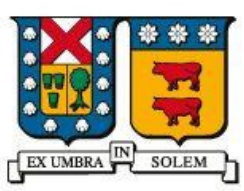
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

VALPARAISO - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE MÚLTIPLES ÁRBOLES ELÉCTRICOS EN FORMA SIMULTÁNEA Y SUS DESCARGAS PARCIALES A DISTINTAS TENSIONES Y FRECUENCIAS DE EXCITACIÓN

SEBASTIÁN ALONSO GAMONAL GONZÁLEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Roger Schürch Brandt

PROFESOR CO-REFERENTE: Dr. Jorge Ardila Rey

JULIO-2023

Lo que más embellece el desierto
-dijo el principito-
es el pozo que oculta en algún sitio.

ANTOINE DE SAINT-EXUPÉRY

Agradecimientos

Agradezco a todos quienes han aportando en la confección de esta memoria.

A Cristián Andrades por su apoyo en el desarrollo experimental en tiempos de pandemia.

El apoyo de mi familiar y amigos todos estos años.

Resumen

El objetivo de este estudio es determinar si hay variaciones significativas en el crecimiento de árboles eléctricos bajo condiciones geométricas distintas a las habituales, incluyendo la presencia de múltiples árboles de manera simultánea y el desarrollo de árboles en geometrías curvas. Resultados positivos podrían abrir nuevas áreas de estudio en el tema de árboles eléctricos.

Para este propósito, en esta investigación se diseñaron probetas de resina epóxica con diferentes configuraciones: placa plana con dos o tres agujas, y placa curva con una aguja. Estas probetas fueron sometidas a excitaciones de 10 y 14 [kV], y con frecuencias de 50[Hz], 250[Hz] y 350[Hz], hasta que se produjera su ruptura, registrandose estos crecimientos mediante fotografías y mediciones de descargas parciales, para luego ser analizados mediante monitoreo visual y PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), comparandolos a muestras de referencia de punta-placa.

Se observó que las probetas de dos agujas tienen dos árboles con crecimientos similares a los de muestras de una aguja, con anchos en ocasiones mayores, y tiempos de ruptura similares o menores, independiente de las condiciones de ensayo. Es por esto, que se consideró que estos representan un peor caso que los de probetas de una y tres agujas. También se obtuvieron magnitudes de carga significativamente mayores a los obtenidos en muestras de una aguja. Igualmente, las probetas punta - placa curva presentaron crecimientos con descargas de mayor magnitud que sus pares de placa plana, pero con mayores tiempos de cruce y ruptura.

Es por esto, que se recomienda continuar y profundizar estos estudios a futuro.

Abstract

The objective of this study is to determine whether there are significant variations in the growth of electric trees under different geometric conditions than usual, including the presence of multiple trees simultaneously and the development of trees in curved geometries. Positive results could open up new areas of study in the field of electric trees.

For this purpose, epoxy resin samples were designed with different configurations: flat plate with two or three needles, and curved plate with one needle. These samples were subjected to excitations of 10 and 14 [kV], at frequencies of 50[Hz], 250[Hz], and 350[Hz], until their breakdown occurred. The growth of these trees was recorded through photographs and measurements of partial discharges, which were later analyzed through visual monitoring and PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) comparison with needle-plate reference samples.

It was observed that the samples with two needles exhibited two trees with growth patterns similar to those of single-needle samples, with occasionally wider widths and similar or shorter times to breakdown, regardless of the test conditions. Therefore, it was considered that these samples represented a worse case scenario compared to the one and three-needle samples. Significantly higher charge magnitudes were also obtained compared to the single-needle samples. Similarly, the curved tip-plate samples showed growth with discharges of higher magnitude than their flat plate counterparts, but with longer crossing and breakdown times.

Hence, it is recommended to continue and deepen these studies in the future.

Tabla de Contenidos

Resumen iii

Abstract iv

Tabla de Contenidos v

Lista de Tablas xi

Lista de Figuras xv

Nomenclatura xxiii

1 Introducción 1

1.1 Motivación . . . 1

1.2 Objetivos . . . 2

1.2.1 Objetivo general: . . . 2

1.2.2 Objetivos específicos: . . . 2

1.3 Alcance . . . 2

1.4 Estructura de la tesis . . . 3

2 Marco teórico 4

2.1 Marco general . . . 4

2.2 Descargas parciales . . . 5

2.2.1 Tipos de DP . . . 5

2.3 PRPD . . . 6

2.4 Revisión bibliográfica . . . 6

3 Metodología experimental 8

3.1 Probetas de ensayo . . . 8

3.2 Banco de pruebas . . . 9

3.2.1 Generación de Alta Tensión . . . 9

3.2.1.1 Amplificador Trek . . . 9
3.2.1.2 Transformador . . . 10
3.2.1.3 Generador de impulsos . . . 10
3.2.2 Área de ensayo . . . 11
3.2.3 Equipos de medición . . . 14
3.2.3.1 Adquisición de imágenes . . . 14
3.2.3.2 Medición de descargas parciales . . . 14
3.2.4 Zona de monitoreo . . . 14
3.3 Procedimiento de fabricación de probetas . . . 16

4 Fabricación de probetas e iniciación de árboles 18
4.1 Criterios de iniciación y ensayo para probetas . . . 18
4.2 Fabricación de probetas de dos y tres agujas . . . 18
4.2.1 Primer diseño . . . 19
4.2.2 Iniciación de probetas: primer diseño . . . 20
4.2.2.1 Iniciación utilizando el banco de pruebas alimentado con un transformador . . . 20
4.2.2.2 Iniciación utilizando un generador de impulsos . . . 22
4.2.3 Segundo diseño . . . 22
4.2.4 Iniciación de probetas: segundo diseño . . . 23
4.2.4.1 Iniciación utilizando metodología de iniciación separada . . . 24
4.2.4.2 Iniciación utilizando metodología de iniciación simultanea . . . 25
4.2.4.3 Iniciación utilizando metodología de iniciación rápida . . . 25
4.3 Fabricación de probetas con placa curva . . . 26
4.3.1 Diseños utilizados . . . 26
4.3.2 Iniciación utilizando metodología de iniciación rápida . . . 27
4.4 Resumen de iniciaciones realizadas . . . 27
4.5 Resumen de ensayos de crecimiento realizados . . . 27
4.5.1 Problemas presentados con el monitoreo visual . . . 28
4.5.2 Problemas presentados con la medición de descargas parciales . . . 28
4.5.3 Problemas presentados con la resina epóxica . . . 29

5 Análisis de resultados 30
5.1 Análisis preliminar . . . 30
5.2 Métodos de análisis . . . 30
5.2.1 Monitoreo visual . . . 31
5.2.2 Análisis de DP . . . 32

5.2.2.1 PRPD 33
5.3 Muestras de múltiples agujas 33
5.3.1 Separación entre agujas y separación punta-placa 33
5.3.2 Monitoreo visual 36
5.3.2.1 Cruce y ruptura 36
5.3.2.2 Morfología de árboles 37
5.3.2.3 Largo y ancho de árboles 37
5.3.2.4 Diferencias en crecimiento simultaneo con dos y tres agujas 39
5.3.2.4.1 Comparación de largo de árboles en el tiempo 40
5.3.2.5 Efecto del largo de iniciación 40
5.3.3 Análisis de descargas parciales 41
5.3.3.1 PRPD 42
5.3.3.1.1 Patrón general obtenido 42
5.3.3.1.2 PRPD de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz] 42
5.3.3.1.3 PRPD de muestras de dos agujas ensayadas 44
5.3.3.2 Magnitud de carga 45
5.3.3.3 Q_{95} 46
5.4 Muestras de punta - placa curva 49
5.4.1 Monitoreo visual 49
5.4.1.1 Cruce y ruptura 49
5.4.1.2 Formas de árboles 50
5.4.1.3 Largo y ancho de árboles 51
5.4.2 Análisis de descargas parciales 51
5.4.2.1 PRPD 51
5.4.2.1.1 Patrón general obtenido 51
5.4.2.1.2 PRPD de muestras con placa curva 52
5.4.2.2 Carga en el tiempo 53
5.4.2.3 Número de eventos 55
5.4.2.4 Q_{95} 55

6 Conclusiones y Trabajos futuros **57**
6.1 Conclusiones 57
6.1.1 Crecimiento de múltiples árboles eléctricos 57
6.1.2 Probetas con placa curva 59
6.2 Trabajos futuros 60

Referencias **61**

A Hoja de datos **63**
A.1 Probeta Número 01 65
A.2 Probeta Número 02 67
A.3 Probeta Número 03 69
A.4 Probeta Número 04 71
A.5 Probeta Número 05 73
A.6 Probeta Número 06 75
A.7 Probeta Número 07 77
A.8 Probeta Número 08 79
A.9 Probeta Número 09 81
A.10 Probeta Número 10 83
A.11 Probeta Número 11 85
A.12 Probeta Número 12 87
A.13 Probeta Número 13 89
A.14 Probeta Número 14 91
A.15 Probeta Número 15 93
A.16 Probeta Número 16 94
A.17 Probeta Número 17 95
A.18 Probeta Número 18 96
A.19 Probeta Número 19 97
A.20 Probeta Número 20 98

B Hoja de datos PRPD **99**
B.1 Probeta N°03, Muestreo 1 100
B.2 Probeta N°03, Muestreo 2 101
B.3 Probeta N°03, Muestreo 3 102
B.4 Probeta N°03, Muestreo 4 103
B.5 Probeta N°03, Muestreo 5 104
B.6 Probeta N°03, Muestreo 6 105
B.7 Probeta N°05, Muestreo 1 106
B.8 Probeta N°05, Muestreo 2 107
B.9 Probeta N°05, Muestreo 3 108
B.10 Probeta N°05, Muestreo 4 109
B.11 Probeta N°05, Muestreo 5 110
B.12 Probeta N°05, Muestreo 6 111
B.13 Probeta N°08, Muestreo 1 112

B.14 Probeta N°08, Muestreo 2 113
B.15 Probeta N°08, Muestreo 3 114
B.16 Probeta N°08, Muestreo 4 115
B.17 Probeta N°08, Muestreo 5 116
B.18 Probeta N°08, Muestreo 6 117
B.19 Probeta N°12, Muestreo 1 118
B.20 Probeta N°12, Muestreo 2 119
B.21 Probeta N°12, Muestreo 3 120
B.22 Probeta N°12, Muestreo 4 121
B.23 Probeta N°12, Muestreo 5 122
B.24 Probeta N°12, Muestreo 6 123
B.25 Probeta N°15, Muestreo 1 124
B.26 Probeta N°15, Muestreo 2 125
B.27 Probeta N°15, Muestreo 3 126
B.28 Probeta N°15, Muestreo 4 127
B.29 Probeta N°15, Muestreo 5 128
B.30 Probeta N°15, Muestreo 6 129
B.31 Probeta N°18, Muestreo 1 130
B.32 Probeta N°18, Muestreo 2 131
B.33 Probeta N°18, Muestreo 3 132
B.34 Probeta N°18, Muestreo 4 133
B.35 Probeta N°18, Muestreo 5 134
B.36 Probeta N°18, Muestreo 6 135
B.37 Probeta N°19, Muestreo 1 136
B.38 Probeta N°19, Muestreo 2 137
B.39 Probeta N°19, Muestreo 3 138
B.40 Probeta N°19, Muestreo 4 139
B.41 Probeta N°19, Muestreo 5 140
B.42 Probeta N°19, Muestreo 6 141
B.43 Probeta N°20, Muestreo 1 142
B.44 Probeta N°20, Muestreo 2 143
B.45 Probeta N°20, Muestreo 3 144
B.46 Probeta N°20, Muestreo 4 145
B.47 Probeta N°20, Muestreo 5 146
B.48 Probeta N°20, Muestreo 6 147

C Recomendaciones experimentales para probetas con múltiples agujas 148
C.1 Recomendaciones para la fabricación de probetas de múltiples agujas o con placa curva 148
C.2 Recomendaciones para procedimientos de iniciación de probetas de múltiples agujas 150
C.2.1 Preparación de probeta 150
C.2.2 Preparación del circuito 150
C.2.3 Preparación de cámara 151
C.2.4 Proceso de iniciación del árbol 152
C.3 Recomendaciones para procedimientos en ensayos de crecimiento de árboles 153
C.3.1 Preparación de probetas 153
C.3.2 Calibración de Omicron 153
C.3.3 Anotaciones importantes para los ensayos 154

Lista de Tablas

3.1 Resistencias y capacitancias equivalentes utilizadas. 12
3.2 Tiempos de frente y cola resultantes. 12
3.3 Parámetros pasivos usados para el diseño de SC. (Fuente: [1]) 13

4.1 Resultados obtenidos con el primer diseño de probetas utilizado, a frecuencia industrial. 22
4.2 Resultados obtenidos con el primer diseño de probetas utilizado, energizando con un generador de impulso. 22
4.3 Resumen de iniciaciones realizadas. 27
4.4 Resumen de ensayos de crecimiento de árboles eléctricos. 28

5.1 Tiempos de cruce y ruptura de muestras punta-placa curva. 50
5.2 Largos y anchos máximos de árboles en probetas con placa curva, y distancia entre electrodos. 51

A.1 Resumen de probetas iniciadas sin crecimiento simultaneo. 63
A.2 Resumen de probetas exitosas. 64
A.3 Datos de entrada y experimentales de probeta N°01. 65
A.4 Datos de entrada y experimentales de probeta N°02. 67
A.5 Datos de entrada y experimentales de probeta N°03. 69
A.6 Datos de entrada y experimentales de probeta N°04. 71
A.7 Datos de entrada y experimentales de probeta N°05. 73
A.8 Datos de entrada y experimentales de probeta N°06. 75
A.9 Datos de entrada y experimentales de probeta N°07. 77
A.10 Datos de entrada y experimentales de probeta N°08. 79
A.11 Datos de entrada y experimentales de probeta N°09. 81
A.12 Datos de entrada y experimentales de probeta N°10. 83
A.13 Datos de entrada y experimentales de probeta N°11. 85
A.14 Datos de entrada y experimentales de probeta N°12. 87
A.15 Datos de entrada y experimentales de probeta N°13. 89

A.16 Datos de entrada y experimentales de probeta N°14. 91
A.17 Datos de entrada y experimentales de probeta N°15. 93
A.18 Datos de entrada y experimentales de probeta N°16. 94
A.19 Datos de entrada y experimentales de probeta N°17. 95
A.20 Datos de entrada y experimentales de probeta N°18. 96
A.21 Datos de entrada y experimentales de probeta N°19. 97
A.22 Datos de entrada y experimentales de probeta N°20. 98

B.1 Resumen de probetas analizadas por PRPD. 99
B.2 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 1. 100
B.3 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 1. 100
B.4 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 2. 101
B.5 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 2. 101
B.6 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 3. 102
B.7 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 3. 102
B.8 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 4. 103
B.9 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 4. 103
B.10 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 5. 104
B.11 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 5. 104
B.12 Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 6. 105
B.13 Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 6. 105
B.14 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 1. 106
B.15 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 1. 106
B.16 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 2. 107
B.17 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 2. 107
B.18 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 3. 108
B.19 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 3. 108
B.20 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 4. 109
B.21 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 4. 109
B.22 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 5. 110
B.23 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 5. 110
B.24 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 6. 111
B.25 Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 6. 111
B.26 Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 1. 112
B.27 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 1. 112
B.28 Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 2. 113
B.29 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 2. 113

B.30 Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 3. 114
B.31 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 3. 114
B.32 Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 4. 115
B.33 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 4. 115
B.34 Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 5. 116
B.35 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 5. 116
B.36 Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 6. 117
B.37 Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 6. 117
B.38 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 1. 118
B.39 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 1. 118
B.40 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 2. 119
B.41 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 2. 119
B.42 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 3. 120
B.43 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 3. 120
B.44 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 4. 121
B.45 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 4. 121
B.46 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 5. 122
B.47 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 5. 122
B.48 Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 6. 123
B.49 Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 6. 123
B.50 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 1. 124
B.51 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 1. 124
B.52 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 2. 125
B.53 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 2. 125
B.54 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 3. 126
B.55 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 3. 126
B.56 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 4. 127
B.57 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 4. 127
B.58 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 5. 128
B.59 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 5. 128
B.60 Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 6. 129
B.61 Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 6. 129
B.62 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 1. 130
B.63 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 1. 130
B.64 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 2. 131
B.65 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 2. 131

B.66 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 3. 132
B.67 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 3. 132
B.68 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 4. 133
B.69 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 4. 133
B.70 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 5. 134
B.71 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 5. 134
B.72 Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 6. 135
B.73 Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 6. 135
B.74 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 1. 136
B.75 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 1. 136
B.76 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 2. 137
B.77 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 2. 137
B.78 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 3. 138
B.79 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 3. 138
B.80 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 4. 139
B.81 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 4. 139
B.82 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 5. 140
B.83 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 5. 140
B.84 Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 6. 141
B.85 Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 6. 141
B.86 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 1. 142
B.87 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 1. 142
B.88 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 2. 143
B.89 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 2. 143
B.90 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 3. 144
B.91 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 3. 144
B.92 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 4. 145
B.93 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 4. 145
B.94 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 5. 146
B.95 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 5. 146
B.96 Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 6. 147
B.97 Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 6. 147

Lista de Figuras

2.1 Tipos de descargas parciales.(Fuente: [2]). 6
2.2 Ejemplo de PRPD de árbol eléctrico (Fuente: [3]). 7
3.1 Diagramas de probetas fabricadas. 9
3.2 Imagen de dos árboles eléctricos en una probeta con configuración doble punta - placa, tomada en LAT - USM para un ensayo a 14 [kV] y 50 [Hz] (Ver apéndice A.8). 10
3.3 Amplificador Trek modelo 20/20C-HS. 10
3.4 Generador de señales arbitrarias Rigol DG-1022. 10
3.5 Transformador monofásico 10[kVA]. 11
3.6 Placa de datos del transformador. 11
3.7 Modelo para pruebas de impulso a devanados de alta impedancia (Fuente: [4]). . . 11
3.8 Configuración del circuito utilizado para generar impulsos tipo rayo en el laboratorio. 11
3.9 Electrodos de bronce. 12
3.10 Circuito balanceado según norma IEC 60270. (Fuente: [5]) 12
3.11 Circuito de substracción implementado. (Fuente: [1]) 13
3.12 Circuito de substracción real (filtro pasa banda). (Fuente: [1]) 13
3.13 Cámara fotográfica Canon EOS Rebel T6. 15
3.14 Lente macro Canon MP-E 65mm. 15
3.15 Lente Macro Canon EF 100mm. 15
3.16 Extensores Kenko. 15
3.17 MPD600 de equipo Omicron. 15
3.18 MCU502 de equipo Omicron. 15
3.19 Horno para hacer vacío y elevar temperatura. 16
3.20 Sujetador con múltiples agujas. 16
3.21 Probetas con resina, agujas y sujetadores en sostenedor. 17

4.1 Etapas durante un ensayo de árboles eléctricos. 19
4.2 Tubos acrílicos preexistentes. 20

4.3 Electrodo de alta tensión para probeta con múltiples agujas. 20
4.4 Sujetadores de bronce para hasta tres agujas. 20
4.5 Agujas hipodérmicas Terumo. 21
4.6 Base del sostenedor (vista lateral). 21
4.7 Tapa del sostenedor. 21
4.8 Base del sostenedor (vista superior). 21
4.9 Iniciación alimentando una única aguja mediante un conector caimán. 21
4.10 Probeta con daño provocado durante prueba de impulso. 23
4.11 Parte superior del sostenedor con daño provocado durante prueba de impulso. . . 23
4.12 Electrodo delgado de bronce para sujetar una única aguja sin tocar las aledañas, en probeta preparada para su iniciación. 23
4.13 Cateter BD Insyte calibre G18X1.88”. 24
4.14 Moldes para probetas punta-placa curva: (a) Molde externo de robalón (vista superior), (b) Molde externo de robalon (vista lateral), (c) Moldes internos de teflón (vista superior), (d) Moldes internos de teflón (vista lateral). 27

5.1 Campo eléctrico a lo largo del eje X (X = 0 en punta central), a la altura de las puntas de las agujas, y comparación con simulación de referencia de una aguja. . . 31
5.2 Ejemplo de medición utilizando el software GIMP. 32
5.3 Imagen de un árbol durante crecimiento. 32
5.4 Medición de largo y ancho máximo del árbol. 32
5.5 Tiempo de ruptura según separación entre agujas. 34
5.6 Tiempo de ruptura según separación punta-placa. 34
5.7 Tiempo de ruptura del total de muestras. 34
5.8 G32: Muestra sin ondulaciones, pocas burbujas en base, ensayada a 10[kV] y 350[Hz]. 35
5.9 SG39: Muestra con ondulaciones, muchas burbujas en base, resina y agujas, ensayada a 10[kV] y 350[Hz]. 35
5.10 Tiempos de cruce y ruptura según condición de ensayo. 37
5.11 Razón entre tiempos de cruce y ruptura según condición de ensayo. 37
5.12 Tiempos de cruce y ruptura según número de agujas (a 10[kV] y 50[Hz]). 37
5.13 Razón entre tiempos de cruce y ruptura según número de agujas (a 10[kV] y 50[Hz]). 37
5.14 Ejemplos de tipos de árboles encontrados en muestras de múltiples agujas. 38
5.15 Diagrama de caja de largos y anchos máximos según condición de ensayo y número de agujas. 38
5.16 Diagrama de caja de largos y anchos máximos según condición de ensayo y número de agujas, sin árboles inhibidos. 39
5.17 Largo máximo en el tiempo de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz]. 40

5.18 Largo máximo en el tiempo de muestras ensayadas a 14[kV] y 50[Hz]. 40
5.19 Largos de árboles en muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz], con una y dos agujas. 41
5.20 PRPD de probeta N°03 mostrando el patrón típico obtenido. 42
5.21 Comparación de DP de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz]. 43
5.22 Comparación de DP y largos de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz]. 43
5.23 Comparación de DP de muestras ensayadas de dos agujas. 44
5.24 Comparación de DP y largos de muestras ensayadas de dos agujas. 45
5.25 Probeta N°01: Árboles de ramas filamentarias y carga asociada. 46
5.26 Probeta N°02: Árboles de ramas oscuras y carga asociada. 46
5.27 Diagramas de Q_{95} de ensayos a 10[kV] y 50[Hz]. 47
5.28 Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con crecimiento inverso. 47
5.29 Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con ramas oscuras. 48
5.30 Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con crecimiento mixto. 48
5.31 Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles de muestra con árboles variados. 48
5.32 Árboles en probetas con placa curva según condición de ensayo. 50
5.33 PRPD de probetas con placa curva. 52
5.34 Comparación de DP de muestras con placa curva ensayadas. 52
5.35 Comparación de DP y largos de muestras con placa curva ensayadas. 53
5.36 Probeta N°18: Relación entre carga y tipo de árbol. 54
5.37 Probeta N°19: Relación entre carga y tipo de árbol. 54
5.38 Probeta N°20: Relación entre carga y tipo de árbol. 55
5.39 Diagramas Q_{95}. 56
5.40 Largos de árboles en el tiempo. 56

A.1 Iniciaciones en puntas de probeta N°01 al comenzar ensayo. 65
A.2 PRPD en probeta N°01. 66
A.3 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°01. 66
A.4 Carga Q_{95} en probeta N°01. 66
A.5 Crecimiento completo en probeta N°01 (pre-ruptura). 66
A.6 Crecimiento completo en probeta N°01 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 66
A.7 Iniciaciones en puntas de probeta N°02 al comenzar ensayo. 67
A.8 PRPD en probeta N°02. 68
A.9 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°02. 68
A.10 Carga Q_{95} en probeta N°02. 68
A.11 Crecimiento completo en probeta N°02 (pre-ruptura). 68
A.12 Crecimiento completo en probeta N°02 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 68
A.13 Iniciaciones en puntas de probeta N°03 al comenzar ensayo. 69

A.14 PRPD en probeta N°03. 70
A.15 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°03. 70
A.16 Carga Q_{95} en probeta N°03. 70
A.17 Crecimiento completo en probeta N°03 (pre-ruptura). 70
A.18 Crecimiento completo en probeta N°03 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 70
A.19 Iniciaciones en puntas de probeta N°04 al comenzar ensayo. 71
A.20 PRPD en probeta N°04. 72
A.21 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°04. 72
A.22 Carga Q_{95} en probeta N°04. 72
A.23 Crecimiento completo en probeta N°04 (pre-ruptura). 72
A.24 Crecimiento completo en probeta N°04 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 72
A.25 Iniciaciones en puntas de probeta N°05 al comenzar ensayo. 73
A.26 PRPD en probeta N°05. 74
A.27 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°05. 74
A.28 Carga Q_{95} en probeta N°05. 74
A.29 Crecimiento completo en probeta N°05 (pre-ruptura). 74
A.30 Crecimiento completo en probeta N°05 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 74
A.31 Iniciaciones en puntas de probeta N°06 al comenzar ensayo. 75
A.32 PRPD en probeta N°06. 76
A.33 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°06. 76
A.34 Carga Q_{95} en probeta N°06. 76
A.35 Crecimiento completo en probeta N°06 (pre-ruptura). 76
A.36 Crecimiento completo en probeta N°06 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 76
A.37 Iniciaciones en puntas de probeta N°07 al comenzar ensayo. 77
A.38 PRPD en probeta N°07. 78
A.39 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°07. 78
A.40 Carga Q_{95} en probeta N°07. 78
A.41 Crecimiento completo en probeta N°07 (pre-ruptura). 78
A.42 Crecimiento completo en probeta N°07 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 78
A.43 Iniciaciones en puntas de probeta N°08 al comenzar ensayo. 79
A.44 PRPD en probeta N°08. 80
A.45 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°08. 80
A.46 Carga Q_{95} en probeta N°08. 80
A.47 Crecimiento completo en probeta N°08 (pre-ruptura). 80
A.48 Crecimiento completo en probeta N°08 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 80
A.49 Iniciaciones en puntas de probeta N°09 al comenzar ensayo. 81

A.50 PRPD en probeta N°09. 82
A.51 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°09. 82
A.52 Carga Q_{95} en probeta N°09. 82
A.53 Crecimiento completo en probeta N°09 (pre-ruptura). 82
A.54 Crecimiento completo en probeta N°01 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 82
A.55 Iniciaciones en puntas de probeta N°10 al comenzar ensayo. 83
A.56 PRPD en probeta N°10. 84
A.57 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°10. 84
A.58 Carga Q_{95} en probeta N°10. 84
A.59 Crecimiento completo en probeta N°10 (pre-ruptura). 84
A.60 Crecimiento completo en probeta N°10 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 84
A.61 Iniciaciones en puntas de probeta N°11 al comenzar ensayo. 85
A.62 PRPD en probeta N°11. 86
A.63 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°11. 86
A.64 Carga Q_{95} en probeta N°11. 86
A.65 Crecimiento completo en probeta N°11 (pre-ruptura). 86
A.66 Crecimiento completo en probeta N°11 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 86
A.67 Iniciaciones en puntas de probeta N°12 al comenzar ensayo. 87
A.68 PRPD en probeta N°12. 88
A.69 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°12. 88
A.70 Carga Q_{95} en probeta N°12. 88
A.71 Crecimiento completo en probeta N°12 (pre-ruptura). 88
A.72 Crecimiento completo en probeta N°12 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 88
A.73 Iniciaciones en puntas de probeta N°13 al comenzar ensayo. 89
A.74 PRPD en probeta N°13. 90
A.75 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°13. 90
A.76 Carga Q_{95} en probeta N°13. 90
A.77 Crecimiento completo en probeta N°13 (pre-ruptura). 90
A.78 Crecimiento completo en probeta N°13 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 90
A.79 Iniciaciones en puntas de probeta N°14 al comenzar ensayo. 91
A.80 PRPD en probeta N°14. 92
A.81 Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°14. 92
A.82 Carga Q_{95} en probeta N°14. 92
A.83 Crecimiento completo en probeta N°14 (pre-ruptura). 92
A.84 Crecimiento completo en probeta N°14 (Primer plano, instante pre-ruptura). . . . 92
A.85 Probeta N°15: Imágenes. 93

A.86 Probeta N°15: Mediciones de descargas parciales. 93
A.87 Probeta N°16: Imágenes. 94
A.88 Probeta N°16: Mediciones de descargas parciales. 94
A.89 Probeta N°17: Imágenes. 95
A.90 Probeta N°17: Mediciones de descargas parciales. 95
A.91 Probeta N°18: Imágenes. 96
A.92 Probeta N°18: Mediciones de descargas parciales. 96
A.93 Probeta N°19: Imágenes. 97
A.94 Probeta N°19: Mediciones de descargas parciales. 97
A.95 Probeta N°20: Imágenes. 98
A.96 Probeta N°20: Mediciones de descargas parciales. 98

B.1 PRPD probeta N°03, muestreo 1. 100
B.2 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 1. 100
B.3 PRPD probeta N°03, muestreo 2. 101
B.4 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 2. 101
B.5 PRPD probeta N°03, muestreo 3. 102
B.6 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 3. 102
B.7 PRPD probeta N°03, muestreo 4. 103
B.8 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 4. 103
B.9 PRPD probeta N°03, muestreo 5. 104
B.10 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 5. 104
B.11 PRPD probeta N°03, muestreo 6. 105
B.12 Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 6. 105
B.13 PRPD probeta N°05, muestreo 1. 106
B.14 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 1. 106
B.15 PRPD probeta N°05, muestreo 2. 107
B.16 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 2. 107
B.17 PRPD probeta N°05, muestreo 3. 108
B.18 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 3. 108
B.19 PRPD probeta N°05, muestreo 4. 109
B.20 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 4. 109
B.21 PRPD probeta N°05, muestreo 5. 110
B.22 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 5. 110
B.23 PRPD probeta N°05, muestreo 6. 111
B.24 Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 6. 111
B.25 PRPD probeta N°08, muestreo 1. 112

B.26 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 1. 112
B.27 PRPD probeta N°08, muestreo 2. 113
B.28 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 2. 113
B.29 PRPD probeta N°08, muestreo 3. 114
B.30 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 3. 114
B.31 PRPD probeta N°08, muestreo 4. 115
B.32 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 4. 115
B.33 PRPD probeta N°08, muestreo 5. 116
B.34 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 5. 116
B.35 PRPD probeta N°08, muestreo 6. 117
B.36 Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 6. 117
B.37 PRPD probeta N°12, muestreo 1. 118
B.38 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 1. 118
B.39 PRPD probeta N°12, muestreo 2. 119
B.40 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 2. 119
B.41 PRPD probeta N°12, muestreo 3. 120
B.42 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 3. 120
B.43 PRPD probeta N°12, muestreo 4. 121
B.44 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 4. 121
B.45 PRPD probeta N°12, muestreo 5. 122
B.46 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 5. 122
B.47 PRPD probeta N°12, muestreo 6. 123
B.48 Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 6. 123
B.49 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 1. 124
B.50 PRPD probeta N°15, muestreo 1. 124
B.51 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 2. 125
B.52 PRPD probeta N°15, muestreo 2. 125
B.53 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 3. 126
B.54 PRPD probeta N°15, muestreo 3. 126
B.55 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 4. 127
B.56 PRPD probeta N°15, muestreo 4. 127
B.57 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 5. 128
B.58 PRPD probeta N°15, muestreo 5. 128
B.59 Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 6. 129
B.60 PRPD probeta N°15, muestreo 6. 129
B.61 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 1. 130

B.62 PRPD probeta N°18, muestreo 1. 130
B.63 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 2. 131
B.64 PRPD probeta N°18, muestreo 2. 131
B.65 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 3. 132
B.66 PRPD probeta N°18, muestreo 3. 132
B.67 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 4. 133
B.68 PRPD probeta N°18, muestreo 4. 133
B.69 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 5. 134
B.70 PRPD probeta N°18, muestreo 5. 134
B.71 Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 6. 135
B.72 PRPD probeta N°18, muestreo 6. 135
B.73 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 1. 136
B.74 PRPD probeta N°19, muestreo 1. 136
B.75 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 2. 137
B.76 PRPD probeta N°19, muestreo 2. 137
B.77 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 3. 138
B.78 PRPD probeta N°19, muestreo 3. 138
B.79 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 4. 139
B.80 PRPD probeta N°19, muestreo 4. 139
B.81 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 5. 140
B.82 PRPD probeta N°19, muestreo 5. 140
B.83 Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 6. 141
B.84 PRPD probeta N°19, muestreo 6. 141
B.85 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 1. 142
B.86 PRPD probeta N°20, muestreo 1. 142
B.87 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 2. 143
B.88 PRPD probeta N°20, muestreo 2. 143
B.89 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 3. 144
B.90 PRPD probeta N°20, muestreo 3. 144
B.91 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 4. 145
B.92 PRPD probeta N°20, muestreo 4. 145
B.93 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 5. 146
B.94 PRPD probeta N°20, muestreo 5. 146
B.95 Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 6. 147
B.96 PRPD probeta N°20, muestreo 6. 147

Nomenclatura

- **AC:** *Altern current.* Corriente alterna, o exitación alterna en general.
- **RMS:** *Root Mean Square.* Valor eficaz.
- **DP:** Descarga parcial, o descargas parciales.
- **PRPD:** *Phase-resolved Partial Discharge.* Análisis resuelto en fase de descargas parciales.
- **LAT-USM:** Laboratorio de alta tensión, Universidad Santa María.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Los estudios de descargas parciales (DP) en aislamientos son fundamentales para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico. Estas se dividen en DP superficiales, corona e internas [6], siendo estas últimas las más difíciles de diagnosticar al carecer de señales visibles o audibles, lo que puede llevar a fallas catastróficas en equipos de potencia (transformadores, generadores, etc.) asociadas a la degradación del aislamiento, producto del crecimiento de árboles eléctricos en este.

Por simplicidad, al estudiarse el crecimiento de árboles eléctricos en muestras de laboratorio, se considera típicamente un único par de probetas (por ejemplo, punta - placa) que representan un único defecto y forman un solo crecimiento dentro de la resina aislante de muestra [7]. Esto lleva a ignorar casos más complejos que pueden ocurrir en la realidad, como lo es la aparición de múltiples defectos cercanos en un mismo aislamiento o la aparición de estos en aislamiento con distintas geometrías. Por esta razón, se vuelve de interés el estudiar la formación de árboles eléctricos, de manera simultánea y próxima, a partir de múltiples agujas, así como el uso de configuraciones de probetas inusuales.

El presente trabajo de memoria busca comparar el crecimiento de árboles eléctricos al existir una, dos y tres agujas alineadas en una misma probeta, variándose la tensión aplicada, la frecuencia solicitada y la distancia de separación entre las agujas, para lo cual es necesario diseñar y poner a prueba probetas que representen de estos casos. En caso de encontrarse diferencias significativas, el crecimiento simultáneo de árboles eléctricos podría ser una nueva área de interés para estudios posteriores. Adicionalmente, se incluyen pruebas con probeta especiales con electrodos de punta-placa curva, de forma que la distancia desde la punta a cualquier punto de la placa sea aproximadamente la misma, pudiéndose estudiar qué efectos tendría esto en las descargas parciales y árbol eléctrico. Esto es interesante estudiar por el hecho de haber aislamientos de simetría cilíndrica, como son los cables de alta tensión.

El método de interpretación de descargas parciales de fase resuelta (PRPD) es uno de los más utilizados, y se tiene experiencia con él en el LAT – USM [2]. Este método compara gráficamente la magnitud y cantidad de pulsos de DP y los compara con patrones conocidos, por lo que será de gran ayuda a la hora de interpretar los resultados obtenidos. Los árboles eléctricos que se creen durante las pruebas serán también monitoreados de manera visual.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Analizar el crecimiento de árboles eléctricos a distintas tensiones y frecuencias de excitación en laboratorio, con dos y tres agujas de forma simultánea, a través de monitoreo visual y la medición de descargas parciales.

1.2.2 Objetivos específicos:

1. Crear probetas para crecimiento de múltiples árboles eléctricos en laboratorio y el caso especial de una placa curva.

2. Implementar mejoras al sistema de monitoreo y medición de descargas parciales para habilitarlo al caso particular de estudio mediante considerando los requerimientos actuales y sugerencias ya existentes.

3. Analizar la interdependencia de los múltiples árboles eléctricos, comparando los resultados obtenidos con el crecimiento iniciado por una sola aguja en las mismas condiciones.

1.3 Alcance

El presente trabajo de memoria pretende determinar si existen variaciones significativas en el crecimiento de árboles eléctricos bajo condiciones geométricas distintas a las habituales, ya sea si múltiples de estos ocurren de forma simultánea, o si se desarrollan en geometrías curvas. Resultados positivos, podrían iniciar nuevas áreas de estudio en el tema de árboles eléctricos.

1.4 Estructura de la tesis

La presente memoria cuenta con las siguientes secciones:

- **Capítulo 1:** Se contextualiza el trabajo y se entregan los objetivos de este.
- **Capítulo 2:** Se presenta el marco teórico y estado del arte.
- **Capítulo 3:** Se proponen los diseños de probetas con múltiples agujas y de una aguja con placa curva a utilizar. Luego se muestran los equipos involucrados en este trabajo. Finalmente, se presenta el procedimiento de fabricación de probetas a utilizarse.
- **Capítulo 4:** Se presentan los diseños puestos a prueba, y las técnicas utilizadas para su iniciación. Luego, se resumen los ensayos realizados y se discuten problemas encontrados durante este proceso.
- **Capítulo 5:** Se analizan los resultados obtenidos para muestras con múltiples agujas y muestras con placa curva, tanto por monitoreo visual como por PRPD, comparando estos a los esperables en muestras de una aguja con placa plana.
- **Capítulo 6:** Se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Marco general

Asegurar la confiabilidad y fiabilidad del suministro eléctrico es de suma importancia. Con este fin, diagnosticar y entender el estado del aislamiento eléctrico en los equipos es vital. En equipos de alta tensión, los dieléctricos utilizados son variados tanto en tipos como usos, incluyendo resinas epóxicas, polietileno y papel impregnado en aceite, ya sea en generadores, conductores o transformadores. Todos estos, se encuentran sometidos a esfuerzos eléctricos, mecánicos, ambientales y térmicos constantemente, lo cual va degradando sus propiedades y, por consiguiente, mermando su vida útil. Por otro lado, la presencia de pequeñas vacuolas (y otras imperfecciones) en aislación polimérica es inevitable, incluso en materiales fabricados con el mayor cuidado [8], las que pueden afectar sus propiedades dieléctricas e incluso aumentar estos procesos de degradación. Esto puede llevar a que ocurra una falla catastrófica, provocando la interrupción del suministro eléctrico.

Tanto la degradación de los materiales aislantes como la presencia de imperfecciones en estos, trae como consecuencia la aparición de campos eléctricos elevados en magnitud, lo que provoca el fenómeno de descargas parciales internas. La actividad de DP en un aislante puede provocar daño progresivo en este a través de un esfuerzo dieléctrico llamado árbol eléctrico, por su forma.

Al estudiarse este fenómeno en laboratorios, se consideran típicamente probetas de resina epóxica con electrodos punta - placa como muestras representativas [7]. Esto reduce el fenómeno a un único defecto, representado por una aguja, y por tanto un único crecimiento de árbol eléctrico, hacia una placa aterrizada, reduciendo la realidad a un caso simplificado.

La presente memoria busca ampliar el alcance de este tipo de investigaciones, estudiando nuevos diseños de probetas que representen defectos más complejos. En particular, como se ve afectado el crecimiento de árboles eléctricos al existir múltiples de estos a poca distancia en un mismo aislamiento, y el cómo se ve afectado el crecimiento de un árbol eléctrico cuando en lugar de utilizar una placa plana como electrodo aterrizado, se utiliza una placa curva semicilíndrica. Con este fin,

se considera diseñar y poner a prueba dichas probetas, comparando luego su comportamiento a las tradicionales, tanto mediante monitoreo visual de los árboles eléctricos resultantes, como por PRPD.

El resultado final de este trabajo busca, por tanto, determinar si el estudio de estas condiciones más complejas es de interés como futuras áreas de estudio dé árboles eléctricos, en la búsqueda de más certeros y eficaces diagnósticos del estado del aislamiento de equipos eléctricos, que lleven a tener un sistema de potencia más confiable.

2.2 Descargas parciales

Existen en la literatura, múltiples definiciones de descargas parciales. En particular, la norma IEC-60270:2001 las define, traducida al español, como "una descarga eléctrica localizada que solo involucra parcialmente el aislamiento entre conductores y las cuales pueden o no ocurrir adyacente al conductor" [5].

La ocurrencia de DP se puede entender como un fenómeno estocástico, lo cual se respalda en que los procesos necesarios para que una descarga se desarrolle son inherentemente estocásticos [9], y dependen de la emisión de electrones iniciadores desde el cátodo, y por lo tanto, un tiempo de retraso ocurre entre que la tensión de ignición sea alcanzada e inicie una avalancha de electrones. En este proceso, se pueden describir tres estados característicos que ocurren a lo largo de su desarrollo que, aunque en la literatura se presentan distintos nombres para estos estados y mecanismos, son llamados: *streamer*, Townsend y *pitting* . En el primer estado, llamado *streamer*, existe una concentración de carga por un alto campo eléctrico, el cual lleva a descargas con una densidad de energía muy alta. En este estado, las DP medidas son pulsos de corriente muy rápidos del orden de los nanosegundos, con valores en el orden de 10-100 [mA] y con una ocurrencia dentro de los 10 a 60 minutos iniciales de actividad. El segundo estado, llamado Townsend, es una sucesión de ionizaciones de las moléculas en el material por electrones libres, las cuales se van generando en el mismo proceso, llevando así a una avalancha autosostenida. Es un proceso más lento que el anterior y en el que disminuye la amplitud de las corrientes registradas hasta el orden de []μA], pero la cantidad de descargas aumenta a decenas por microsegundo. Finalmente se llega al último estado, llamado *pitting*, en el que el aislante se encuentra cerca de la falla catastrófica [10].

2.2.1 Tipos de DP

Las DP pueden ser clasificadas en tres tipos según origen: superficiales, corona e internas [6]. Las del tipo superficiales aparecen entre dieléctricos, como puede ser entre el aire y la superficie de un aislador, al encontrar un camino de mayor conducción debido a la presencia de humedad o

contaminación, lo que provoca perdida en su eficacia. Esta se da en aisladores aéreos, terminales de cables y en la superficie de los devanados de motores y transformadores. Las de tipo corona son descargas que se producen normalmente en electrodos que tengan zonas puntiagudas o afiladas, las que generan una concentración de campo eléctrico por la tensión sometida. Estas forman un halo luminoso alrededor de los conductores de AT en forma de corona. Por último, las de tipo internas se producen al interior de aislantes del tipo sólido o líquido, en cavidades generalmente microscópicas que poseen una rigidez dieléctrica menor al material. Se les considera el tipo de descarga más dañina para los equipos eléctricos, y estas incluyen la arborización eléctrica. Estos tres tipos de descargas parciales, incluyendo ambas formas de DP internas en sólidos, se pueden ver en la figura 2.1.

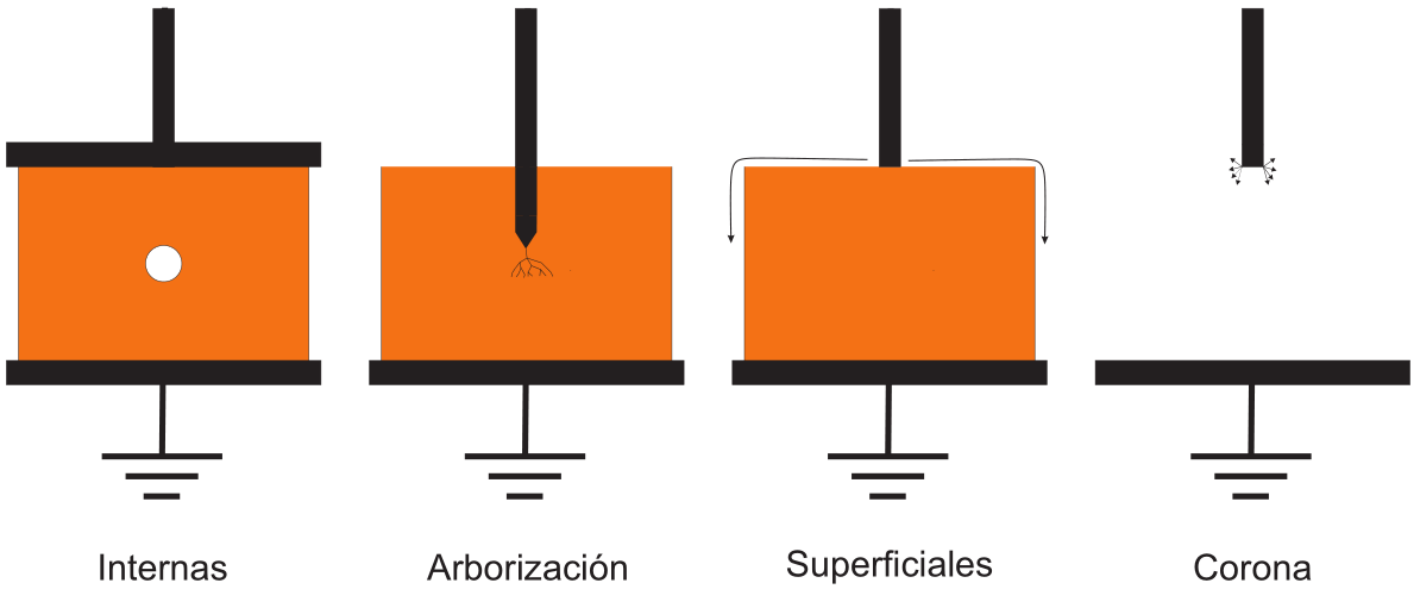


Figura 2.1: Tipos de descargas parciales.(Fuente: [2]).

2.3 PRPD

El análisis resuelto en fase, o PRPD, por sus siglas en inglés, es el método descriptivo para analizar descargas parciales más clásico y robusto, tanto para clasificación y diagnóstico de aislamiento. Se basa en caracterizar los pulsos de descarga por medio de su carga y fase de ocurrencia, para luego ubicarlos bajo un mismo ciclo AC de referencia (ver figura 2.2), es decir, a cada pulso se le calcula su valor de carga y este es ubicado como un punto de valor específico en [pC] o [mV], en su fase de ocurrencia.

2.4 Revisión bibliográfica

Dado que esta memoria trata de un nuevo tipo de probetas para estudios de árboles eléctricos, no se encontraron investigaciones similares ni menciones en la literatura.

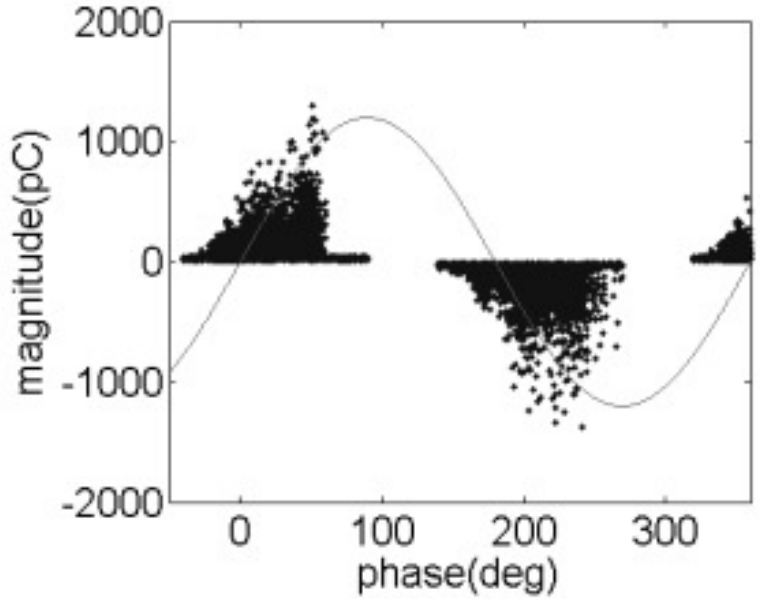


Figura 2.2: Ejemplo de PRPD de árbol eléctrico (Fuente: [3]).

Al ampliar la búsqueda a otras áreas, se encontró únicamente un *paper* que trata del campo eléctrico en múltiples agujas, titulado "The Effects of Electric Field on the Multijet Electrospinning Process and Fiber Morphology" [11]. En este *paper*, se trata el tema del uso de múltiples agujas en sistemas de hilado de microfibras, y su funcionamiento teórico al compararlo a sistemas de una aguja utilizados típicamente en investigaciones. Este tipo de máquina utiliza agujas separadas a distancias iguales o superiores a 10[mm] entre sí y hacia el electrodo de tierra, con alimentación continua de hasta 15[kV], por lo que se tienen solo algunas similitudes al caso de interés en esta memoria, con la diferencia de mayor importancia en el uso de corriente continua en lugar de alterna. En dicho trabajo se concluye que la presencia de múltiples agujas disminuye el campo eléctrico en cada una, en comparación a una única aguja, y en particular, en el caso de tres agujas, el campo en la aguja central se ve significativamente inhibido.

Capítulo 3

Metodología experimental

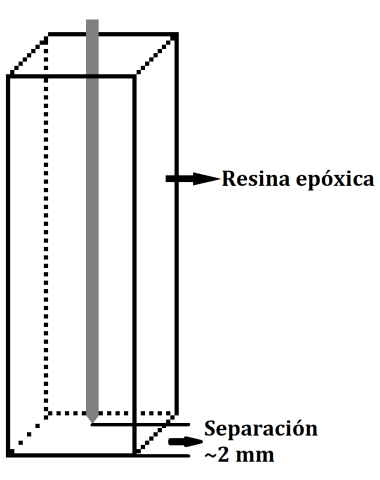
3.1 Probetas de ensayo

Para poder llevar a cabo los ensayos de crecimiento de árboles eléctricos competentes a esta memoria, se fabricaron probetas de resina epóxica, con agujas hipodérmicas como electrodos. Estas probetas se dividen en cuatro tipos, según la configuración de electrodos utilizada:

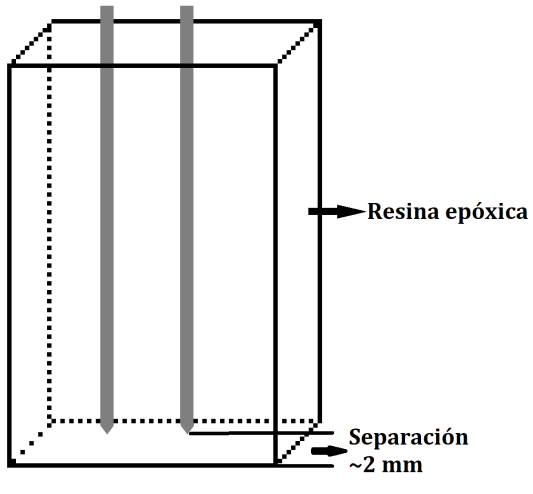
1. Punta - placa: La configuración típica para este tipo de ensayos (figura 3.1a).
2. Doble punta - placa: dos electrodos de punta alimentados a una misma tensión y paralelos contra un electrodo de placa (figura 3.1b).
3. Triple punta - placa: Tres electrodos de punta alimentados a una misma tensión y paralelos contra un electrodo de placa (figura 3.1c).
4. Punta - placa curva: Un electrodo de punta y un electrodo de placa semicilíndrico, con una distancia de punta a cualquier punto de la placa equivalente (figura 3.1d).

El uso de resina epóxica como material para la fabricación de probetas, obedece que este material polimérico es un muy buen dieléctrico, con excelentes propiedades mecánicas y adhesivas, alta estabilidad térmica, buena resistencia química, a la corrosión, al impacto y al choque térmico [12]. La simpleza de su uso, y en el caso de la resina Mepox 1124 UV utilizada en este caso, su transparencia, son otras propiedades de interés para este trabajo.

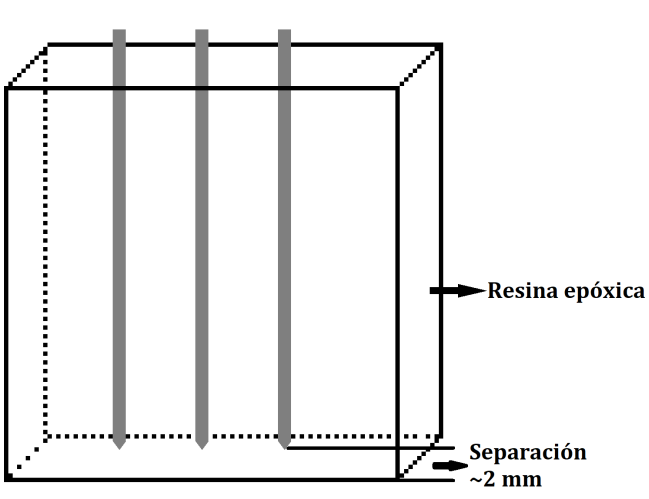
Por otro lado, las agujas hipodérmicas han sido utilizadas para este propósito en otras memorias realizadas en el LAT-USM con resultados positivos [1]. Si bien no presentan una calidad en su punta comparable a la de agujas de precisión, utilizadas en otros casos, su bajo costo, de la mano a su tasa de efectividad en los ensayos, se consideró aceptable para este estudio. Este tipo de agujas, de acero inoxidable, actúan como los electrodos de punta en las distintas configuraciones utilizadas.



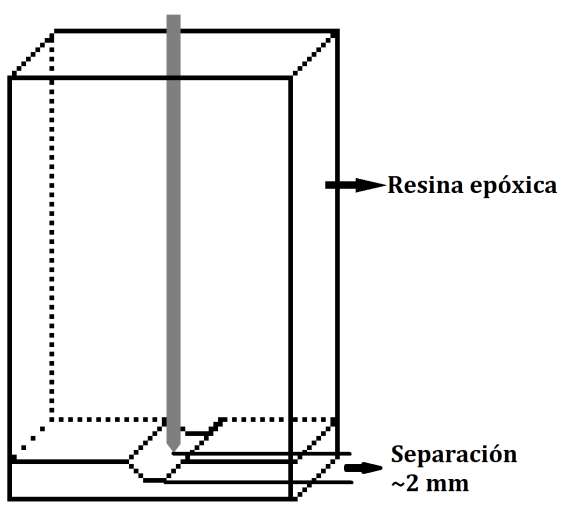
(a) Punta - placa.



(b) Doble punta - placa.



(c) Triple punta - placa.



(d) Punta - placa curvo.

Figura 3.1: Diagramas de probetas fabricadas.

3.2 Banco de pruebas

Los bancos de pruebas utilizados para este trabajo son adaptaciones del desarrollado en una memoria de titulación en el LAT-USM [1] y mejorado en trabajos posteriores [2]. En términos generales, el banco de pruebas consta de cuatro secciones: Generación de alta tensión, área de ensayo, equipos de medición y equipos de monitoreo.

3.2.1 Generación de Alta Tensión

Por motivos de fuerza mayor, que se discuten más adelante, se utilizaron tres distintas formas de generación de alta tensión durante esta memoria.

3.2.1.1 Amplificador Trek

El banco de pruebas fue diseñado considerando la presencia de un amplificador de alta tensión de la marca Trek modelo 20/20C-HS con el que es posible amplificar por 2000 una señal de entrada,

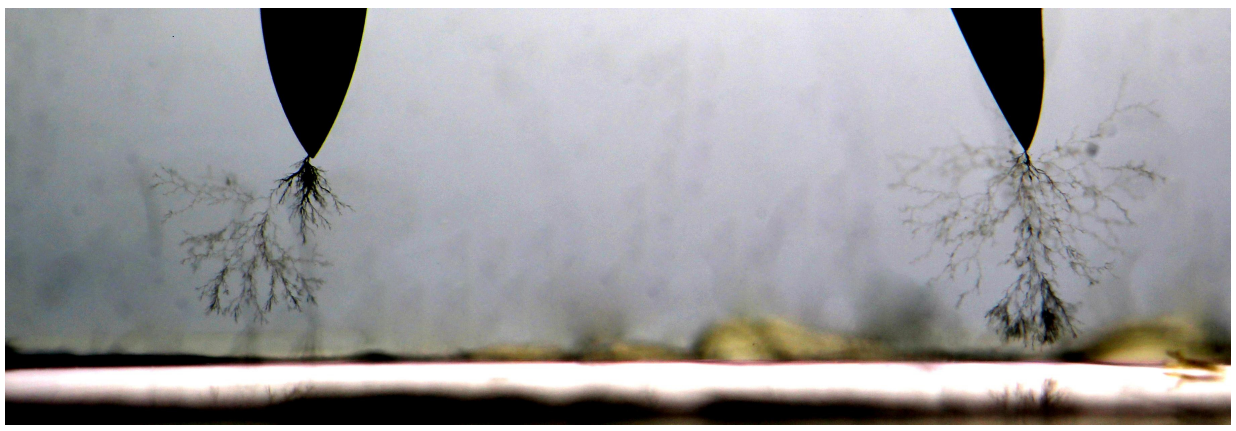


Figura 3.2: Imagen de dos árboles eléctricos en una probeta con configuración doble punta - placa, tomada en LAT - USM para un ensayo a 14 [kV] y 50 [Hz] (Ver apéndice A.8).

alcanzando hasta los 14 $[kV_{rms}]$, para las señales sinusoidales utilizadas en esta oportunidad.

La señal de entrada fue obtenida en cada caso mediante el uso de un generador de señales arbitrarias de la marca Rigol modelo DG-1022.

Para limitar la corriente en la ruptura y proteger los equipos de medición de descargas, se utilizó una resistencia de agua de aproximadamente 600-1000 [kΩ].



Figura 3.3: Amplificador Trek modelo 20/20C-HS.



Figura 3.4: Generador de señales arbitrarias Rigol DG-1022.

3.2.1.2 Transformador

Debido a reparaciones requeridas en el amplificador Trek, previo a iniciar este trabajo, este no estuvo disponible en el laboratorio. Por esta razón, durante los primeros ensayos se utilizó un transformador de potencia 10 [kVA], de la marca Rhona, alimentado mediante un autotransformador variable (en la figura 3.5). Esta configuración permitió alcanzar mayores tensiones que el amplificador Trek, llegando hasta a 20$[kV_{rms}]$, pero sin la posibilidad de variar la frecuencia.

3.2.1.3 Generador de impulsos

De forma experimental, se utilizó un impulso tipo rayo 1.2$[\mu s]$/50$[\mu s]$, haciendo uso del generador de impulsos Haefely 200[kV], 0,5 [kJ] y su divisor capacitivo, siguiendo el modelo de la figura 3.7



Figura 3.5: Transformador monofásico 10[kVA].



Figura 3.6: Placa de datos del transformador.

[4], como se ve en la figura 3.8.

Puesto que este sería realizado simplemente a modo de prueba para ver el comportamiento de las probetas ante esta condición, se utilizó un circuito con tiempos de frente y cola solo cercanos al deseado, cuyos datos se incluyen en las tablas 3.1 y 3.2.

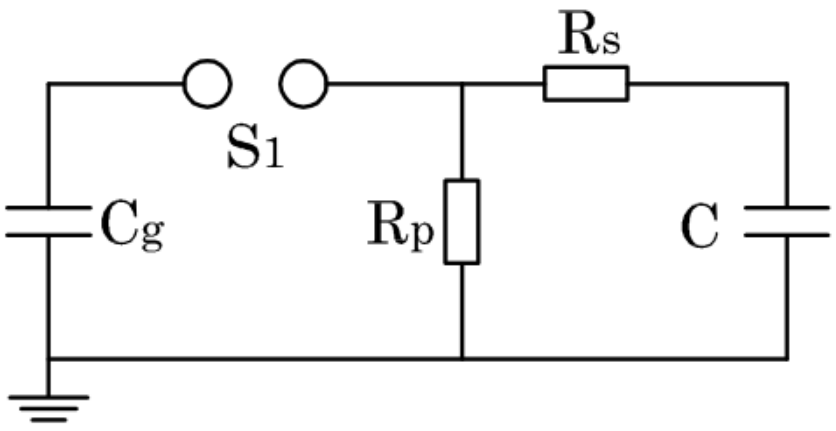


Figura 3.7: Modelo para pruebas de impulso a devanados de alta impedancia (Fuente: [4]).

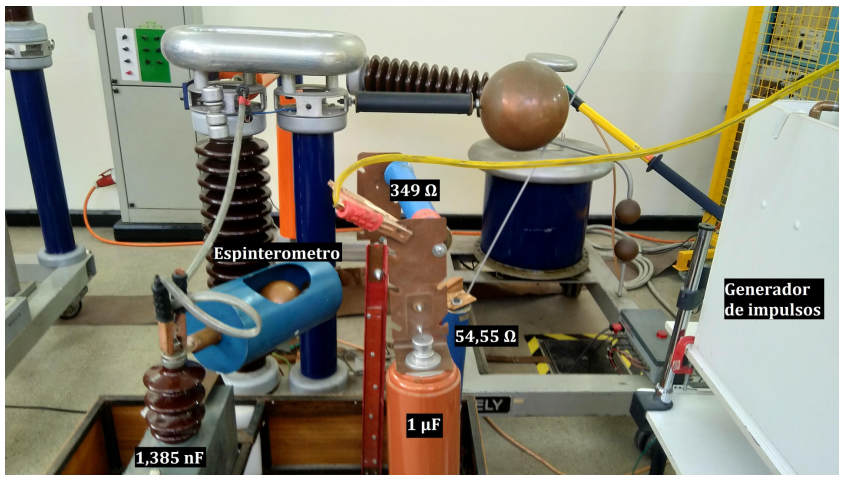


Figura 3.8: Configuración del circuito utilizado para generar impulsos tipo rayo en el laboratorio.

3.2.2 Área de ensayo

Para la iniciación y crecimiento de un árbol eléctrico, se debe aplicar alta tensión a las probetas fabricadas. Para esto, es necesario aterrizar un electrodo de la probeta, mientras se energiza los demás. Además, esta probeta debe estar fija para poder monitorearla visualmente. En la figura 3.9a se ve un electrodo de alta tensión capaz de alimentar múltiples electrodos de punta de manera simultánea. Sus bordes redondeados buscan reducir la amplificación de campo eléctrico, evitando las descargas corona. Por otra parte, en la figura 3.9b se ve un electrodo de tierra que permite la conexión de todo el electrodo de placa de las probetas, y en la figura 3.9c un adaptador para las

Rs [Ω]	349
Rp [Ω]	54.55
Cg [nF]	1.385
C [μF]	1

Tabla 3.1: Resistencias y capacitancias equivalentes utilizadas.

Tiempo de frente [μs]	1.448
Tiempo de cola [μs]	38.235

Tabla 3.2: Tiempos de frente y cola resultantes.

probetas con base curva, de forma de aterrizar únicamente esa zona.



(a) Electrodo de múltiples agujas.

(b) Electrodo de conexión a tierra.

(c) Adaptador de conexión a tierra curvo.

Figura 3.9: Electrodos de bronce.

Siguiendo las sugerencias presentes en la norma IEC 60270, se conecta en paralelo una probeta con punta redonda libre de descargas, con capacidades dentro del mismo orden que las muestras a ensayar, a fin de balancear el circuito (en la figura 3.10)[5]. Otra ventaja de este circuito paralelo es su uso como parte de un circuito de substracción de señales de ruido (en la figura 3.11).

Figura 3.10: Circuito balanceado según norma IEC 60270. (Fuente: [5])

Las capacidades C_a y C_k presentes en la figura 3.10 deben ser similares para que el circuito funcione. A pesar de esto, en el caso de esta investigación se decidió mantener la probeta libre de descargas utilizada en otros casos, en lugar de fabricar nuevas probetas con dos y tres agujas, con distintas separaciones. En futuros estudios, en caso de realizarse, es de suma importancia el corregir esta simplificación.

El desarrollo e implementación del circuito de substracción utilizado fue realizado en una investigación previa a este trabajo [1], donde se detallan los componentes del circuito utilizado.

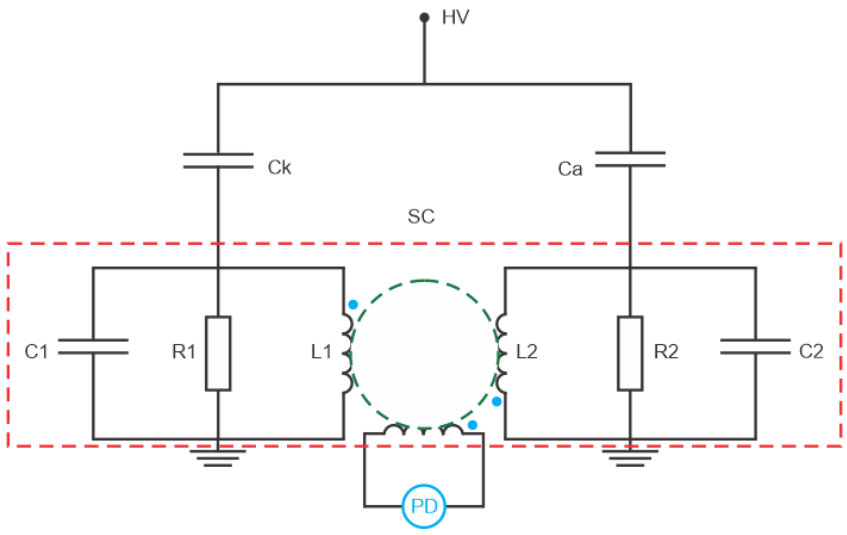


Figura 3.11: Circuito de substracción implementado. (Fuente: [1])

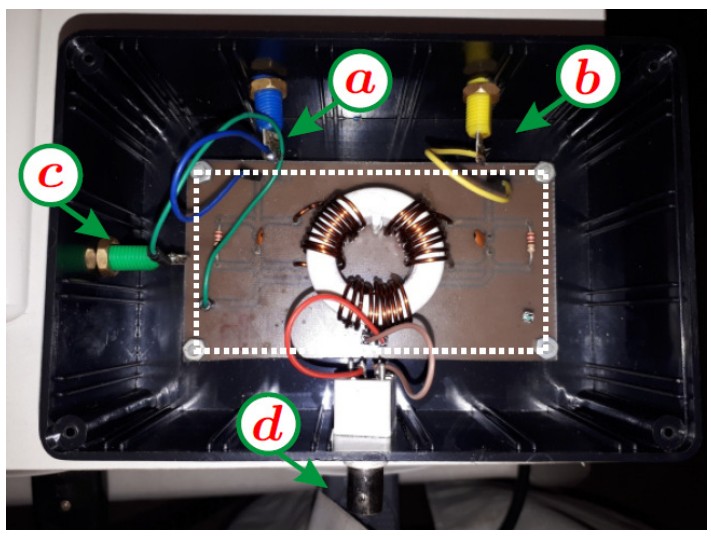


Figura 3.12: Circuito de substracción real (filtro pasa banda). (Fuente: [1])

En la figura 3.11 se muestran los elementos:

- C_k: Probeta libre de descargas.
- C_a: Probeta de ensayo.
- C_1: Condensador 1 de la probeta libre de descargas.
- R_1 Resistencia 1 de la probeta libre de descargas.
- L_1: Inductancia 1 de la probeta libre de descargas.
- C_2 Condensador 2 de la probeta de ensayo.
- R_2 Resistencia 2 de la probeta de ensayo.
- L_2: Inductancia 2 de la probeta de ensayo.
- PD: Medidor de descargas Omicron MPD600.

Elemento	Valor
Condensador (C_1-C_2)	10 [pF]
Resistencia (R_1-R_2)	180 [Ω]
Inductancia (L_1-L_2)	625 [μH]

Tabla 3.3: Parámetros pasivos usados para el diseño de SC. (Fuente: [1])

En la figura 3.12 se indican cuatro puntos, donde (a) es la salida de la probeta libre de descargas, (b) es la salida de la probeta ensayada, (c) es la conexión a tierra y (d) es la salida de la señal de descargas que luego se mide con el equipo Omicron.

Finalmente, y para evitar descargas superficiales durante el ensayo, se sumergen ambas probetas en un tanque con silicona. Esta silicona puede previamente pasar por un proceso de secado para extraer la humedad existente (12 horas a 60[°C]).

3.2.3 Equipos de medición

En esta investigación, se midieron descargas parciales utilizando el equipo Omicron MPD600, y se adquirieron imágenes durante el proceso de crecimiento de árboles.

3.2.3.1 Adquisición de imágenes

Este proceso se llevó a cabo utilizando una cámara fotográfica marca Canon, modelo EOS Rebel T6 (en la figura 3.13). Se utilizó en un principio un lente macro Marca Canon Modelo MP-E 65mm f/2.8 1-5x Macro Photo (en la figura 3.14), pero dadas sus características, no es posible observar todos los electrodos de punta de forma simultánea, por lo que su uso se redujo solo a los casos con un único electrodo de punta. Para los casos de múltiples agujas, se utilizó un lente macro Marca Canon Modelo EF 100mm f/2.8L Macro IS USM (en la figura 3.15), el cual permite un mayor ángulo de visión, pero una menor calidad final en la imagen. Adicionalmente, se utilizaron tres extensores de la marca Kenko, de 12mm, 20mm y 36mm (en la figura 3.16).

3.2.3.2 Medición de descargas parciales

La medición de descargas parciales se llevó a cabo utilizando el equipo Omicron MPD600, el cual es un equipo de adquisición y análisis de datos, capaz de detectar, grabar y analizar eventos de descargas parciales en muchas aplicaciones. Este equipo, se conecta a la unidad MCU502, y esta a su vez a un PC, donde el software integrado MPD/MI visualiza y analiza las descargas parciales en tiempo real, además de permitir la modificación de los parámetros del sistema y opciones de análisis. Los equipos MPD600 y MCU502 se muestran en las figuras 3.17 y 3.18.

3.2.4 Zona de monitoreo

Para el monitoreo de los ensayos, se dispone de equipos monitoreos en una zona de seguridad. En esta zona se incluyen un PC para controlar las mediciones obtenidas por el equipo Omicron, la alimentación al equipo Trek y el disparo de la cámara fotográfica, además del generador Rigol y un osciloscopio de monitoreo.



Figura 3.13: Cámara fotográfica Canon EOS Rebel T6.



Figura 3.14: Lente macro Canon MP-E 65mm.



Figura 3.15: Lente Macro Canon EF 100mm.



Figura 3.16: Extensores Kenko.



Figura 3.17: MPD600 de equipo Omicron.



Figura 3.18: MCU502 de equipo Omicron.

3.3 Procedimiento de fabricación de probetas

Se adaptó el procedimiento para la fabricación de probetas utilizado por otros memoristas con anterioridad [2]. A pesar de las diferencias entre los distintos diseños de probetas ensayados, este procedimiento no recibió modificaciones significativas a lo largo de la memoria.

1. Retirar las agujas hipodérmicas del resto de sus respectivos cateteres, intentando preservar el mayor largo posible, y teniendo cuidado de no dañar la punta.

2. Dejar las agujas en un plato Petri, sumergidas en acetona, durante al menos 30 minutos.

3. Preparar resina epóxica, mezclando los componentes A y B a razón de 2:1 en peso, utilizando un agitador, hasta lograr un resultado homogéneo.

4. Aplicar vacío a la mezcla de resina epóxica, con el fin de desgasificarla, minimizando las burbujas de aire al interior del material aislante.



Figura 3.19: Horno para hacer vacío y elevar temperatura.



Figura 3.20: Sujetador con múltiples agujas.

5. Limpiar y preparar los tubos acrílicos a utilizarse. Un extremo debe quedar sellado, utilizando una cubierta plástica y cinta adhesiva.

6. Determinar la distancia de separación entre agujas y base, eligiendo el separador adecuado.

7. Colocar el separador temporalmente en cada uno de los tubos de acrílico, y ajustar así las agujas en los sujetadores a la distancia adecuada. Cada aguja debe previamente limpiarse con papel libre de pelusa.

8. Verter la resina epóxica desgasificada a los tubos acrílicos, y luego colocar los sostenedores con sus agujas dentro, sellando el otro extremo.

9. Colocar las probetas preparadas en los sostenedores, para evitar que estas pudiesen caerse y derramar la mezcla.

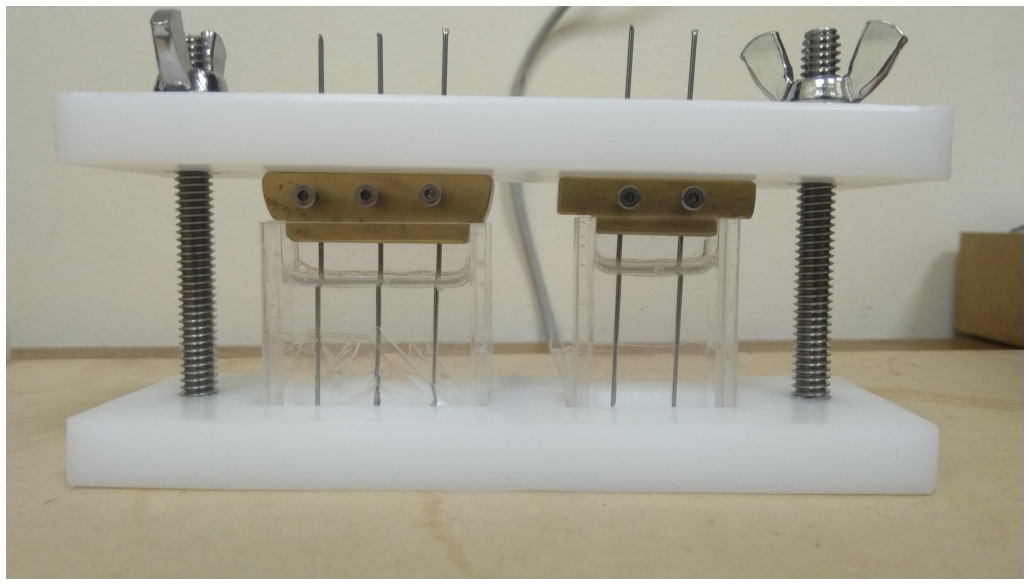


Figura 3.21: Probetas con resina, agujas y sujetadores en sostenedor.

10. Llevar los sostenedores al horno, para el proceso de curado y post-curado de la resina. Para el curado, se aplica una temperatura de 25[°C] durante 24 horas, y para el post-curado, una temperatura de 50[°C] durante 15 horas, a presión ambiente.

11. Transcurrido este periodo, se debe retirar los sostenedores, sujetadores y tubos acrílicos, dejando solo las probetas de resina.

12. Comprobar la correcta fabricación de cada probeta, y pegar cinta adhesiva conductora, ya sea de cobre o aluminio, a las bases de las probetas, para que logren un mejor contacto eléctrico en la etapa experimental.

13. Con esto, están listas las probetas para proseguir. Para más detalles, recomendaciones o casos particulares, respecto a la fabricación de probetas, revisar anexo C.

Capítulo 4

Fabricación de probetas e iniciación de árboles

4.1 Criterios de iniciación y ensayo para probetas

Típicamente, una probeta pasa por cuatro etapas durante su ensayo. Pre-iniciación, iniciación, crecimiento y ruptura. Para el estudio de múltiples agujas, se deben incluir ciertas condiciones, las cuales aún puedan ser seguidas por muestras de una aguja, por lo que se definen estas cuatro etapas de la siguiente manera:

1. Pre-iniciación (ver figura 4.1a): No existen aún carbonizaciones visibles en ninguna de las puntas.

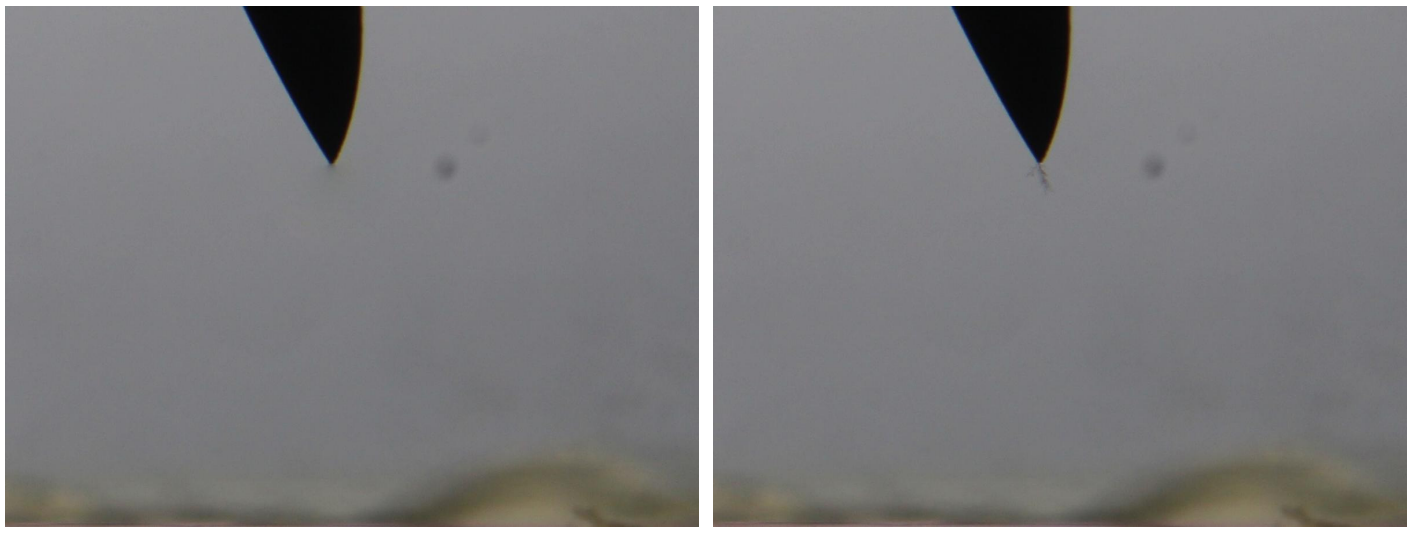
2. Iniciación (ver figura 4.1b): Se considera un árbol como iniciado cuando este es observable. Solo al existir iniciación en todas las puntas presentes en la probeta, se puede considerar esta como correctamente iniciada. Si existe iniciación, pero no en todas las puntas, la probeta se encuentra en iniciación parcial.

3. Crecimiento (ver figura 4.1c): Proceso de arborización que se da durante el ensayo. Solo si en todas las puntas existe crecimiento, se considerará el ensayo como exitoso.

4. Ruptura (ver figura 4.1d): Falla franca a tierra en cualquiera de las puntas.

4.2 Fabricación de probetas de dos y tres agujas

Para poder llevar a cabo los ensayos de interés para esta investigación, se debió en primer lugar diseñar equipos que permitiesen fabricar probetas con múltiples agujas hacia una única placa, y a



(a) Pre-iniciación. (b) Inicio árbol eléctrico.

(c) Crecimiento (instante previo a ruptura). (d) Ruptura de árbol eléctrico.

Figura 4.1: Etapas durante un ensayo de árboles eléctricos.

diversas distancias de separación, con relativa exactitud. Como restricción adicional, estas deben poder ensayarse utilizándose el mismo banco de pruebas existente, sin realizarle cambios mayores que dificulten otras investigaciones. También, dada las condiciones únicas de estas probetas, es necesario encontrar una metodología para su iniciación que de buenos resultados.

4.2.1 Primer diseño

Como primera aproximación, se buscó utilizar mayoritariamente elementos ya existentes en el laboratorio, desarrollados por Manuel Maureira, para su memoria de titulación [1], pero que finalmente no fueron incluidos en esta. Cualquier problema de diseño que presentasen estas piezas podría entonces ser corregido para el diseño final. Esto incluye:

- Tubos acrílicos de dimensiones internas aproximadas de 10[mm] x 20[mm] x 30[mm] y 10[mm] x 30[mm] x 30[mm] (ver figura 4.2).
- Sujetadores de bronce, con capacidad para hasta tres agujas simultáneas a una distancia de separación entre agujas de 10 [mm]. Un tornillo ajusta cada aguja a su lugar (ver figura 4.4).

- Separadores de 2[mm] de espesor para utilizarse con los tubos acrílicos previamente mencionados.
- Electrodo de alta tensión, de bronce, con capacidad para hasta tres agujas simultaneas a una distancia de separación entre agujas de 10 [mm], para energizar la probeta sin necesidad de modificar el banco de pruebas (ver figura 4.3).

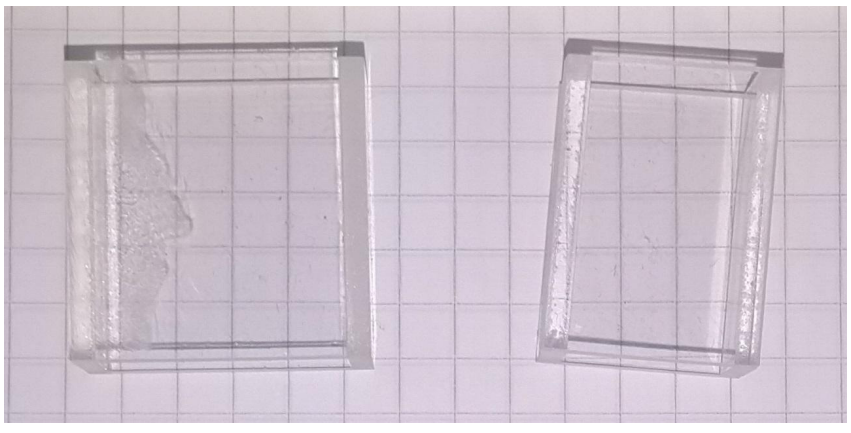


Figura 4.2: Tubos acrílicos preexistentes.



Figura 4.3: Electrodo de alta tensión para probeta con múltiples agujas.



Figura 4.4: Sujetadores de bronce para hasta tres agujas.

Además, se contó en un principio con otros elementos utilizados en investigaciones anteriores, como lo son la resina epóxica Mepox 1124 UV y agujas hipodérmicas Terumo 21G x $1\frac{1}{2}''$ (ver figura 4.5). Para poder preparar más probetas en paralelo, se fabricaron otros tres sujetadores de bronce, y dos sostenedores para evitar que las probetas se pudiesen caer durante la fabricación (ver figuras 4.6, 4.7, 4.8).

4.2.2 Iniciación de probetas: primer diseño

Inicialmente, se fabricó satisfactoriamente 5 probetas, con dos agujas cada una. Tres de ellas con una distancia entre punta y placa de 1 [mm] y dos con una distancia de 2 [mm], y separación entre agujas de 10 [mm] o 20 [mm].

4.2.2.1 Iniciación utilizando el banco de pruebas alimentado con un transformador

La tabla 4.1 resume los resultados obtenidos utilizando el banco de pruebas energizado mediante un transformador 10[kVA], antes de que estuviera disponible el amplificador Trek que permite



Figura 4.5: Agujas hipodérmicas Terumo.

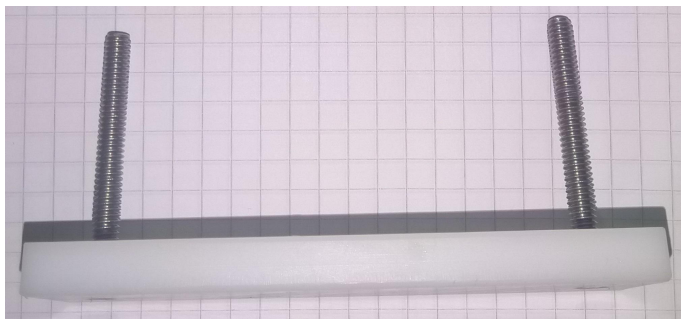


Figura 4.6: Base del sostenedor (vista lateral).

Figura 4.7: Tapa del sostenedor.

Figura 4.8: Base del sostenedor (vista superior).

variar la frecuencia de excitación. Para esto, se inició llevando la tensión a 10[kV] a razón de 200 [V/s], y luego elevándola en 2[kV] cada 5 minutos, hasta llegar a un máximo de 20[kV] o se decida detener la prueba prematuramente.

Dado lo rudimentaria de la alimentación mediante un terminal caimán (en la figura 4.9), durante las pruebas en aire, existía una clara corona audible. La tensión máxima aplicada en cada caso dependió de la intensidad de esta corona, por lo que en ciertos casos la tensión no llegó a valores tan altos como en otros, y en ningún caso se llegó a los 20 [kV] en aire. Las probetas iniciadas en aceite, si pudieron llevarse a 20 [kV], sin la presencia de corona audible. De ambas formas, no se logró iniciar ninguna de las agujas usando el transformador como fuente de alimentación. Para estos ensayos preliminares, no se instaló el equipo MPD600, por lo que tampoco fue posible medir ni observar las DP obtenidas.

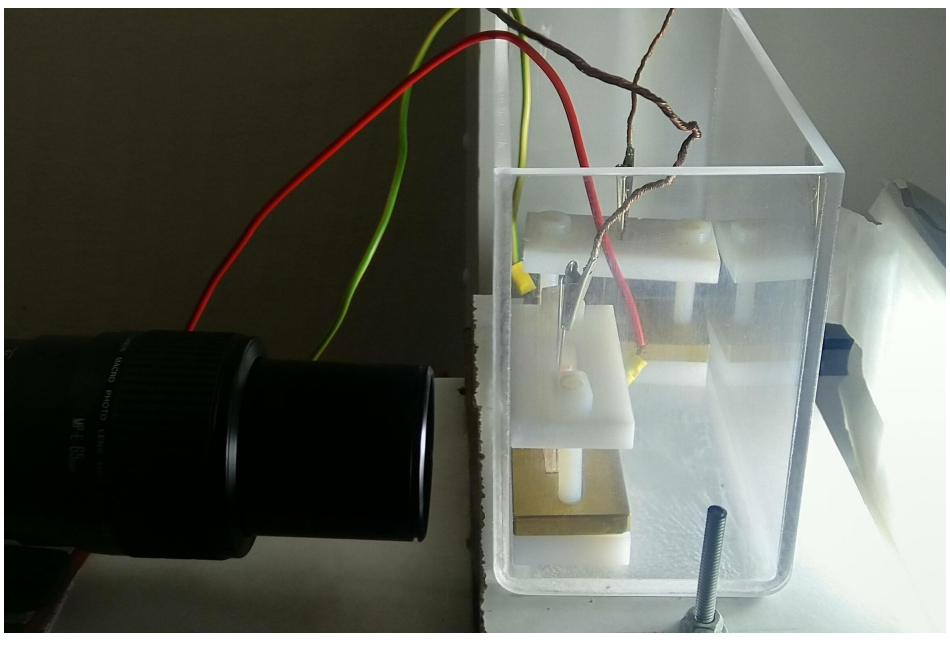


Figura 4.9: Iniciación alimentando una única aguja mediante un conector caimán.

Probeta	Aguja	Tensión[KV]	Condición	Resultados
G-1.01	1	19	Aire	Sin iniciación
	2			No ensayada
G-1.02	1	17	Aire	Sin iniciación
	2	14	Aire	Sin iniciación
G-1.03	1	16	Aire	Sin iniciación
	2	17.45	Aire	Sin iniciación
G-2.01	1	20	Aceite	Sin iniciación
	2	20	Aceite	Sin iniciación
G-2.02	1	20	Aceite	Sin iniciación
	2	20	Aceite	Sin iniciación

Tabla 4.1: Resultados obtenidos con el primer diseño de probetas utilizado, a frecuencia industrial.

4.2.2.2 Iniciación utilizando un generador de impulsos

Dado estos resultados negativos, se decidió buscar temporalmente otro método para lograr la iniciación, a la espera de la llegada del equipo Trek. En una oportunidad, se buscó lograr la iniciación utilizando un impulso tipo rayo como se describe en 3.2.1.3.

El segundo de estos impulsos provocó una falla franca, quemando la probeta utilizada (ver figura 4.10), y dañando parte del sostenedor de la probeta (ver figura 4.11), a pesar del uso de silicona líquida como medio para la descarga. Por motivos de seguridad, se desistió de repetir esta forma de iniciación, además de modificar los largos de las probetas a futuro.

Probeta	Aguja	Tension[KV]	Condición	Resultados
G-1.01	1	30 (impulso)	Aceite	Sin iniciación
	2			No ensayada
G-1.01	1	35 (impulso)	Aceite	Ruptura
	2			No ensayada

Tabla 4.2: Resultados obtenidos con el primer diseño de probetas utilizado, energizando con un generador de impulso.

4.2.3 Segundo diseño

En base a los resultados obtenidos, con las primeras pruebas, y a lo largo del proceso, se aplicaron cambios al diseño de las probetas, y principalmente a la conexión de estas con el banco de pruebas, incluyendo:

- Tubos acrílicos de dimensiones internas 10[mm] x 20[mm] x 60[mm] para dos agujas, y 10[mm] x 30[mm] x 60[mm]. La mayor altura busca aumentar la distancia de fuga de las probetas.

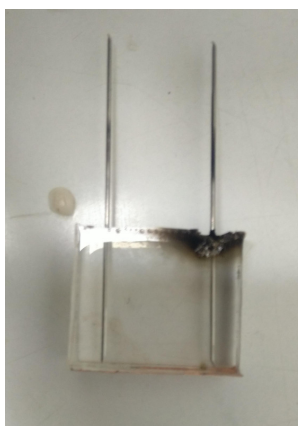


Figura 4.10: Probeta con daño provocado durante prueba de impulso.



Figura 4.11: Parte superior del sostenedor con daño provocado durante prueba de impulso.

- Sujetadores de bronce con distintas distancias entre agujas. Dos tornillos opuestos ajustan cada aguja a su lugar, permitiendo mayor precisión.
- Electrodo delgado de bronce, capaz de sujetar una única aguja de una probeta (figura 4.12).
- Electrodos de bronce con distintas distancias entre agujas, conectables al electrodo delgado.
- Adaptaciones a los sostenedores existentes, para que puedan ser usados con probetas más largas.
- Agujas hipodérmicas de calibre G18 y largo aproximado de 2 pulgadas. Las agujas utilizadas anteriormente no tienen el largo suficiente para ajustarlas en los nuevos tubos (figura 4.13).

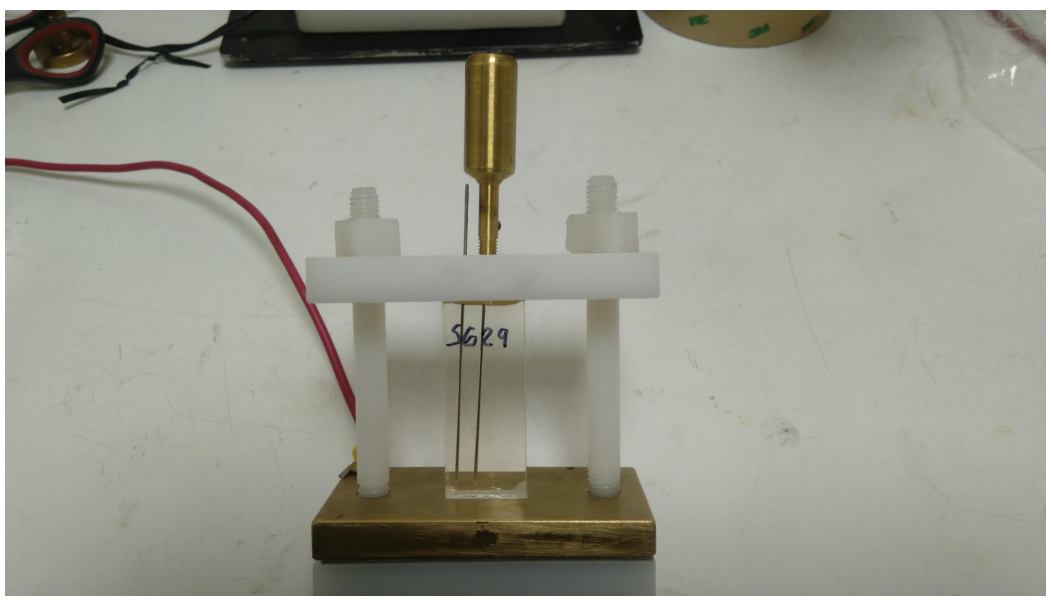


Figura 4.12: Electrodo delgado de bronce para sujetar una única aguja sin tocar las aledañas, en probeta preparada para su iniciación.

4.2.4 Iniciación de probetas: segundo diseño

Se fabricó satisfactoriamente un total de 46 probetas, 30 de dos agujas, 12 de tres agujas, y 4 con solo una aguja, con una distancia aproximada entre punta y placa de 2[mm].

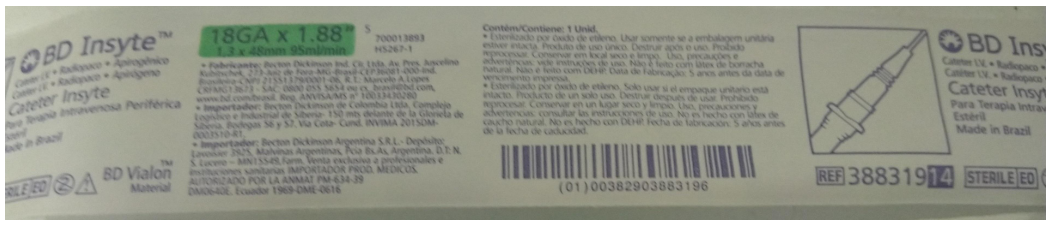


Figura 4.13: Cateter BD Insyte calibre G18X1.88".

Inicialmente, se intentó iniciar las agujas siguiendo el mismo procedimiento del diseño anterior, elevando la tensión de una aguja hasta 20 [kV] en aire, pero no dio resultado.

Con la llegada del equipo Trek para energizar el banco de pruebas, se procedió nuevamente con la iniciación de probetas. Este proceso fue realizado a la vez que estas se fabricaron, un proceso que duró meses, lo que llevó a que haya diferencias en la metodología de iniciación utilizada.

4.2.4.1 Iniciación utilizando metodología de iniciación separada

La metodología utilizada fue, en un principio, similar a la utilizada sin el equipo Trek. Elevando la tensión de una aguja hasta 10[kV] a razón de 200 [V/s], luego elevándola cada 5 minutos en 2[kV] hasta los 14[kV], y luego elevando la frecuencia en 100[Hz] cada 5 minutos hasta los 450[Hz]. Este proceso proseguía hasta detectar visualmente con la cámara fotográfica que existió iniciación en la aguja energizada, o este llegaba a su fin. Esta metodología fue llamada "de iniciación separada". Los resultados y conclusiones de esta metodología fueron:

- De 30 probetas, 5 fueron iniciadas correctamente ($< 17\%$ de efectividad).
- Cada iniciación de una aguja podía tomar hasta 35 minutos, en caso de que esta fallara. Con múltiples agujas por probeta, este proceso que requiere atención constante se volvía extenuante.
- Alrededor de un tercio de las agujas no iniciaba en un primer intento, por lo que lograr múltiples en una misma probeta se volvía más complejo.
- Salvo en una ocasión, las iniciaciones ocurrieron al momento de variar la frecuencia a 150[Hz] o 250[Hz].
- Se presentaron casos de iniciación sin contacto. La aguja en la que ocurría la iniciación no era la energizada ni tampoco se encontraba en el plano de la cámara, llegando incluso a la ruptura en un caso.
- Una vez iniciada una aguja de la probeta, al pasar a la siguiente, podía presentarse crecimiento en la aguja ya iniciada, incluyendo ruptura en dos casos.

- Se debió monitorear todas las puntas de forma simultánea para evitar rupturas indeseadas e iniciaciones sin contacto, lo que llevó a detener pruebas de forma preventiva.
- A modo de prueba, se buscó iniciar dos probetas de una sola aguja utilizando esta metodología sin lograrlo.

4.2.4.2 Iniciación utilizando metodología de iniciación simultanea

Se decidió cambiar la metodología, iniciando las múltiples agujas de forma simultánea y deteniendo el ensayo en caso de iniciar solo una, luego de transcurridos 10 segundos. Esta metodología fue llamada "de iniciación simultanea". Los resultados y conclusiones de esta metodología fueron:

- Todas las probetas ensayadas de este modo ya habían sido ensayadas con la metodología anterior, de forma insatisfactoria.
- De 14 probetas ensayadas, 0 fueron iniciadas correctamente (0% de efectividad).
- De estas 14 probetas, en 11 hubo iniciación en una aguja.
- Se mantuvieron los problemas presentados anteriormente.

4.2.4.3 Iniciación utilizando metodología de iniciación rápida

Por estos resultados negativos, se puso a prueba un nuevo método de iniciación más rápido, con la intención de conseguir iniciar las agujas que se encuentran junto a otras ya iniciadas sin provocar mucho crecimiento en estas. En lugar de elevar la tensión cada 5 minutos, esta sería elevada a razón de 200 [V/s], como en el proceso inicial de subida de tensión de las metodologías anteriores. Con esto, se reduce el tiempo total por aguja, de un máximo de 35 minutos a un máximo de 70 segundos para llegar a 14[kV], y luego otros 10 segundos para subir de 50[Hz] a 250[Hz]. Esta metodología fue llamada "de iniciación rápida". Los resultados y conclusiones de esta metodología fueron:

- Este fue el único método utilizado desde este punto en adelante.
- De 14 probetas previamente iniciadas de forma parcial, 12 fueron completadas correctamente (85% de efectividad).
- De 12 probetas ensayadas utilizando únicamente este método, 9 iniciaron correctamente (75% de efectividad).
- En dos oportunidades hubo iniciación sin contacto, tras lo cual solo se realizó ensayos en aceite. No existió iniciación sin contacto al usar aceite.

- De 10 probetas ensayadas con el método rápido en aceite, 9 iniciaron correctamente (90% de efectividad).
- En casos en que no hubo iniciación en un primer intento, este se repitió hasta cuatro veces, pero en la mayoría de los casos solo uno o dos intentos fueron necesarios.
- A modo de prueba, se intentó iniciar 4 probetas de una aguja utilizando este método, iniciando exitosamente 3 de ellas (75% de efectividad).

Tras terminar este proceso, y descartar algunas muestras que se determinó tenían un crecimiento muy avanzado en una de sus puntas, se tuvo 28 probetas exitosas, las cuales fueron utilizadas para los ensayos competentes a este trabajo.

4.3 Fabricación de probetas con placa curva

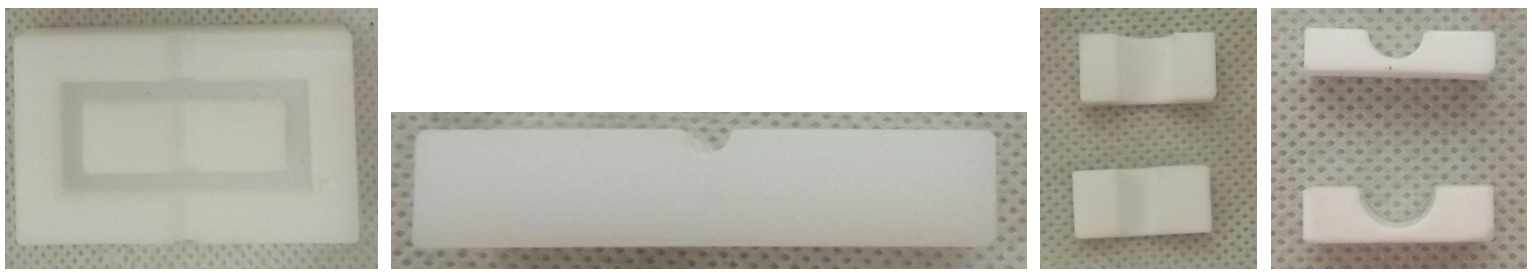
Una vez terminada la fabricación de probetas de dos y tres agujas, se procedió a fabricar probetas con base curva, cuyo diseño pueda potencialmente ser utilizado en una futura investigación o memoria.

4.3.1 Diseños utilizados

Se fabricaron tres probetas de forma exitosa. Para esto, se utilizaron distintos moldes con la forma deseada, que se ubicaron en un extremo de los tubos acrílicos de 20[mm] de ancho utilizados en pruebas anteriores.

- Molde externo de polietileno UHMW Robalon, con un sacado semicilíndrico de 2[mm] de radio (ver figuras 4.14a y 4.14b).
- Moldes internos de teflón, con un sacado semicilíndrico de 2[mm] y 3[mm] de radio (ver figuras 4.14c y 4.14d).

Estos moldes son reutilizables, pero para cada probeta se utilizó uno diferente para ponerlos a prueba. Todos los moldes funcionaron, pero el molde de robalon se adhirió a las probetas fabricadas en él, lo que daño la que habría sido una cuarta probeta. Los moldes internos de teflón no presentaron este problema.



(a) (b) (c) (d)

Figura 4.14: Moldes para probetas punta-placa curva: (a) Molde externo de robalón (vista superior), (b) Molde externo de robalon (vista lateral), (c) Moldes internos de teflón (vista superior), (d) Moldes internos de teflón (vista lateral).

4.3.2 Iniciación utilizando metodología de iniciación rápida

Se utilizó el mismo método de iniciación de las últimas pruebas realizadas. Para poder conectar únicamente la sección curva de las probetas al electrodo de conexión a tierra, se fabricó una pieza de robalon con una sección de bronce curva a juego con las piezas fabricadas.

Las tres probetas iniciaron sin problemas.

4.4 Resumen de iniciaciones realizadas

En la tabla 4.3 se incluye un resumen de las iniciaciones realizadas en probetas que se ensayaron posteriormente.

Total de probetas iniciadas		
Tipo de Probeta	Fabricadas correctamente	Iniciadas exitosamente
Una aguja	4	3
Dos agujas	30	22
Tres agujas	12	6
Placa curva	3	3
Total	49	34

Tabla 4.3: Resumen de iniciaciones realizadas.

4.5 Resumen de ensayos de crecimiento realizados

Se determinó realizar ensayos con tres distintas tensiones de excitación. La tabla 4.4 resume los ensayos realizados y los resultados obtenidos en cada caso.

De las 28 muestras con múltiples agujas ensayadas, la mitad presentó crecimiento simultaneo.

	Número de probetas ensayadas				
	Dos agujas		Tres agujas		Placa curva
Condición de ensayo	Ensayadas	Crecimiento simultaneo	Ensayadas	Crecimiento simultaneo	Ensayadas
10[kV], 50[Hz]	12	3	5	3	1
14[kV], 50[Hz]	5	3	1	1	1
10[kV], 350[Hz]	5	4	0	0	1
Total	22	10	6	4	3

Tabla 4.4: Resumen de ensayos de crecimiento de árboles eléctricos.

4.5.1 Problemas presentados con el monitoreo visual

Durante los ensayos realizados, ya sea utilizando probetas de dos agujas, tres agujas, o con placa curva, se tuvo dificultad para visualizar el crecimiento de los árboles mediante el uso de la cámara.

En el caso de múltiples agujas por probeta, la distancia entre estas obliga a enfocar la cámara a mayor distancia, perdiéndose resolución y claridad en las imágenes obtenidas. Por otro lado, enfocar múltiples puntas de forma simultánea es sumamente complicado, y es necesario sacrificar parte de este enfoque para poder visualizar todas con una calidad razonable, esto es aún más problemático en las probetas de tres agujas.

En el caso de las probetas con placa curva, todas las muestras presentaron un obscurecimiento en la zona de interés, así como dificultad para enfocarla. Se identificó como causa probable la geometría menos precisa de estas, y la sombra adicional dado que el electrodo abraza parte de la probeta. La probeta cuya parte semicilíndrica es de mayor radio, presentó menos problemas que las otras dos.

4.5.2 Problemas presentados con la medición de descargas parciales

Con el uso de un electrodo alargado para poder conectar dos o tres agujas simultáneamente, ocurrió que el umbral de ruido en las mediciones fue mayor que en el caso con una única aguja, afectando la sensibilidad de las mediciones. En caso de necesitarse una mayor precisión en estas mediciones en futuras investigaciones, sería necesario solucionar este problema en primer lugar. También se debe considerar el uso de probetas paralelas libres de descarga de construcción más similar a las ensayadas.

* Ensayo realizado con una frecuencia de 250[Hz] por error.

4.5.3 Problemas presentados con la resina epóxica

Durante la etapa final de ensayos, se presentaron problemas con la resina epóxica utilizada. A pesar de haber mantenido el mismo proveedor, marca y variedad de resina, esta presentaba problemas a la hora de su preparación, dando lugar a una mayor cantidad de burbujas en la mezcla, ondulaciones en las probetas tras curarlas y en ocasiones, separaciones entre las agujas y la resina al terminar el post-curado. Un gran número de probetas fabricadas fueron descartadas en este periodo, pero algunas fueron ensayadas de todas maneras. A futuro, es de suma importancia corregir este problema.

Capítulo 5

Análisis de resultados

El análisis de resultados, tanto de muestras con múltiples agujas como de muestras con placa curva, incluye el monitoreo visual de los crecimientos obtenidos, así como el análisis de mediciones de descargas parciales. Información adicional de las muestras ensayadas con éxito, imágenes de los crecimientos y gráficos, se incluyen en el anexo A.

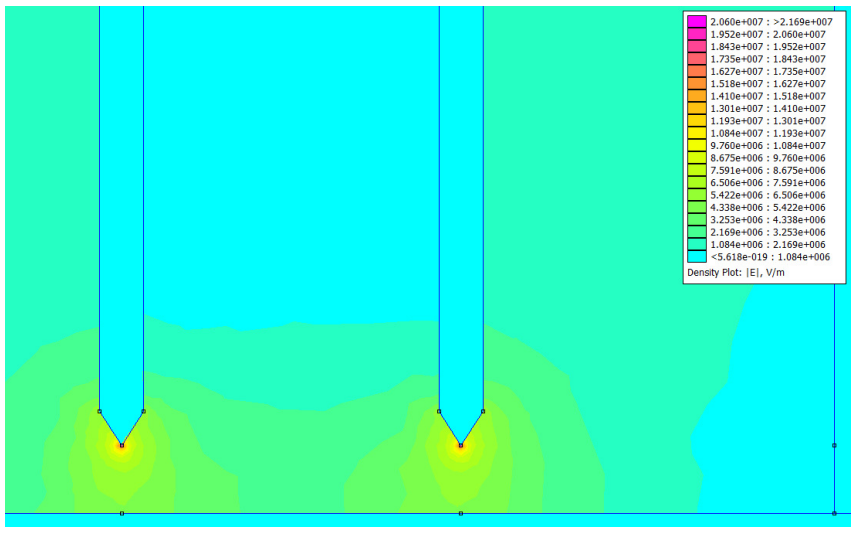
5.1 Análisis preliminar

Se decidió, de manera preliminar, simular el comportamiento de probetas de múltiples agujas y probetas de placa curva, y compararlo con el comportamiento de probetas de punta - placa típicas, utilizando el software libre FEMM. Estas simulaciones se realizaron bajo la condición de corriente alterna a frecuencia industrial (15[kV], 50[Hz]) y con distancias entre punta y placa de 2[mm], produjendose los siguientes resultados gráficos:

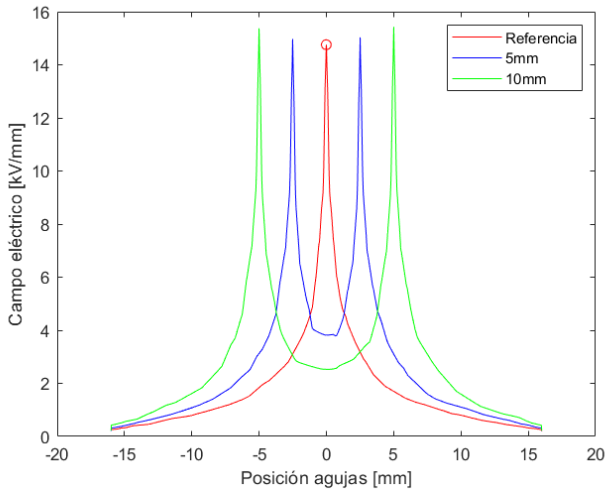
Es posible notar que el campo eléctrico en las puntas de las agujas es superior en todos los casos especiales en comparación al campo de referencia. En el caso de la probeta con placa curva, existen máximos del campo eléctrico en la placa aterrizada, contrario a lo que se podría suponer. Estos resultados dan un punto de partida al análisis de las muestras reales.

5.2 Métodos de análisis

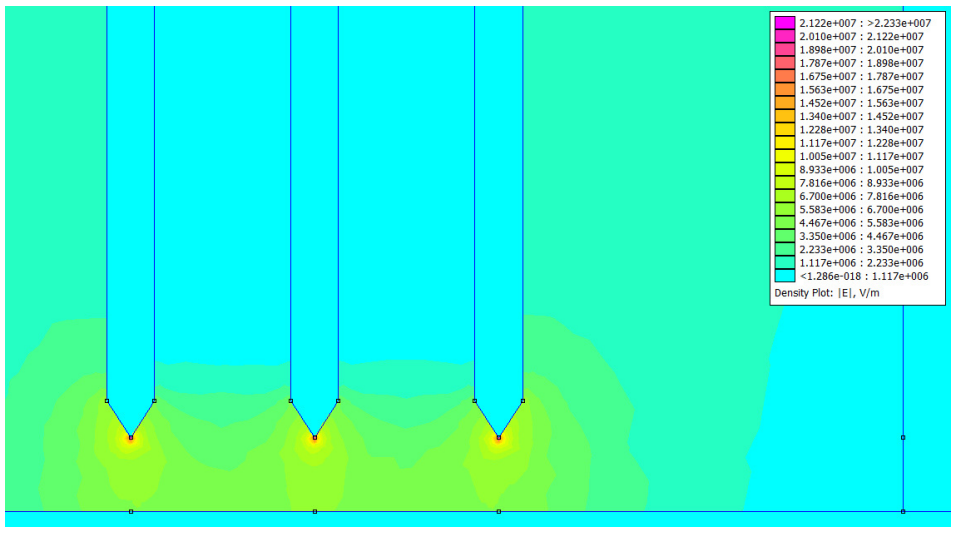
El análisis de los resultados obtenidos incluye principalmente la comparación entre estos con los esperados en base a investigaciones previas, o muestras de referencia preparadas especialmente para este trabajo.



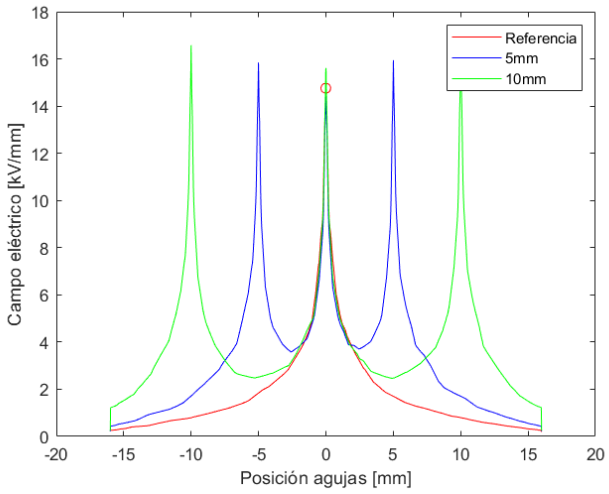
(a) Simulación de dos agujas agujas.



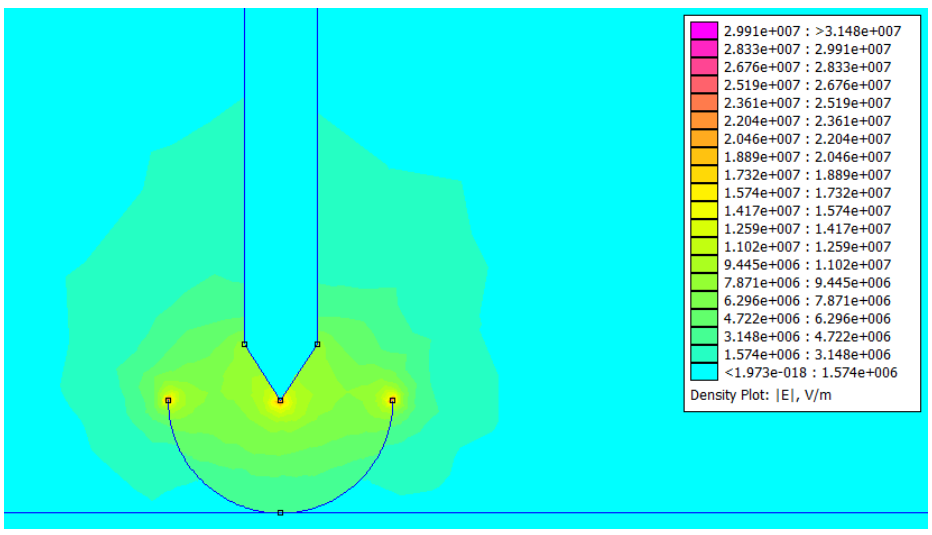
(b) Resultados de simulación.



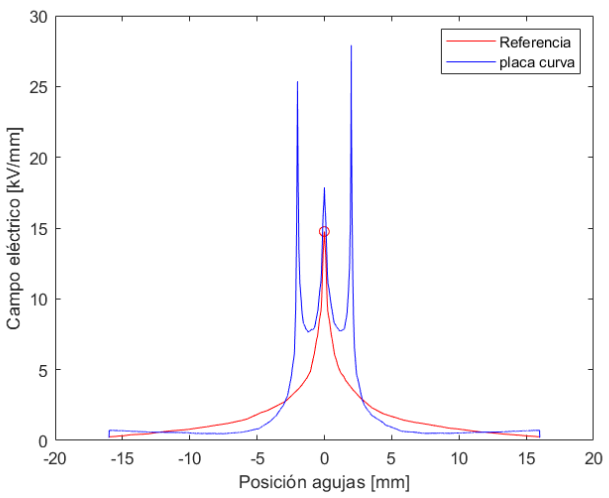
(c) Simulación de tres agujas.



(d) Resultados de simulación.



(e) Simulación de una aguja con placa curva.



(f) Resultados de simulación.

Figura 5.1: Campo eléctrico a lo largo del eje X (X = 0 en punta central), a la altura de las puntas de las agujas, y comparación con simulación de referencia de una aguja.

5.2.1 Monitoreo visual

Para el análisis por monitoreo visual, se hizo uso de las fotografías obtenidas durante los ensayos. Para su postproceso se utilizó el software de edición de imágenes digitales de uso libre GIMP, mediante el cual se midieron las distintas distancias entre puntos de interés en las imágenes, y

se tradujo esto a distancias en milímetros, utilizando el diámetro de una aguja como referencia. También se utilizó el mismo software para realizar una limpieza de las imágenes, en áreas que no entraron en contacto con árboles. Todas las medidas se tomaron como se ve en la figura 5.2.

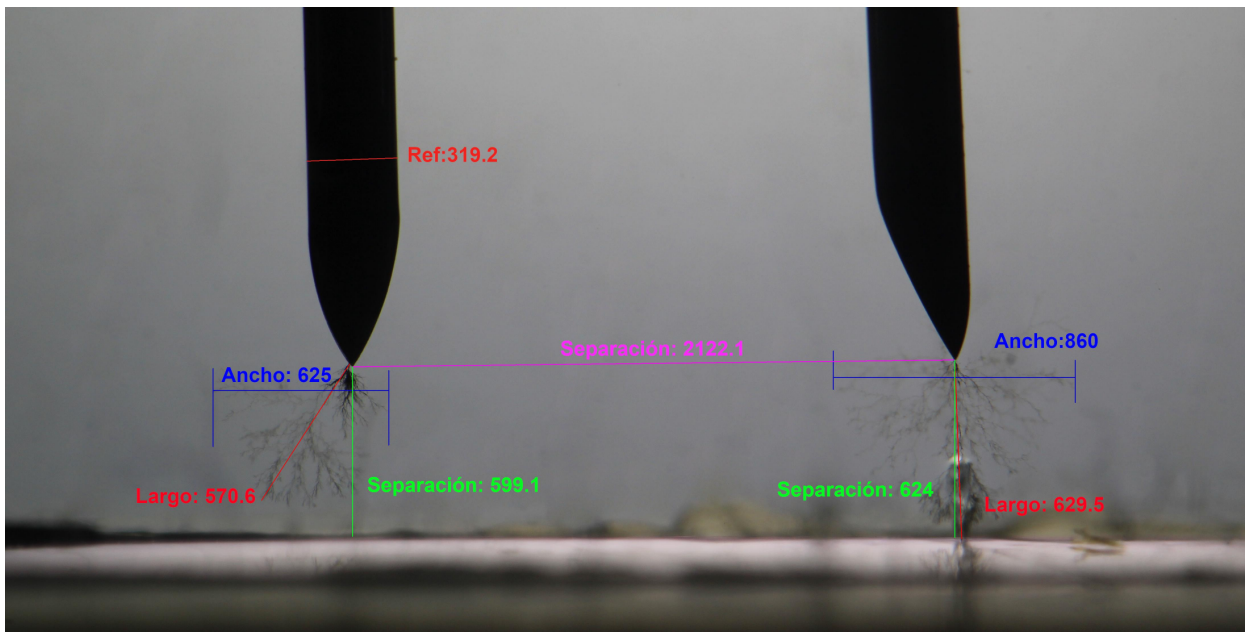


Figura 5.2: Ejemplo de medición utilizando el software GIMP.

Por ejemplo, para tomar las medidas de largo y ancho de árboles, utilizados a lo largo del análisis, se consideró como largo de árbol a la distancia máxima entre el punto de iniciación del árbol hasta alguna de sus ramas, independiente del grosor de esta. Igualmente, para determinar el ancho de un árbol, se midió la distancia máxima paralelo al plano entre ramas de un mismo árbol. Un ejemplo de esto, se ve en las imagenes 5.3 y 5.4.

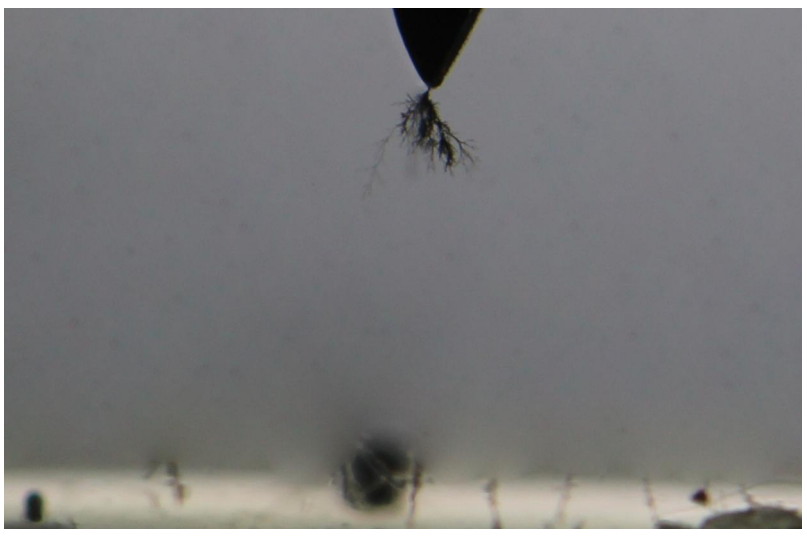


Figura 5.3: Imagen de un árbol durante crecimiento.

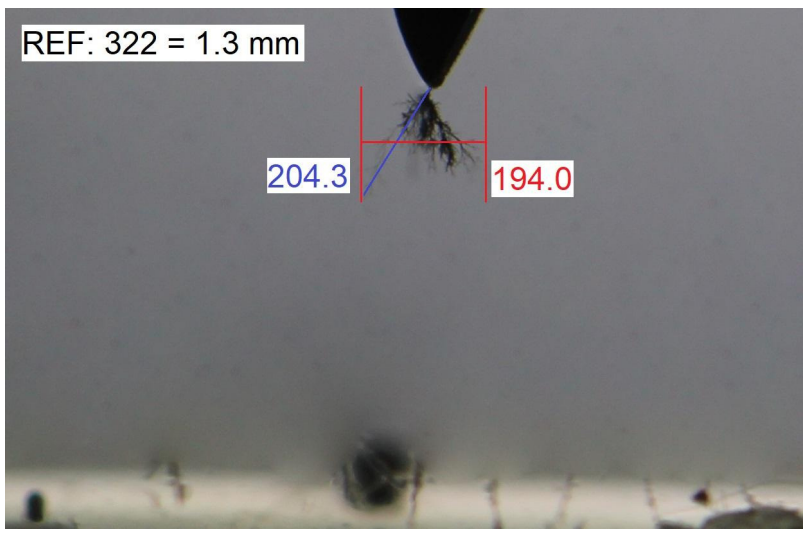


Figura 5.4: Medición de largo y ancho máximo del árbol.

5.2.2 Análisis de DP

Para el análisis de DP, se utilizaron las mediciones obtenidas con el equipo Omicron. Utilizando el software Matlab, se convirtieron los datos obtenidos a tablas, y se prepararon gráficos pertinentes.

Tanto los diagramas de PRPD, como gráficos que incluyen la magnitud de carga, Q_{95}, número de eventos y otros, se obtuvieron de esta manera.

5.2.2.1 PRPD

Para el análisis de PRPD, se definió el utilizar 6 muestras de 1500 ciclos (equivalente a 30 segundos), para ensayos representativos seleccionados.

Cada muestra fue tomada al transcurrir 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% del tiempo de ensayo. Se consideró como tiempo inicial el momento en que se alcanzó la tensión determinada para cada ensayo, y 100% al tiempo de ruptura. En cada caso, esta información se encuentra disponible en el anexo B.

5.3 Muestras de múltiples agujas

Los resultados obtenidos en los ensayos de crecimiento con múltiples agujas, al considerarse solo las muestras en que cada punta presentó iniciación, se pueden clasificar en dos grupos: muestras que presentaron crecimiento desde más de una punta y muestras en que solo existió crecimiento en una punta. Determinar causas probables para las diferencias entre ambos tipos de muestras obtenidas, así como diferencias entre estas y muestras de referencia de una aguja es fundamental para definir si esta área de estudio puede ser de interés a futuro.

Para poder analizar estos resultados para múltiples agujas, y compararlos a probetas con un solo electrodo de punta, es vital determinar las variables propias del ensayo, así como los distintos datos que podemos obtener durante y tras estos.

Estas pueden incluir muchísimas opciones, como lo son las relacionadas a la fabricación de las probetas (posición y cantidad de electrodos), condiciones de ensayo (tensión, frecuencia, ambientales), resultados visuales (forma de los árboles) y resultados medidos (descargas parciales, tiempo de ensayo). Para cada caso se eligió las variables de mayor interés en cada análisis, dejando de lado las demás.

5.3.1 Separación entre agujas y separación punta-placa

Para tener una vista general de los resultados obtenidos, se decidió comparar el efecto de diversas variables en el tiempo de ruptura. En particular, la distancia horizontal entre puntas de electrodos y la distancia vertical de los electrodos de punta al electrodo de placa. Las variables consideradas fueron:

- Número de agujas en la probeta.

- Tensión de ensayo.
- Frecuencia de ensayo.
- Presencia de crecimiento simultaneo.

Así, se produjeron los gráficos 5.5 y 5.6, que contrastan la separación entre agujas y separación punta-placa, respectivamente, al tiempo de ruptura.

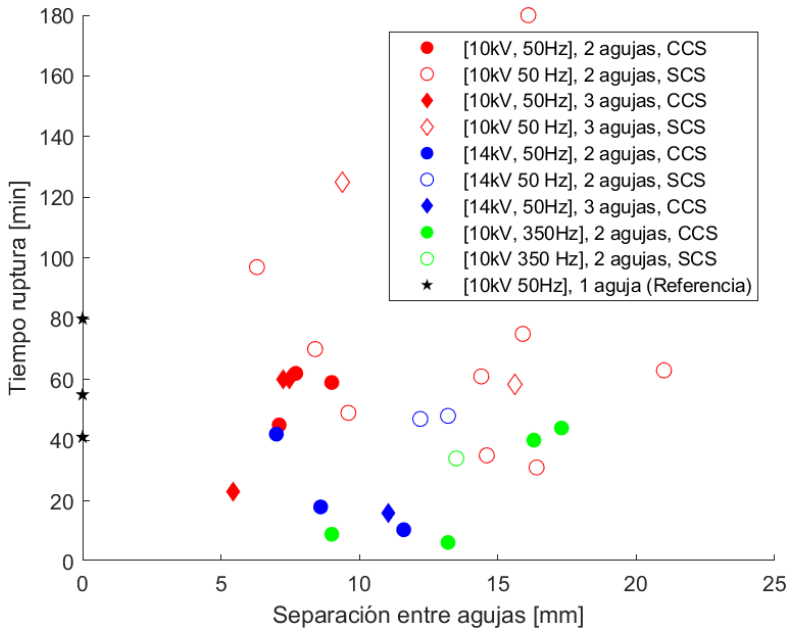


Figura 5.5: Tiempo de ruptura según separación entre agujas.

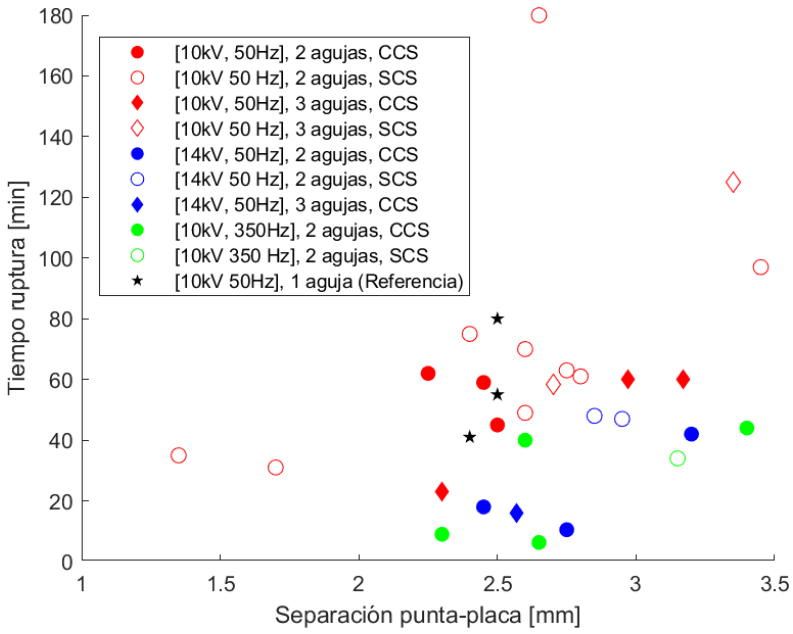


Figura 5.6: Tiempo de ruptura según separación punta-placa.

El primer gráfico permite ver que, en general, las muestras tienen una mayor chance de presentar crecimiento simultaneo mientras más cerca estén los electrodos de punta, con la mayor cantidad de éxitos a una separación inferior a 9[mm].

El segundo gráfico, por su parte, no muestra grandes diferencias con respecto al crecimiento simultaneo a distintas separaciones entre punta y placa. Si se ve que las dos muestras con separación inferior a 2[mm] no lo lograron, lo que puede indicar una separación mínima requerida.

Mas importante aún, en ambos gráficos se aprecia, que la mayoría de las muestras con crecimiento simultaneo, también llegaron a la ruptura en menos tiempo que sus contrapartes, y en promedio lo hicieron más rápido que las muestras de referencia. Esto da indicios de una correlación entre la presencia de múltiples crecimientos y una falla más acelerada de lo normal.

Como se mencionó anteriormente, la mitad de las muestras presentó crecimiento simultaneo, y también es posible ver, está vez de forma gráfica, como la mayoría de las muestras que no presentaron crecimiento simultaneo son las realizadas a 10[kV] y 50[Hz]. Este fenómeno, sin embargo, podría tener una explicación externa a las variables previamente discutidas.

En primer lugar, se debe considerar la experiencia ganada al producir continuamente nuevas probetas a lo largo de meses. Una mayor habilidad a la hora de fabricar las probetas y un método

de iniciación más simple, dieron lugar a un mayor número de probetas con iniciación en todas sus puntas, además de luego tener crecimiento simultaneo. Fue durante el último periodo de ensayos en que se trabajó principalmente en muestras con mayor tensión o frecuencia, pudiendo haber dado lugar esto a una mayor tasa de éxito.

Por otro lado, la inmensa mayoría de iniciaciones se lograron al aumentar la tensión o la frecuencia, por sobre los 10[kV] y 50[Hz], por lo que, al momento de realizar el ensayo, esta mayor tensión o frecuencia pudo ayudar a iniciar nuevamente las muestras, en especial en casos en que las agujas hubiesen sido desplazadas sin que esto fuese percibido. En particular, una muestra (N°07) presentó iniciación en sus dos puntas, pero al realizarse el ensayo de crecimiento a tensión 10[kV] y 50[Hz] esta no presentó avance alguno tras 40 minutos, ni tampoco se midieron DP en este tiempo, por lo que se decidió repetir el ensayo a 14[kV] y 50[Hz], lo que dio lugar a crecimiento simultaneo.

En estudios posteriores, condiciones similares de fabricación se deben considerar dentro de las variables de estudio, para poder así descartar su influencia. Por otro, realizar el ensayo de crecimiento inmediatamente tras lograr la iniciación en todas las puntas, podría descartar los errores por manipulación de las muestras. Esto podría llevar a que más de un tercio de las muestras tenga crecimiento simultaneo.

Se puede notar, finalmente, que las muestras ensayadas a 350[Hz], presentan una gran diferencia en sus resultados. Estas probetas (N°13 y N°14) fueron fabricadas con resina que presentaba problemas, y presentaron una muy marcada ondulación en ellas por lo que para los análisis posteriores estas muestras no serán consideradas. En las figuras 5.8 se ve una muestra "limpia" y en la figura 5.9 se ve una muestra con ondulaciones y burbujas.

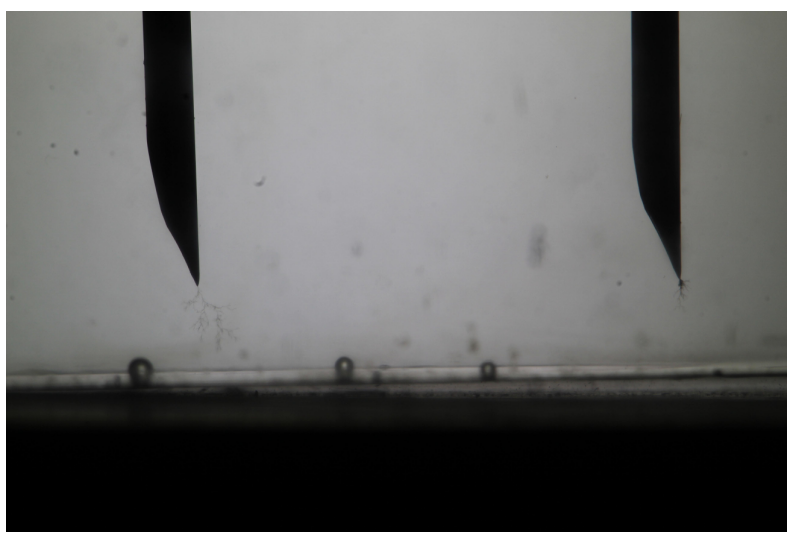


Figura 5.8: G32: Muestra sin ondulaciones, pocas burbujas en base, ensayada a 10[kV] y 350[Hz].



Figura 5.9: SG39: Muestra con ondulaciones, muchas burbujas en base, resina y agujas, ensayada a 10[kV] y 350[Hz].

5.3.2 Monitoreo visual

En base a las imágenes obtenidas durante los ensayos, se pueden estudiar diversas cualidades de los árboles obtenidos para muestras con crecimiento simultaneo. Se decidió comparar los tiempos de cruce y ruptura de las distintas muestras, morfología y tamaño de los árboles, incluyendo además las muestras de referencia. Las variables consideradas incluyen:

- Número de agujas en la probeta.
- Tensión de ensayo.
- Frecuencia de ensayo.
- Tiempo de cruce.
- Tiempo de ruptura.
- Morfología de árbol: forma, largo y ancho (medidos como se ve en la imagen 5.4).

5.3.2.1 Cruce y ruptura

En las figuras 5.10 y 5.11 se contrastan los tiempos de cruce y de ruptura de las muestras según su tensión y frecuencia de ensayo. En la figura 5.12 y 5.13 se contrastan estos mismos tiempos para muestras a 10[kV] y 50[Hz], según el número de agujas en cada probeta. En el caso de múltiples agujas, se consideró como tiempo de cruce únicamente cuando el primer árbol de la muestra haya cruzado y no cada árbol de forma independiente.

Esta información se presenta en "diagramas de caja", en que cada caja incluye las muestras entre los percentiles 25 y 75, y los bigotes los valores extremos no atípicos. La marca dentro de la caja indica la mediana de las muestras recogidas.

Es claro que los tiempos de cruce y ruptura descienden al aumentar la tensión y la frecuencia, siendo con diferencia las muestras a 350[Hz] las que cruzaron y rompieron más rápidamente. Si vemos por otro lado la razón entre ambos tiempos, este es menor para 10[kV] y 50[Hz]. Esto va en contra de lo esperado, ya que, en muestras con una sola aguja, la razón es menor para una frecuencia de 350[Hz] [13].

Si comparamos los resultados por número de agujas, se ve que las medianas de los tiempos de cruce son muy similares, y en los tiempos de ruptura son prácticamente idénticas, pero las muestras tienen valores extremos opuestos, con una muestra de una aguja teniendo el mayor tiempo de ruptura y una muestra de 3 agujas teniendo el menor, con gran diferenciación entre ambas. La razón entre los tiempos de cruce y ruptura si parecen disminuir con el número de agujas, lo que podría deberse a que la existencia de múltiples cruces en una misma muestra da más chances para que ocurra una ruptura más cercana al tiempo de cruce.

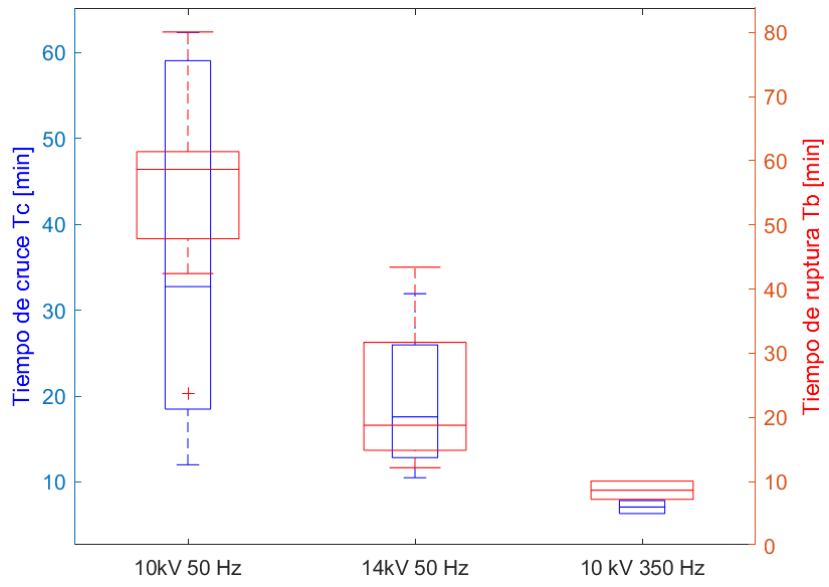


Figura 5.10: Tiempos de cruce y ruptura según condición de ensayo.

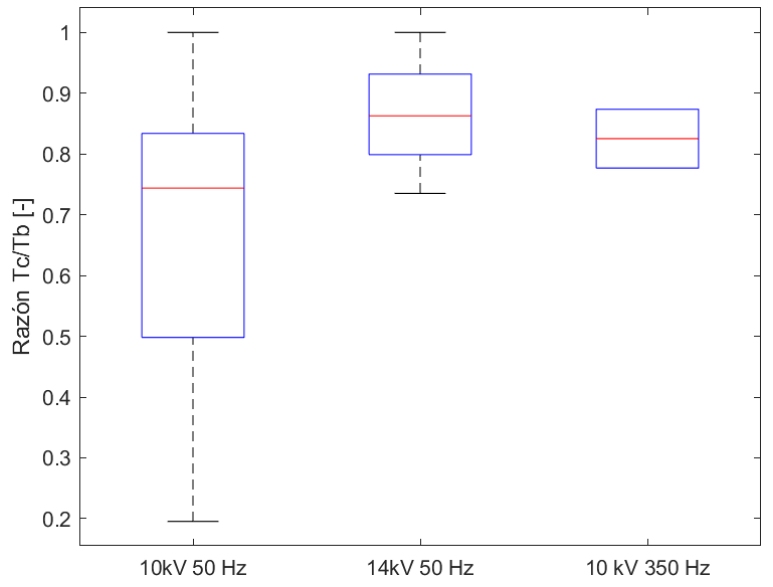


Figura 5.11: Razón entre tiempos de cruce y ruptura según condición de ensayo.

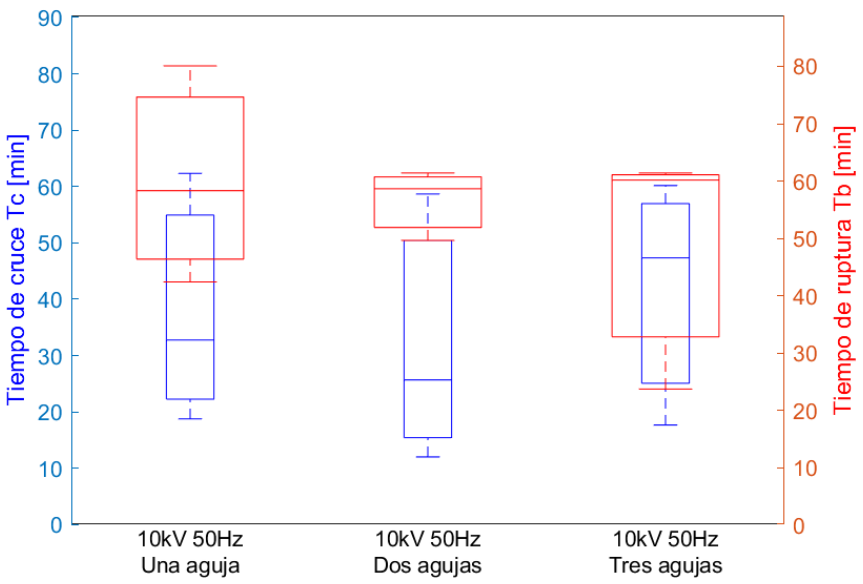


Figura 5.12: Tiempos de cruce y ruptura según número de agujas (a 10[kV] y 50[Hz]).

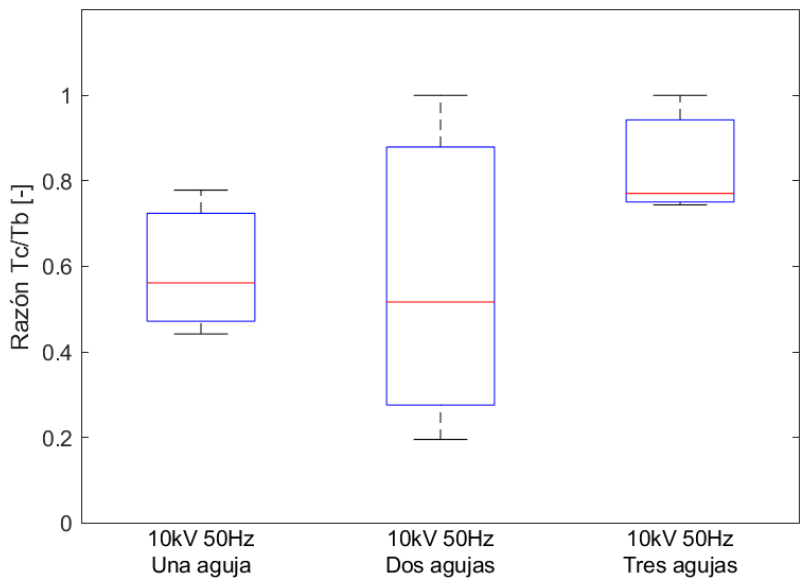


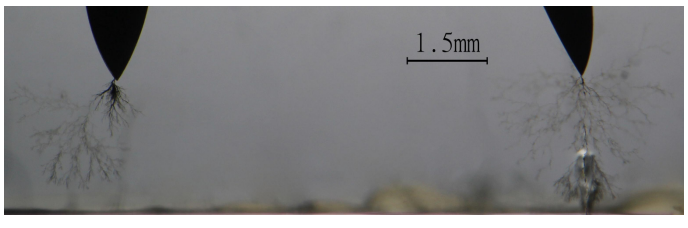
Figura 5.13: Razón entre tiempos de cruce y ruptura según número de agujas (a 10[kV] y 50[Hz]).

5.3.2.2 Morfología de árboles

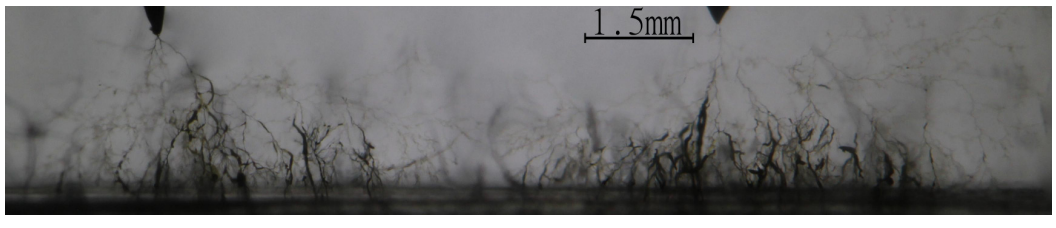
La forma de los árboles encontrados en esta investigación es variable. Dependiendo de la muestra, e incluso de la punta, estos varían de árboles tipo rama filamentaria, hasta árboles tipo arbusto con ramas oscuras. Estos resultados se encuentran dentro de lo esperado y no parece seguir una lógica distinta a las muestras de una aguja. Si es destacable la existencia de árboles de distinto tipo en una misma muestra, como se ve en las figuras en 5.14.

5.3.2.3 Largo y ancho de árboles

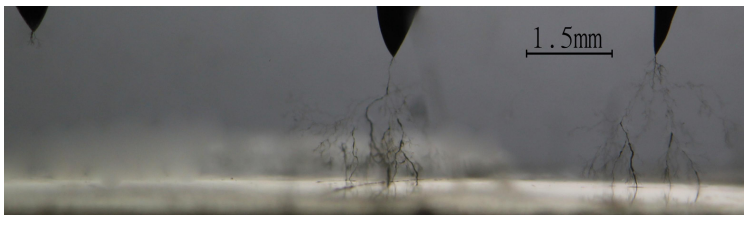
En la figura 5.15 se comparan los largos y anchos máximos alcanzados por las distintas muestras. En el caso de probetas con múltiples agujas, cada árbol se midió de forma independiente.



(a) Mixto (arbusto a rama) y ramas filamentarias (separación entre agujas de 8.6 [mm]).



(b) Ramas filamentarias con crecimiento inverso (separación entre agujas de 7.7 [mm]).



(c) Arbusto estancado y ramas filamentarias (separación entre agujas de 6.3 [mm] y 4.6 [mm]).



(d) Ramas oscuras y arbusto estancado (separación entre agujas de 6.9 [mm] y 7.6 [mm]).

Figura 5.14: Ejemplos de tipos de árboles encontrados en muestras de múltiples agujas.

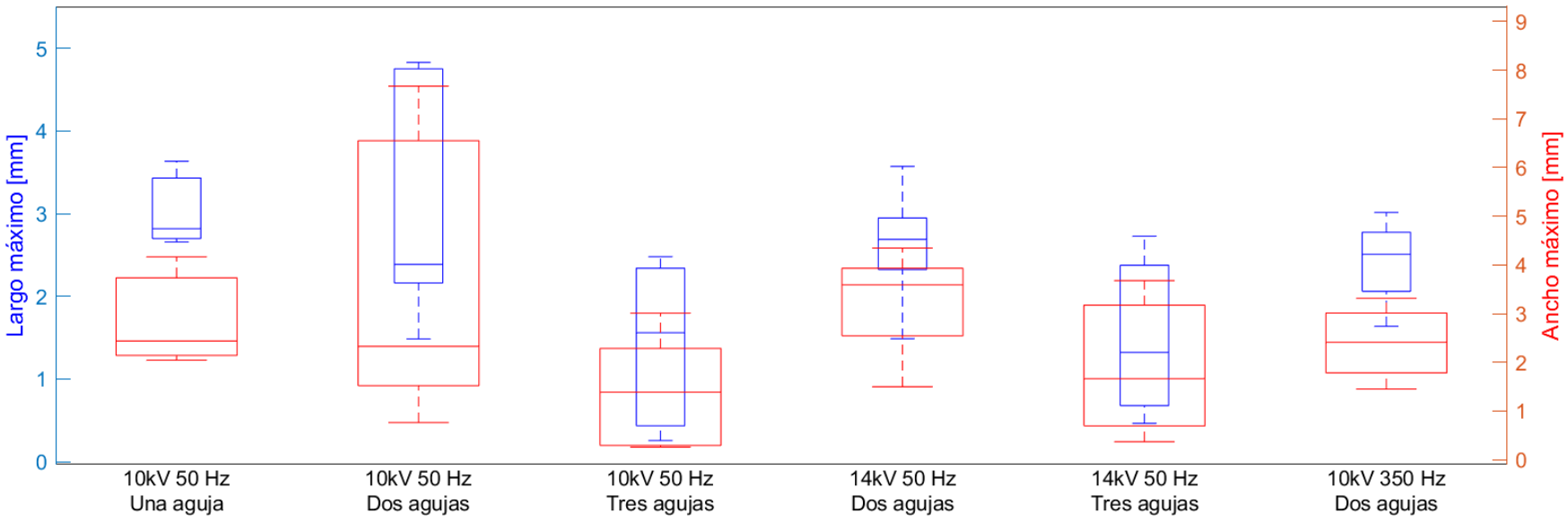


Figura 5.15: Diagrama de caja de largos y anchos máximos según condición de ensayo y número de agujas.

A mayor tensión o frecuencia, no parecen aumentar de forma importante los largos y anchos máximos de los árboles eléctricos. Si existe, como es de esperarse, una relación entre las razones de tiempos de cruce y ruptura, y los largos y anchos máximos alcanzados, con las muestras con razones más cercanos a 1 creciendo menos en total.

Lo que resulta de mayor interés, es que los largos y anchos máximos pueden aumentar o disminuir de forma importante al comparar las muestras de una aguja a las muestras con dos o tres agujas. Los árboles en muestras de múltiples agujas presentaron una gran variabilidad en sus crecimientos, incluso dentro de una misma muestra.

5.3.2.4 Diferencias en crecimiento simultaneo con dos y tres agujas

Se consideró que existió crecimiento simultaneo, si todas las agujas de una muestra presentaron iniciación, y, además, todas las iniciaciones presentaron crecimiento durante el ensayo.

De todas las probetas fabricadas, iniciadas y ensayadas, solo cuatro de ellas presentaron crecimiento simultaneo en tres agujas. El total de ellas, sin embargo, tuvieron un crecimiento muy bajo en una de sus puntas.

En contraparte a esto, las probetas de dos agujas con crecimiento simultaneo, terminaron con sus dos árboles con tamaños similares, y frecuentemente con cruce en ambos.

Es posible que esto obedezca a la dificultad propia de lograr crecimiento simultaneo en probetas, como se ve también en el gran número de probetas de dos agujas que no presentaron crecimiento simultaneo. De todos modos, dado que no se logró crecimiento simultaneo con cruce en tres agujas, esto afecta los resultados de largo y ancho máximo, subrepresentando el daño ocurrido en dichas probetas.

El gráfico 5.16 se comparan nuevamente los largos y anchos máximos alcanzados por las diversas probetas, pero descartando los árboles inhibidos de las probetas de tres agujas.

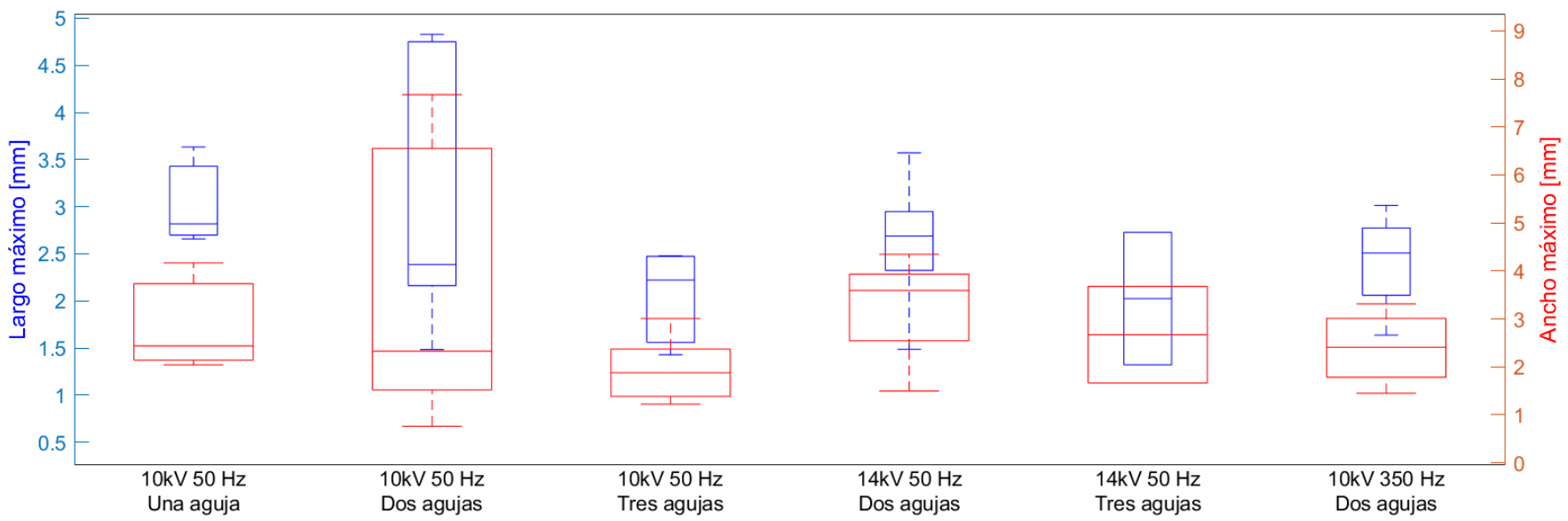


Figura 5.16: Diagrama de caja de largos y anchos máximos según condición de ensayo y número de agujas, sin árboles inhibidos.

En este caso, se puede ver que las muestras con tres agujas, incluso al considerar solo los dos árboles con mayor crecimiento, presentaron árboles de menor tamaño que las muestras con dos agujas, o una aguja, en promedio, aunque ahora con medianas mucho más cercanas. Podemos entonces asumir con mayor certeza, que los casos de dos agujas, con crecimiento simultaneo, son más graves que los de tres agujas, y son por tanto de mayor interés, dados sus crecimientos similares o en algunos casos mucho mayores a los casos de una aguja y tres agujas, y la presencia de dos de estos en simultaneo.

5.3.2.4.1 Comparación de largo de árboles en el tiempo

En la figura 5.17 se comparan los largos de los árboles eléctricos en el tiempo, medidos en tres probetas representativas ensayadas a 10[kV] y 50[Hz] (probetas N°02, N°04 y N°15), y en la figura 5.18 se comparan los largos de los de los árboles en el tiempo, medidos en dos probetas representativas ensayadas a 14[kV] y 50[Hz] (probetas N°08 y N°10). Estas fueron seleccionadas por su similitud en tiempos de ruptura.

Se ve como el largo del árbol eléctrico en la muestra con una aguja, es más rápido en su crecimiento que los demás. Los dos árboles de las muestras con dos agujas, por su parte, crecen de forma casi idéntica, y muy cercano al más rápido de las muestras de tres agujas. Ambas muestras de tres agujas tienen comportamientos comparables, con un árbol creciendo al ritmo "normal", otro creciendo bastante más lento y un tercero casi sin crecimiento.

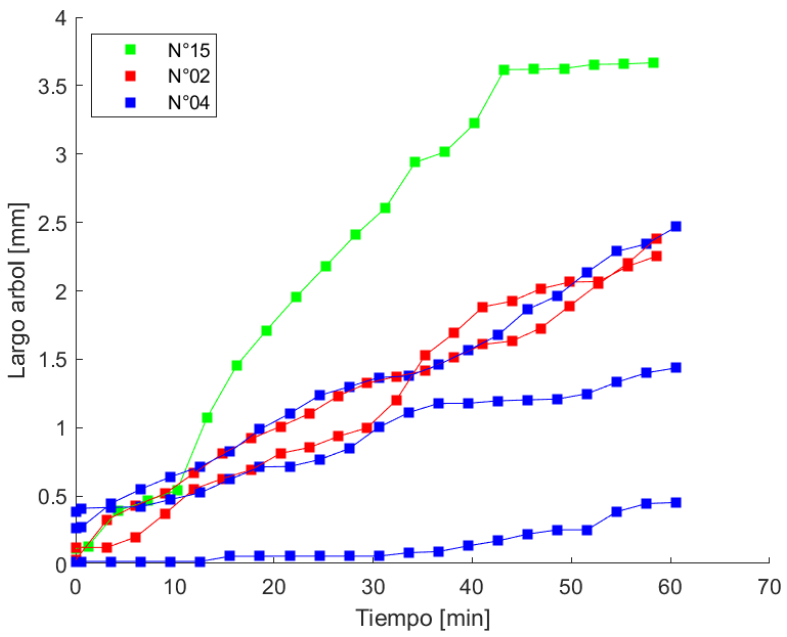


Figura 5.17: Largo máximo en el tiempo de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz].

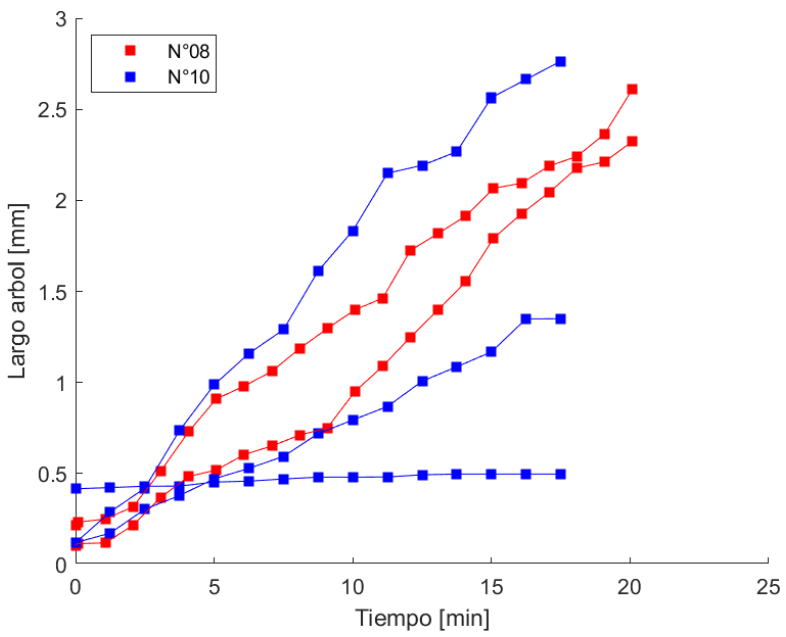


Figura 5.18: Largo máximo en el tiempo de muestras ensayadas a 14[kV] y 50[Hz].

Este resultado es consistente con los obtenidos anteriormente, y muestran como el caso de dos agujas puede implicar un mayor daño que el de tres agujas.

Por otro lado, al comparar las tres muestras de una aguja y de dos agujas (ver figura 5.19), podemos apreciar la similitud en sus comportamientos. La velocidad de crecimiento de los árboles de estas muestras es similar, pudiendo distinguirse dos grupos según su pendiente. También se puede apreciar como los largos de dos árboles en una misma probeta es muy cercano, prácticamente idéntico en dos casos.

5.3.2.5 Efecto del largo de iniciación

Al realizar las iniciaciones de los distintos árboles, el largo de estas al detener este proceso es distinto, a veces con diferencias sustanciales. Idealmente, todas las iniciaciones debiesen ser de

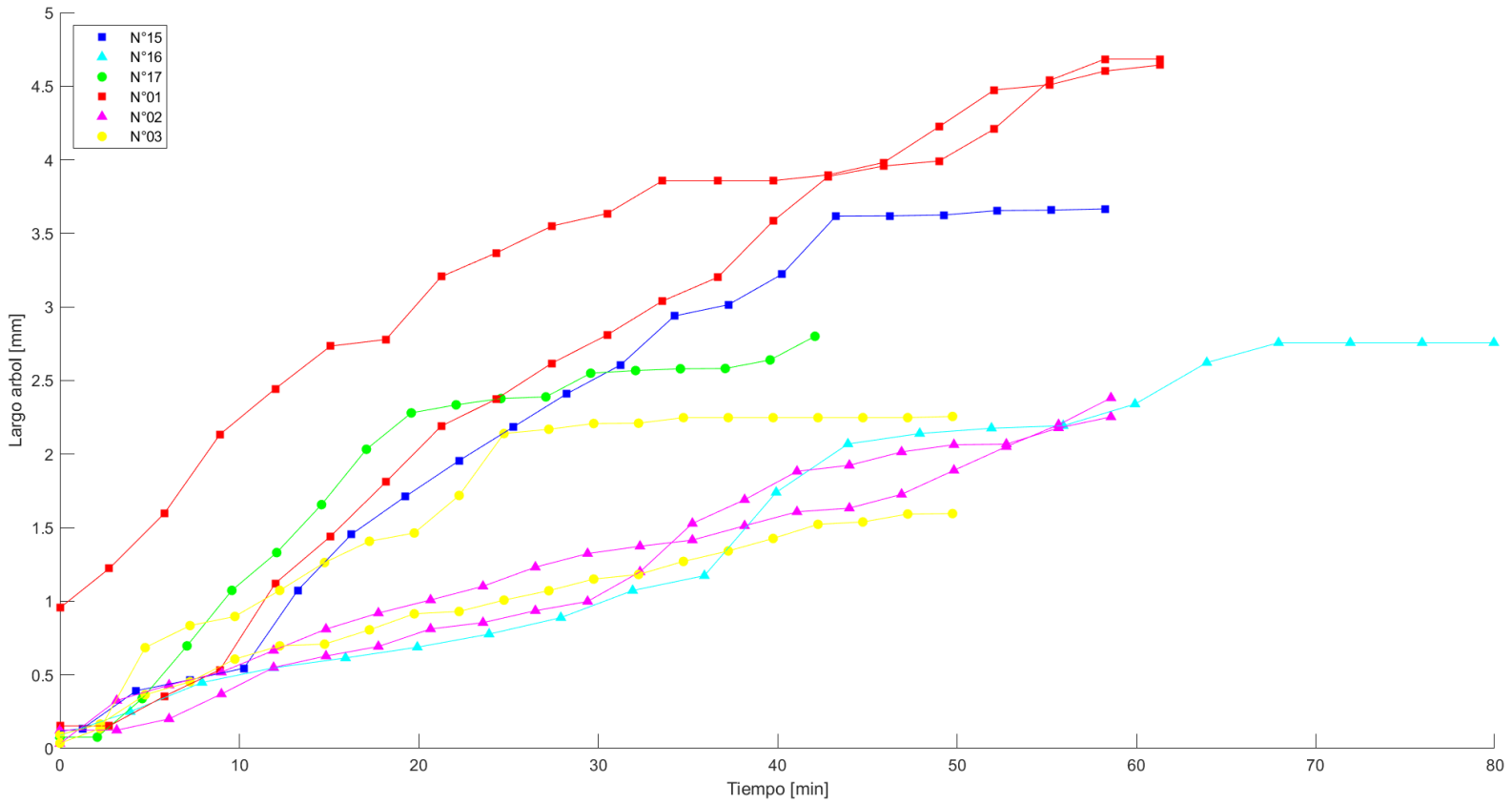


Figura 5.19: Largos de árboles en muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz], con una y dos agujas.

largos similares para tener menos variables a considerar, pero finalmente, este hecho pareció ser de menor importancia.

De 14 muestras, en 5 ocurrió la ruptura en la punta con mayor iniciación. Igualmente, a futuro, esto debe considerarse al momento de realizarse los ensayos, ahora que se tiene un método claro para la iniciación de las puntas. El uso del método de iniciación rápido en aceite, dio lugar a muestras con crecimientos más similares que en los demás casos.

5.3.3 Análisis de descargas parciales

Para el análisis de descargas parciales se prepararon gráficos de interés para cada una de las probetas ensayadas, considerándose como variables:

- Número de agujas en la probeta.
- Tensión de ensayo.
- Frecuencia de ensayo.
- PRPD.
- Magnitud de carga.
- Q_{95}.
- Número de eventos.

Todos los gráficos producidos se encuentran disponibles en el anexo A, para su revisión.

5.3.3.1 PRPD

5.3.3.1.1 Patrón general obtenido

En general, los gráficos de PRPD obtenidos son similares a los descritos en la literatura [3], con muestras que se asemejan a las provocadas por de defectos de vacío [14] en un gran número de ellas, incluidas las muestras de referencia. Esto en consistente con los resultados obtenidos para muestras de una aguja realizados con agujas hipodérmicas [1]. Un ejemplo de esto se puede ver en la figura 5.20, en la cual se indican los patrones que se consideraron causados por arborización y por defectos de vacío.

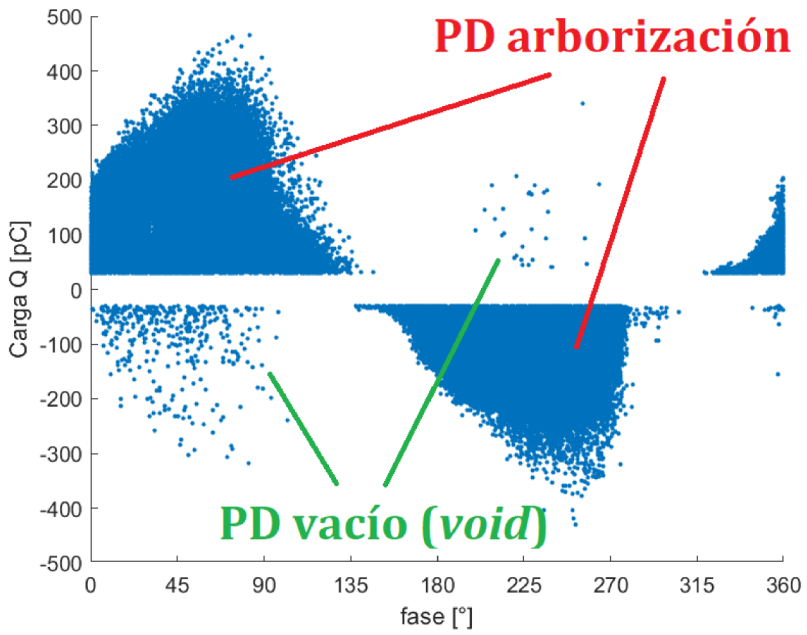


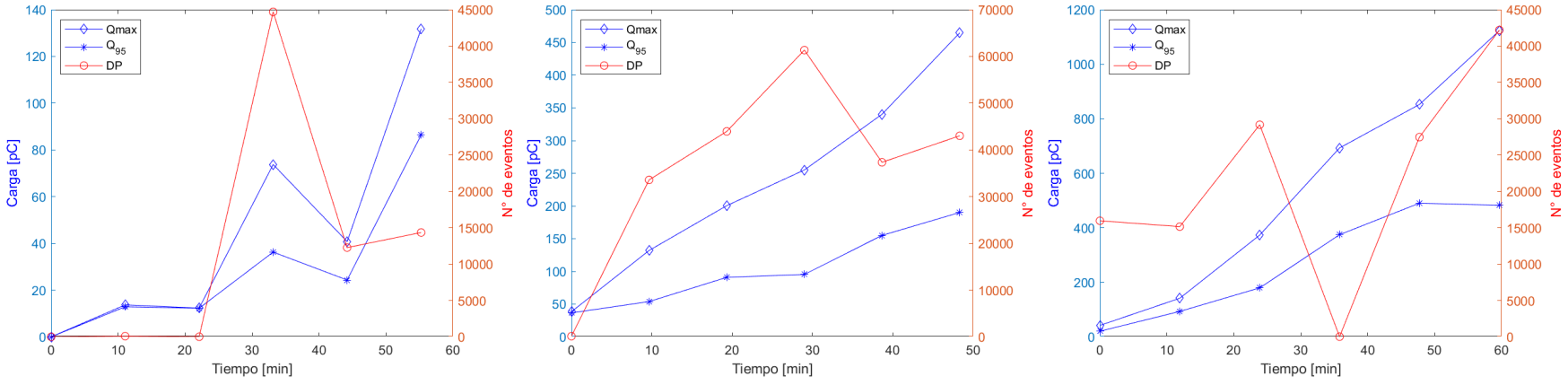
Figura 5.20: PRPD de probeta N°03 mostrando el patrón típico obtenido.

5.3.3.1.2 PRPD de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz]

Se seleccionaron tres probetas representativas según su número de agujas, con tiempos de cruce y ruptura comparables:

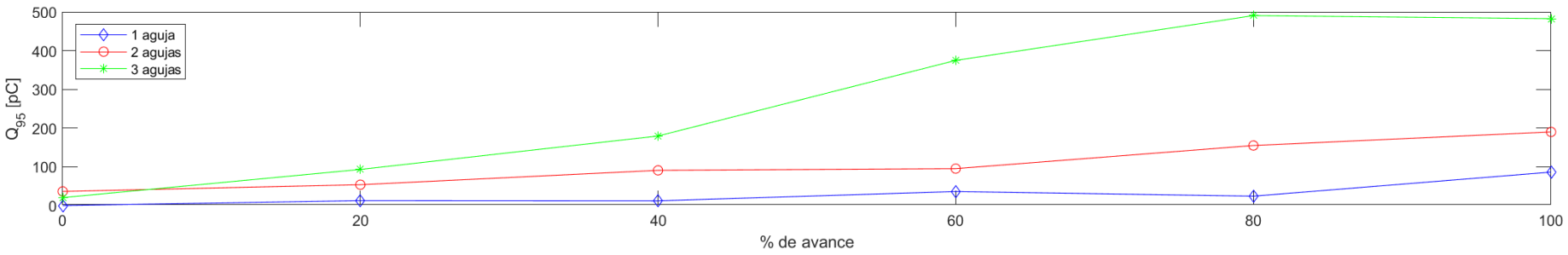
- Probeta N°15: Una aguja.
- Probeta N°03: Dos agujas.
- Probeta N°05: Tres agujas.

Se puede ver en la figura 5.21a una cierta relación entre carga máxima (y Q_{95}) con el número de eventos. Esta relación no es clara en las figuras 5.21b y 5.21c. Si tienen en común la caida en número de eventos, para luego volver a aumentar antes de la ruptura.

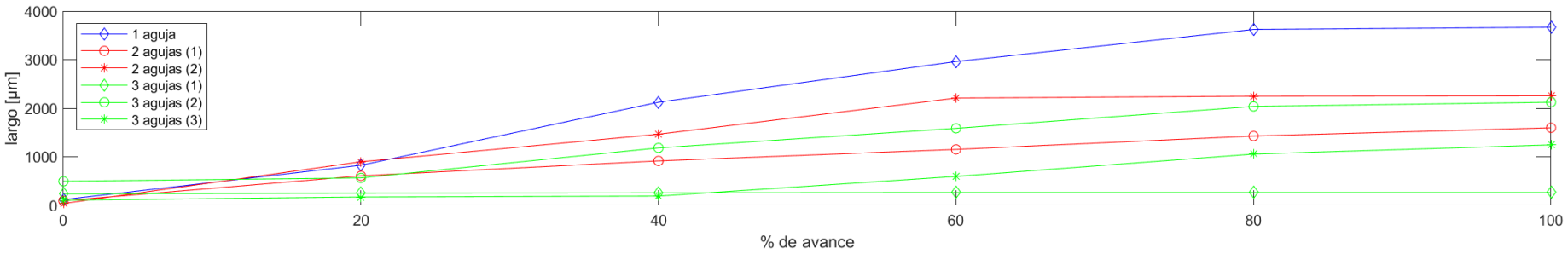


(a) Una aguja. (b) Dos agujas. (c) Tres agujas.

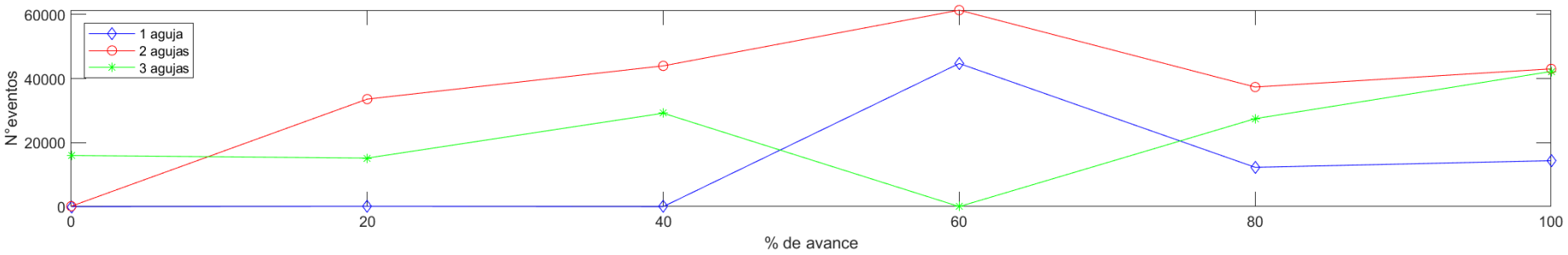
Figura 5.21: Comparación de DP de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz].



(a) Q_{95}.



(b) Largo de árbol por punta.



(c) Número de DP.

Figura 5.22: Comparación de DP y largos de muestras ensayadas a 10[kV] y 50[Hz].

En el caso de las primeras tres muestras de la probeta de una aguja, y la muestra al 60% del tiempo en la muestra de tres agujas, el número de eventos se acercó bastante a cero. Esto no fue una coincidencia en la elección de la muestra, sino que un resultado claro durante un periodo suficientemente largo, en cada caso.

En las figuras en 5.22, se comparan Q_{95}, largo de árbol y número de eventos de las tres probetas analizadas, y según porcentaje de avance. Se puede apreciar una relación inversa entre largos de

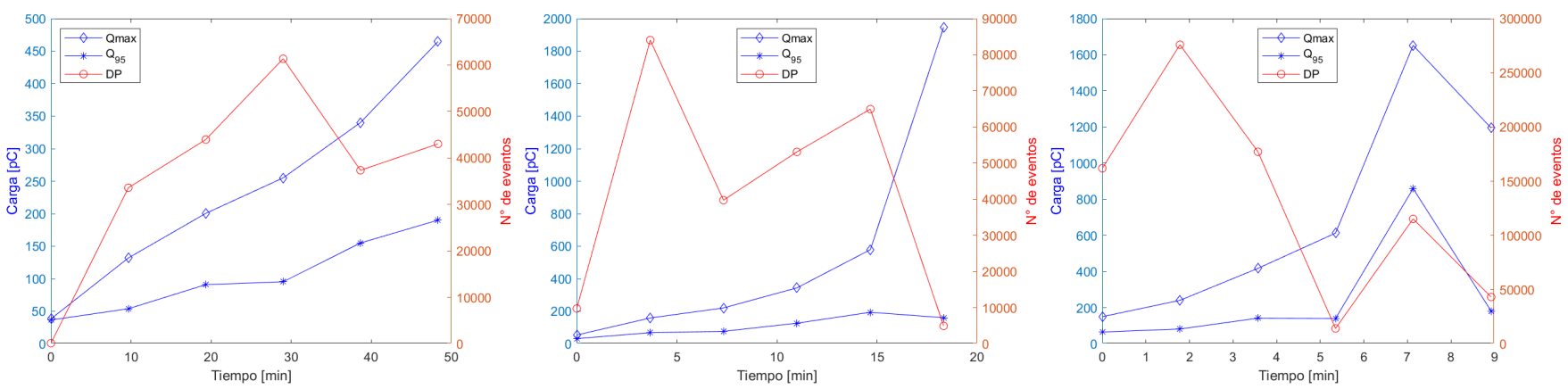
árboles y Q_{95}. La muestra con mayor carga fue la probeta de tres agujas, en cada caso, pero el crecimiento fue menor a las de una y dos agujas. Lo opuesto ocurrió en la muestra de una aguja, donde la carga fue menor pero el crecimiento fue mayor.

Salvo en un caso, el número de eventos fue mayor en las probetas de múltiples agujas, con la excepción del periodo con descargas mínimas en la muestra de tres agujas. Si el crecimiento es comparable en cada aguja ensayada, es de esperar que el número de eventos en casos de múltiples agujas sea mayor.

5.3.3.1.3 PRPD de muestras de dos agujas ensayadas

Se seleccionaron tres probetas representativas de dos agujas, y diferentes condiciones de ensayo:

- Probeta N°03: 10[kV] y 50[Hz].
- Probeta N°08: 14[kV] y 50[Hz].
- Probeta N°12: 10[kV] y 350[Hz].



(a) 10[kV], 50[Hz]. (b) 14[kV], 50[Hz]. (c) 10[kV], 350[Hz].

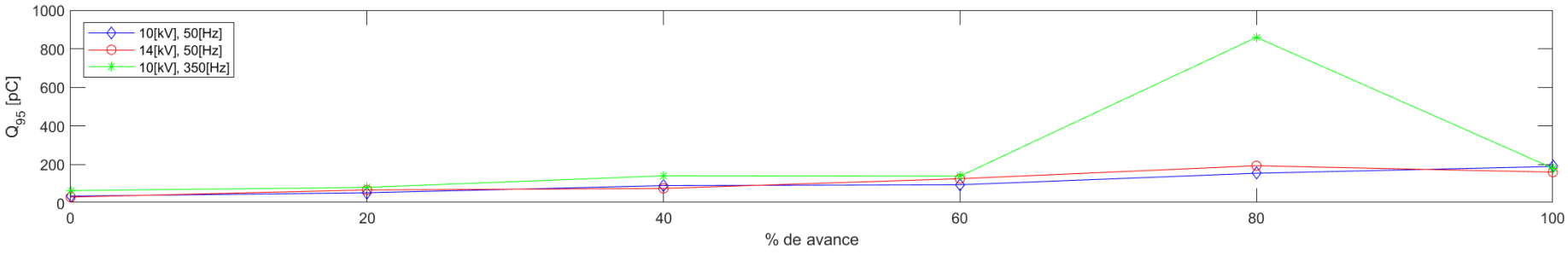
Figura 5.23: Comparación de DP de muestras ensayadas de dos agujas.

Se puede ver que en las tres figuras de 5.23, la carga máxima y percentil 95 aumentan con el tiempo, pero en los casos 5.23b y 5.23c, estas cargas no aumentan en forma lineal. En su lugar, estas aumentan fuertemente cerca del final de las mediciones.

El número de eventos también se comporta de forma distinta, presentando en los casos a tensión o frecuencia mayor, un número de eventos que disminuye cerca del final hasta valores cercanos a su mínimo.

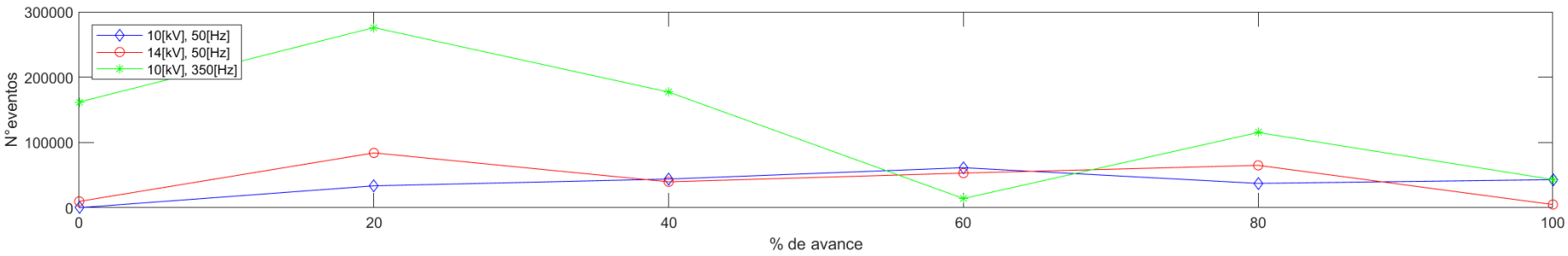
En la figura 5.24 se comparan Q_{95}, largo de árbol y número de eventos de las tres probetas analizadas, y según porcentaje de avance.

Se puede apreciar un aumento en la magnitud de carga en la probeta ensayada a 350[Hz], que los demás resultados se pueden distinguir muy poco entre sí. Esta muestra también es la que



(a) Q_{95}.

(b) Largo de árbol por punta.



(c) Número de DP.

Figura 5.24: Comparación de DP y largos de muestras ensayadas de dos agujas.

presentó mayor largo de árboles final, y en general, un mayor número de eventos en un mucho menor tiempo.

Esto da señas de ser el peor caso de los ensayados con dos agujas.

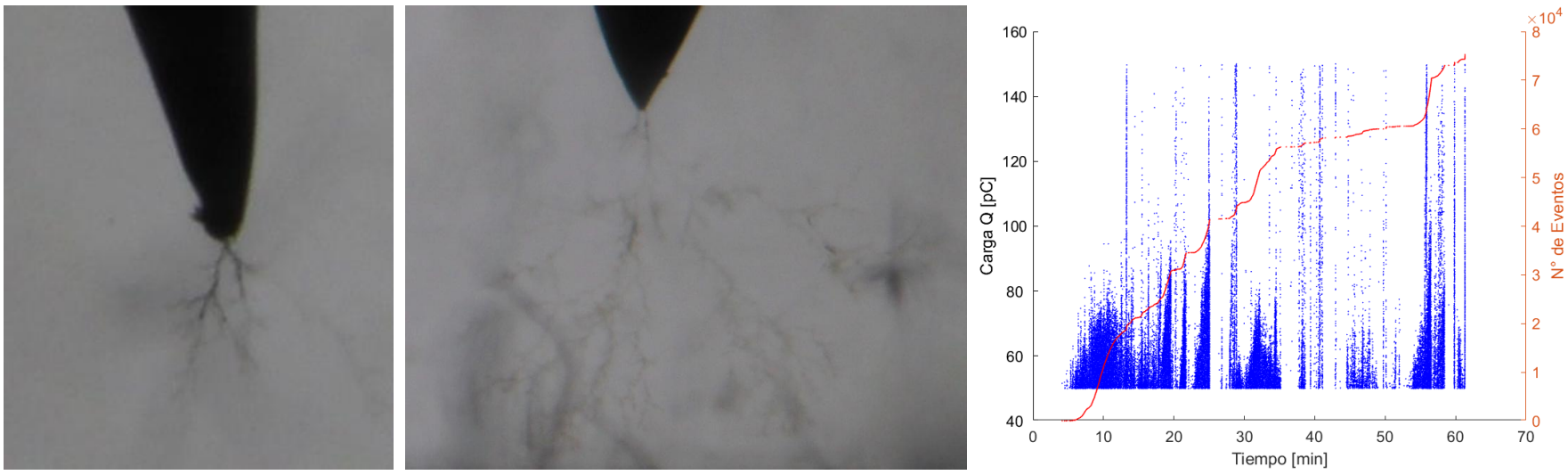
Más adelante, se analizan los distintos parámetros en un mayor número de probetas.

5.3.3.2 Magnitud de carga

Los distintos ensayos entregaron valores de carga máxima entre 80 [pC] y 2500 [pC], siendo los valores más bajos en los que los árboles crecieron de forma más filamentaria y/o con gran diferencia entre tiempos de cruce y ruptura (figuras en 5.25). Los mayores valores, por su parte, ocurrieron en muestras sin diferencia entre tiempos de cruce y ruptura (o muy poca diferencia), y crecimiento más similar al tipo arbusto o mixto arbusto-rama o rama-arbusto (a veces clasificados como “pine”, “bine”, “pine-branch”, “branch-bine”, entre otros [15, 16].), con ramas oscuras desde un principio (figuras en 5.26). No parece haber diferencias notorias entre muestras de una, dos o tres agujas, que no puedan a su vez ser relacionadas a la forma de los árboles formados.

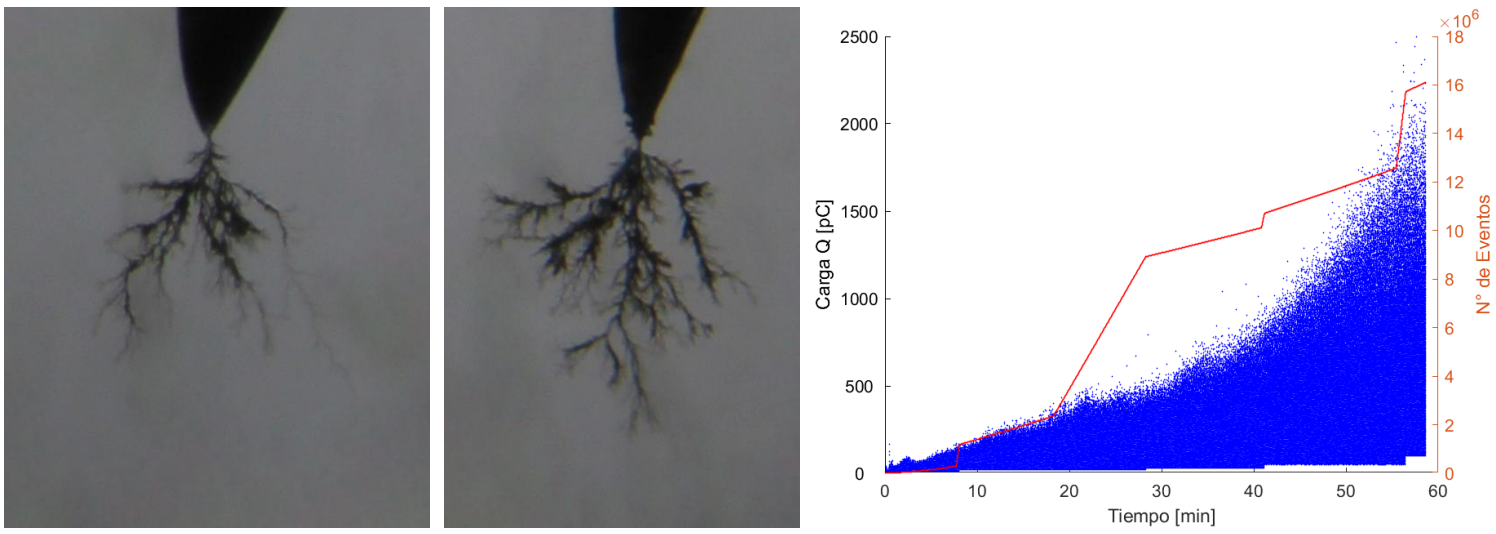
Si se consideran solo las zonas con más descargas en las figuras 5.25c y 5.26c, se pueden diferenciar ambos comportamientos de forma clara, con las descargas por ramas oscuras aumentando con

el tiempo, mientras que en el primer caso se mueve entre elevaciones y momentos con descargas de baja magnitud. Es muy notorio además la diferencia en el ruido de las mediciones en ambos casos.



(a) Punta 1. (b) Punta 2. (c) Carga en el tiempo.

Figura 5.25: Probeta N°01: Árboles de ramas filamentarias y carga asociada.



(a) Punta 1. (b) Punta 2. (c) Carga en el tiempo.

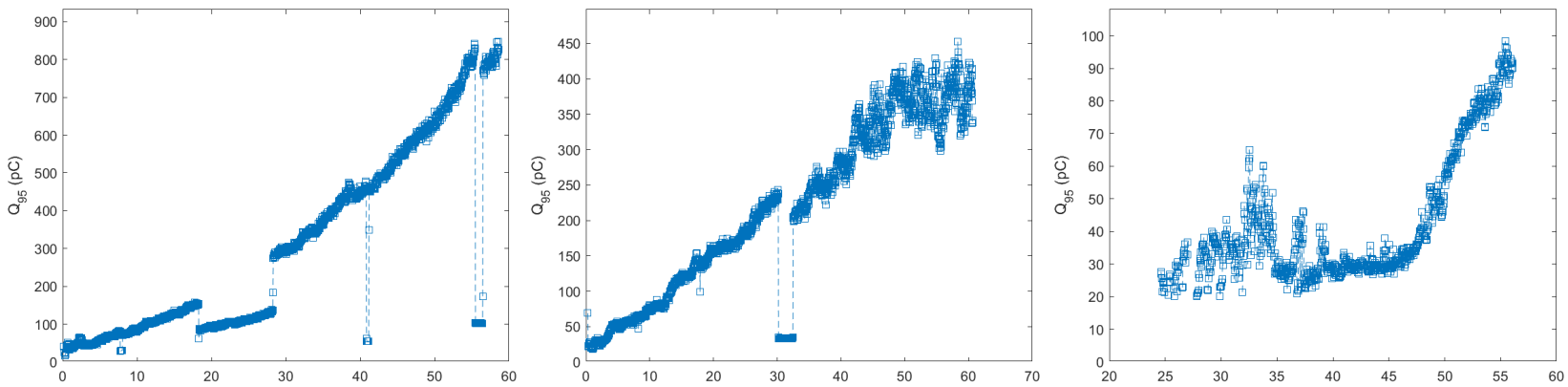
Figura 5.26: Probeta N°02: Árboles de ramas oscuras y carga asociada.

5.3.3.3 Q_{95}

Los gráficos de Q_{95} también entregan información que describe los tipos de árboles, de la misma forma que es posible con muestras tradicionales de una aguja. Los comportamientos de los distintos resultados son similares a lo esperado [17], tanto en muestras con estancamiento como en muestras con ruptura inmediata tras cruzar.

La mayor diferencia aparece al comparar los valores de carga alcanzados, llegando en bastantes casos a superar los 700 [pC] e incluso superarlos, lo que habla de la existencia de descargas de gran

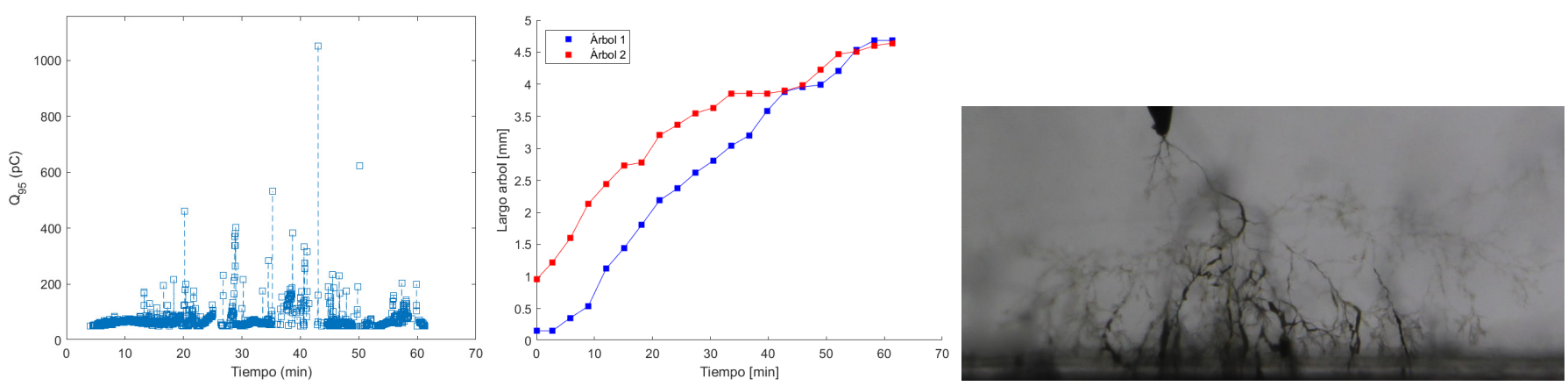
magnitud que no se ocurren en muestras con una sola aguja, ya sea en la literatura como en las muestras de referencia, como se ve en las figuras 5.27a, 5.27b, 5.27c, superando con creces valores de Q_{95} obtenidos en el laboratorio [1, 2] e incluso valores de carga máxima [17].



(a) Probeta N°02 (2 agujas). (b) Probeta N°05 (3 agujas). (c) Probeta N°15 (1 aguja).

Figura 5.27: Diagramas de Q_{95} de ensayos a 10[kV] y 50[Hz].

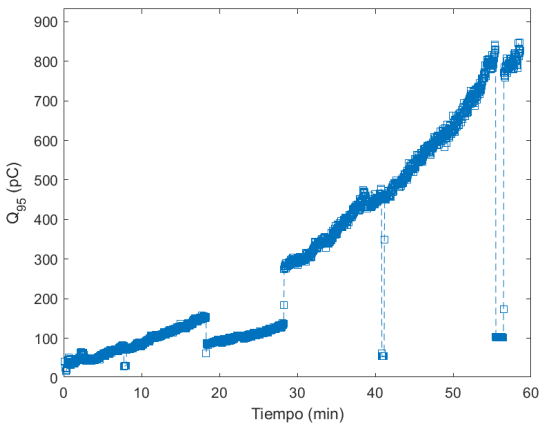
Sobre la forma de las curvas obtenidas, estas son congruentes con las obtenidas en muestras de una aguja, con una distinción clara entre los casos de árboles estancados o con gran diferencia entre tiempos de cruce y ruptura, resultante en árboles oscuros cerca del electrodo de tierra debido al crecimiento inverso [18, 19] (ver 5.28), tipo rama (ver 5.29) y tipo mixto ("pine branch", ver 5.30).



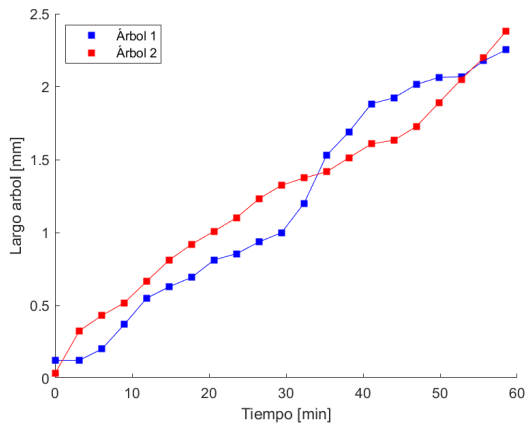
(a) Q_{95}. (b) Largo de árbol. (c) Árbol con crecimiento inverso.

Figura 5.28: Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con crecimiento inverso.

Una dificultad que se presenta en la presencia de árboles de distintos tipos en una misma muestra, y como esto afecta en nuestra habilidad para identificar esto utilizando resultados gráficos. Por ejemplo, en la probeta N°10 (3 agujas, 14[kV], 50[Hz]) existen árboles de tres tipos: estancado, arbusto y rama, pero solo podemos obtener un único gráfico de Q_{95}, como se ve en las figuras 5.31b, 5.31a y 5.31c. Este tipo de gráfico Q_{95} presenta una forma variante en el tiempo, pasando de ser lineal a tener altibajos según cambia el comportamiento de los árboles en la probeta. Este tipo de gráfico fue el más común encontrado durante este trabajo.



(a) Q_{95}.

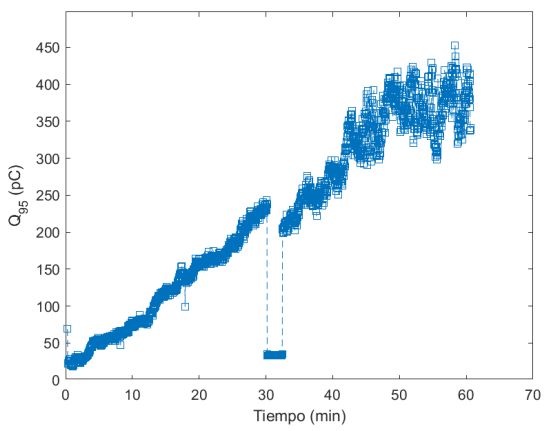


(b) Largo de árbol.

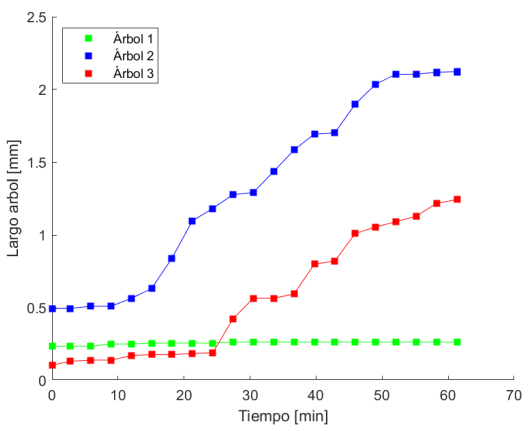


(c) Árbol con ramas oscuras.

Figura 5.29: Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con ramas oscuras.



(a) Q_{95}.

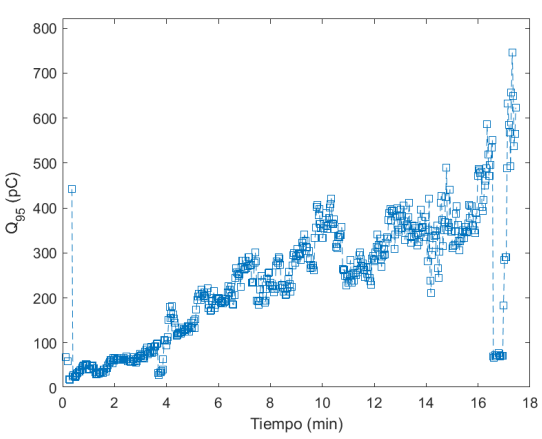


(b) Largo de árbol.

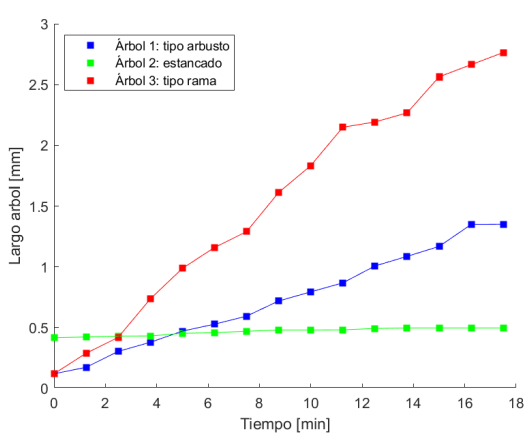


(c) Árbol con crecimiento mixto tipo “pine-branch”.

Figura 5.30: Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles con crecimiento mixto.



(a) Q_{95}.



(b) Largo de árboles.



(c) Árboles con crecimiento tipo arbusto, estancado y rama (separación entre agujas de 12.6 [mm] y 9.5 [mm]).

Figura 5.31: Relación entre gráfico Q_{95} y morfología de árboles de muestra con árboles variados.

5.4 Muestras de punta - placa curva

Se fabricaron tres probetas en total, con electrodos de punta - placa curva. Estas fueron ensayadas bajo tres condiciones distintas con el fin de estudiar los resultados encontrados por monitoreo visual y por análisis de descargas parciales, y comparar su comportamiento al encontrado en muestras típicas con electrodos de punta - placa.

5.4.1 Monitoreo visual

Siguiendo la misma línea de estudio realizada con las muestras de múltiples agujas, se considerarán ciertas variables de interés, y se estudiará el comportamiento de las muestras en comparación a muestras tradicionales.

Estas variables incluyen:

- Tensión de ensayo.
- Frecuencia de ensayo.
- Tiempo de cruce.
- Tiempo de ruptura.
- Morfología de árbol: forma, largo y ancho.

A diferencia de las muestras de múltiples agujas, el monitoreo visual de estas muestras resulta menos claro por la calidad de las imágenes. El enfoque en este caso resultó ser de gran dificultad, por motivos relacionados al electrodo de tierra que provoca sombras indeseadas, y a las imperfecciones de los bordes de la parte curva de las probetas, afectando la correcta iluminación de esa zona.

5.4.1.1 Cruce y ruptura

En la tabla 5.1 muestras los tiempos de cruce y ruptura de los ensayos realizados, y la razón entre estos tiempos.

Estos tiempos revelan un comportamiento muy distinto al encontrado en probetas tradicionales. En el caso de la probeta N°18, su tiempo de cruce es un 50% mayor al más alto encontrado en las muestras de referencia, y su tiempo de ruptura es 300% mayor. Al comparar estos resultados con otros obtenidos en el LAT-USM en otras oportunidades, es posible ver que el tiempo de ruptura de la probeta N°19 también es muy superior a lo esperable, con más del doble del tiempo de ruptura de muestras similares, incluso con un tiempo de cruce similar [2]. Solo la muestra N°20

Probeta	Condición de ensayo	Tiempo de cruce [min]	Tiempo de ruptura [min]	Ratio entre tiempos [-]
N°18	10 [kV], 50 [Hz]	96.92	252.92	0.383
N°19	14 [kV], 50 [Hz]	25.25	91.67	0.275
N°20	10 [kV], 250 [Hz]	7.42	9.67	0.767

Tabla 5.1: Tiempos de cruce y ruptura de muestras punta-placa curva.

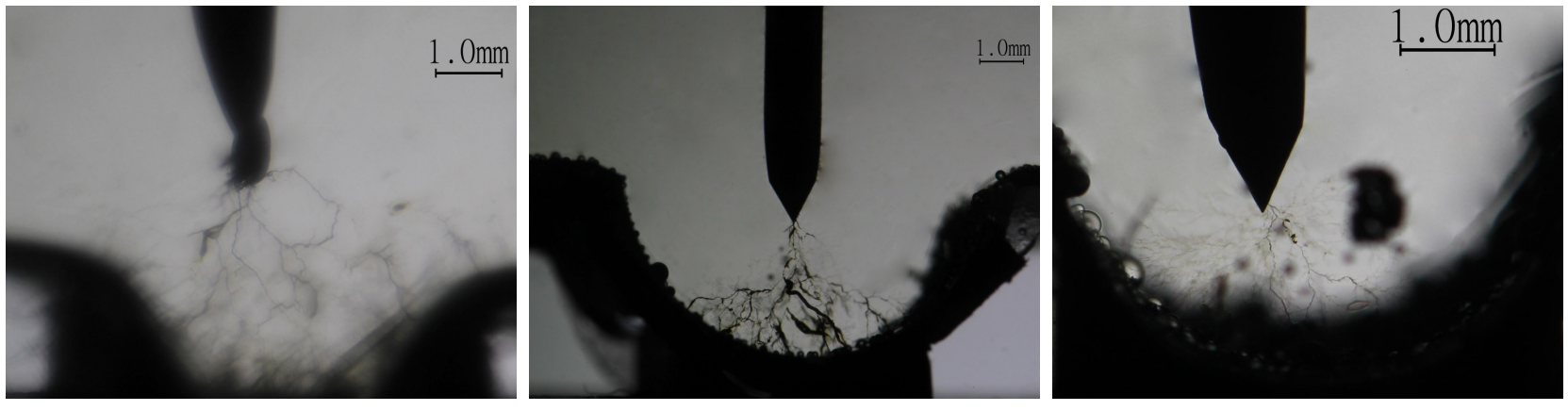
tuvo tiempos de cruce y ruptura bajos, cercano a lo esperado para su condición de ensayo. Al ser esta la única muestra a una frecuencia superior a la industrial es un factor a tener en cuenta.

No se debe descartar que esto pudiera tener relación con la calidad de la resina utilizada, similar al problema ocurrido con las muestras N°13 y N°14, discutido con anterioridad. Mas resultados serían necesarios para poder concluir de forma definitiva el efecto en el tiempo de ruptura del uso de una placa curva como electrodo.

5.4.1.2 Formas de árboles

Las formas de los árboles obtenidos, incluidos en las figuras en 5.32, muestran comportamientos diferentes a los vistos en otros casos. En los tres casos, pero más notoriamente en la figura 5.32b, se puede ver que los árboles son de tipo rama con múltiples de estas haciendo contacto con el electrodo de tierra, teniendo un crecimiento radial. Incluso al observarse un crecimiento en forma de ramas filamentarias, dada la geometría de la muestra, el resultado final aparenta ser un arbusto.

Estos árboles fueron inicialmente filamentarias, con la probeta N°18 comenzando como arbusto antes de pasar a ramas, y se oscurecieron una vez cruzado. En los tres casos el contacto ocurrió a lo largo de toda el área de contacto entre probeta y electrodo de tierra, pero siempre con la ruptura ocurriendo en forma vertical.



(a) 10[kV], 50[Hz]. (b) 14[kV], 50[Hz]. (c) 10[kV], 250[Hz].

Figura 5.32: Árboles en probetas con placa curva según condición de ensayo.

5.4.1.3 Largo y ancho de árboles

Dadas la similitud en las formas de los árboles, es de esperar que no exista una diferencia muy sustancial respecto a sus largos y anchos máximos. La tabla 5.2 incluye los largos y anchos máximos de los árboles, pero además se incluyen las distancias mínimas y máximas entre punta y electrodo de tierra, mostrando que el menor largo ocurrió en la punta más cercana.

Probeta	Dist. mín. a electrodo [mm]	Dist. máx. a electrodo [mm]	Largo máx.[mm]	Ancho máx.[mm]	Velocidad de crecimiento[μm/min]
N°18	2.66	4.23	4.05	5.37	41.79
N°19	3.01	3.34	3.38	5.21	133.86
N°20	1.52	2.88	2.01	3.20	270.89

Tabla 5.2: Largos y anchos máximos de árboles en probetas con placa curva, y distancia entre electrodos.

El largo y ancho máximo de la muestra N°18 son superiores a los obtenidos en las muestras de referencia, y más importantemente, dado el crecimiento radial que se observa, el área efectiva afectada por el crecimiento del árbol es mayor. La velocidad de cruce de la muestra N°18 es la mitad que en las muestras de referencia (99.31[μm/min] en promedio).

5.4.2 Análisis de descargas parciales

Para el análisis de DP, se prepararon gráficos de interés para las tres probetas ensayadas, y se compararon a los resultados esperables en probetas de una aguja, considerándose como variables:

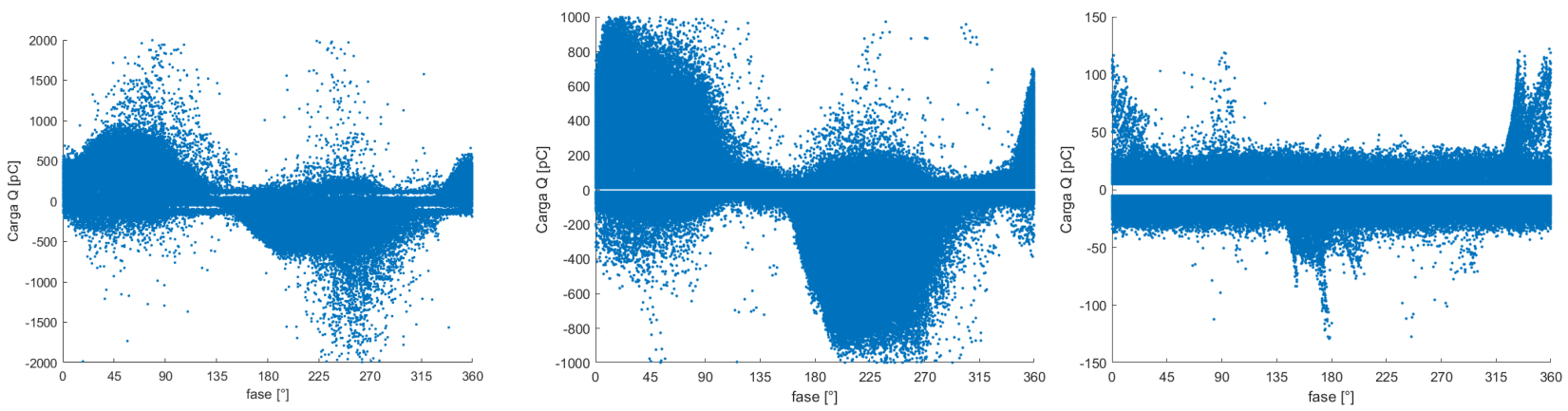
- Tensión de ensayo.
- Frecuencia de ensayo.
- PRPD.
- Magnitud de carga.
- Q_{95}.
- Número de eventos.

5.4.2.1 PRPD

5.4.2.1.1 Patrón general obtenido

Los gráficos de PRPD obtenidos son del mismo tipo que los obtenidos en las probetas con múltiples agujas, y que ya fueron discutidos. Si se debe comentar el gran nivel de ruido de las muestras

obtenidas, como se ve en las figuras en 5.33. Parte de este ruido podría verse disminuido al utilizarse una probeta libre de descargas más similar a las ensayadas.



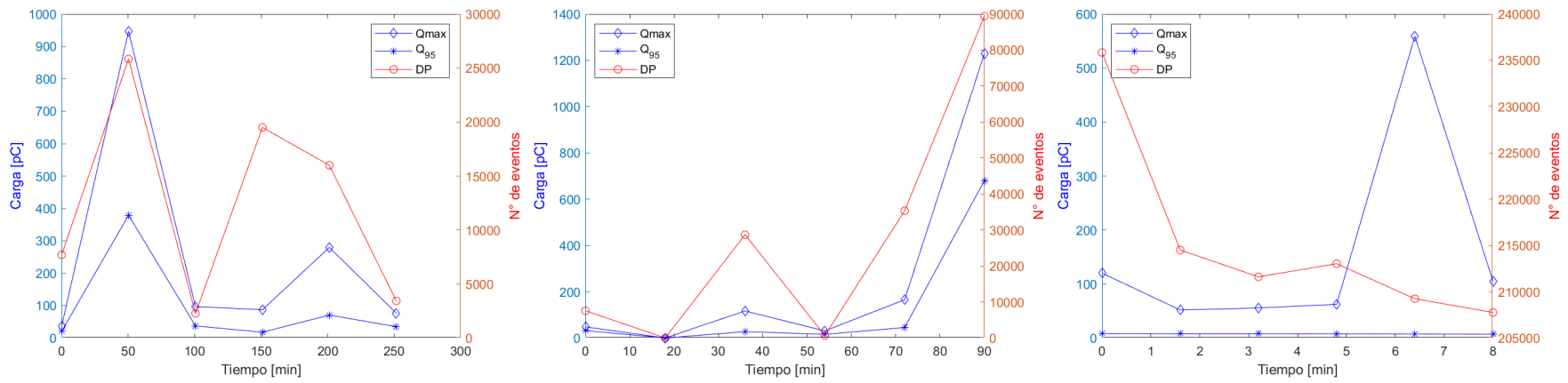
(a) Probeta N°18. (b) Probeta N°19. (c) Probeta N°20.

Figura 5.33: PRPD de probetas con placa curva.

5.4.2.1.2 PRPD de muestras con placa curva

Se analizaron las tres probetas fabricadas:

- Probeta N°18: 10[kV], 50[Hz].
- Probeta N°19: 14[kV], 50[Hz].
- Probeta N°20: 10[kV], 250[Hz].

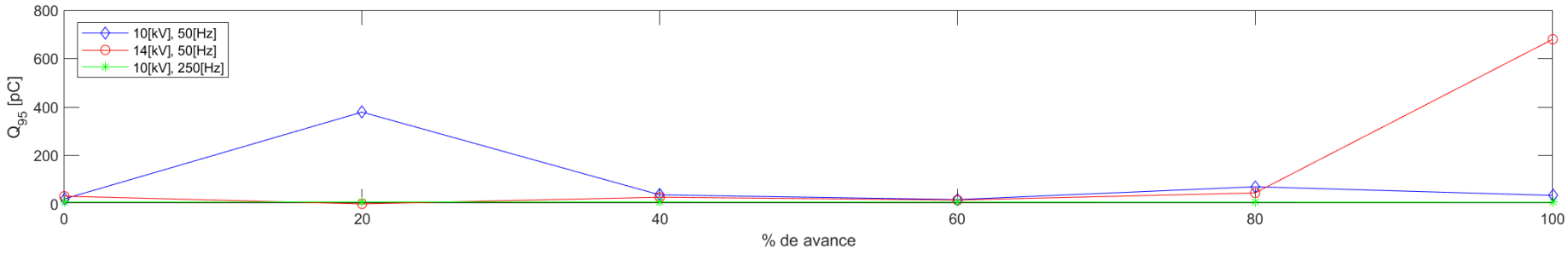


(a) 10[kV], 50[Hz]. (b) 14[kV], 50[Hz]. (c) 10[kV], 250[Hz].

Figura 5.34: Comparación de DP de muestras con placa curva ensayadas.

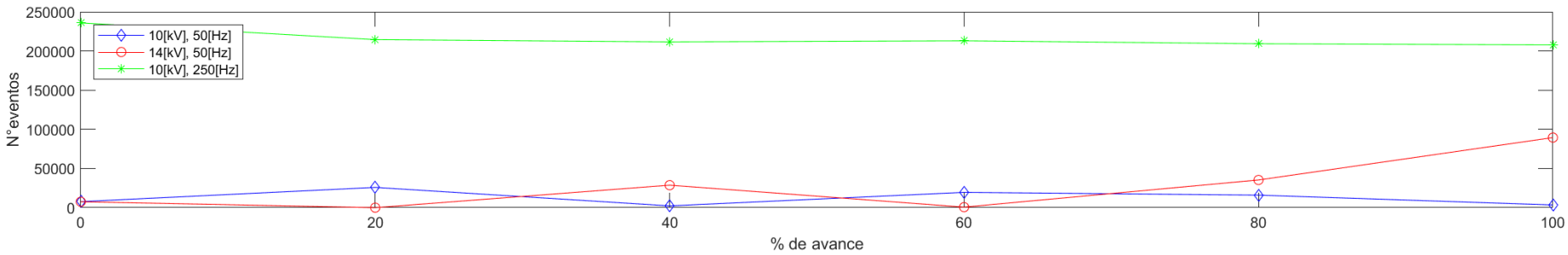
Se puede ver en las figuras 5.34a y 5.34b una relación entre carga máxima (y Q_{95}) con el número de eventos. Esta relación no es clara en la figura 5.34c, cuya carga Q_{95} se mantuvo en niveles muy bajos, entre 7[pC] y 8[pC].

También tienen comportamientos mucho más erráticos al comparar cuantas DP ocurrieron en cada muestra. En un caso estas aumentaron significativamente al acercarse el final del ensayo, en



(a) Q_{95}.

(b) Largo de árbol.



(c) Número de DP.

Figura 5.35: Comparación de DP y largos de muestras con placa curva ensayadas.

otra el número fue alto desde un principio, pero bajó con el tiempo. Es un punto interesante para estudiarse, si este comportamiento es así por su tipo de construcción.

En las figuras en 5.35, se comparan Q_{95}, largo de árbol y número de eventos de las tres probetas analizadas, y según porcentaje de avance. Se puede apreciar como la mayor carga Q_{95} ocurrió en el comienzo del crecimiento de la probeta N°18, y en la ruptura de la probeta N°19.

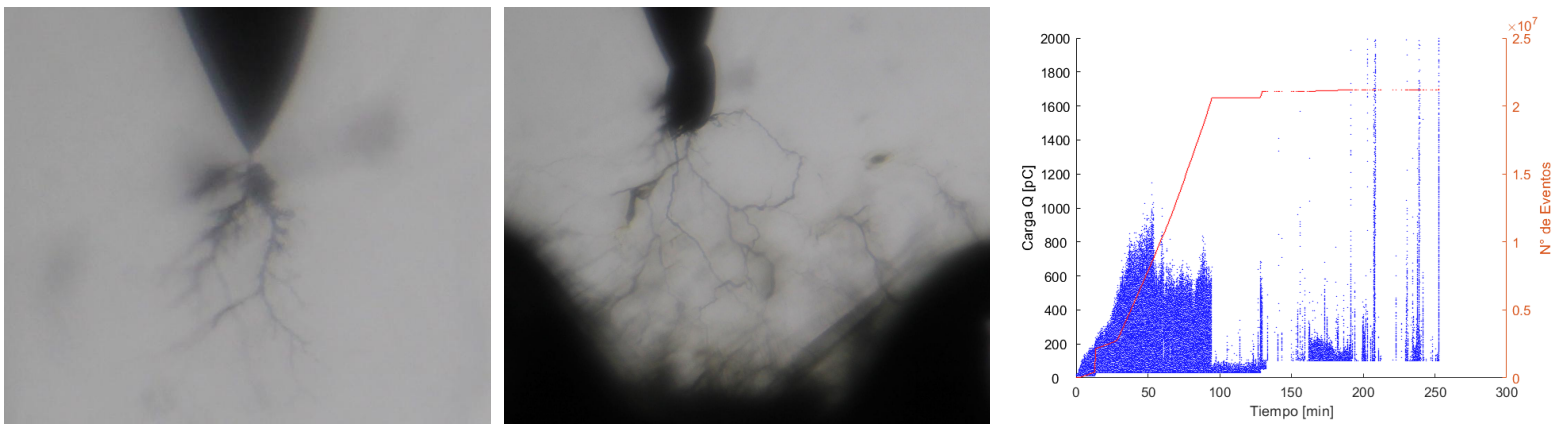
La probeta N°20, por otro lado, tuvo simultáneamente el mayor número de descargas parciales, así como la menor carga Q_{95}. Este resultado, si bien no puede compararse directamente a otros en esta prueba, si se puede relacionar a estos, y al hacerlo resulta bastante extraño. Una mayor frecuencia (350[Hz]) resultó en mayor magnitud de carga y menor número de eventos en la mayoría de los casos. Este tipo de discrepancias da motivos para continuar este estudio a futuro.

Más adelante, se analizan los distintos parámetros en un mayor número de probetas.

5.4.2.2 Carga en el tiempo

En el caso de la probeta N°18, como se ve en la figura 5.36c, bastantes descargas alcanzaron magnitudes sobre los 700[pC], antes de que estas cayeran y la muestra presentara descargas de muy baja magnitud hasta prácticamente su ruptura. Estos valores son mayores a los obtenidos en

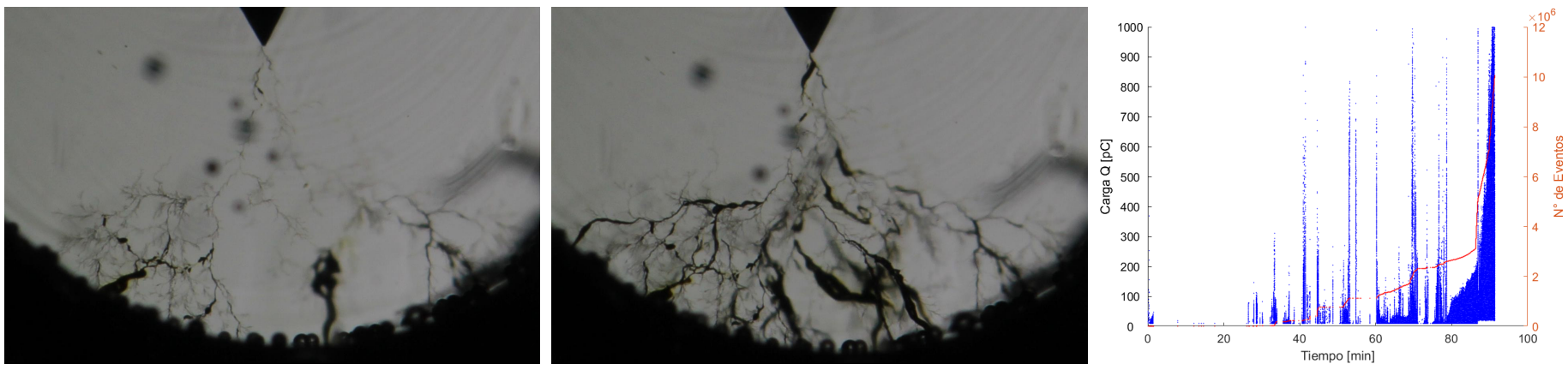
las muestras de referencia. Como se puede ver en 5.36a, el árbol formado inicialmente es de ramas oscuras, y luego en 5.36b, este pasa a ser principalmente filamentario, lo que es consistente con los resultados obtenidos con múltiples agujas.



(a) Crecimiento inicial. (b) Crecimiento pre-ruptura. (c) Carga en el tiempo.

Figura 5.36: Probeta N°18: Relación entre carga y tipo de árbol.

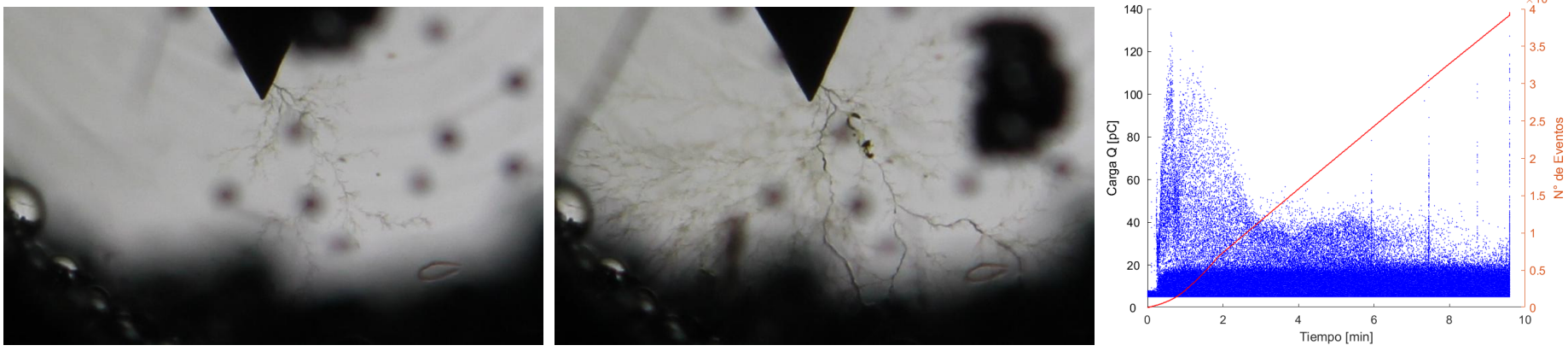
La probeta N°19, ensayada a mayor tensión tiene un comportamiento distinto, alcanzando descargas consistentemente sobre 200[pC] solo al final del crecimiento, como se ve en la figura 5.37c. Esto se ha visto ocurre al oscurecerse las ramas, mientras al principio estas solo son filamentarias. Ese mismo comportamiento se puede ver en las figuras 5.37a y 5.37b.



(a) Crecimiento inicial. (b) Crecimiento pre-ruptura. (c) Carga en el tiempo.

Figura 5.37: Probeta N°19: Relación entre carga y tipo de árbol.

La probeta N°20, ensayada a mayor frecuencia, por su parte, tiene un menor número de descargas con magnitudes sobre la banda de 20[pC] que aparenta ser principalmente ruido, como se ve en la figura 5.38c. Estas descargas de baja magnitud y en bajo número se mantienen hasta la ruptura, y como se ve en las figuras 5.38a y 5.38b, están relacionadas a ramas filamentarias que presentan incluso al momento de la ruptura poco oscurecimiento.



(a) Crecimiento inicial. (b) Crecimiento pre-ruptura. (c) Carga en el tiempo.

Figura 5.38: Probeta N°20: Relación entre carga y tipo de árbol.

5.4.2.3 Número de eventos

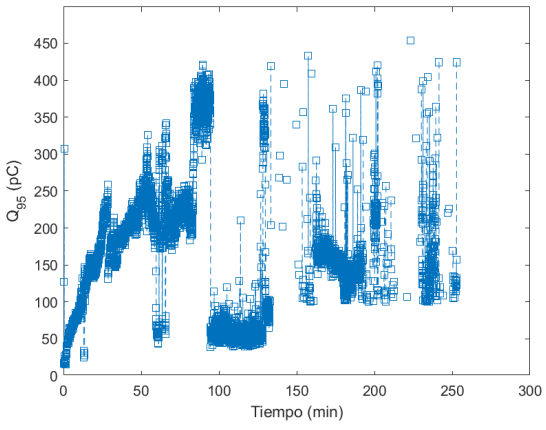
El número de eventos, dado el nivel de ruido medido, es de poco uso. Si es de notar que el número de descargas aparentes obtenidas en estas pruebas es menor a los casos de múltiples agujas, e incluso a los casos de una aguja utilizados como referencia. Un estudio más preciso podría dilucidar si esto es factual.

5.4.2.4 Q_{95}

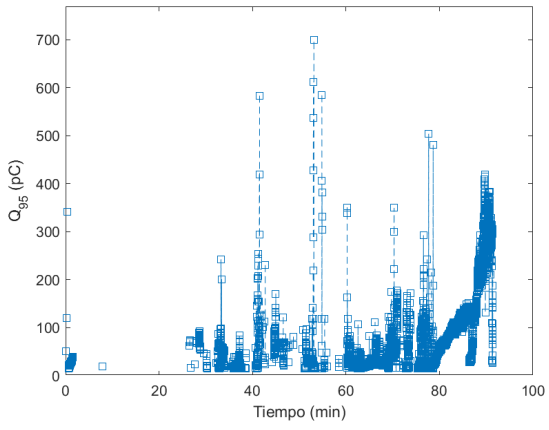
Los gráficos de Q_{95} contra el tiempo no hacen más que confirmar los resultados anteriores. Con un aumento lineal en un principio para luego mantenerse en altibajos para la probeta N°18 (figura 5.39a), propio de crecimientos oscuros en un principio y filamentarios al final, y lo opuesto para la probeta N°19 (figura 5.39b), con crecimiento filamentario en un principio que pasó a ser oscuro al avanzar el ensayo.

El resultado de la probeta N°20 es el más desigual a lo visto con anterioridad, con una pendiente negativa. Las bajas magnitudes, como se comentó anteriormente, obedecen a su crecimiento filamentario que no varió a lo largo de la prueba.

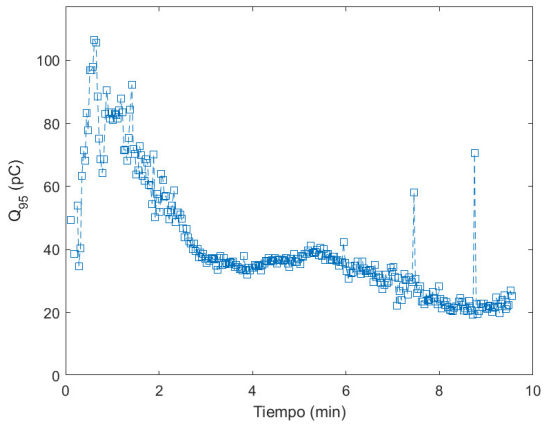
Al comparar los gráficos de Q_{95} con los largos de árboles (figuras en 5.40), se puede notar que nuevamente las zonas con altibajos en el primer diagrama se relacionan a momentos sin aumento en el largo máximo de los árboles, ya en post-cruce. También se puede ver que el crecimiento del árbol de la probeta N°19 ocurrió con descargas de muy baja magnitud, que no se ven en la figura 5.39b.



(a) Probeta N°18.

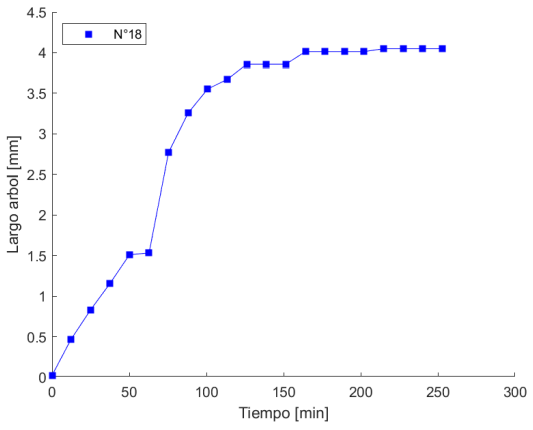


(b) Probeta N°19.

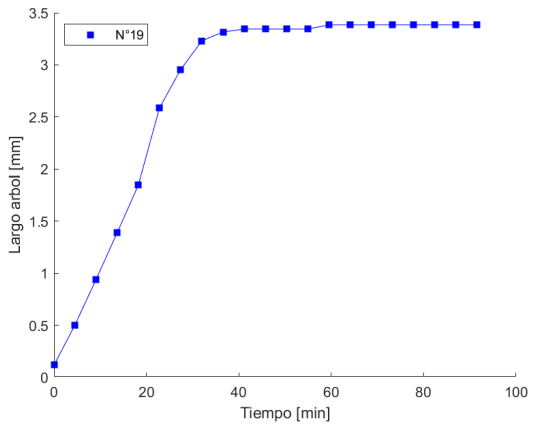


(c) Probeta N°20.

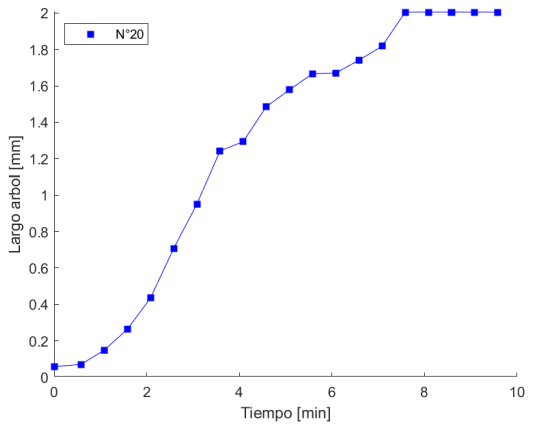
Figura 5.39: Diagramas Q_{95}.



(a) Probeta N°18.



(b) Probeta N°19.



(c) Probeta N°20.

Figura 5.40: Largos de árboles en el tiempo.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo se diseñaron, fabricaron y ensayaron probetas para estudios de árboles eléctricos con electrodos de punta y placa con formas inusuales, probetas con múltiples electrodos de punta hacia un único electrodo de placa y probetas de una punta hacia una placa curva, con el fin de determinar si sus comportamientos resultan ser de interés o incluso ser una nueva área de estudio.

Dada la presencia de defectos adicionales provocados por la calidad variable de la resina epóxica utilizada, incluyendo un gran número de burbujas en algunas probetas, algunos de los resultados obtenidos en esta investigación podrían verse afectados en un estudio más consistente.

6.1.1 Crecimiento de múltiples árboles eléctricos

Es posible tener crecimiento simultaneo en una misma muestra. En este trabajo, un tercio de las muestras ensayadas presentó crecimiento simultaneo, y se considera que este número aumente al aplicarse mejoras al método utilizado. La mayor dificultad encontrada fue respecto a la iniciación de múltiples agujas en una misma muestra, sin que continuara el crecimiento de la primera iniciación creada. En un ensayo, se logró incluso iniciación simultánea en tres agujas, alimentando todas a la vez, por lo que es posible que este evento pueda ocurrir en un caso real.

En general, las muestras con crecimiento simultaneo llegan a la ruptura más rápido que sus pares sin crecimiento simultaneo, y en tiempos similares a los de probetas de una aguja. Los resultados obtenidos a distintas condiciones de ensayo son consistentes con los esperados en probetas de una aguja, sin excentricidades.

Solo existió crecimiento simultaneo en muestras con separación entre punta y placa de al menos 2.25[mm] y separación entre agujas menor a 20[mm] (y menor a 9[mm] en el caso de 10[kV] y 50[Hz]). Es posible que estos representen condiciones límite para conseguir crecimiento simultaneo.

Las muestras de múltiples agujas presentaron mucha variedad en sus árboles, en probetas ensayadas bajo las mismas condiciones, e incluso con distintas formas en una misma probeta. En particular, al comparar los largos y anchos de árboles obtenidos, los mayores y menores resultados correspondieron a muestras de múltiples agujas.

El largo de los árboles en probetas de dos agujas es similar, prácticamente idéntico en algunas muestras, independiente de las condiciones de ensayo, y a la velocidad esperada en una muestra de una aguja ensayada en las mismas condiciones. En cambio, en probetas de tres agujas, existen tres velocidades de crecimiento en las muestras, con un árbol creciendo a la misma velocidad que una muestra de una aguja, un segundo árbol a aproximadamente la mitad de esta velocidad, y el tercer árbol prácticamente estancado. No queda claro el motivo de estos comportamientos, ni si este depende de alguna variable en particular.

Respecto al análisis de descargas parciales, los patrones de carga (Φ-q-n) obtenidos son del mismo tipo que en muestras de una aguja. Sin diferencias notorias. Según condición de ensayo, la muestra ensayada a 350[Hz] analizada, presentó mayor número de DP y magnitud de carga. Según número de agujas, existió una relación inversa entre largo de árbol y magnitud de carga.

La magnitud de carga alcanzada en algunas muestras es muy superior a lo medido en probetas de una aguja, llegando a ser hasta 5 veces mayor que la obtenida en las muestras de referencia. El valor representativo Q_{95} presentó resultados similares, con mayores magnitudes en probetas de dos agujas que de una o tres agujas.

En la mayoría de las probetas, el crecimiento de árboles fue dispar en su forma, pudiendo un árbol ser tipo arbusto y otro tipo rama filamentaria. También se vieron casos en que los árboles crecían alternativamente, o la forma del crecimiento de un árbol cambiaba completamente en algún punto del ensayo. Esto conllevó a que los gráficos obtenidos sean complejos de analizar sin información adicional respecto a la forma de los árboles.

En resumen, las muestras de dos agujas tienen dos árboles con crecimientos similares a los de muestras de una aguja, con anchos potencialmente mayores, y tiempos de ruptura similares o menores, independiente de las condiciones de ensayo, por lo que estas representan un peor caso que los de probetas de una aguja, e incluso que los de probetas de tres agujas. De la mano a estos resultados, se tuvieron magnitudes de carga significativamente mayores a los obtenidos en muestras de una aguja.

6.1.2 Probetas con placa curva

El estudio de crecimientos de árboles eléctricos en probetas punta - placa curva, presenta dificultades adicionales a las vistas en los casos de placa plana, y resultados muy distintos a sus contrapartes.

En primer lugar, conseguir que la punta de la aguja utilizada se ubique equidistante a todo el plano es sumamente complejo. En caso de conseguirlo, observar este resultado durante un ensayo, es complejo, debido al mal comportamiento de la cámara fotográfica con esta configuración, con sombras no deseadas y problemas de enfoque. A pesar de estos desafíos, los resultados obtenidos llevan a pensar que este tipo de estudio puede llevar a descubrimientos de interés.

Los crecimientos obtenidos asemejan árboles tipo arbusto, pero se comportan como árboles tipo rama filamentaria, con gran diferencia entre tiempos de cruce y ruptura. Estos tiempos son, además, mucho mayores a los que transcurren en muestras de placa plana, con tiempos de cruce un 50% mayor y tiempo de ruptura un 300% mayor. La probeta ensayada a mayor frecuencia fue una excepción a este comportamiento, mostrando que podrían haber diferencias importantes en los resultados obtenibles según frecuencia de ensayo. Al comparar las velocidades de crecimiento hasta el cruce, esta es la mitad que, en probetas con placa plana, en promedio. Es posible que estos tiempos se hayan visto afectados por problemas relacionados a la resina utilizada en estos ensayos, que afectó otras investigaciones realizadas en conjunto.

Respecto al PRPD, los patrones obtenidos fueron similares a los casos de placa plana. En este análisis, el comportamiento al aumentar la frecuencia de excitación fue distinto a lo visto en muestras de múltiples agujas, con una disminución en la magnitud de carga en lugar de un aumento, en comparación a muestras ensayadas a 50[Hz].

Las magnitudes de carga fueron también mayores, alcanzando hasta 700[pC], con comportamientos similares a los resultados obtenidos en muestras de múltiples agujas. Los tipos de crecimiento observados fueron consistentes también con los gráficos de carga en el tiempo.

En resumen, las probetas punta - placa curva presentan crecimientos con descargas de mayor magnitud que sus pares de placa plana. Los mayores tiempos de cruce son de notar, pero se desconoce cuanta importancia en estos tuvo la resina utilizada. Por esto, se recomienda estudiar de manera más profunda este tipo de probetas, pues el nivel de daño que pueden provocar podría ser de aún mayor importancia que el de probetas de punta - placa plana, y podría darse de forma más común que los de crecimiento simultaneo.

6.2 Trabajos futuros

Se recomienda continuar con ambas investigaciones iniciadas en este trabajo, enfocándose en obtener resultados con menos ruido y así poder estudiar de manera más precisa las descargas parciales presentes. Para este fin, también se debiesen incluir mediciones de forma de onda de las DP.

Para el estudio de crecimiento simultaneo, se recomienda realizarlos solo con muestras de dos agujas y utilizando el método de iniciación rápida descrito en este trabajo. Se puede fabricar además una probeta libre de descargas de dos agujas, y si es necesario modificar los electrodos para reducir el umbral de ruido. Con estas modificaciones, será posible estudiar a más detalles las mediciones del Omicron, y comprobar si efectivamente la magnitud de carga en estos ensayos es mayor, como se vio en este trabajo.

Para el estudio de probetas con placa curva, realizar un estudio más completo es necesario para dilucidar su comportamiento. Para su fabricación, se recomienda utilizar moldes internos de al menos 2[mm] de radio. Para su ensayo, es necesario solucionar los problemas de iluminación y enfoque encontrados, y fabricar adaptador para el electrodo de tierra que se ajuste de manera aún más precisa a la probeta.

En general, se recomienda considerar otros tipos de resina epóxica, con la que se obtengan resultados consistentes, dados los problemas presentados en este trabajo con distintas partidas de la resina Mepox 1124 UV.

Referencias

[1] Manuel Maureira. Implementación de un banco de pruebas de laboratorio para el monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos y sus descargas parciales asociadas a excitación a frecuencia industrial y VLF. Memoria Título USM, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

[2] Osvaldo Muñoz. Análisis de la forma de onda en descargas parciales durante el crecimiento de árboles eléctricos con excitación de frecuencia variable. Tesis de magister, Universidad Técnica Federico Santa María, 2022.

[3] Tianchun Zhou, Ling Liu, Ruijin Liao, and George Chen. Study on propagation characteristics and analysis of partial discharges for electrical treeing in XLPE power cables. In *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, pages 1–4, Potsdam, Germany, July 2010. IEEE.

[4] Juan Luis Dinamarca. Técnicas de Alta Tensión. Teoría y aplicaciones.

[5] IEC60270 Standard et al. High-voltage test techniques: partial discharge measurements. *IEC-60270*, pages 13–31, 2000.

[6] FH Kreuger, E Gulski, and A Krivda. Classification of partial discharges. *IEEE transactions on Electrical Insulation*, 28(6):917–931, 1993.

[7] J V Champion, S J Dodd, and G C Stevens. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins over a wide range of stressing voltage. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(5):1020–1030, May 1994.

[8] Len A Dissado and John C Fothergill. *Electrical degradation and breakdown in polymers*, volume 9. Iet, 1992.

[9] R.J. Van Brunt. Stochastic properties of partial-discharge phenomena. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26(5):902–948, 1991.

[10] Petrus Henricus Franciscus Morshuis. *Partial Discharge Mechanisms: Mechanisms Leading to Breakdown, Analyzed by Fast Electrical and Optical Measurements*. Delft University Press, Delft, 1993.

[11] Chitral J. Angammana and Shesha H. Jayaram. The Effects of Electric Field on the Multijet Electrospinning Process and Fiber Morphology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(2):1028–1035, March 2011.

[12] Paul F. Bruins. *Epoxy Resin Technology (Polymer Engineering and Technology)*. Interscience, 1968.

[13] Roger Schurch, Osvaldo Munoz, and Jorge Ardila-Rey. Electrical tree growth under harmonic frequencies characterized by partial discharges waveforms. In *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pages 168–171, East Rutherford, NJ, USA, October 2020. IEEE.

[14] Taufik Rossal Sukma, Umar Khayam, Suwarno, Ryouya Sugawara, Hina Yoshikawa, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Osamu Eda, Masanori Otsuka, Hiroshi Kaneko, and Yasuharu Shiina. Classification of Partial Discharge Sources using Waveform Parameters and Phase-Resolved Partial Discharge Pattern as Input for the Artificial Neural Network. In *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pages 1–6, Perth, WA, September 2018. IEEE.

[15] Xiaoquan Zheng and George Chen. Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigating a double electrical tree structure. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(3):800–807, June 2008.

[16] B X Du, T Han, Y Gao, Z L Ma, and X H Zhu. Dependence of electrical treeing behavior on cross-linking temperature of XLPE. In *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectic Phenomena*, pages 1–4, West Lafayette, IN, October 2010. IEEE.

[17] Xiangrong Chen, Yang Xu, Xiaolong Cao, S. Dodd, and L. Dissado. Effect of tree channel conductivity on electrical tree shape and breakdown in XLPE cable insulation samples. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(3):847–860, June 2011.

[18] Hualong Zheng, Simon M. Rowland, Ibrahim Iddrissu, and Zepeng Lv. Electrical treeing and reverse tree growth in an epoxy resin. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(6):3966–3973, December 2017.

[19] Boxue Du, Meng Tian, Jingang Su, and Tao Han. Electrical Tree Growth Characteristics in Epoxy Resin With Harmonic Superimposed DC Voltage. *IEEE Access*, 7:47273–47281, 2019.

Anexo A

Hoja de datos

A continuación, se presenta la información de las probetas fabricadas y ensayadas en este trabajo, según experimento, condición de ensayo y resultados.

N° Probeta	Código USM [mm]	Experimento	Tensión[kV]	Frecuencia[Hz]
x01	SG01	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x02	SG02	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x03	SG03	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x04	SG07	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x05	SG08	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x06	SG20	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x07	SG21	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x08	SG22	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x09	SG23	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
x10	SG06	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	50
x11	SG16	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	50
x12	SG08*	Crecimiento simultaneo - dos agujas	14	50
x13	SG10	Crecimiento simultaneo - dos agujas	14	50
x14	SG38	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	350

Tabla A.1: Resumen de probetas iniciadas sin crecimiento simultaneo.

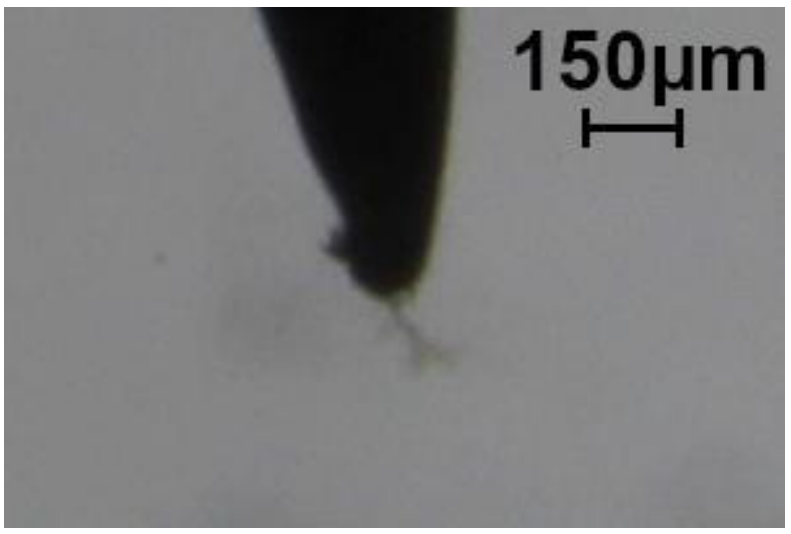
N° Probeta	Código USM [mm]	Experimento	Tensión[kV]	Frecuencia[Hz]
01	SG18	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
02	SG19	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
03	SG29	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	50
04	SG09	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	50
05	SG14	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	50
06	SG25	Crecimiento simultaneo - tres agujas	10	50
07	SG13	Crecimiento simultaneo - dos agujas	14	50
08	SG31	Crecimiento simultaneo - dos agujas	14	50
09	SG37	Crecimiento simultaneo - dos agujas	14	50
10	SG30	Crecimiento simultaneo - tres agujas	14	50
11	SG32	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	350
12	SG33	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	350
13	SG39	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	350
14	SG40	Crecimiento simultaneo - dos agujas	10	350
15	SG96	Referencia	10	50
16	SG98	Referencia	10	50
17	SG99	Referencia	10	50
18	SG102	Punta - Placa curva	10	50
19	SG103	Punta - Placa curva	14	50
20	SG104	Punta - Placa curva	10	250

Tabla A.2: Resumen de probetas exitosas.

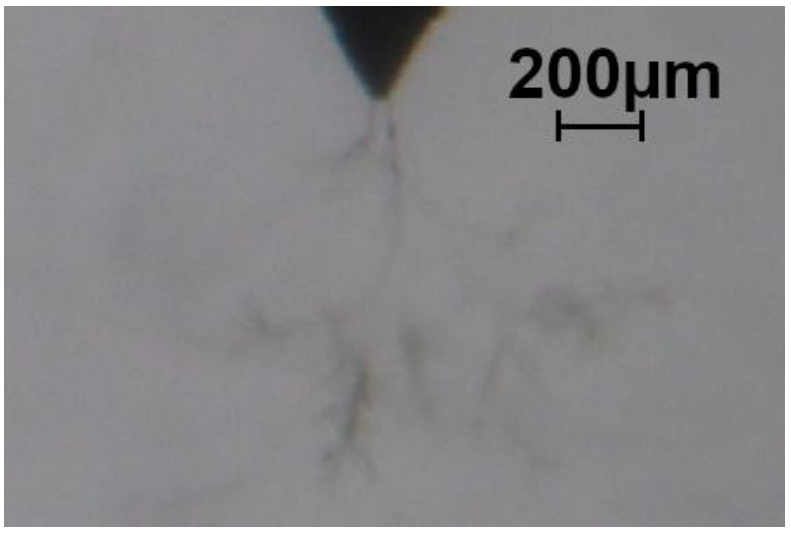
A.1 Probeta Número 01

Número de probeta	01
Código USM	SG18
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	7.7 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.2 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.3 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	4.83 [mm]
Largo máximo árbol 2	4.75 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	6.55 [mm]
Ancho máximo árbol 2	7.67 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	12.00 [min]
Tiempo de ruptura	61.42 [min]

Tabla A.3: Datos de entrada y experimentales de probeta N°01.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.1: Iniciaciones en puntas de probeta N°01 al comenzar ensayo.

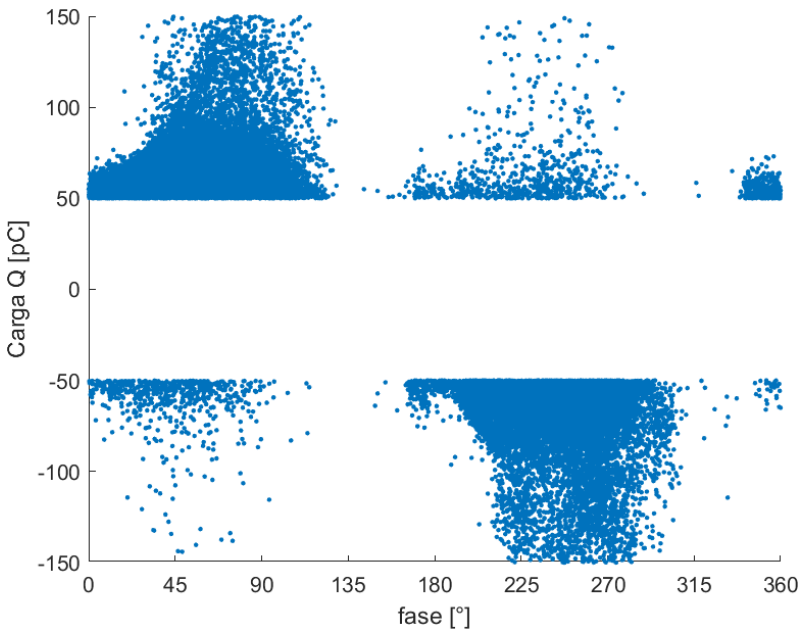


Figura A.2: PRPD en probeta N°01.

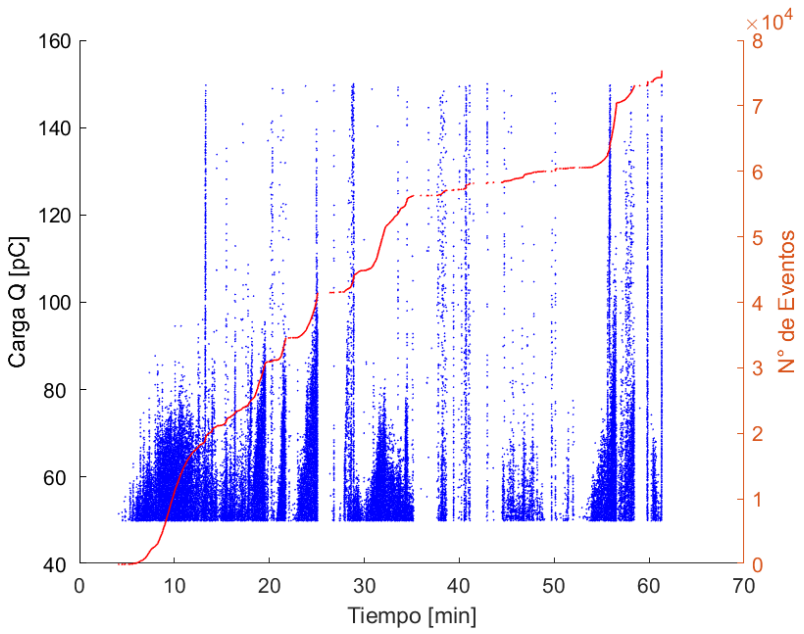


Figura A.3: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°01.

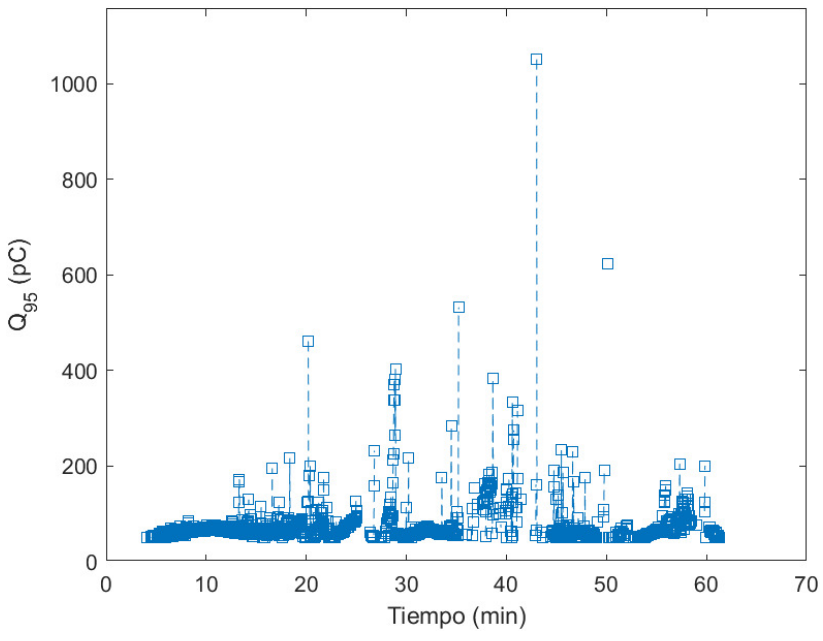


Figura A.4: Carga Q_{95} en probeta N°01.

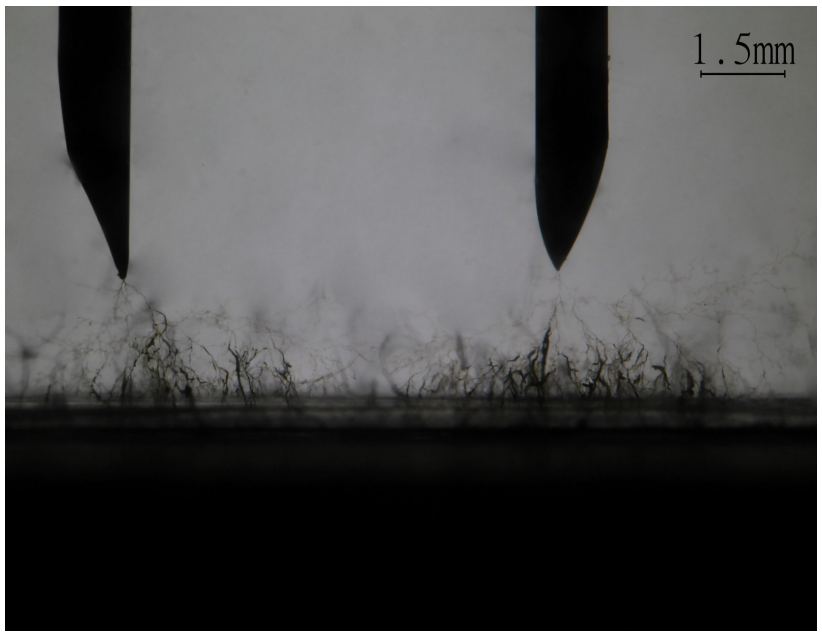


Figura A.5: Crecimiento completo en probeta N°01 (pre-ruptura).

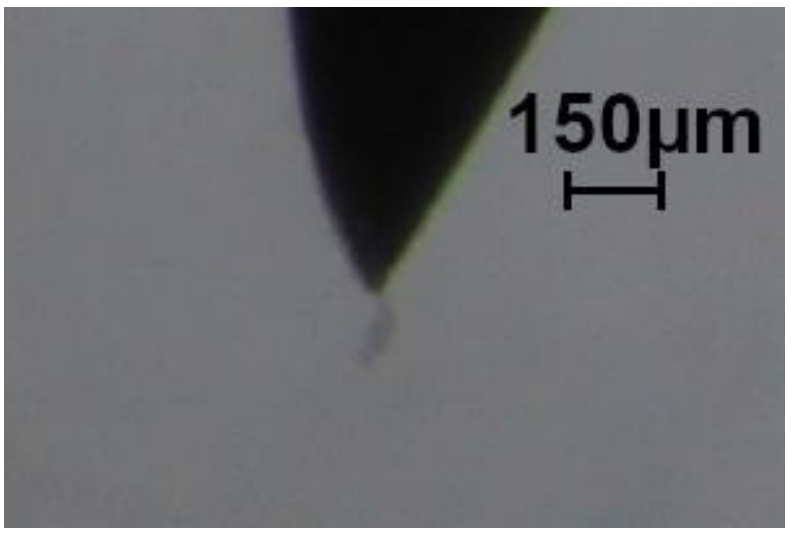


Figura A.6: Crecimiento completo en probeta N°01 (Primer plano, instante pre-ruptura).

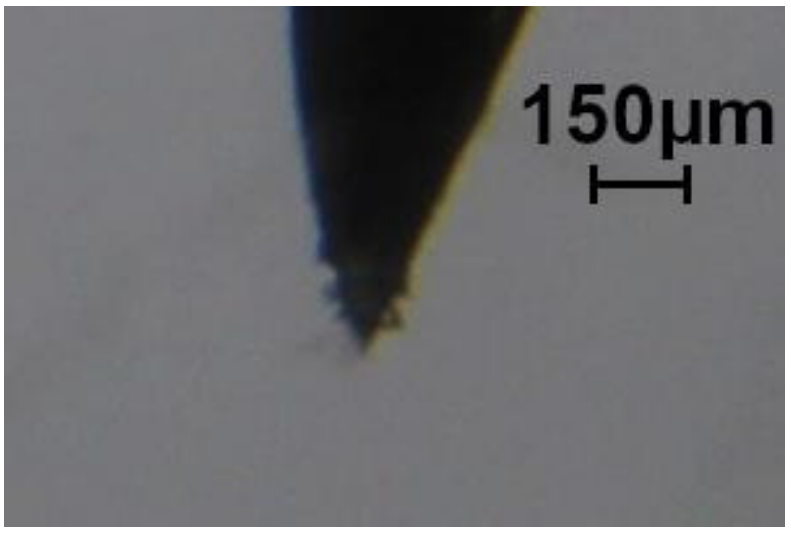
A.2 Probeta Número 02

Número de probeta	02
Código USM	SG19
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	9.0 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.5 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.4 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.31 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.46 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	2.31 [mm]
Ancho máximo árbol 2	2.35 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	58.67 [min]
Tiempo de ruptura	58.67 [min]

Tabla A.4: Datos de entrada y experimentales de probeta N°02.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.7: Iniciaciones en puntas de probeta N°02 al comenzar ensayo.

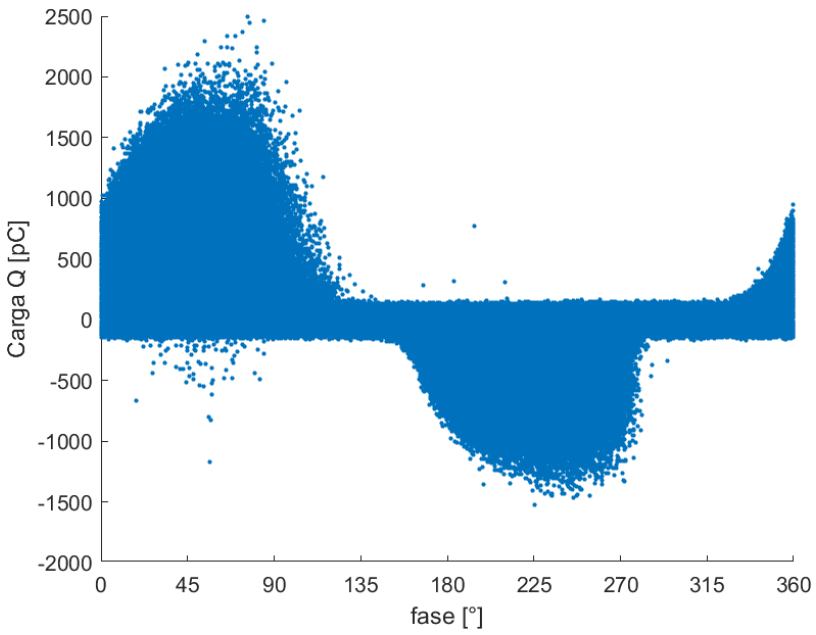


Figura A.8: PRPD en probeta N°02.

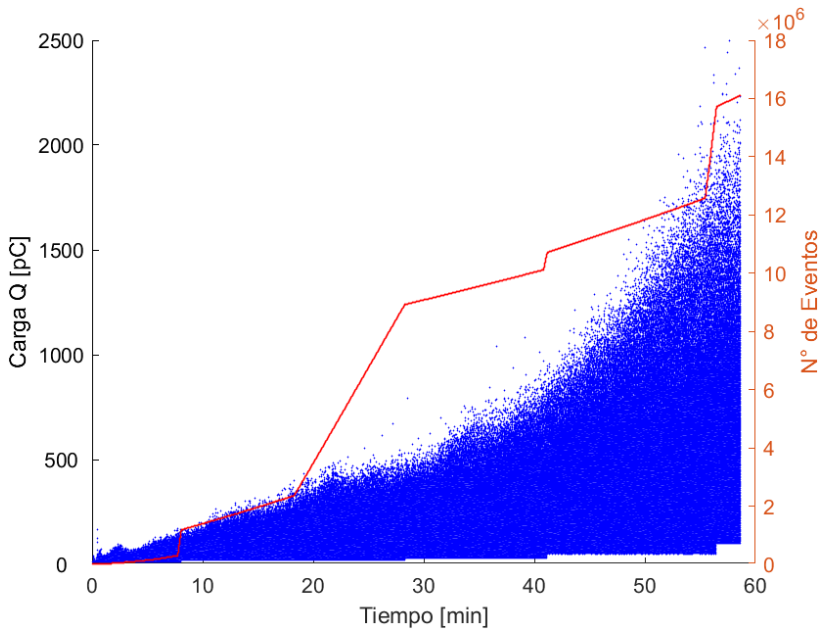


Figura A.9: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°02.

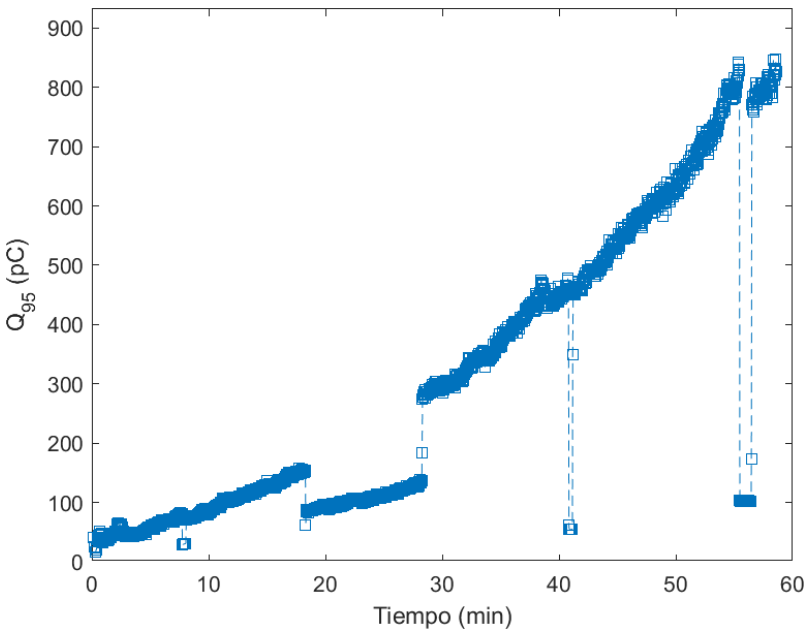


Figura A.10: Carga Q_{95} en probeta N°02.

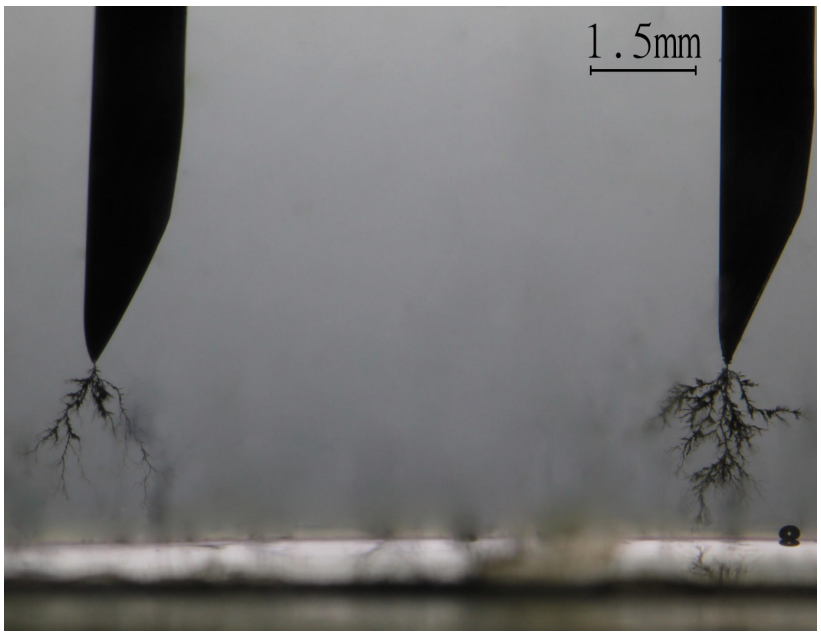


Figura A.11: Crecimiento completo en probeta N°02 (pre-ruptura).

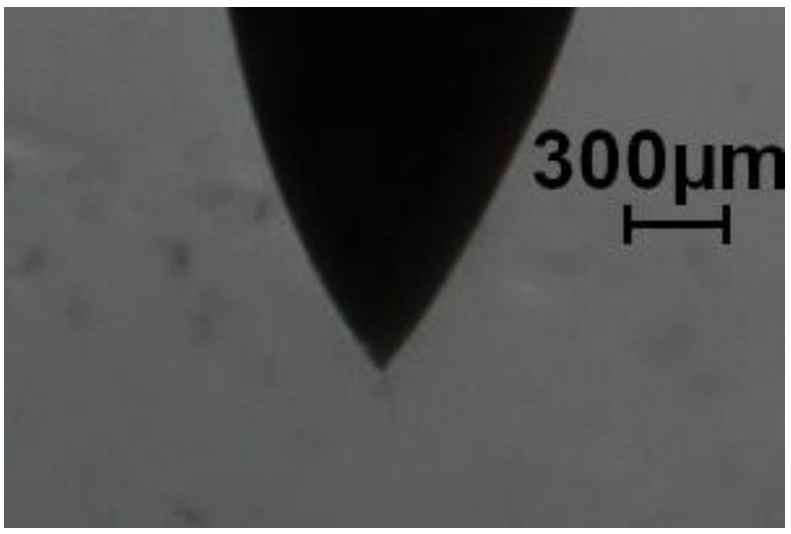


Figura A.12: Crecimiento completo en probeta N°02 (Primer plano, instante pre-ruptura).

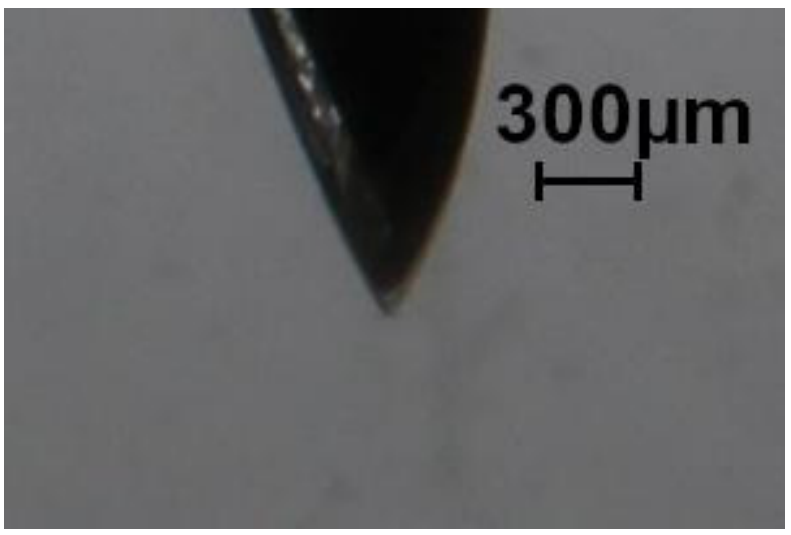
A.3 Probeta Número 03

Número de probeta	03
Código USM	SG29
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	7.1 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.6 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.4 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	1.49 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.16 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	0.76 [mm]
Ancho máximo árbol 2	1.52 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	25.67 [min]
Tiempo de ruptura	49.67 [min]

Tabla A.5: Datos de entrada y experimentales de probeta N°03.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.13: Iniciaciones en puntas de probeta N°03 al comenzar ensayo.

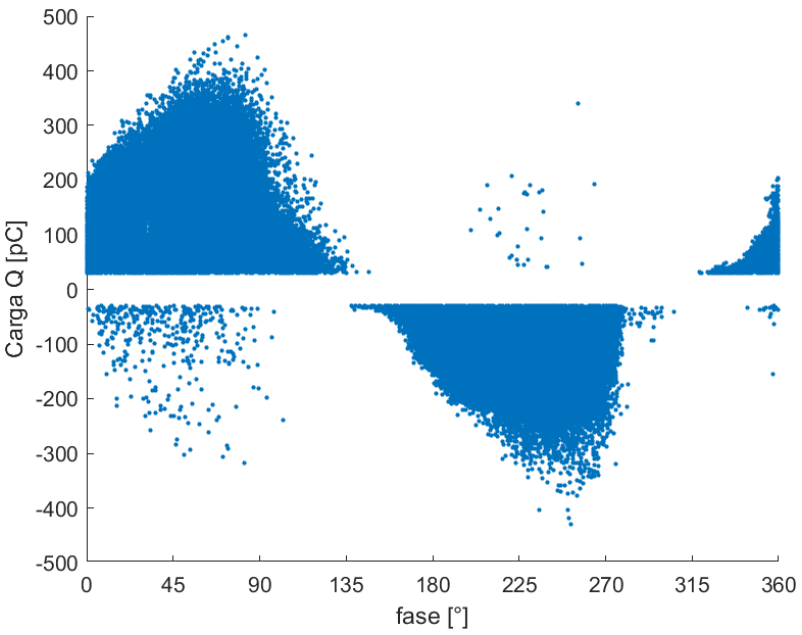


Figura A.14: PRPD en probeta N°03.

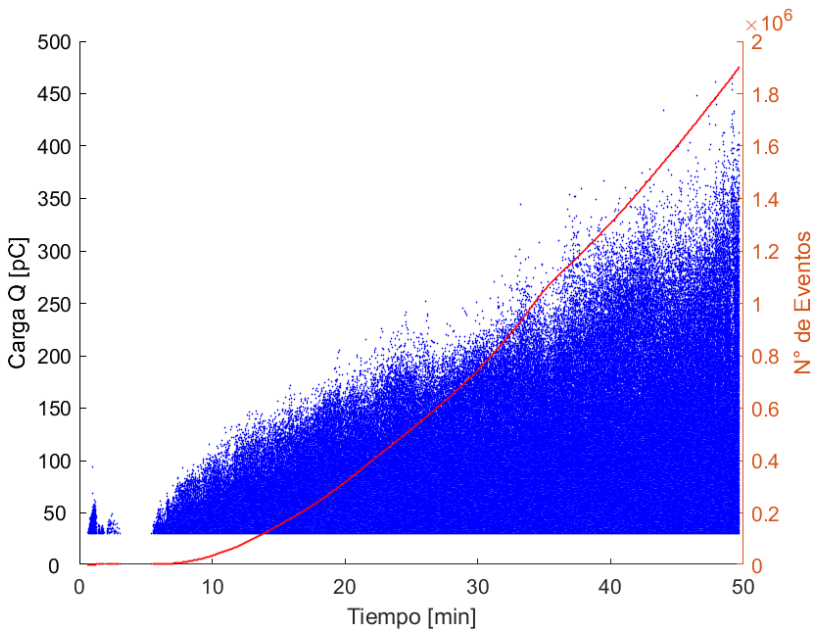


Figura A.15: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°03.

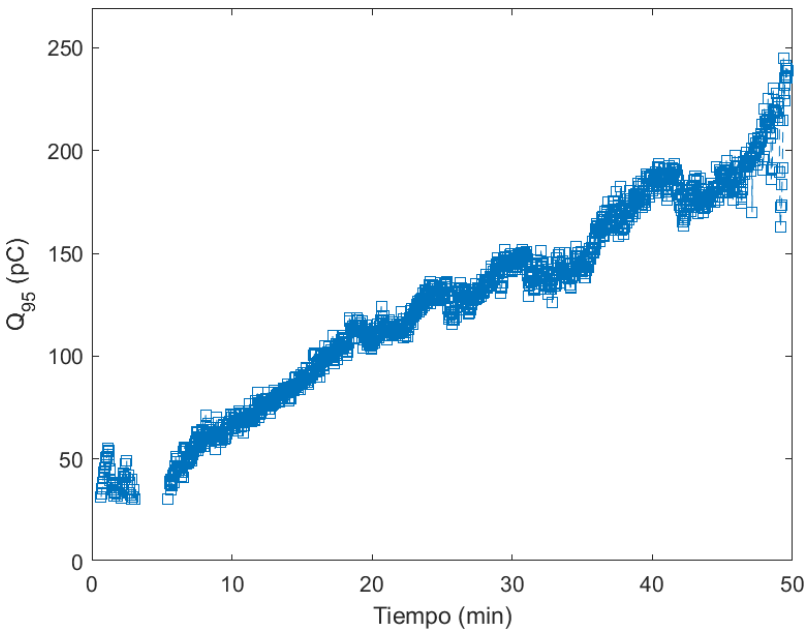


Figura A.16: Carga Q_{95} en probeta N°03.

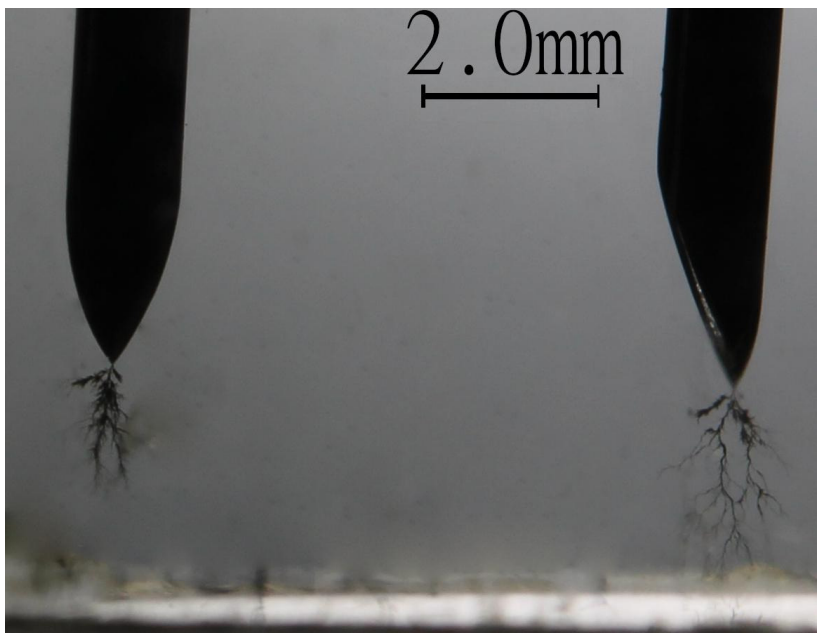


Figura A.17: Crecimiento completo en probeta N°03 (pre-ruptura).

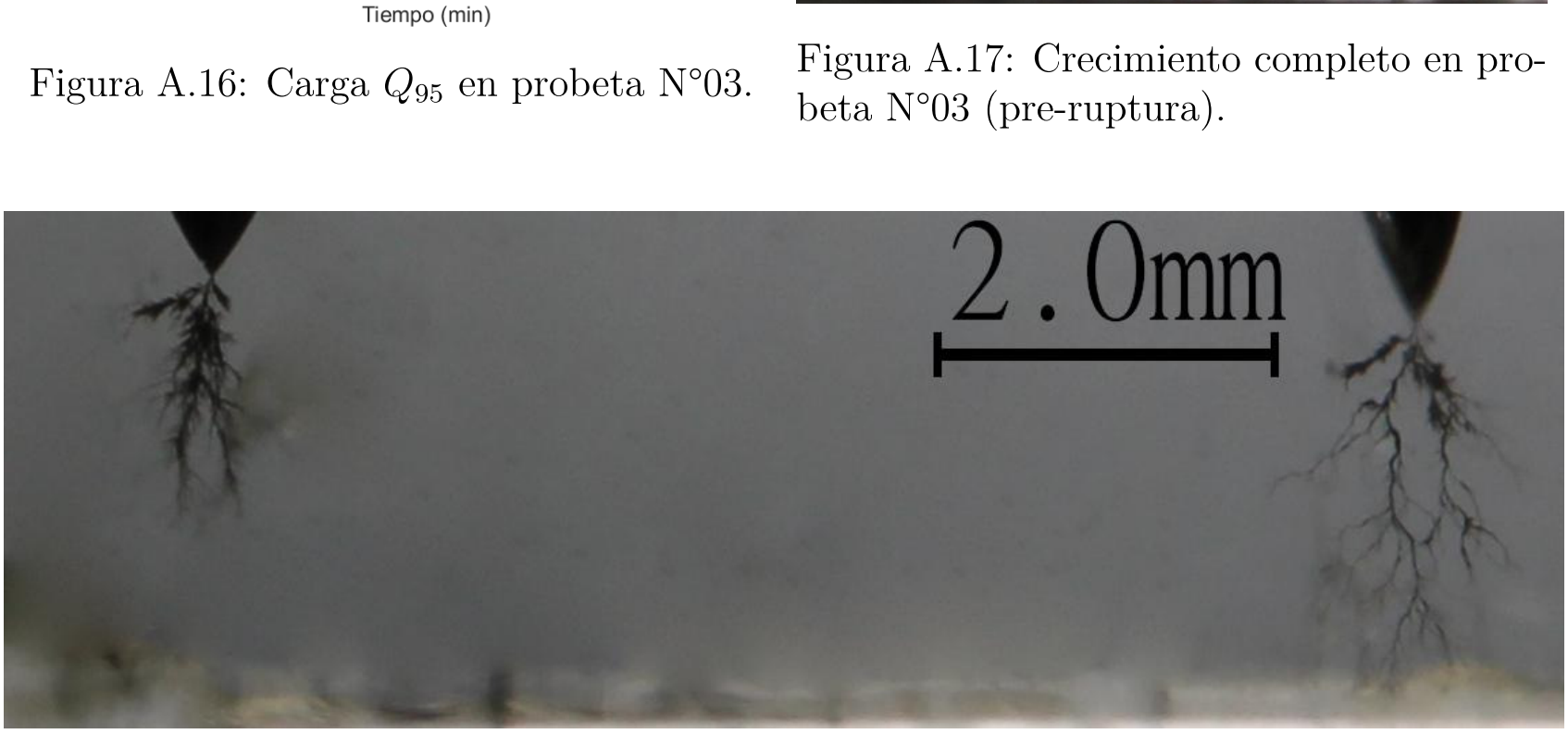
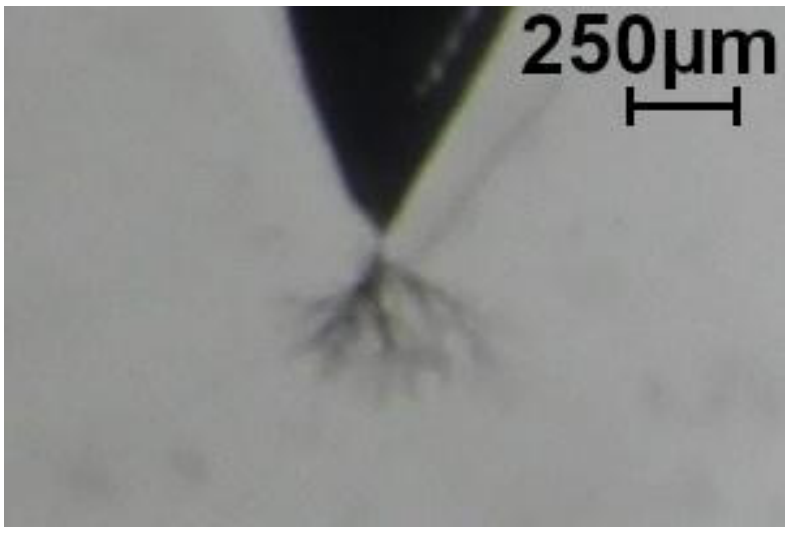


Figura A.18: Crecimiento completo en probeta N°03 (Primer plano, instante pre-ruptura).

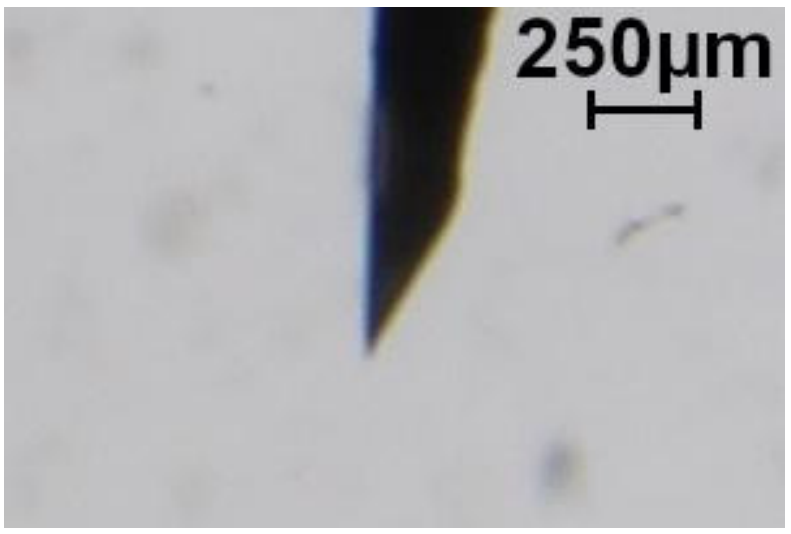
A.4 Probeta Número 04

Número de probeta	04
Código USM	SG09
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Tres agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	6.9 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	7.6 [mm]
Distancia punta 1 - placa	3.1 [mm]
Distancia punta 2 - placa	3.0 [mm]
Distancia punta 3 - placa	2.8 [mm]
Largo máximo árbol 1	1.43 [mm]
Largo máximo árbol 2	0.47 [mm]
Largo máximo árbol 3	2.48 [mm]
Ancho máximo árbol 1	1.50 [mm]
Ancho máximo árbol 2	0.30 [mm]
Ancho máximo árbol 3	2.26 [mm]
Tiempo de cruce	60.17 [min]
Tiempo de ruptura	60.17 [min]

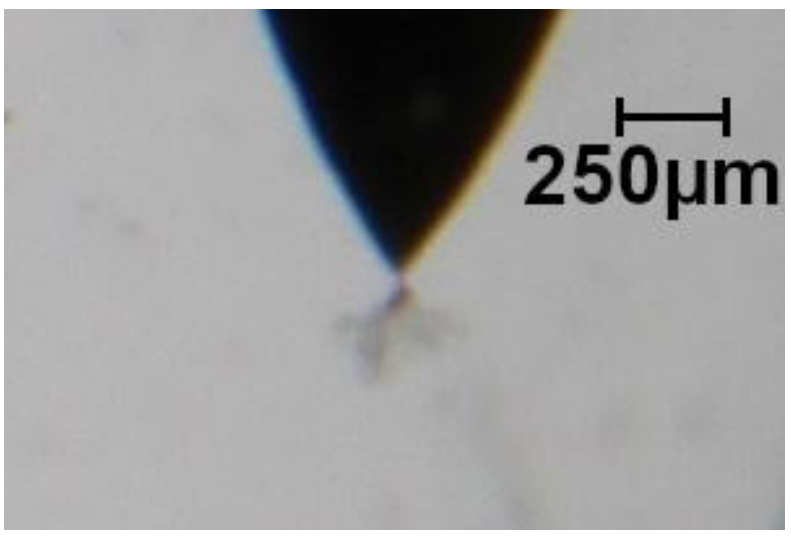
Tabla A.6: Datos de entrada y experimentales de probeta N°04.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.



(c) Punta 3.

Figura A.19: Iniciaciones en puntas de probeta N°04 al comenzar ensayo.

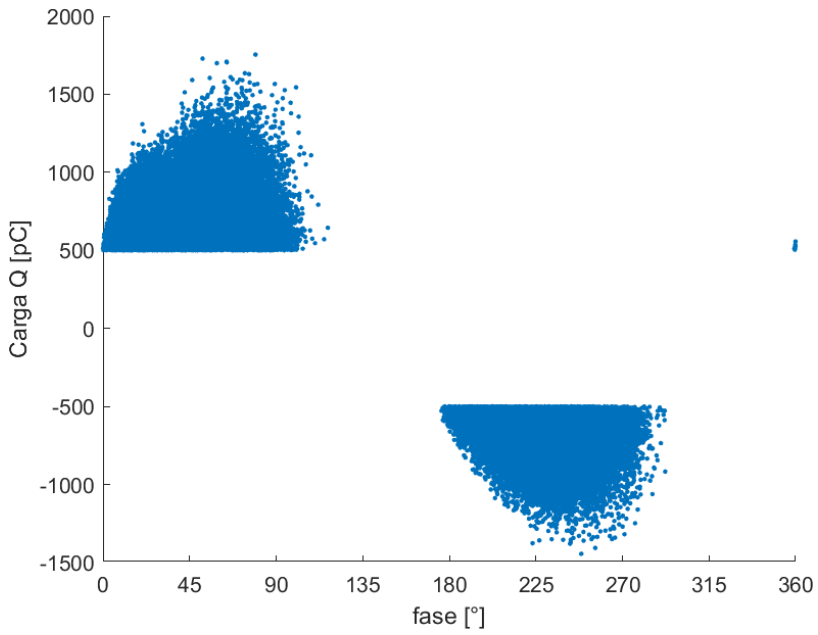


Figura A.20: PRPD en probeta N°04.

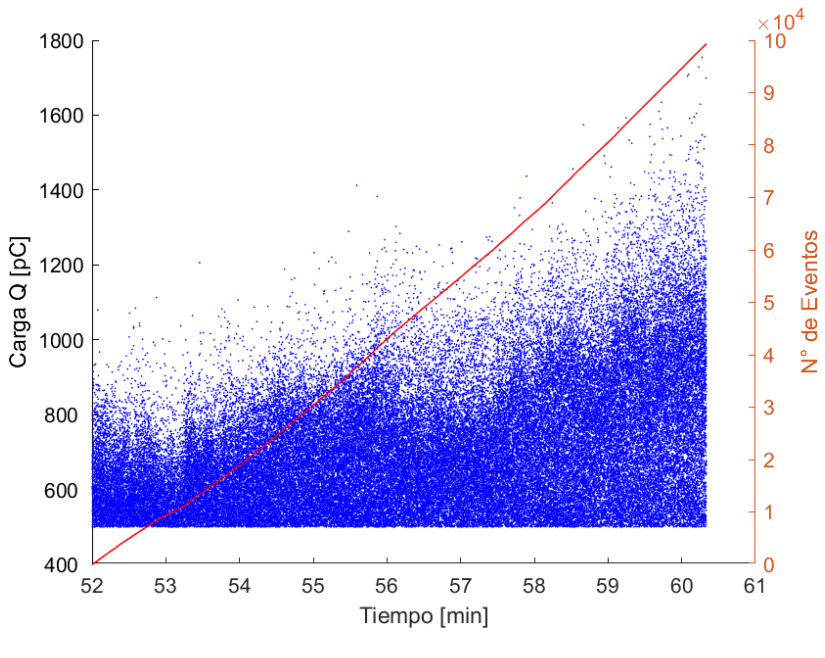


Figura A.21: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°04.

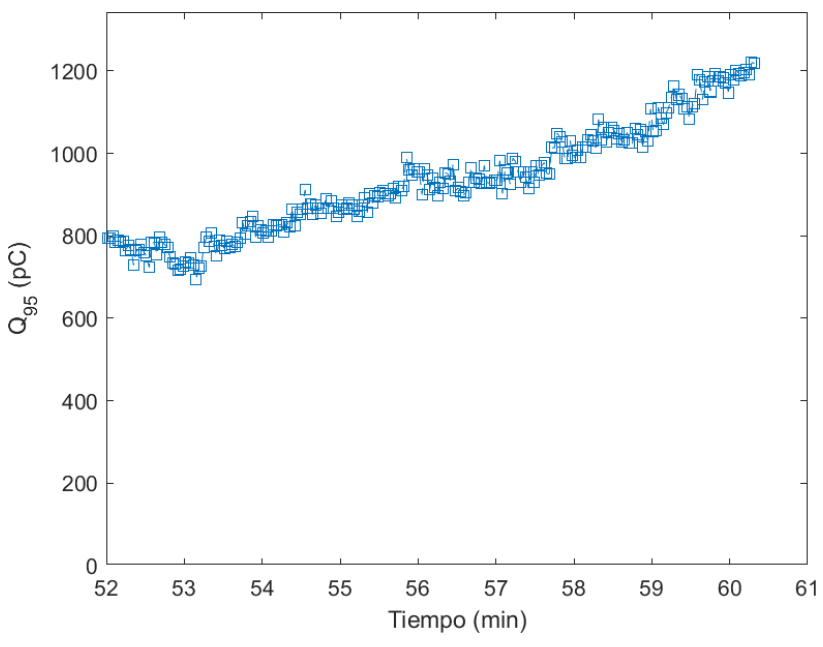


Figura A.22: Carga Q_{95} en probeta N°04.

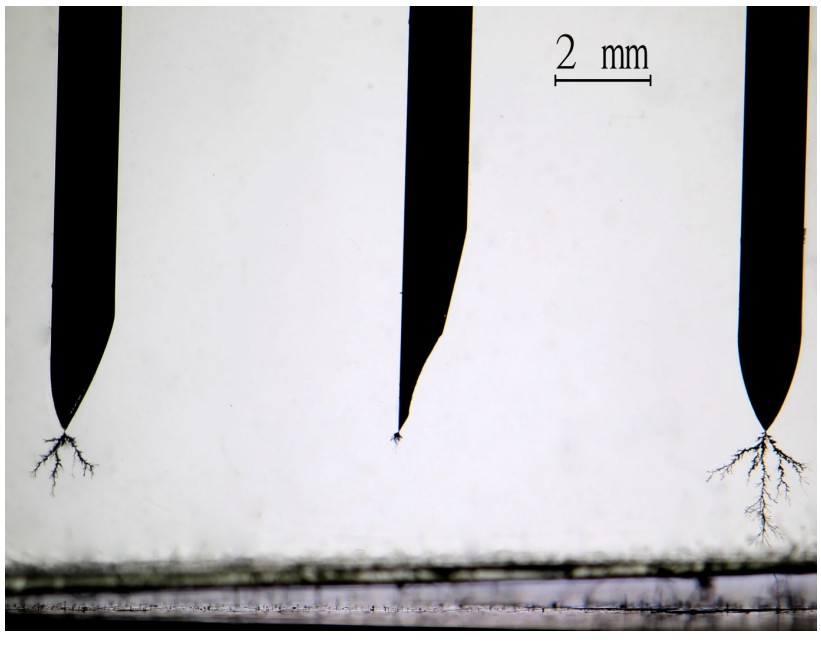


Figura A.23: Crecimiento completo en probeta N°04 (pre-ruptura).

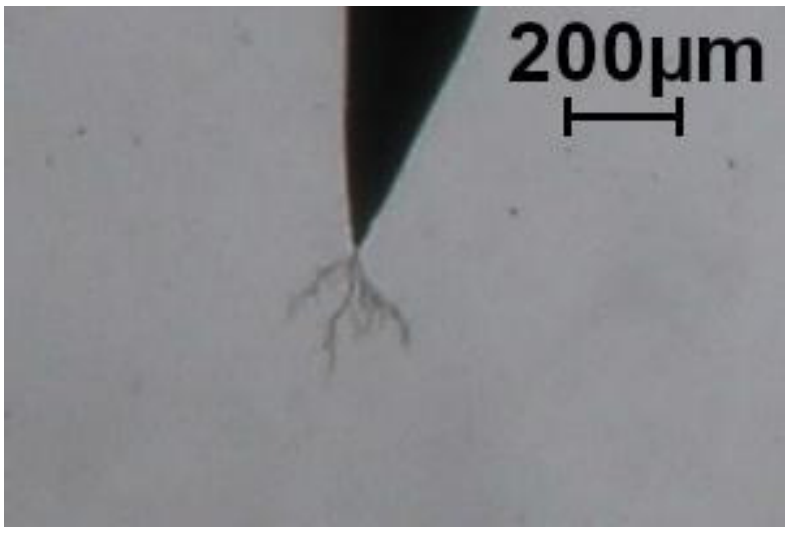


Figura A.24: Crecimiento completo en probeta N°04 (Primer plano, instante pre-ruptura).

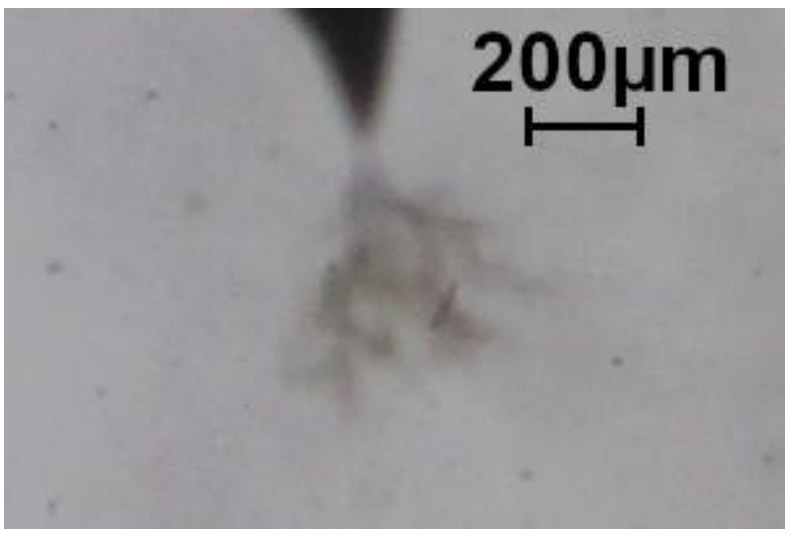
A.5 Probeta Número 05

Número de probeta	05
Código USM	SG14
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Tres agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	6.9 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	8.0 [mm]
Distancia punta 1 - placa	3.1 [mm]
Distancia punta 2 - placa	3.1 [mm]
Distancia punta 3 - placa	3.3 [mm]
Largo máximo árbol 1	0.26 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.15 [mm]
Largo máximo árbol 3	1.56 [mm]
Ancho máximo árbol 1	0.26 [mm]
Ancho máximo árbol 2	1.23 [mm]
Ancho máximo árbol 3	1.39 [mm]
Tiempo de cruce	47.33 [min]
Tiempo de ruptura	61.42 [min]

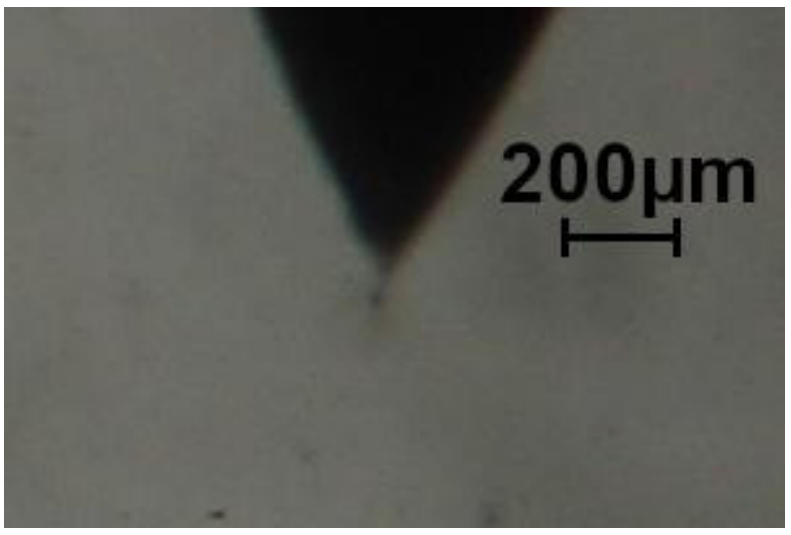
Tabla A.7: Datos de entrada y experimentales de probeta N°05.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.



(c) Punta 3.

Figura A.25: Iniciaciones en puntas de probeta N°05 al comenzar ensayo.

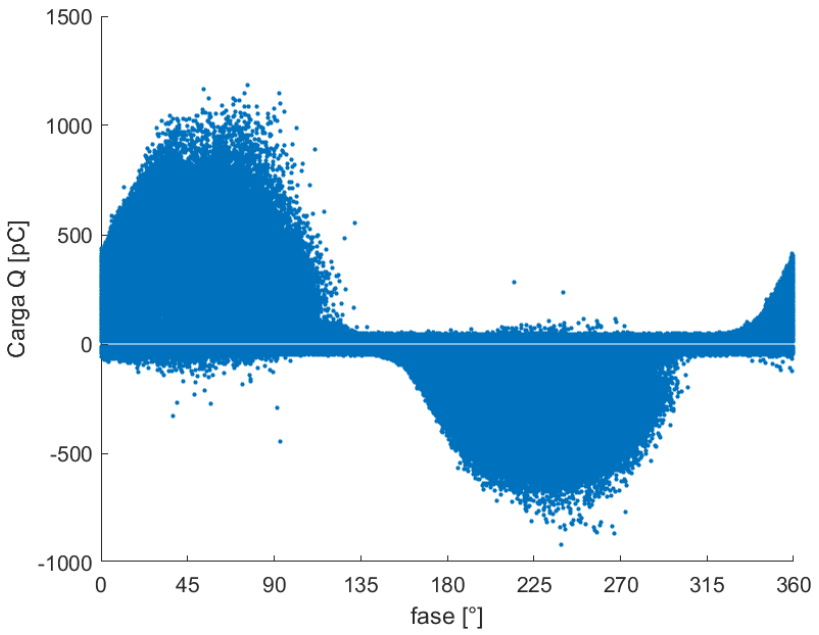


Figura A.26: PRPD en probeta N°05.

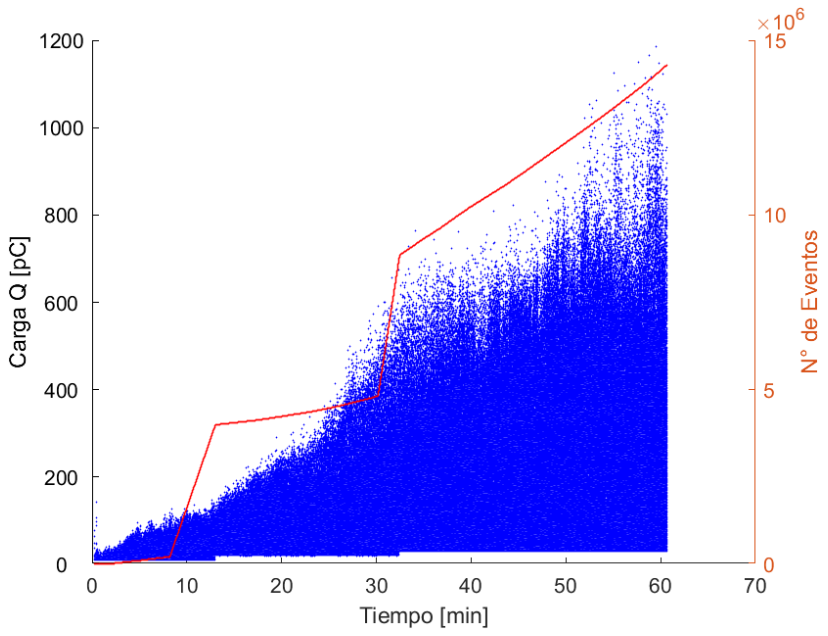


Figura A.27: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°05.

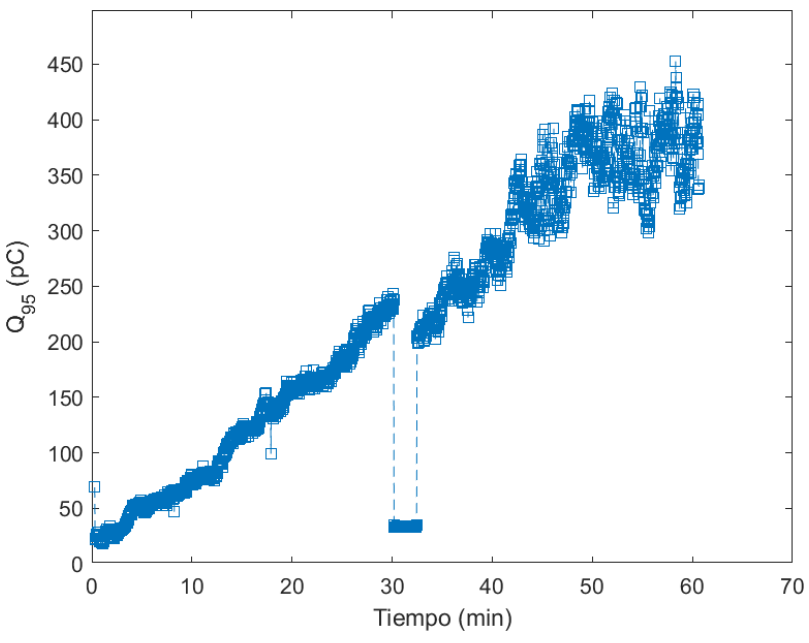


Figura A.28: Carga Q_{95} en probeta N°05.



Figura A.29: Crecimiento completo en probeta N°05 (pre-ruptura).

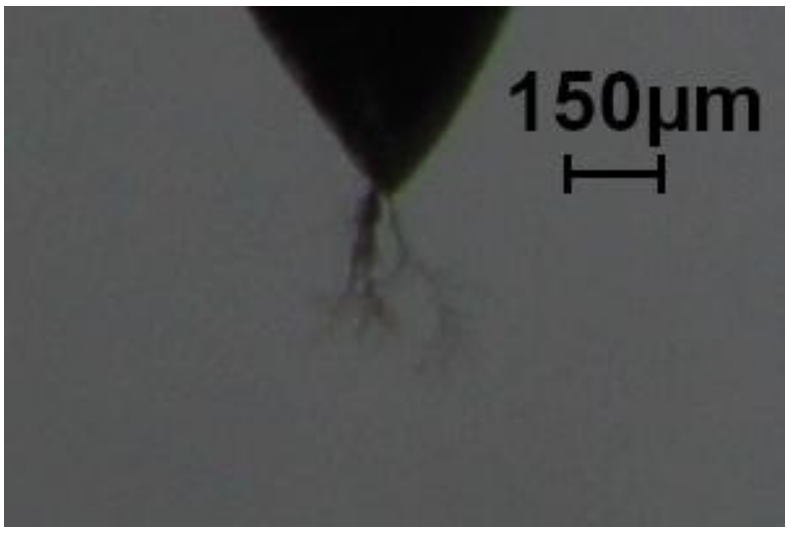


Figura A.30: Crecimiento completo en probeta N°05 (Primer plano, instante pre-ruptura).

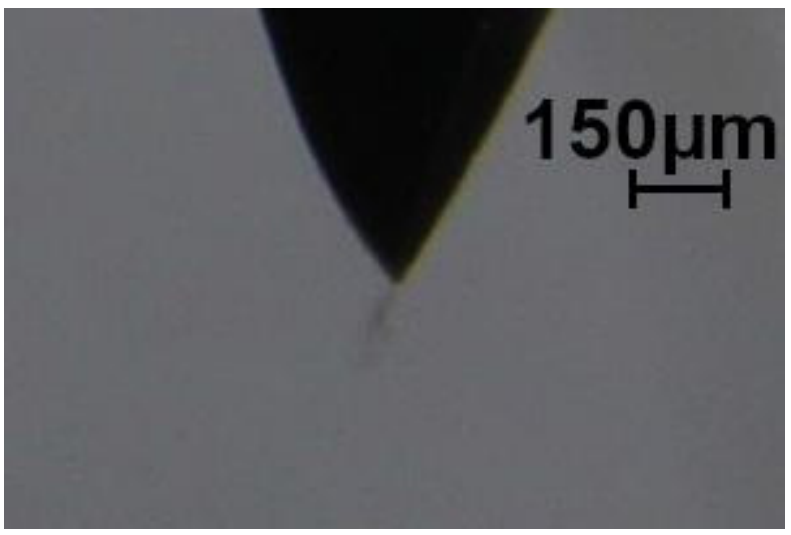
A.6 Probeta Número 06

Número de probeta	06
Código USM	SG25
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Tres agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	6.3 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	4.6 [mm]
Distancia punta 1 - placa	2.6 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.1 [mm]
Distancia punta 3 - placa	2.2 [mm]
Largo máximo árbol 1	0.34 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.30 [mm]
Largo máximo árbol 3	2.47 [mm]
Ancho máximo árbol 1	0.28 [mm]
Ancho máximo árbol 2	2.37 [mm]
Ancho máximo árbol 3	3.01 [mm]
Tiempo de cruce	17.67 [min]
Tiempo de ruptura	23.75 [min]

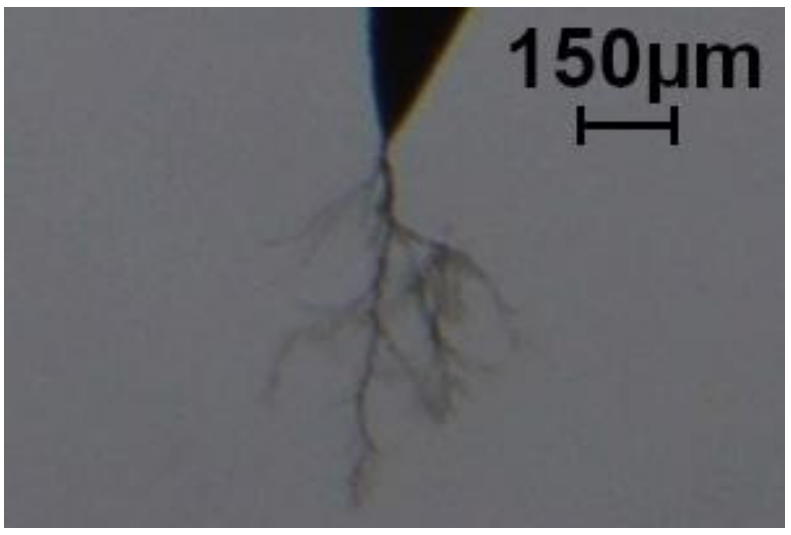
Tabla A.8: Datos de entrada y experimentales de probeta N°06.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.



(c) Punta 3.

Figura A.31: Iniciaciones en puntas de probeta N°06 al comenzar ensayo.

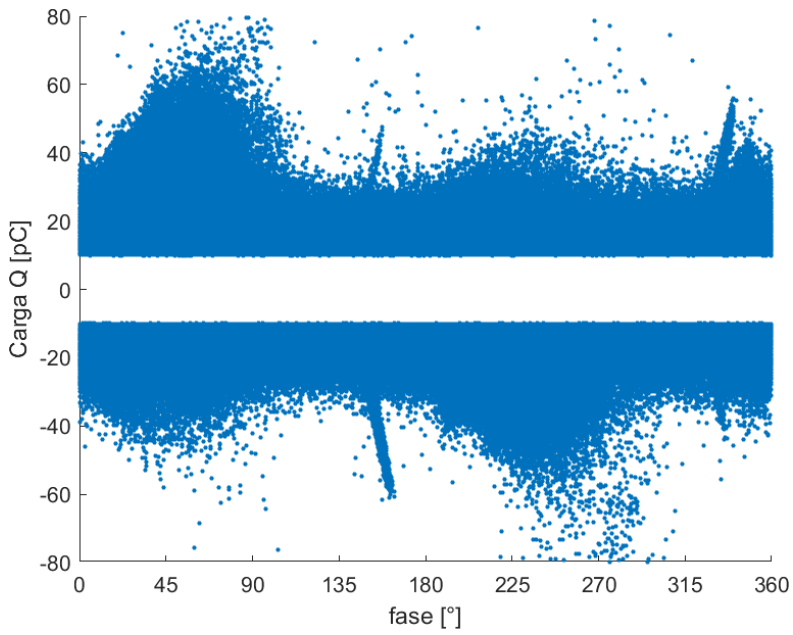


Figura A.32: PRPD en probeta N°06.

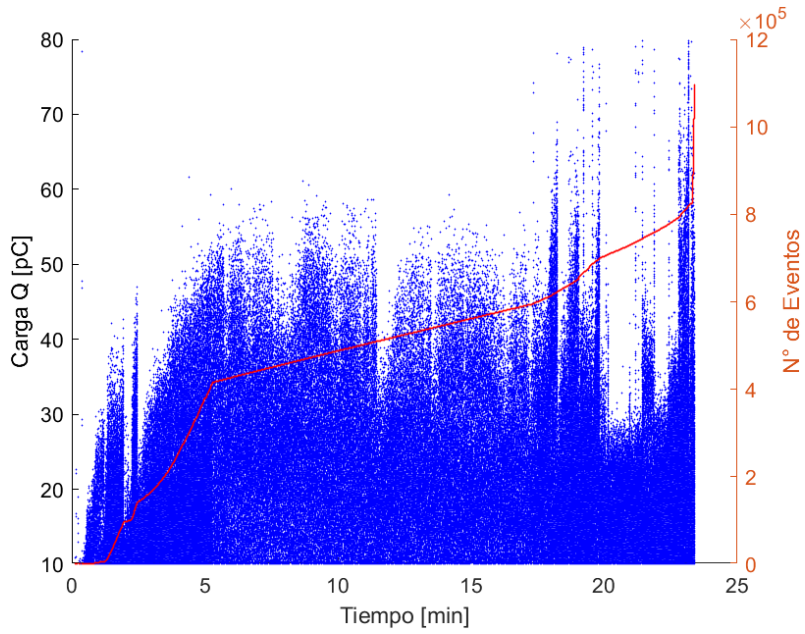


Figura A.33: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°06.

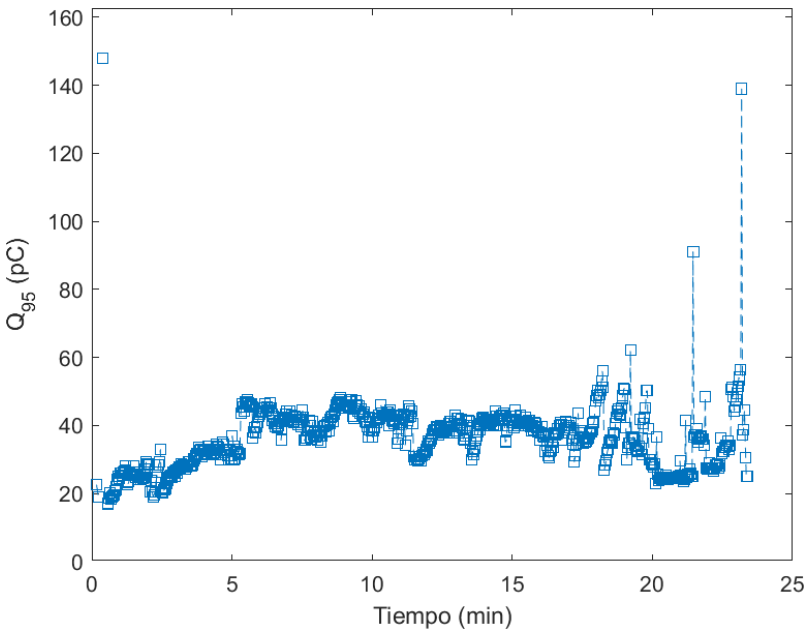


Figura A.34: Carga Q_{95} en probeta N°06.

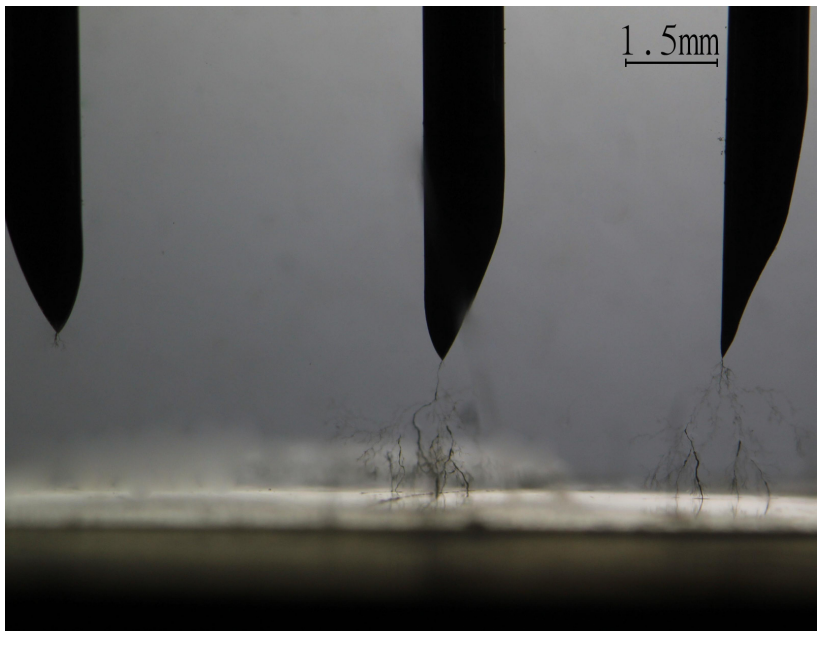


Figura A.35: Crecimiento completo en probeta N°06 (pre-ruptura).

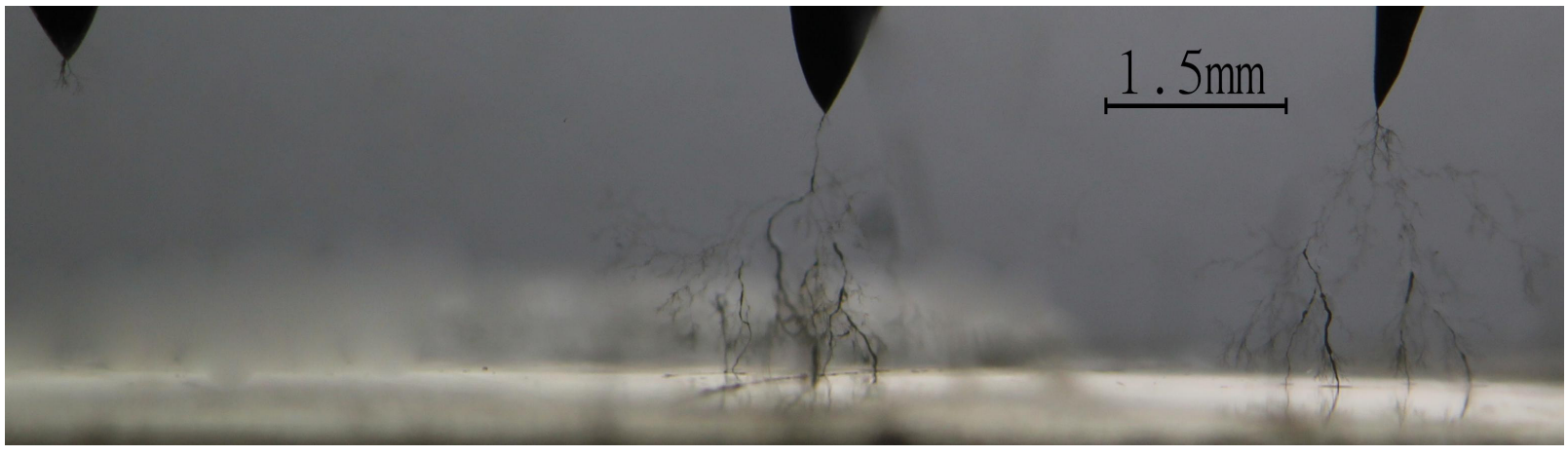
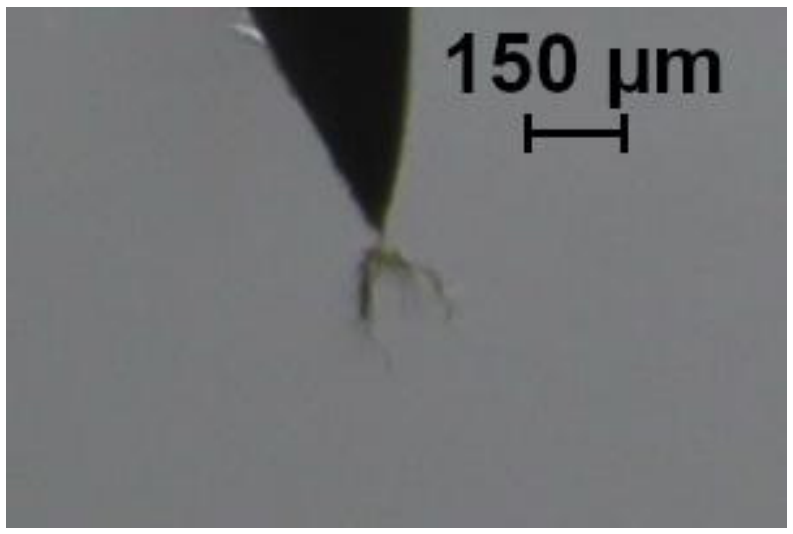


Figura A.36: Crecimiento completo en probeta N°06 (Primer plano, instante pre-ruptura).

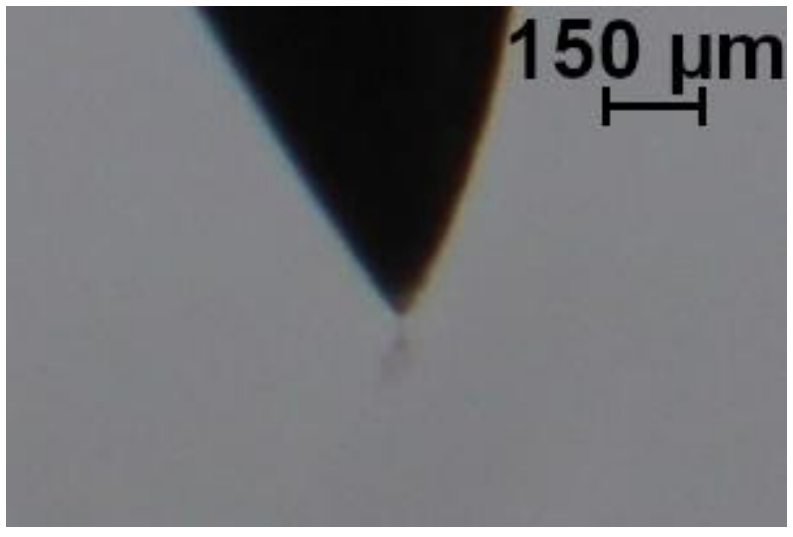
A.7 Probeta Número 07

Número de probeta	07
Código USM	SG13
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	14 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	7.0 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	3.3 [mm]
Distancia punta 2 - placa	3.1 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	3.57 [mm]
Largo máximo árbol 2	1.49 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	4.35 [mm]
Ancho máximo árbol 2	1.50 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	31.92 [min]
Tiempo de ruptura	43.42 [min]

Tabla A.9: Datos de entrada y experimentales de probeta N°07.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.37: Iniciaciones en puntas de probeta N°07 al comenzar ensayo.

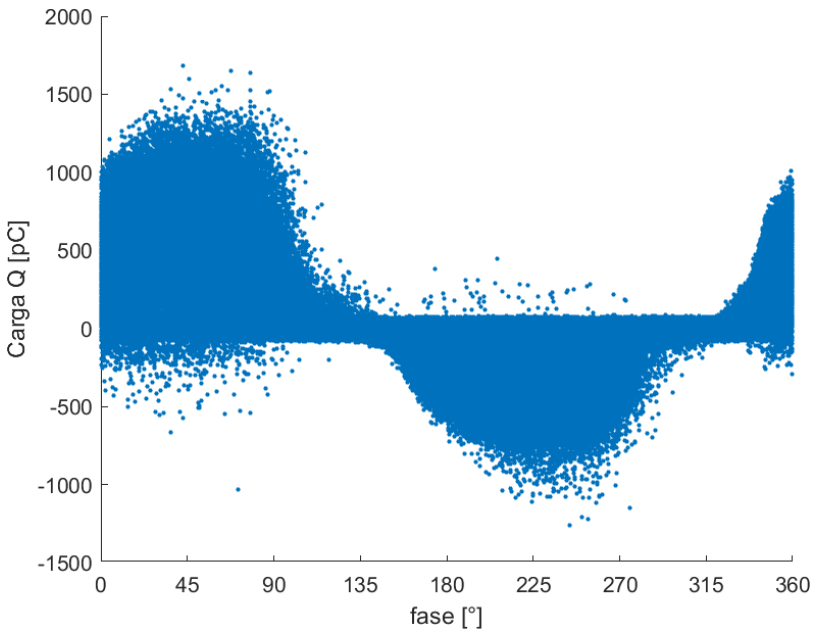


Figura A.38: PRPD en probeta N°07.

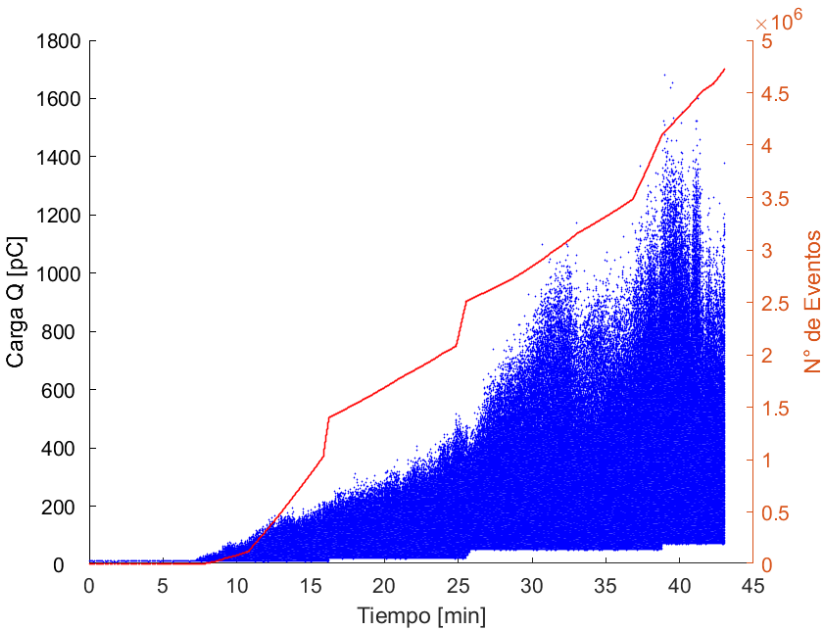


Figura A.39: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°07.

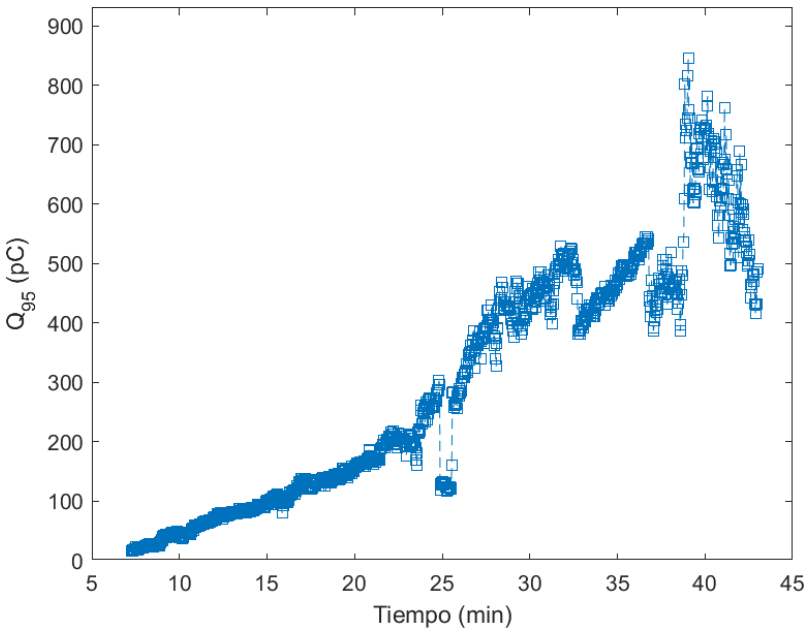


Figura A.40: Carga Q_{95} en probeta N°07.

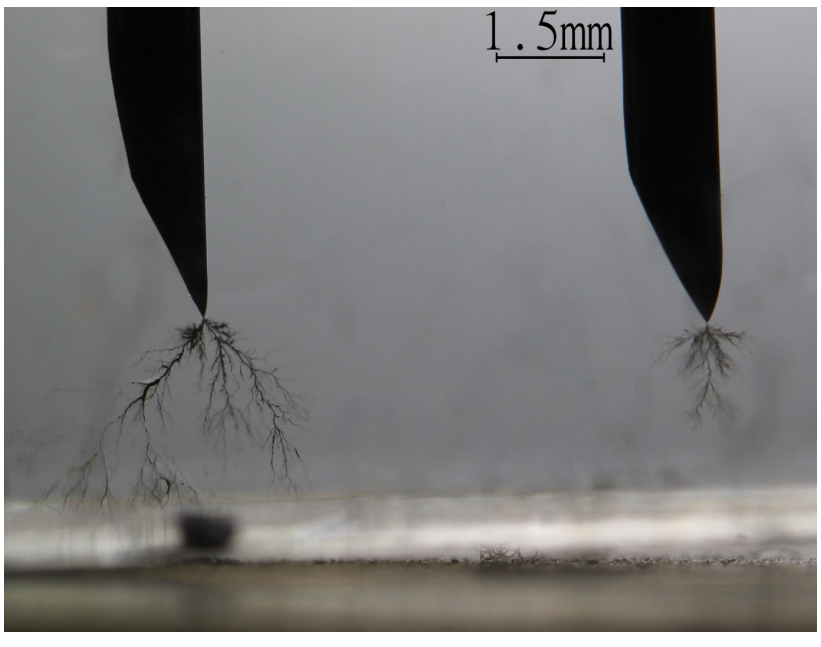


Figura A.41: Crecimiento completo en probeta N°07 (pre-ruptura).

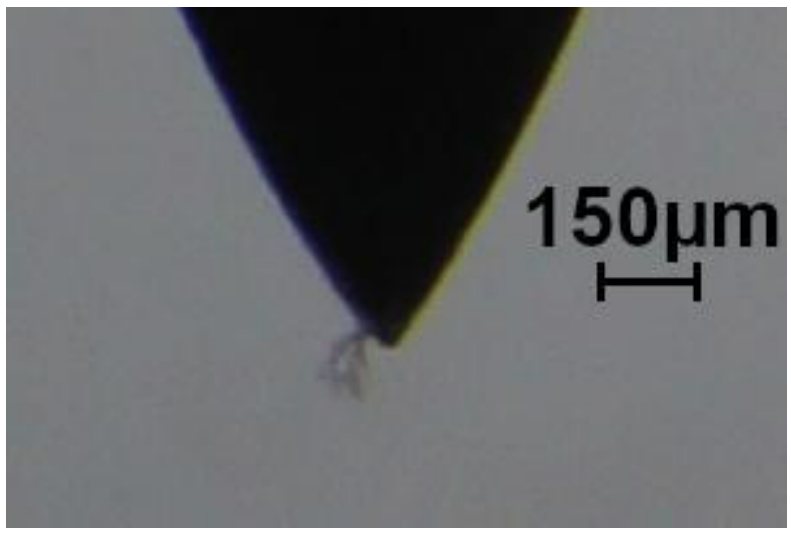


Figura A.42: Crecimiento completo en probeta N°07 (Primer plano, instante pre-ruptura).

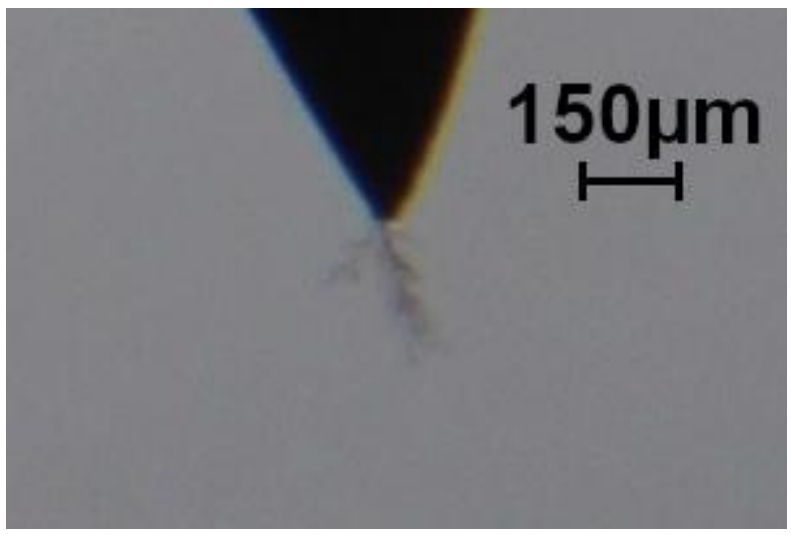
A.8 Probeta Número 08

Número de probeta	08
Código USM	SG31
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	14 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	8.6 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.4 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.5 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.32 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.56 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	2.55 [mm]
Ancho máximo árbol 2	3.50 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	20.00 [min]
Tiempo de ruptura	20.00 [min]

Tabla A.10: Datos de entrada y experimentales de probeta N°08.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.43: Iniciaciones en puntas de probeta N°08 al comenzar ensayo.

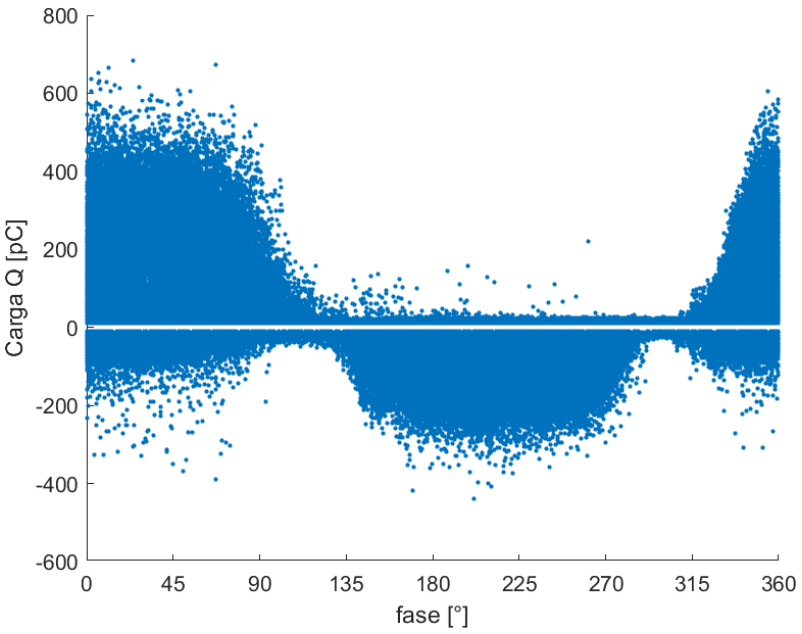


Figura A.44: PRPD en probeta N°08.

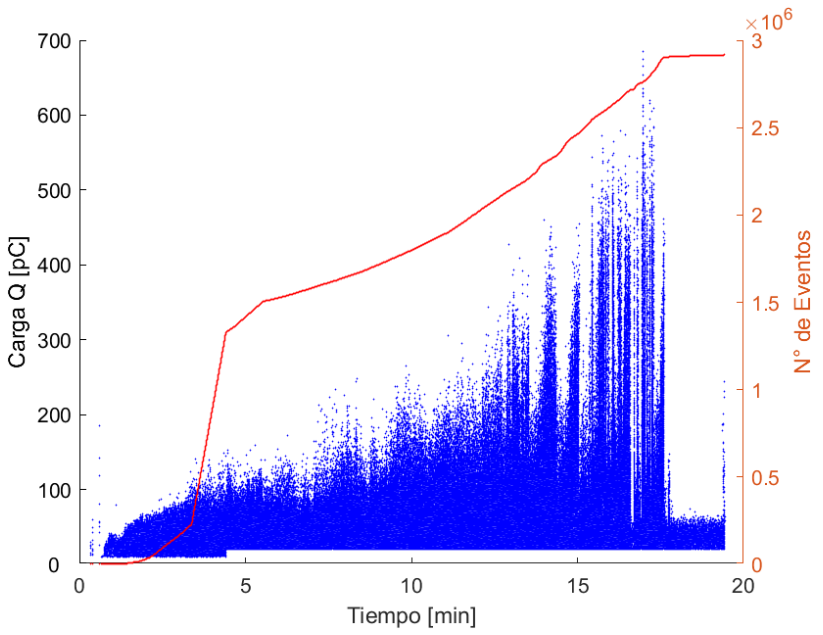


Figura A.45: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°08.

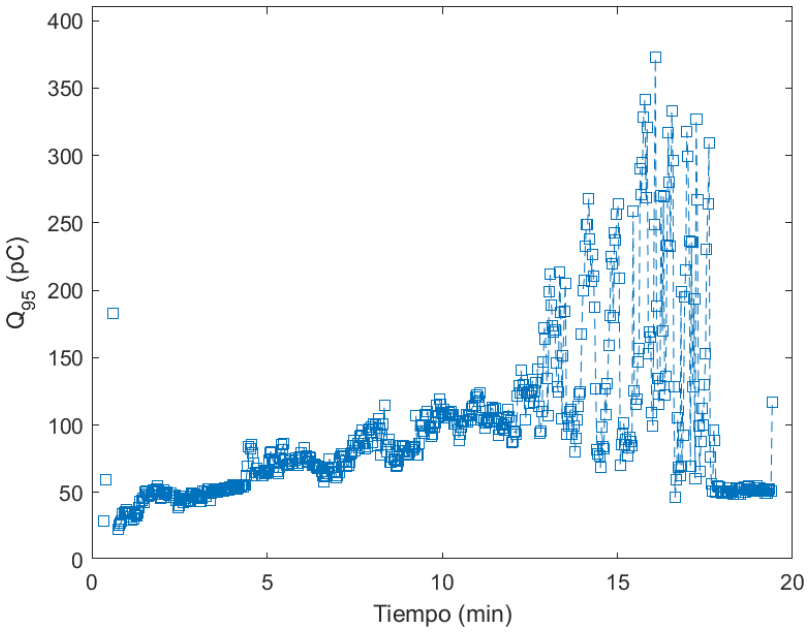


Figura A.46: Carga Q_{95} en probeta N°08.

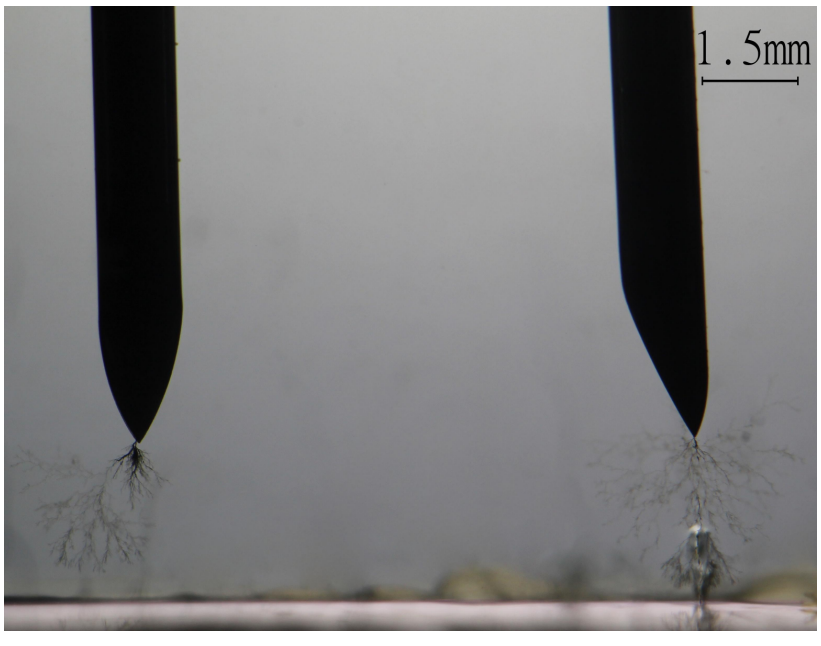


Figura A.47: Crecimiento completo en probeta N°08 (pre-ruptura).

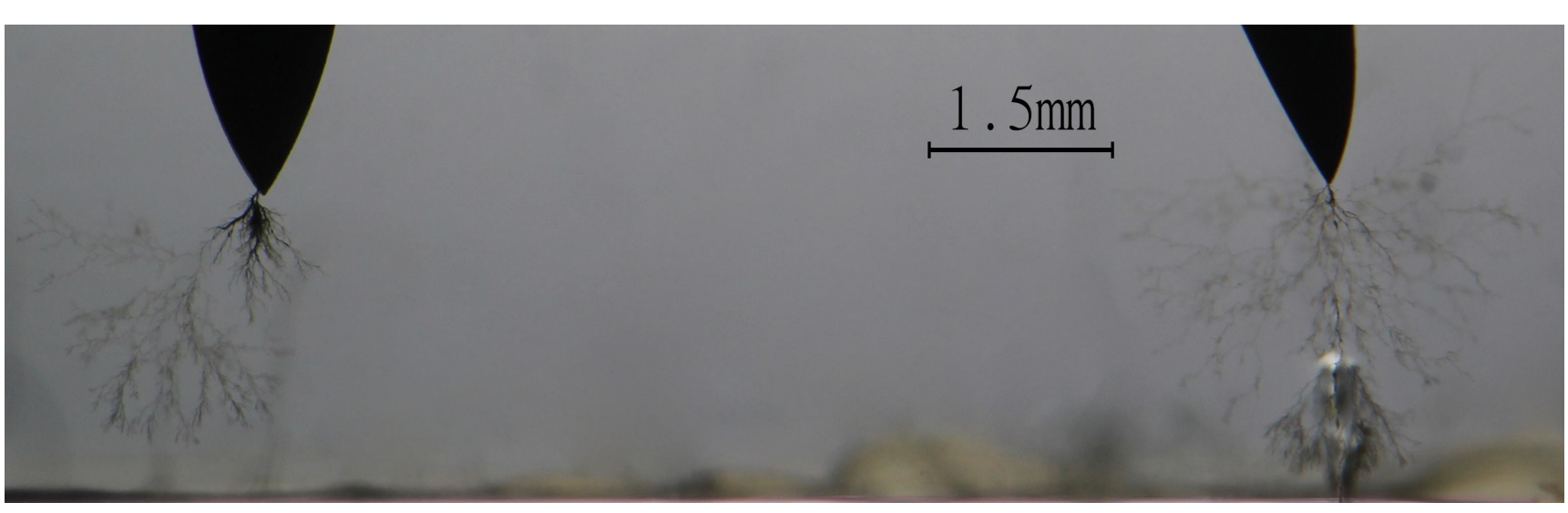
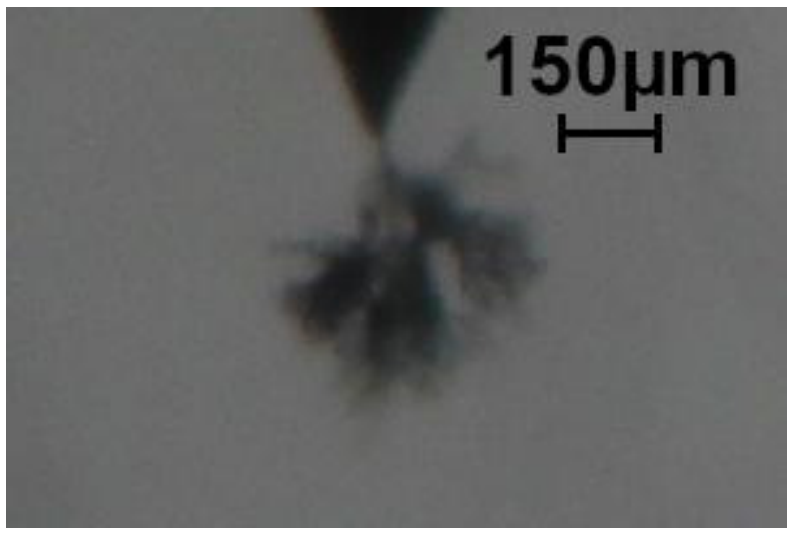


Figura A.48: Crecimiento completo en probeta N°08 (Primer plano, instante pre-ruptura).

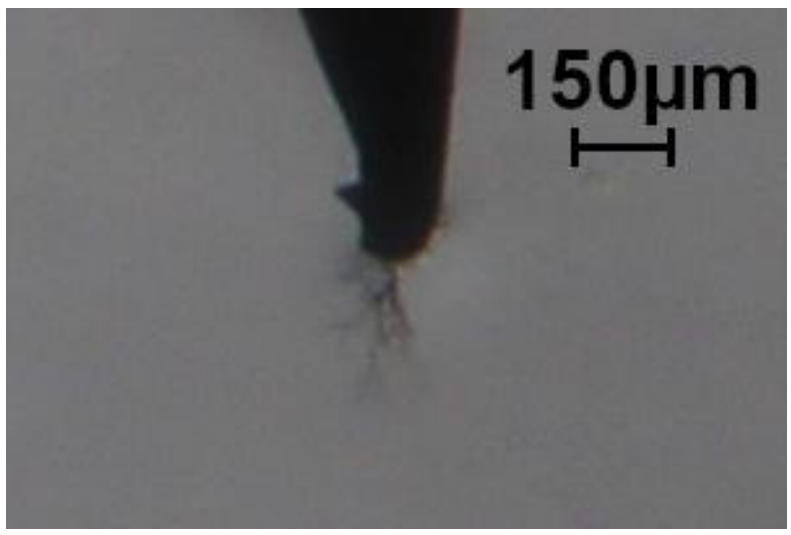
A.9 Probeta Número 09

Número de probeta	09
Código USM	SG37
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	14 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	11.6 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.7 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.8 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.81 [mm]
Largo máximo árbol 2	2.95 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	3.93 [mm]
Ancho máximo árbol 2	3.68 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	10.50 [min]
Tiempo de ruptura	12.17 [min]

Tabla A.11: Datos de entrada y experimentales de probeta N°09.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.49: Iniciaciones en puntas de probeta N°09 al comenzar ensayo.

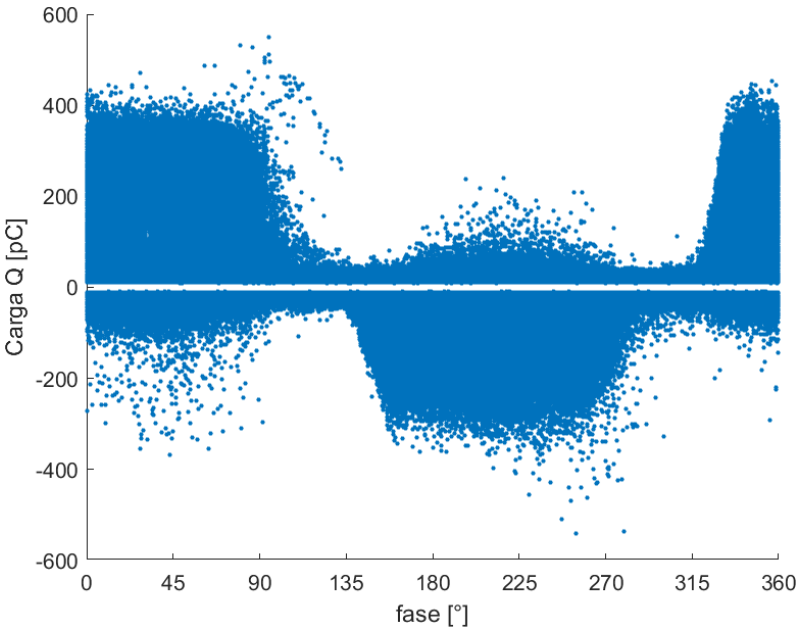


Figura A.50: PRPD en probeta N°09.

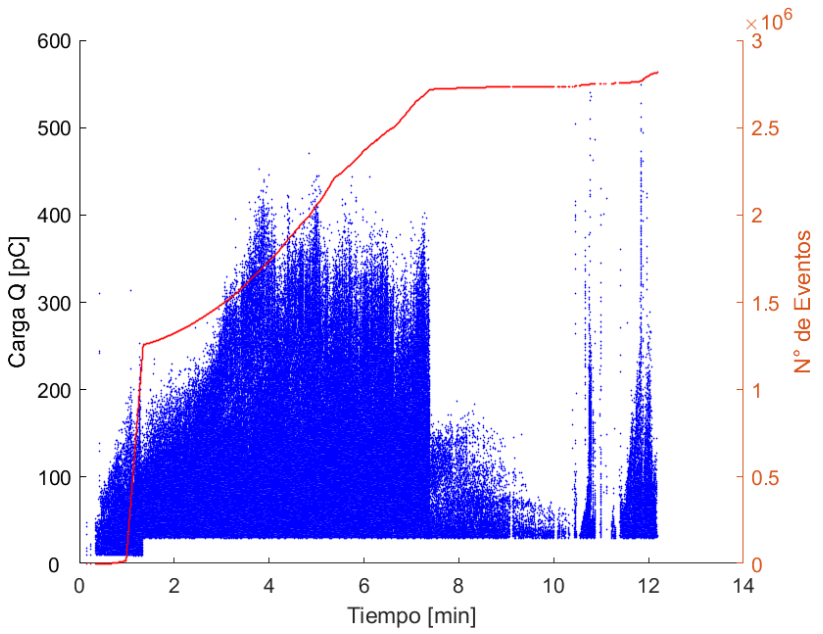


Figura A.51: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°09.

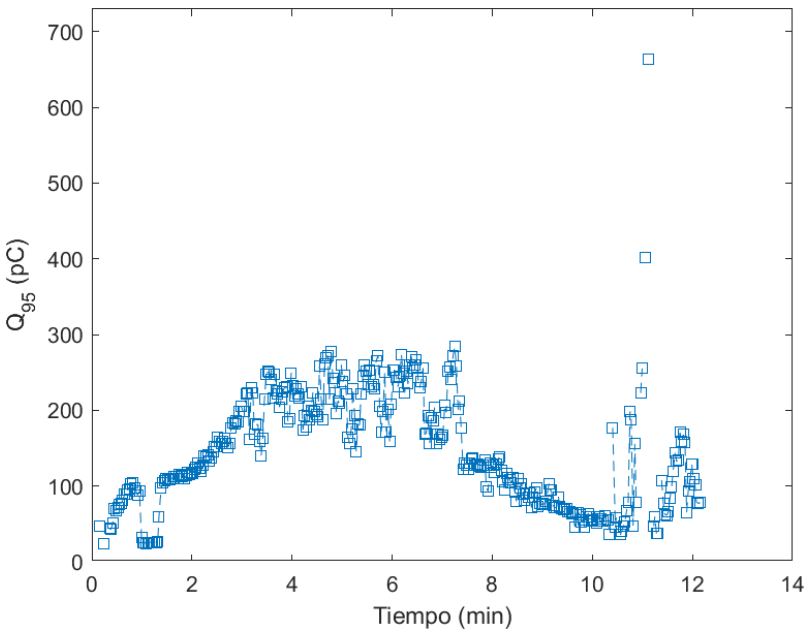


Figura A.52: Carga Q_{95} en probeta N°09.

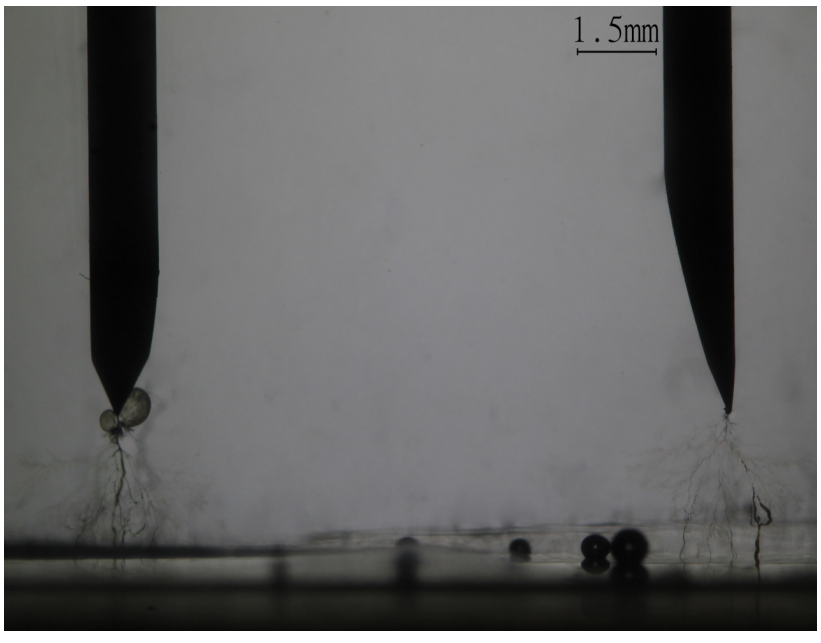


Figura A.53: Crecimiento completo en probeta N°09 (pre-ruptura).

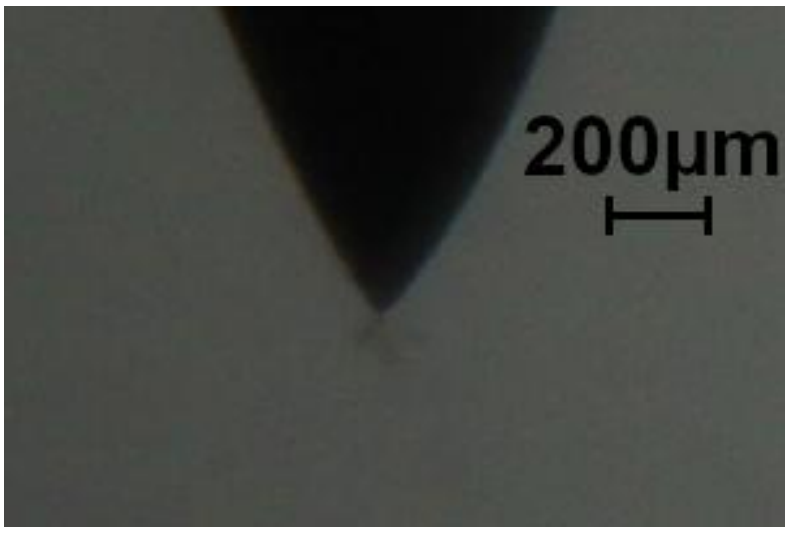


Figura A.54: Crecimiento completo en probeta N°01 (Primer plano, instante pre-ruptura).

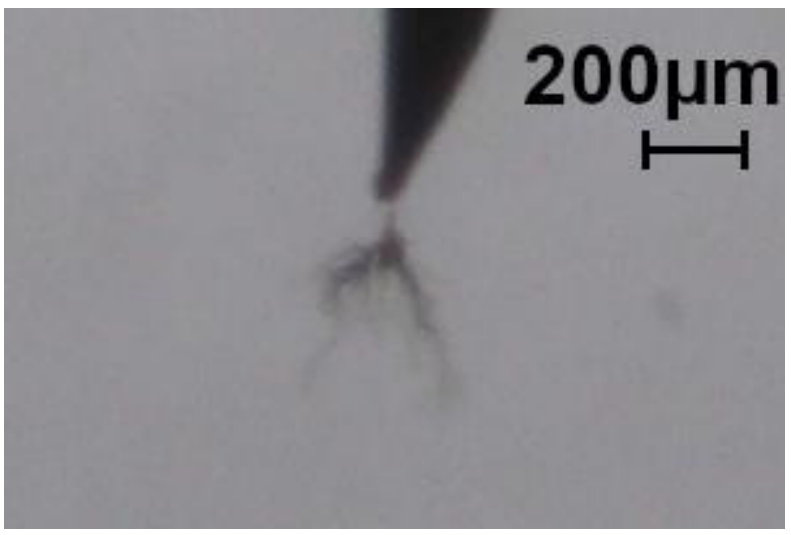
A.10 Probeta Número 10

Número de probeta	10
Código USM	SG30
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Tres agujas
Tensión	14 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	12.6 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	9.5 [mm]
Distancia punta 1 - placa	2.5 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.5 [mm]
Distancia punta 3 - placa	2.7 [mm]
Largo máximo árbol 1	1.32 [mm]
Largo máximo árbol 2	0.46 [mm]
Largo máximo árbol 3	2.73 [mm]
Ancho máximo árbol 1	1.67 [mm]
Ancho máximo árbol 2	0.37 [mm]
Ancho máximo árbol 3	3.68 [mm]
Tiempo de cruce	15.17 [min]
Tiempo de ruptura	17.58 [min]

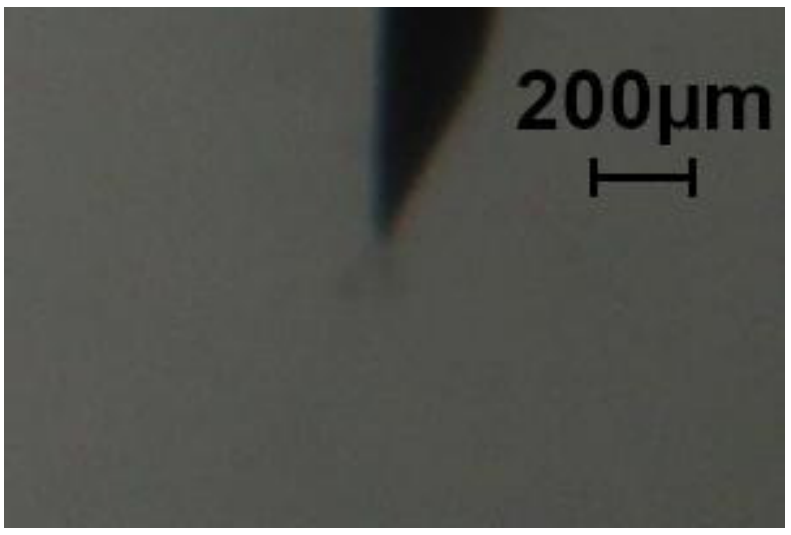
Tabla A.12: Datos de entrada y experimentales de probeta N°10.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.



(c) Punta 3.

Figura A.55: Iniciaciones en puntas de probeta N°10 al comenzar ensayo.

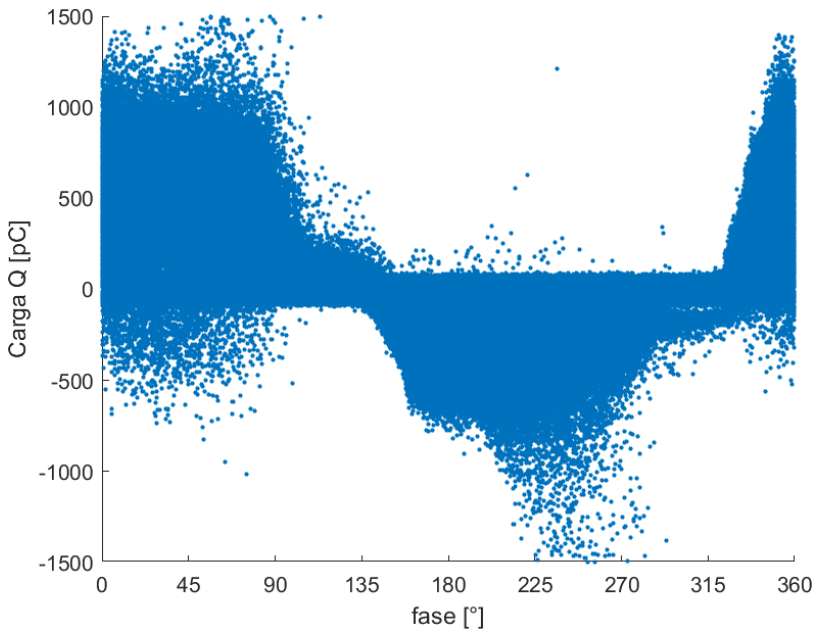


Figura A.56: PRPD en probeta N°10.

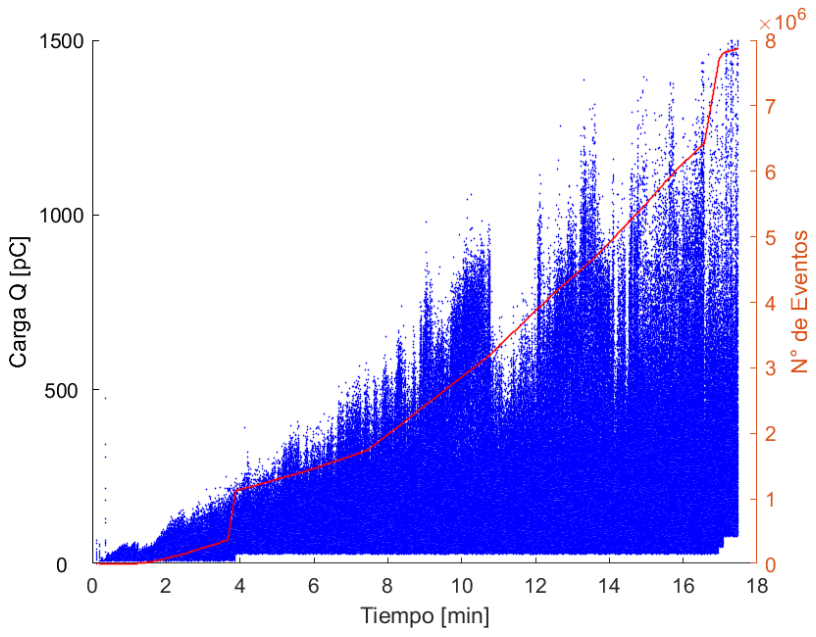


Figura A.57: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°10.

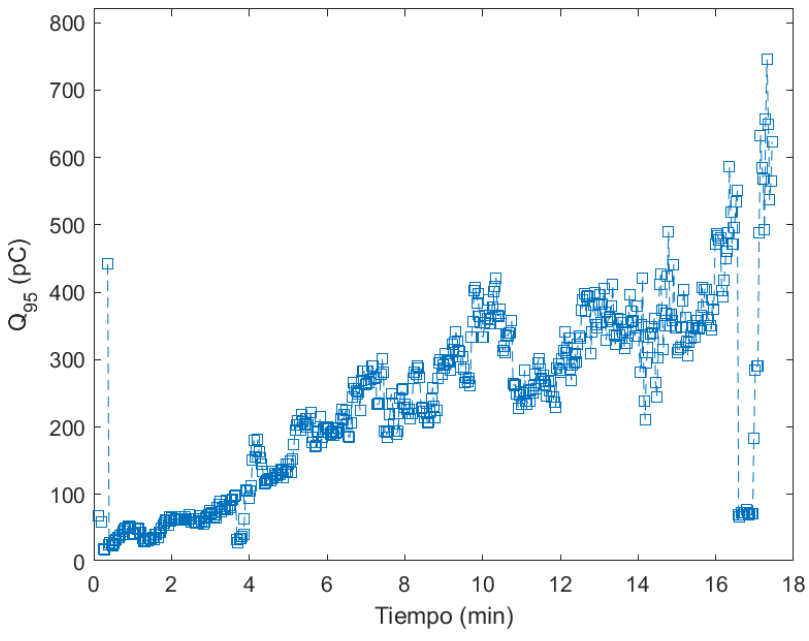


Figura A.58: Carga Q_{95} en probeta N°10.

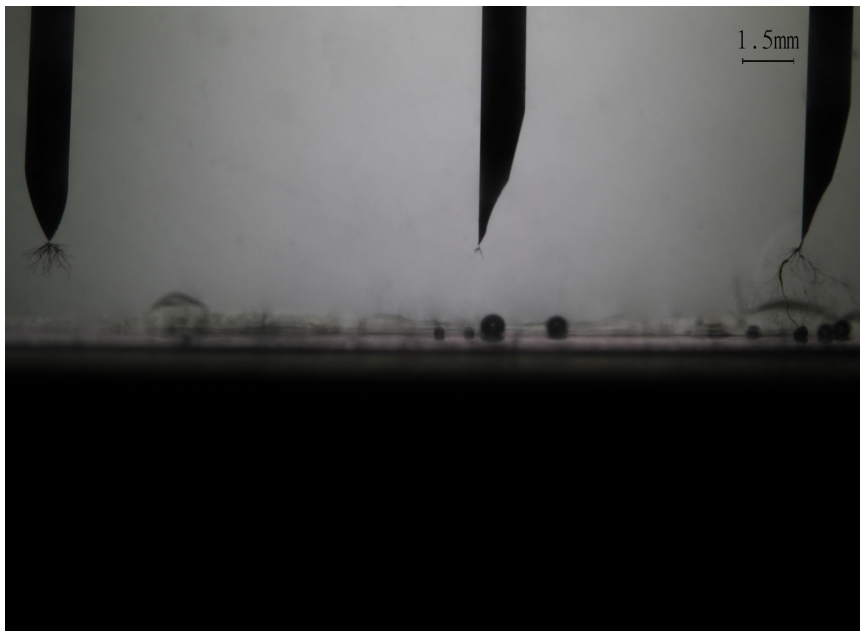


Figura A.59: Crecimiento completo en probeta N°10 (pre-ruptura).

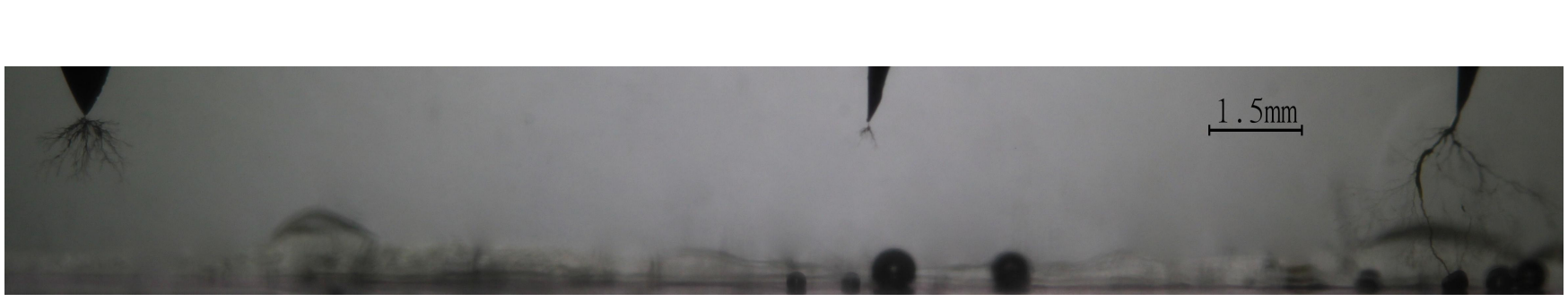
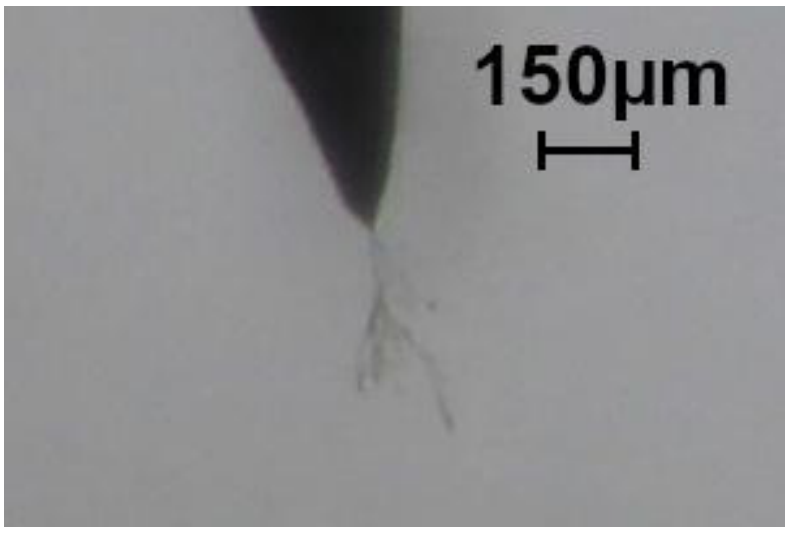


Figura A.60: Crecimiento completo en probeta N°10 (Primer plano, instante pre-ruptura).

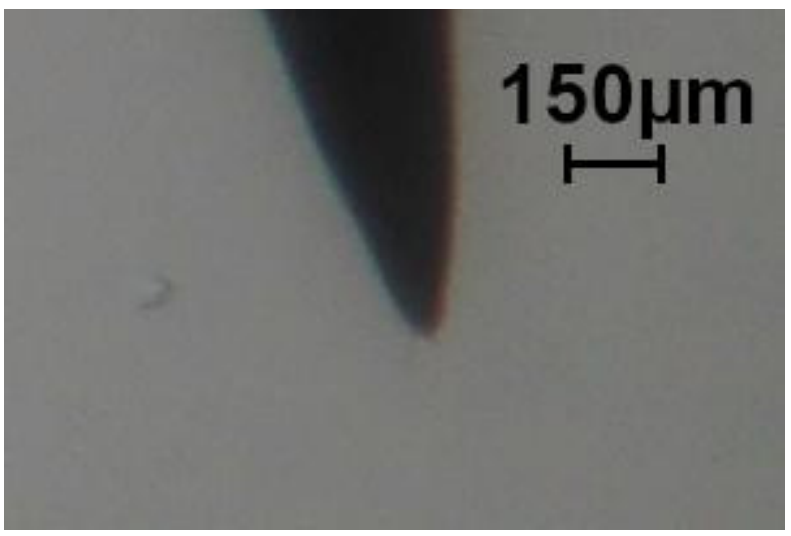
A.11 Probeta Número 11

Número de probeta	11
Código USM	SG32
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	350 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	13.2 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.7 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.6 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.48 [mm]
Largo máximo árbol 2	1.64 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	2.12 [mm]
Ancho máximo árbol 2	1.45 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	6.33 [min]
Tiempo de ruptura	7.25 [min]

Tabla A.13: Datos de entrada y experimentales de probeta N°11.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.61: Iniciaciones en puntas de probeta N°11 al comenzar ensayo.

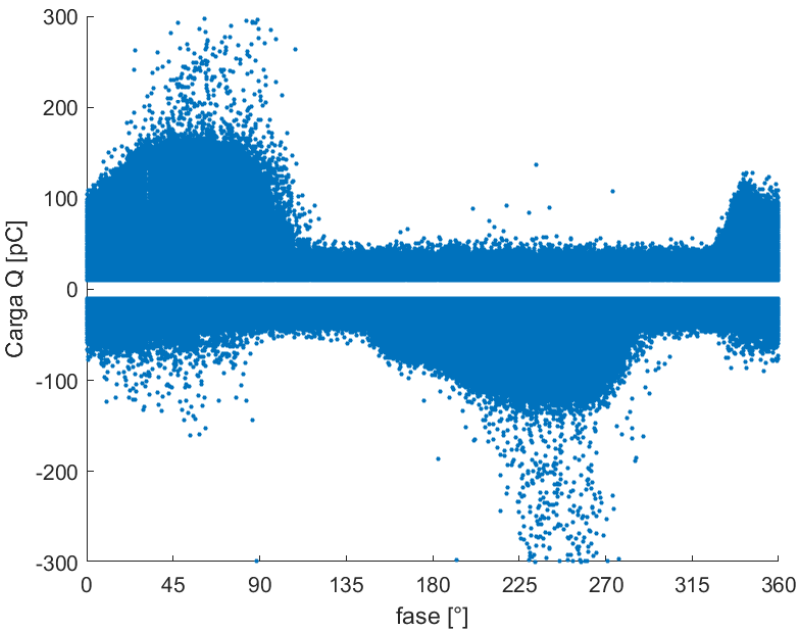


Figura A.62: PRPD en probeta N°11.

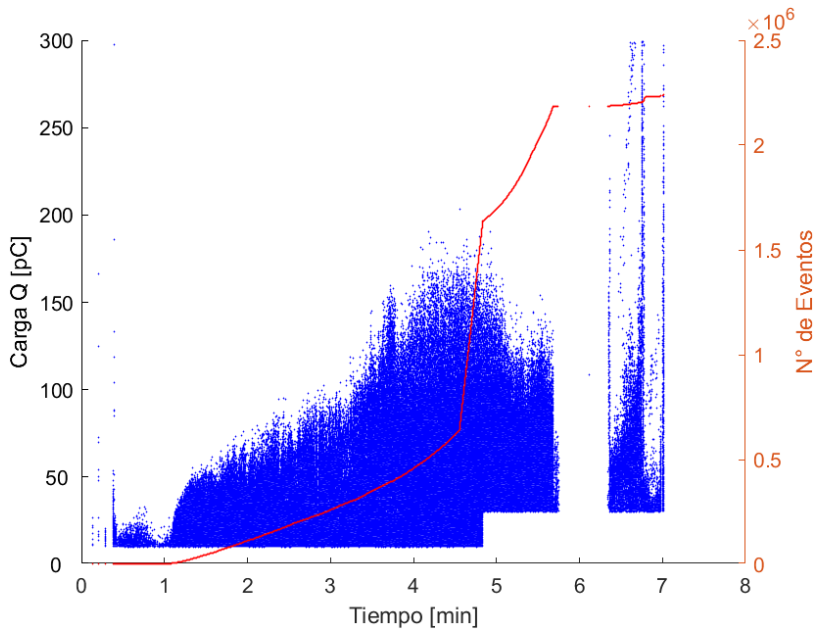


Figura A.63: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°11.

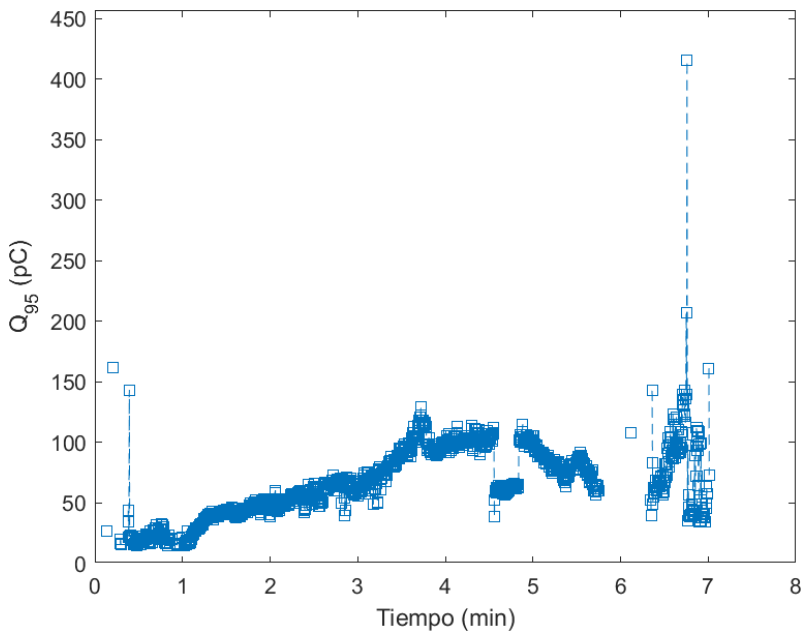


Figura A.64: Carga Q_{95} en probeta N°11.

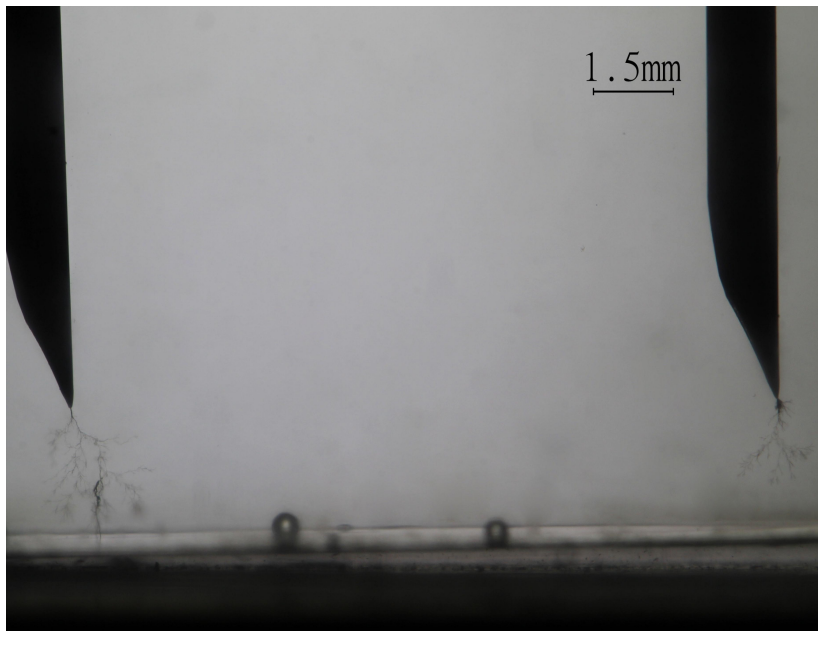


Figura A.65: Crecimiento completo en probeta N°11 (pre-ruptura).

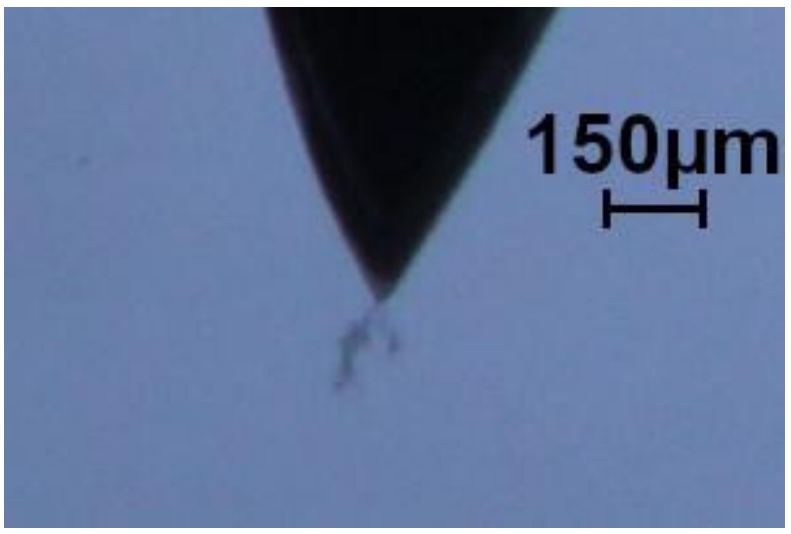


Figura A.66: Crecimiento completo en probeta N°11 (Primer plano, instante pre-ruptura).

A.12 Probeta Número 12

Número de probeta	12
Código USM	SG33
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	350 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	9.0 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.3 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.3 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.53 [mm]
Largo máximo árbol 2	3.01 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	2.71 [mm]
Ancho máximo árbol 2	3.32 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	7.83 [min]
Tiempo de ruptura	10.08 [min]

Tabla A.14: Datos de entrada y experimentales de probeta N°12.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.67: Iniciaciones en puntas de probeta N°12 al comenzar ensayo.

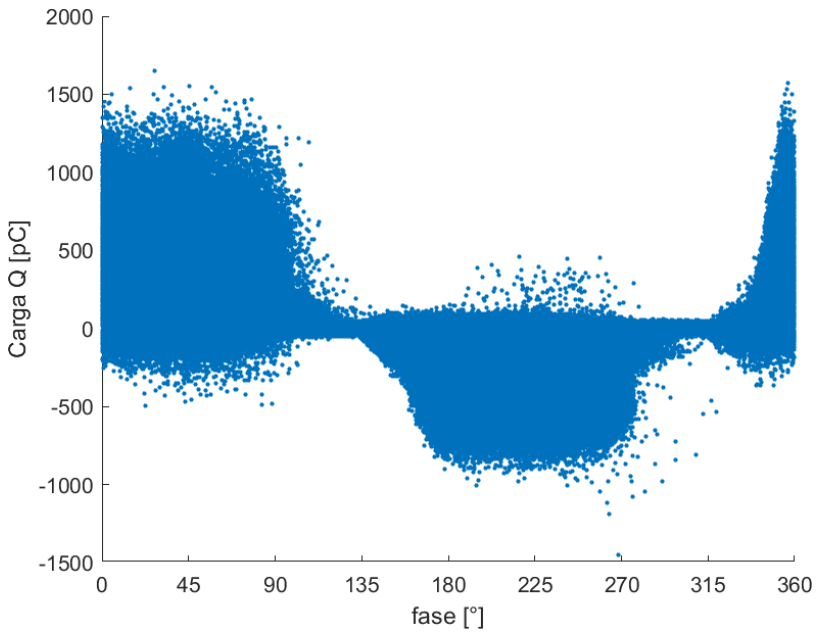


Figura A.68: PRPD en probeta N°12.

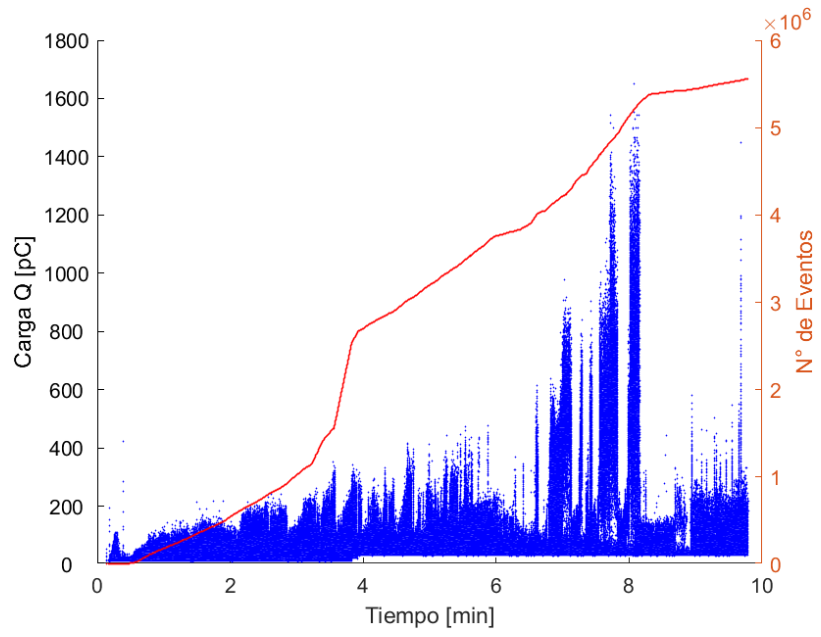


Figura A.69: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°12.

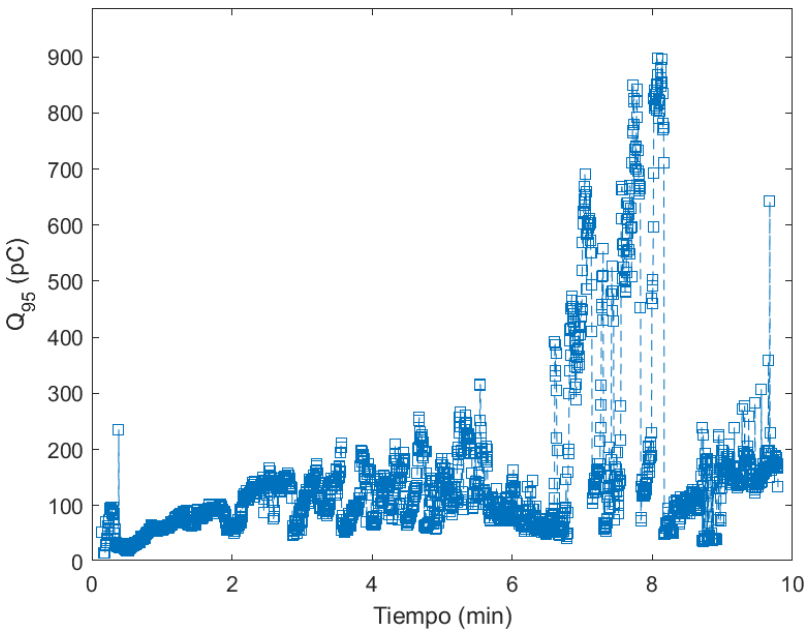


Figura A.70: Carga Q_{95} en probeta N°12.

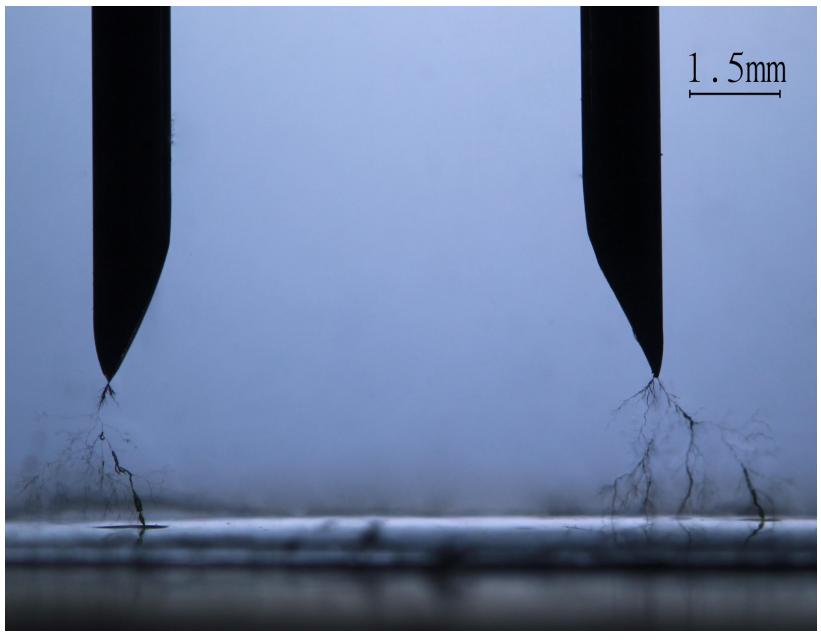


Figura A.71: Crecimiento completo en probeta N°12 (pre-ruptura).

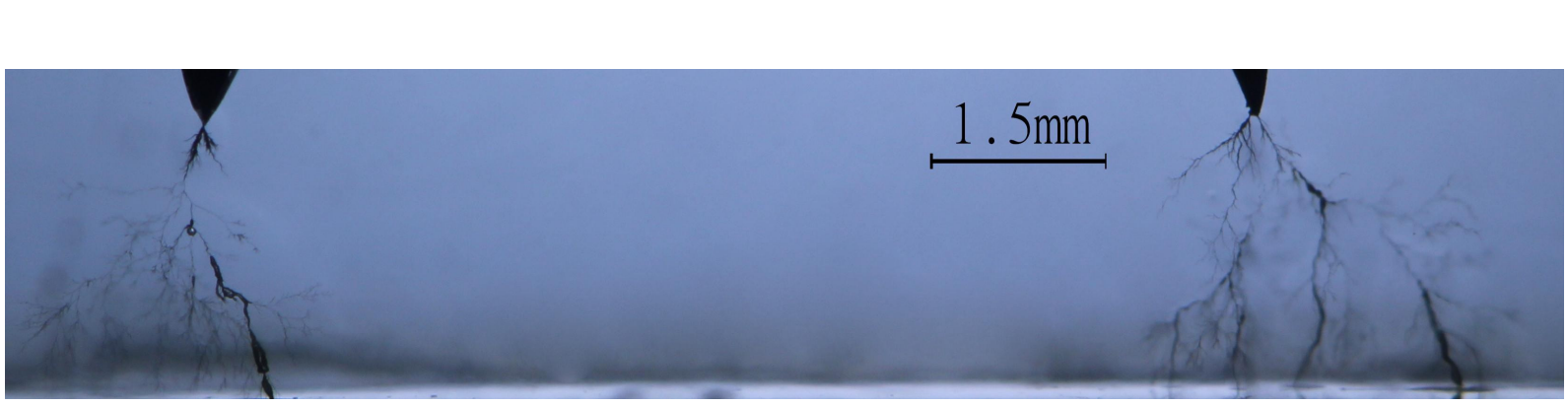
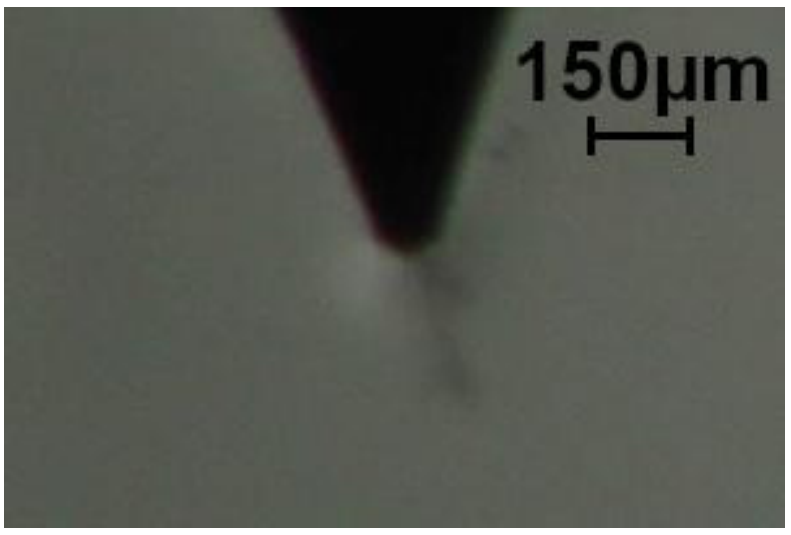


Figura A.72: Crecimiento completo en probeta N°12 (Primer plano, instante pre-ruptura).

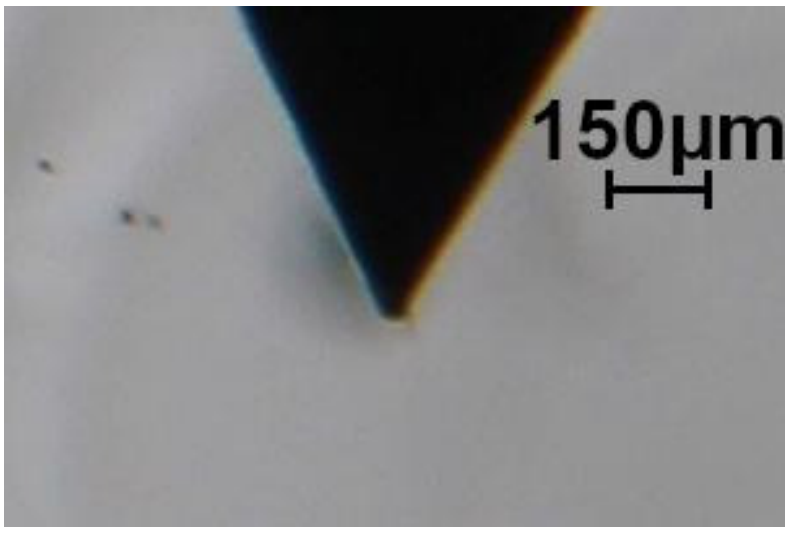
A.13 Probeta Número 13

Número de probeta	13
Código USM	SG39
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	350 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	17.3 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	3.5 [mm]
Distancia punta 2 - placa	3.3 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	3.49 [mm]
Largo máximo árbol 2	3.44 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	3.41 [mm]
Ancho máximo árbol 2	3.49 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	13.75 [min]
Tiempo de ruptura	44.50 [min]

Tabla A.15: Datos de entrada y experimentales de probeta N°13.



(a) Punta 1.



(b) Punta 2.

Figura A.73: Iniciaciones en puntas de probeta N°13 al comenzar ensayo.

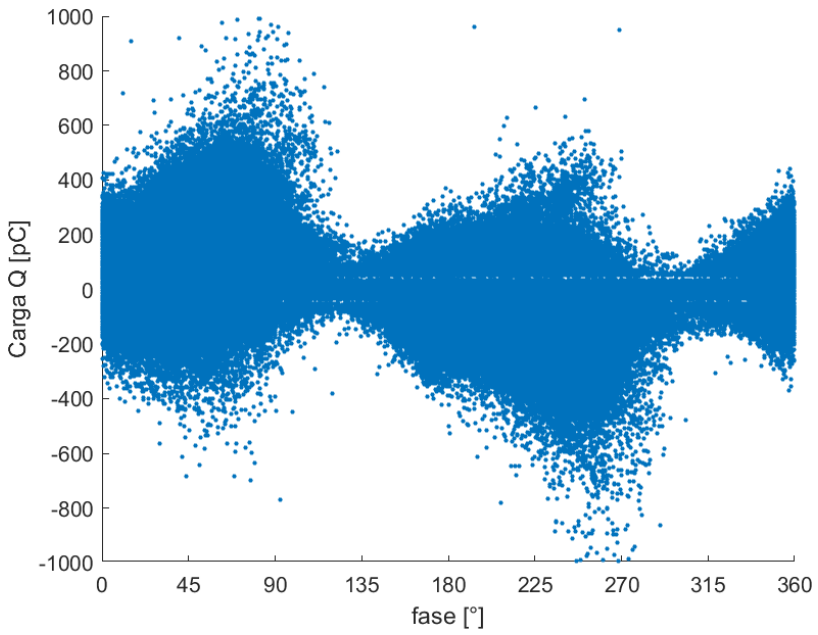


Figura A.74: PRPD en probeta N°13.

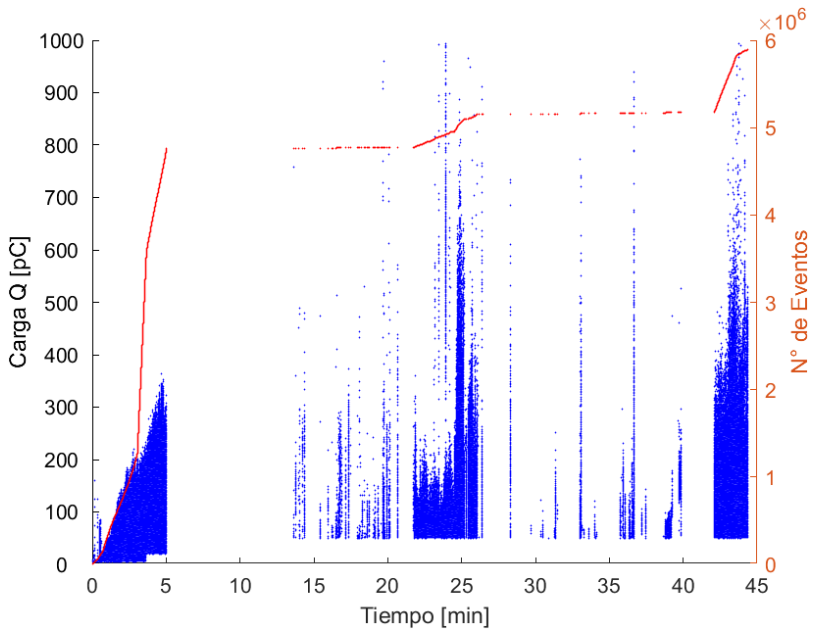


Figura A.75: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°13.

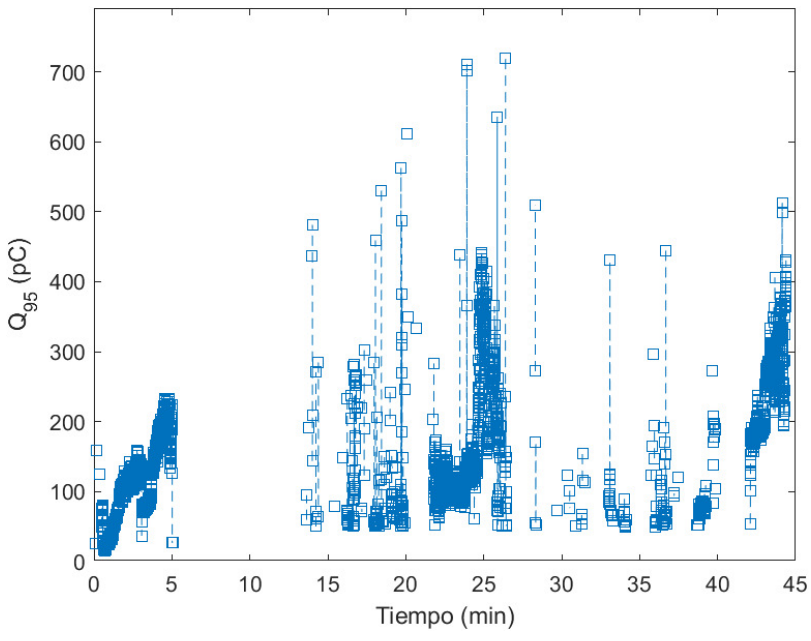


Figura A.76: Carga Q_{95} en probeta N°13.

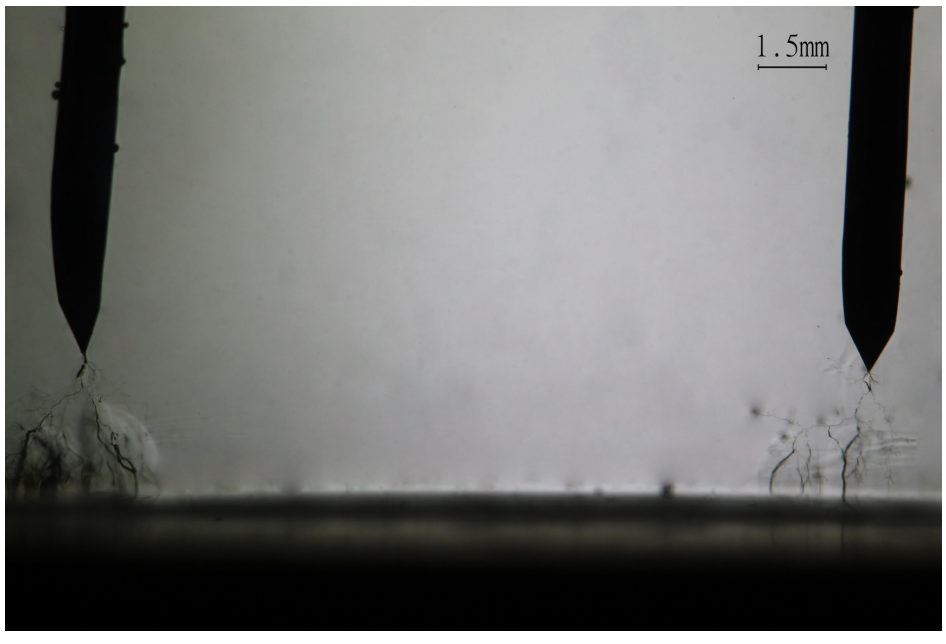


Figura A.77: Crecimiento completo en probeta N°13 (pre-ruptura).

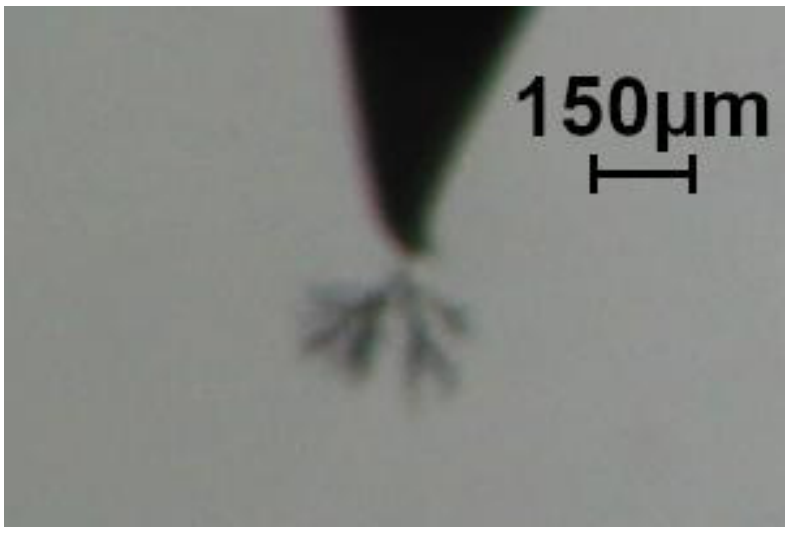


Figura A.78: Crecimiento completo en probeta N°13 (Primer plano, instante pre-ruptura).

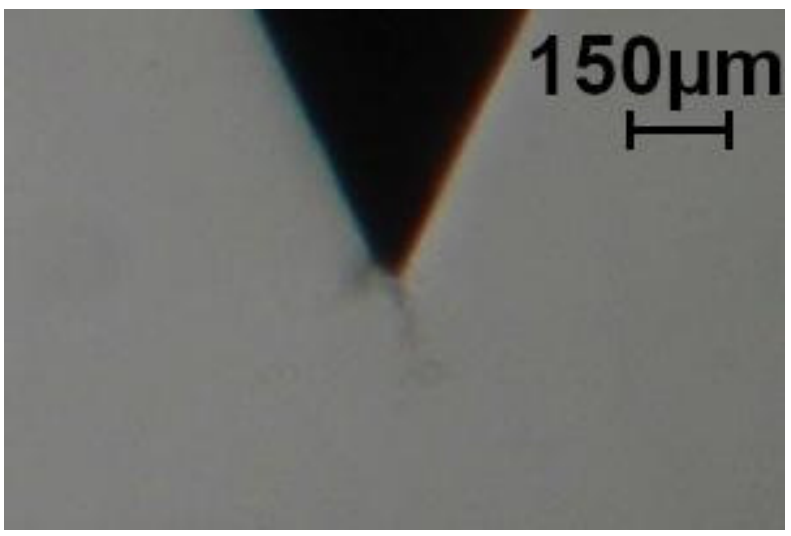
A.14 Probeta Número 14

Número de probeta	14
Código USM	SG40
Experimento	Crecimiento simultaneo
Tipo	Dos agujas
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	350 [Hz]
Distancia punta 1 - punta 2	16.3 [mm]
Distancia punta 2 - punta 3	-
Distancia punta 1 - placa	2.6 [mm]
Distancia punta 2 - placa	2.6 [mm]
Distancia punta 3 - placa	-
Largo máximo árbol 1	2.86 [mm]
Largo máximo árbol 2	3.00 [mm]
Largo máximo árbol 3	-
Ancho máximo árbol 1	2.58 [mm]
Ancho máximo árbol 2	2.36 [mm]
Ancho máximo árbol 3	-
Tiempo de cruce	15.08 [min]
Tiempo de ruptura	41.08 [min]

Tabla A.16: Datos de entrada y experimentales de probeta N°14.



(a) Punta 1



(b) Punta 2

Figura A.79: Iniciaciones en puntas de probeta N°14 al comenzar ensayo.

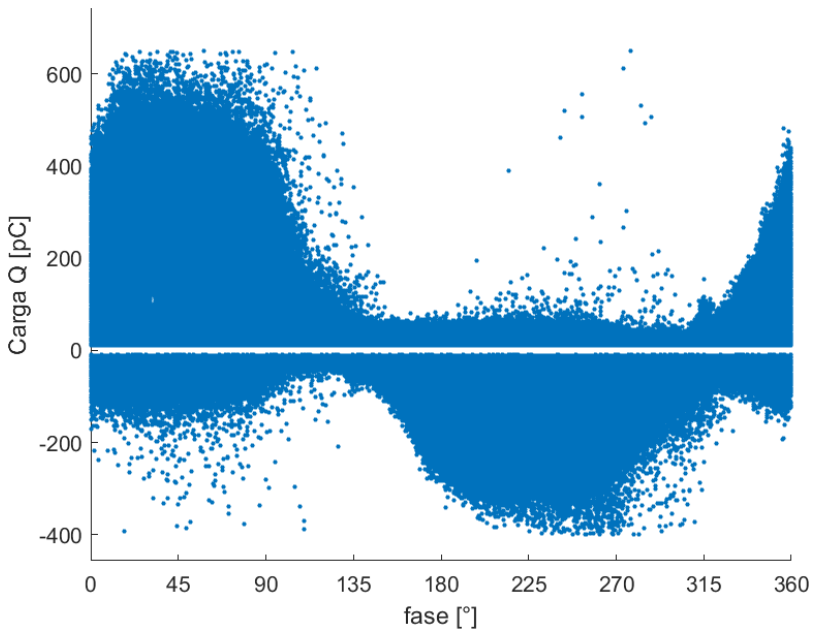


Figura A.80: PRPD en probeta N°14.

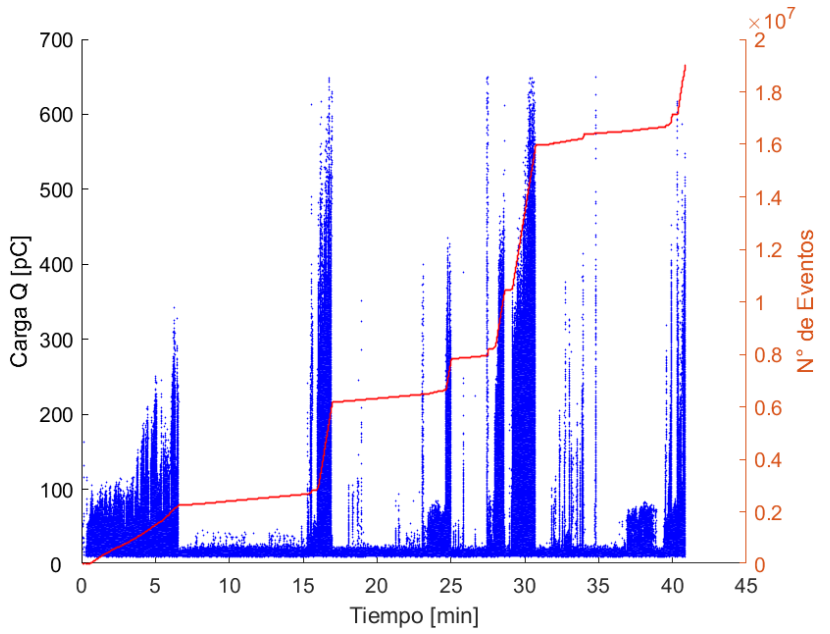


Figura A.81: Carga Q y número de eventos en el tiempo en probeta N°14.

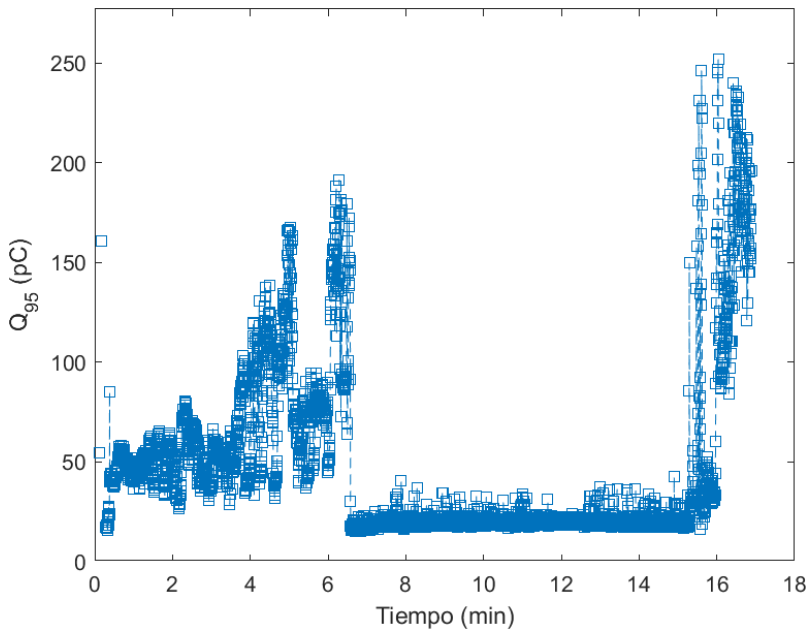


Figura A.82: Carga Q_{95} en probeta N°14.

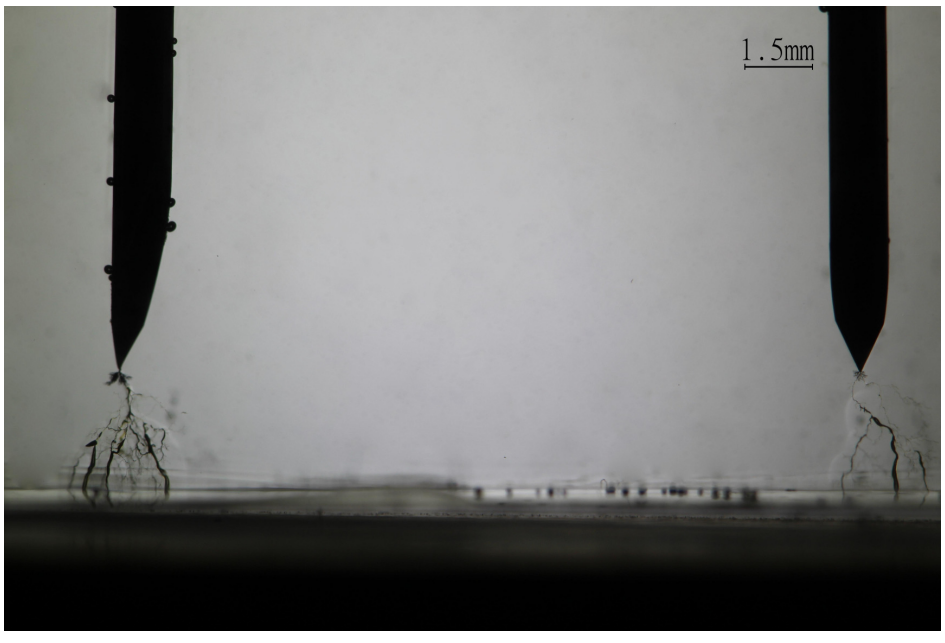


Figura A.83: Crecimiento completo en probeta N°14 (pre-ruptura).

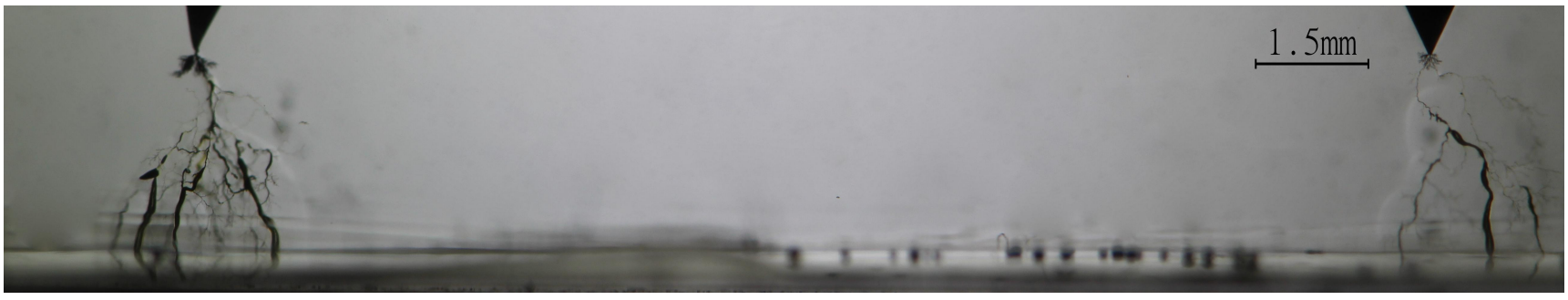
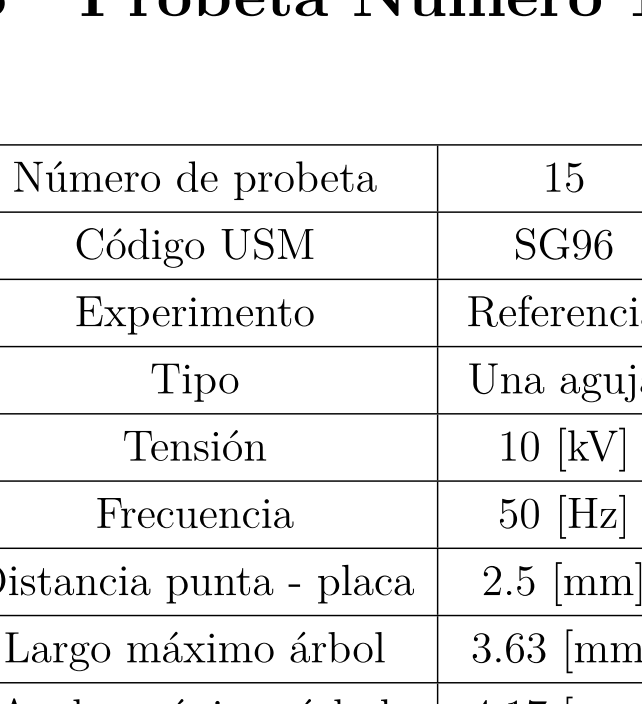


Figura A.84: Crecimiento completo en probeta N°14 (Primer plano, instante pre-ruptura).

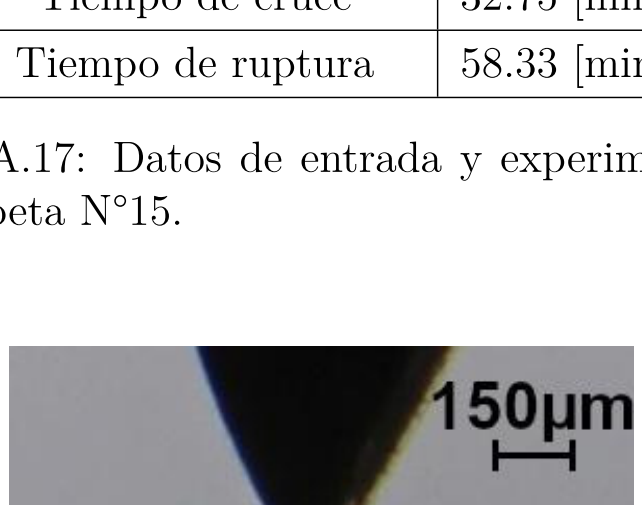
A.15 Probeta Número 15

Número de probeta	15
Código USM	SG96
Experimento	Referencia
Tipo	Una aguja
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta - placa	2.5 [mm]
Largo máximo árbol	3.63 [mm]
Ancho máximo árbol	4.17 [mm]
Tiempo de cruce	32.75 [min]
Tiempo de ruptura	58.33 [min]

Tabla A.17: Datos de entrada y experimentales de probeta N°15.

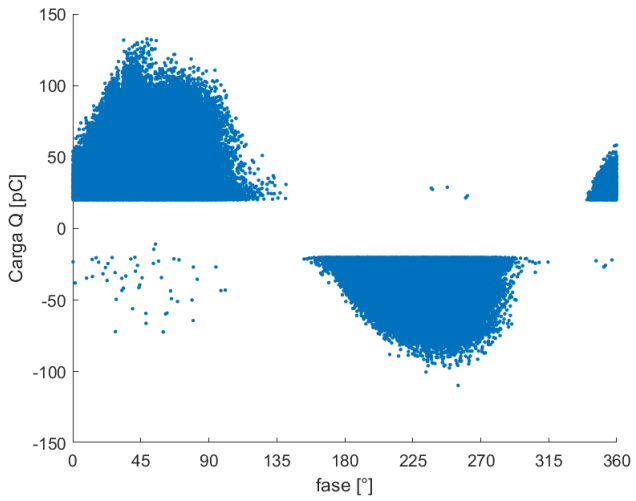


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

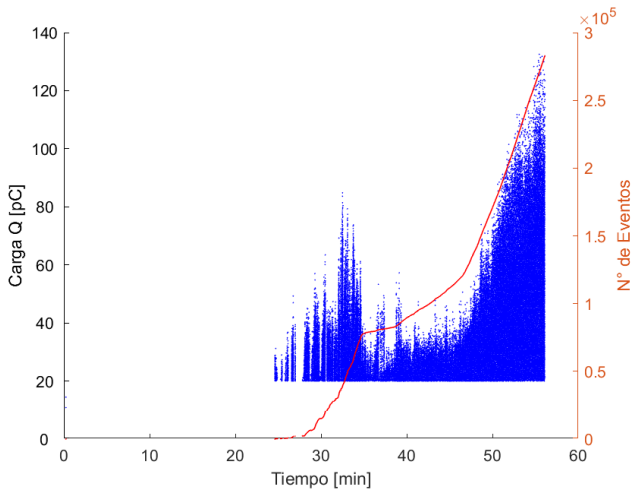


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

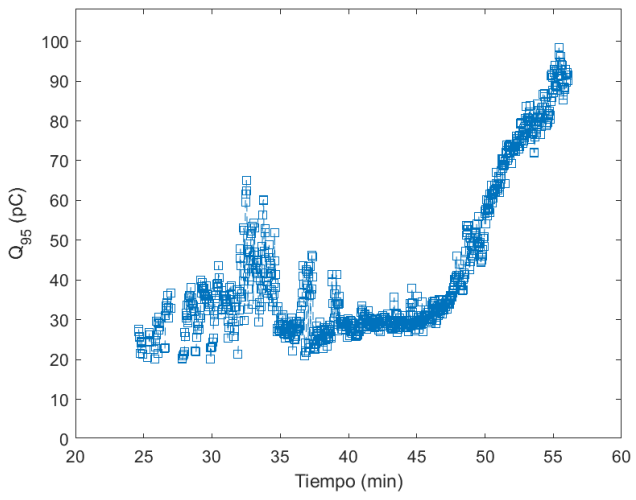
Figura A.85: Probeta N°15: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



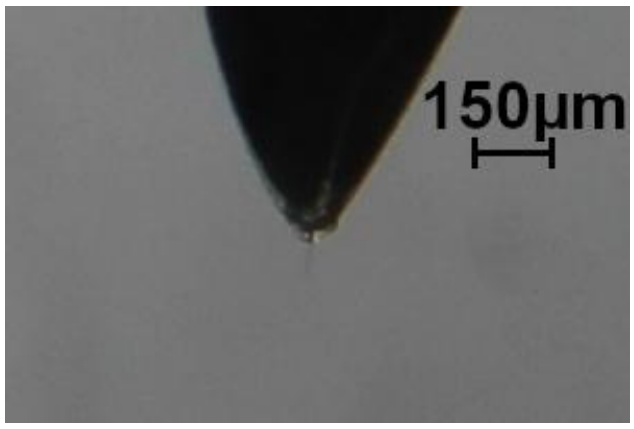
(c) Carga Q_{95}

Figura A.86: Probeta N°15: Mediciones de descargas parciales.

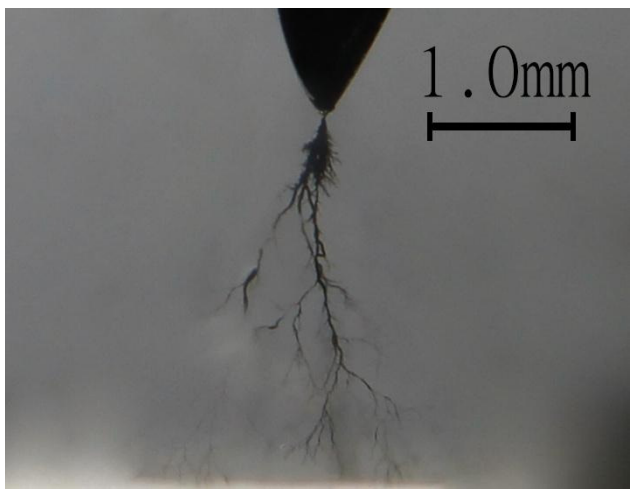
A.16 Probeta Número 16

Número de probeta	16
Código USM	SG98
Experimento	Referencia
Tipo	Una aguja
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta - plano	2.5 [mm]
Largo máximo árbol	2.82 [mm]
Ancho máximo árbol	2.04 [mm]
Tiempo de cruce	62.33 [min]
Tiempo de ruptura	80.08 [min]

Tabla A.18: Datos de entrada y experimentales de probeta N°16.

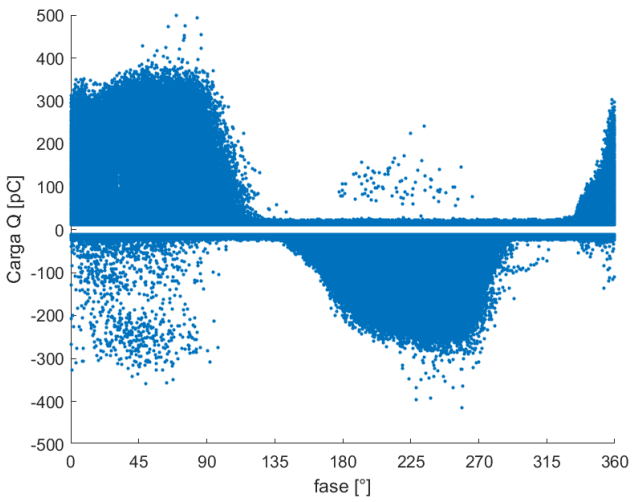


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

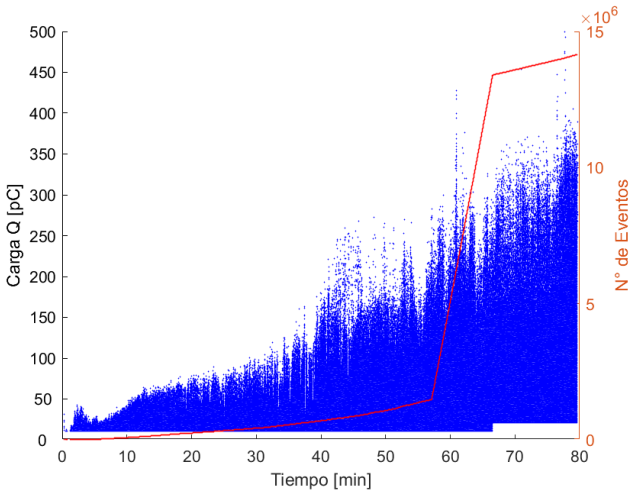


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

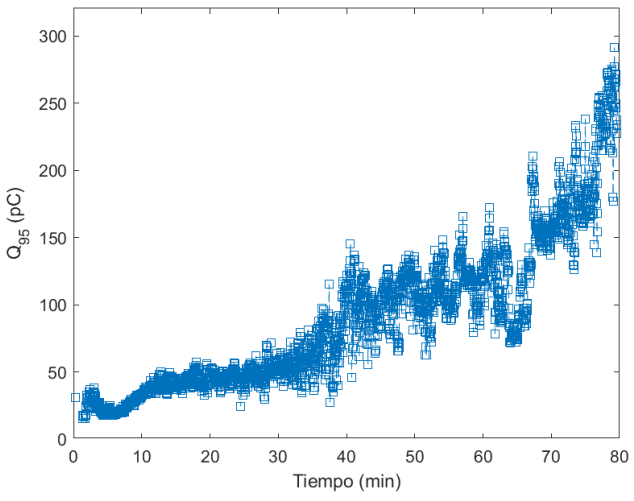
Figura A.87: Probeta N°16: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



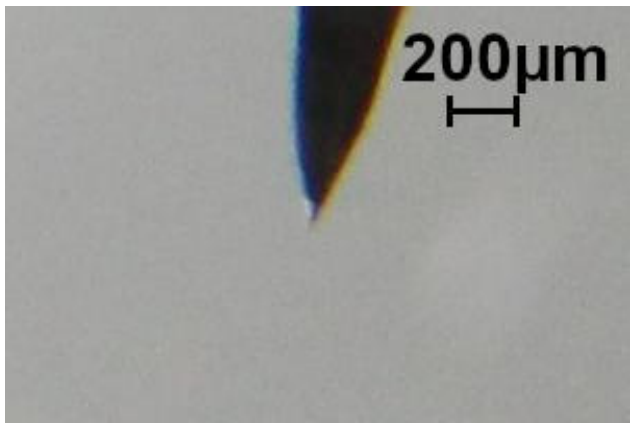
(c) Carga Q_{95}

Figura A.88: Probeta N°16: Mediciones de descargas parciales.

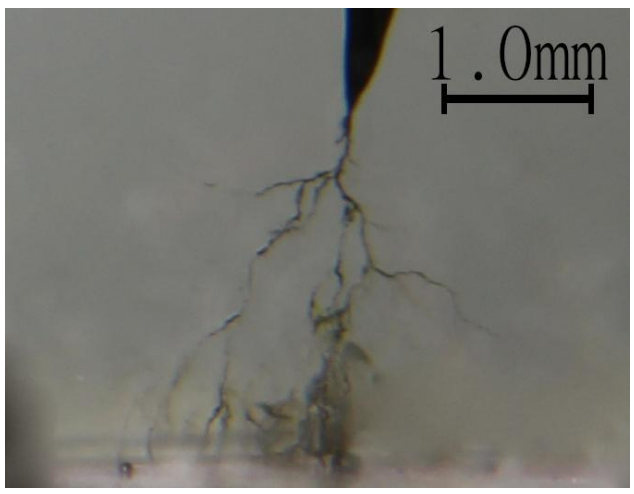
A.17 Probeta Número 17

Número de probeta	17
Código USM	SG99
Experimento	Referencia
Tipo	Una aguja
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Distancia punta - placa	2.4 [mm]
Largo máximo árbol	2.66 [mm]
Ancho máximo árbol	2.44 [mm]
Tiempo de cruce	18.75 [min]
Tiempo de ruptura	42.42 [min]

Tabla A.19: Datos de entrada y experimentales de probeta N°17.

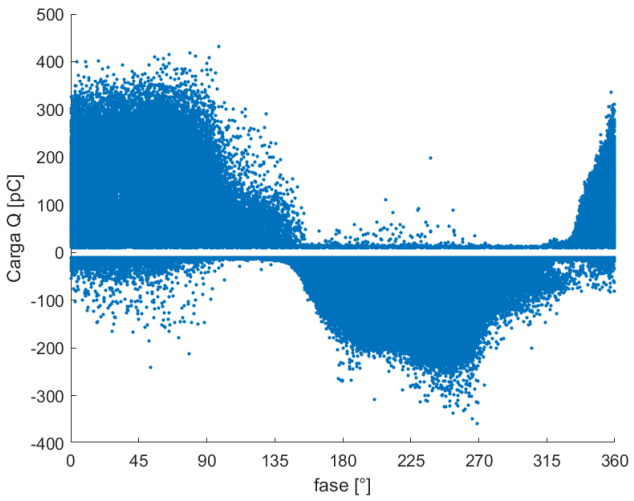


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

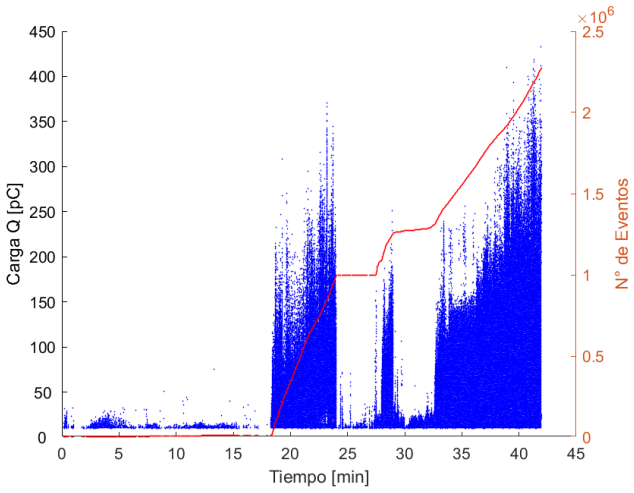


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

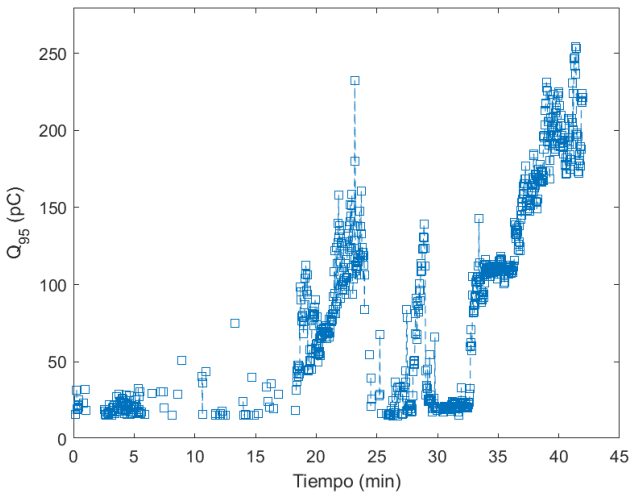
Figura A.89: Probeta N°17: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



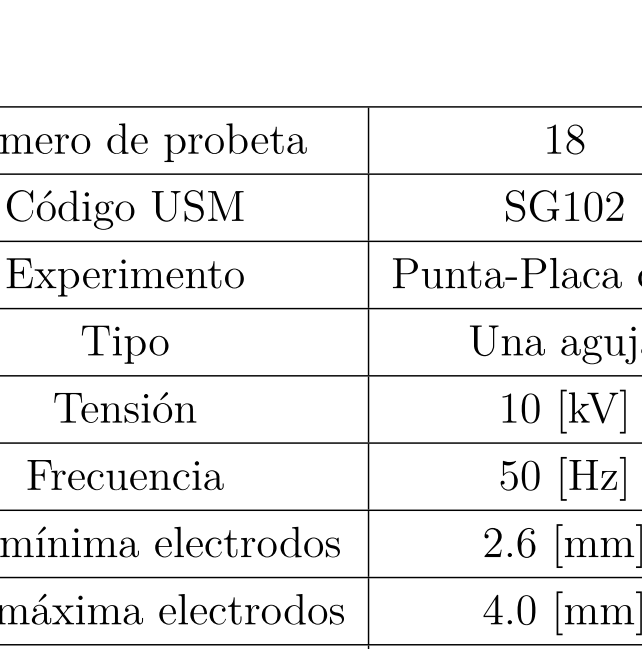
(c) Carga Q_{95}

Figura A.90: Probeta N°17: Mediciones de descargas parciales.

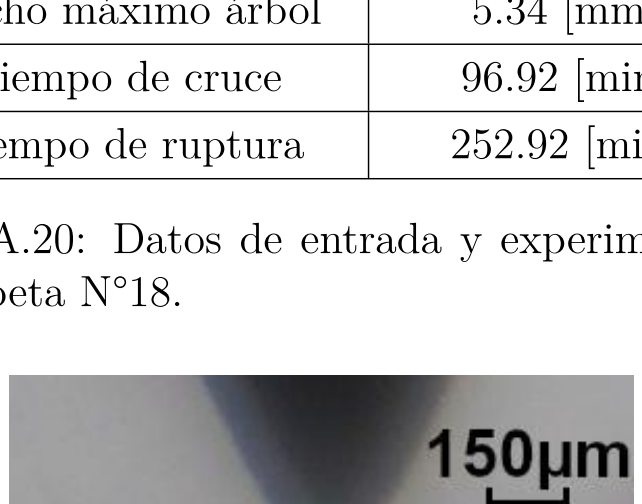
A.18 Probeta Número 18

Número de probeta	18
Código USM	SG102
Experimento	Punta-Placa curva
Tipo	Una aguja
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Dist.mínima electrodos	2.6 [mm]
Dist.máxima electrodos	4.0 [mm]
Largo máximo árbol	4.02 [mm]
Ancho máximo árbol	5.34 [mm]
Tiempo de cruce	96.92 [min]
Tiempo de ruptura	252.92 [min]

Tabla A.20: Datos de entrada y experimentales de probeta N°18.

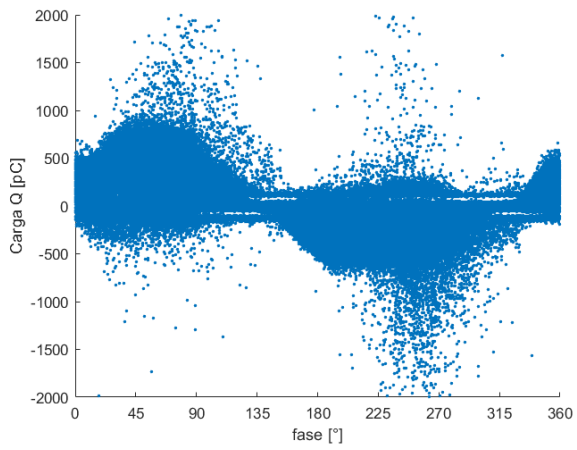


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

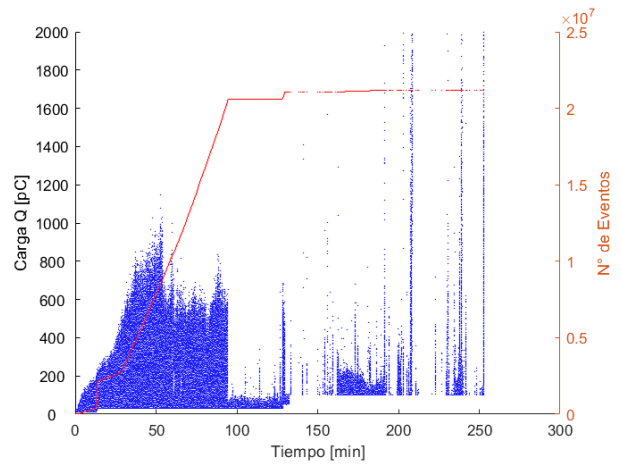


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

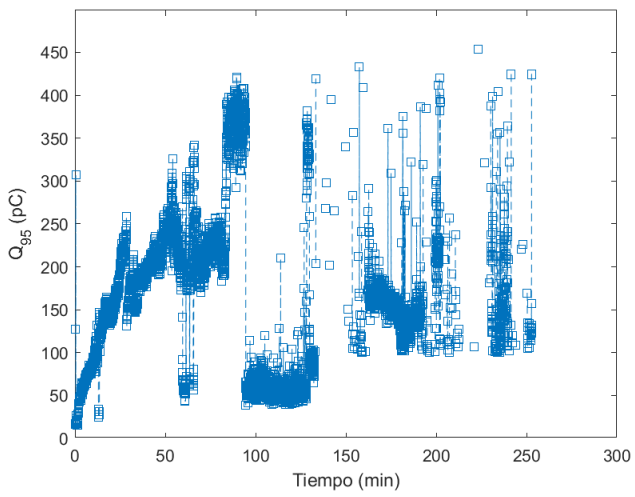
Figura A.91: Probeta N°18: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



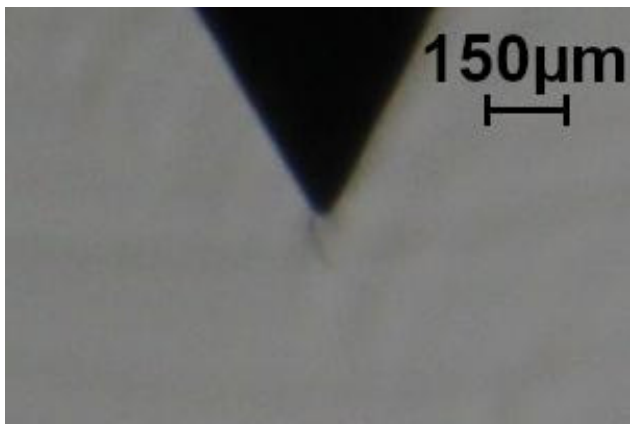
(c) Carga Q_{95}.

Figura A.92: Probeta N°18: Mediciones de descargas parciales.

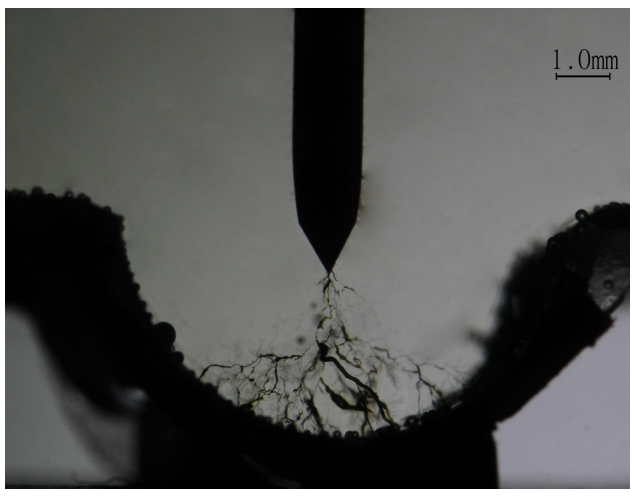
A.19 Probeta Número 19

Número de probeta	19
Código USM	SG103
Experimento	Punta-Placa curva
Tipo	Una aguja
Tensión	14 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]
Dist.mínima electrodos	2.9 [mm]
Dist.máxima electrodos	3.9 [mm]
Largo máximo árbol	3.26 [mm]
Ancho máximo árbol	5.06 [mm]
Tiempo de cruce	25.25 [min]
Tiempo de ruptura	91.67 [min]

Tabla A.21: Datos de entrada y experimentales de probeta N°19.

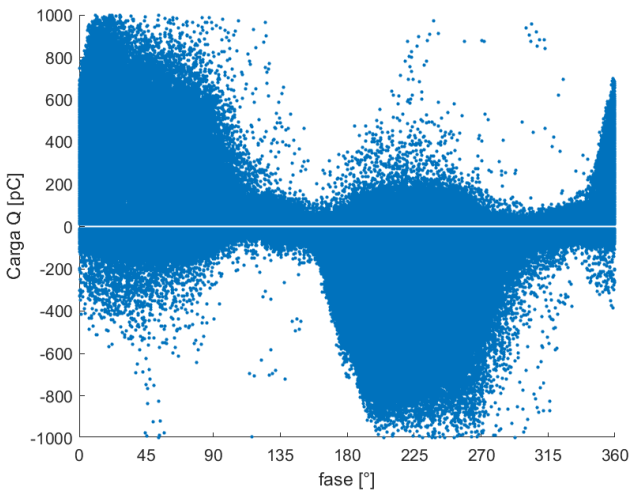


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

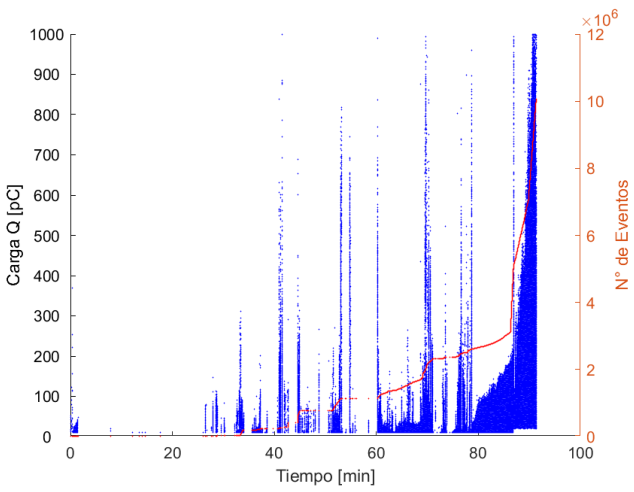


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

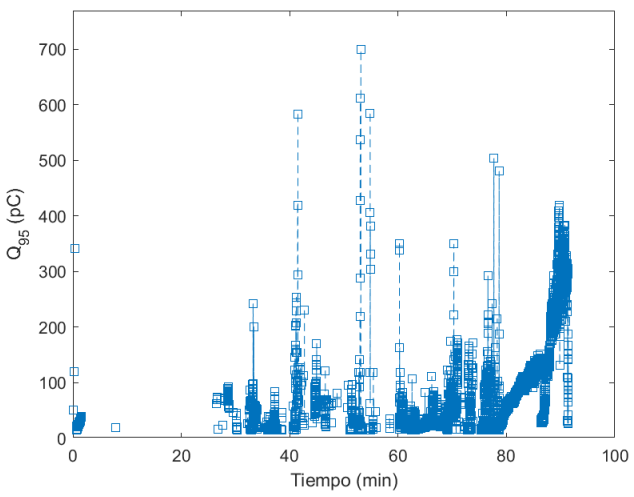
Figura A.93: Probeta N°19: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



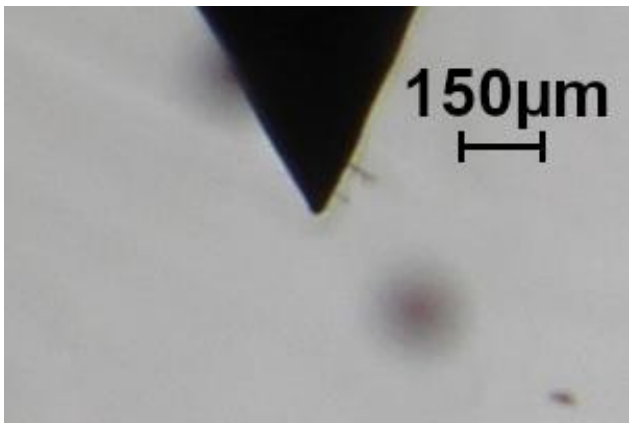
(c) Carga Q_{95}.

Figura A.94: Probeta N°19: Mediciones de descargas parciales.

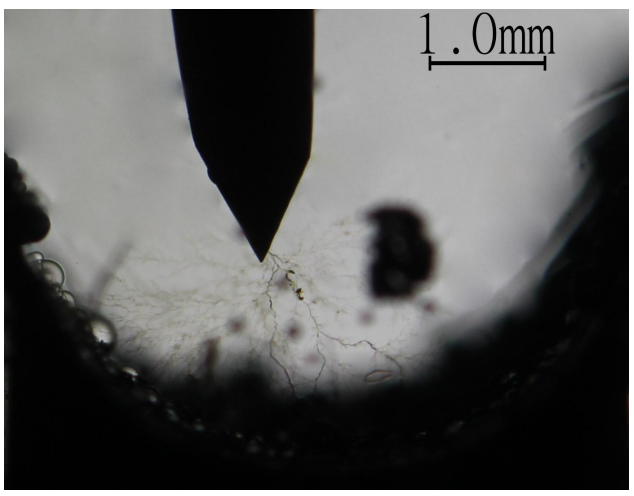
A.20 Probeta Número 20

Número de probeta	20
Código USM	SG104
Experimento	Punta-Placa curva
Tipo	Una aguja
Tensión	10 [kV]
Frecuencia	250 [Hz]
Dist.mínima electrodos	1.5 [mm]
Dist.máxima electrodos	3.2 [mm]
Largo máximo árbol	1.83 [mm]
Ancho máximo árbol	3.14 [mm]
Tiempo de cruce	7.42 [min]
Tiempo de ruptura	9.67 [min]

Tabla A.22: Datos de entrada y experimentales de probeta N°20.

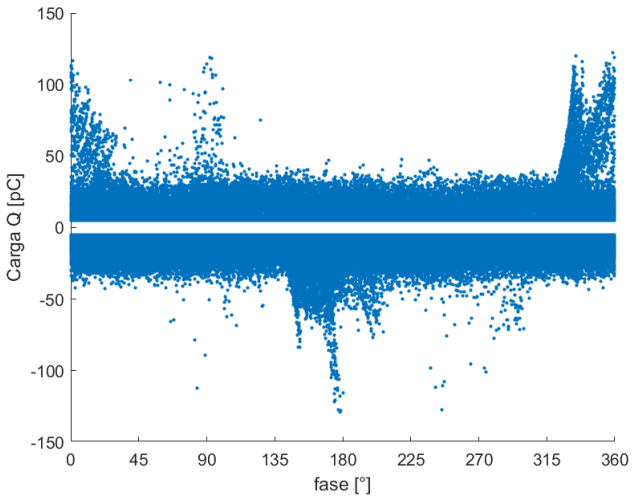


(a) Iniciación al comenzar ensayo.

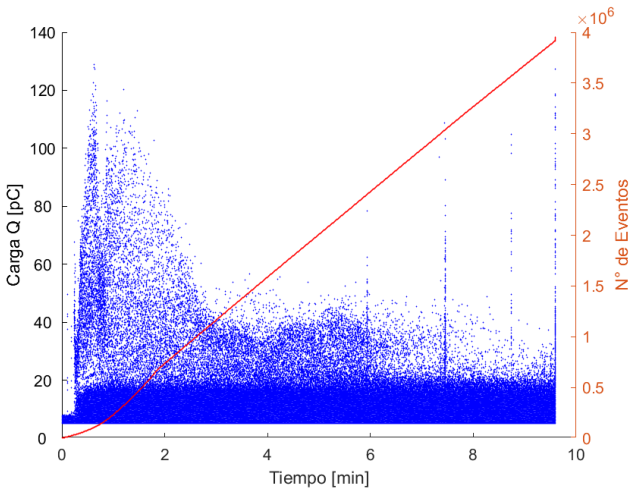


(b) Crecimiento completo (pre-ruptura)

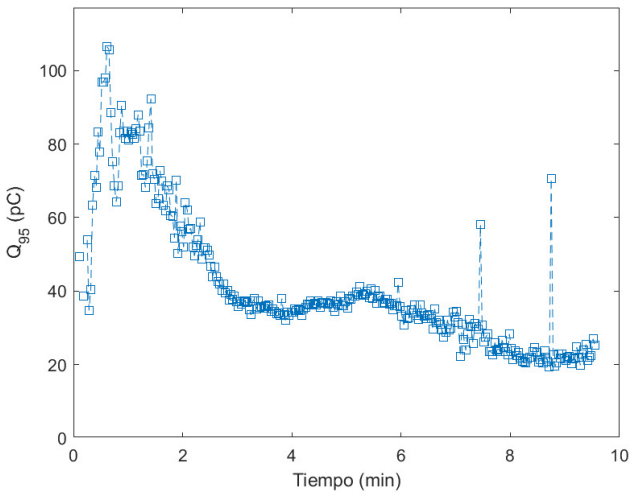
Figura A.95: Probeta N°20: Imágenes.



(a) PRPD.



(b) Carga Q y número de eventos en el tiempo.



(c) Carga Q_{95}.

Figura A.96: Probeta N°20: Mediciones de descargas parciales.

Anexo B

Hoja de datos PRPD

A continuación, se presenta la información de las probetas analizadas por PRPD, según fue descrito en 5.2.2.1.

N° Probeta	Código USM	Experimento	Tensión[kV]	Frecuencia[Hz]	N° Muestreos
03	SG29	Crecimiento simultáneo Dos agujas	10	50	6
05	SG14	Crecimiento simultáneo Tres agujas	14	50	6
08	SG31	Crecimiento simultáneo Dos agujas	14	50	6
12	SG33	Crecimiento simultáneo Dos agujas	10	350	6
15	SG96	Referencia	10	50	6
18	SG102	Punta - Placa curva	10	50	6
19	SG103	Punta - Placa curva	14	50	6
20	SG104	Punta - Placa curva	10	250	6

Tabla B.1: Resumen de probetas analizadas por PRPD.

B.1 Probeta N°03, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 1.

Código USM	SG29
Número de muestreo	1
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.2: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 1.

Número de descargas	137
Carga máxima [pC]	38.4031
Q_{95} [pC]	36.5766
Largo de árbol 1 [μm]	93
Largo de árbol 2 [μm]	36

Tabla B.3: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 1.

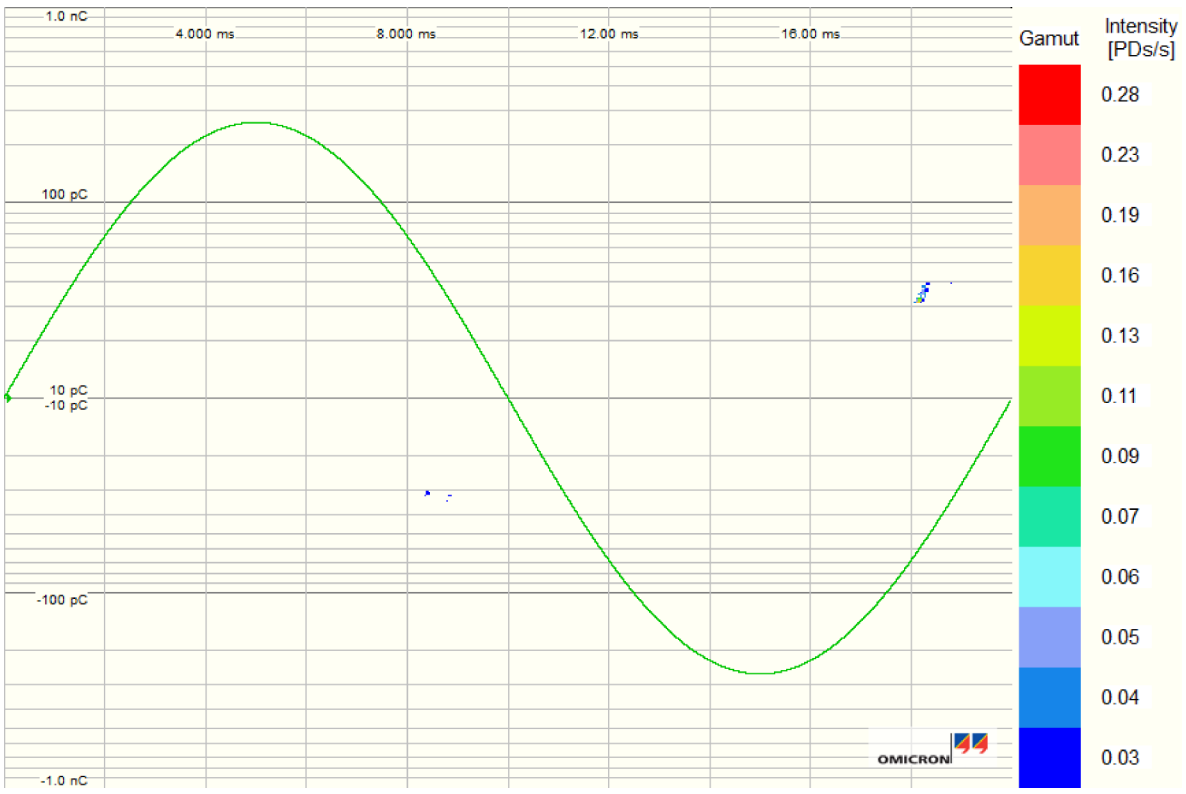


Figura B.1: PRPD probeta N°03, muestreo 1.

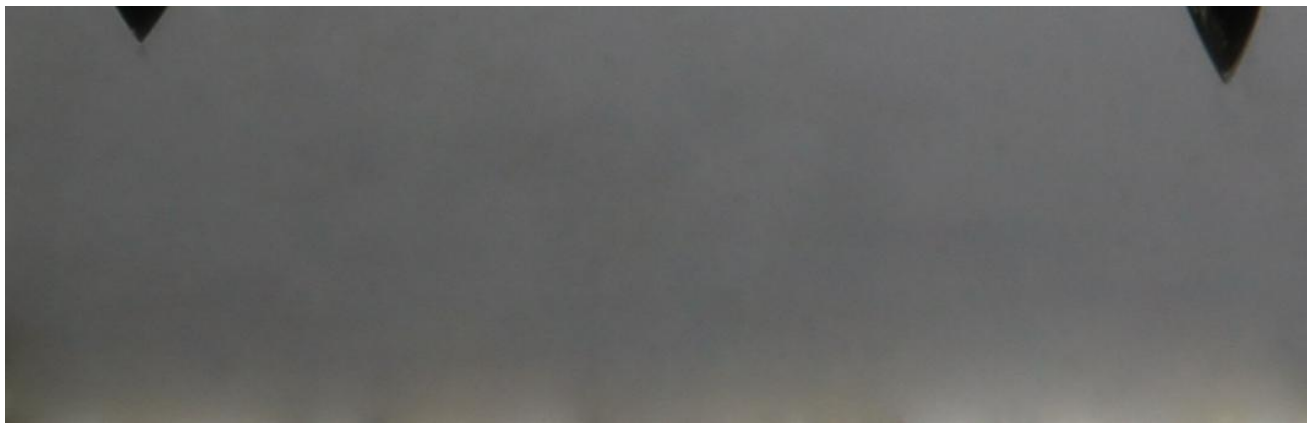


Figura B.2: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 1.

B.2 Probeta N°03, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 2.

Código USM	SG29
Número de muestreo	2
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.4: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 2.

Número de descargas	33579
Carga máxima [pC]	131.9806
Q_{95} [pC]	53.9071
Largo de árbol 1 [μm]	607
Largo de árbol 2 [μm]	897

Tabla B.5: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 2.

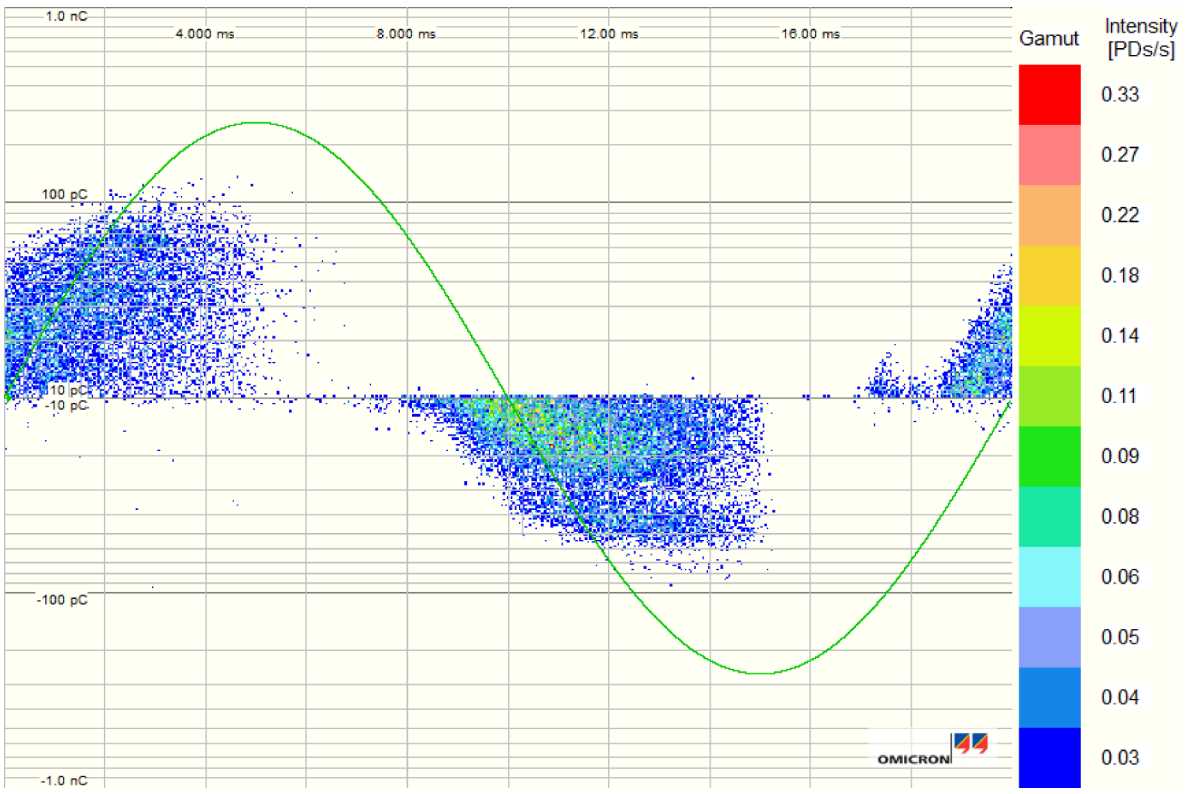


Figura B.3: PRPD probeta N°03, muestreo 2.

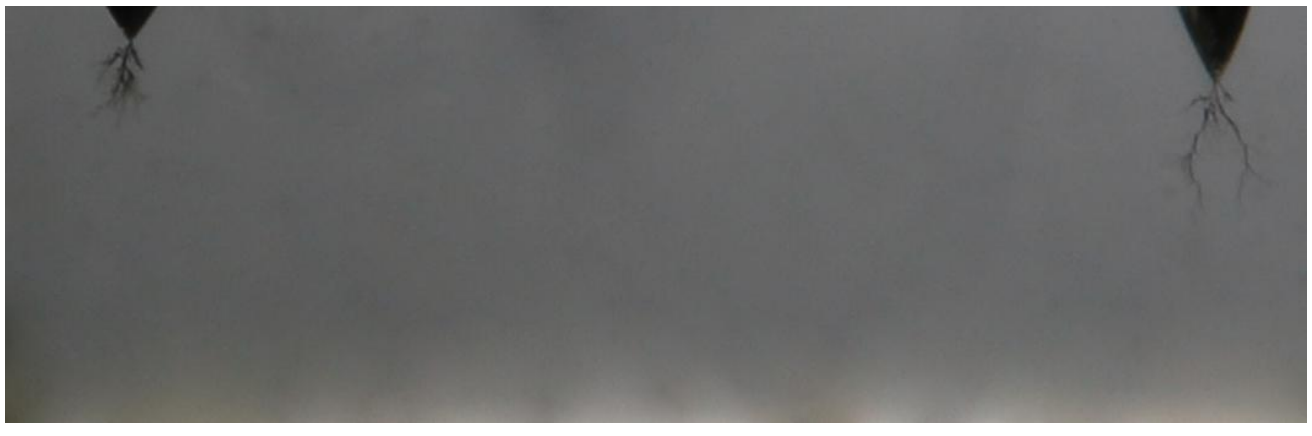


Figura B.4: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 2.

B.3 Probeta N°03, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 3.

Código USM	SG29
Número de muestreo	3
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.6: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 3.

Número de descargas	43959
Carga máxima [pC]	200.542
Q_{95} [pC]	90.9613
Largo de árbol 1 [μm]	915
Largo de árbol 2 [μm]	1464

Tabla B.7: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 3.

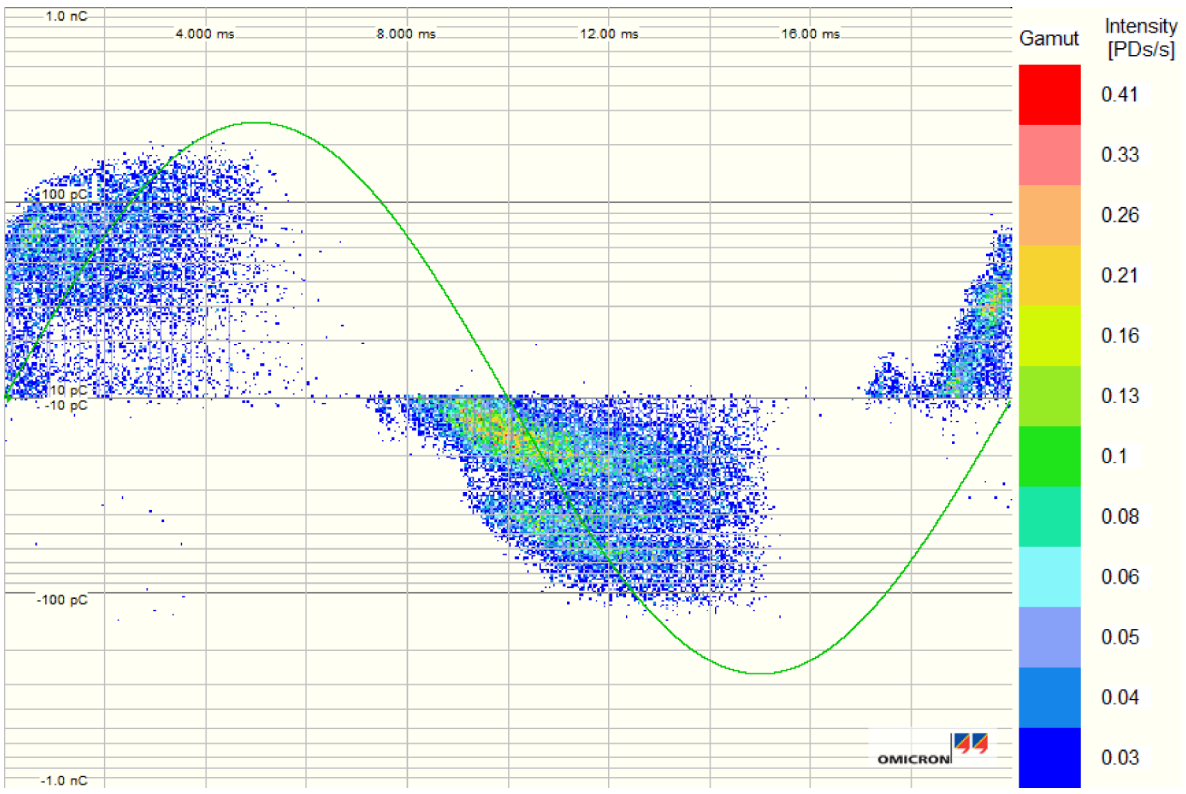


Figura B.5: PRPD probeta N°03, muestreo 3.

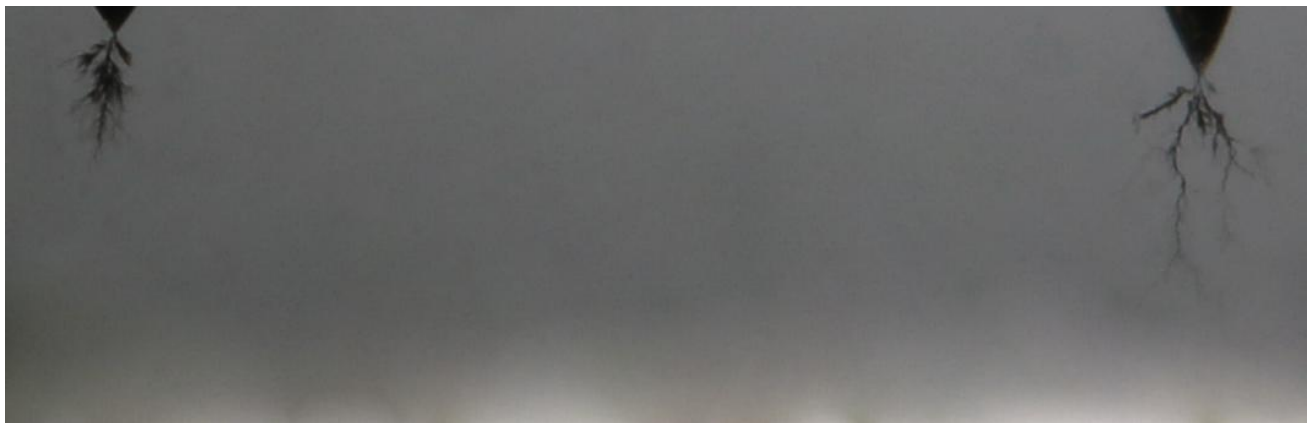


Figura B.6: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 3.

B.4 Probeta N°03, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 4.

Código USM	SG29
Número de muestreo	4
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.8: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 4.

Número de descargas	61357
Carga máxima [pC]	255.0777
Q_{95} [pC]	95.3608
Largo de árbol 1 [μm]	1151
Largo de árbol 2 [μm]	2208

Tabla B.9: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 4.

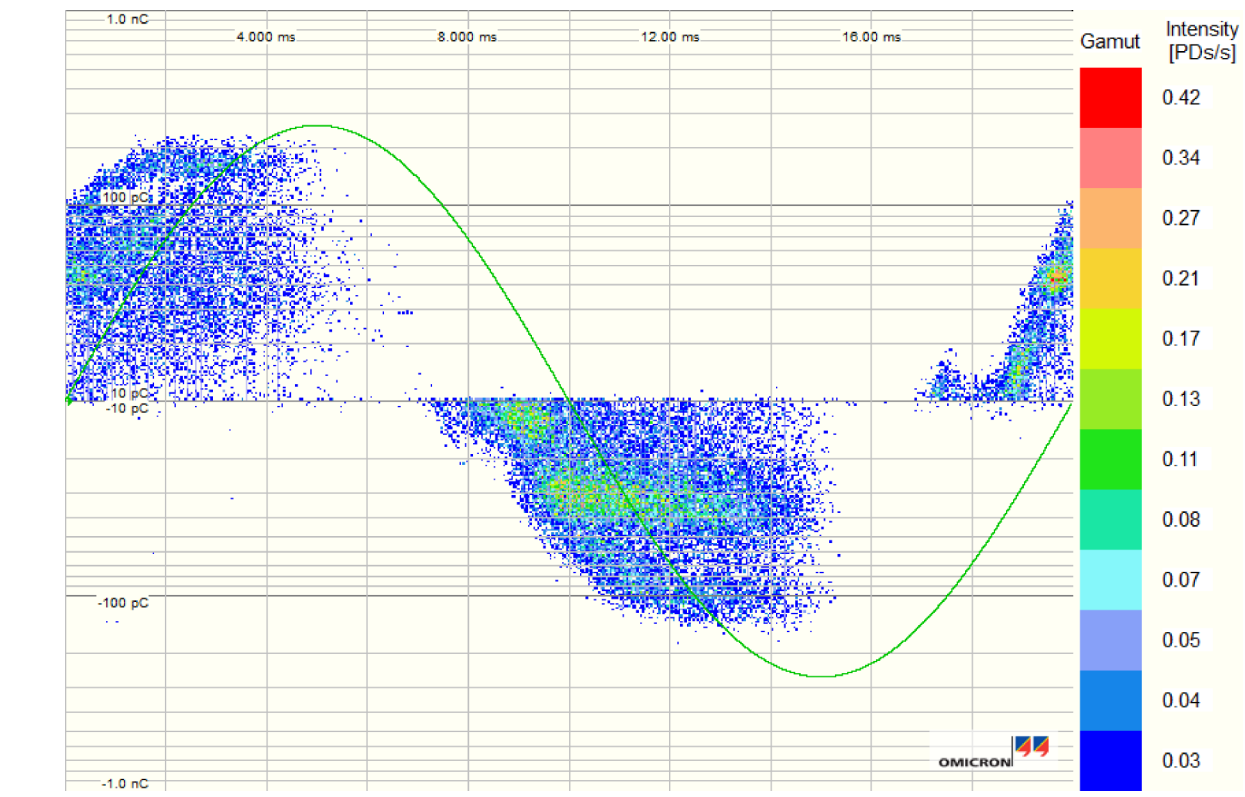


Figura B.7: PRPD probeta N°03, muestreo 4.

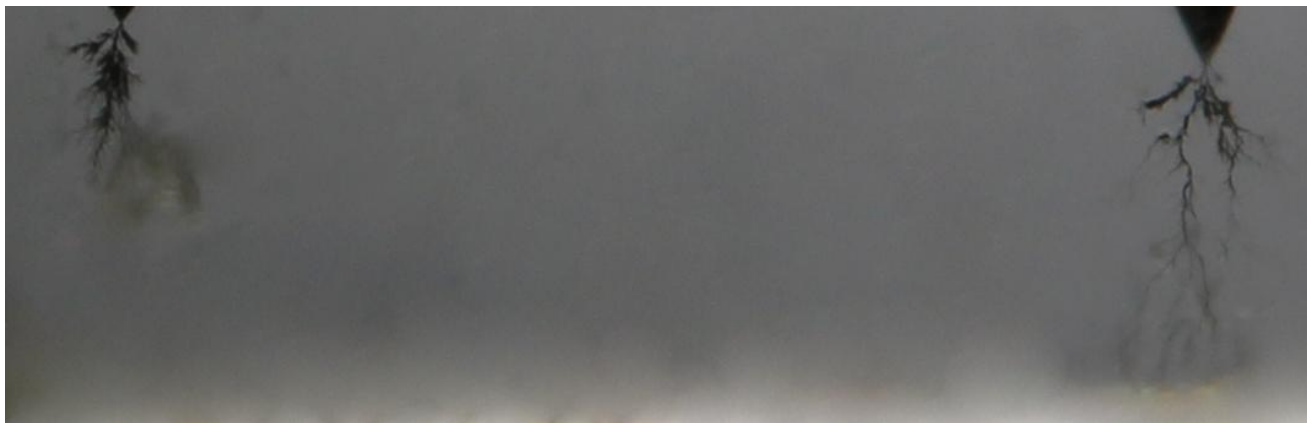


Figura B.8: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 4.

B.5 Probeta N°03, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 5.

Código USM	SG29
Número de muestreo	5
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.10: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 5.

Número de descargas	37348
Carga máxima [pC]	340.1848
Q_{95} [pC]	155.0439
Largo de árbol 1 [μm]	1427
Largo de árbol 2 [μm]	2248

Tabla B.11: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 5.

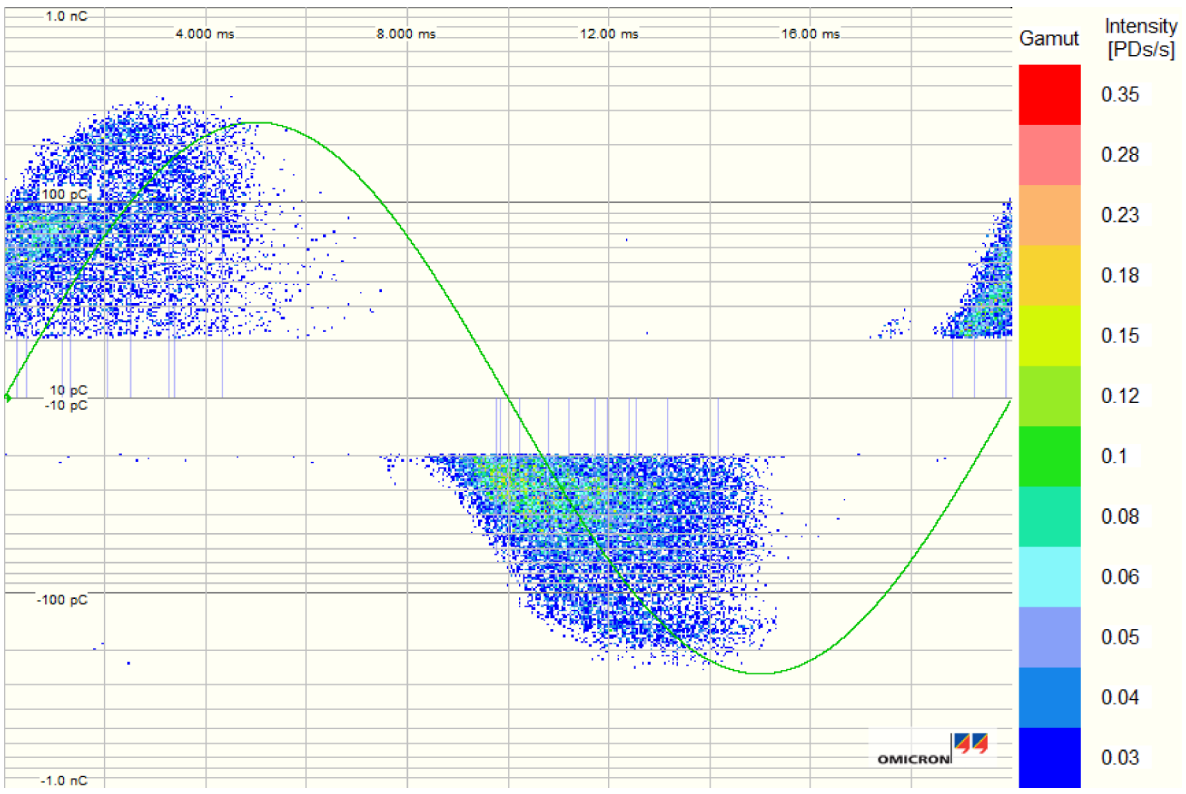


Figura B.9: PRPD probeta N°03, muestreo 5.



Figura B.10: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 5.

B.6 Probeta N°03, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°03, muestreo 6.

Código USM	SG29
Número de muestreo	6
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.12: Datos de entrada del análisis de probeta N°03, muestreo 6.

Número de descargas	43024
Carga máxima [pC]	464.5978
Q_{95} [pC]	190.0759
Largo de árbol 1 [μm]	1596
Largo de árbol 2 [μm]	2256

Tabla B.13: Datos de salida del análisis de probeta N°03, muestreo 6.

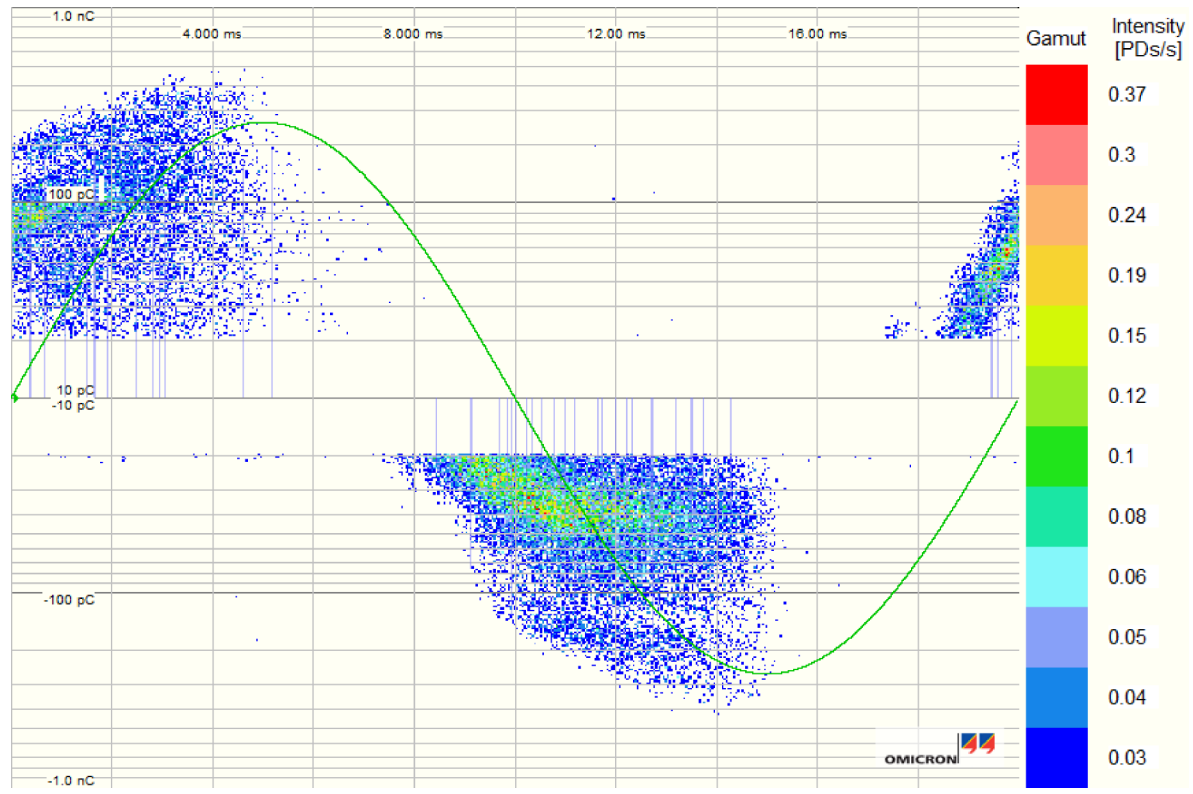


Figura B.11: PRPD probeta N°03, muestreo 6.

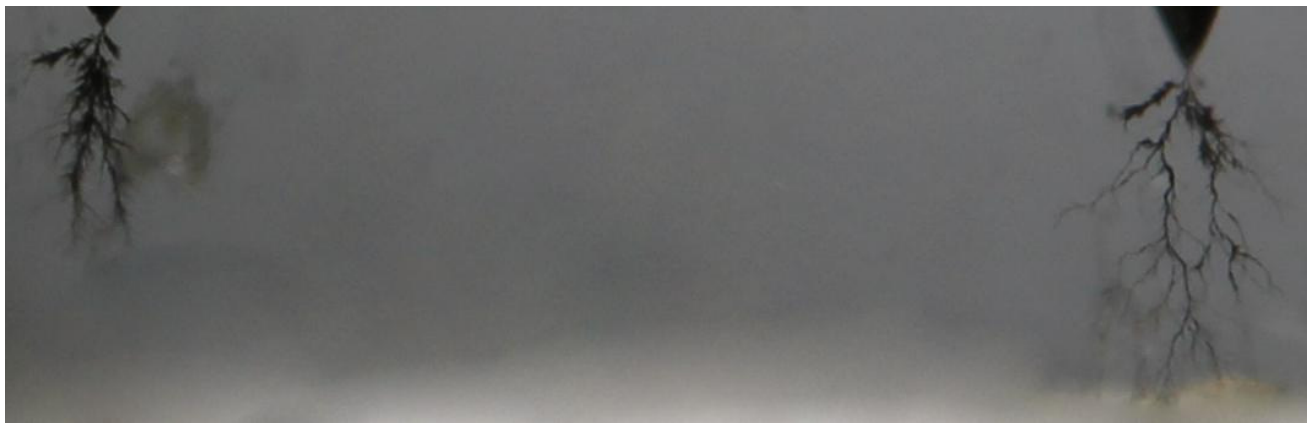


Figura B.12: Crecimiento de árboles de probeta N°03, muestreo 6.

B.7 Probeta N°05, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 1.

Código USM	SG14
Número de muestreo	1
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.14: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 1.

Número de descargas	15969
Carga máxima [pC]	41.992
Q_{95} [pC]	20.5767
Largo de árbol 1 [μm]	236
Largo de árbol 2 [μm]	495
Largo de árbol 3 [μm]	105

Tabla B.15: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 1.

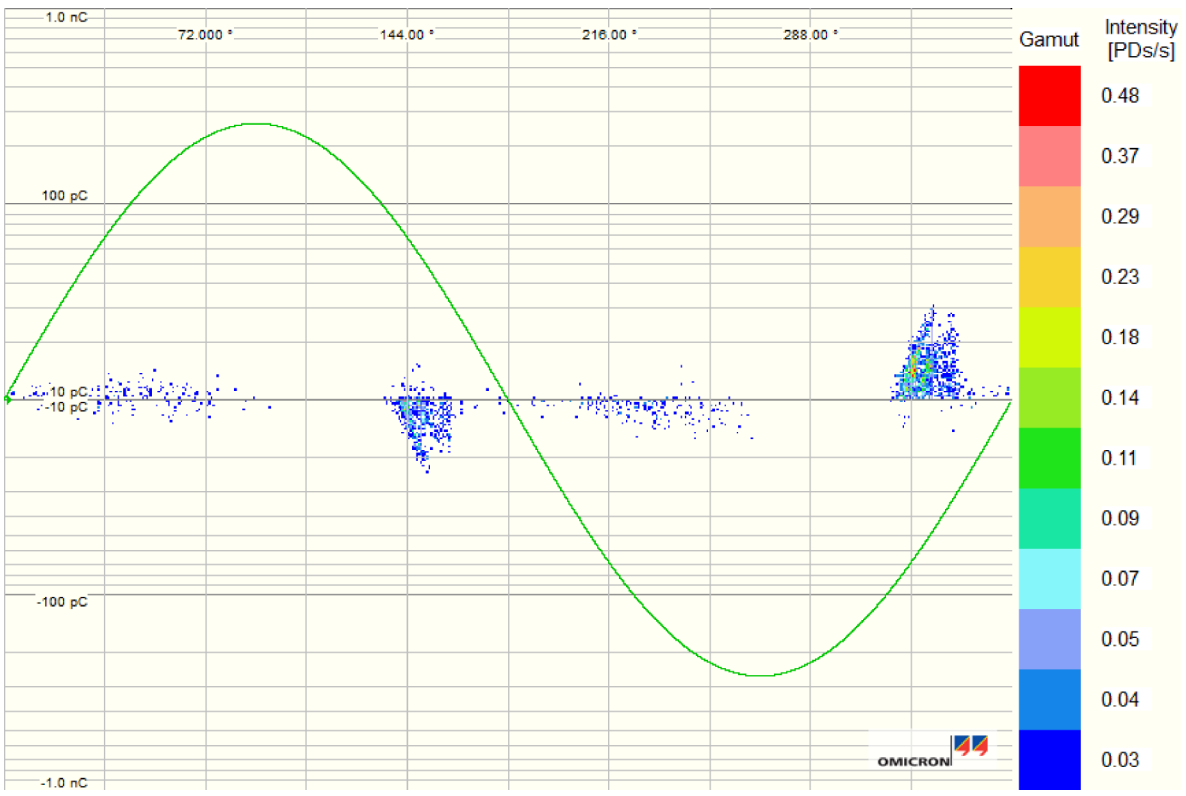


Figura B.13: PRPD probeta N°05, muestreo 1.



Figura B.14: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 1.

B.8 Probeta N°05, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 2.

Código USM	SG14
Número de muestreo	2
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.16: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 2.

Número de descargas	15161
Carga máxima [pC]	141.5925
Q_{95} [pC]	93.3037
Largo de árbol 1 [μm]	251
Largo de árbol 2 [μm]	564
Largo de árbol 3 [μm]	170

Tabla B.17: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 2.

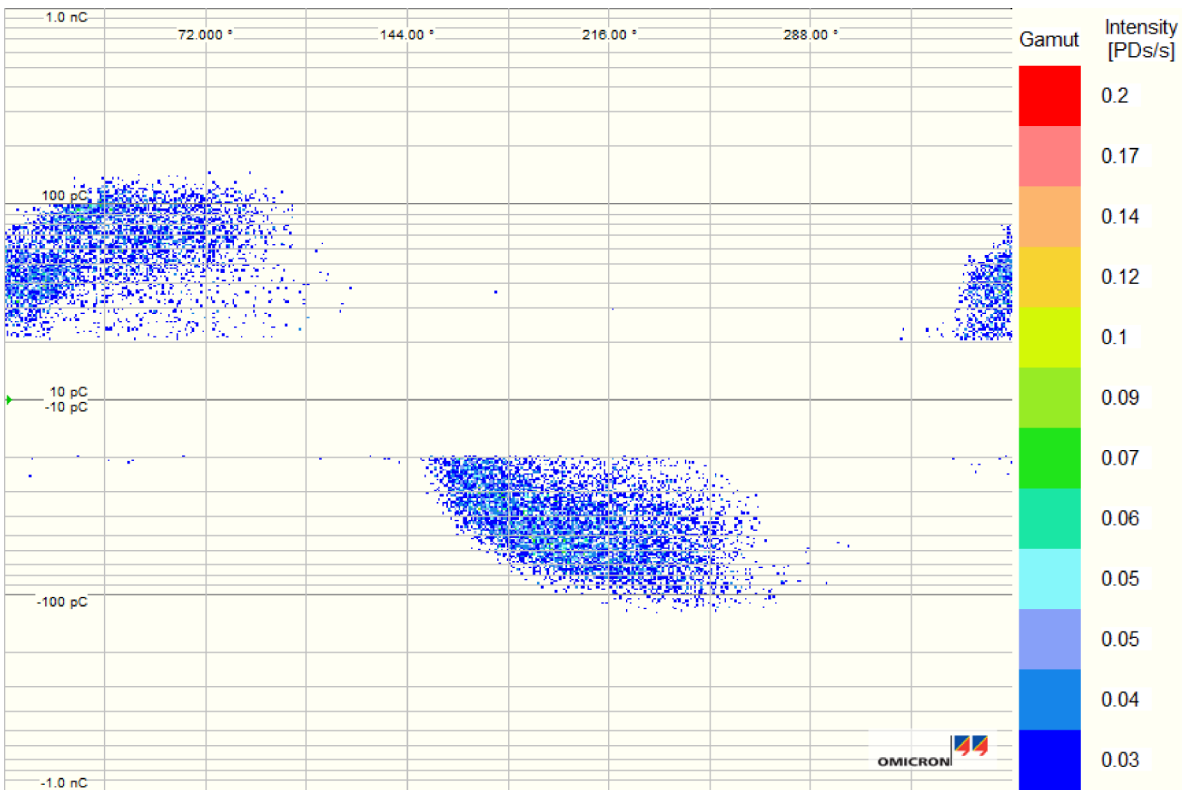


Figura B.15: PRPD probeta N°05, muestreo 2.



Figura B.16: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 2.

B.9 Probeta N°05, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 3.

Código USM	SG14
Número de muestreo	3
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.18: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 3.

Número de descargas	29177
Carga máxima [pC]	373.3596
Q_{95} [pC]	179.6038
Largo de árbol 1 [μm]	257
Largo de árbol 2 [μm]	1182
Largo de árbol 3 [μm]	190

Tabla B.19: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 3.

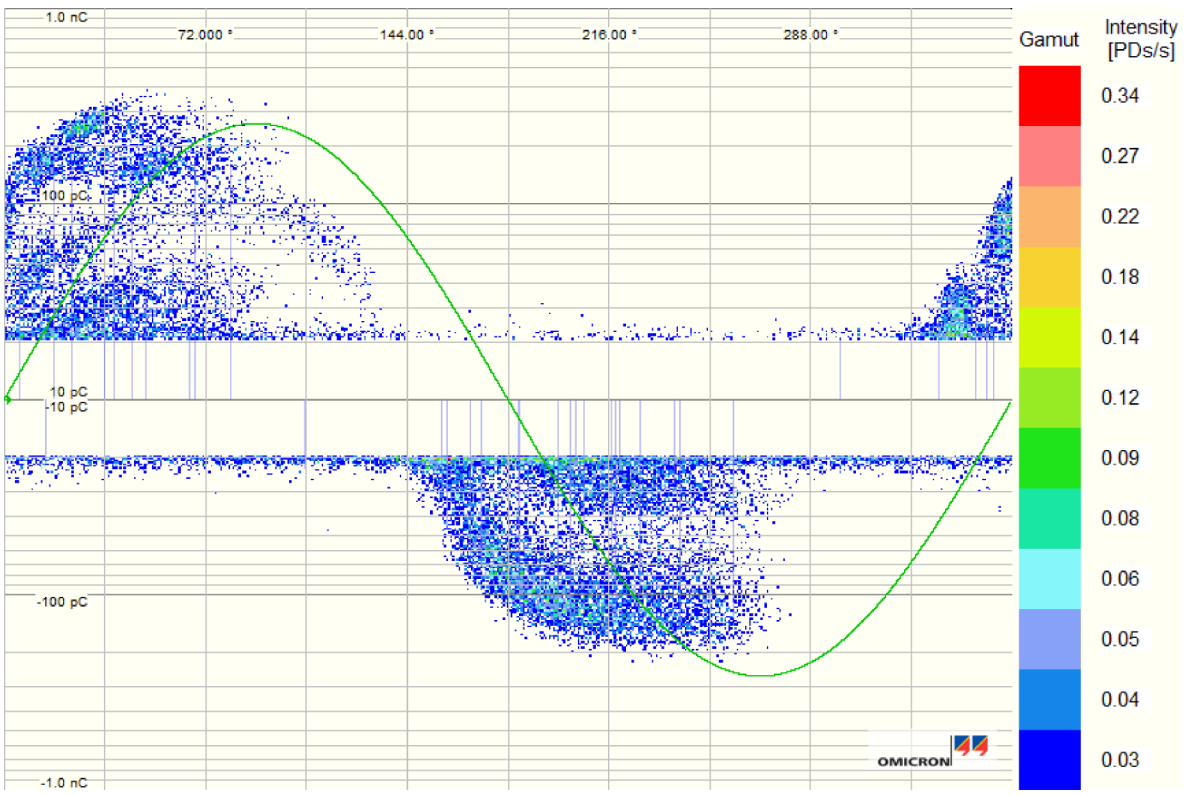


Figura B.17: PRPD probeta N°05, muestreo 3.



Figura B.18: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 3.

B.10 Probeta N°05, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 4.

Código USM	SG14
Número de muestreo	4
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.20: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 4.

Número de descargas	25039
Carga máxima [pC]	692.9077
Q_{95} [pC]	374.6876
Largo de árbol 1 [μm]	264
Largo de árbol 2 [μm]	1585
Largo de árbol 3 [μm]	595

Tabla B.21: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 4.

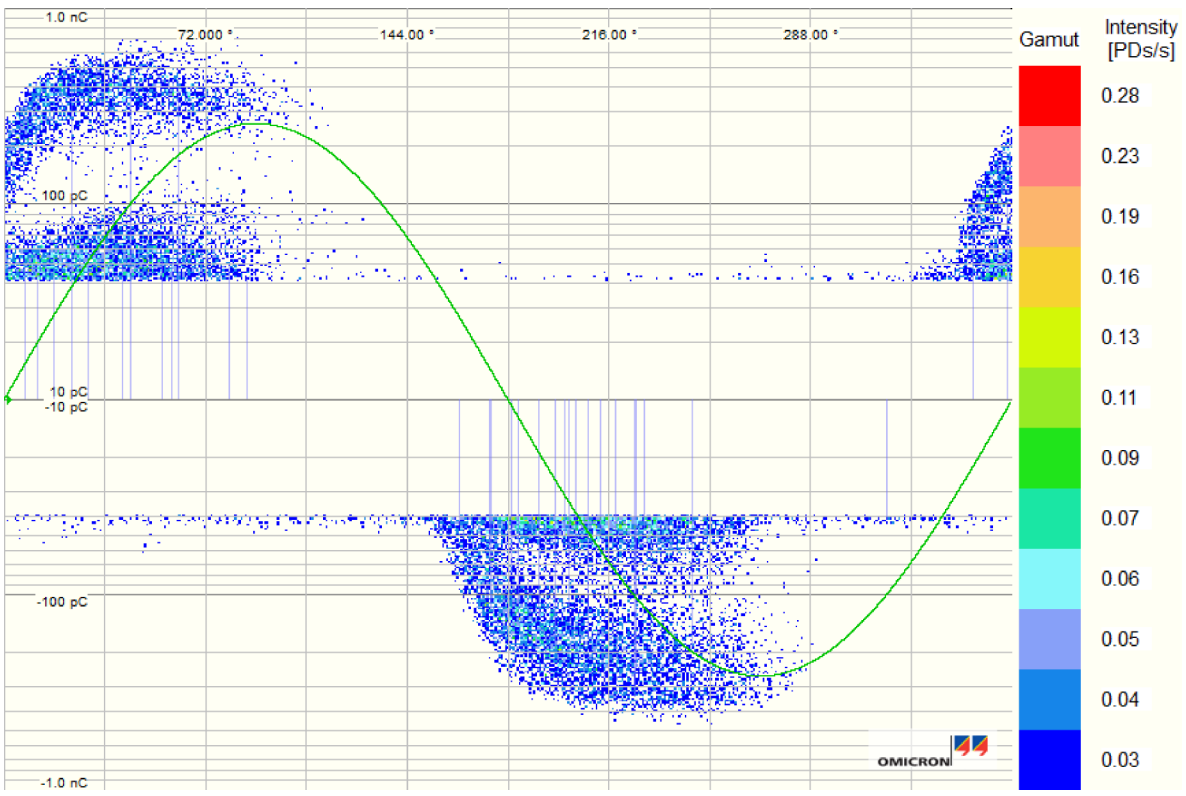


Figura B.19: PRPD probeta N°05, muestreo 4.



Figura B.20: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 4.

B.11 Probeta N°05, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 5.

Código USM	SG14
Número de muestreo	5
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.22: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 5.

Número de descargas	27472
Carga máxima [pC]	852.5107
Q_{95} [pC]	490.3554
Largo de árbol 1 [μm]	264
Largo de árbol 2 [μm]	2036
Largo de árbol 3 [μm]	1055

Tabla B.23: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 5.

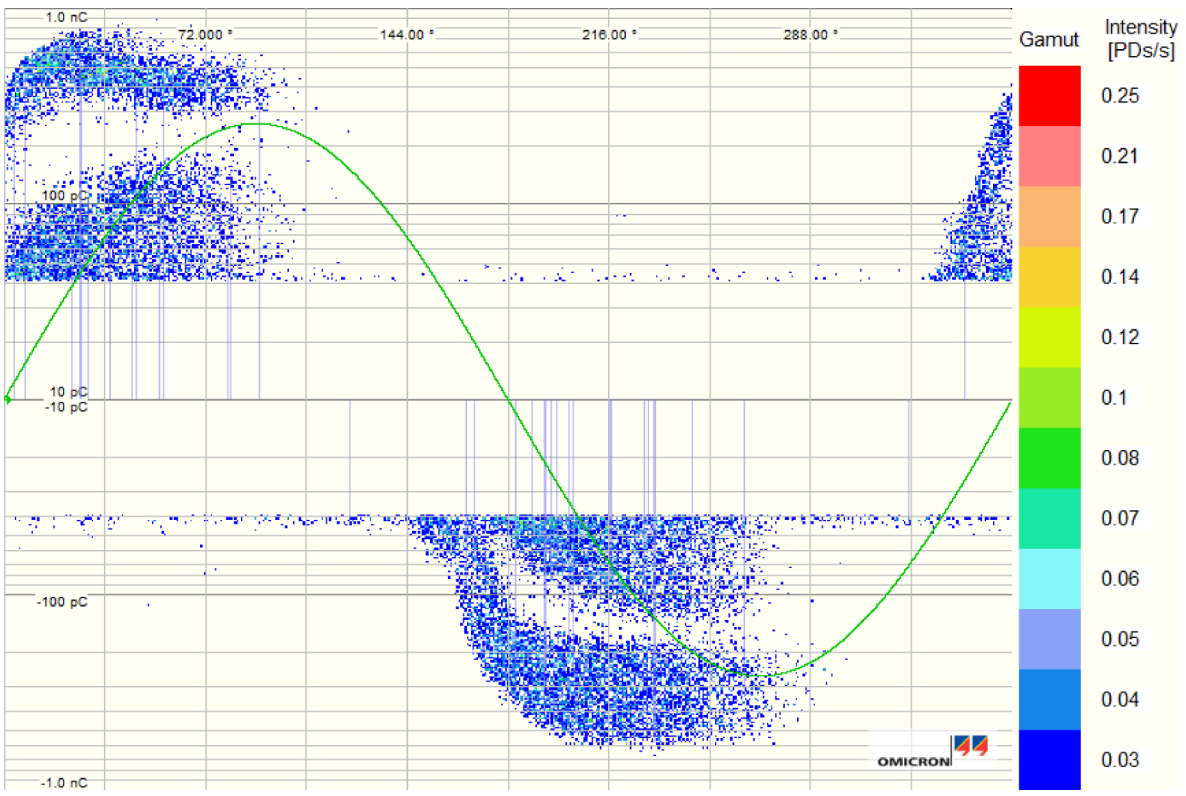


Figura B.21: PRPD probeta N°05, muestreo 5.



Figura B.22: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 5.

B.12 Probeta N°05, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°05, muestreo 6.

Código USM	SG14
Número de muestreo	6
Experimento	Tres agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.24: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 6.

Número de descargas	42204
Carga máxima [pC]	1123
Q_{95} [pC]	482.5021
Largo de árbol 1 [μm]	264
Largo de árbol 2 [μm]	2123
Largo de árbol 3 [μm]	1244

Tabla B.25: Datos de salida del análisis de probeta N°05, muestreo 6.

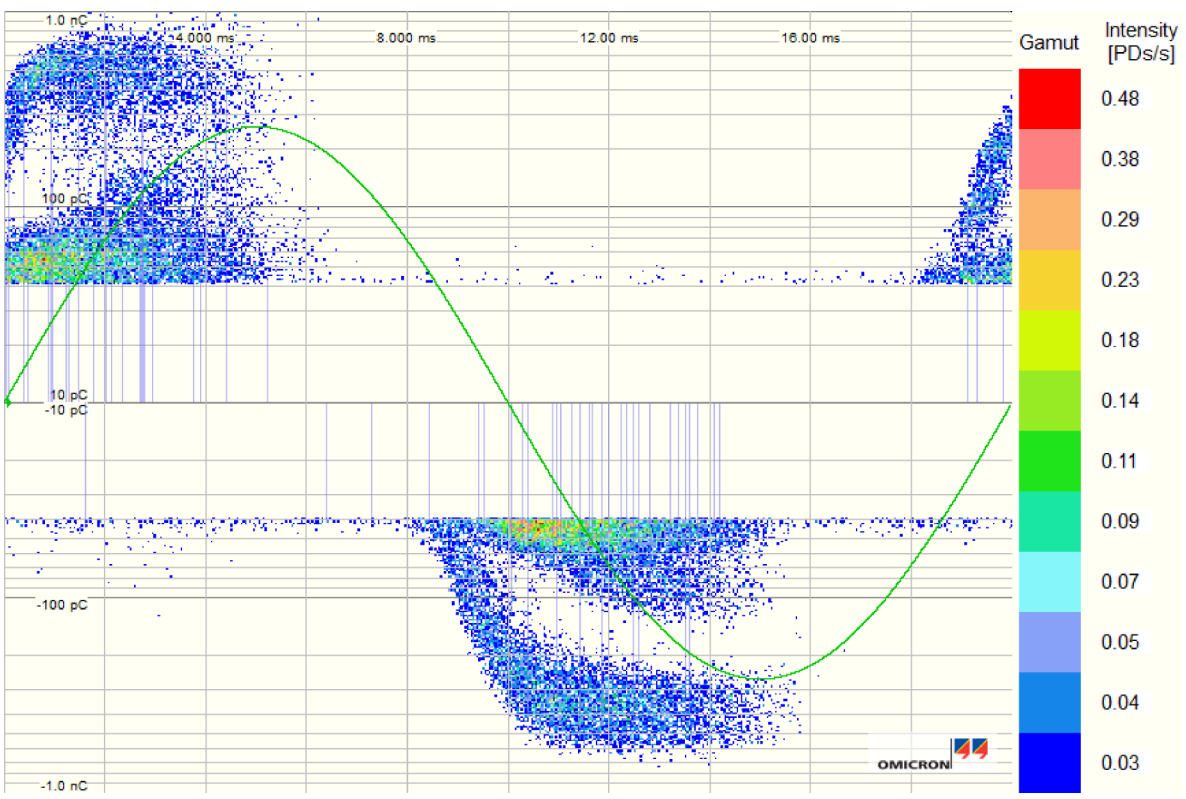


Figura B.23: PRPD probeta N°05, muestreo 6.



Figura B.24: Crecimiento de árboles de probeta N°05, muestreo 6.

B.13 Probeta N°08, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 1.

Código USM	SG31
Número de muestreo	1
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.26: Datos de entrada del análisis de probeta N°05, muestreo 1.

Número de descargas	9762
Carga máxima [pC]	54.0472
Q_{95} [pC]	31.8952
Largo de árbol 1 [μm]	106
Largo de árbol 2 [μm]	217

Tabla B.27: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 1.

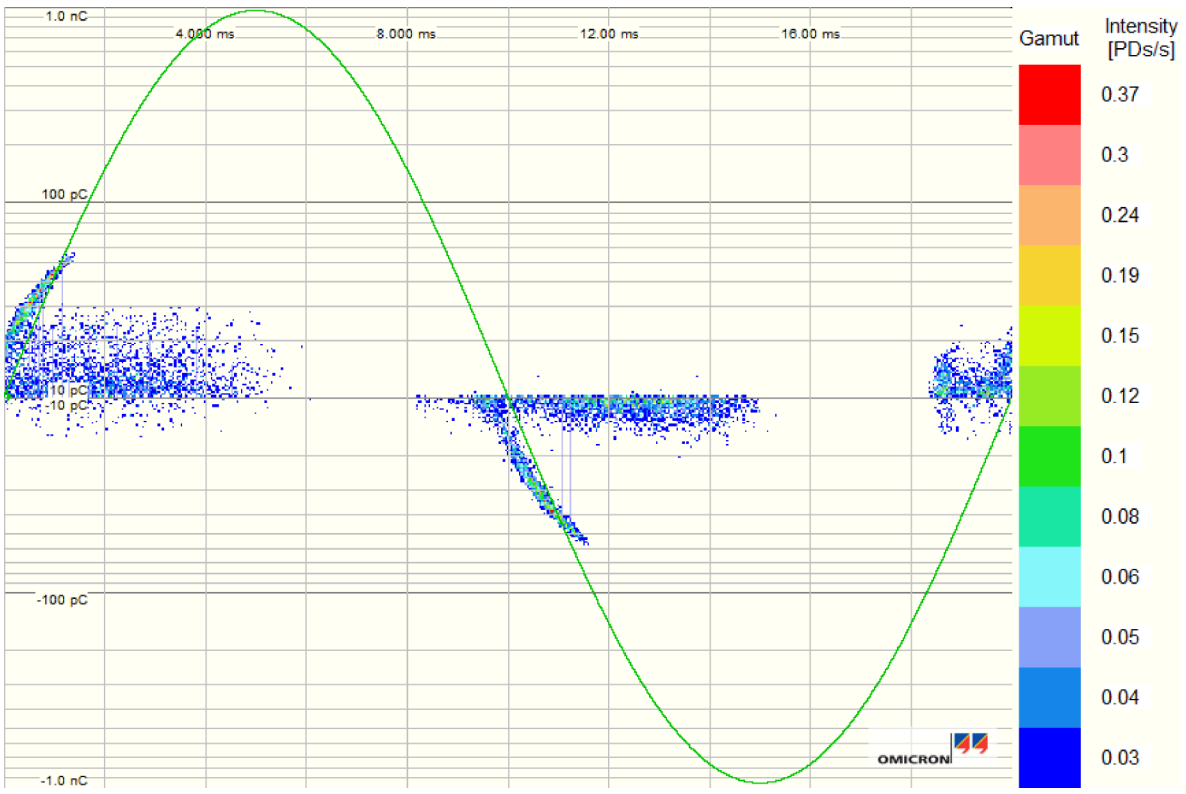


Figura B.25: PRPD probeta N°08, muestreo 1.

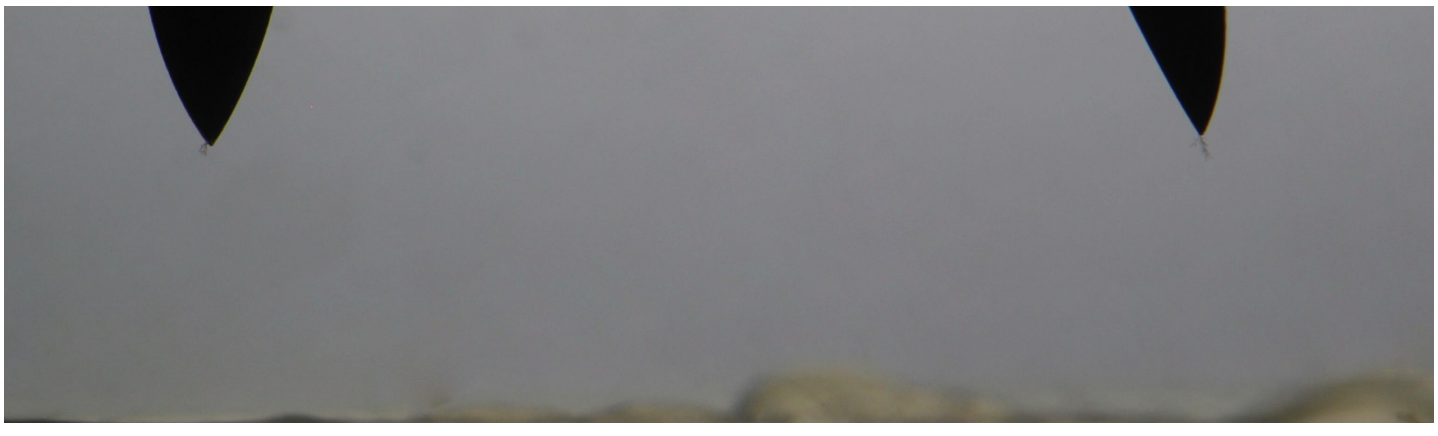


Figura B.26: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 1.

B.14 Probeta N°08, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 2.

Código USM	SG31
Número de muestreo	2
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.28: Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 2.

Número de descargas	84035
Carga máxima [pC]	158.9041
Q_{95} [pC]	68.4534
Largo de árbol 1 [μm]	484
Largo de árbol 2 [μm]	730

Tabla B.29: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 2.

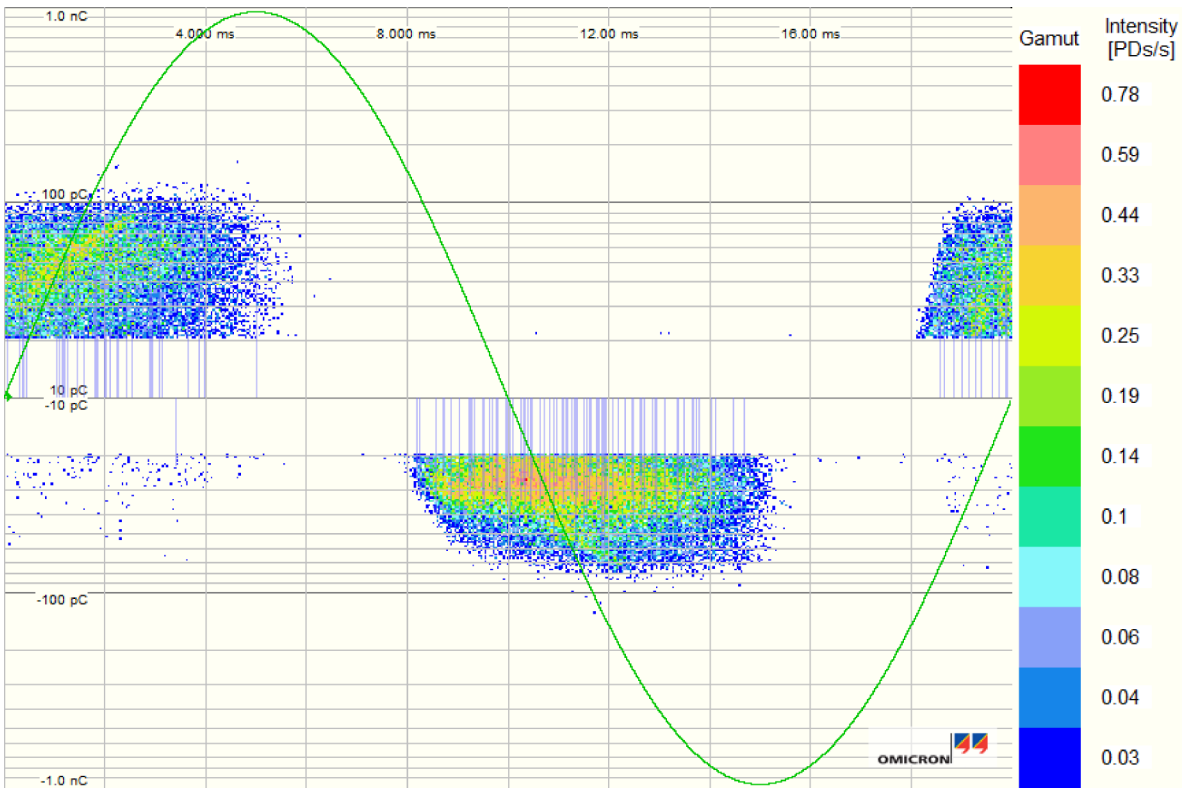


Figura B.27: PRPD probeta N°08, muestreo 2.

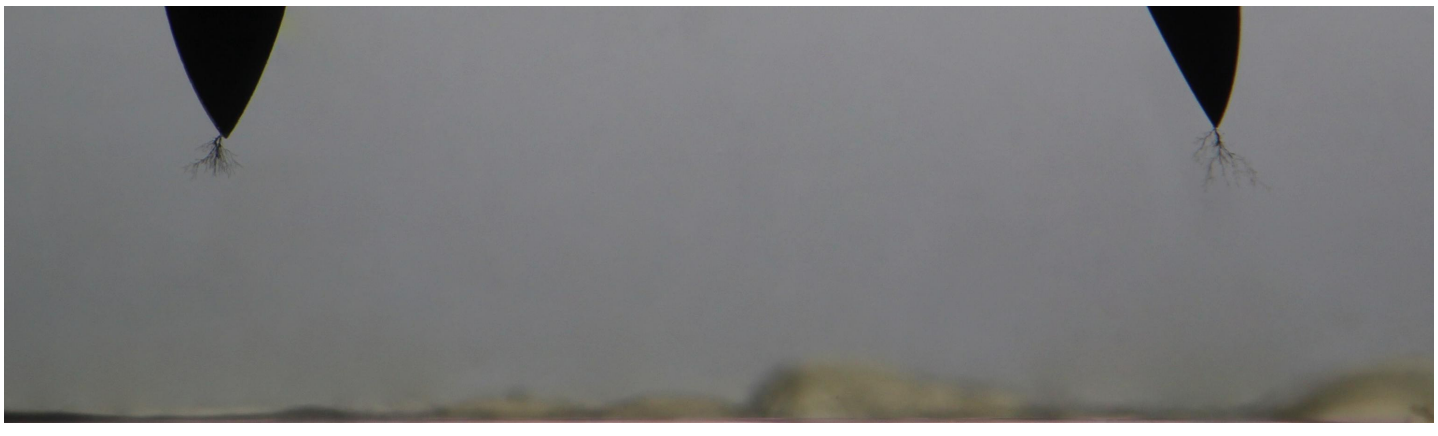


Figura B.28: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 2.

B.15 Probeta N°08, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 3.

Código USM	SG31
Número de muestreo	3
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.30: Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 3.

Número de descargas	39757
Carga máxima [pC]	220.5323
Q_{95} [pC]	76.5438
Largo de árbol 1 [μm]	711
Largo de árbol 2 [μm]	1186

Tabla B.31: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 3.

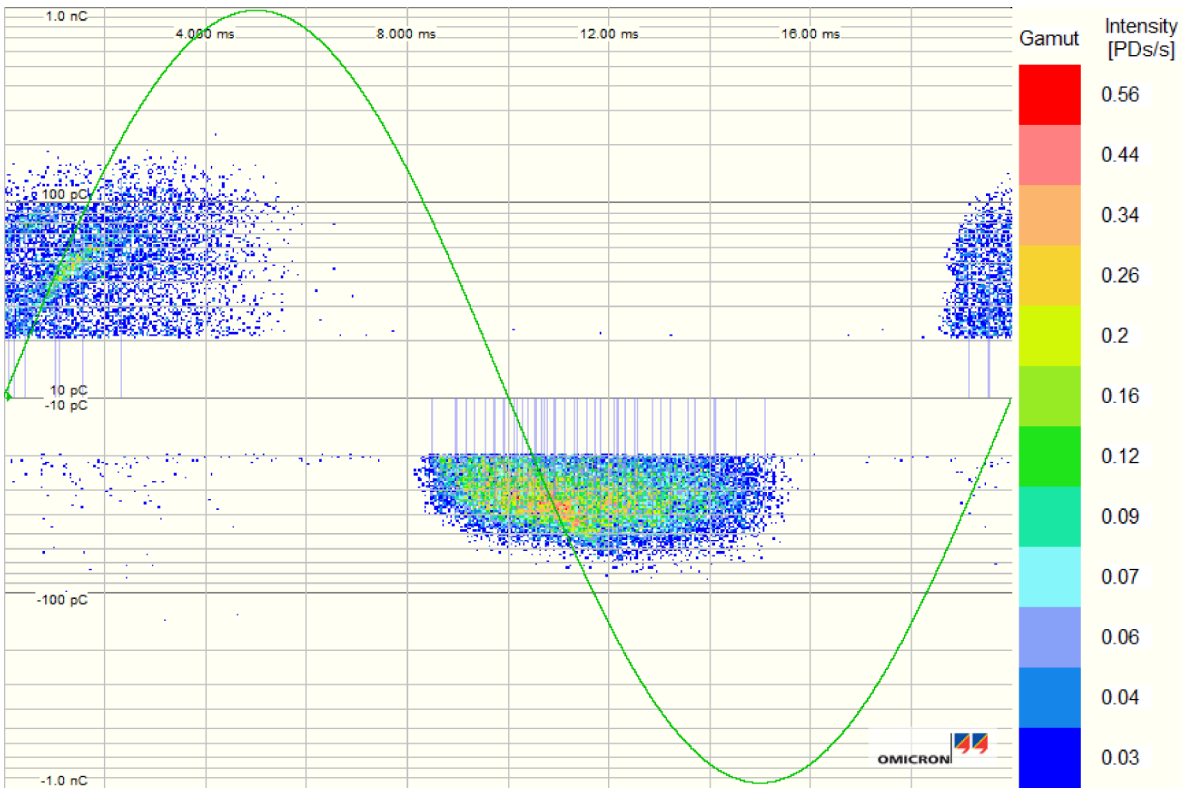


Figura B.29: PRPD probeta N°08, muestreo 3.

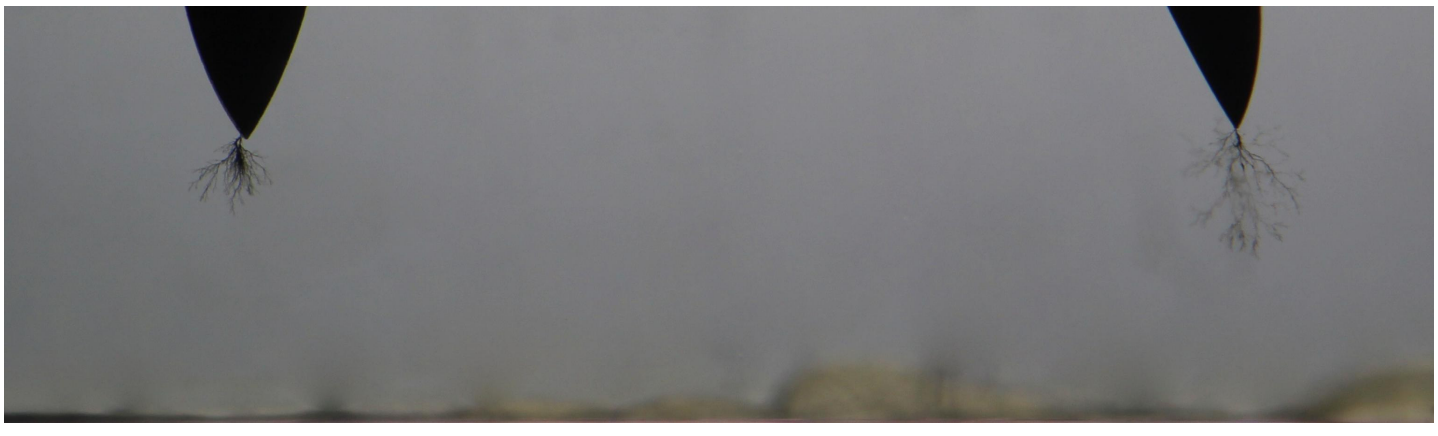


Figura B.30: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 3.

B.16 Probeta N°08, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 4.

Código USM	SG31
Número de muestreo	4
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.32: Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 4.

Número de descargas	53109
Carga máxima [pC]	343.9498
Q_{95} [pC]	126.815
Largo de árbol 1 [μm]	1249
Largo de árbol 2 [μm]	1725

Tabla B.33: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 4.

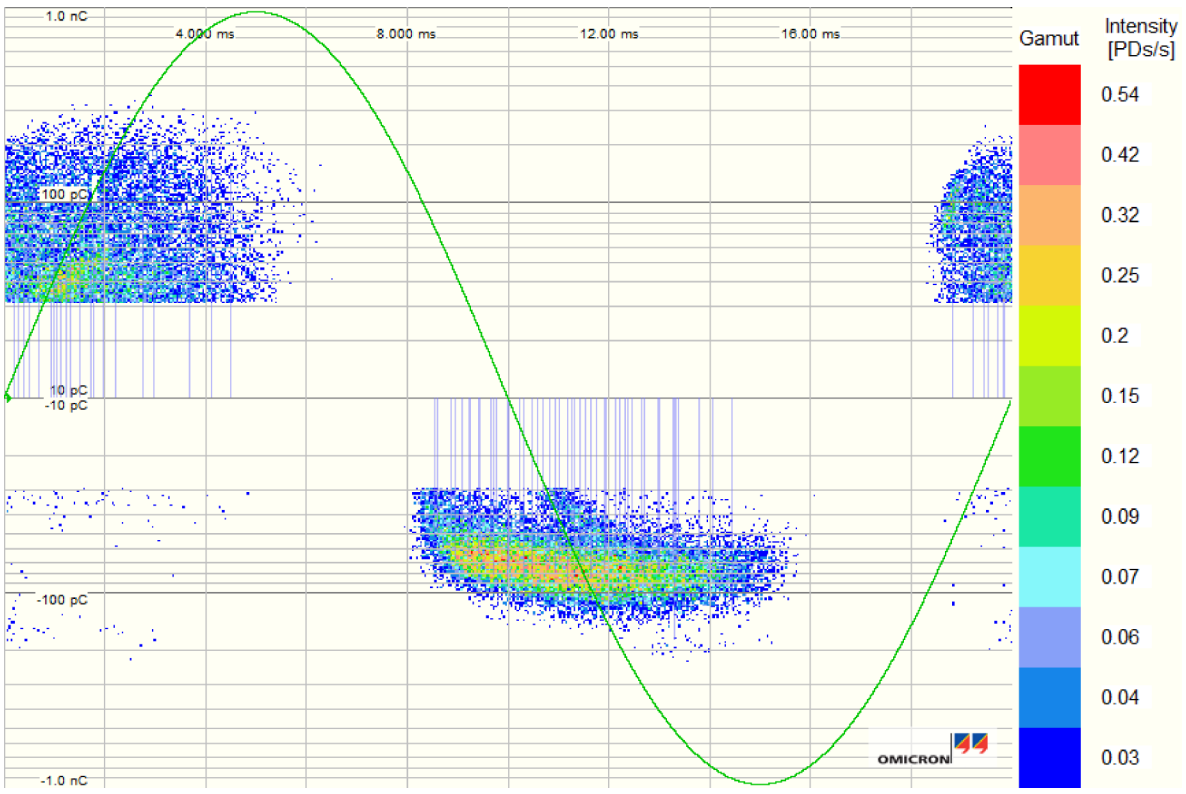


Figura B.31: PRPD probeta N°08, muestreo 4.

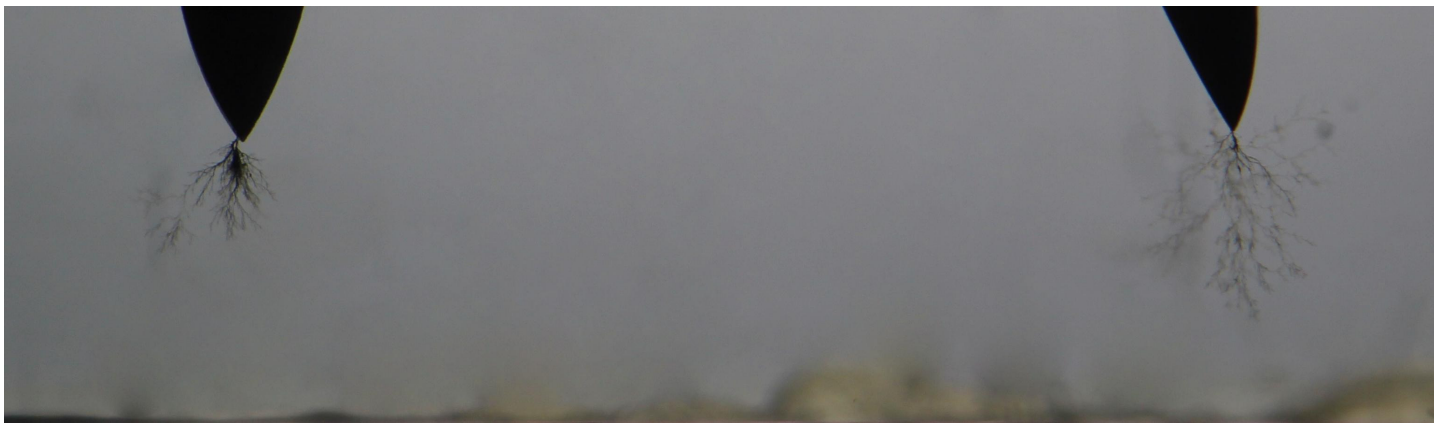


Figura B.32: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 4.

B.17 Probeta N°08, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 5.

Código USM	SG31
Número de muestreo	5
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.34: Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 5.

Número de descargas	64951
Carga máxima [pC]	579.0762
Q_{95} [pC]	193.8717
Largo de árbol 1 [μm]	1926
Largo de árbol 2 [μm]	2094

Tabla B.35: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 5.

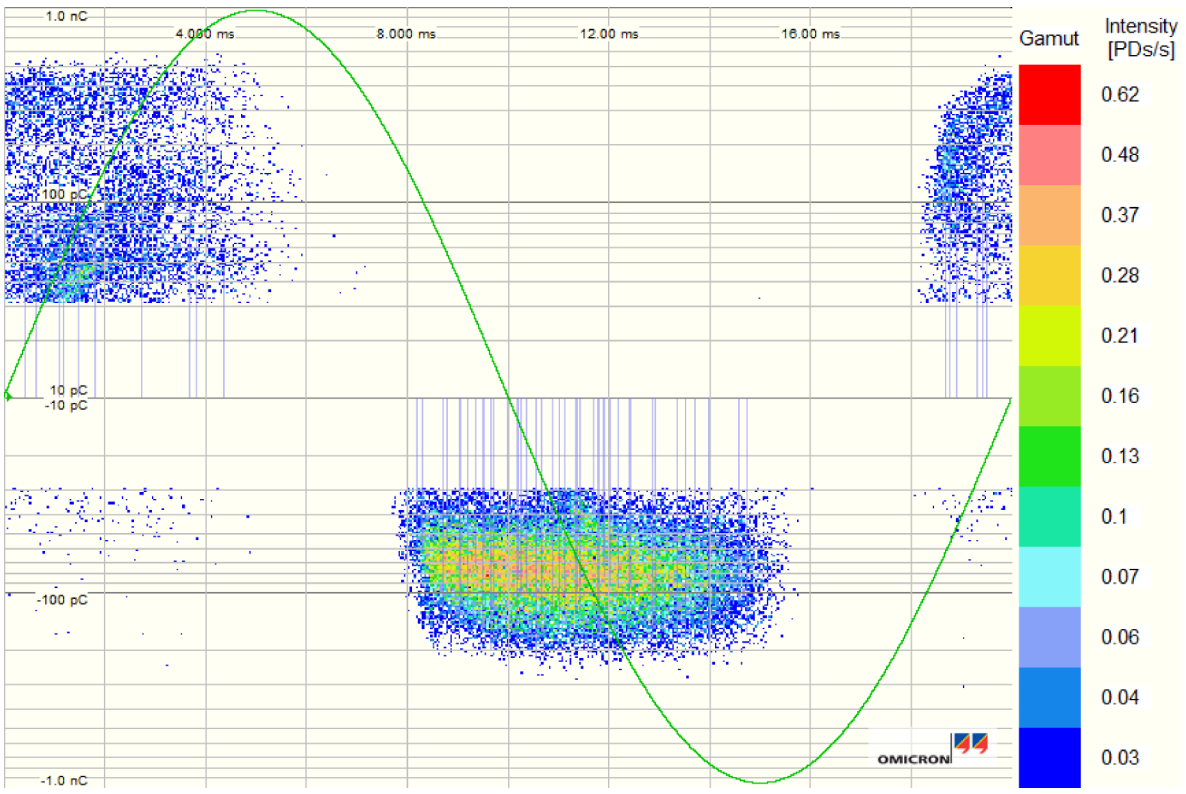


Figura B.33: PRPD probeta N°08, muestreo 5.

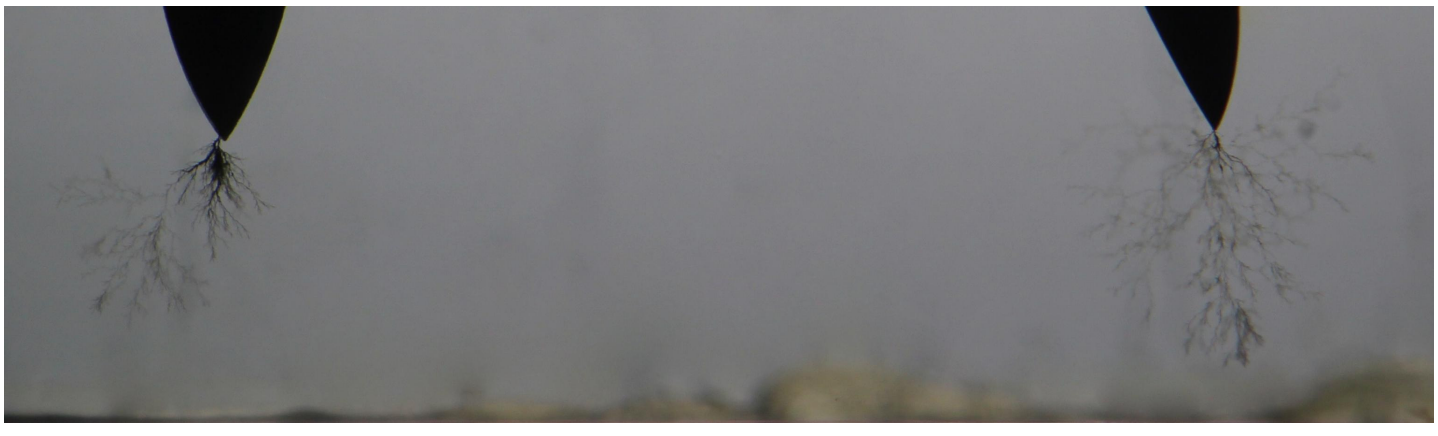


Figura B.34: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 5.

B.18 Probeta N°08, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°08, muestreo 6.

Código USM	SG31
Número de muestreo	6
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.36: Datos de entrada del análisis de probeta N°08, muestreo 6.

Número de descargas	4952
Carga máxima [pC]	1946.7
Q_{95} [pC]	160.729
Largo de árbol 1 [μm]	2324
Largo de árbol 2 [μm]	2609

Tabla B.37: Datos de salida del análisis de probeta N°08, muestreo 6.

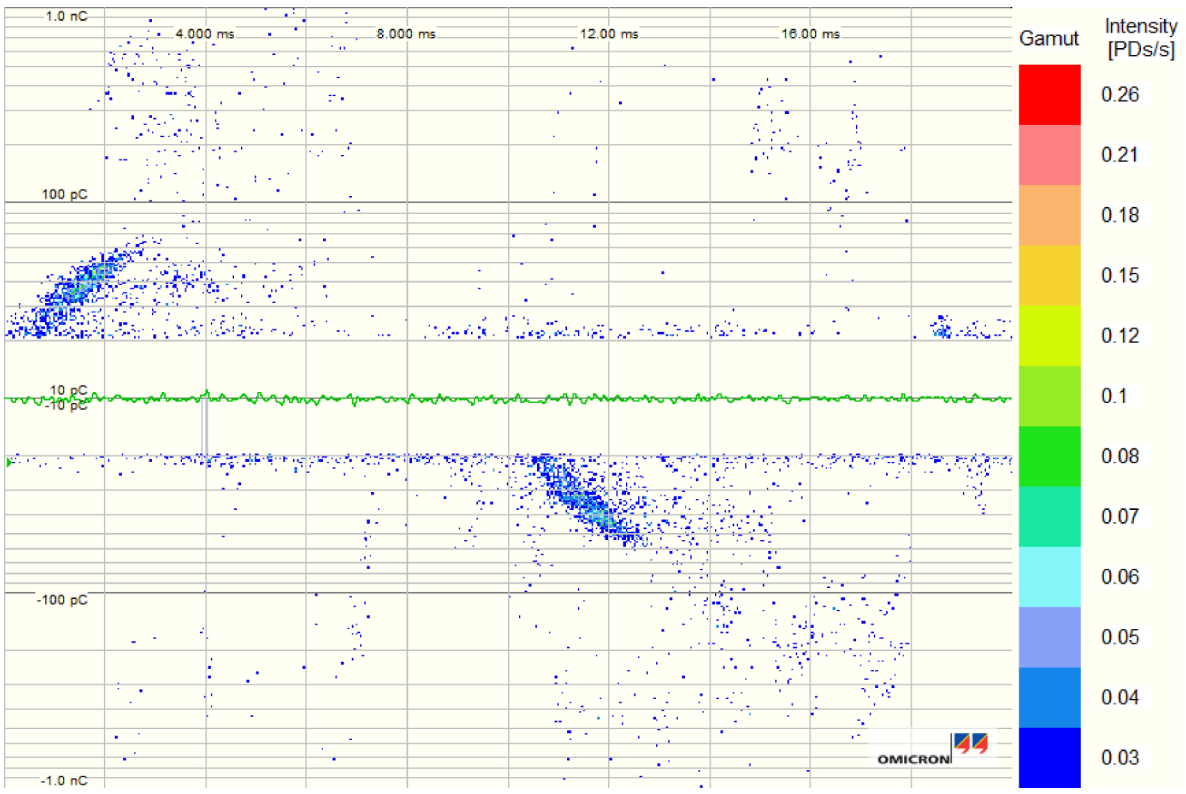


Figura B.35: PRPD probeta N°08, muestreo 6.

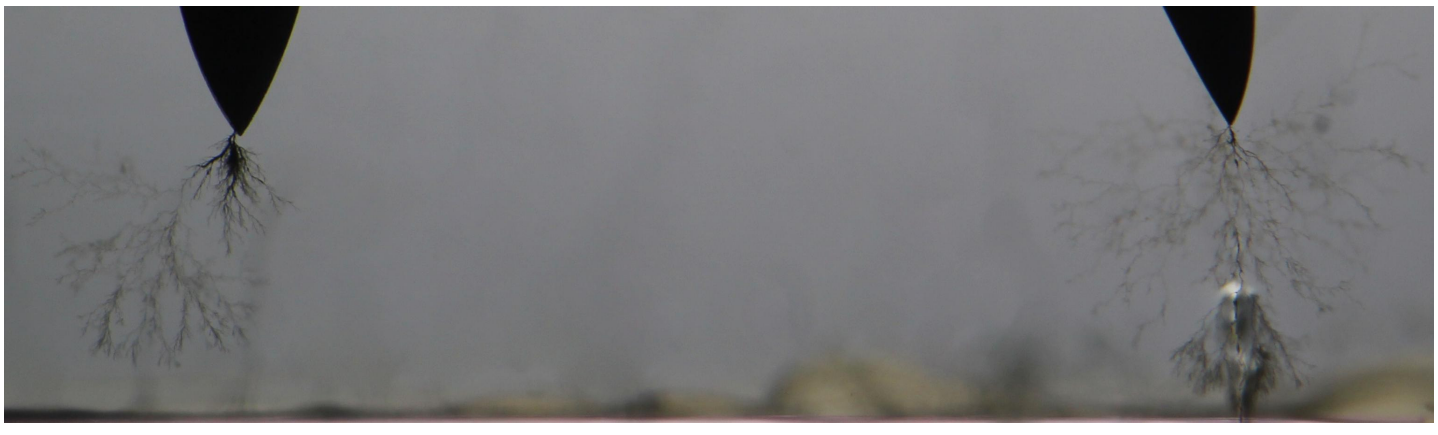


Figura B.36: Crecimiento de árboles de probeta N°08, muestreo 6.

B.19 Probeta N°12, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 1.

Código USM	SG33
Número de muestreo	1
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.38: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 1.

Número de descargas	161923
Carga máxima [pC]	150.1862
Q_{95} [pC]	65.1814
Largo de árbol 1 [μm]	154
Largo de árbol 2 [μm]	591

Tabla B.39: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 1.

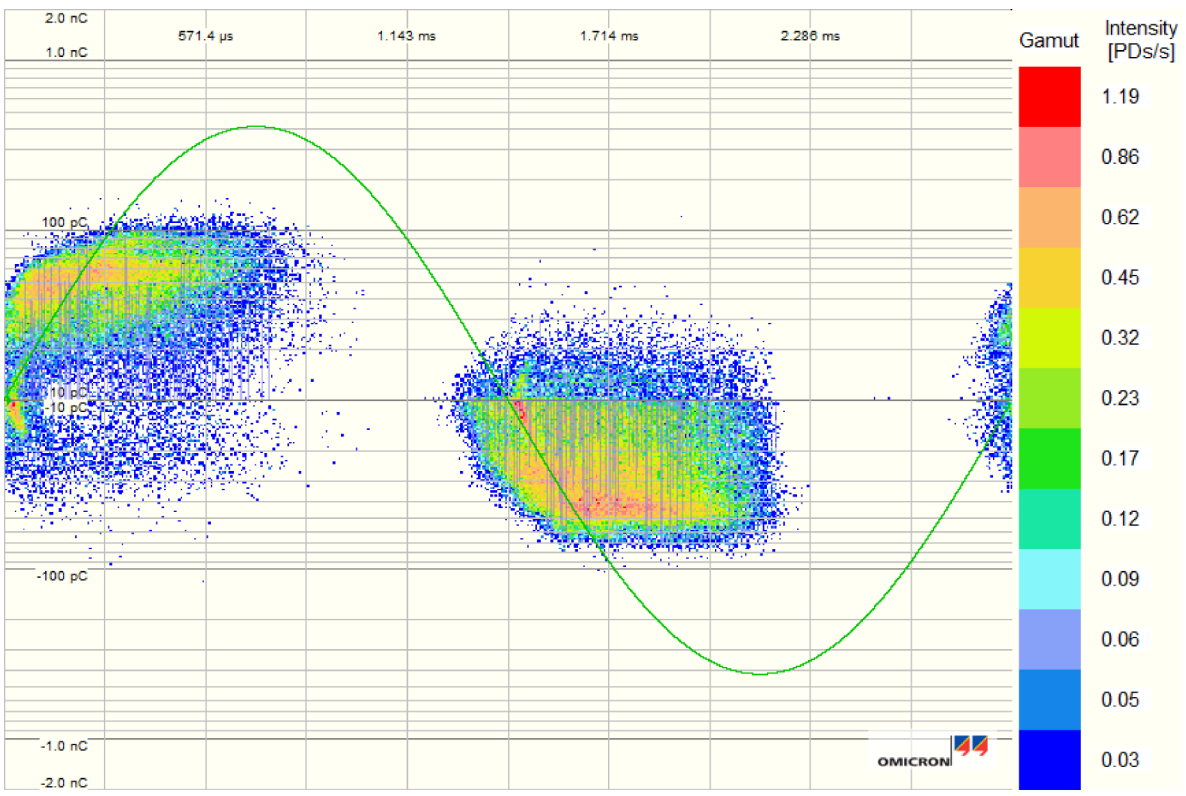


Figura B.37: PRPD probeta N°12, muestreo 1.

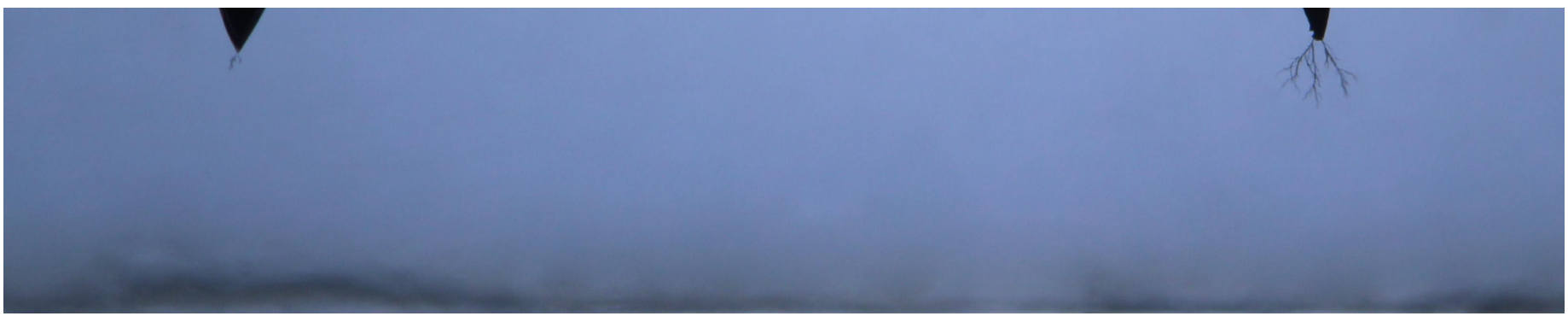


Figura B.38: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 1.

B.20 Probeta N°12, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 2.

Código USM	SG33
Número de muestreo	2
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.40: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 2.

Número de descargas	275867
Carga máxima [pC]	240.5706
Q_{95} [pC]	81.9365
Largo de árbol 1 [μm]	381
Largo de árbol 2 [μm]	620

Tabla B.41: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 2.

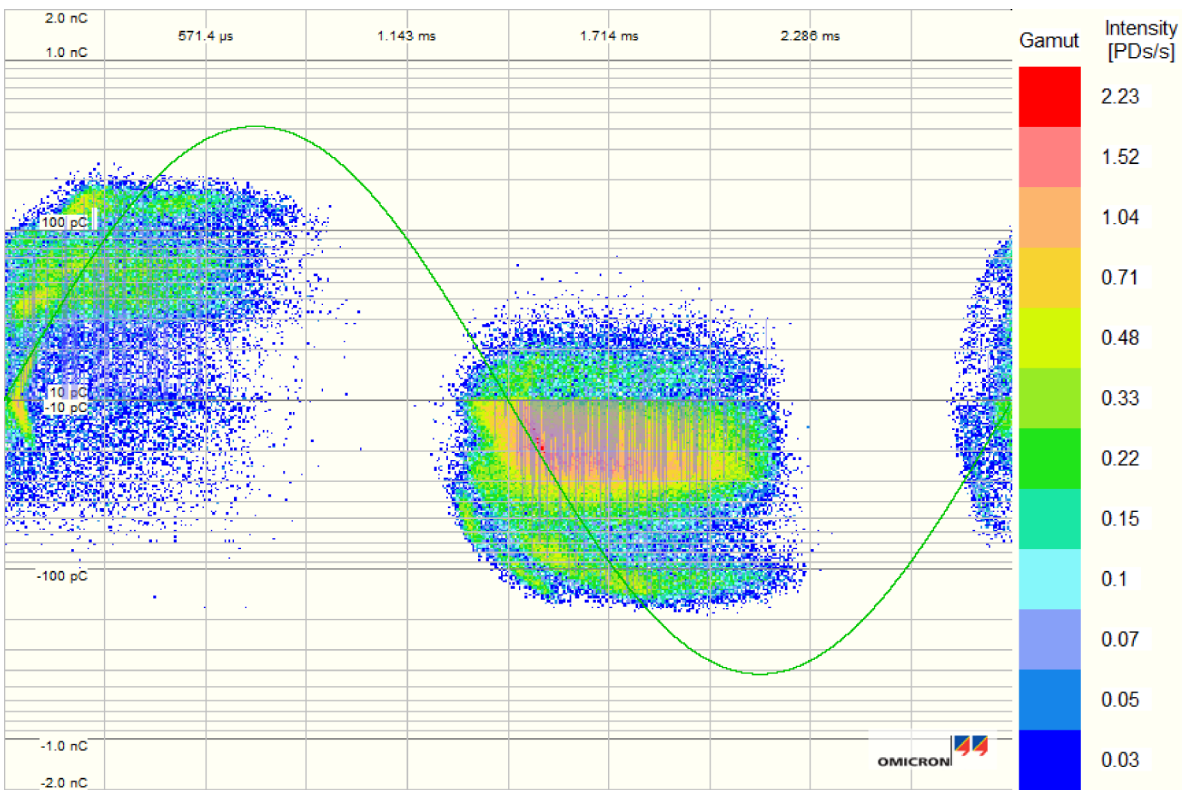


Figura B.39: PRPD probeta N°12, muestreo 2.



Figura B.40: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 2.

B.21 Probeta N°12, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 3.

Código USM	SG33
Número de muestreo	3
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.42: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 3.

Número de descargas	177124
Carga máxima [pC]	417.6532
Q_{95} [pC]	141.8257
Largo de árbol 1 [μm]	826
Largo de árbol 2 [μm]	1282

Tabla B.43: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 3.

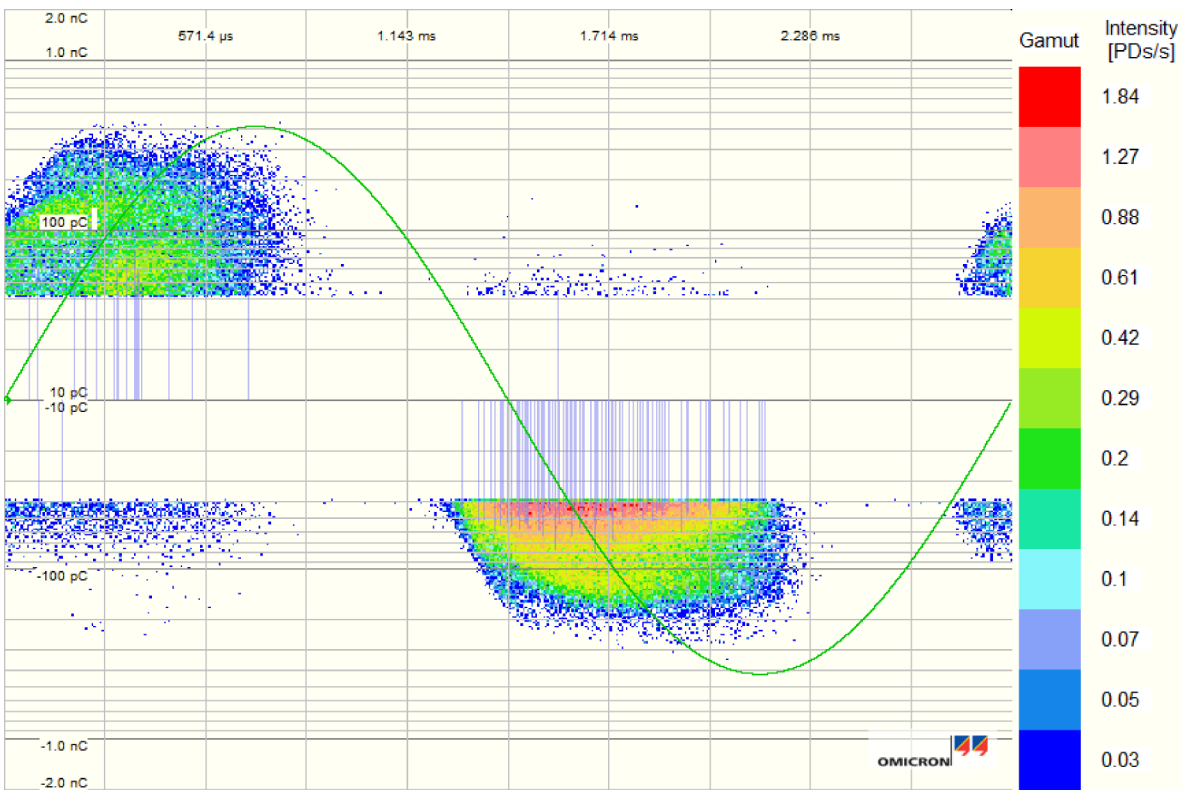


Figura B.41: PRPD probeta N°12, muestreo 3.

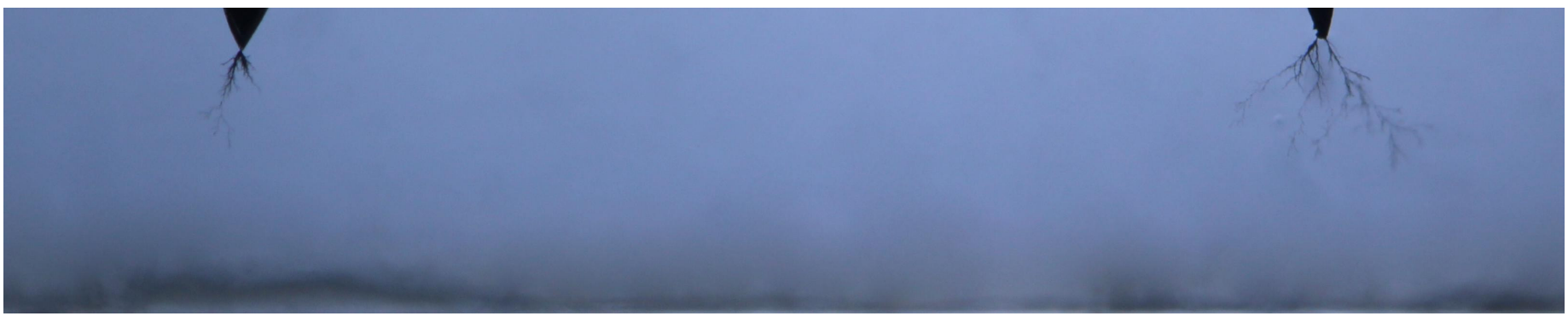


Figura B.42: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 3.

B.22 Probeta N°12, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 4.

Código USM	SG33
Número de muestreo	4
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.44: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 4.

Número de descargas	14162
Carga máxima [pC]	612.6863
Q_{95} [pC]	140.0968
Largo de árbol 1 [μm]	1493
Largo de árbol 2 [μm]	2073

Tabla B.45: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 4.

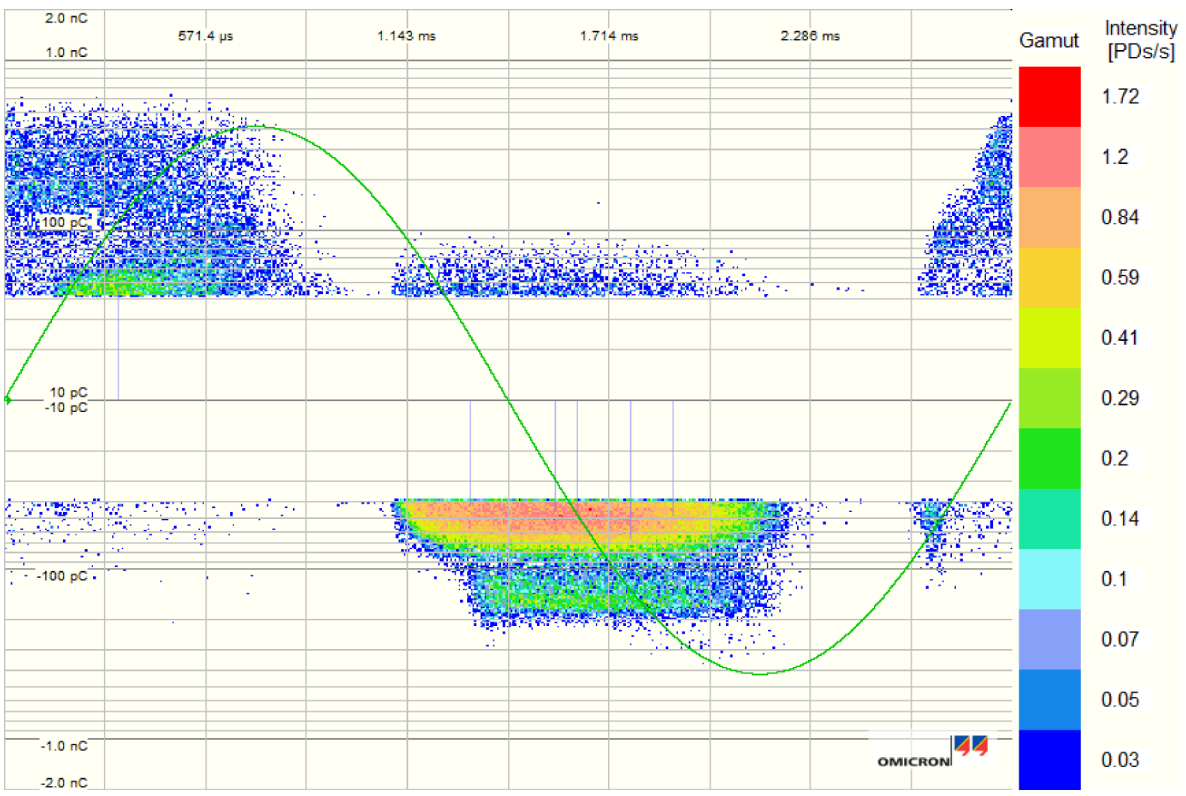


Figura B.43: PRPD probeta N°12, muestreo 4.

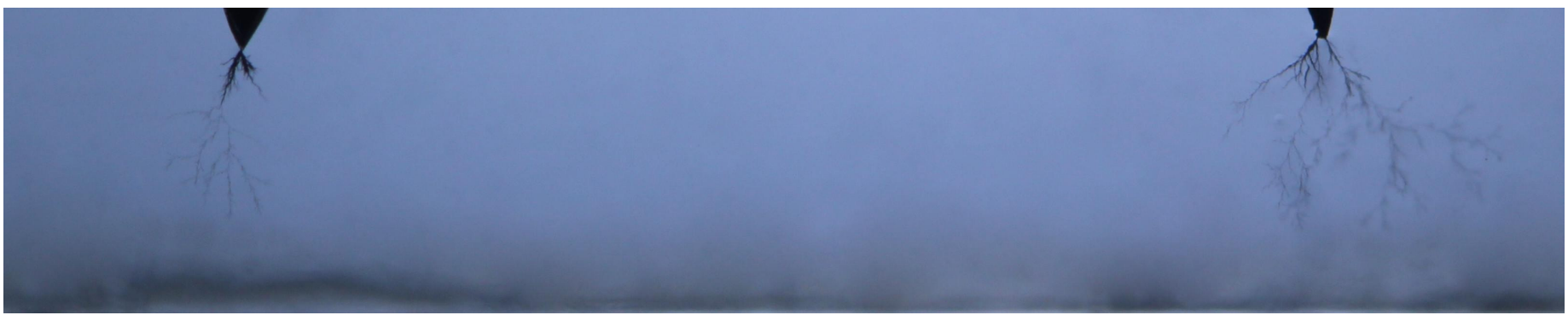


Figura B.44: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 4.

B.23 Probeta N°12, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 5.

Código USM	SG33
Número de muestreo	5
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.46: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 5.

Número de descargas	115219
Carga máxima [pC]	1651.7
Q_{95} [pC]	859.2007
Largo de árbol 1 [μm]	2193
Largo de árbol 2 [μm]	2652

Tabla B.47: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 5.

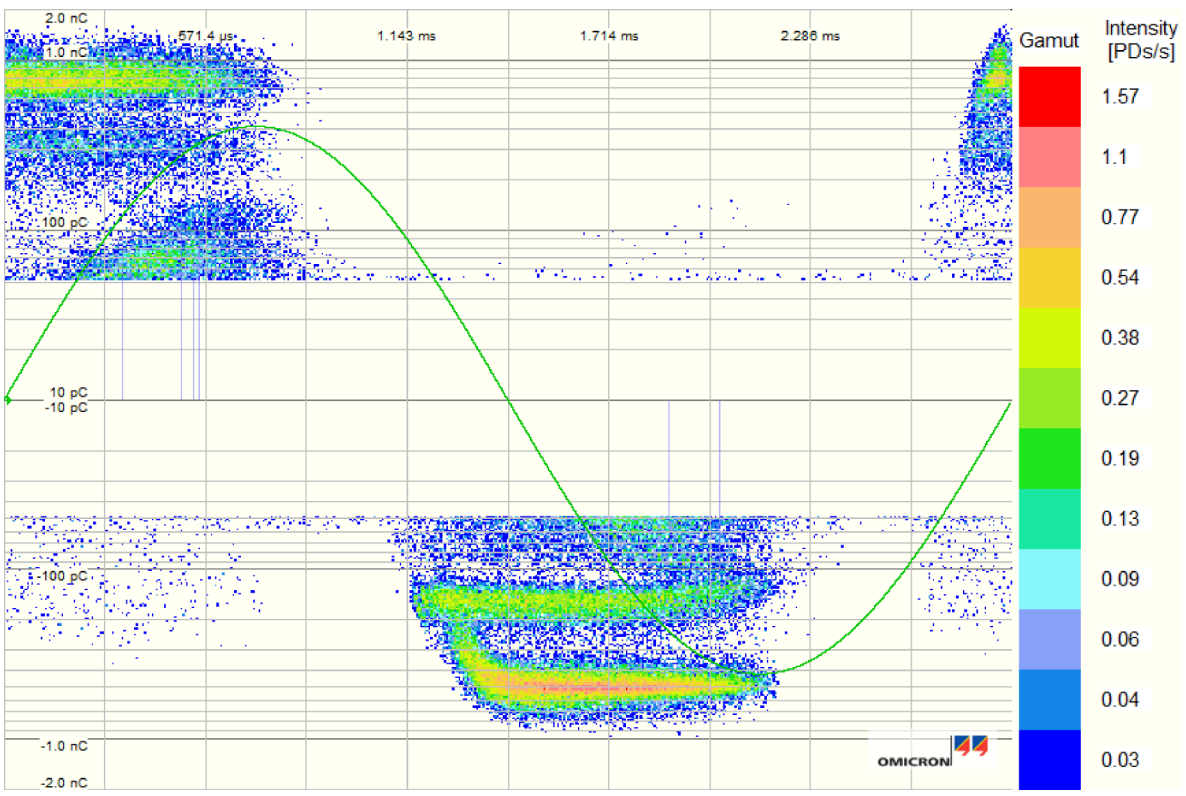


Figura B.45: PRPD probeta N°12, muestreo 5.



Figura B.46: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 5.

B.24 Probeta N°12, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°12, muestreo 6.

Código USM	SG33
Número de muestreo	6
Experimento	Dos agujas
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.48: Datos de entrada del análisis de probeta N°12, muestreo 6.

Número de descargas	43208
Carga máxima [pC]	1194.4
Q_{95} [pC]	181.0736
Largo de árbol 1 [μm]	2424
Largo de árbol 2 [μm]	2988

Tabla B.49: Datos de salida del análisis de probeta N°12, muestreo 6.

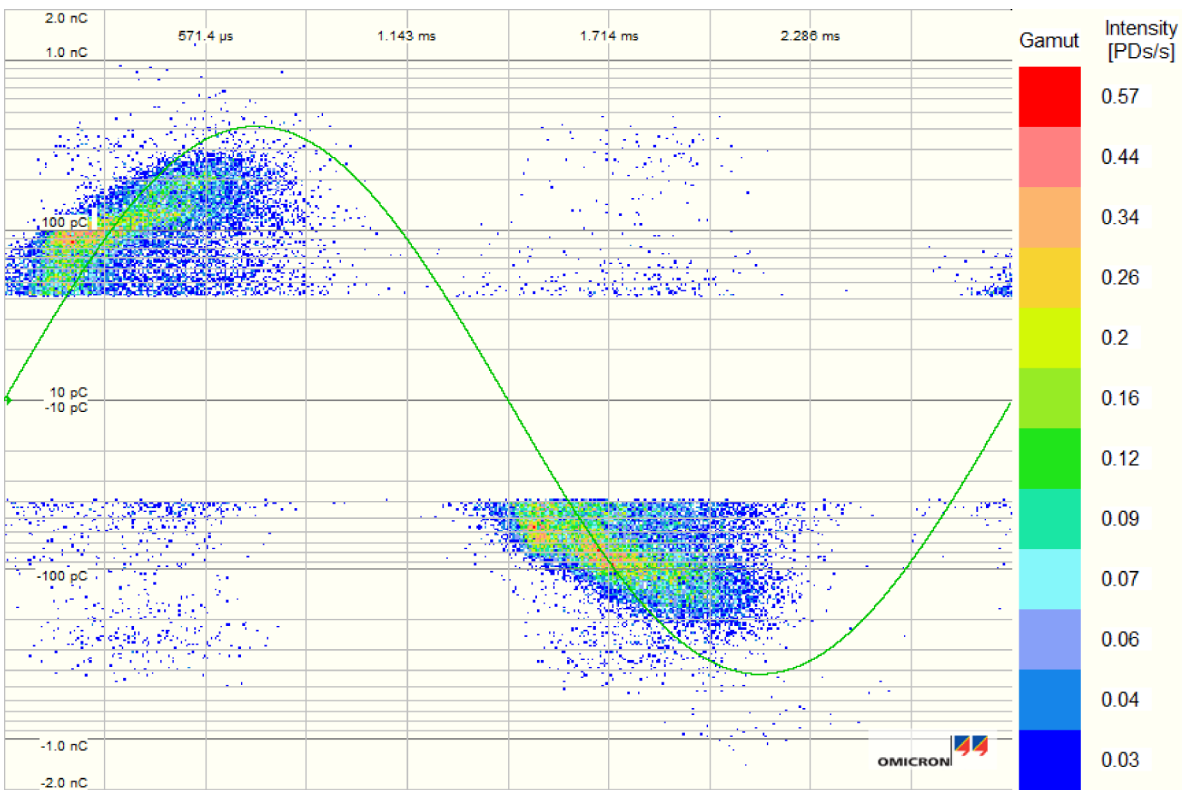


Figura B.47: PRPD probeta N°12, muestreo 6.



Figura B.48: Crecimiento de árboles de probeta N°12, muestreo 6.

B.25 Probeta N°15, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 1.

Código USM	SG96
Número de muestreo	1
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.50: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 1.

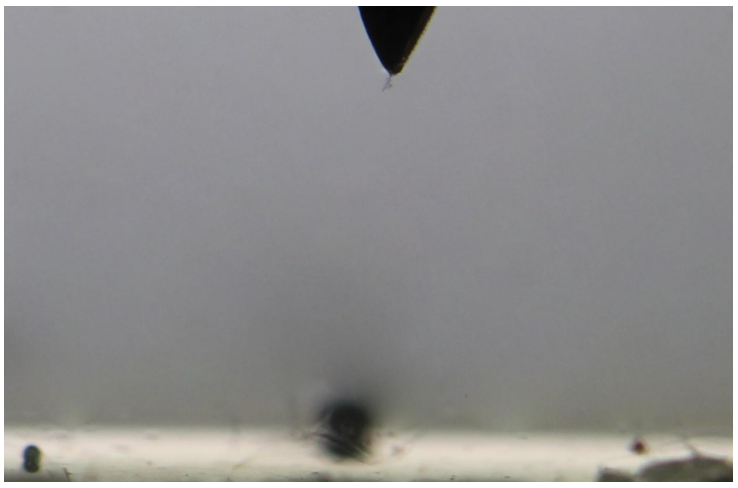


Figura B.49: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 1.

Número de descargas	0
Carga máxima [pC]	0
Q_{95} [pC]	0
Largo de árbol [μm]	117

Tabla B.51: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 1.

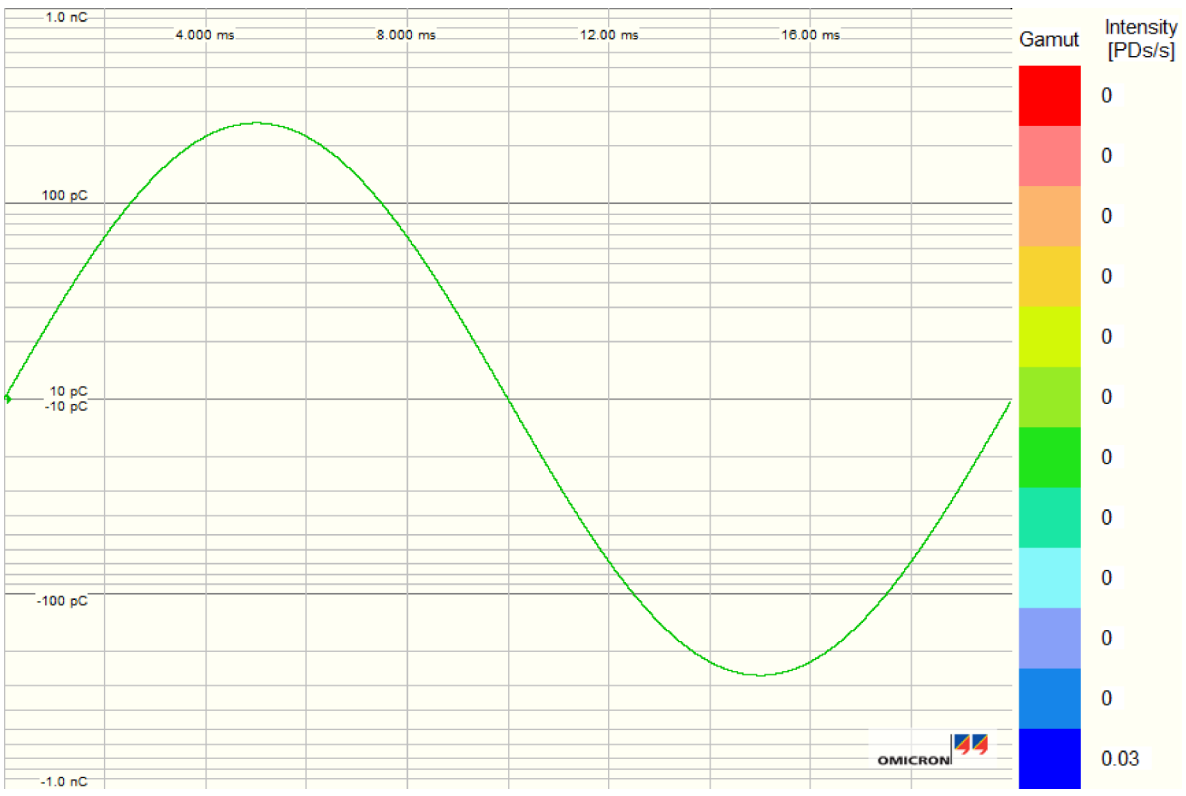


Figura B.50: PRPD probeta N°15, muestreo 1.

B.26 Probeta N°15, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 2.

Código USM	SG96
Número de muestreo	2
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.52: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 2.

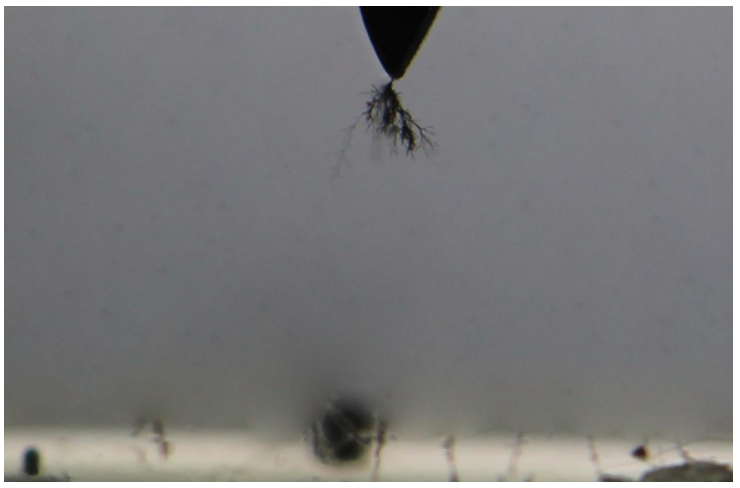


Figura B.51: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 2.

Número de descargas	96
Carga máxima [pC]	13.6747
Q_{95} [pC]	12.8701
Largo de árbol [μm]	825

Tabla B.53: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 2.



Figura B.52: PRPD probeta N°15, muestreo 2.

B.27 Probeta N°15, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 3.

Código USM	SG96
Número de muestreo	3
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.54: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 3.

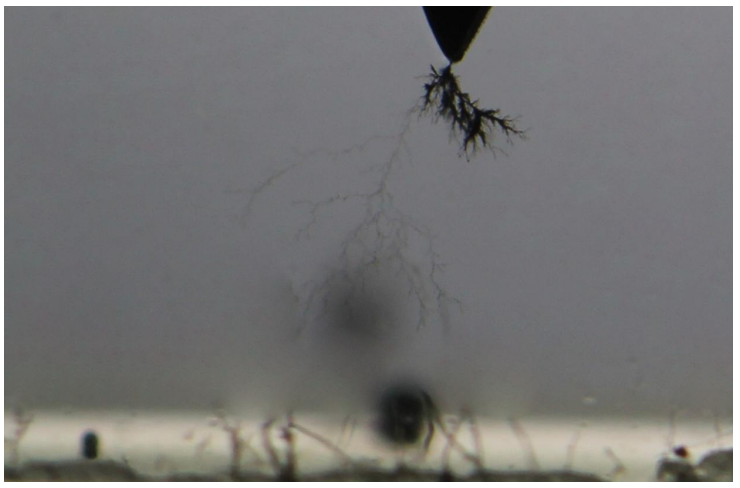


Figura B.53: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 3.

Número de descargas	13
Carga máxima [pC]	12.3048
Q_{95} [pC]	12.257
Largo de árbol [μm]	2123

Tabla B.55: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 3.

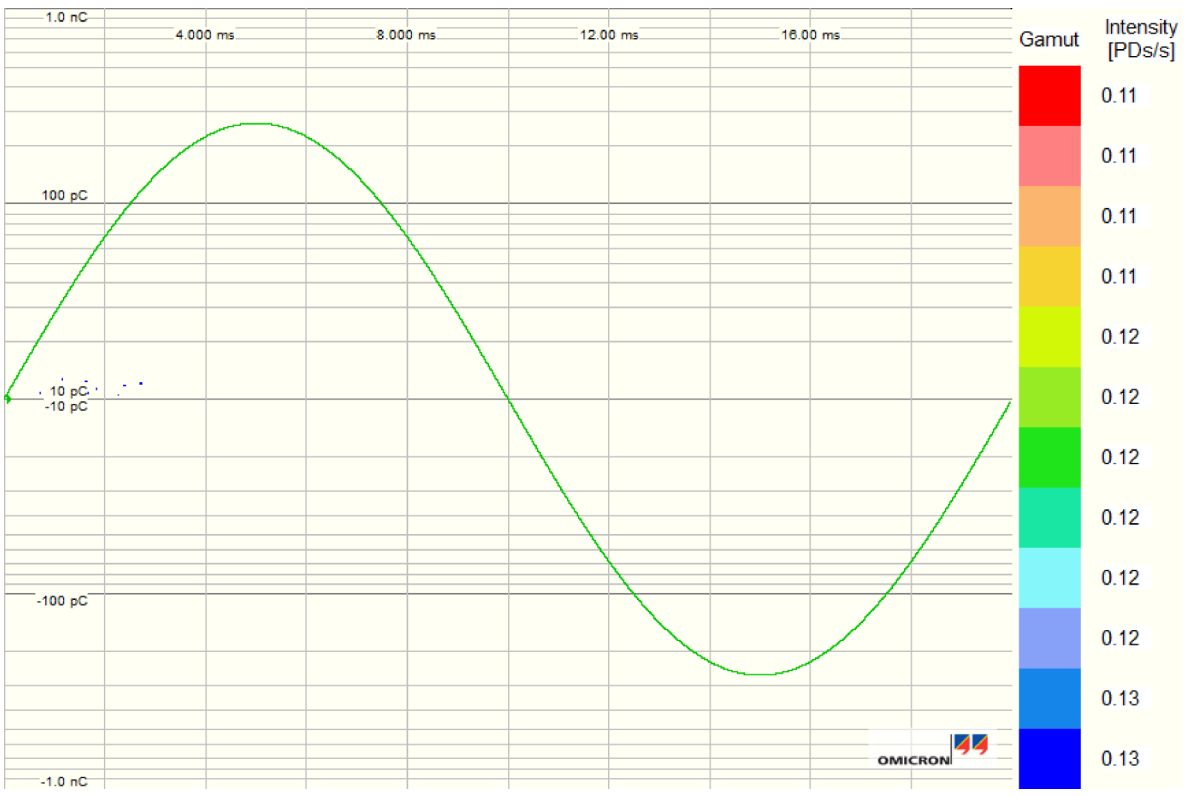


Figura B.54: PRPD probeta N°15, muestreo 3.

B.28 Probeta N°15, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 4.

Código USM	SG96
Número de muestreo	4
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.56: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 4.

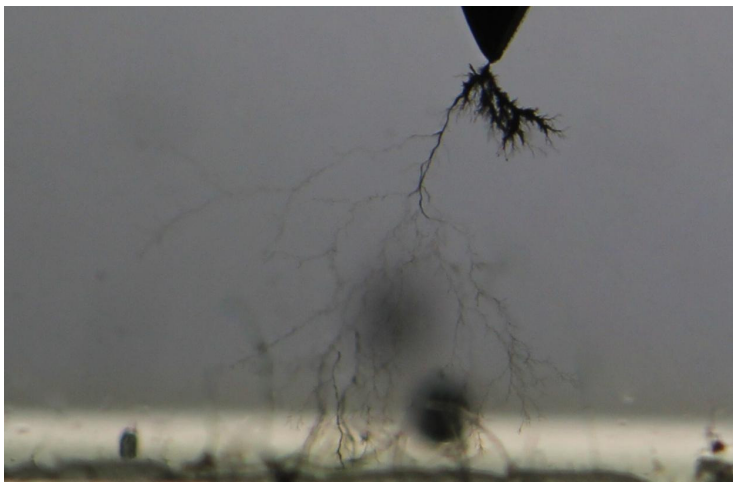


Figura B.55: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 4.

Número de descargas	44701
Carga máxima [pC]	73.7558
Q_{95} [pC]	36.2668
Largo de árbol [μm]	2960

Tabla B.57: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 4.

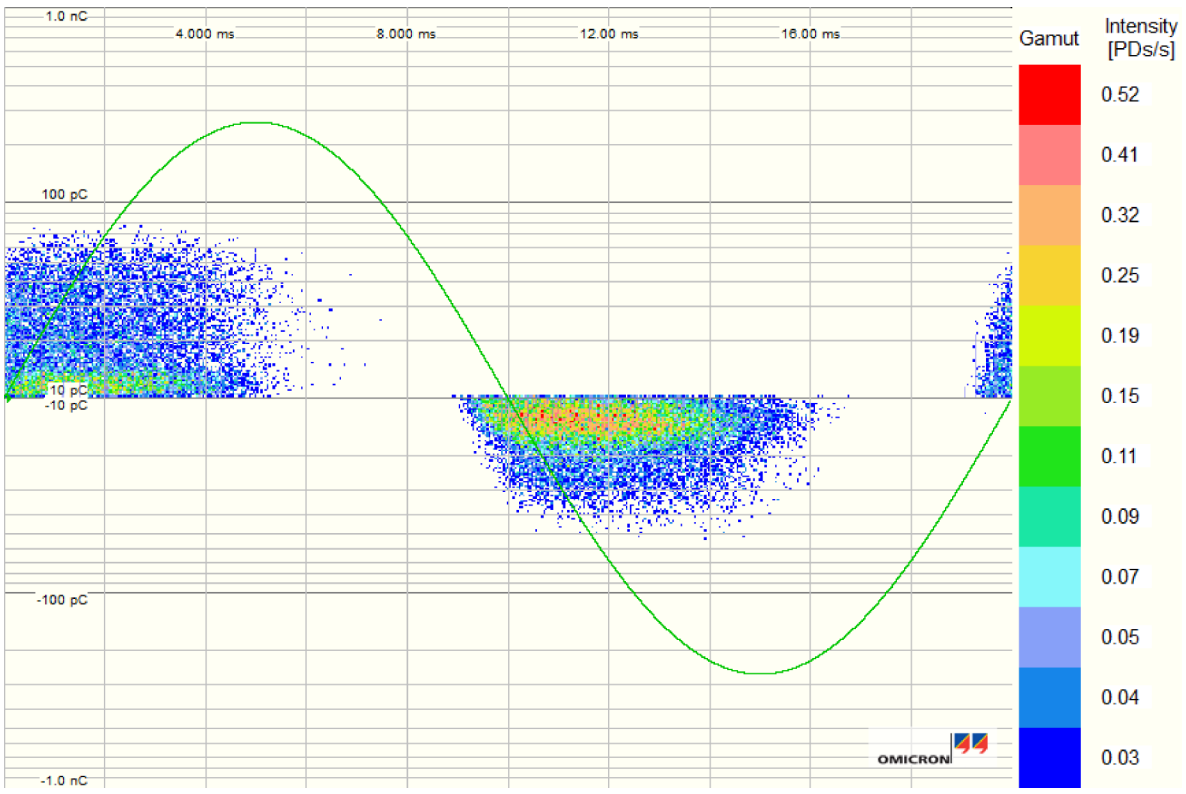


Figura B.56: PRPD probeta N°15, muestreo 4.

B.29 Probeta N°15, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 5.

Código USM	SG96
Número de muestreo	5
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.58: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 5.

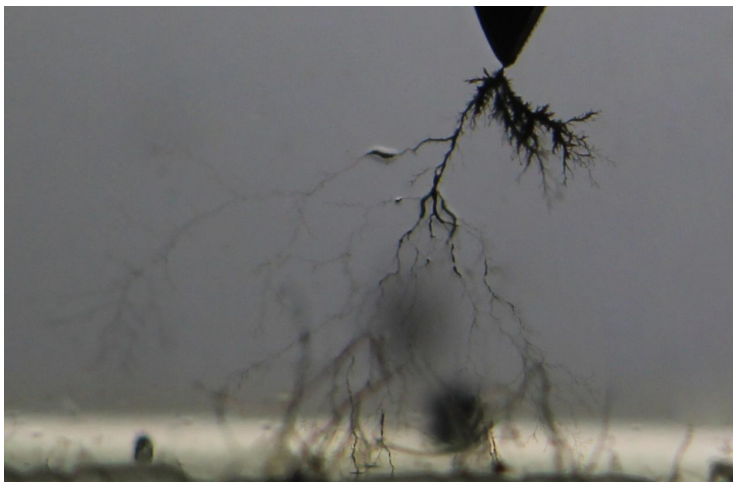


Figura B.57: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 5.

Número de descargas	12275
Carga máxima [pC]	40.7605
Q_{95} [pC]	24.3331
Largo de árbol [μm]	3620

Tabla B.59: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 5.

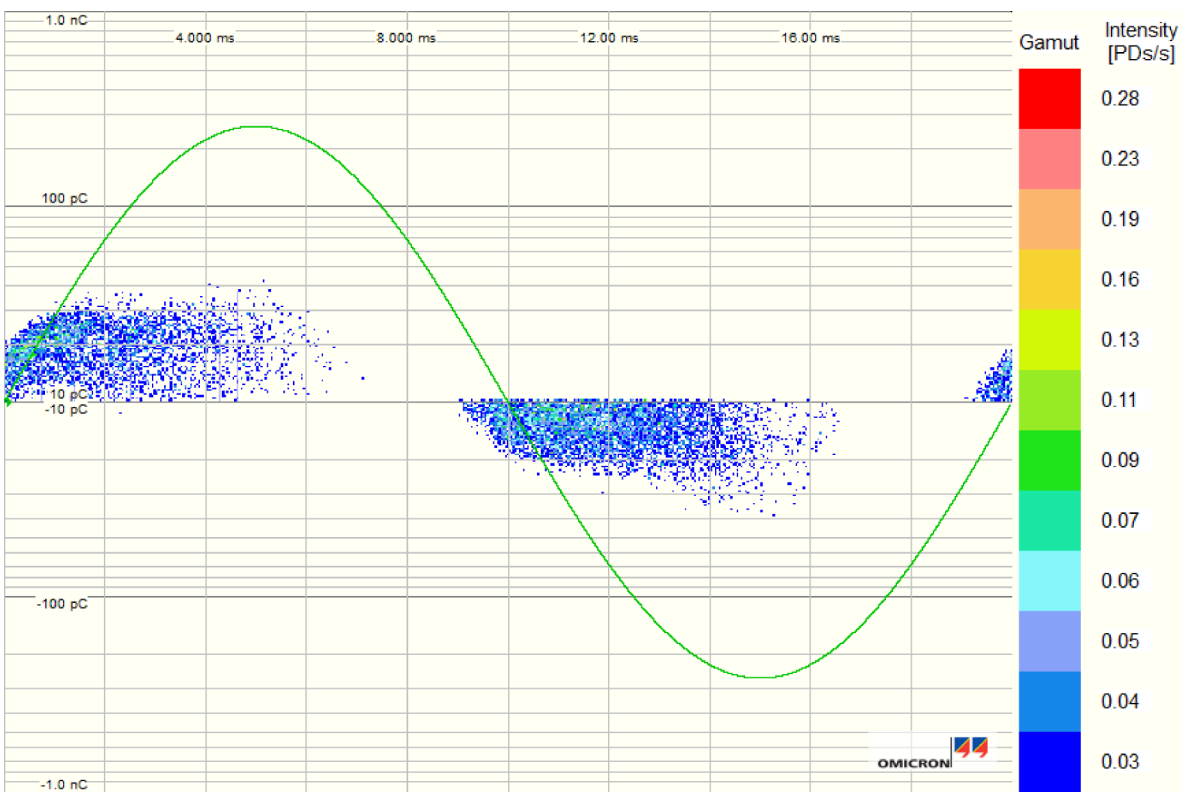


Figura B.58: PRPD probeta N°15, muestreo 5.

B.30 Probeta N°15, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°15, muestreo 6.

Código USM	SG96
Número de muestreo	6
Experimento	Referencia
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.60: Datos de entrada del análisis de probeta N°15, muestreo 6.

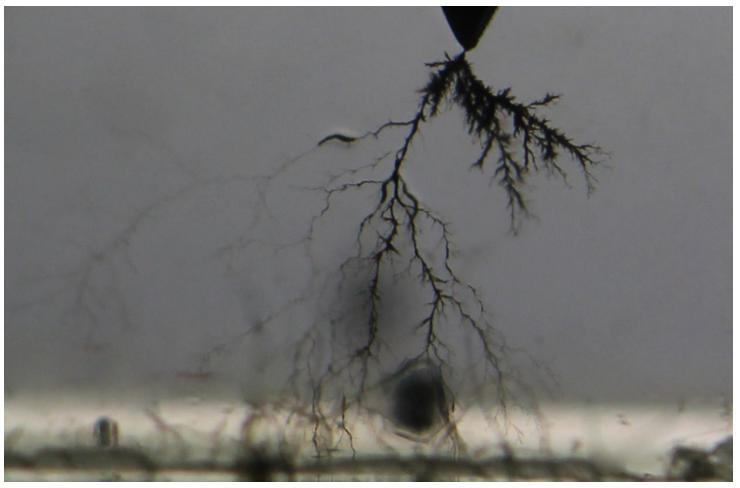


Figura B.59: Crecimiento de árboles de probeta N°15, muestreo 6.

Número de descargas	14354
Carga máxima [pC]	131.8154
Q_{95} [pC]	86.3829
Largo de árbol [μm]	3667

Tabla B.61: Datos de salida del análisis de probeta N°15, muestreo 6.

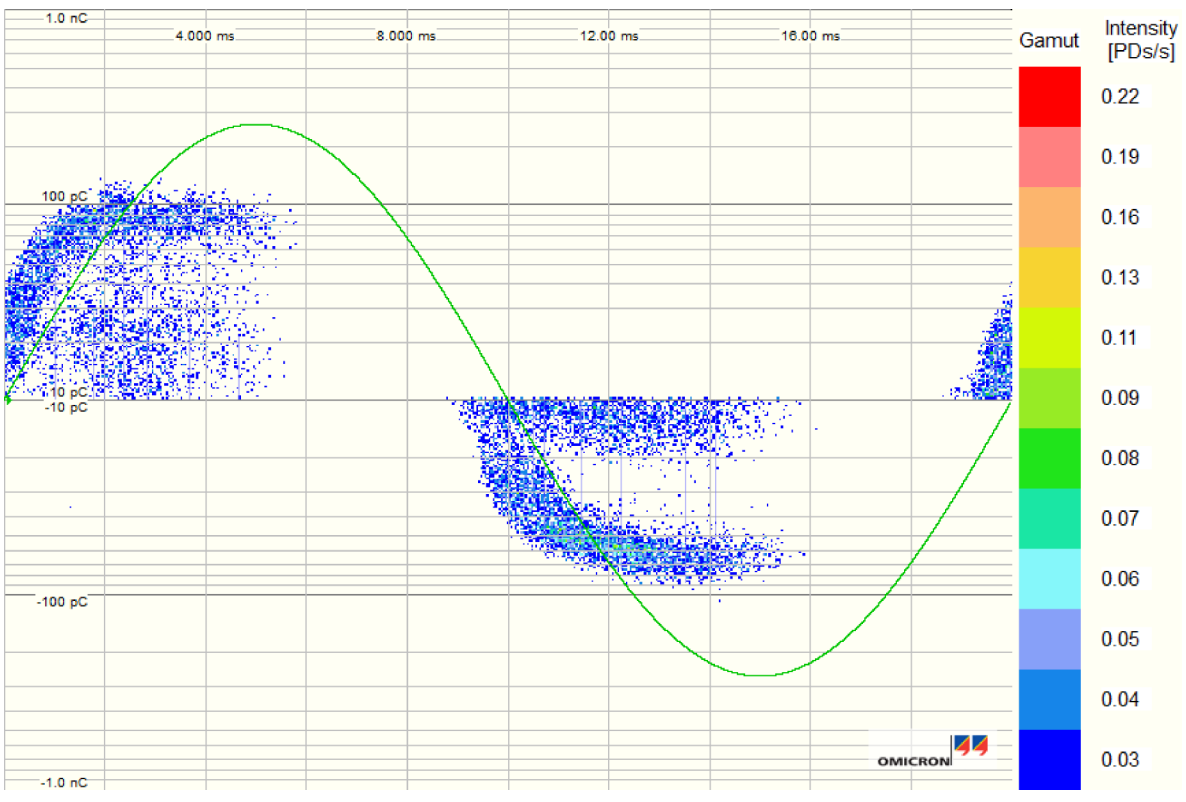


Figura B.60: PRPD probeta N°15, muestreo 6.

B.31 Probeta N°18, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 1.

Código USM	SG102
Número de muestreo	1
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.62: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 1.

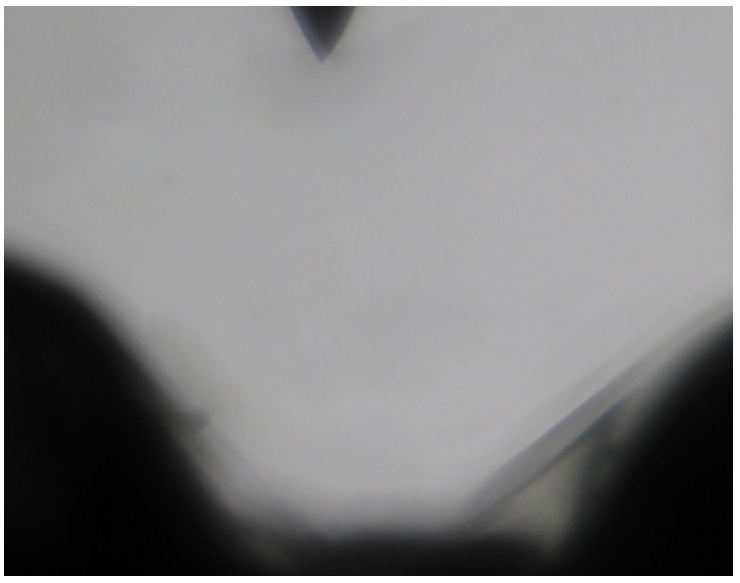


Figura B.61: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 1.

Número de descargas	7693
Carga máxima [pC]	36.1599
Q_{95} [pC]	20.6515
Largo de árbol [μm]	25

Tabla B.63: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 1.

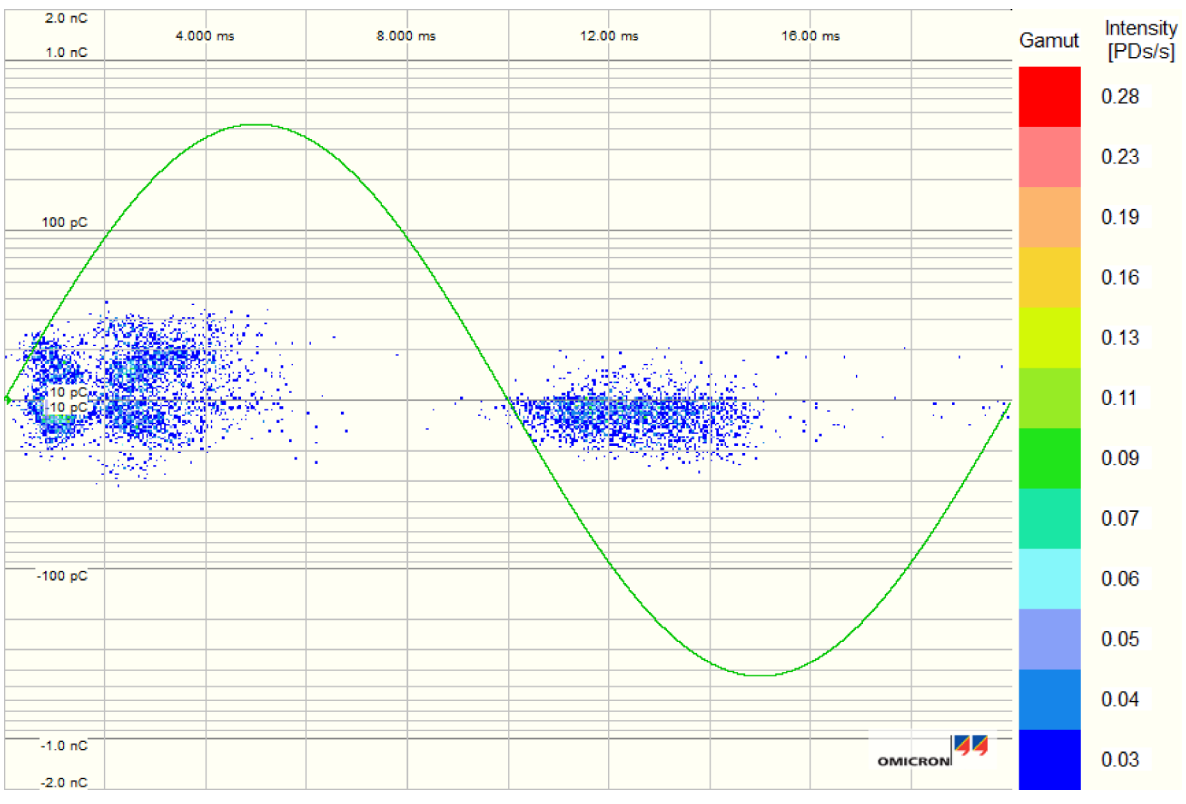


Figura B.62: PRPD probeta N°18, muestreo 1.

B.32 Probeta N°18, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 2.

Código USM	SG102
Número de muestreo	2
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.64: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 2.

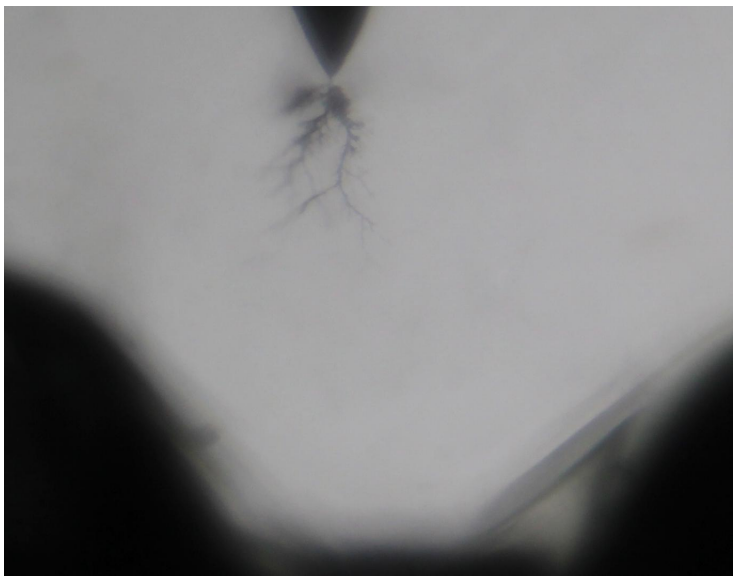


Figura B.63: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 2.

Número de descargas	25846
Carga máxima [pC]	946.9957
Q_{95} [pC]	379.0281
Largo de árbol [μm]	1511

Tabla B.65: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 2.

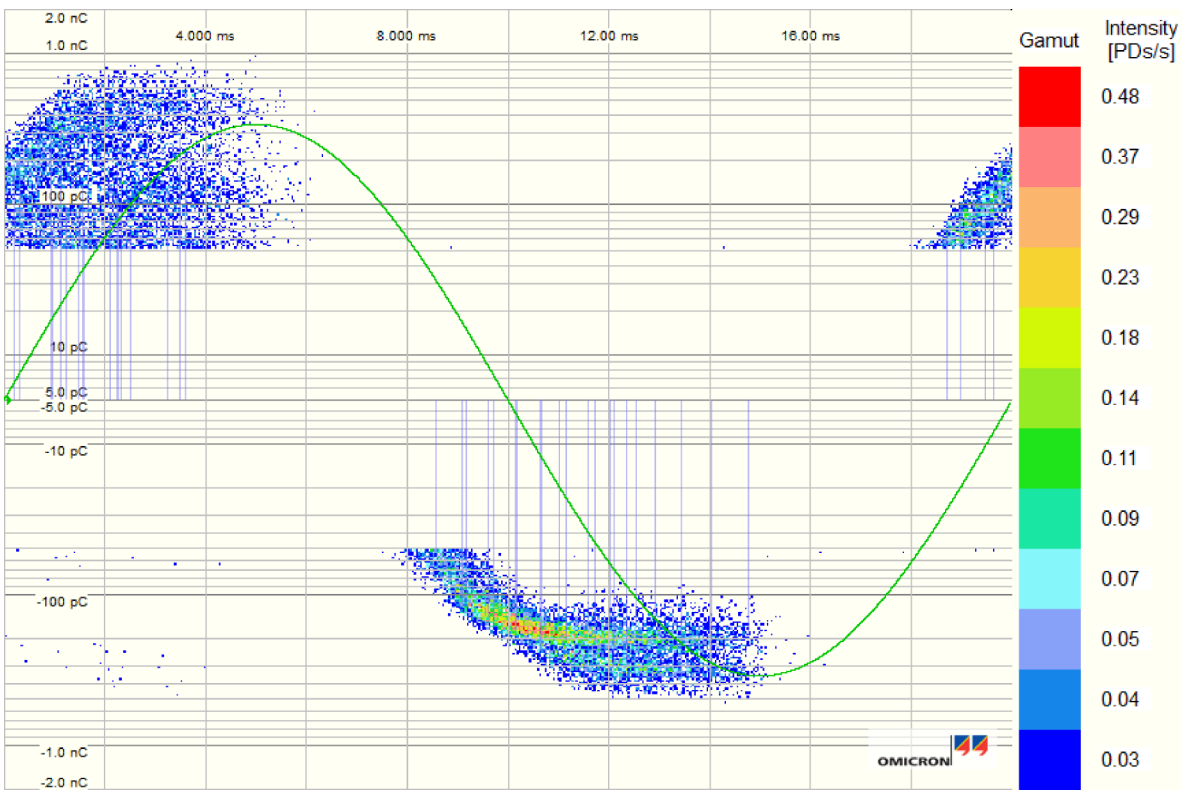


Figura B.64: PRPD probeta N°18, muestreo 2.

B.33 Probeta N°18, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 3.

Código USM	SG102
Número de muestreo	3
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.66: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 3.

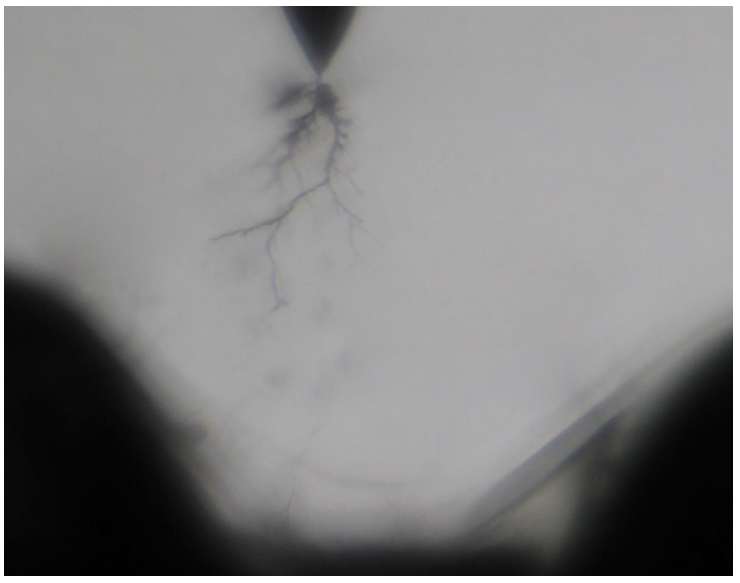


Figura B.65: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 3.

Número de descargas	2272
Carga máxima [pC]	97.0009
Q_{95} [pC]	37.2738
Largo de árbol [μm]	3553

Tabla B.67: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 3.

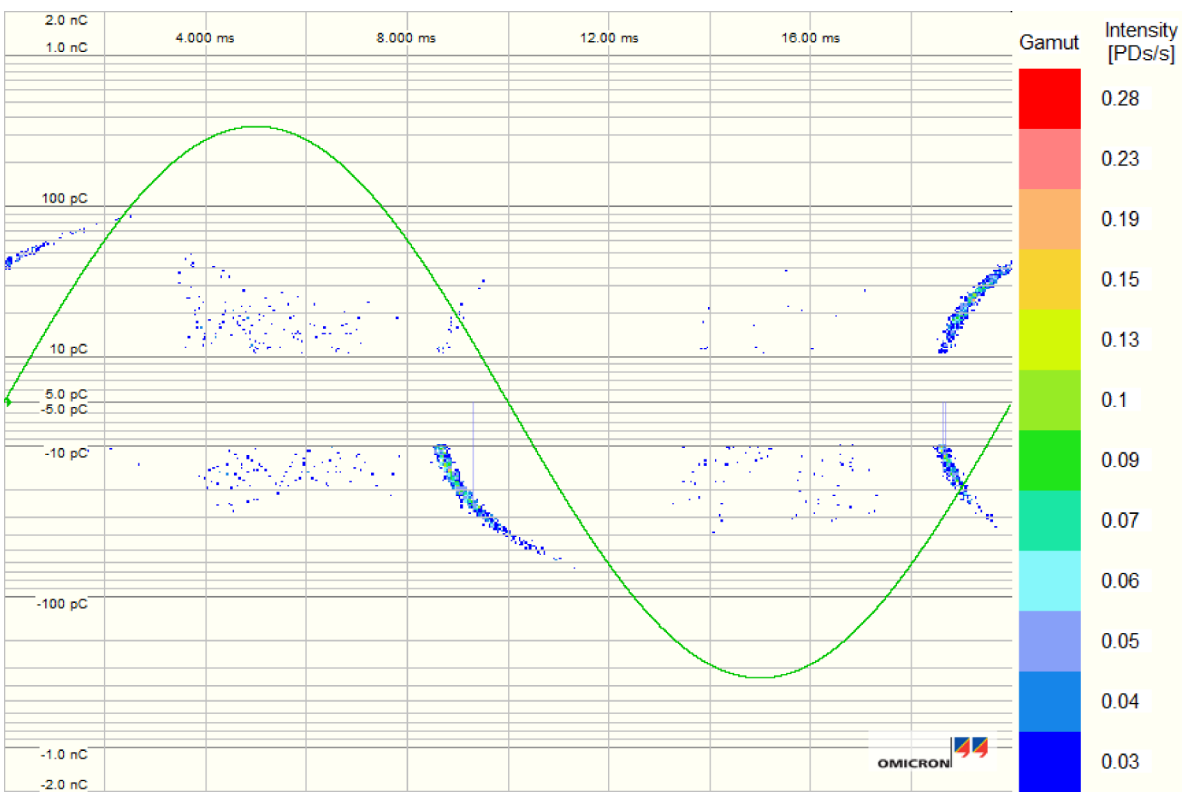


Figura B.66: PRPD probeta N°18, muestreo 3.

B.34 Probeta N°18, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 4.

Código USM	SG102
Número de muestreo	4
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.68: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 4.

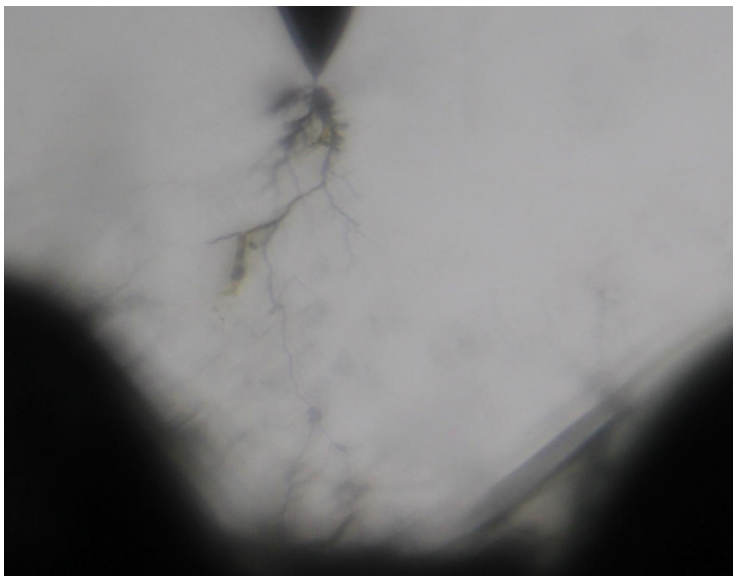


Figura B.67: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 4.

Número de descargas	19503
Carga máxima [pC]	87.1016
Q_{95} [pC]	17.7599
Largo de árbol [μm]	3859

Tabla B.69: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 4.

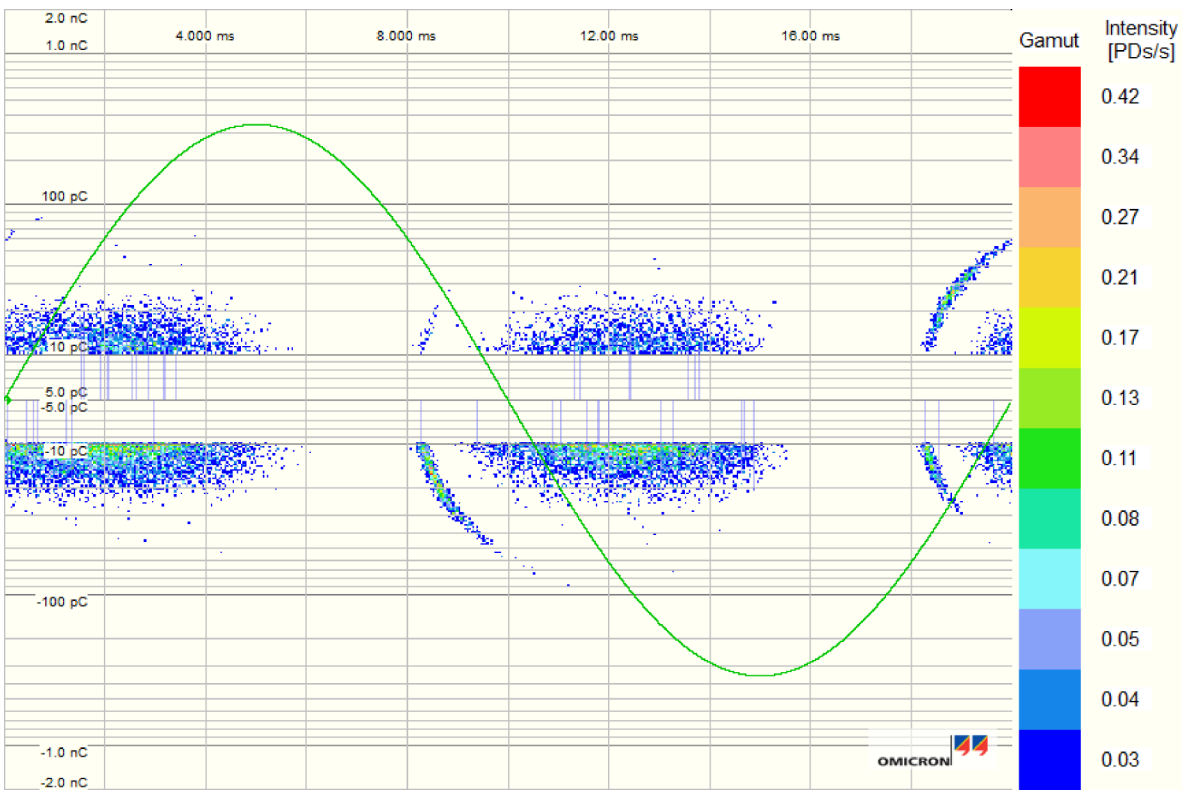


Figura B.68: PRPD probeta N°18, muestreo 4.

B.35 Probeta N°18, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 5.

Código USM	SG102
Número de muestreo	5
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.70: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 5.

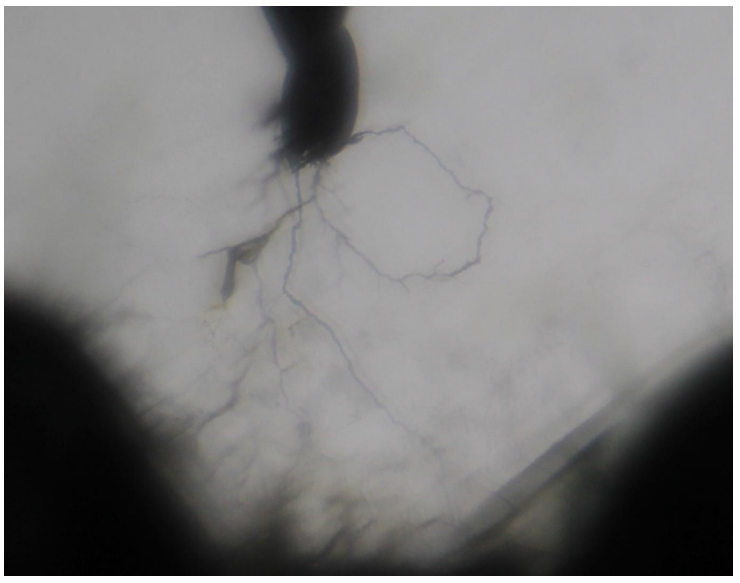


Figura B.69: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 5.

Número de descargas	15994
Carga máxima [pC]	279.745
Q_{95} [pC]	70.6957
Largo de árbol [μm]	4014

Tabla B.71: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 5.

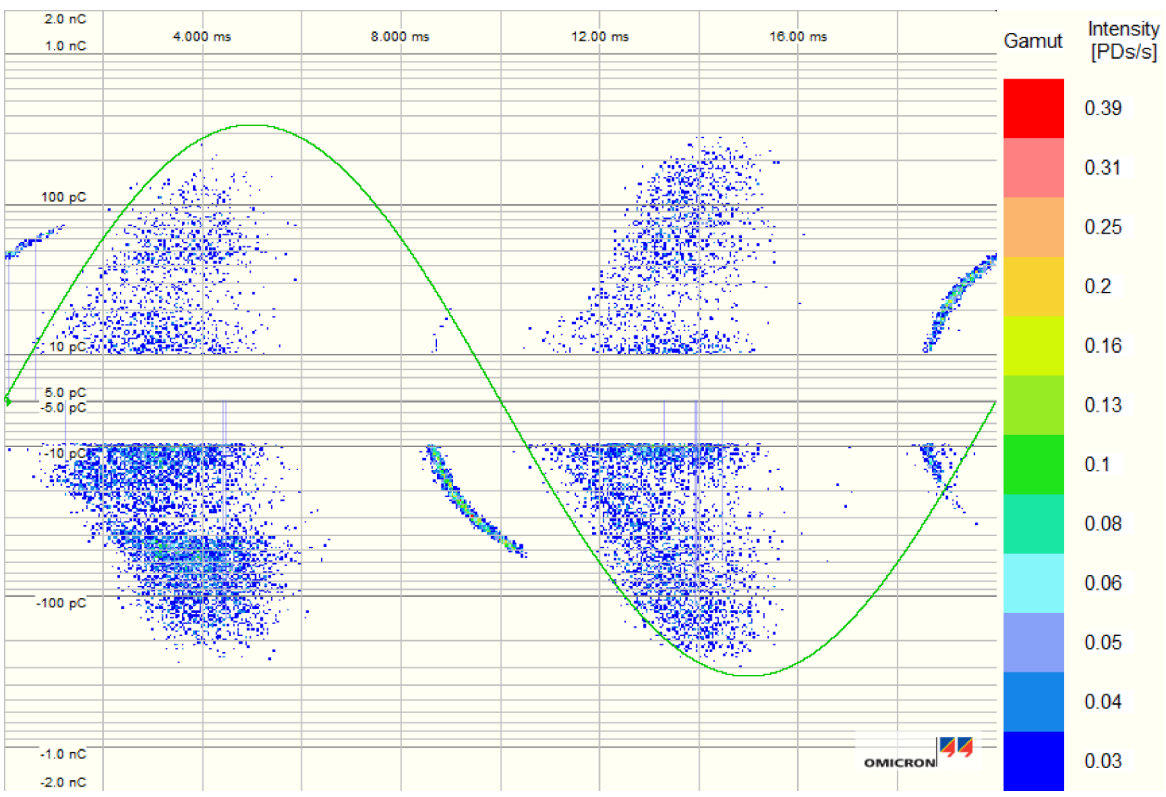


Figura B.70: PRPD probeta N°18, muestreo 5.

B.36 Probeta N°18, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°18, muestreo 6.

Código USM	SG102
Número de muestreo	6
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.72: Datos de entrada del análisis de probeta N°18, muestreo 6.

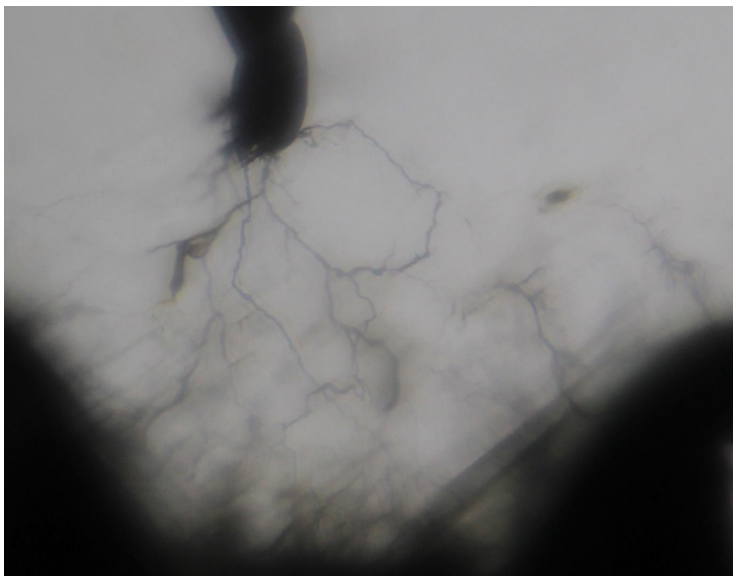


Figura B.71: Crecimiento de árboles de probeta N°18, muestreo 6.

Número de descargas	3436
Carga máxima [pC]	76.423
Q_{95} [pC]	34.9287
Largo de árbol [μm]	4049

Tabla B.73: Datos de salida del análisis de probeta N°18, muestreo 6.

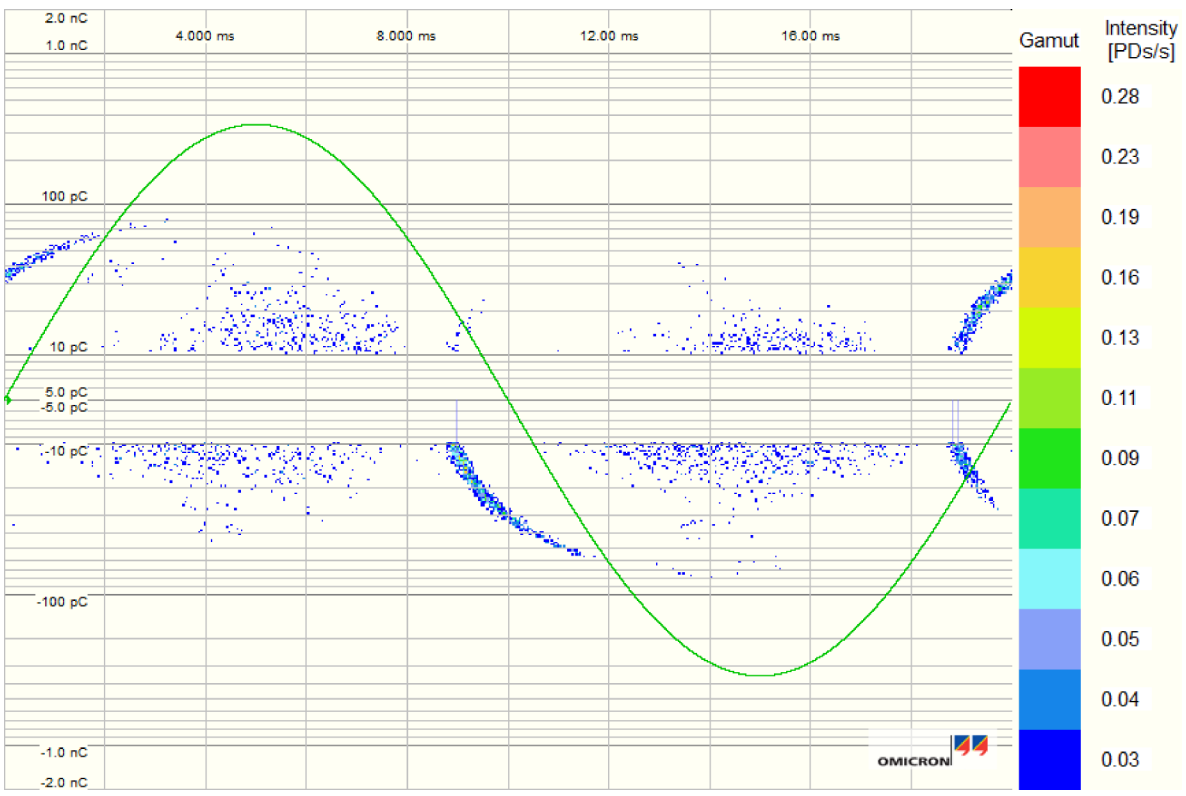


Figura B.72: PRPD probeta N°18, muestreo 6.

B.37 Probeta N°19, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 1.

Código USM	SG103
Número de muestreo	1
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.74: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 1.

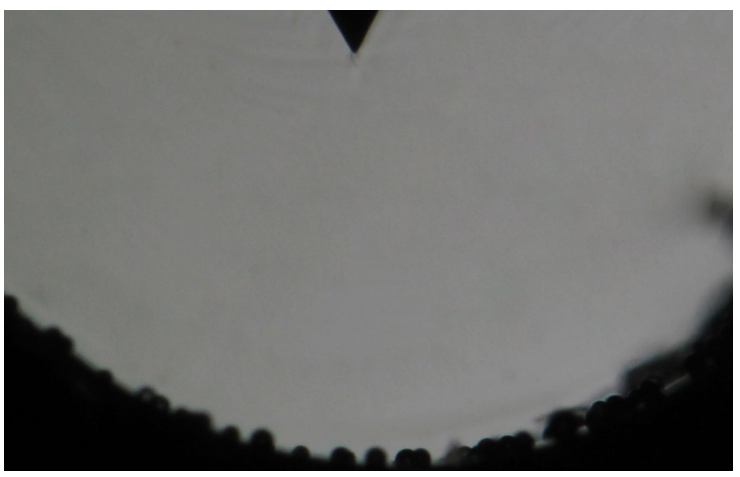


Figura B.73: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 1.

Número de descargas	7564
Carga máxima [pC]	47.9531
Q_{95} [pC]	31.7514
Largo de árbol [μm]	117.6

Tabla B.75: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 1.

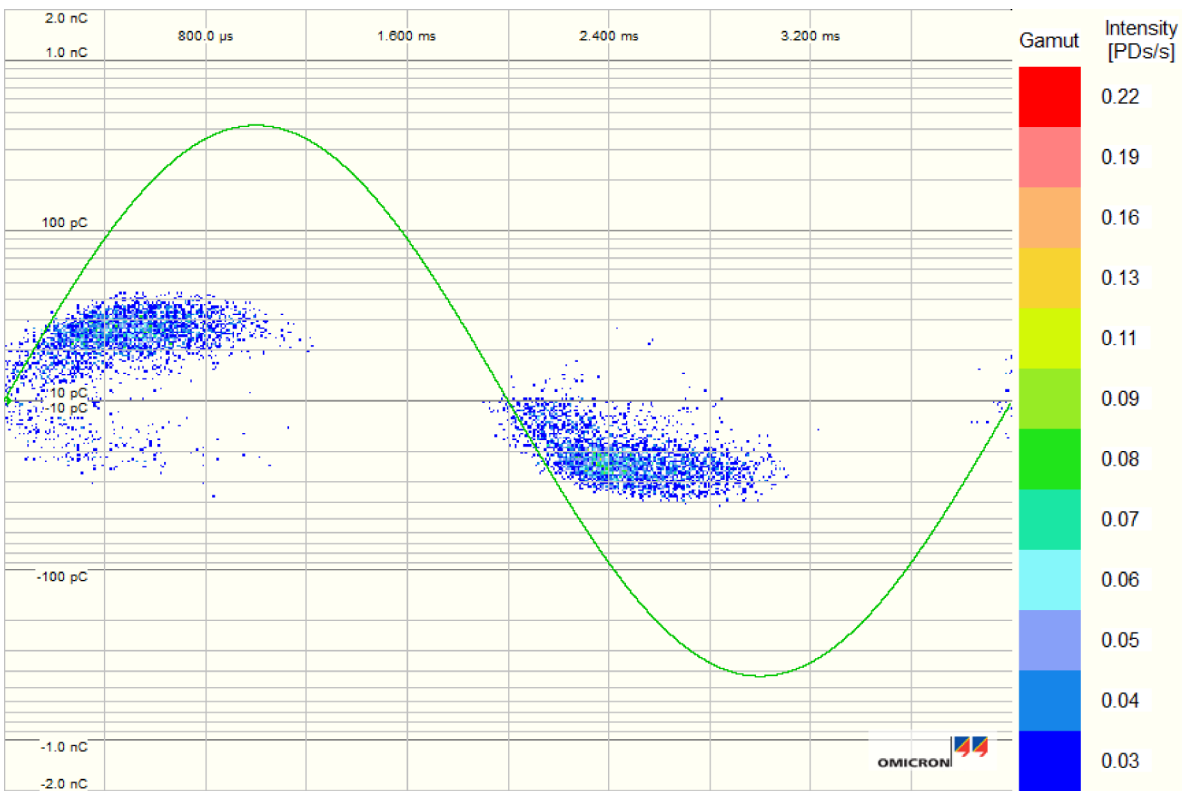


Figura B.74: PRPD probeta N°19, muestreo 1.

B.38 Probeta N°19, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 2.

Código USM	SG103
Número de muestreo	2
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.76: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 2.

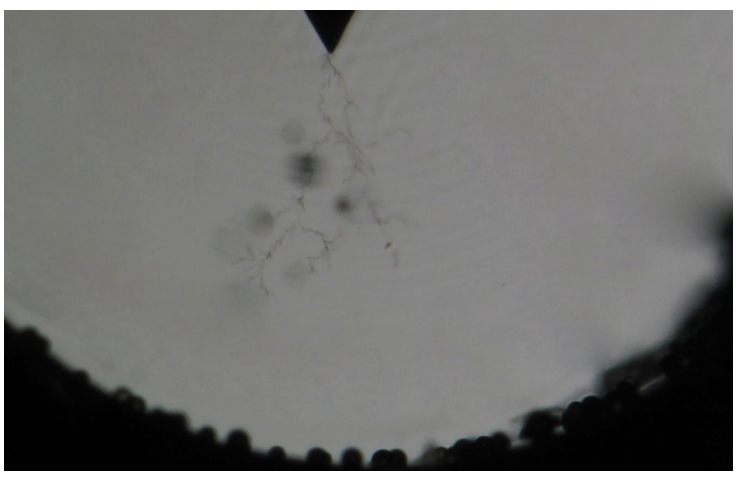


Figura B.75: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 2.

Número de descargas	0
Carga máxima [pC]	0
Q_{95} [pC]	0
Largo de árbol [μm]	1846

Tabla B.77: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 2.

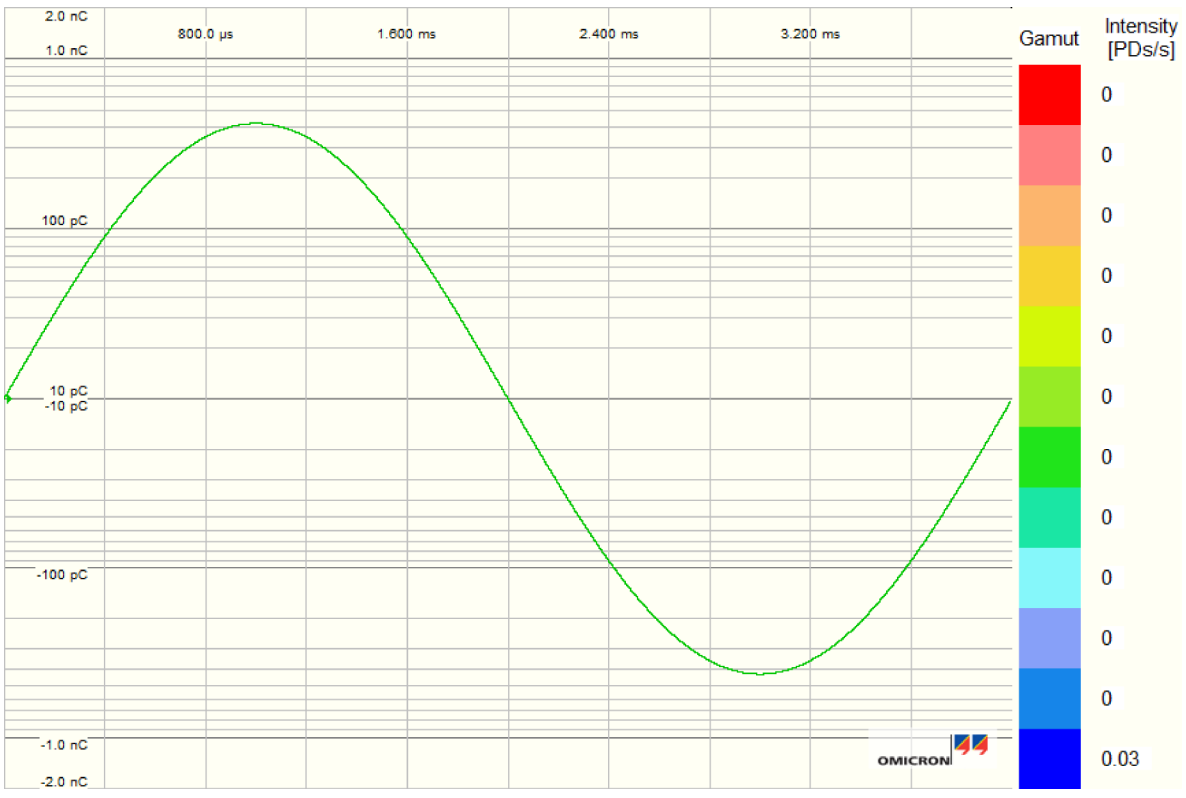


Figura B.76: PRPD probeta N°19, muestreo 2.

B.39 Probeta N°19, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 3.

Código USM	SG103
Número de muestreo	3
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.78: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 3.

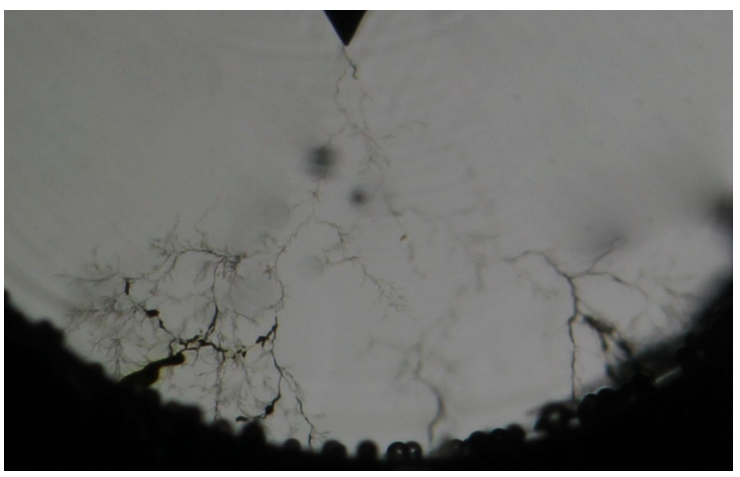


Figura B.77: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 3.

Número de descargas	28695
Carga máxima [pC]	116.7884
Q_{95} [pC]	27.4745
Largo de árbol [μm]	3316.4

Tabla B.79: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 3.

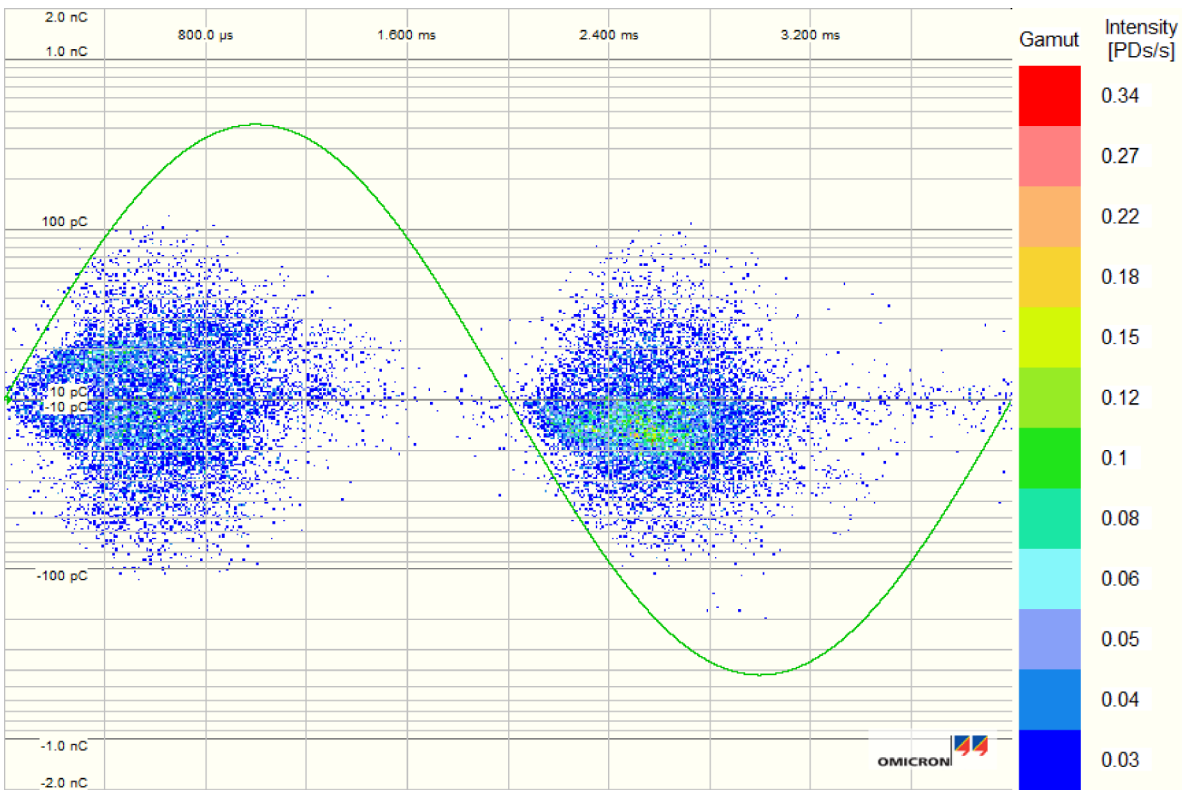


Figura B.78: PRPD probeta N°19, muestreo 3.

B.40 Probeta N°19, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 4.

Código USM	SG103
Número de muestreo	4
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.80: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 4.

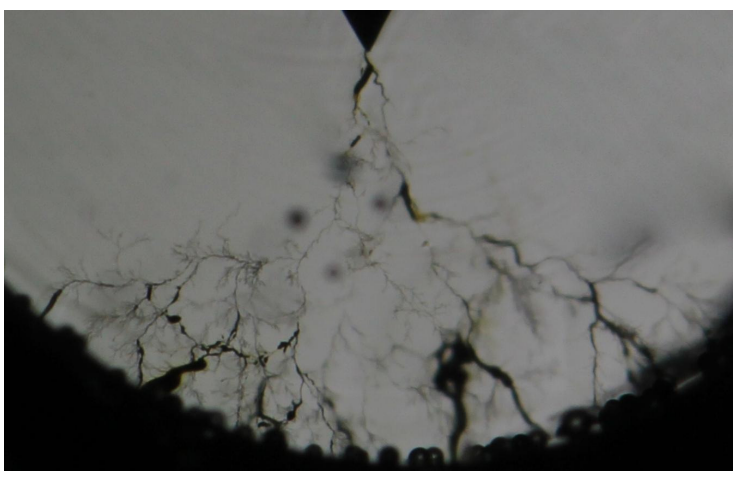


Figura B.79: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 4.

Número de descargas	686
Carga máxima [pC]	30.6847
Q_{95} [pC]	15.8764
Largo de árbol [μm]	3344

Tabla B.81: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 4.

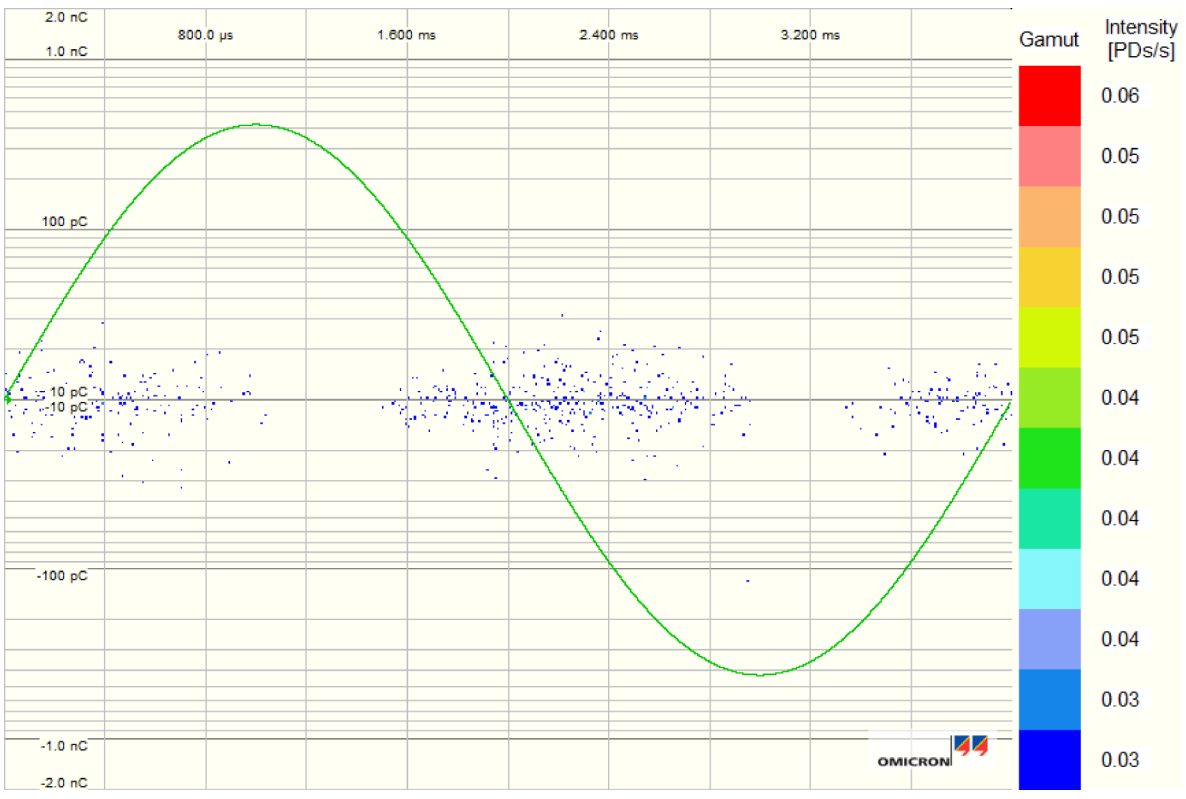


Figura B.80: PRPD probeta N°19, muestreo 4.

B.41 Probeta N°19, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 5.

Código USM	SG103
Número de muestreo	5
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.82: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 5.

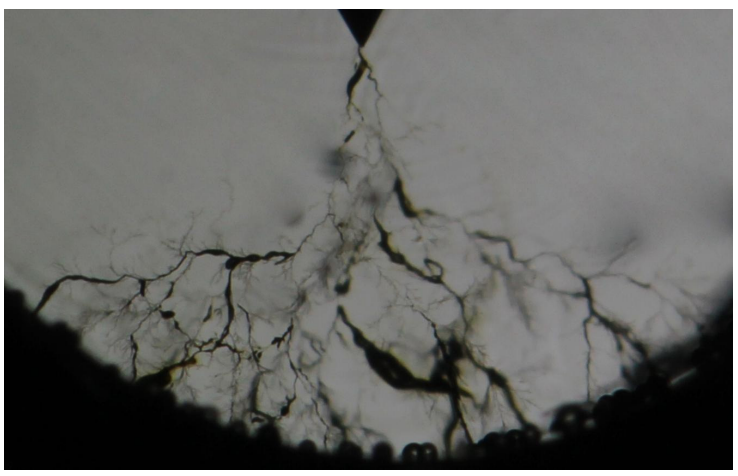


Figura B.81: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 5.

Número de descargas	35331
Carga máxima [pC]	165.5646
Q_{95} [pC]	45.24
Largo de árbol [μm]	3384

Tabla B.83: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 5.

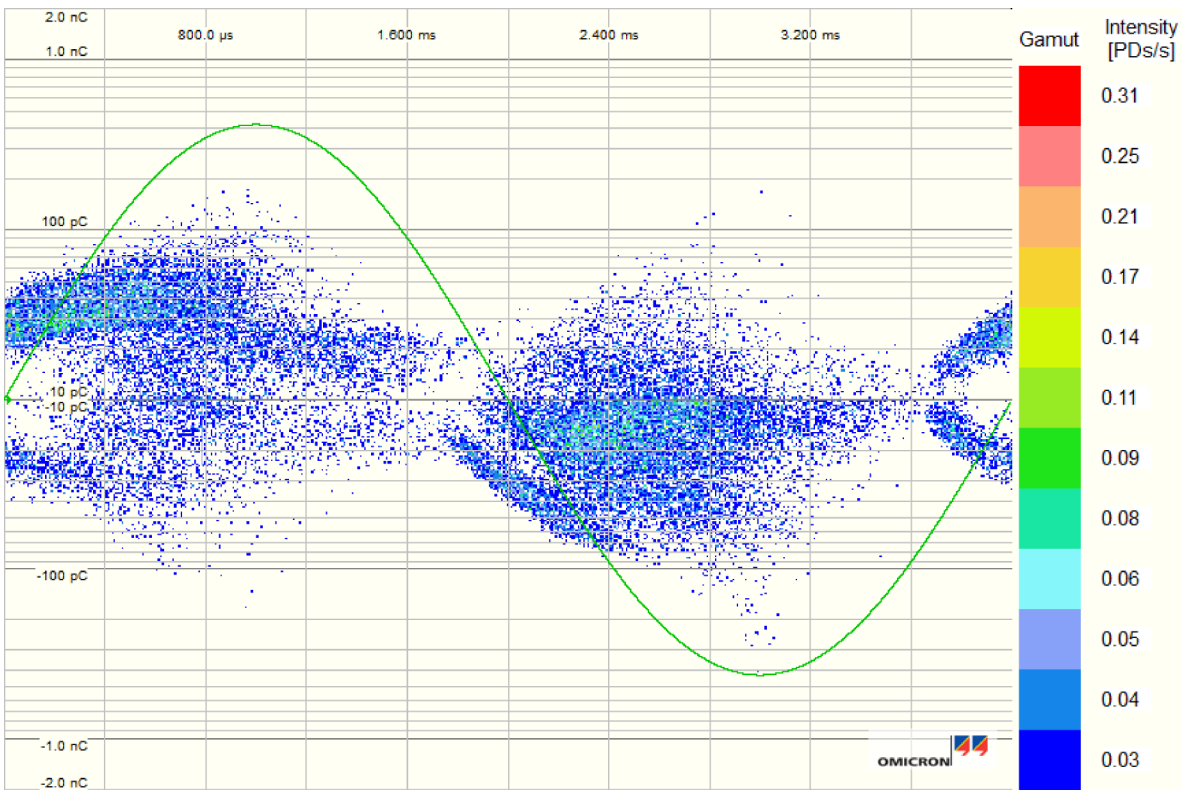


Figura B.82: PRPD probeta N°19, muestreo 5.

B.42 Probeta N°19, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°19, muestreo 6.

Código USM	SG103
Número de muestreo	6
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	14
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.84: Datos de entrada del análisis de probeta N°19, muestreo 6.

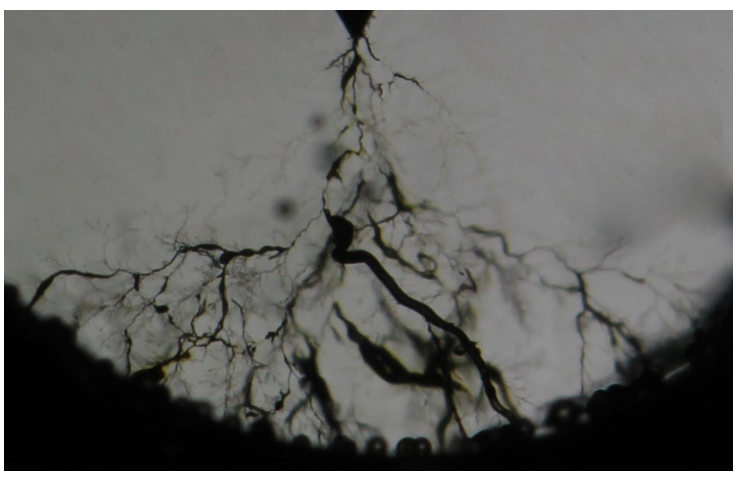


Figura B.83: Crecimiento de árboles de probeta N°19, muestreo 6.

Número de descargas	89431
Carga máxima [pC]	1229.1
Q_{95} [pC]	679.9071
Largo de árbol [μm]	3384

Tabla B.85: Datos de salida del análisis de probeta N°19, muestreo 6.

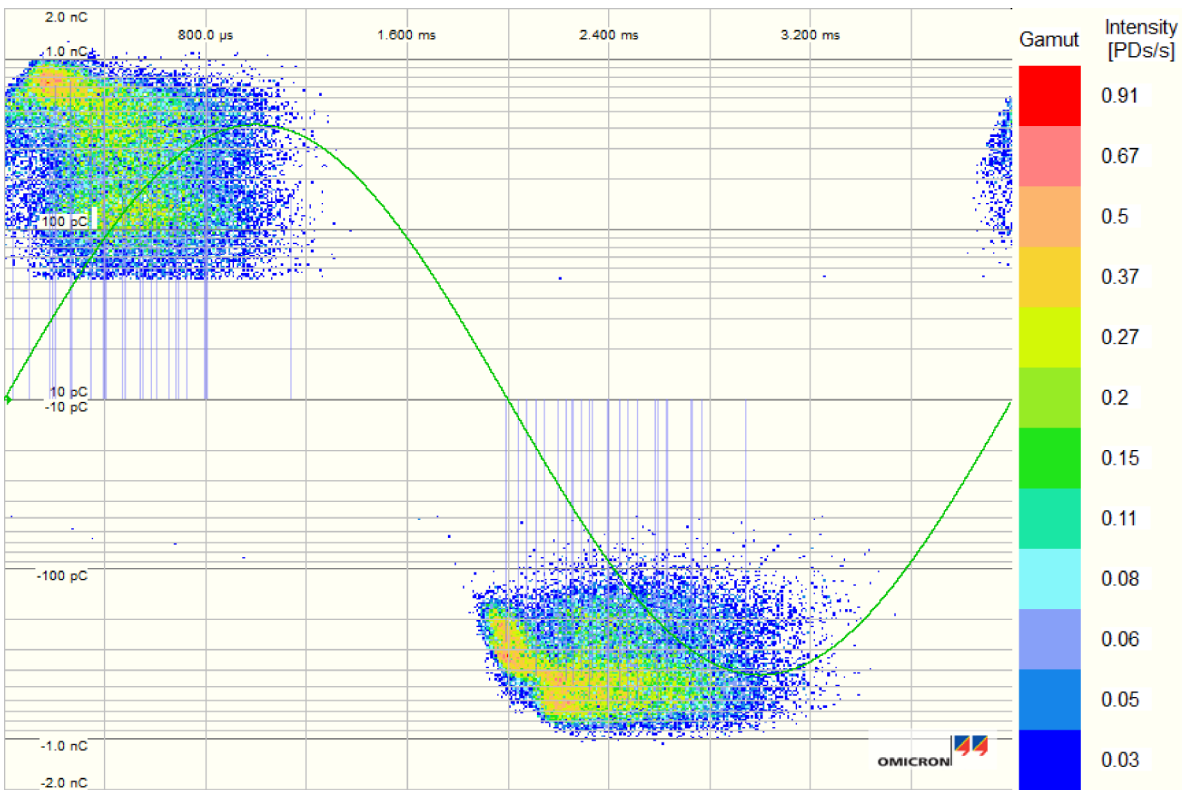


Figura B.84: PRPD probeta N°19, muestreo 6.

B.43 Probeta N°20, Muestreo 1

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 1.

Código USM	SG104
Número de muestreo	1
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.86: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 1.

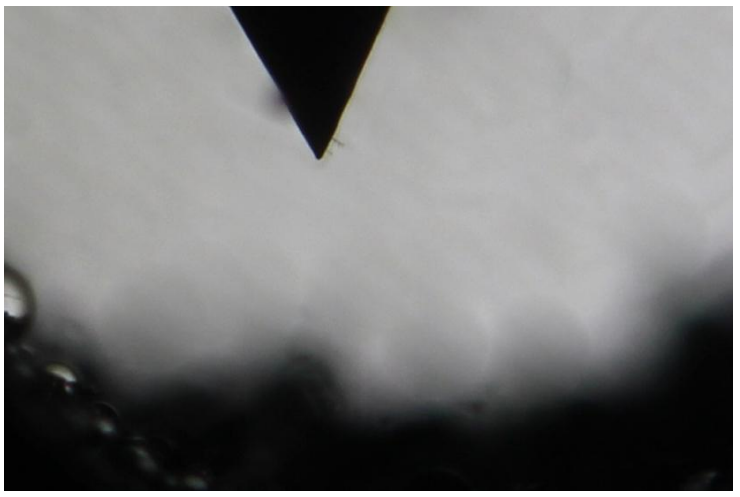


Figura B.85: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 1.

Número de descargas	235848
Carga máxima [pC]	120.1827
Q_{95} [pC]	8.254
Largo de árbol [μm]	58

Tabla B.87: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 1.

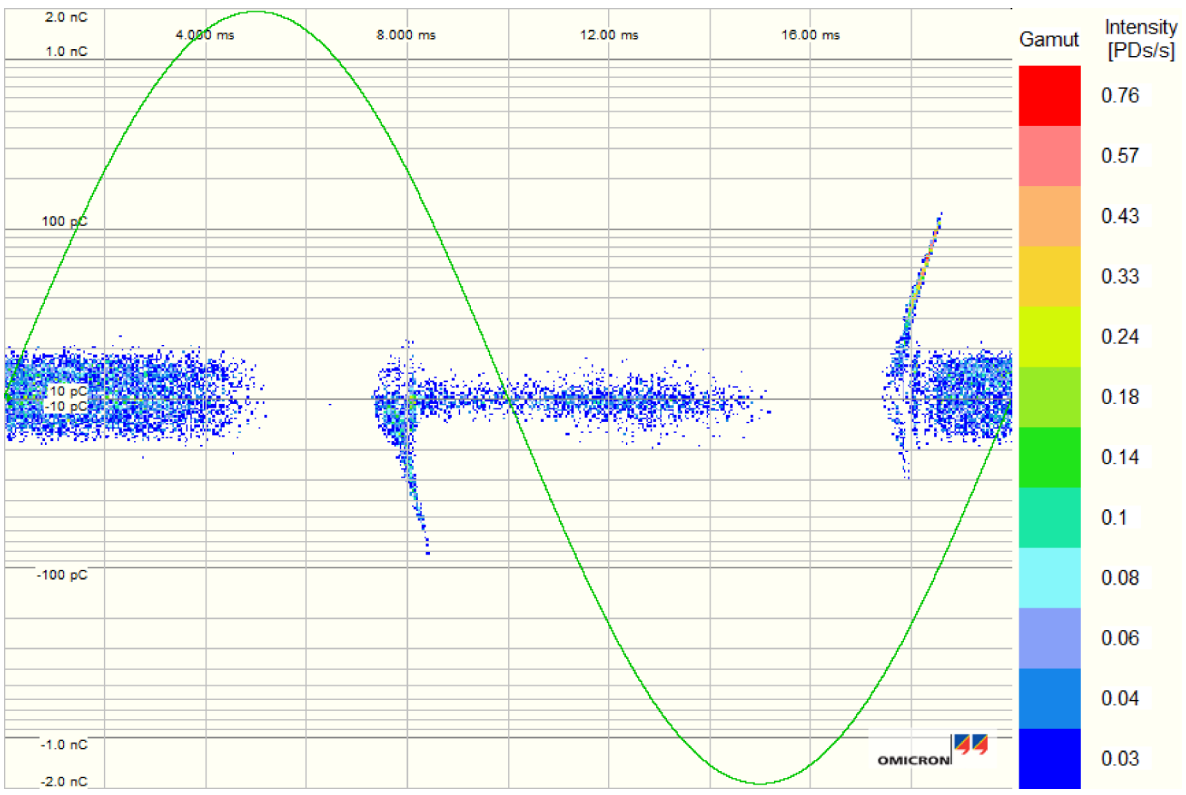


Figura B.86: PRPD probeta N°20, muestreo 1.

B.44 Probeta N°20, Muestreo 2

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 2.

Código USM	SG104
Número de muestreo	2
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.88: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 2.

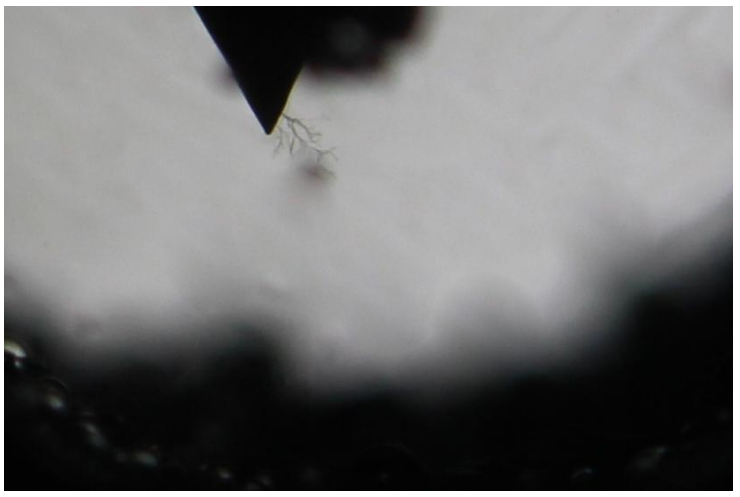


Figura B.87: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 2.

Número de descargas	214512
Carga máxima [pC]	51.7911
Q_{95} [pC]	7.9112
Largo de árbol [μm]	436

Tabla B.89: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 2.

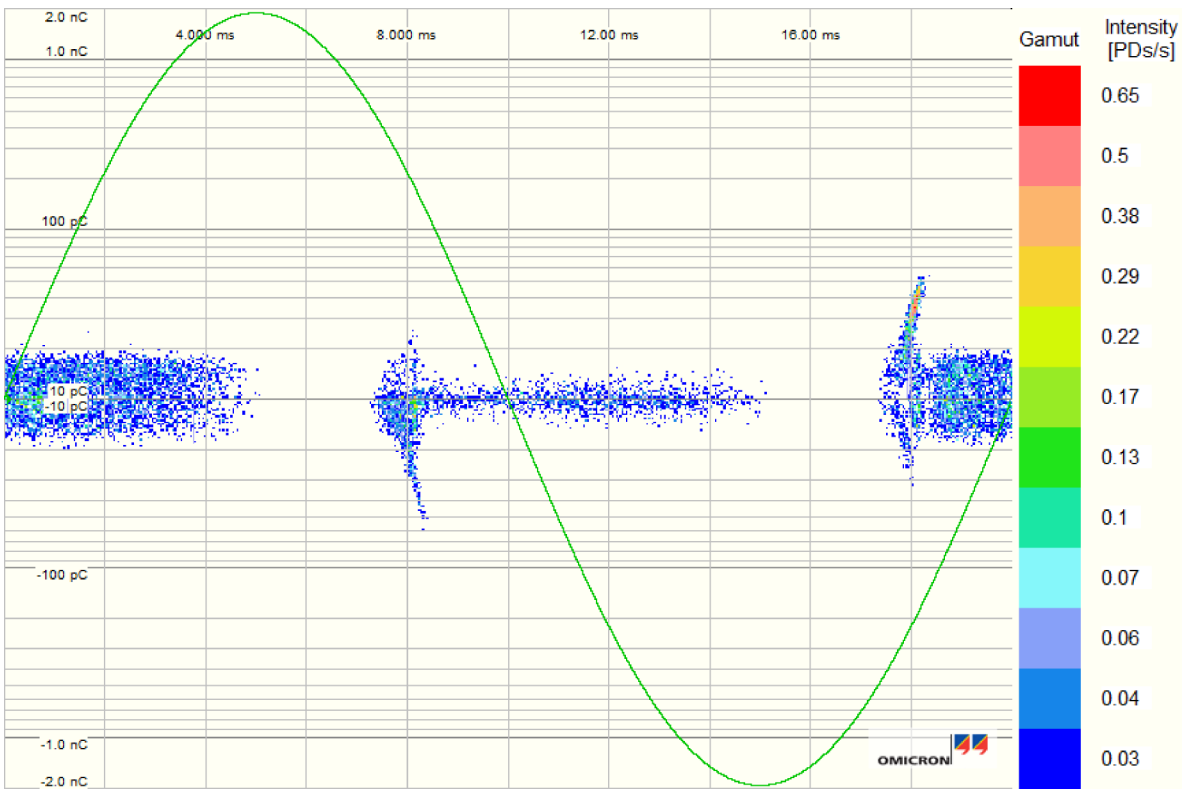


Figura B.88: PRPD probeta N°20, muestreo 2.

B.45 Probeta N°20, Muestreo 3

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 3.

Código USM	SG104
Número de muestreo	3
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.90: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 3.

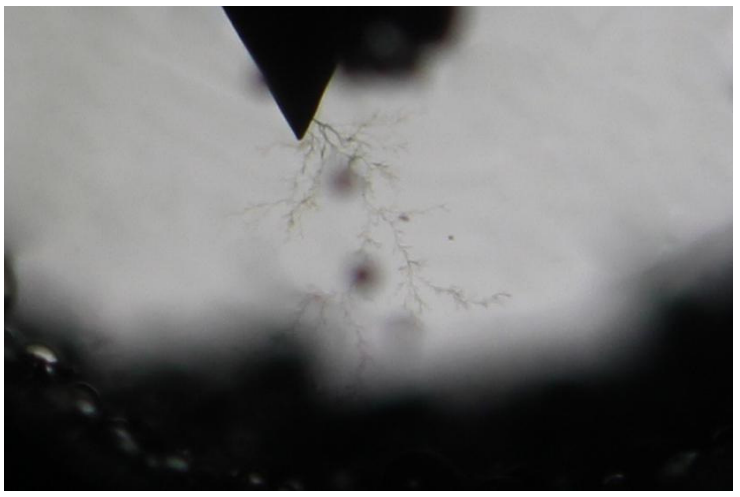


Figura B.89: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 3.

Número de descargas	211608
Carga máxima [pC]	55.6133
Q_{95} [pC]	7.8994
Largo de árbol [μm]	1294

Tabla B.91: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 3.

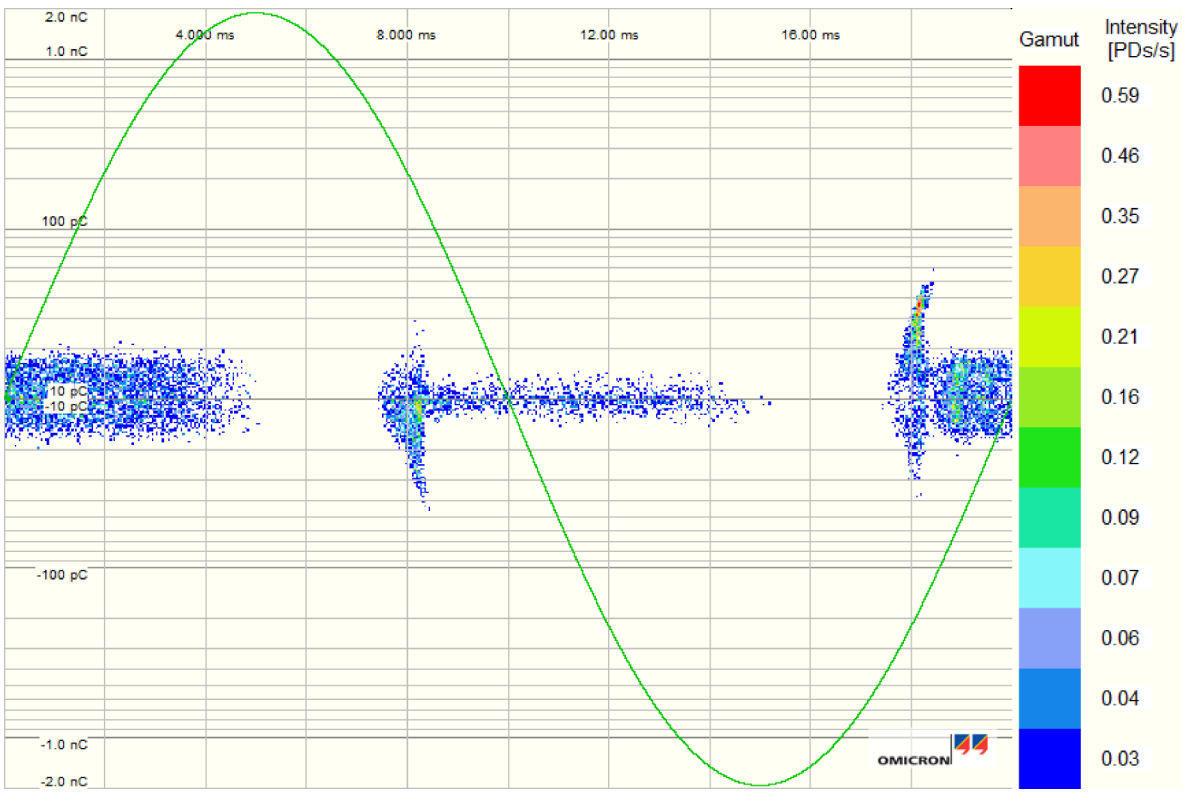


Figura B.90: PRPD probeta N°20, muestreo 3.

B.46 Probeta N°20, Muestreo 4

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 4.

Código USM	SG104
Número de muestreo	4
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.92: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 4.

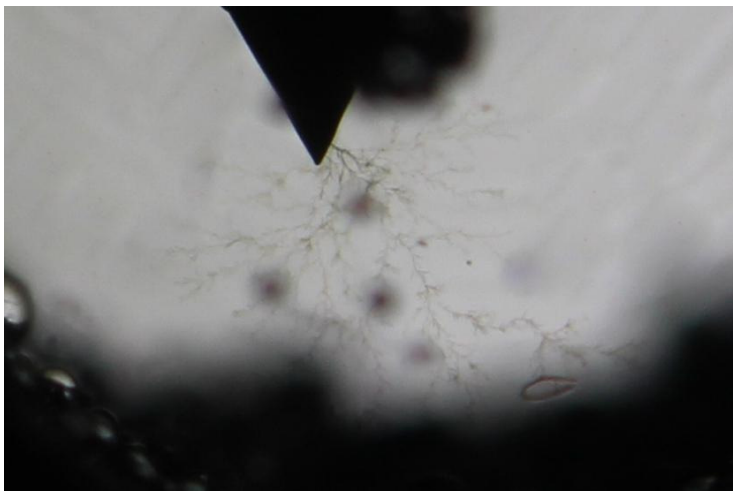


Figura B.91: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 4.

Número de descargas	213026
Carga máxima [pC]	62.4015
Q_{95} [pC]	7.6876
Largo de árbol [μm]	1671

Tabla B.93: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 4.

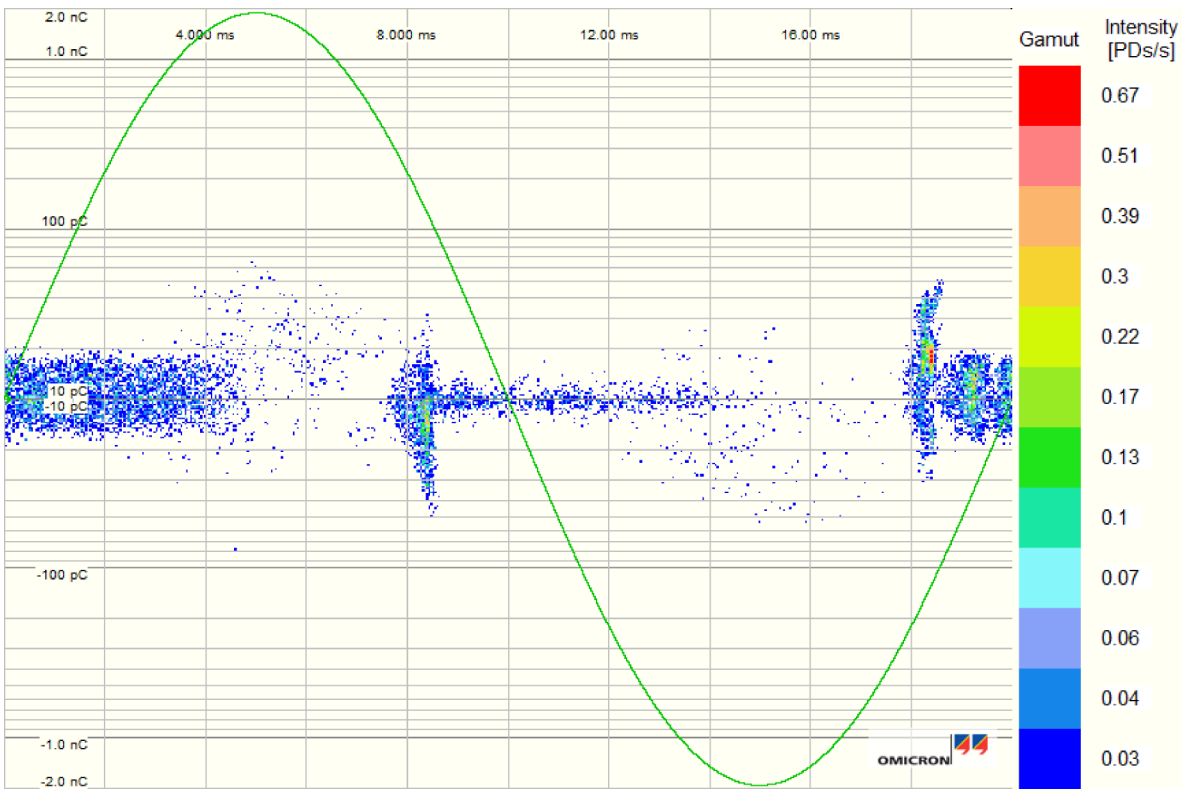


Figura B.92: PRPD probeta N°20, muestreo 4.

B.47 Probeta N°20, Muestreo 5

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 5.

Código USM	SG104
Número de muestreo	5
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	50
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.94: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 5.

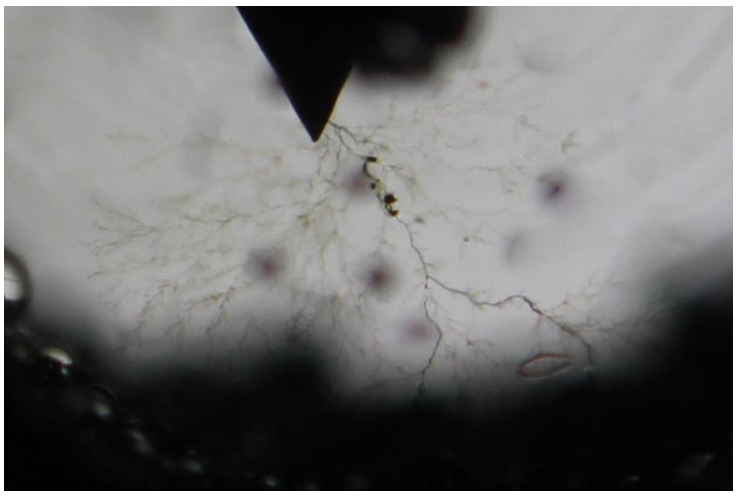


Figura B.93: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 5.

Número de descargas	209243
Carga máxima [pC]	558.7642
Q_{95} [pC]	7.2756
Largo de árbol [μm]	2005

Tabla B.95: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 5.

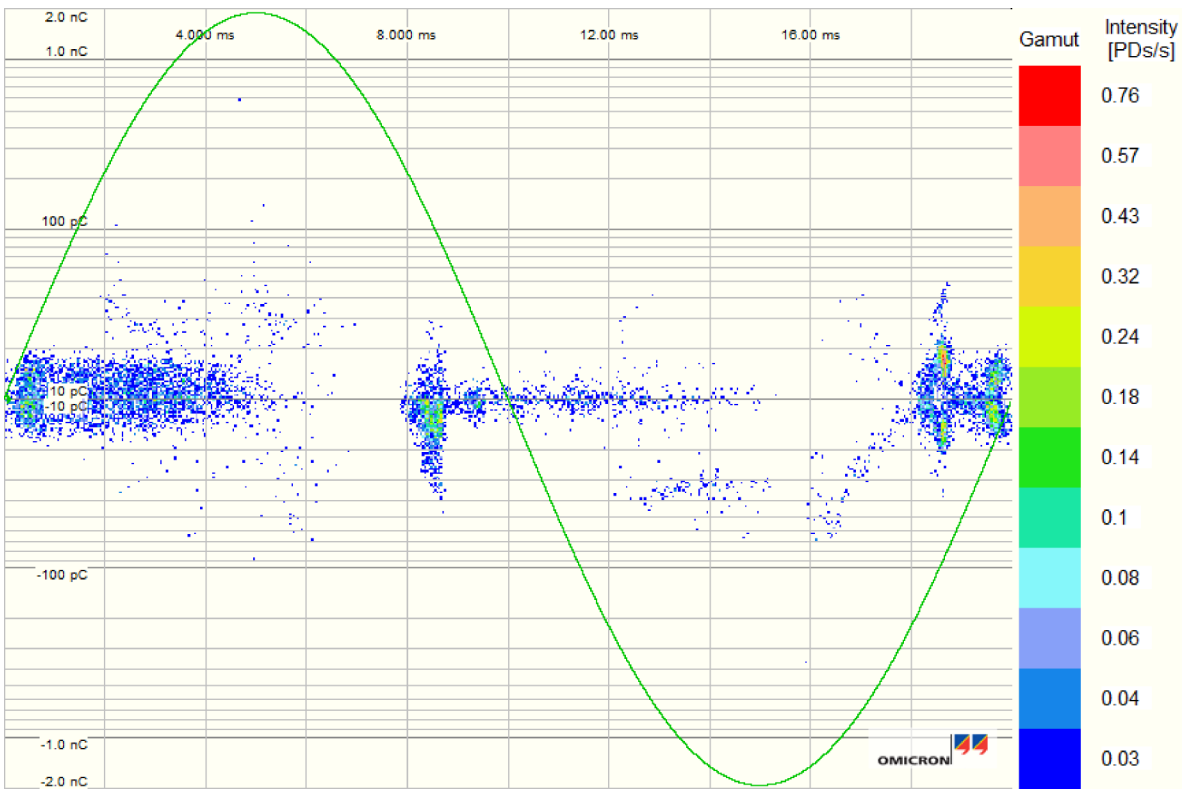


Figura B.94: PRPD probeta N°20, muestreo 5.

B.48 Probeta N°20, Muestreo 6

A continuación se muestran los resultados de la probeta N°20, muestreo 6.

Código USM	SG104
Número de muestreo	6
Experimento	Placa curva
Tensión [kV]	10
Frecuencia [Hz]	350
Intervalo de muestra [s]	30
Número de ciclos	1500

Tabla B.96: Datos de entrada del análisis de probeta N°20, muestreo 6.

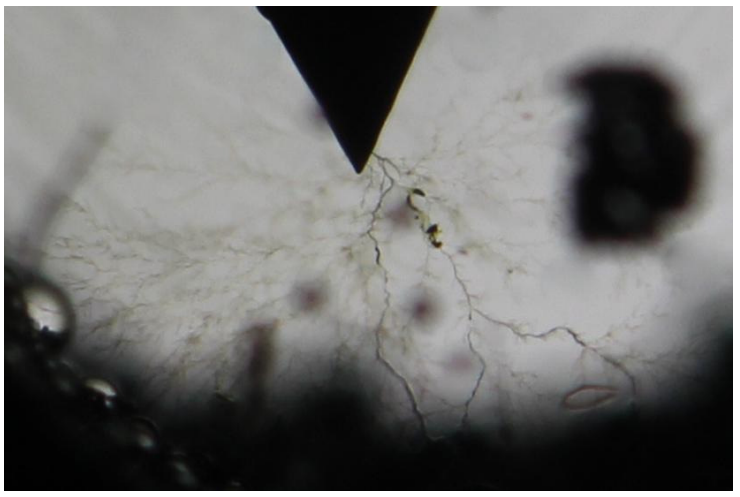


Figura B.95: Crecimiento de árboles de probeta N°20, muestreo 6.

Número de descargas	207756
Carga máxima [pC]	104.7302
Q_{95} [pC]	7.0062
Largo de árbol [μm]	2005

Tabla B.97: Datos de salida del análisis de probeta N°20, muestreo 6.

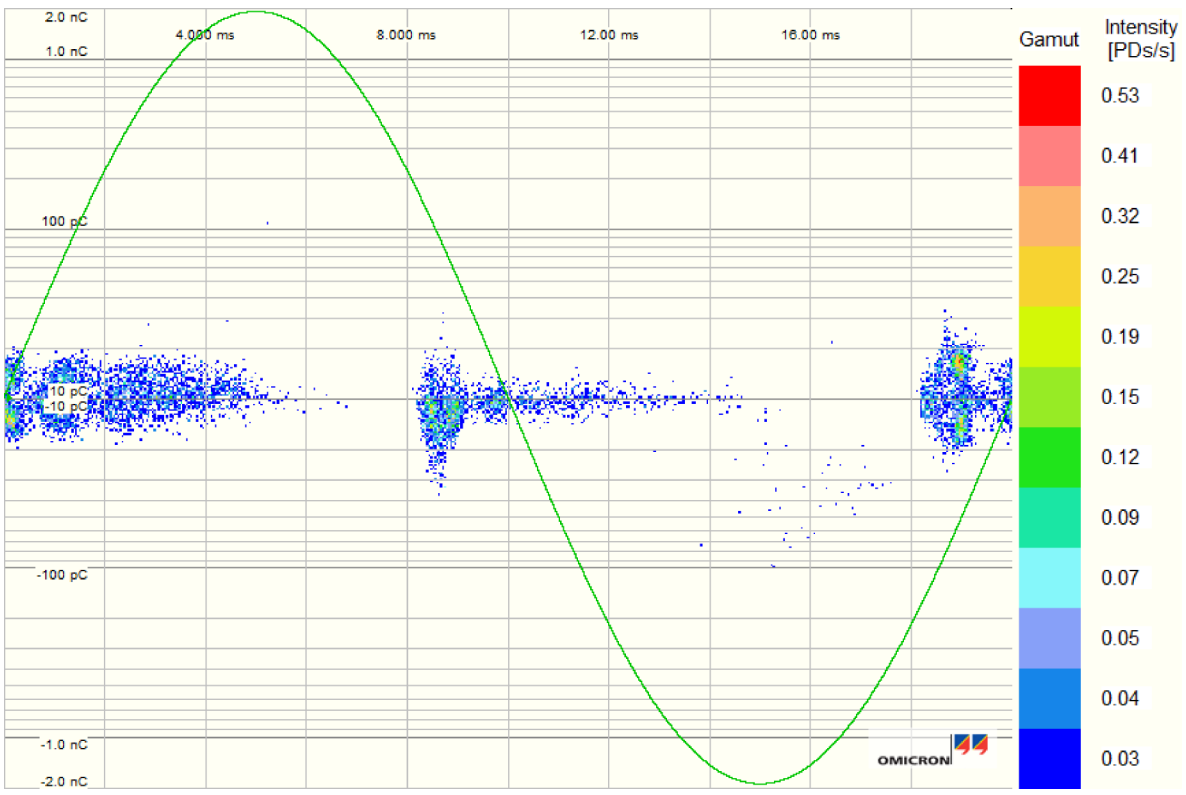


Figura B.96: PRPD probeta N°20, muestreo 6.

Anexo C

Recomendaciones experimentales para probetas con múltiples agujas

C.1 Recomendaciones para la fabricación de probetas de múltiples agujas o con placa curva

- **Reutilización de agujas:** Solo las agujas de precisión pueden ser reutilizadas. Las agujas hipodérmicas muy rara vez pueden ser reutilizadas, y generalmente no vale la pena.
- **Extraer aguja hipodérmica**: Las agujas hipodérmicas vienen unidas a elementos plásticos en uno de sus extremos, con parte de la aguja escondida. Es posible romper esta unión utilizando un alicate, para luego extraer la aguja completa sin necesidad de cortarla.
- **Pasar las agujas por acetona:** Para esto usar una placa Petri plana con tapa y cubrir las agujas a usar con la acetona, esto se debe realizar al menos 30 minutos antes de utilizarla.
- **Limpiar moldes:** Es importante quitar los restos de la fabricación (basuras blancas), para esto se puede usar agua (se debe quitar la humedad con el horno o usando un secador) o alcohol. También se puede utilizar papel libre de pelusas para secar los excesos.
- **Poner tapa al molde:** Para esto, no puede utilizarse mica plástica, pues esta no mantiene su forma en moldes más grandes que los de una aguja. En su lugar, se debe utilizar plástico más firme, sin textura. Este plástico se debe dimensionar y adherir utilizando cinta adhesiva a un extremo del molde. Según la calidad de la tapa utilizada, podría ser reutilizable.
- **Ajustar las agujas:** Tras la limpieza de las agujas, estas se deben colocar en los sujetadores, utilizando una llave Allen para apretar los tornillos.

  - La aguja debe ajustarse evitando que esta se doble, utilizando ambos tornillos para lograr que su posición sea lo más vertical posible.
  - Para determinar la altura, se debe colocar un espaciador de la medida deseada dentro del molde a utilizar (típicamente 2[mm] para muestras con múltiples agujas, y lo más cercano a 0[mm] posible para muestras con placa curva), y colocar el sujetador en su posición. Cada aguja debe rozar el espaciador (con cuidado de no estropear la aguja), para asegurar que todas las agujas están equiespaciadas.
  - En el caso de probetas con placa curva, se debe seleccionar y colocar el molde interno de teflón antes de ajustar la aguja.

- **Mezclar la resina:** Para esto se necesita de una pesa, un vaso de mezcla y una varilla mezcladora.
  - Un vaso de 50ml es ideal. Este no se debe llenar por sobre 3/4 de su volumen.
  - La razón entre el peso de resina y endurecedor a utilizar es de 2:1. Una mezcla de 30 gramos en total, alcanza para llenar dos moldes de medidas 10[mm]x20[mm]x60[mm].
  - Al hacer vacío, no sobrepasar los 20 a 25 minutos desde que se juntan la resina con el endurecedor.
  - Si durante el proceso de vacío, las burbujas que emerjan de la mezcla alcanzan el borde del recipiente, se puede quitar el vacío y luego repetirlo.
  - Se deben quitar todas las burbujas que sea posible.
  - Se debe dejar cerca de 10[mm] del molde sin llenar para colocar los sujetadores.
  - En caso de que, al seguir estos pasos, la mezcla final resulte "sucia" o las piezas fabricadas presenten ondulaciones, esto podría estar provocado por la calidad de la resina.
  - Se puede reducir el problema si la resina en el vaso, antes de mezclarla con el endurecedor, se coloca a baño maría. Para esto, se debe colocar el vaso dentro de otro recipiente resistente al calor más grande, y colocar agua caliente entre ambos, con cuidado de que la resina no se moje. Con la resina caliente, se pueden seguir los mismos pasos anteriores.

- **Proceso de curado:** Ajustar temperatura del horno a 25[°C] durante 24 horas.
- **Proceso de post-curado:** Elevar temperatura del horno a 50[°C] por 15 horas, de manera paulatina, idealmente en escalones de 35[°C] por una hora, 45[°C] por una hora y luego 50[°C] por 13 horas.

C.2 Recomendaciones para procedimientos de iniciación de probetas de múltiples agujas

C.2.1 Preparación de probeta

- Se recomienda utilizar únicamente el método de iniciación rápida en aceite.
- Para esto se necesita formar el circuito balanceado por la probeta a iniciar (C_a) y una libre de descargas (C_k).
- Se debe asegurar que los electrodos queden bien ajustados y las probetas bien sujetas, para evitar movimientos durante este proceso. Si es necesario, utilizar el electrodo delgado, para alimentar una única aguja sin hacer contacto con las demás de la muestra.
- Se le debe colocar cobre adhesivo a la cara inferior de la probeta a iniciar.
- Se debe seleccionar y marcar una cara de la probeta para que sea la cara frontal.

C.2.2 Preparación del circuito

- Conectar OMICRON al computador:
  - Conectar la referencia de tensión directamente desde la referencia que entrega el amplificador. Esta referencia también va al osciloscopio de monitoreo (junto a la corriente) y si hay un cable extra se debe desconectar (normalmente el que va al osciloscopio de medición queda conectado y hay que quitarlo).
  - Conectar a la entrada PD directamente la salida del circuito de substracción (cable azul rígido).
  - Conectar el cable de fibra óptica.
  - Conectar el cable USB al computador (Usar el conector USB 3.0).
  - Esto se usa como monitoreo del proceso de iniciación.
- Revisar que el generador de señales, vaya directamente a la entrada del amplificador (INPUT SIGNAL) y al osciloscopio de monitoreo.
- Conectar el cable BNC que sale del conector CAT (REMOTE) directamente al circuito con el Arduino. Recordar usar en modalidad REMOTE para elevar tensión desde fuera del circuito.

- Conectar el circuito con Arduino al computador usando el cable USB y probar que el programa controle el amplificador de manera correcta.
  - Iniciar el programa de control remoto y revisar que accione los relés como corresponde (se escucha la acción de los relés sin problemas). Dejar en el estado en que inhabilita la salida de alta tensión.
  - Revisar que hay tensión cero en la señal de entrada al amplificador.
  - Levantar el botón gris de OFF para habilitar el control remoto (hay que recordar que este botón inhabilita en todos los casos que se pueda salir con alta tensión).
  - Salir del área de trabajo y probar que se encienda el led rojo que indica que se eleva tensión (HV ON). El led verde debe mantenerse encendido durante todos los pasos (HV OFF) hasta que se activa el rojo.
  - Si lo anterior funciona, se pasa hacer una prueba con una tensión de $0.5[V_{rms}]$ (generador de señales) que genera $1[kV_{rms}]$ a la salida, con el fin de visualizar esto en el OMICRON y calibrar el factor (suele ser cercano a 2000). Hay que recordar que el generador eleva la tensión por 2000.

C.2.3 Preparación de cámara

- Sacar la cámara del bolso y conectar el lente macro directamente (lente Canon MP-E 65mm o lente Canon EF 100mm). Utilizar extensores si es necesario.
- Conectar el cable de carga y el cable USB, para luego instalar la cámara el sujetador cuidando que quede bien firme.
- Al encender la cámara se abre automáticamente el programa en el computador, de este hay que usar el control remoto.
- En el programa se debe seleccionar la opción de visión directa, que transmite directamente lo que se ve en la cámara en tiempo real.
- Con lo anterior listo, mover el lente y mover el enfoque de este para encontrar la aguja de la probeta a iniciar, luego poner la visión x10 en la punta de la aguja y buscar el mejor enfoque posible.
- Para esto, hay que recordar que se debe poner la probeta lo más cerca posible de un lado del tanque y hay que encender el foco de iluminación.

- El ajuste del enfoque de la cámara se debe hacer al final cuando todo lo demás esté listo, ya que cualquier movimiento puede cambiar la visión.

- Hay que recordar que el enfoque tiene límites y que es suficiente con tener la capacidad de visualizar un pequeño árbol creciendo. (si se busca la perfección puede demorar mucho tiempo esta parte).

C.2.4 Proceso de iniciación del árbol

- Con los ajustes realizados debe dar inicio el proceso de iniciación. Hay que considerar que para esto se va a necesitar un cronómetro.

- Siguiendo el método de iniciación rápido (se puede utilizar el método normal para muestras con placa curva), se debe elevar la tensión a razón de 100[mV/s] en el generador de señales (o 200[V/s] de tensión real a la salida del Trek), a 50[Hz]. Este proceso continúa hasta que ocurra la iniciación o se alcancen los 7[V] de salida en el generador de señales.

- En caso de no ocurrir la iniciación, se procede a elevar la frecuencia desde 50[Hz] hasta 350[Hz] de 100[Hz] en 100[Hz], esperando 10 segundos en cada frecuencia.

- En caso de ocurrir iniciación, se debe desconectar la alimentación, ya sea utilizando el control remoto o el generador de señales, de forma inmediata. Se debe entonces anotar la condición en que ocurrió y el tiempo que haya tomado.

- Si la probeta inició, se debe enumerar (por ejemplo: PXX), anotar alguna observación respecto a la forma de inicio (ej: si el árbol nace por los costados o por la punta) y el estado general de la probeta (Burbujas o alguna anomalía). Anotar la numeración en la probeta por el lado en el que se observó para recordar colocarla en la misma posición al ensayarla. Luego envolverla en un papel y cuidando que no se raye ni se manipule demasiado la aguja. Al papel también en poner la numeración.

- Si se utilizó el método de iniciación rápida, y la aguja ensayada no inició, este se puede repetir en otra oportunidad. Si continua sin iniciar, la probeta se debe descartar.

- Luego pasar a la siguiente aguja o probeta para iniciar.

C.3 Recomendaciones para procedimientos en ensayos de crecimiento de árboles

C.3.1 Preparación de probetas

- El tanque donde se ubican las probetas para el circuito balanceado se debe preparar llenando el tanque con silicona previamente secada al menos 12hrs a temperatura de 60°C. La silicona debe llenar al menos la parte curvada de los electrodos empleados con el fin de reducir las descargas superficiales.
- El tanque con las probetas dentro se le debe aplicar vacío durante 30min, para lograr que el aire que pueda quedar en los intersticios de los electrodos salga, con el fin de reducir las descargas parciales que se puedan probar en esas zonas.
- Cuidar que la silicona no suba por los cables (tratar de evitarlo), aunque hay veces en que es inevitable.
- Las probetas en los electrodos deben quedar bien sujetas para evitar cualquier movimiento durante el ensayo, ya que eso implica parar el ensayo y por ende perder el ensayo dependiendo del grado de avance del árbol.
- Ubicar la probeta ensayada bien cerca de uno de los costados del tanque, para mejorar la visión de la cámara.

C.3.2 Calibración de Omicron

- El equipo Omicron se debe calibrar para 3 niveles de descargas al menos (10[pC], 100[pC], 1[nC]), con esto se cubre bastante el espectro, pero en el ensayo usar la configuración de 10[pC] para evitar que se cuele mucho ruido en la medición de descargas en Omicron (en su mayoría esas descargas son más grandes).
- Los valores de factor de ajuste para probetas con 2mm de gap mencionados como referencia en otros documentos (2 para 10[pC], y entre 6 y 9 para 100[pC] y 1000[pC]) no son representativos para muestras de múltiples agujas, las cuales varían de gran manera según construcción.
- No olvidar este ajuste, ya que es vital para interpretar las descargas medidas por Omicron.

C.3.3 Anotaciones importantes para los ensayos

- Para cada ensayo se recomienda anotar los factores de la calibración de Omicron. Probeta ensayada, frecuencia ensayada y tensión aplicada. También es importante anotar la fecha del ensayo.

- Anotar cualquier observación que le parezca pertinente realizar. Por ejemplo, las descargas desaparecieron o se observa que había mucho ruido ingresando a la medición o no se logra ver ruido, etc.