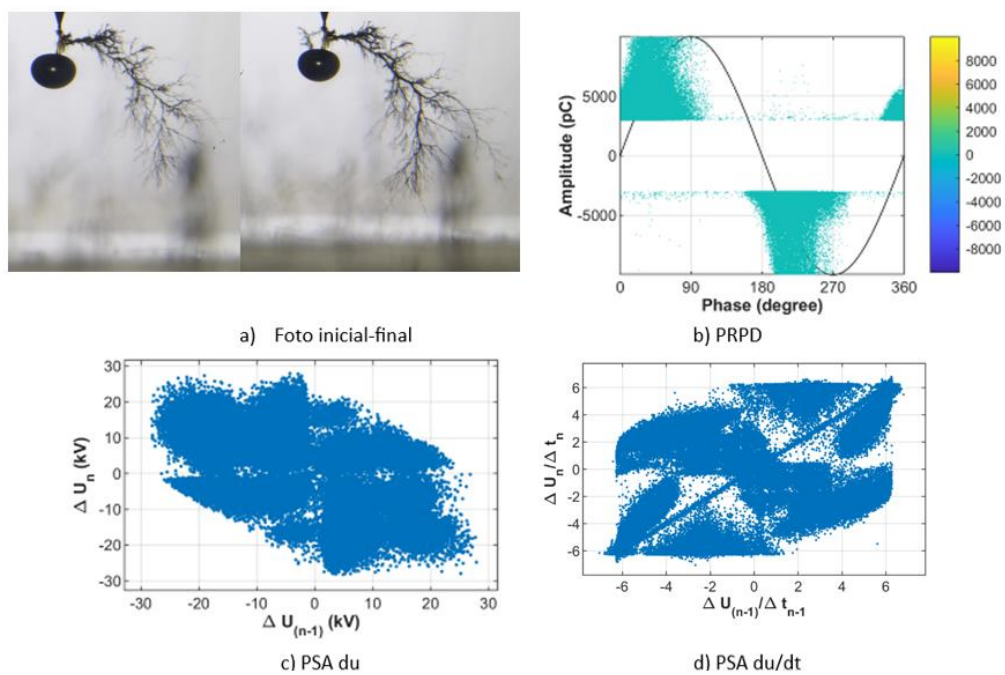


Figura 56 MV183 técnicas tradicionales periodo de tiempo 131 a 148 min

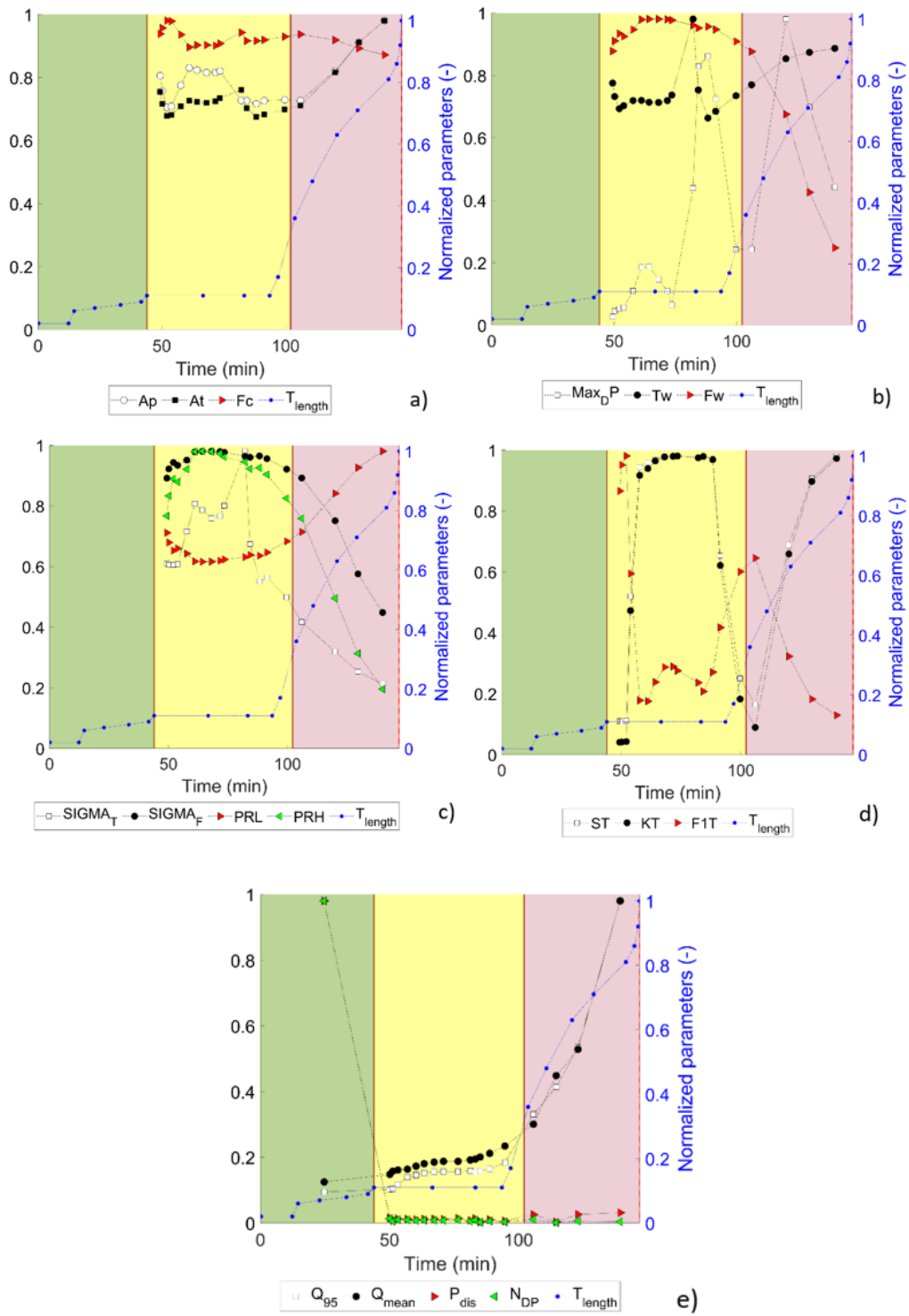


Figura 57 MV183 Parámetros de forma de onda

8.2. MV184

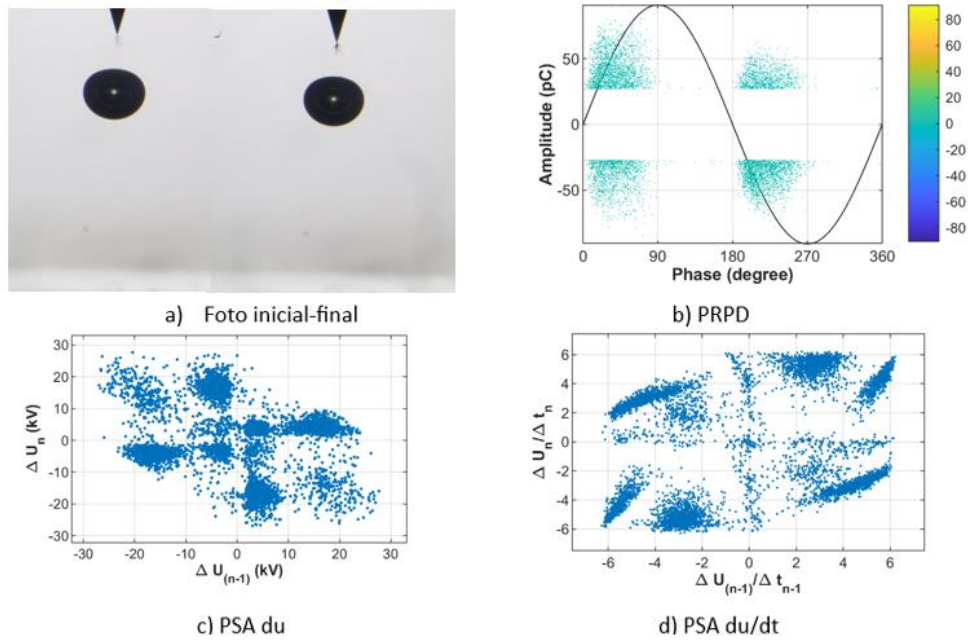


Figura 58 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 2 min

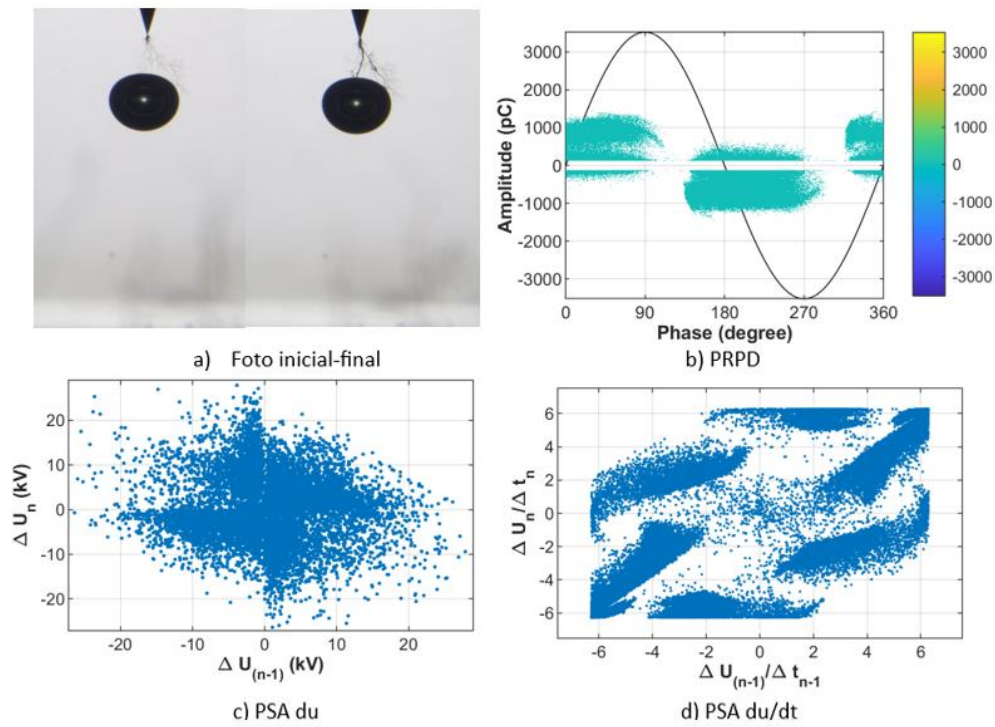


Figura 59 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 10 a 14 min

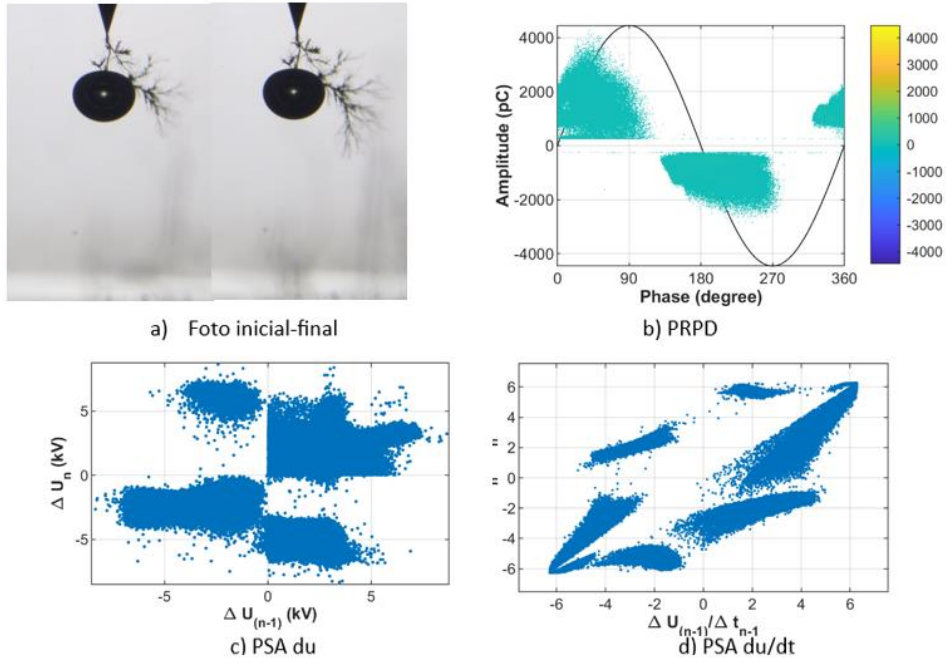


Figura 60 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 27 a 33 min

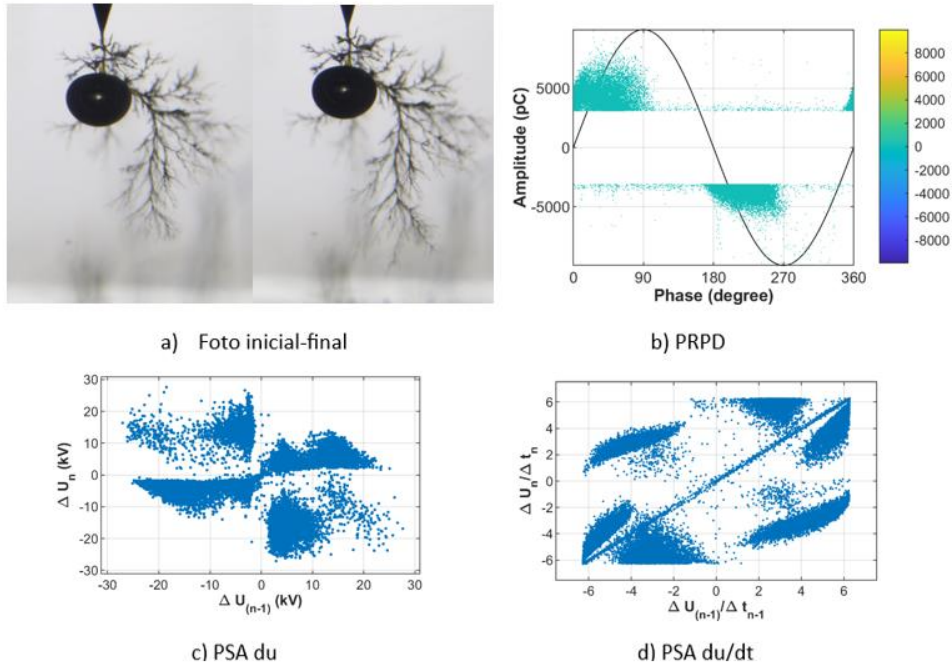


Figura 61 MV184 técnicas tradicionales periodo de tiempo 50 a 53 min

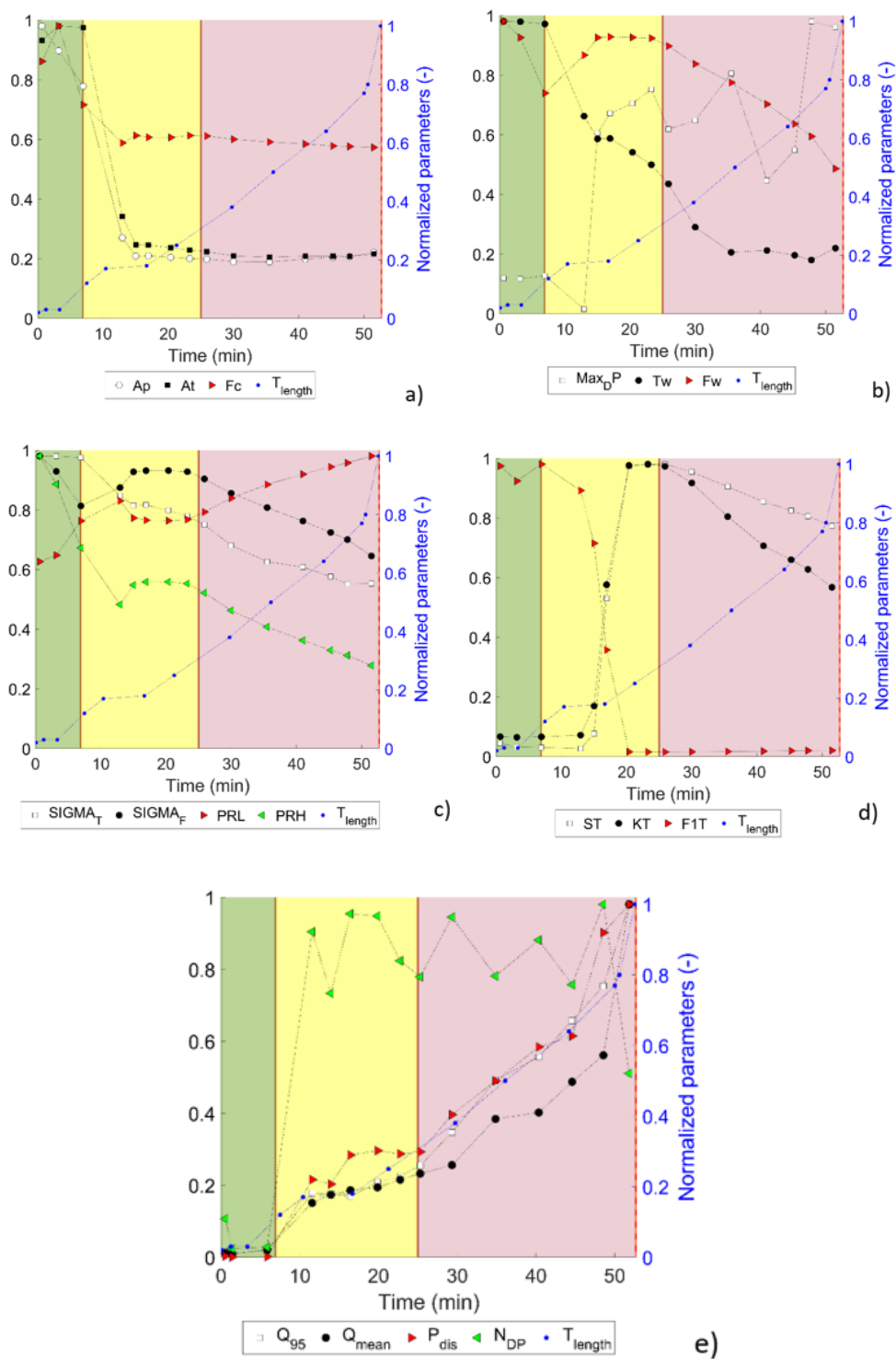


Figura 62 MV184 Parámetros de forma de onda

8.3. MV185

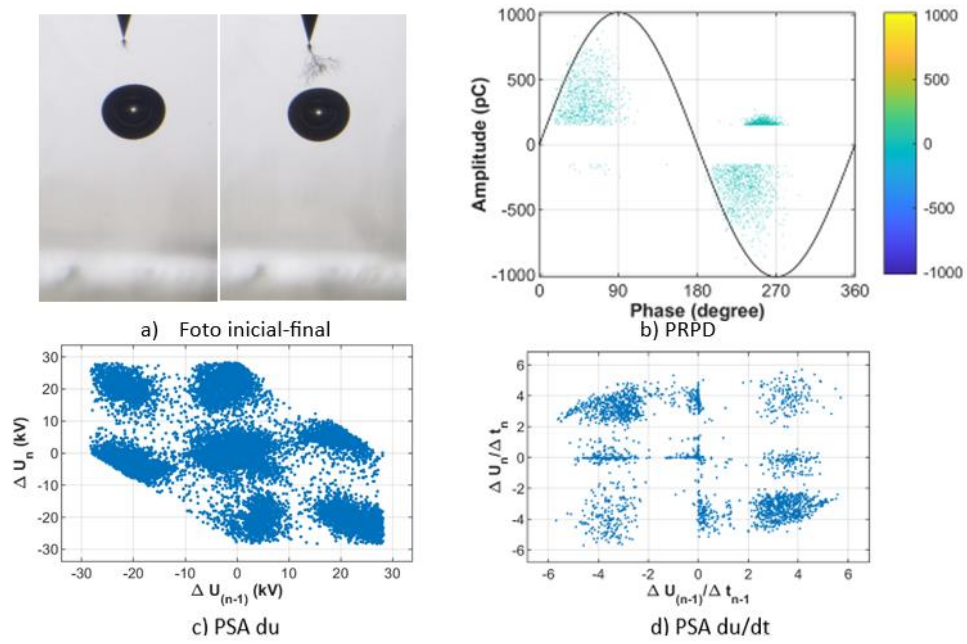


Figura 63 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 04 a 21 min

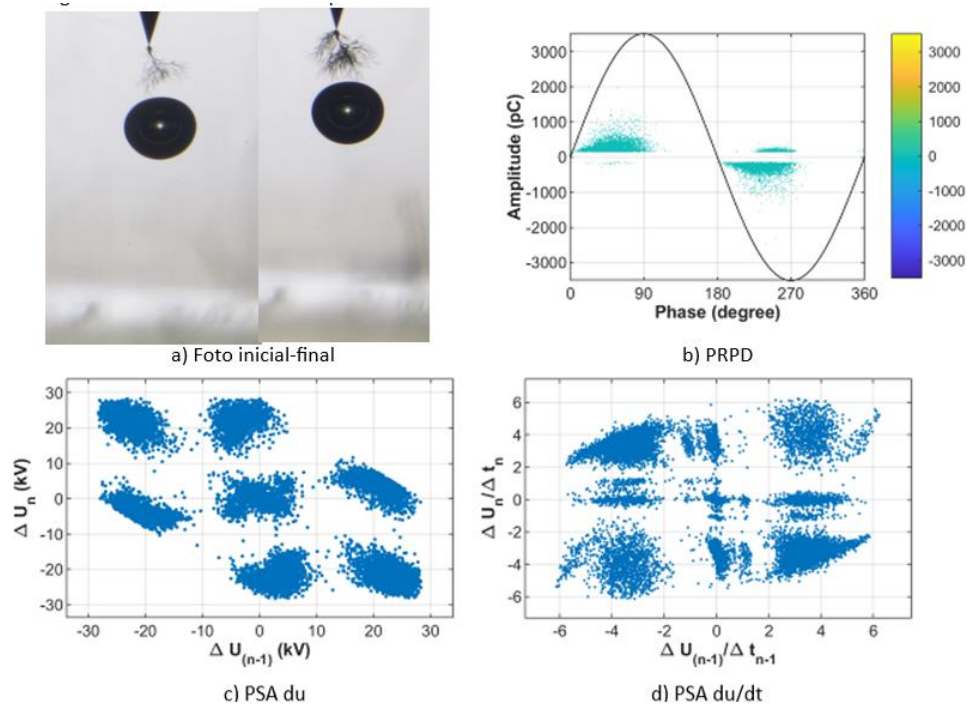


Figura 64 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 21 a 59 min

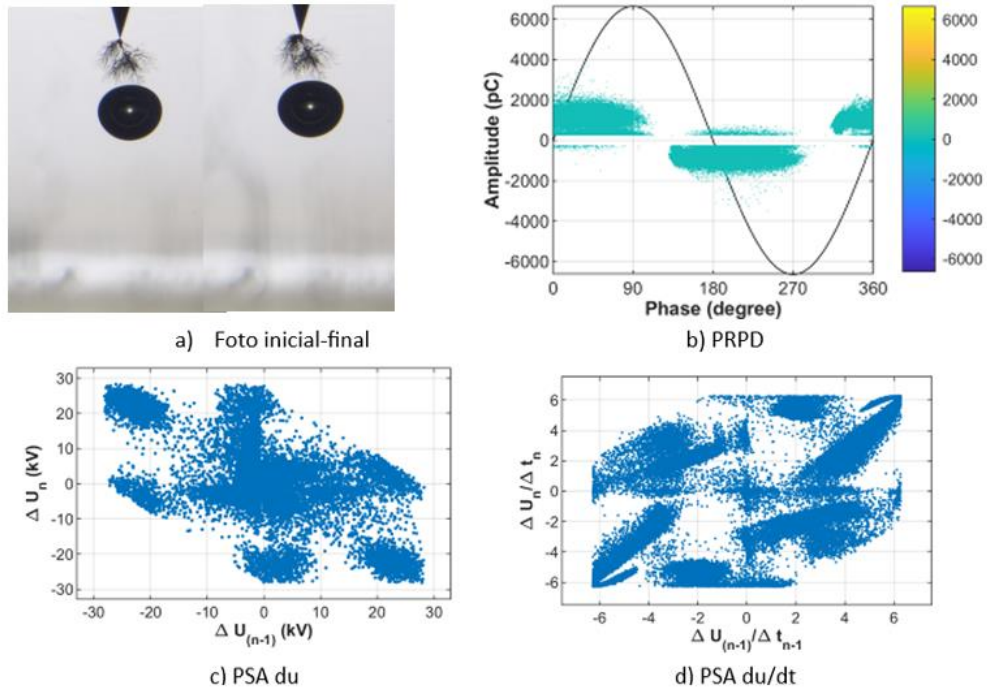


Figura 65 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 60 a 85 min

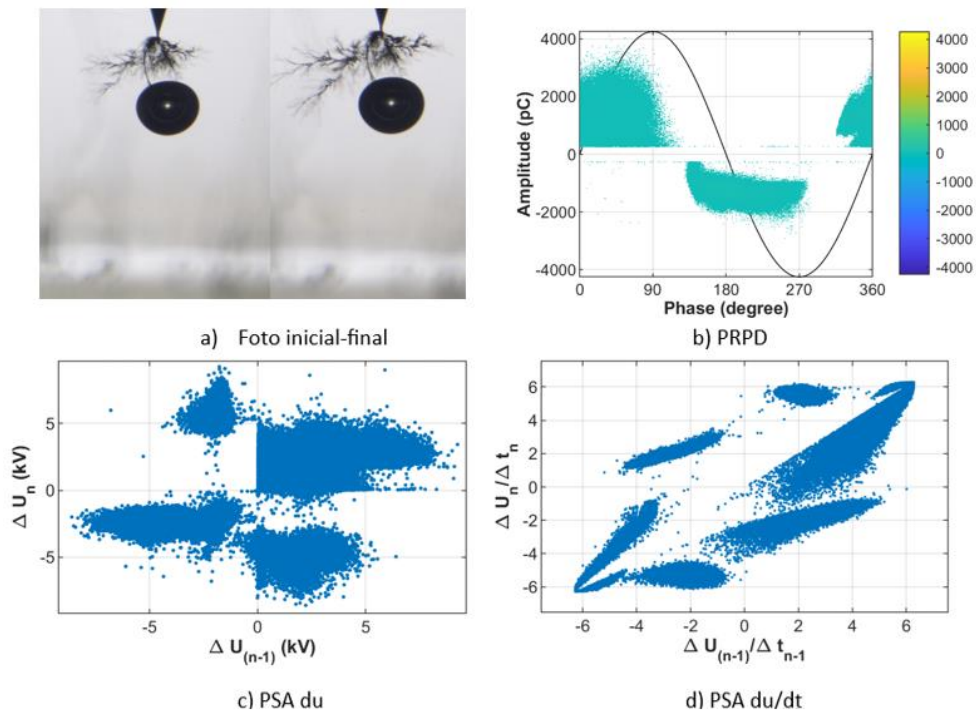


Figura 66 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 90 a 96 min

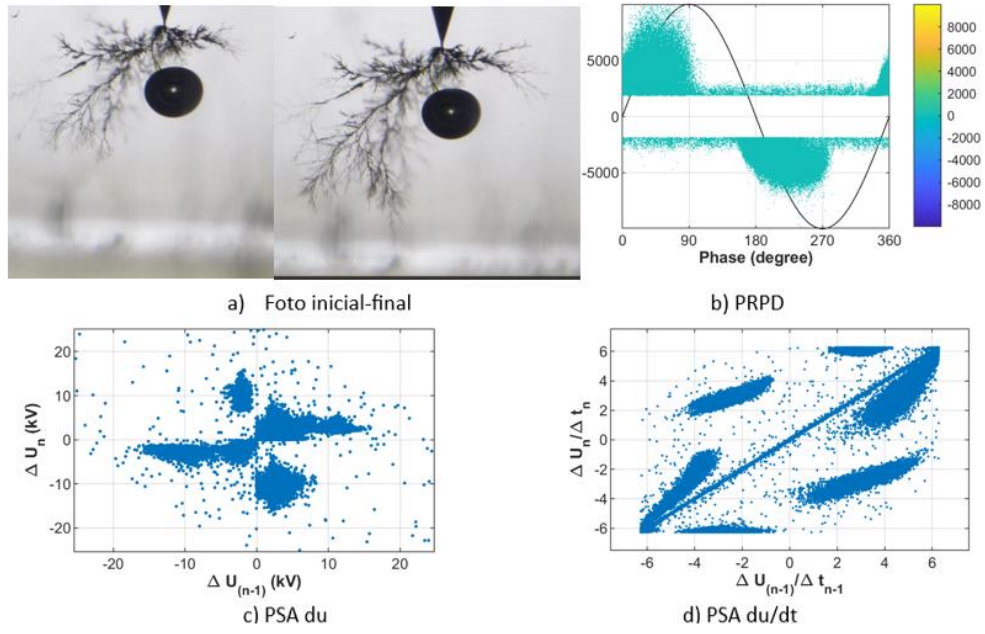


Figura 67 MV185 técnicas tradicionales periodo de tiempo 113 a 118 min

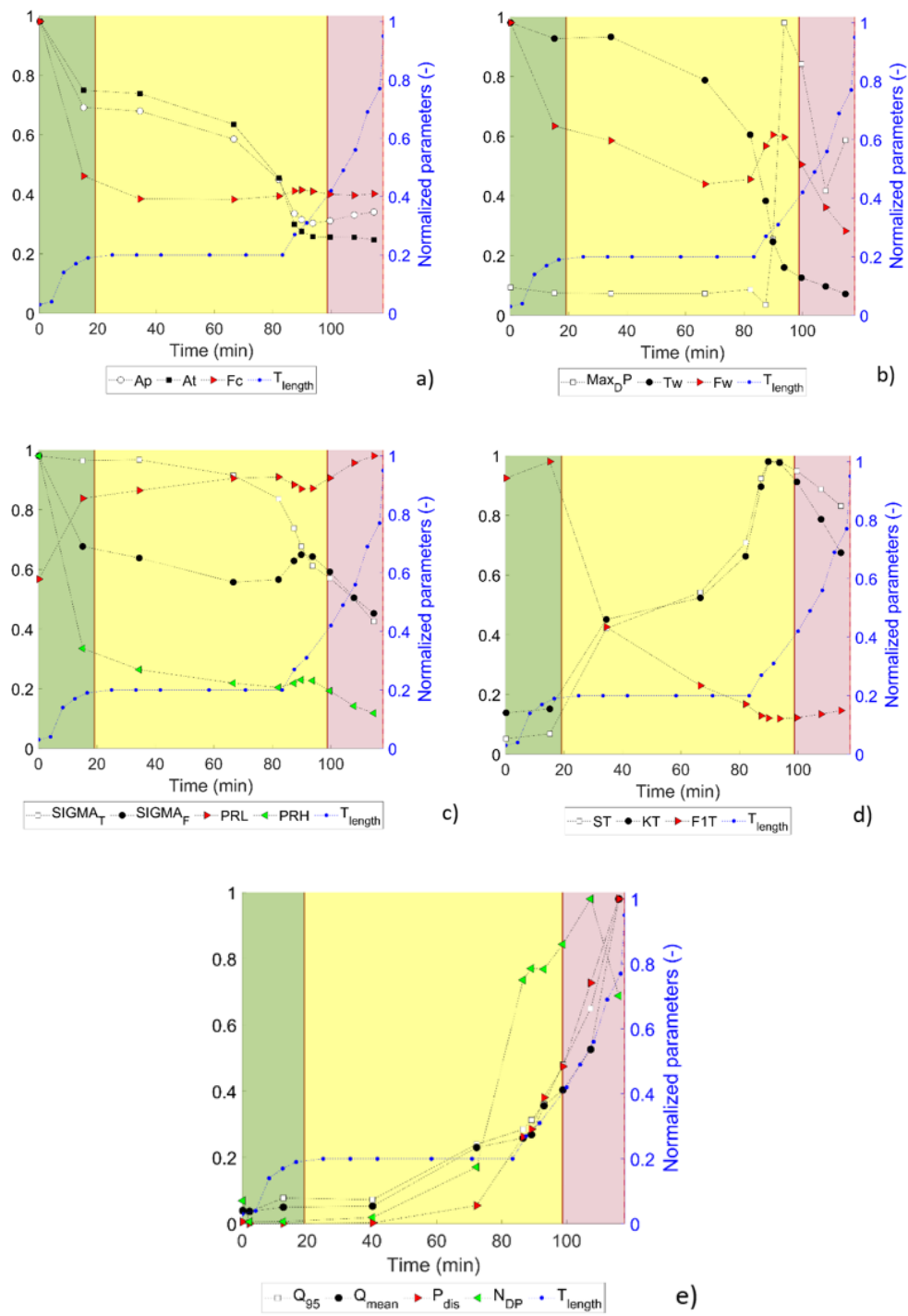


Figura 68 MV185 Parámetros de forma de onda

8.4. MV187

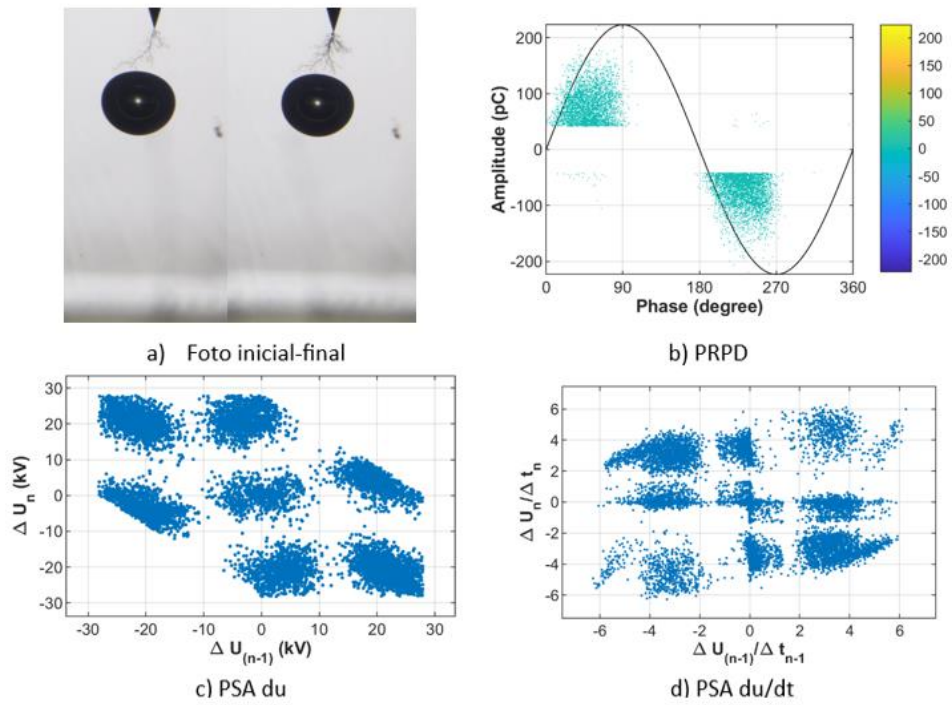


Figura 69 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 02 a 09 min

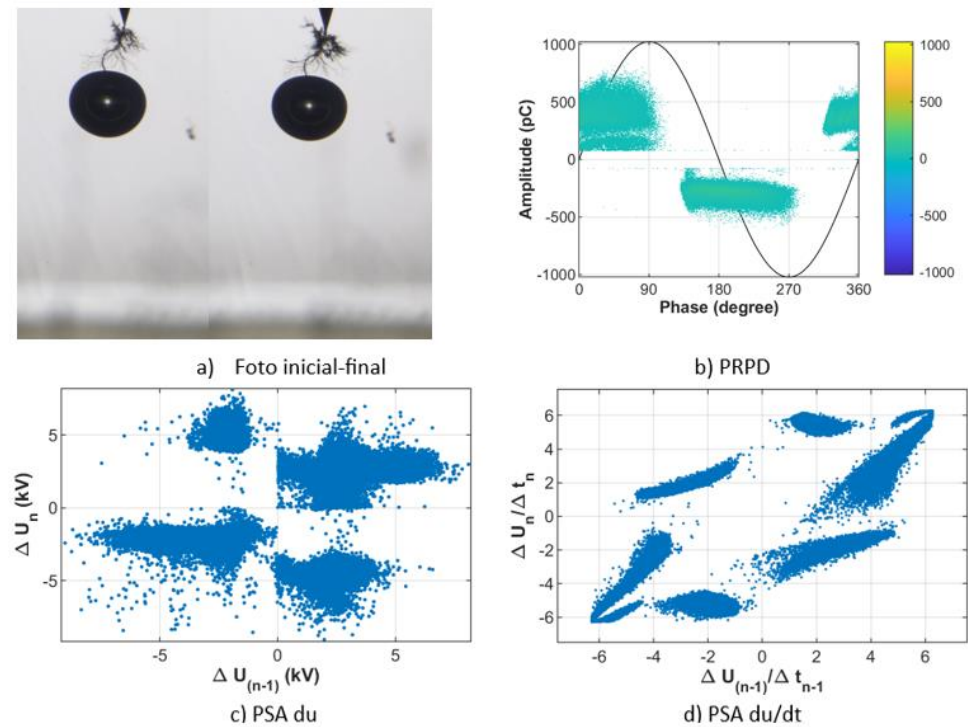


Figura 70 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 23 a 29 min

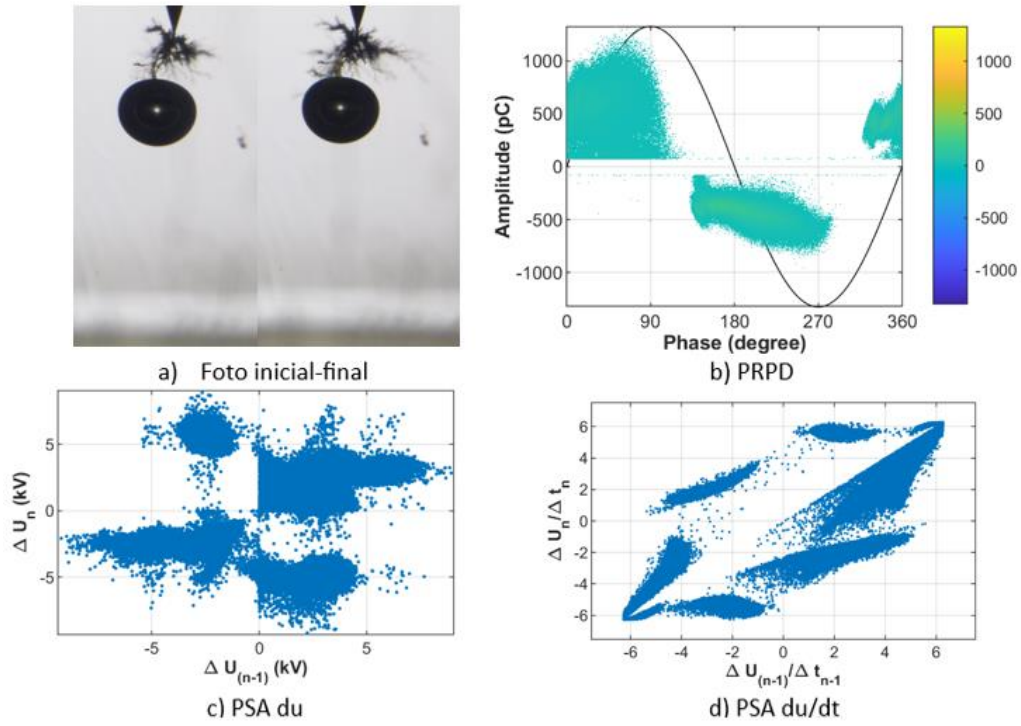


Figura 71 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 40 a 50 min

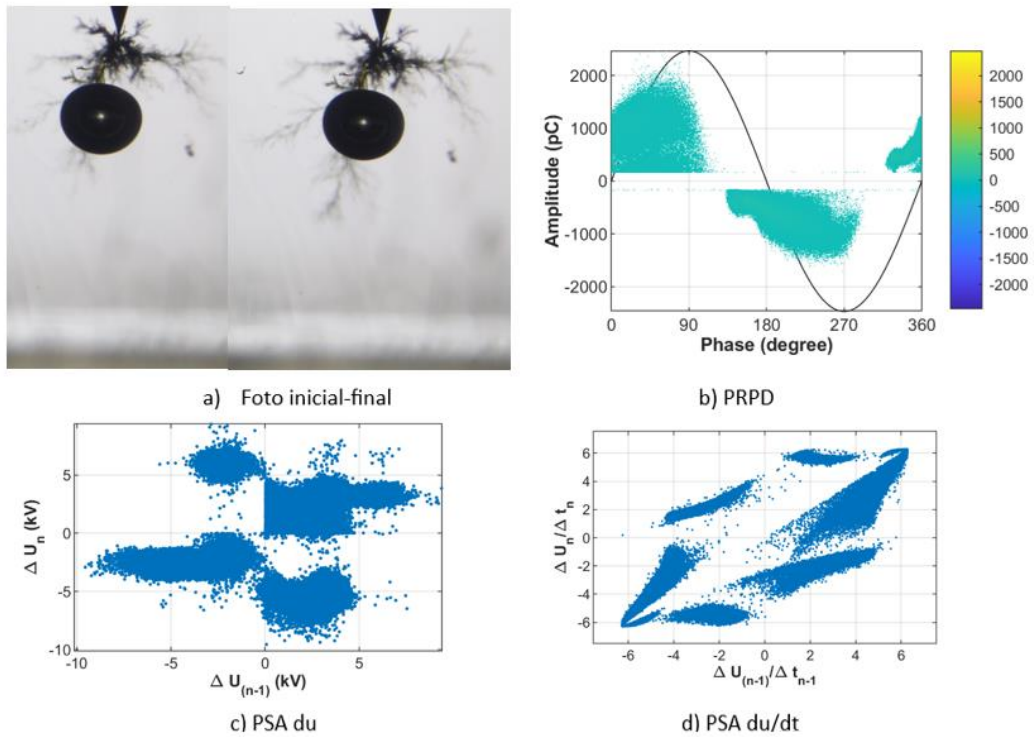


Figura 72 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 62 a 67 min

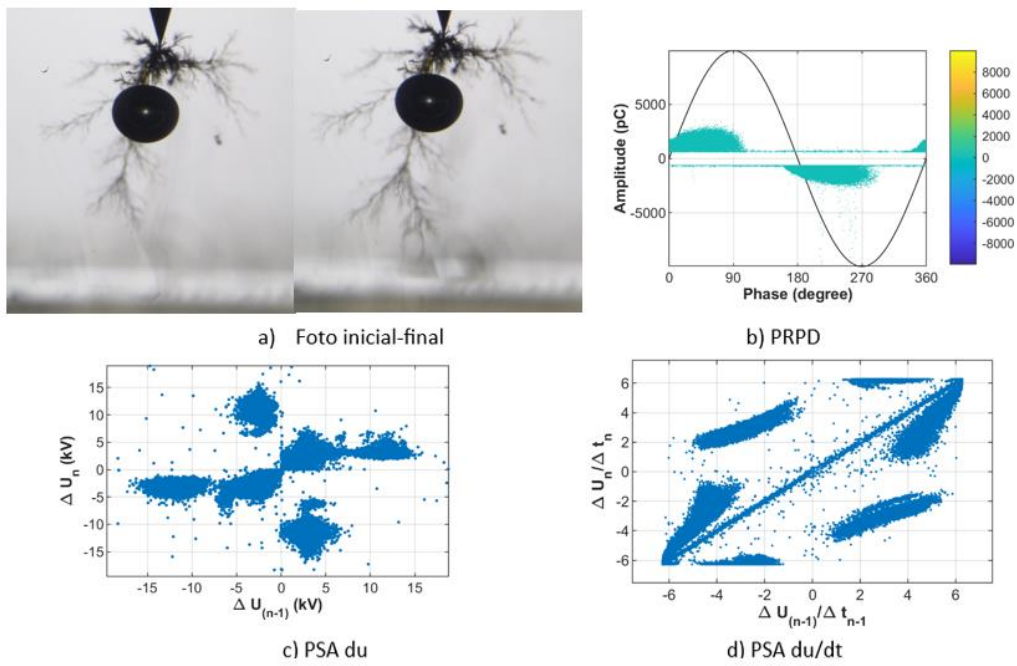


Figura 73 MV187 técnicas tradicionales periodo de tiempo 73 a 78 min

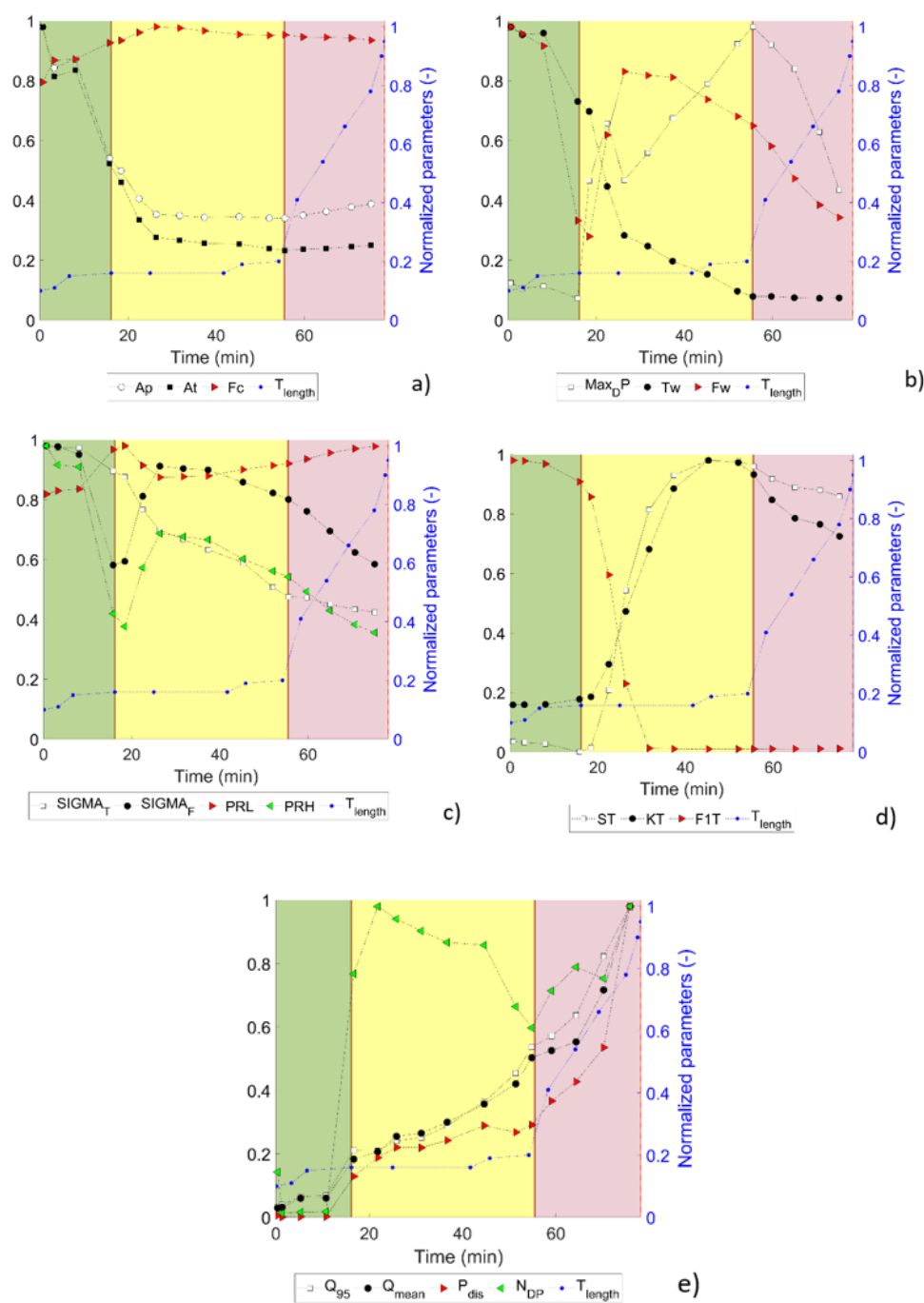


Figura 74 MV187 Parámetros de forma de onda

8.5. MV189

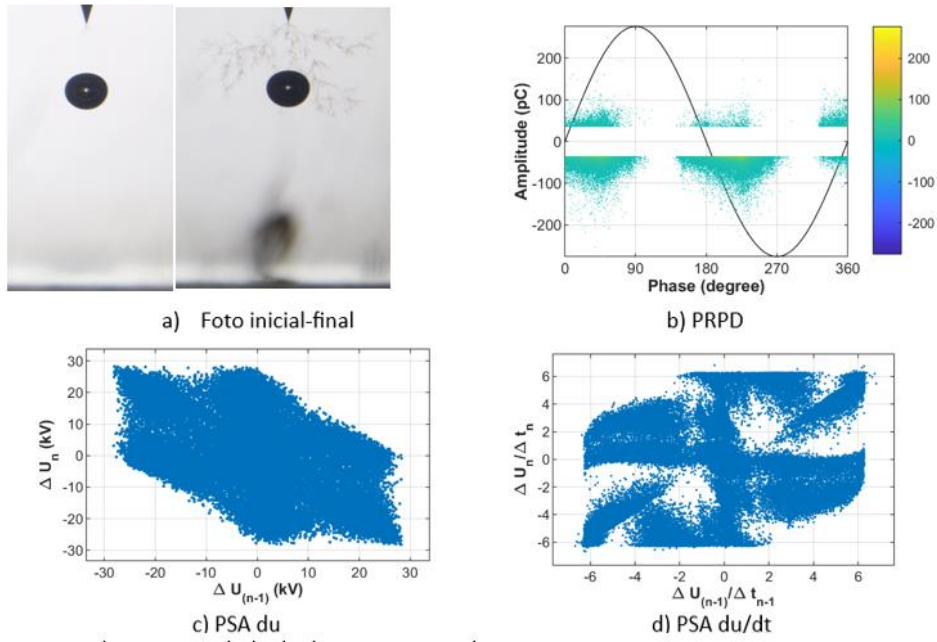


Figura 75 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 21 min

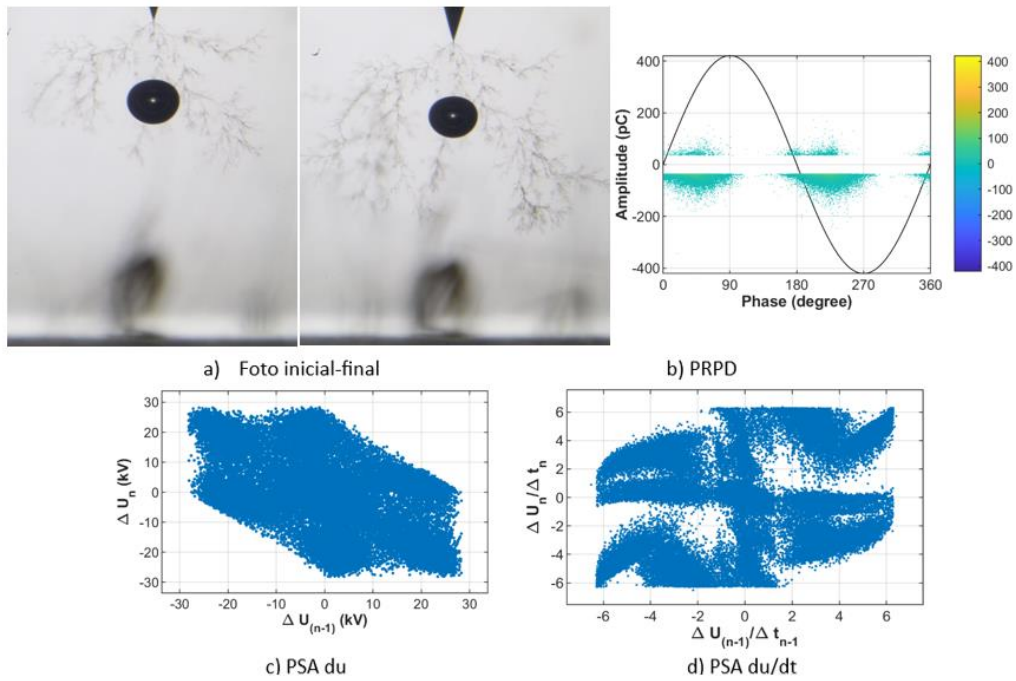


Figura 76 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 27 a 41 min

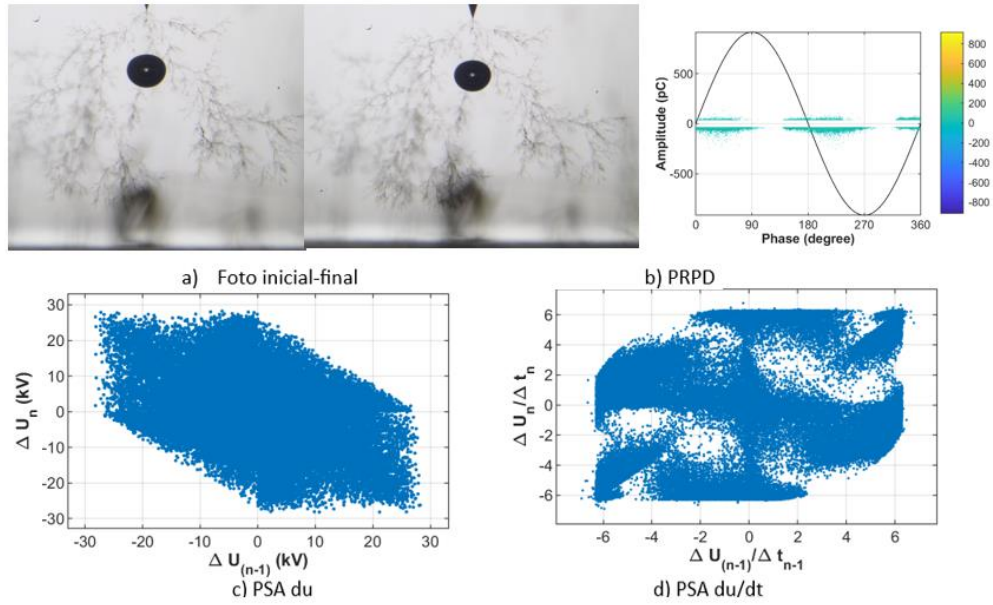


Figura 77 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 58 a 66 min

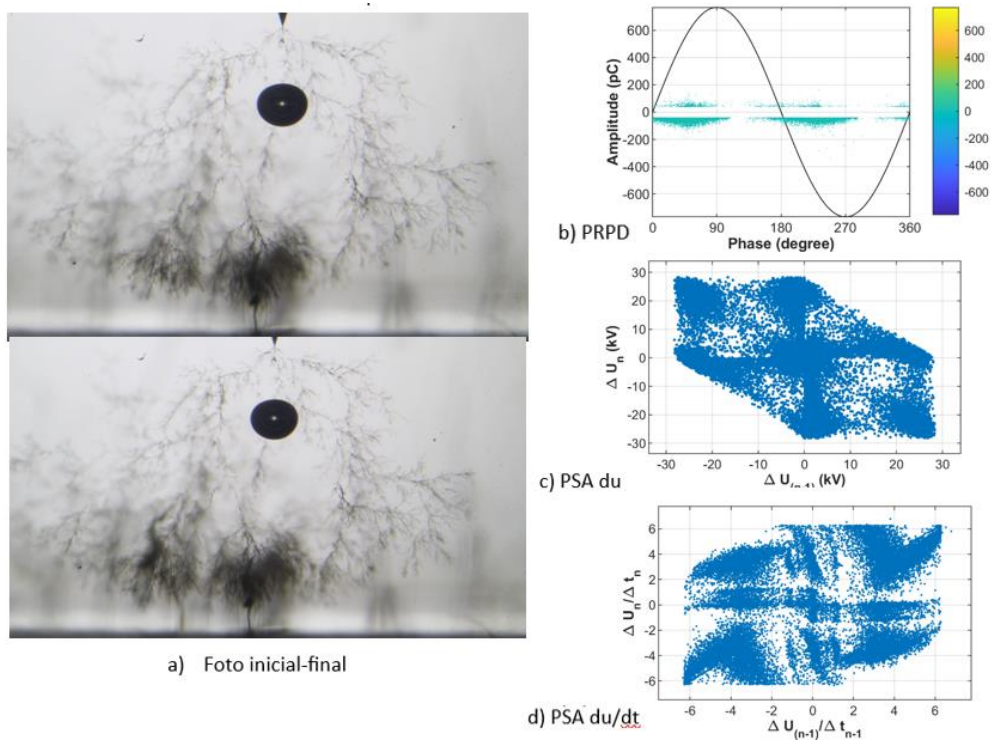


Figura 78 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 90 a 94 min

-Quinto tramo: Periodo de tiempo 114 a 118 min:

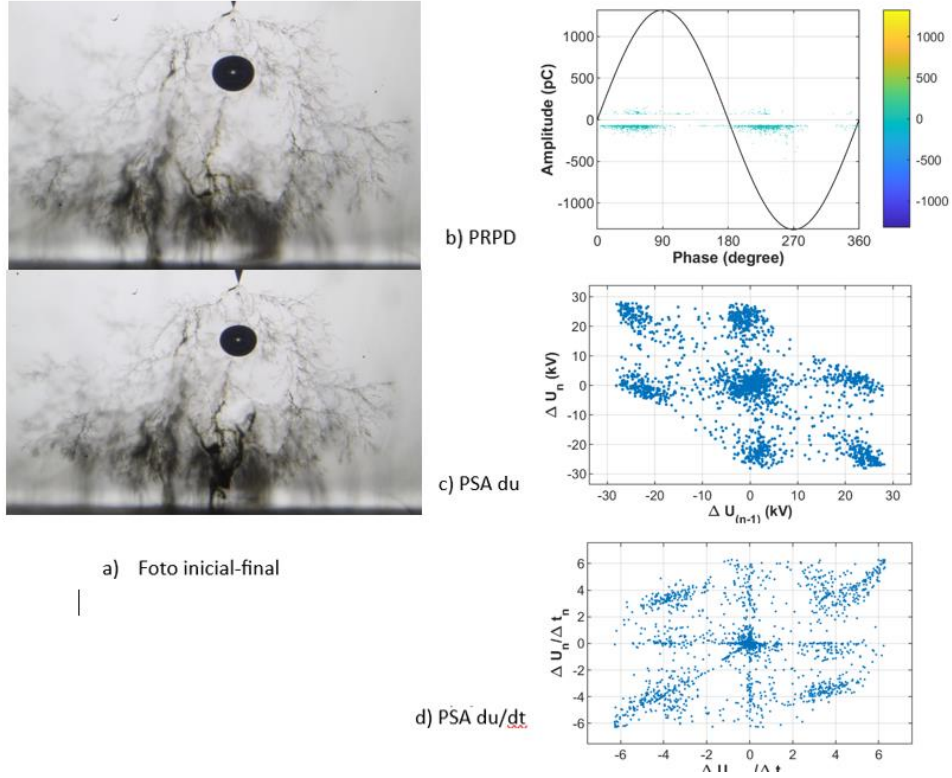


Figura 79 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 114 a 118 min

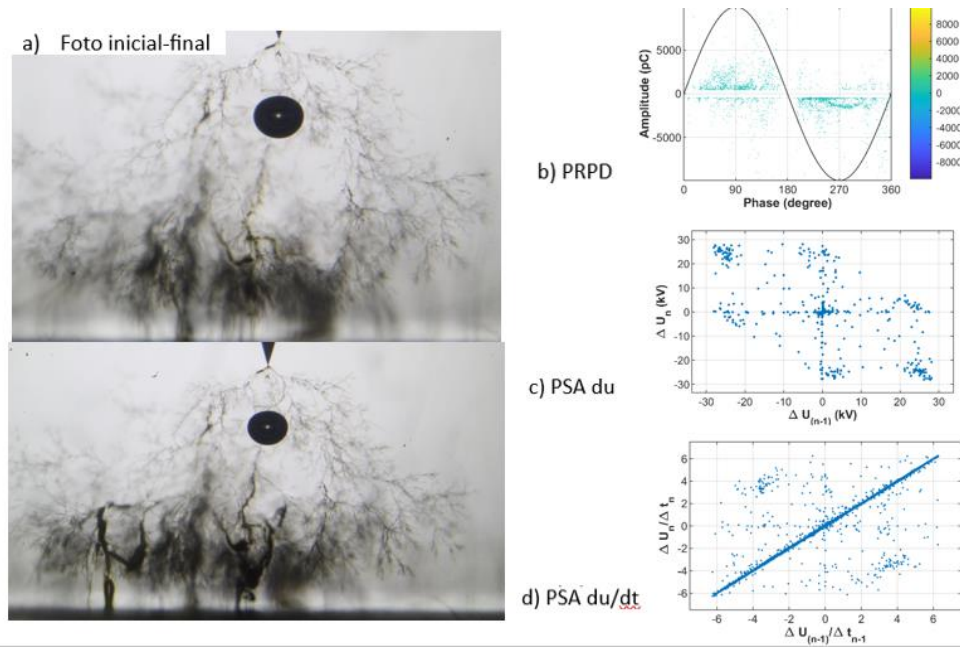


Figura 80 MV189 técnicas tradicionales periodo de tiempo 118 a 149 min

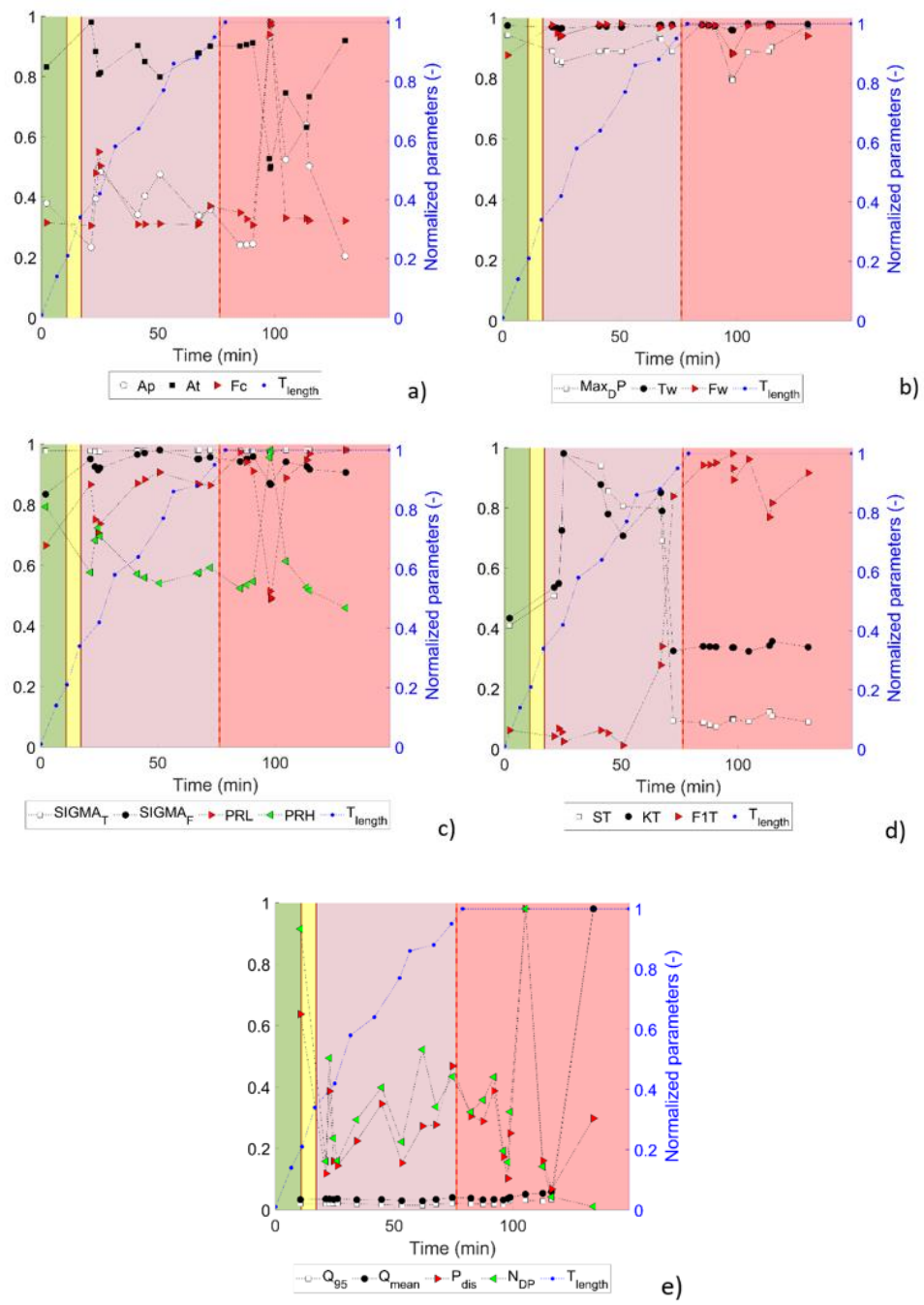


Figura 81 MV189 Parámetros de forma de onda

8.6. MV124

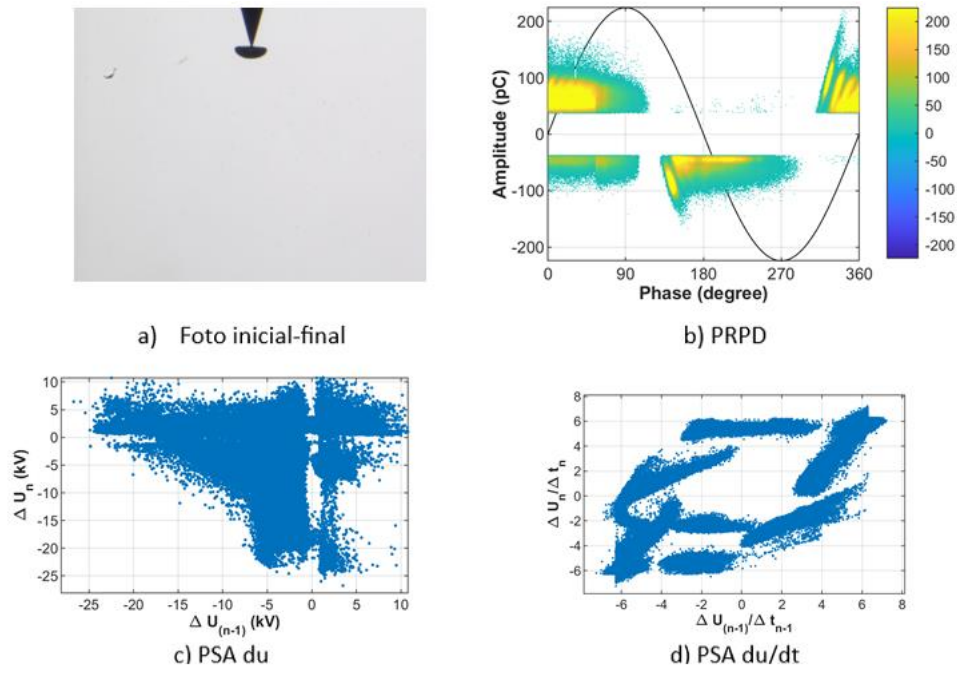


Figura 82 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 0 a 30 min

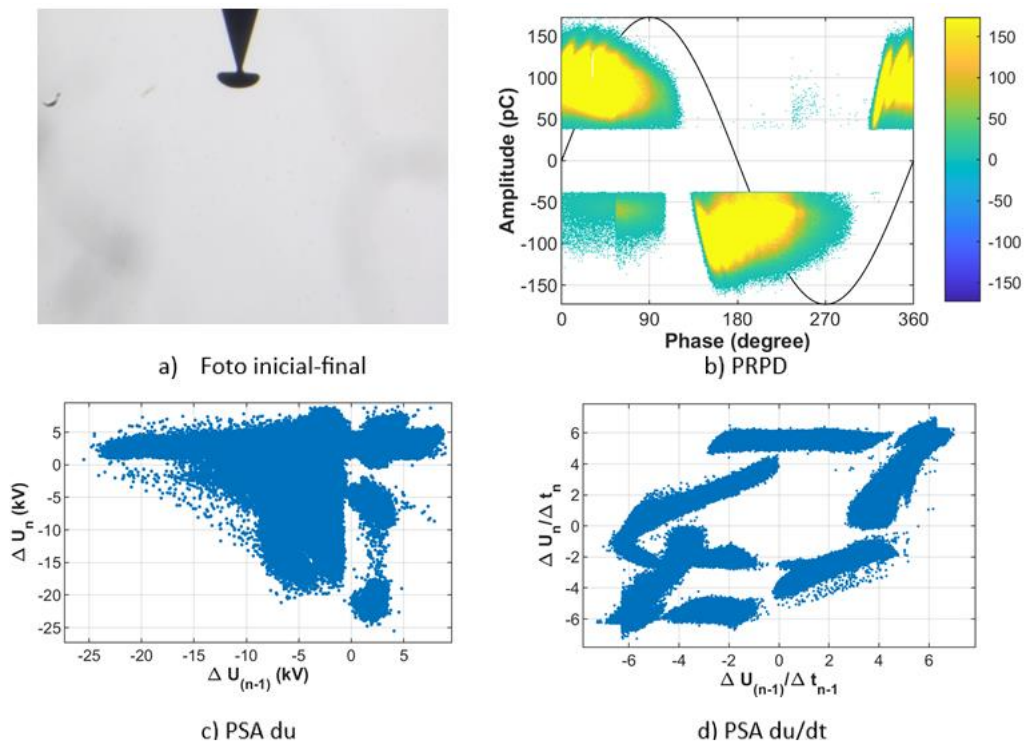


Figura 83 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 187 a 290 min

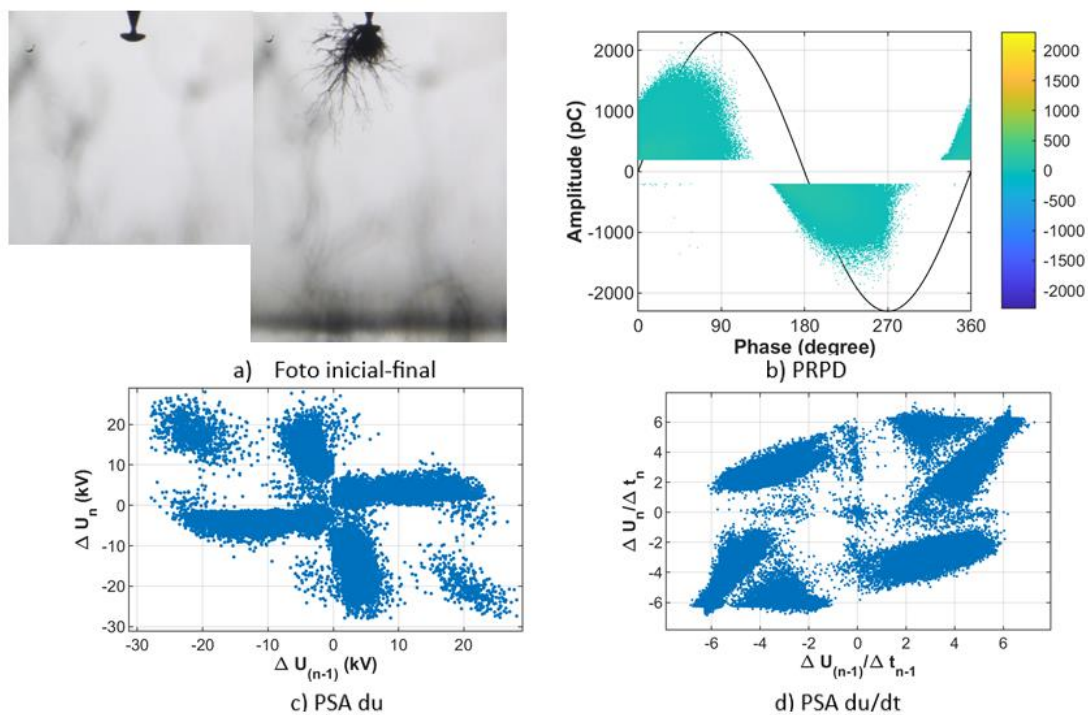


Figura 84 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h 50 min a 1d 3h 10min

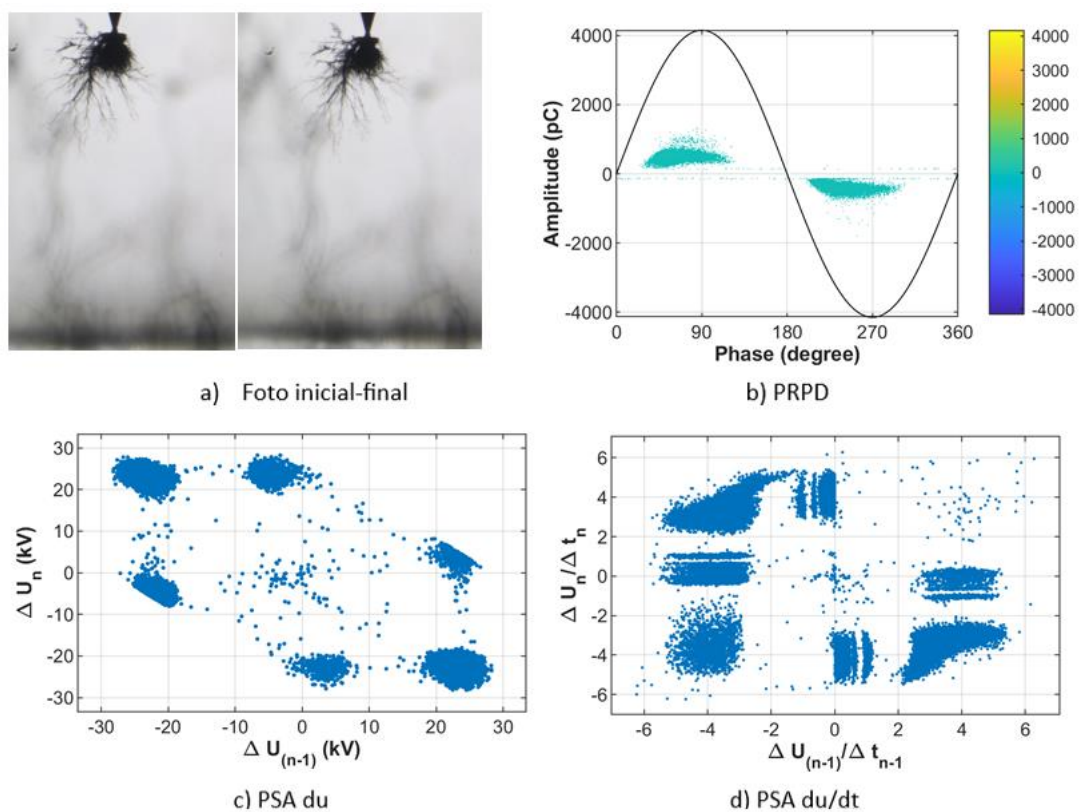


Figura 85 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 30 min a 1d 4h 0min

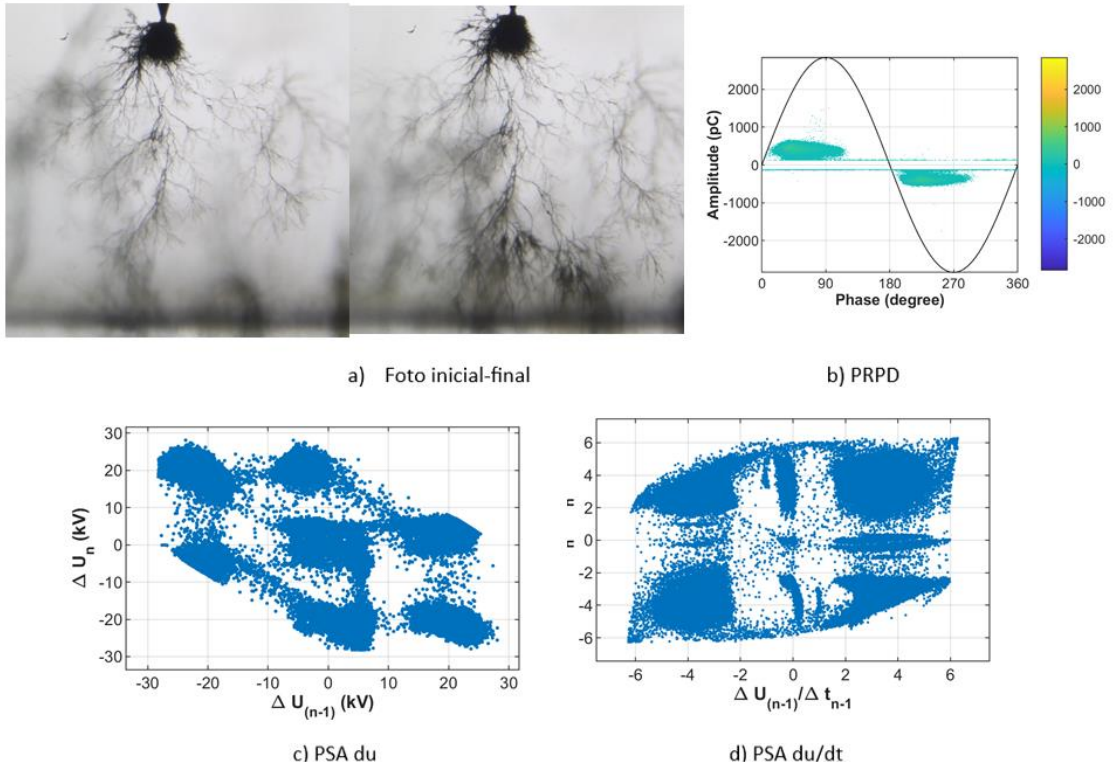
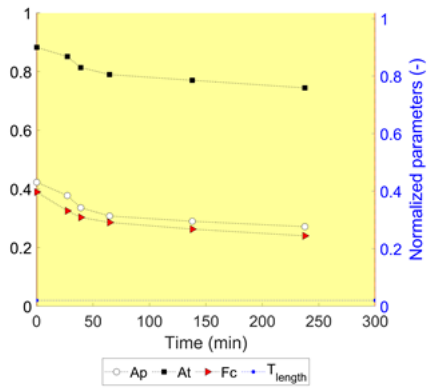
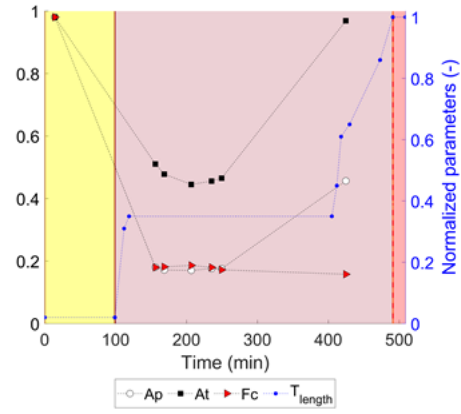


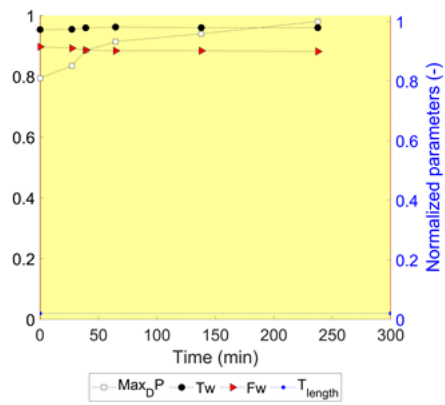
Figura 86 MV124 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 6h 30 min a 1d 7h 0min



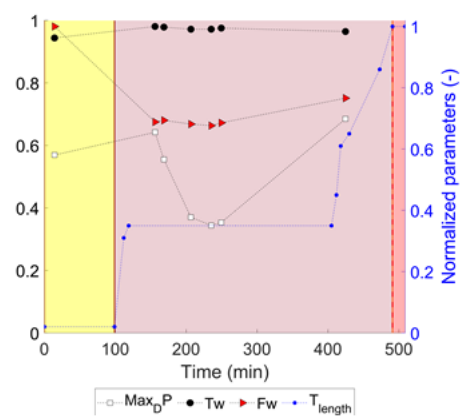
a) 0h 0min a 4h 50min



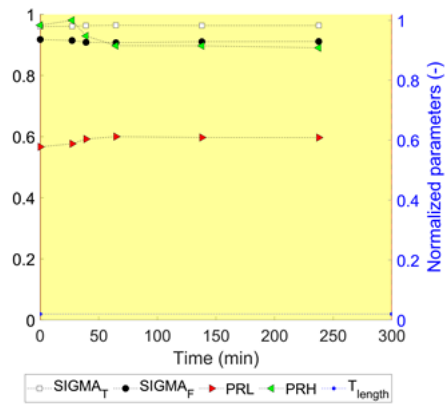
b) 1d 0h 30min a 1d 7h



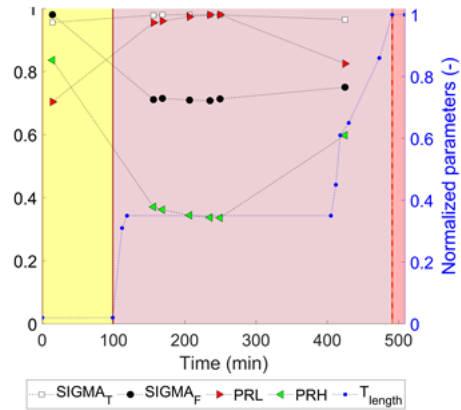
a) 0h 0min a 4h 50min



b) 1d 0h 30min a 1d 7h

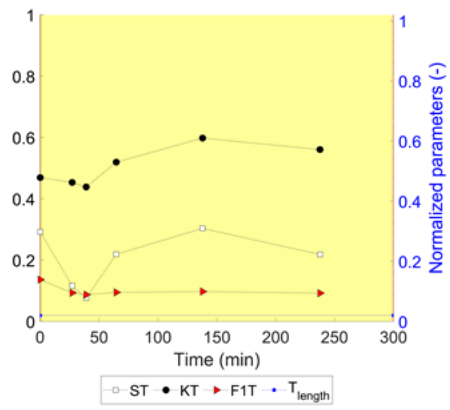


a) 0h 0min a 4h 50min

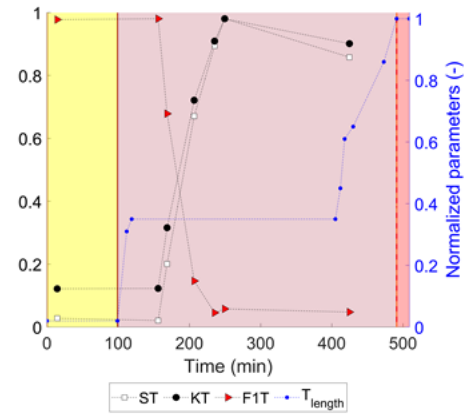


b) 1d 0h 30min a 1d 7h

}



a) 0h 0min a 4h 50min



b) 1d 0h 30min a 1d 7h

Figura 87 MV124 Parámetros de forma de onda

8.7. MV153

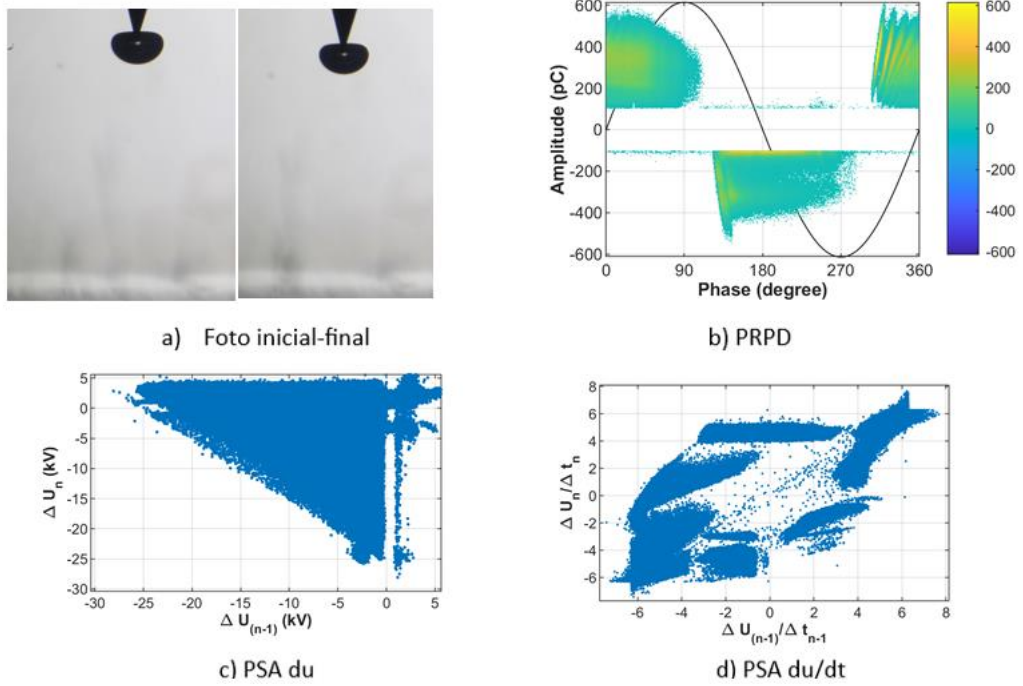


Figura 88 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 30min a 4h 0min

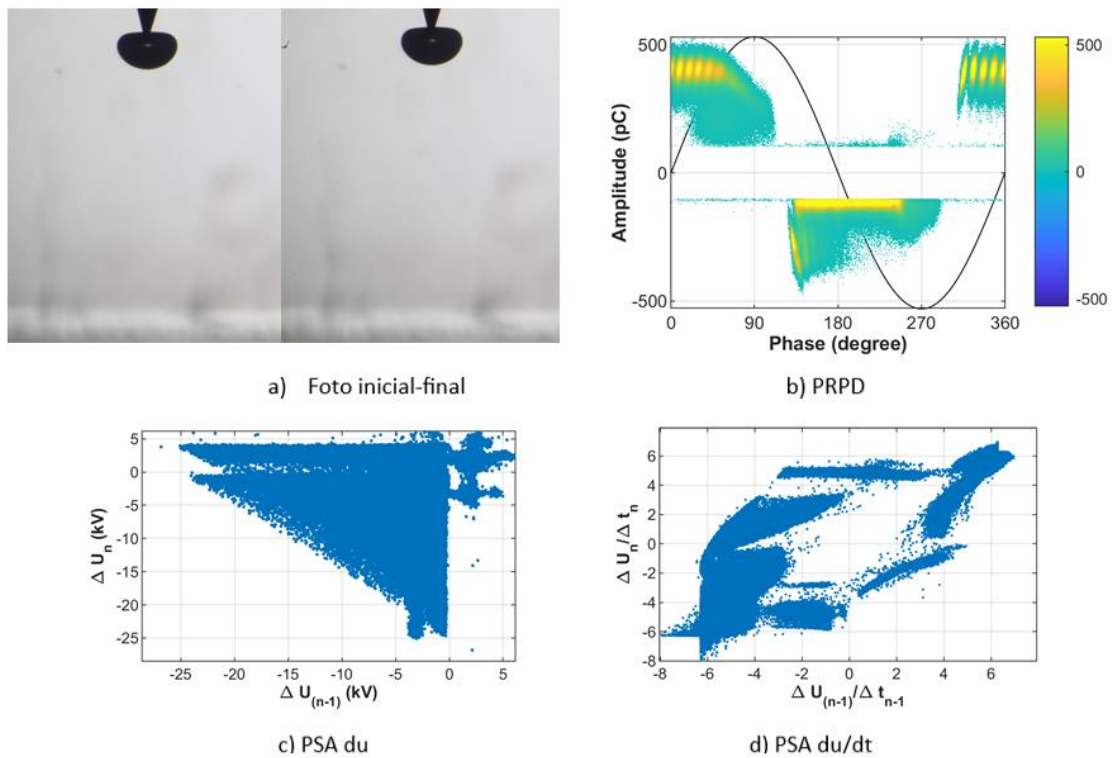


Figura 89 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 30min a 1d 4h 0min

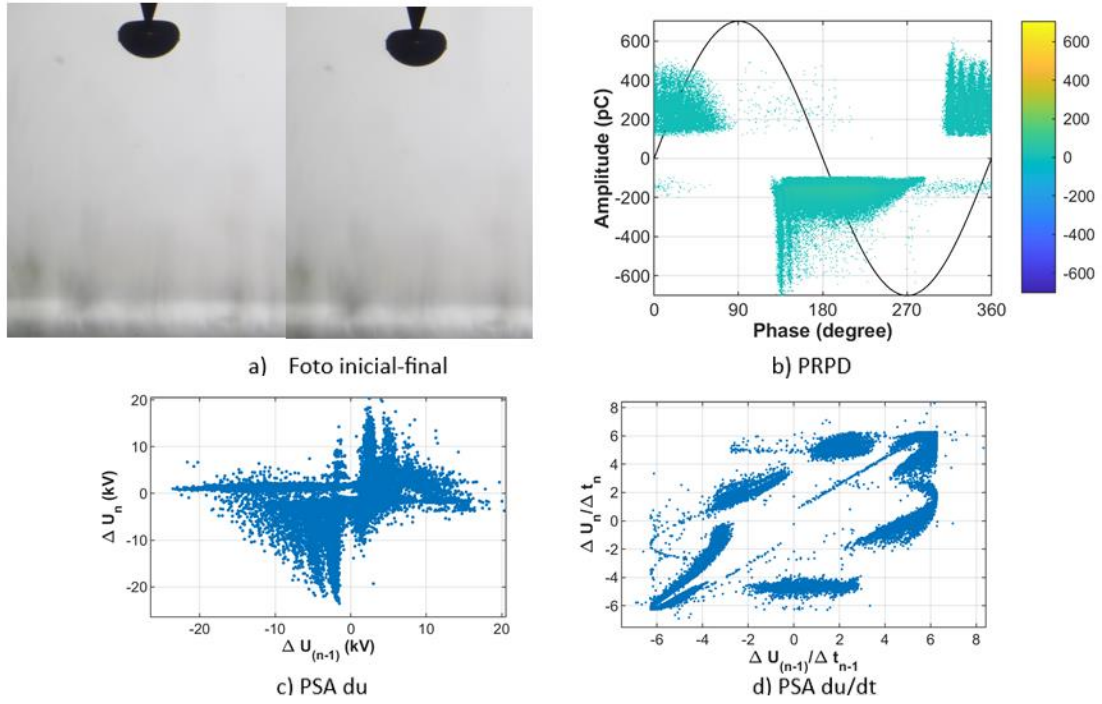


Figura 90 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 4h 0min a 2d 4h 30min

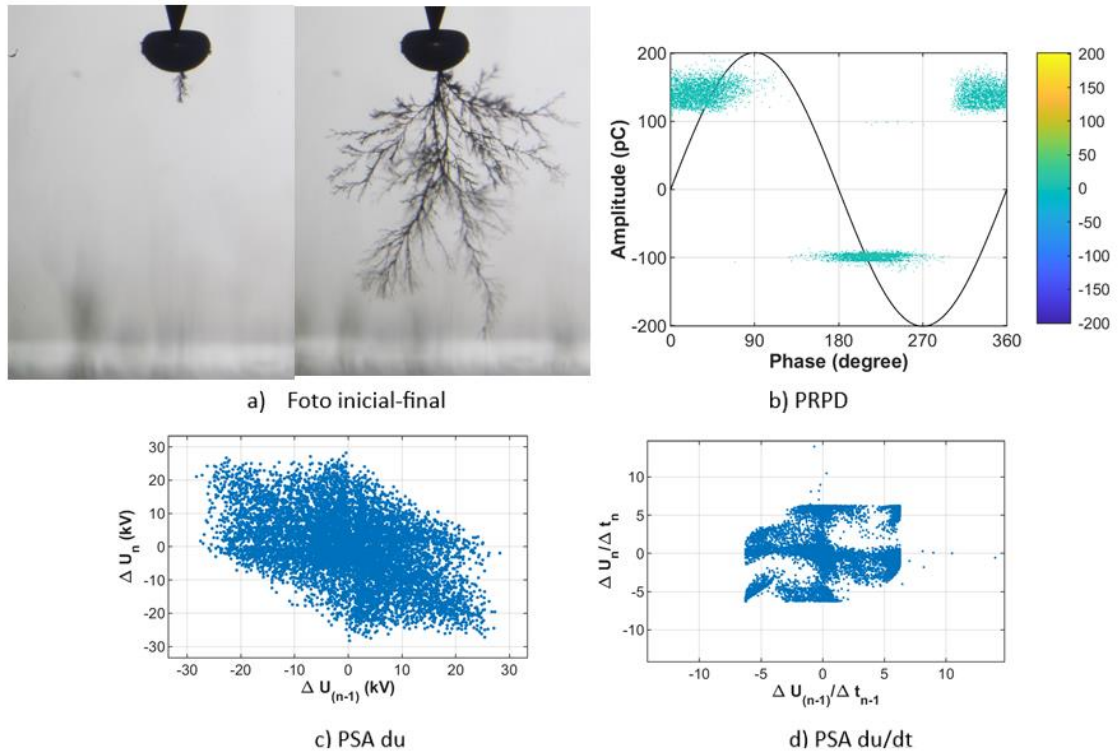


Figura 91 MV153 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 13h 50min a 2d 14h 30min

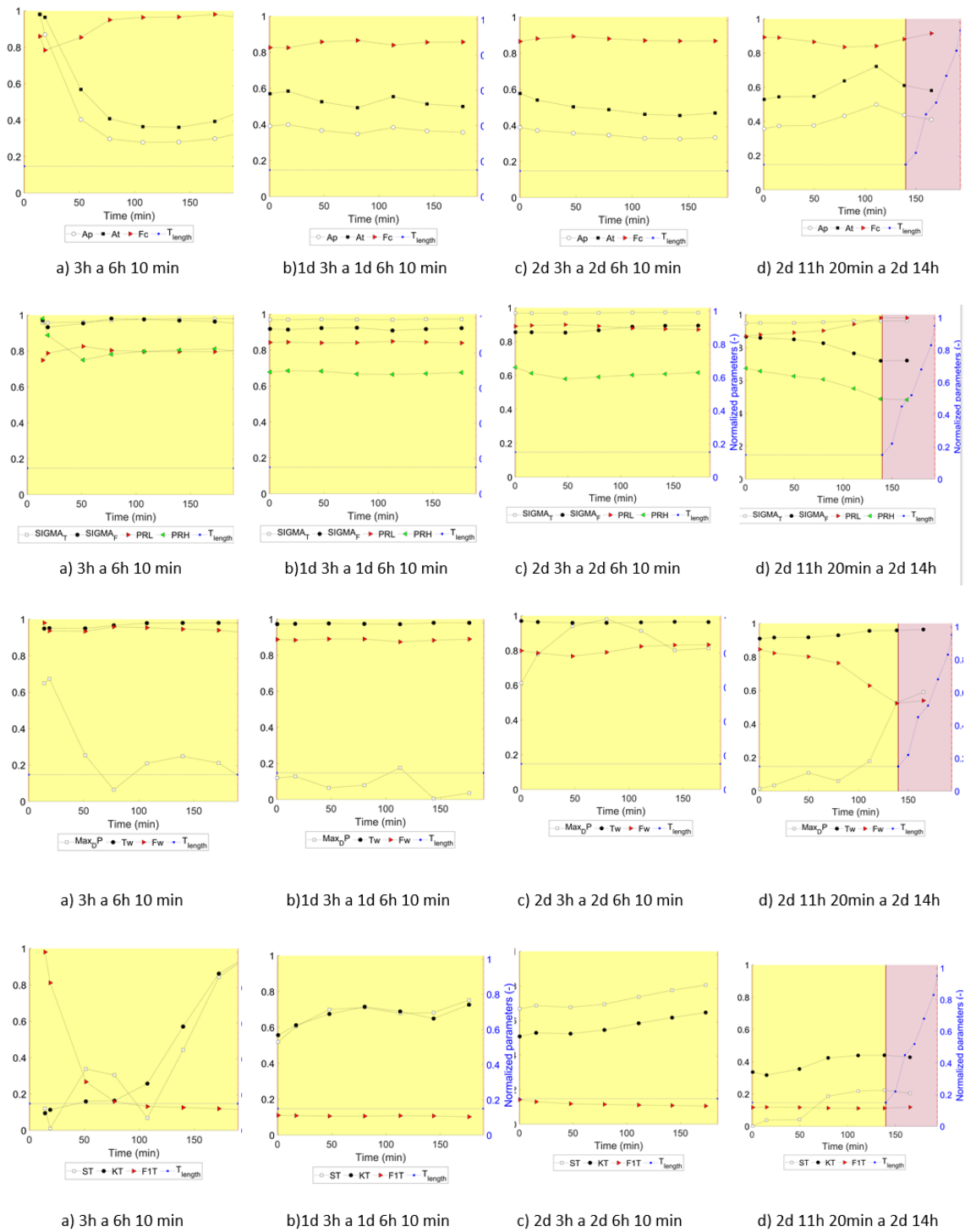


Figura 92 MV153 Parámetros de forma de onda

8.8. MV154

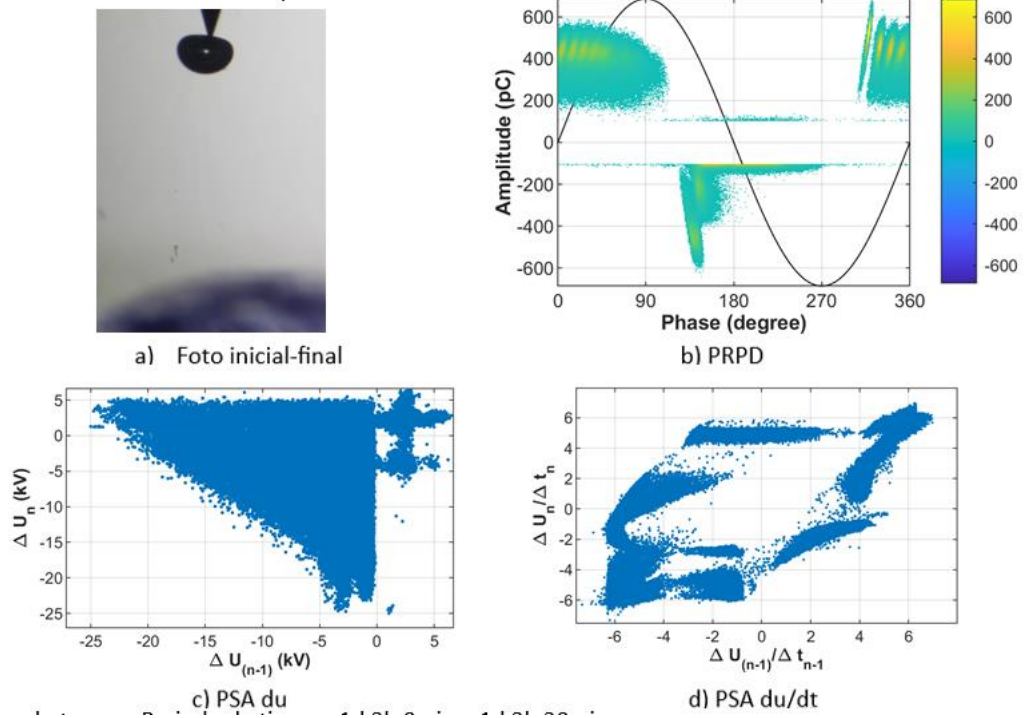


Figura 93 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 0min a 3h 20min

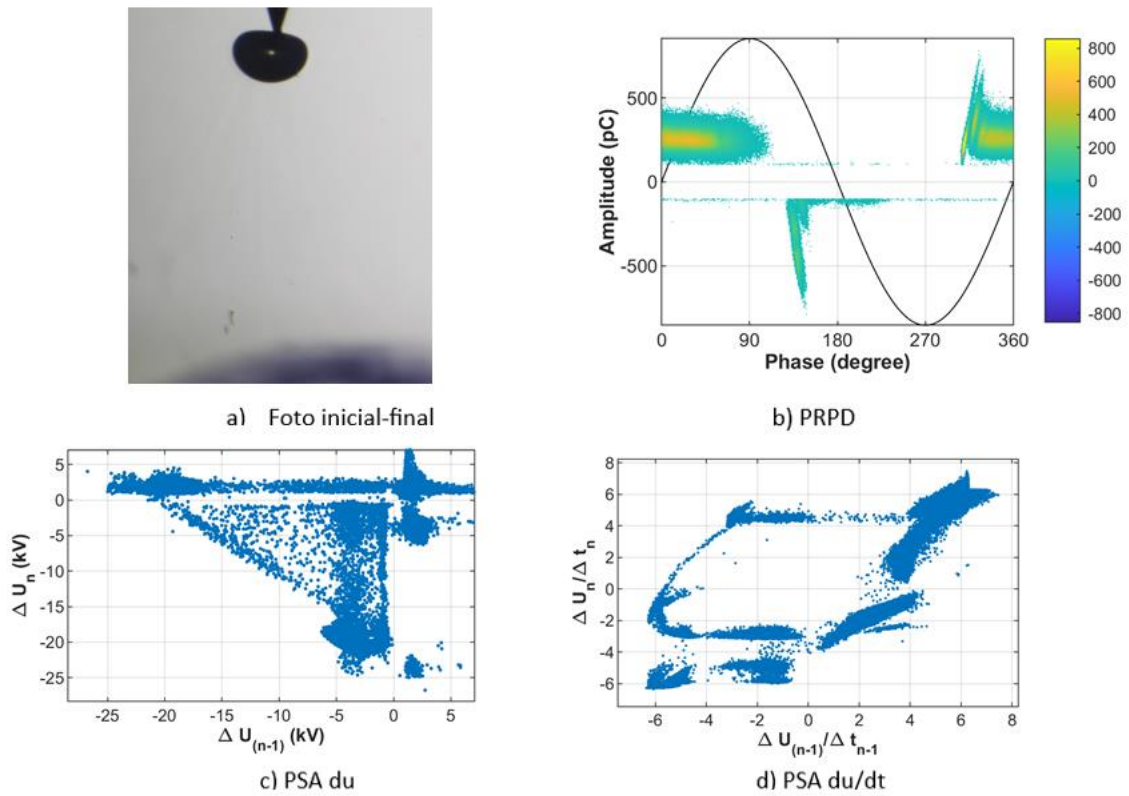


Figura 94 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 3h 0min a 1d 3h 20min

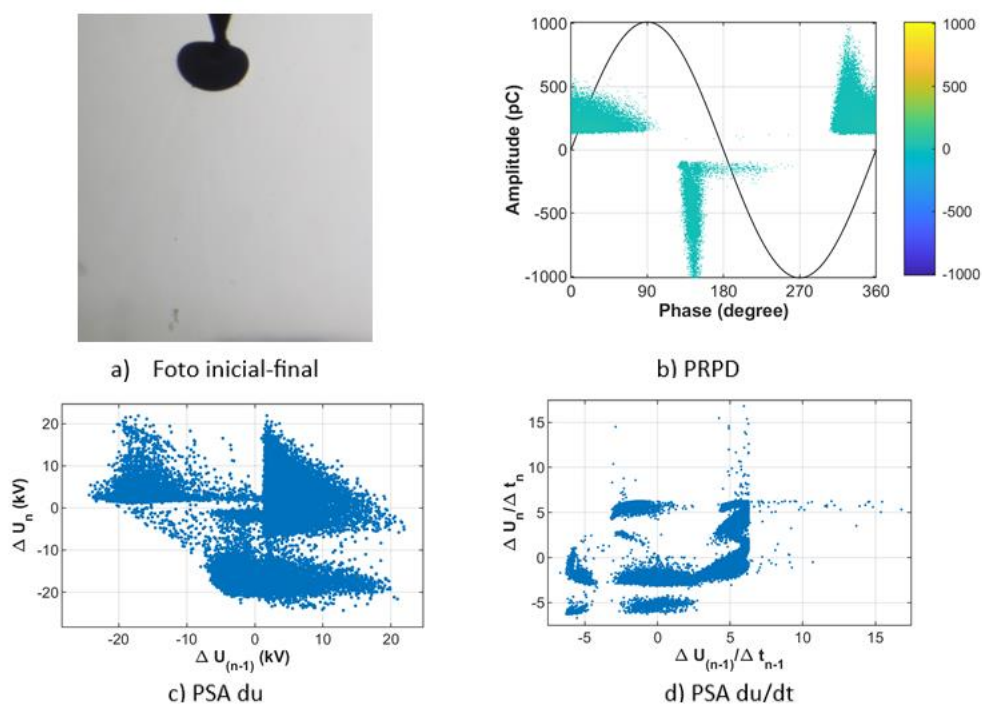


Figura 95 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 3h 10min a 2d 4h 10min

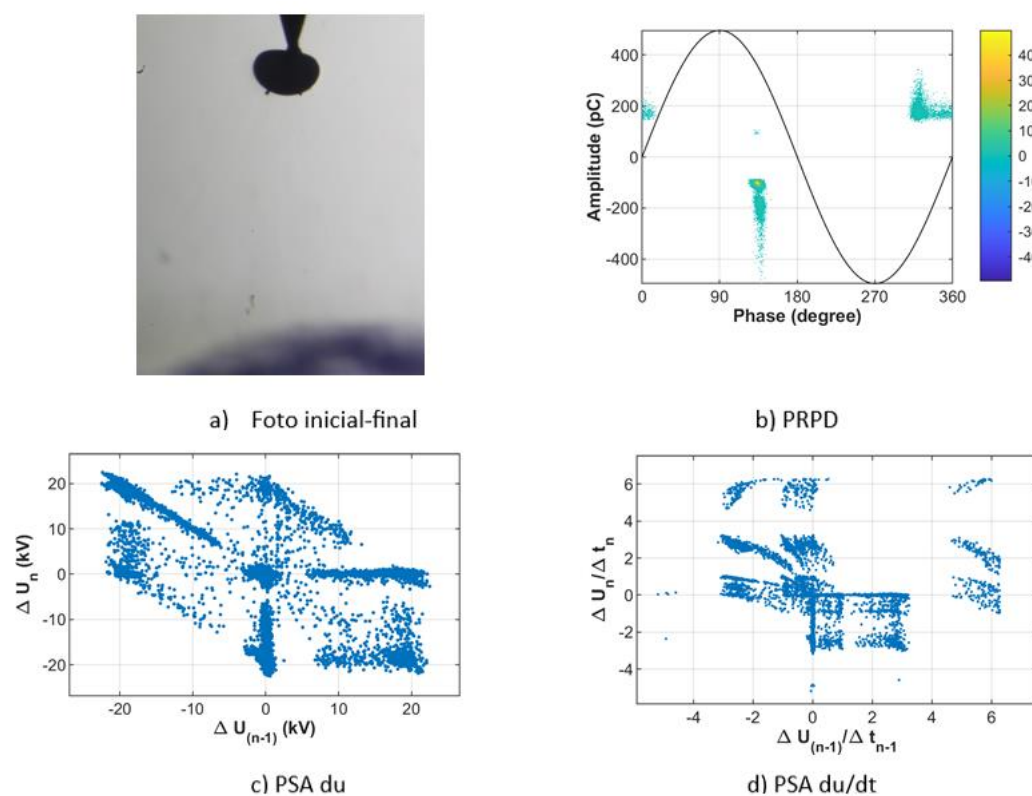


Figura 96 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 3h 30min a 3d 4h 50min

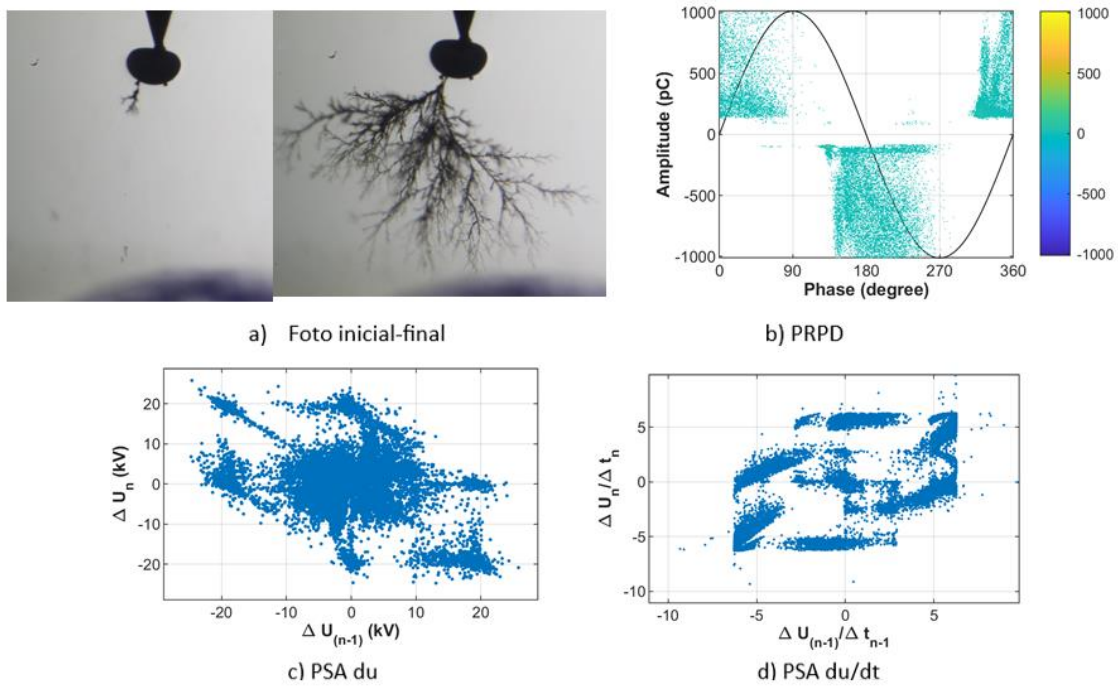


Figura 97 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 9h 50min a 3d 10h 50min

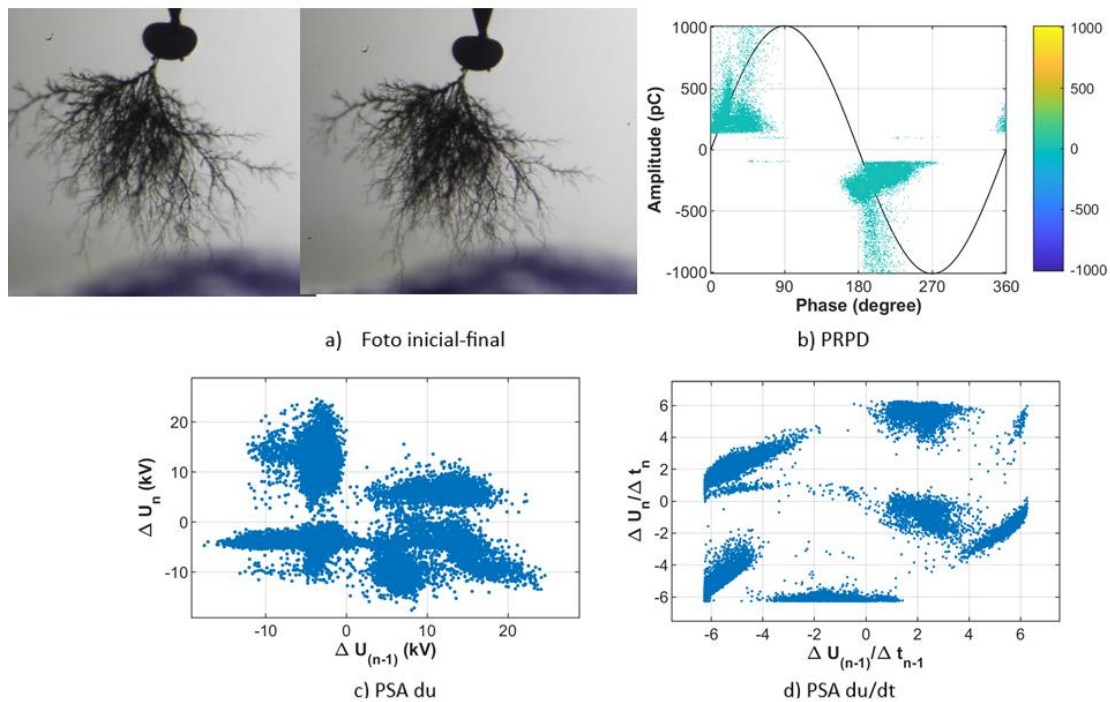


Figura 98 MV154 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 11h 30min a 3d 12h 0min

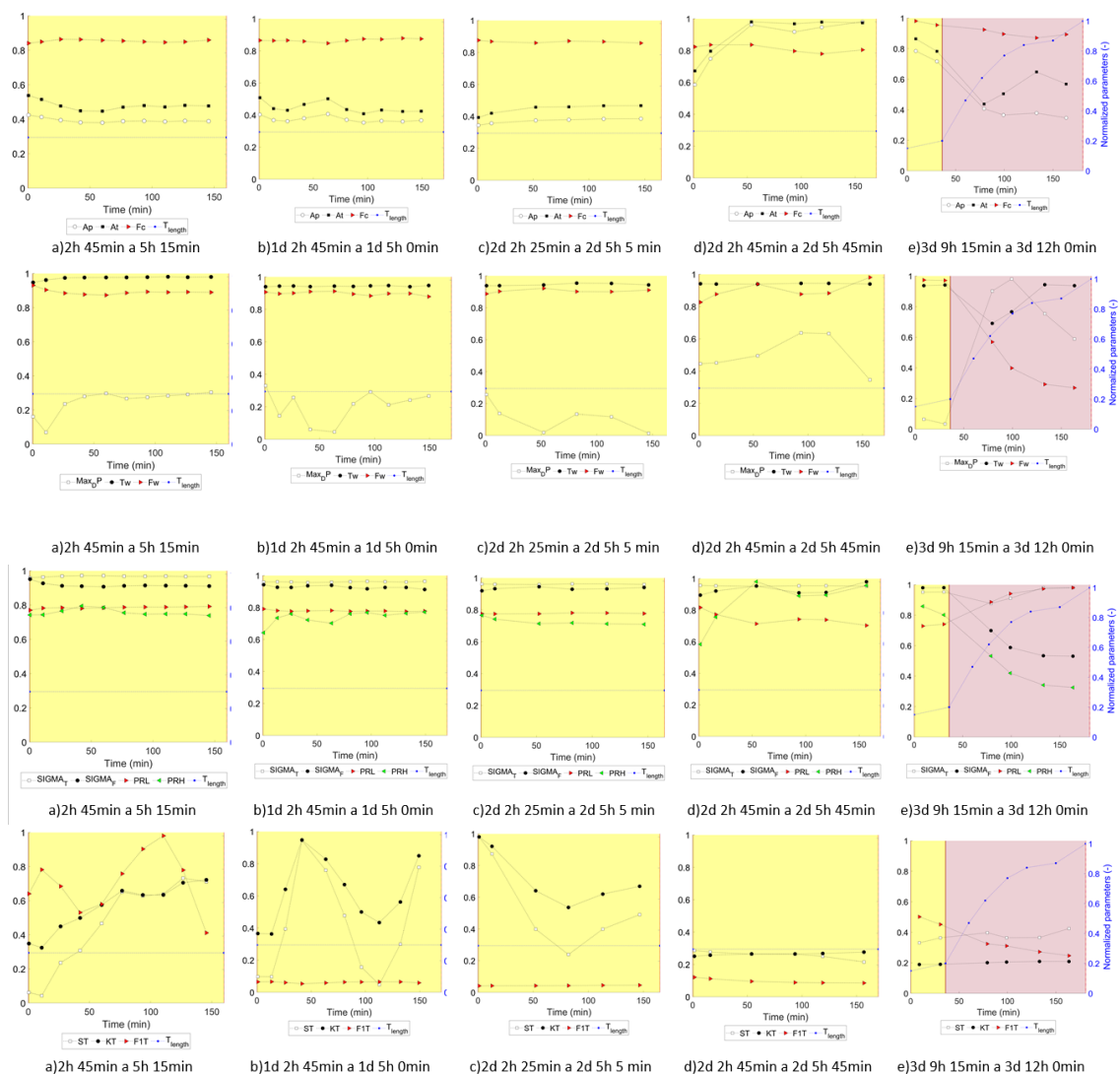


Figura 99 MV154 Parámetros de forma de onda

8.9. MV167

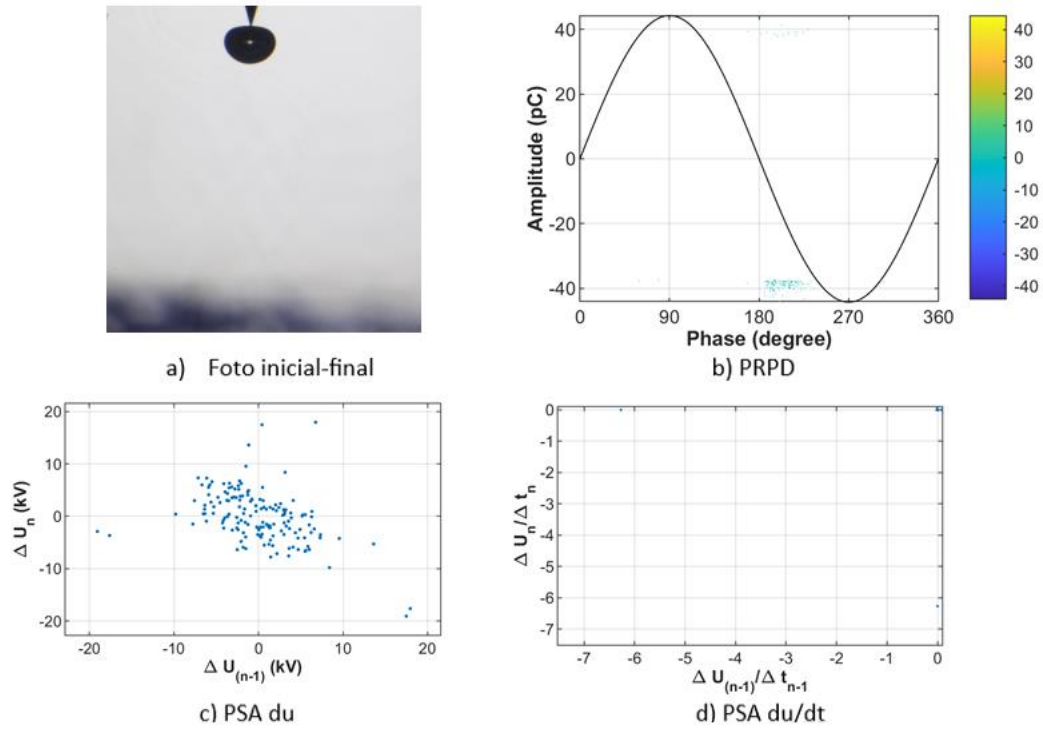


Figura 100 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3h 20min a 4h 0min

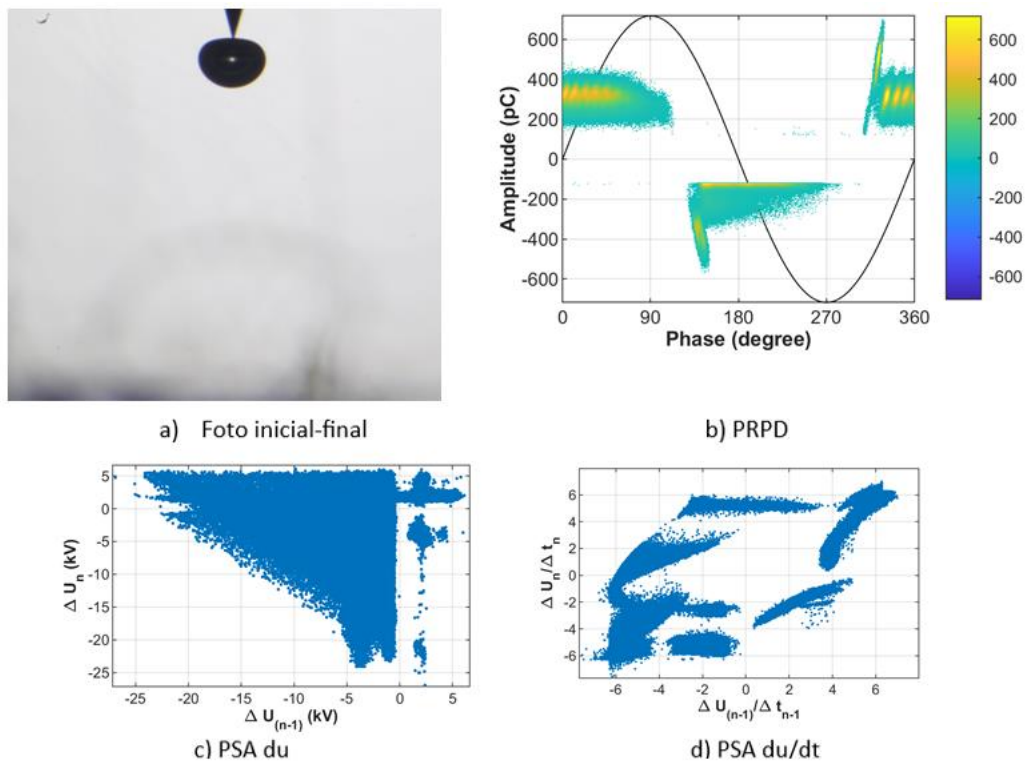


Figura 101 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h 50min a 1d 4h 0min

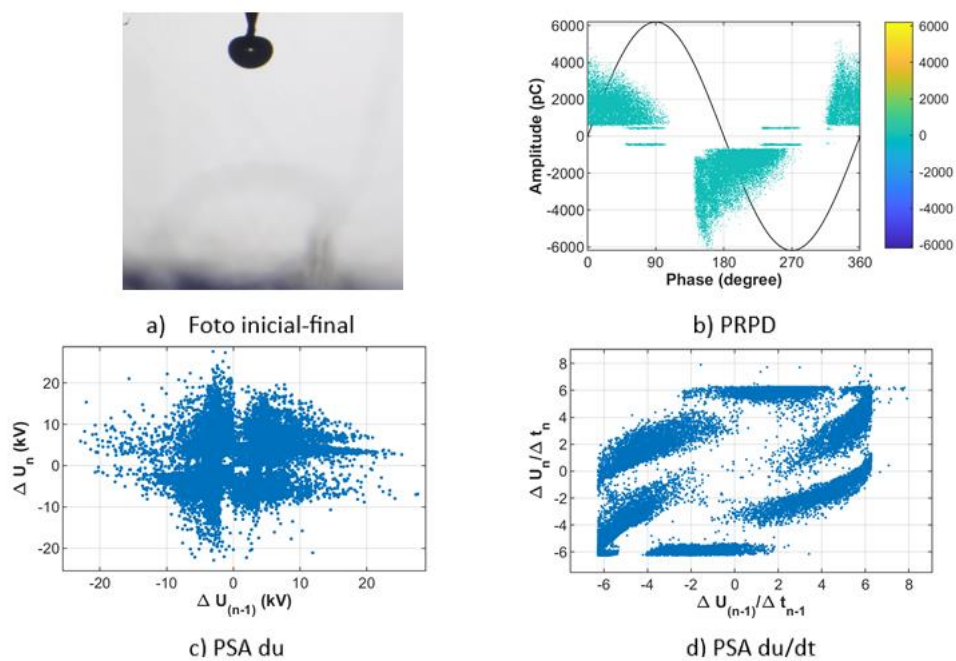


Figura 102 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 1h 0min a 2d 5h 10min

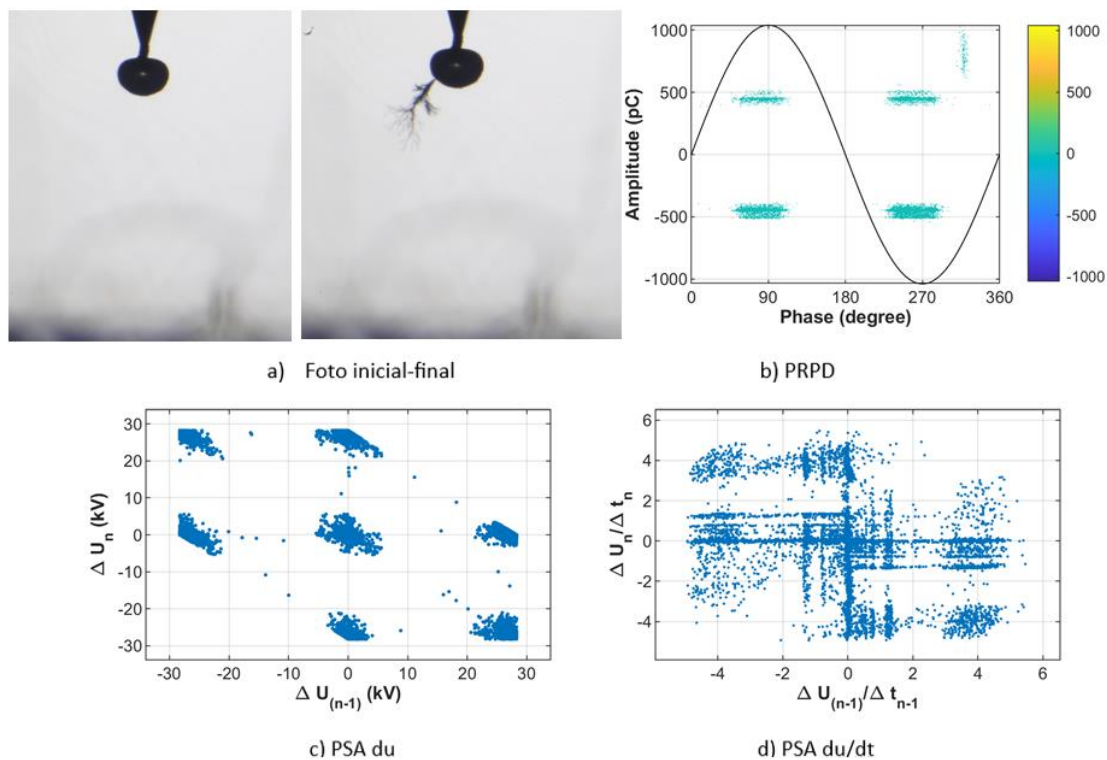


Figura 103 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 20h 15min a 2d 23h 20min

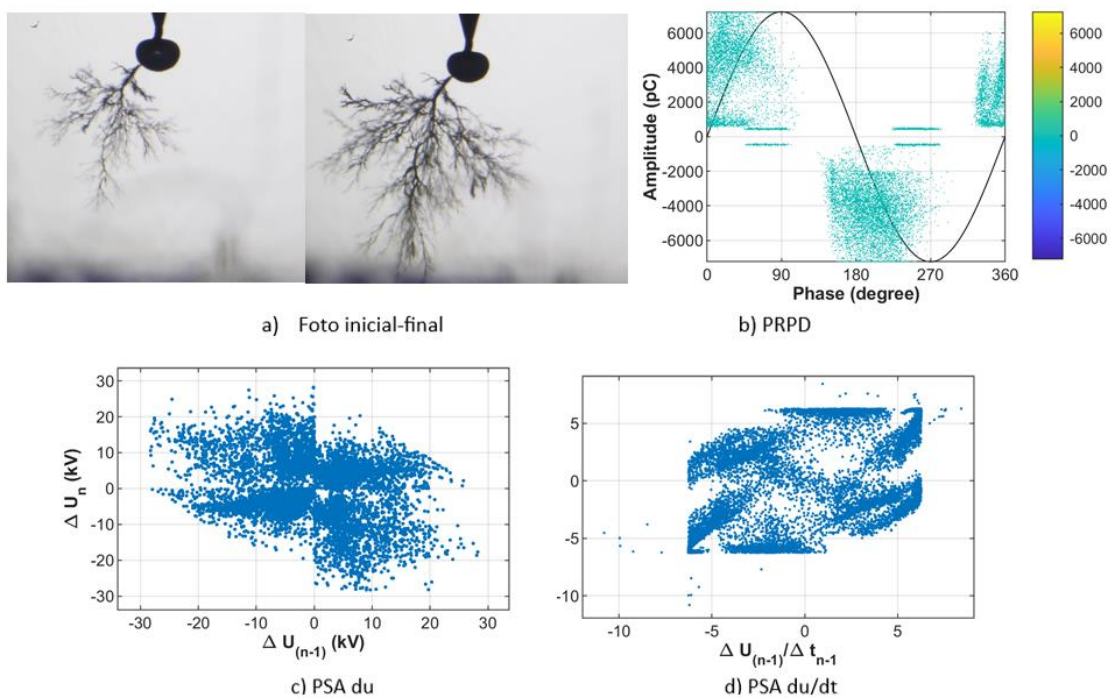
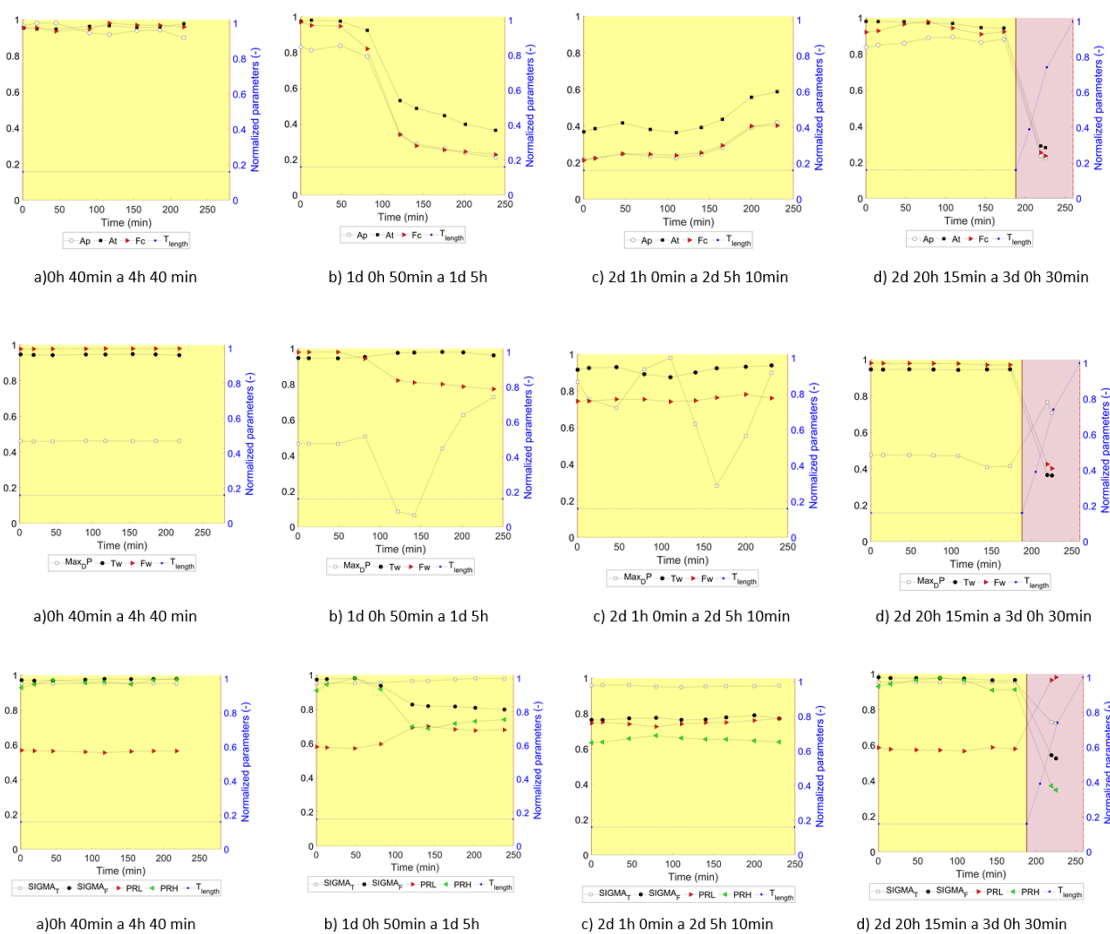


Figura 104 MV167 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 0h 0min a 3d 0h 30min



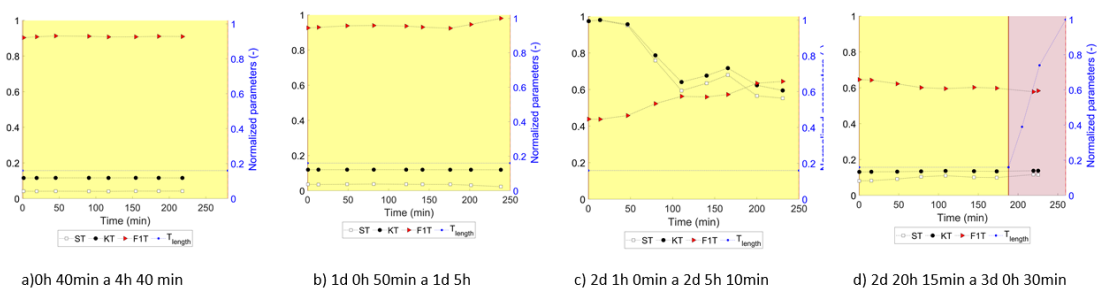


Figura 105 MV167 Parámetros de forma de onda

8.10. MV168

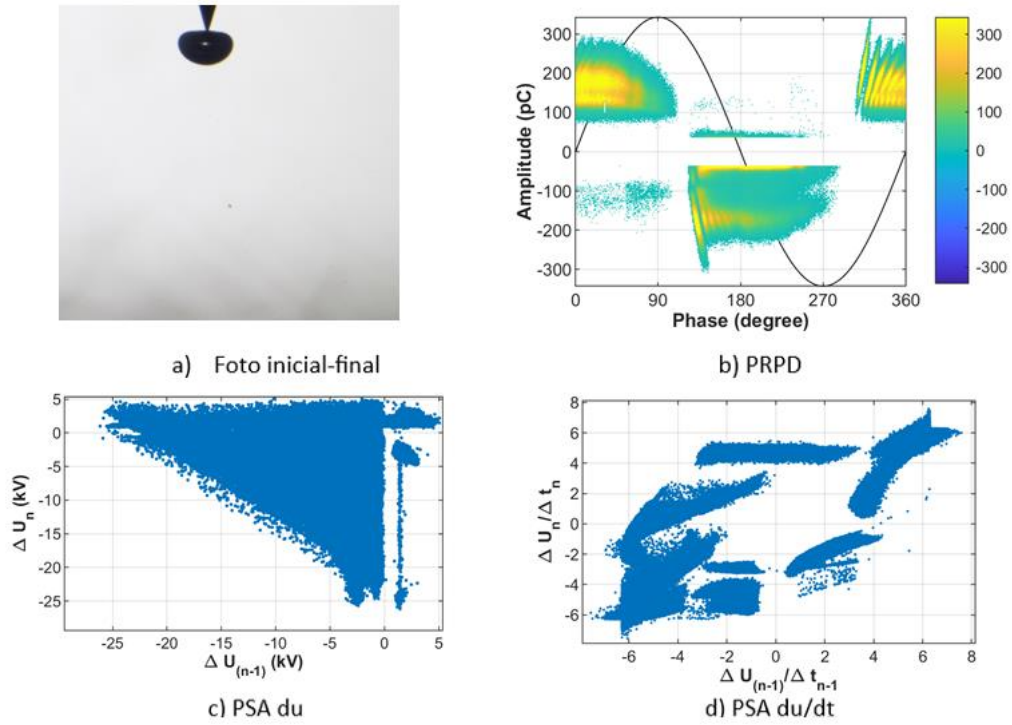


Figura 106 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 30min a 1h 0min

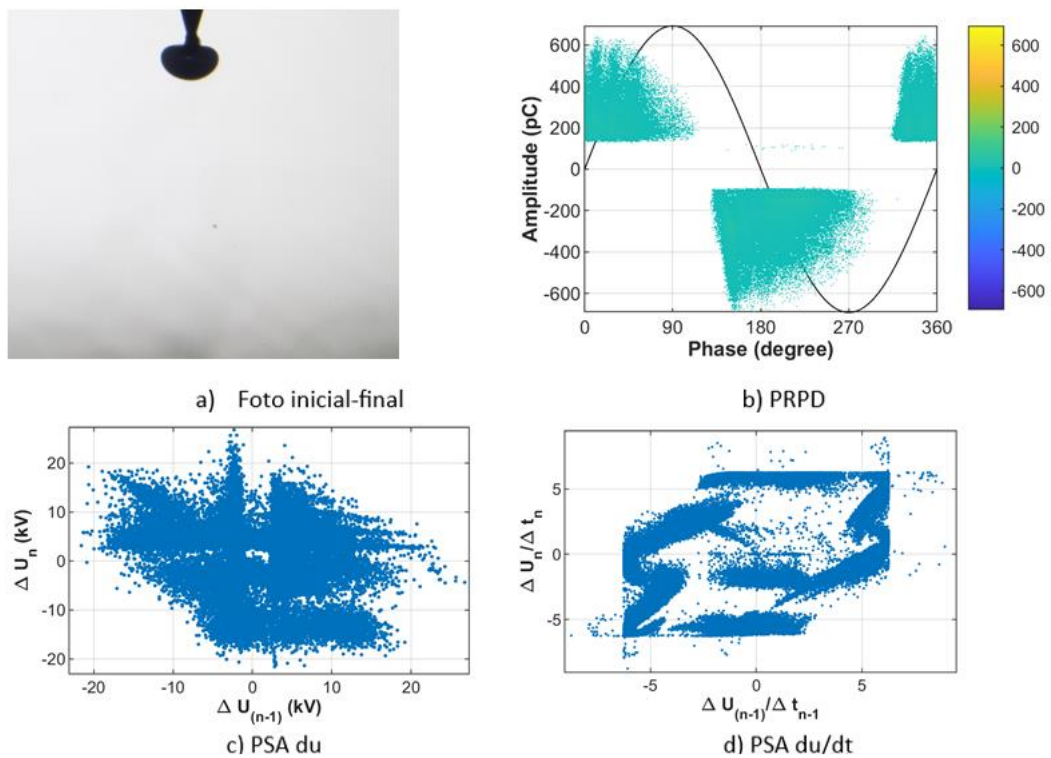
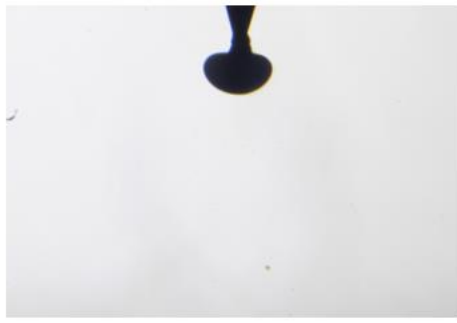
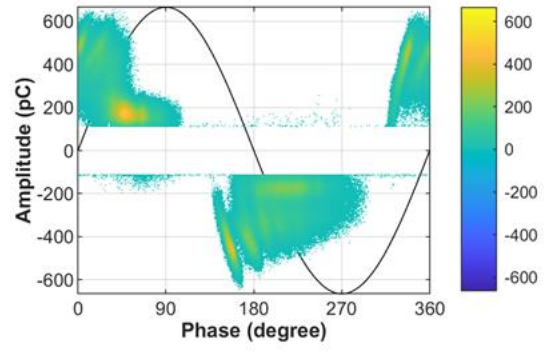


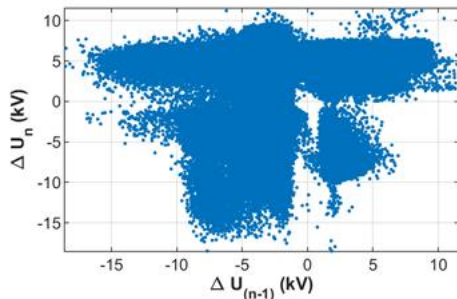
Figura 107 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 1d 0h a 1d 1h 40min



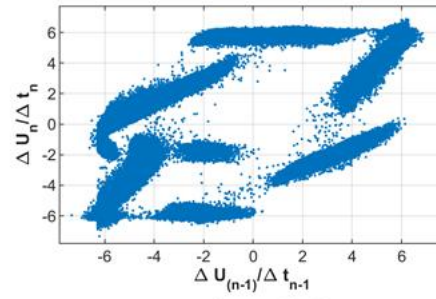
a) Foto inicial-final



b) PRPD



c) PSA du

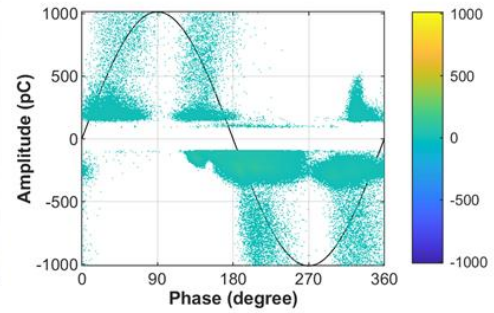


d) PSA du/dt

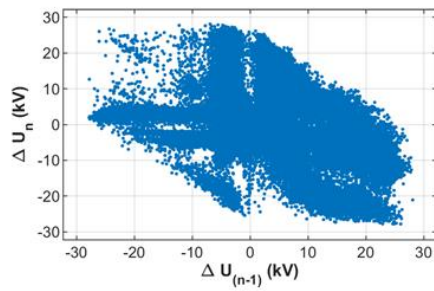
Figura 108 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 2d 0h 10min a 2d 0h 30min



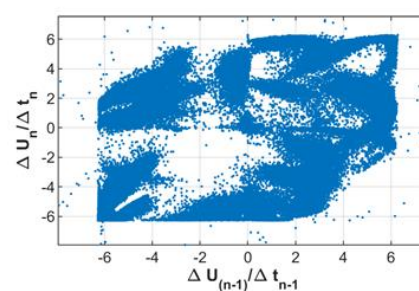
a) Foto inicial-final



b) PRPD



c) PSA du



d) PSA du/dt

Figura 109 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 2h 40min a 3d 6h 40min

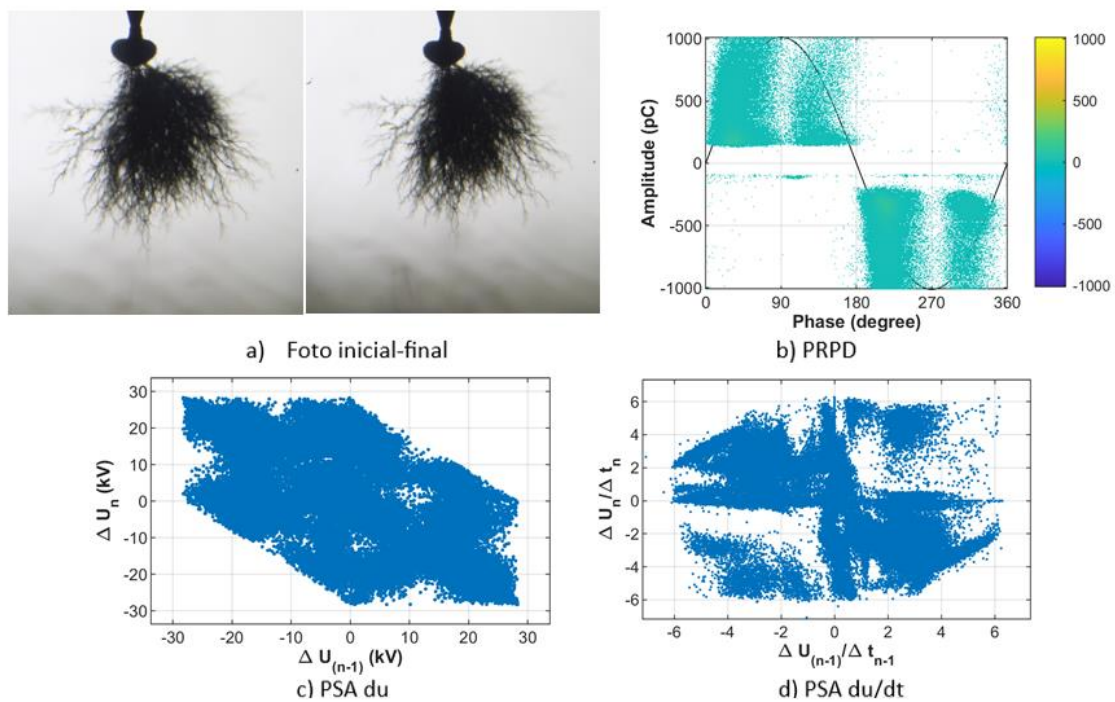


Figura 110 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 3d 8h 50min a 3d 15h 0min

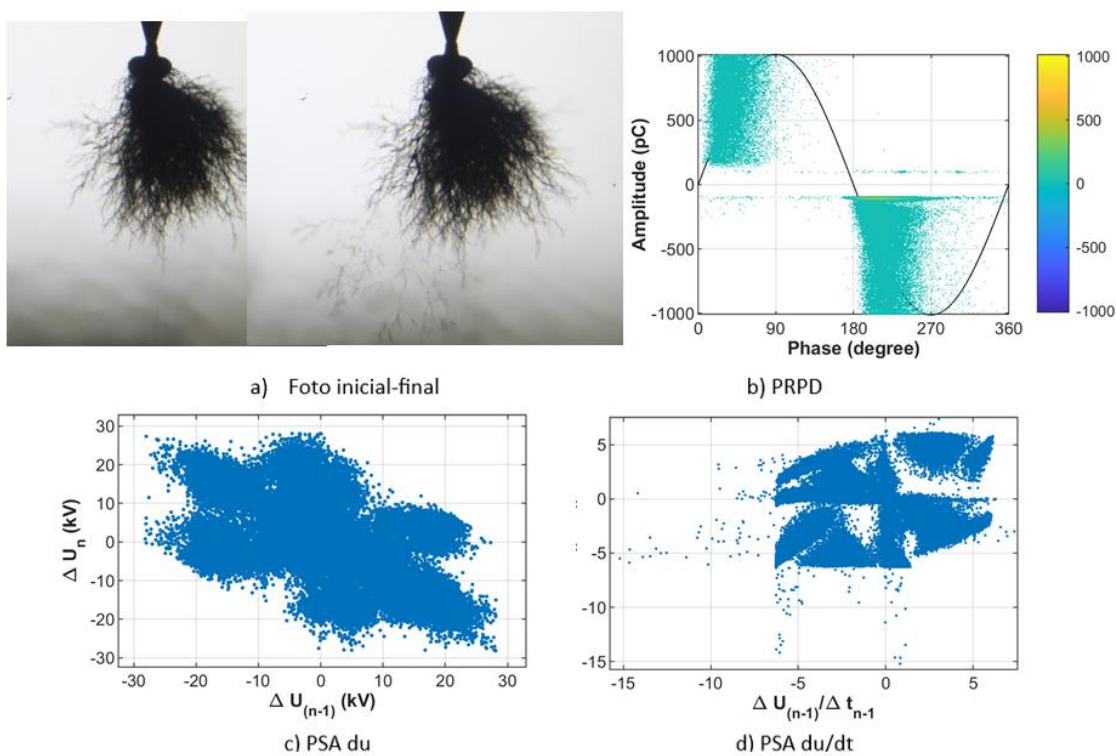


Figura 111 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4d 12h 0min a 4d 13h 0min

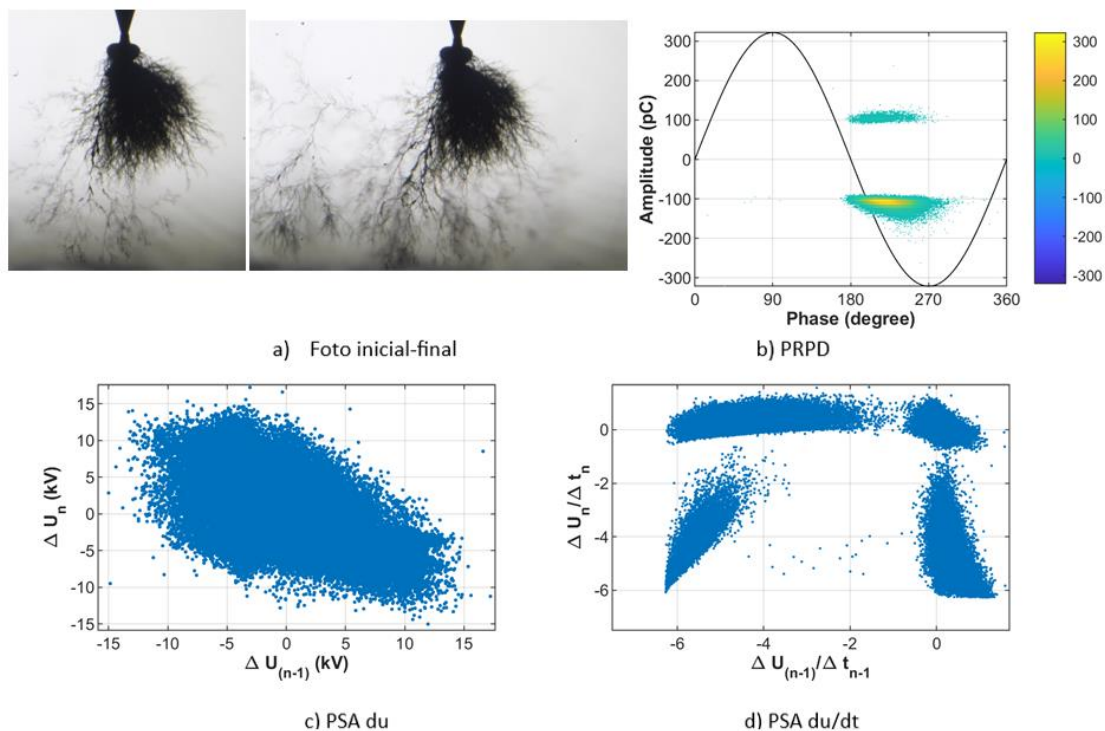
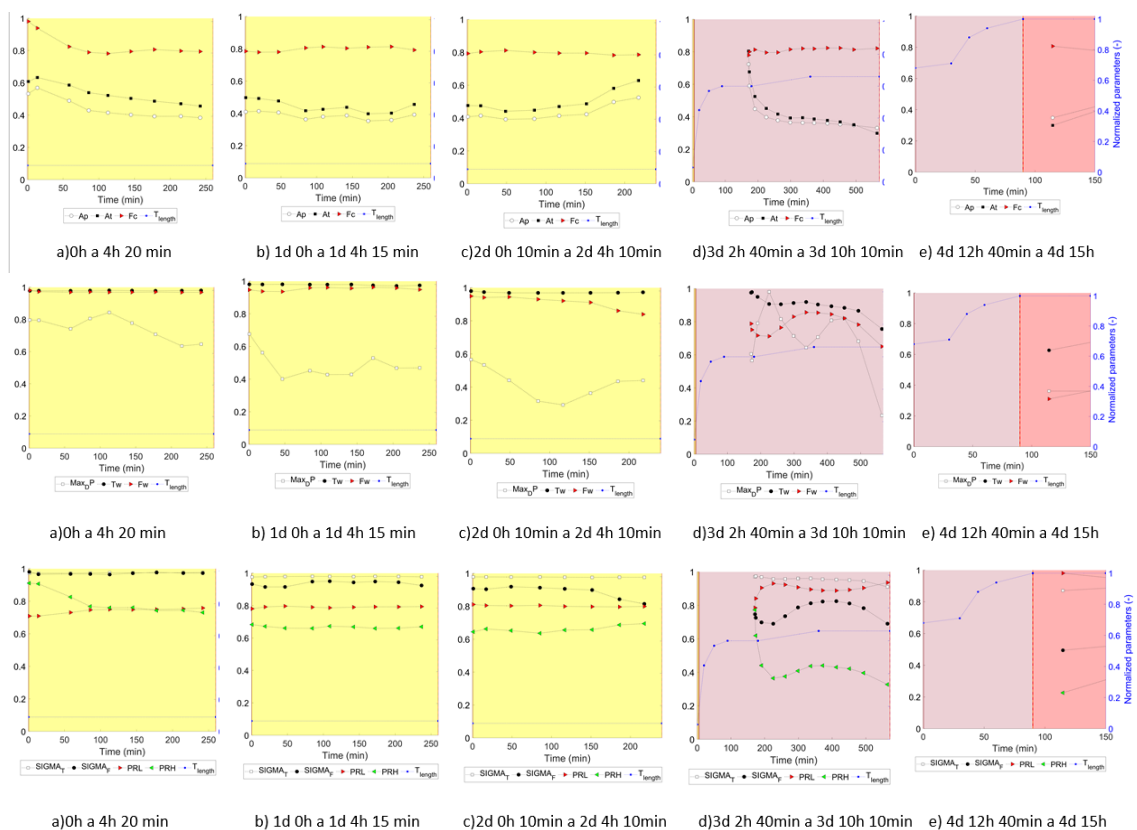


Figura 112 MV168 técnicas tradicionales periodo de tiempo 4d 13h 30min a 4d 15h 0min



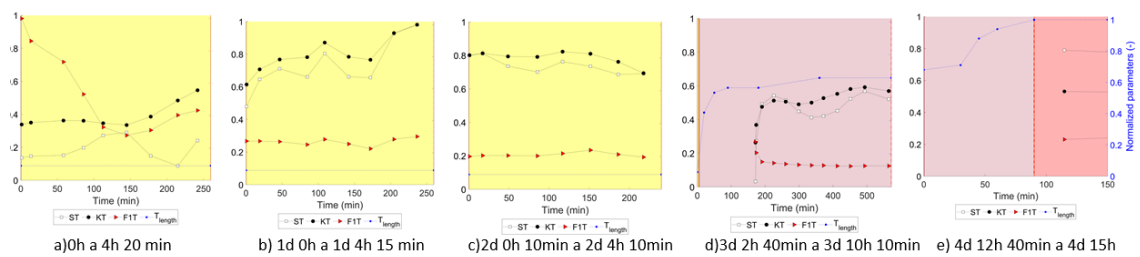


Figura 113 MV168 Parámetros de forma de onda