

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Eléctrica

Proyecto de Investigación
**Caracterización visual de descargas deslizantes en la
interfaz líquido–sólido con tensión en corriente
directa negativa**

Trimestre 19 – O

Presentado por:

Mario Rubén González Ambriz

2112043528

Asesores:

Dr. José Luis Hernández Ávila

Dr. César Simón López Monsalvo

Declaratoria

Yo, Dr. José Luis Hernández Ávila, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Dr. César Simón López Monsalvo, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Mario Rubén González Ambriz, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Agradecimientos

A todas las personas que me extendieron la mano para que este ciclo de mi vida pudiese concluirse, porque sin su confianza, cariño y paciencia nada de esto sería posible.

Agradezco a Dios por todo lo que me manda para forjar mi destino.

Agradezco a mi madre por su colaboración para mi educación, por el amor que me brinda día a día, por su apoyo incondicional y por todo aquello que no tengo palabras para ella.

Agradezco a mi padre por brindarme su apoyo para realizar mis objetivos.

También agradezco a mis hermanas que me alentaron a no rendirme y alcázar una de mis metas fijadas.

Agradezco a la Uam-Azc por todo lo que me brindó, así como también a todo esos profesores y buenos amigos que encontré al paso por mi vida universitaria.

Agradezco a mi especial amiga que me brindó sus consejos para no flaquear y acompañarme en la etapa final de este objetivo.

Quiero hacer un agradecimiento a mí, por no rendirme cuando existieron situaciones adversas y alcanzar uno de mis varios objetivos de vida.

Gracias por todo a cada uno de ustedes.

Resumen

En este proyecto se realizó la caracterización de la descarga deslizante (creeping discharge) en una interfaz líquido – sólido con tensión en corriente directa y polaridad negativa. Se emplearon tres configuraciones de electrodos aterrizados (aro, signo de interrogación y círculo).

Para el estudio de la descarga deslizante no existe un único modelo para su análisis, por lo que se estudiaron diversos trabajos que se describen el comportamiento de este tipo de descarga, en diferentes condiciones. A partir de esto se proponer un método que facilitó el análisis de caracterización de la descarga deslizante. Experimentalmente se logró obtener información para trazar la curva de histéresis de corriente-voltaje (I-V) y caracterizar la aparición de descargas deslizantes (DD) para cada uno de los electrodos anteriormente mencionados.

El estudio de este tipo de descarga parcial es relevante ya que, con la presencia de las descargas parciales o superficiales, se puede estimar la vida promedio de un material eléctrico entre otras aplicaciones.

Se llevaron a cabo varias pruebas para observar el comportamiento de la descarga en diversas condiciones. Se calcula la velocidad de propagación de descarga tomando en cuenta la diferencia de tiempo y distancia de fotogramas de un evento de este tipo.

Índice General

Declaratoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	3
Índice General	4
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
Índice de grafica	7
Capítulo 1	8
1.1 Introducción	8
1.2 Antecedentes	9
1.3 Justificación.....	12
1.4 Objetivos	13
Capítulo 2	14
2.1 Descargas parciales	14
2.2 Fenómeno Electrohidrodinámico	15
Capítulo 3	16
3.1 Instrumentación.....	16
3.2 Equipo eléctrico para medición.....	16
3.3 Materiales empleados.....	18
Capítulo 4	20
4.1 Caracterización de la descarga deslizante	20
4.2 Descripción del procedimiento experimental.....	20
Capítulo 5	22
5.1 Caracterización y análisis de resultados de las pruebas	22
5.2 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Aro (O).	22
5.2.1 Análisis de resultados electrodo Aro.....	25
5.3 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Signo de interrogación (?).	29
5.3.1 Análisis de resultados electrodo Signo de interrogación.....	32
5.4 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Círculo (●).....	35
5.4.1 Análisis de resultados electrodo Círculo	39

5.5	Comparación de los electros aterrizados empleados para la caracterización de la descarga.....	42
Capítulo 6	45
6.1	Propagación de la descarga deslizando	45
6.2	Determinación de la velocidad de propagación de la descarga deslizando	45
6.3	Propagación de la descarga deslizando electrodo Aro	47
6.4	Propagación de la descarga deslizando electrodo Signo de interrogación	47
6.5	Propagación de la descarga deslizando electrodo Círculo.....	48
6.6	Comparación de la estimación de las velocidades de propagación de los electrodos utilizados.	48
Conclusión	49
Referencia	50
Apéndices	52

Índice de figuras

Figura 2. 1 Descargas Parciales. Descripción de cada inciso en el texto.....	15
Figura 3. 1 Fuente de alto voltaje.....	16
Figura 3. 2 Electrómetro digital.....	17
Figura 3. 3 Multímetro digital.	17
Figura 3. 4 Sonda atenuadora de alta tensión.	17
Figura 3. 5 Papel Kraft.	18
Figura 3. 6 Electrodo aterrizados.....	18
Figura 3. 7 Electrodo de alta tensión (aguja de acupuntura).....	19
Figura 4. 1 Montaje físico del experimento para la caracterización de la descarga deslizante.....	21
Figura 5. 1 Montaje experimental para la configuración de Aro.	22
Figura 5. 2 Efecto Sumoto en el electrodo de Aro.	25
Figura 5. 3 Fenómeno Electrohidrodinámico en el electrodo de Aro.....	26
Figura 5. 4 Descarga Deslizante en el electrodo de Aro.....	26
Figura 5. 5 Presencia de torbellinos en el electrodo de Aro.	27
Figura 5. 6 Evacuación del fluido en el electrodo de Aro.....	27
Figura 5. 7 Montaje experimental para la configuración de Signo de interrogación.	29
Figura 5. 8 Efecto Sumoto en el electrodo Signo de interrogación.	32
Figura 5. 9 Fenómeno Electrohidrodinámico en el electrodo Signo de interrogación.	33
Figura 5. 10 Descarga Deslizante en el electrodo Signo de interrogación.	33
Figura 5. 11 Presencia de torbellinos en el electrodo Signo de interrogación.	34
Figura 5. 12 Evacuación del fluido en el electrodo Signo de interrogación.	34
Figura 5. 13 Montaje experimental para la configuración de Círculo.....	36
Figura 5. 14 Efecto Sumoto electrodo Círculo.	39
Figura 5. 15 Fenómeno Electrohidrodinámico electrodo Círculo.....	40
Figura 5. 16 Descarga Deslizante electrodo Círculo.....	40
Figura 5. 17 Perturbación de torbellinos electrodo Círculo.	40
Figura 5. 18 Evacuación del aceite electrodo Círculo.....	41
Figura 6. 1 Vegas Pro 13. Video cuadro por cuadro.....	45
Figura 6. 2 Video to JPG converter. Imágenes cuadro a cuadro.	46
Figura 6. 3 ImageJ. Medición de Longitudes.	46

Índice de tablas

Tabla 5. 1 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Aro.....	23
Tabla 5. 2 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Aro.....	23
Tabla 5. 3 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión, electrodo Aro.	25
Tabla 5. 4 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro.	28
Tabla 5. 5 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo de Aro.	29
Tabla 5. 6 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Signo de interrogación.	30
Tabla 5. 7 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Signo de interrogación.	30
Tabla 5. 8 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión electrodo Signo de interrogación.	32
Tabla 5. 9 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación.	35
Tabla 5. 10 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo de Signo de interrogación.	35
Tabla 5. 11 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Círculo.	37
Tabla 5. 12 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Círculo.	37
Tabla 5. 13 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión electrodo Círculo.	39
Tabla 5. 14 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo.....	41
Tabla 5. 15 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo Círculo.	42
Tabla 5. 16 Descarga Deslizante por cada uno de los electrodos aterrizados.	42
Tabla 5. 17 Diferencia de tensión de aparición de la DD en kV entre cada uno de los electrodos.	44
Tabla 5. 18 Diferencia de corriente de aparición de la DD en Amperes entre cada uno de los electrodos.	44
Tabla 6. 1 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Aro.....	47
Tabla 6. 2 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Signo de interrogación.	47
Tabla 6. 3 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Círculo.....	48

Índice de grafica

Gráfica 5. 1 Curva de histéresis corriente-tensión, electrodo Aro.....	24
Gráfica 5. 2 Curva de histéresis corriente-tensión electrodo Signo de interrogación.	31
Gráfica 5. 3 Curva de histéresis corriente-tensión electrodo Círculo.	38
Gráfica 5. 4 Comparación entre los electrodos empleados y aparición de descarga deslizantes (DD).	43

Capítulo 1

1.1 Introducción

La descarga parcial (PD) es una descarga eléctrica localizada, que limita el aislamiento entre los conductores y que puede ocurrir o no adyacente a un conductor.

Las descargas parciales son, en general, una consecuencia de las concentraciones de tensión eléctrica local en el aislamiento o en la superficie del aislamiento.

Generalmente, tales descargas aparecen como pulsos de duración de mucho menos de 1 μ s. Sin embargo, pueden ocurrir formas más continuas, como por ejemplo las llamadas descargas sin pulso en dieléctricos gaseosos [1].

El presente proyecto de investigación tiene el objetivo caracterizar el efecto de descarga deslizante (consecuencia de descargas parciales) con polarización negativa en aceite vegetal, con el propósito de dar continuidad a un proyecto previo realizado con polaridad positiva. [2].

Max Toepler estudió las descargas deslizantes en la década de 1920 por primera vez [3]. Los patrones de descarga deslizante y sus longitudes finales L_f (de detención) dependen del tipo de aislante y su geometría, la amplitud y la polaridad del voltaje. El voltaje umbral de iniciación para las descargas negativas es más alto que el positivo. Además, el voltaje requerido para obtener un L_f dado es mayor cuando el electrodo punta es negativo [4].

Para la ejecución del presente trabajo se usó una configuración de electrodos en polaridad negativa donde el electrodo activo es una punta y, el electrodo aterrizado, puede tener dos siluetas distintas (signo de interrogación, círculo y aro). Los parámetros que se analizaron son: voltaje, propagación del fenómeno, distancia de propagación, velocidad de propagación y pureza del aceite (limpio y usado).

La descarga deslizante en la superficie de la sustancia aislante es más fácil de progresar que la descarga aérea y se considera una causa común de fallas eléctricas en el equipo eléctrico de potencia. Por lo tanto, el estudio de este fenómeno de descarga deslizante es importante, porque controlar la descarga deslizante permitiría mejorar en el diseño de aislamientos en los equipos de energía eléctrica [5].

1.2 Antecedentes

A continuación, se mencionan algunos de los trabajos experimentales realizados a cerca de descargas parciales.

En el trabajo de “Caracterización de una descarga deslizante en la interface de aceite de transformador y papel dieléctrico con alta tensión en corriente directa y polaridad positiva” [2], se analizó la caracterización de descargas deslizantes con polaridad positiva en CD con dos configuraciones de electrodos, donde los autores lograron determinar que la descarga deslizante presenta rangos de corriente y de tensión similares. Además, confirman que la descarga deslizante no depende de la forma del electrodo de baja tensión, ni de la posición en donde se coloque el electrodo punta (activo), asimismo, la descarga deslizante muestra una dependencia radial.

En el trabajo “Study of creeping discharge on hardwood timber under AC and DC voltages” [6], se estudiaron las descargas de CD positivas, CD negativas y en condiciones de CA en madera dura. La disposición del electrodo (asimétrico) consta de dos electrodos de latón. La superficie del electrodo de tierra es mucho mayor que el electrodo de alto voltaje, lo que hace que el campo eléctrico sea extremadamente no uniforme. Los voltajes aplicados fueron 12.7 kV (RMS). Los electrodos se colocan perpendiculares a la superficie de las muestras. Las muestras de madera dura, están en buenas condiciones sin ningún tratamiento químico, contaminación o descomposición. Los tipos de madera dura que se utilizaron en este proyecto fueron goma manchada y la ceniza de Silvertop.

Se analizó el desarrollo de descargas deslizantes a través de capturas de macroimagen altamente sensibles y con poca luz. El tiempo de ruptura se mide desde la primera aparición de ionización hasta la ruptura de la madera dura. Las variaciones del patrón de ionización en las descargas deslizantes se investigaron utilizando el software MATLAB. Se comprobó que el tiempo de ruptura de la madera dura, en el voltaje positivo de CD es más corto que el voltaje negativo de CD y el voltaje de CA. Los efectos capacitivos sobre el tiempo de ruptura también se estudian en este documento. Estos resultados proporcionan nuevas ideas sobre el papel de las descargas deslizantes que conducen a la descomposición de la madera de madera dura y la posterior quema de la madera

En el trabajo de “Creeping Discharge Characteristics of Nanofluid-Impregnated Pressboards Under AC Stress” [7], se estudian las descargas deslizantes sobre un trozo madera comprimida impregnada de aceite de transformador con nanopartículas. La acumulación de carga superficial se produce sobre en la madera comprimida, lo que conduce a una distorsión del campo eléctrico local, provocando una descarga deslizante o incluso, una falla prematura de la muestra de madera.

Recientemente, se han desarrollado nanofluidos a base de aceite para transformadores dispersando nanopartículas en el aceite. Se ha demostrado que tanto la resistencia a la descomposición en CA como de CD puede aumentar considerablemente mediante la sustitución del aceite puro del transformador por nanofluidos. Además, las nanopartículas pueden aumentar el voltaje de inicio de

la descarga deslizante y el voltaje de descarga instantánea de madera prensada impregnada con nanofluidos (NF) bajo voltaje de CA con una tasa creciente de 0.5 kV/s.

Se descubrió que las muestras de maderas impregnadas con NF poseen una mayor resistencia a la descarga por arrastre que la del cartón prensado impregnado de aceite puro. Los resultados de la permitividad y la acumulación de carga superficial y las características de desintegración revelan que la modificación de las nanopartículas no solo puede hacer que el campo eléctrico se distribuya de manera más uniforme en la interfaz del nanofluido / tablero de prensa debido a una mejor coincidencia en la permitividad, sino que también aumenta significativamente la velocidad de desintegración a través de un proceso de captura y extracción en trampas menos profundas. Por lo tanto, los efectos de descarga deslizante de los NF se atenúan mediante la modificación de las nanopartículas de TiO_2 .

En el trabajo de “Evolution and Discharge Pattern of Creeping Discharge at Aged Oil/Pressboard Interface” [8]., se estudia la evolución y el patrón que sigue la descarga deslizante en las interfaces de aceite/cartón prensado de diferentes edades. Además de las características de descargas parciales, este trabajo también se investigó los fenómenos asociados y las variaciones de temperatura durante la descarga deslizante. Los autores realizaron el análisis de gases libres y de gas disuelto en aceite para la identificación de fallas. Por último, las muestras de madera prensada de interés, fueron sometidas a microscopía para un análisis detallado post mortem.

La metodología experimental que utilizaron fue la siguiente: Se uso una configuración de electrodo de punta-plano para aplicar un impulso de CA extremadamente divergente en la interfaz de aceite/cartón prensado. El electrodo de aguja posee un radio de punta de 15 μm y está conectado a la salida del transformador de prueba a través de una resistencia de protección R2 (50 k Ω). Se instaló una resistencia limitadora de corriente de entrada R1 (60 Ω) entre la fuente de alimentación de 230V y la entrada del transformador de prueba. El voltaje aplicado se mide a través de un divisor de voltaje compuesto por dos condensadores Cd1 (100 pF) y Cd2 (100 nF). La medición de descarga parcial (PD) se llevó a cabo utilizando un condensador de acoplamiento Cc (1200 pF) y una impedancia de medición que está conectada a la muestra de prueba en paralelo.

Se implementaron tres sensores térmicos de fibra óptica para registrar en tiempo real las temperaturas de la superficie del cartón prensado y el volumen de aceite durante el proceso de descarga. El proceso de descarga visual fue grabado por una cámara de alta resolución. Además, se conectó una bolsa de muestreo de gas a la celda de prueba hermética para recoger cualquier gas libre potencial, formado durante el proceso de descarga y se usó una botella hermética de aluminio para obtener muestras de aceite. Posteriormente, las muestras de gas libre y gas disuelto en aceite se analizaron por cromatografía de gases.

Se observaron dos patrones de descarga claramente diferentes, a saber, la descarga deslizante crónica y la descarga progresiva aguda. La descarga deslizante crónica que ocurre con todas las muestras de cartón prensado, mientras que la descarga deslizante aguda ocurre solo con el cartón prensado masivamente envejecido. Los resultados de la detección de descargas parciales, el

monitoreo de temperatura en línea y el análisis de gases indicaron que la descarga deslizante crónica está estrechamente relacionada con la fase de aceite, mientras que la descarga deslizante aguda involucra múltiples mecanismos de descarga. También se encontró que la grieta de carbonización en el interior del cartón prensado es la causa principal de la generación de burbujas y marcas blancas durante la descarga de arrastre aguda.

En el trabajo de “Creeping Discharge Development Over Insulator Surfaces in Natural Gases: Design and Implementation of Test Procedure” [9], se presenta un método de prueba, junto con una modelación de la configuración del electrodo hasta la implementación de la prueba final. Para fines de simulación, se utilizó un software que emplea el Método de Elementos Finitos (FEM).

La simulación muestra de la distribución del campo eléctrico a lo largo de la superficie del aislador y el cálculo de la tensión máxima del campo eléctrico en la configuración del electrodo personalizado. Siguiendo el diseño optimizado de los electrodos, se realizan una serie de pruebas utilizando muestras de material aislante de politetrafluoroetileno (PTFE) y resina epoxi. Estos dieléctricos están aislados por una mezcla gaseosa de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2) y se les aplica una tensión de CA, para replicar las condiciones de triple unión. Los autores usaron una configuración de electrodos punta-plano empleando dos métodos de análisis:

A. Diseño de electrodos.

El diseño de la configuración de electrodos elegida consiste en un electrodo de aguja, con un diámetro de punta de alta precisión de $20\ \mu\text{m}$, un diámetro del cuerpo de $0.51\ \text{mm}$, y un electrodo plano con potencial cero. Por conveniencia, la aguja está unida a un porta sonda fino, colocado perpendicularmente y a corta distancia con el centro del disco aislante de muestra. El electrodo plano incorpora una superficie plana junto con un escudo circular.

B. Simulación del método de elementos finitos (FEM)

La configuración de distribución de las líneas equipotenciales de una simulación electrostática cuando se aplica un voltaje de $V_{ap} = 20\ \text{kV}$ (RMS) al electrodo de aguja. La visualización presentada muestra la sección transversal de una geometría tridimensional detallada.

En este documento, se presenta todo el procedimiento de diseño e implementación de pruebas de descarga deslizante bajo la aplicación de voltaje de CA. Se considera la etapa inicial de simulación numérica de la configuración del electrodo para garantizar una distribución aceptable del campo eléctrico en el área donde se unen el gas, el aislante y el electrodo cargado.

Se realizan una serie de mediciones de voltaje y corriente asociada y se presentan algunos resultados típicos de estas. Las variaciones observadas en los resultados de la medición se atribuyeron a la presencia de diferentes gases y materiales aislantes.

1.3 Justificación

La descarga deslizante es un fenómeno eléctrico que se genera y progresa a lo largo de la superficie de las sustancias dieléctricas. Progresa fácilmente por la existencia de un electrodo de tierra [5]. La presencia de una magnitud significativa del componente tangencial de la intensidad del campo eléctrico es crítica para estimular las descargas superficiales y deslizantes [10]. La morfología de las descargas deslizantes varía según la polaridad del voltaje, el tipo de interfaz y la presión del gas [11].

Las descargas parciales son relevantes durante el periodo de vida de un aislamiento, ya que provocan el deterioro de este material a través de descargas de ionización presentándose diversos efectos. Para este proyecto de investigación se caracterizará uno de esos efectos, el cual serán las descargas deslizantes, visualizándolo en un medio líquido-sólido con alta tensión aplicada en corriente directa y en polaridad negativa.

La finalidad de este proyecto es poder analizar la propagación de las descargas deslizantes en una interfaz líquido-sólido debido a que estas se presentan en un transformador porque tenemos medios que se encuentran sumergidos en aceite y que están protegidos por aislantes sólidos que pueden ser resinas, papeles, entre otros y esos se encuentran en interfaz con el líquido. Además, se determinarán la distancia y la velocidad con la que se propagan en un tiempo establecido.

En el desarrollo se proponen dos electrodos en forma de signo de interrogación y de forma de aro (estos empleados en un trabajo previo [2]), para poder realizar la comparación de corrientes y voltajes de descargas deslizantes en polaridad positiva y en polaridad negativa.

El propósito de este trabajo es permitir desarrollar técnicas de investigación, el análisis de resultados y presentación de un informe. Con el objetivo de integrar la formación durante el lapso de la carrera.

1.4 Objetivos

Objetivo general:

- Caracterizar visualmente una descarga deslizante (creeping discharge) para un arreglo dieléctrico líquido-sólido.

Objetivos específicos:

- Analizar y comparar las imágenes obtenidas de la cámara Phantom de alta velocidad en polaridad positiva y en polaridad negativa.
- Caracterización de una descarga deslizante en la interfaz líquido-papel a través de la aplicación de alta tensión en corriente directa y polaridad negativa.
- Analizar la estructura que forman las descargas deslizantes en polaridad negativa desde el inicio hasta su expansión (propagación) durante un lapso de tiempo determinado.
- Definir las distancias y velocidades de propagación a través del tiempo establecido.

Capítulo 2

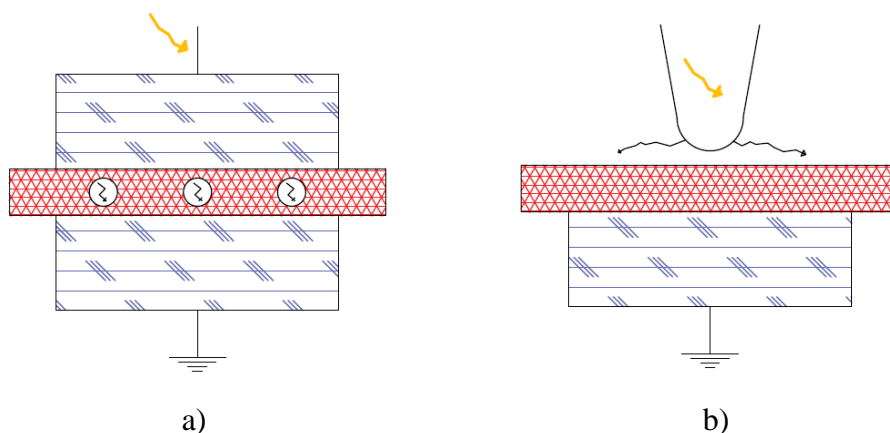
2.1 Descargas parciales

La descarga parcial está relacionada con las mediciones de descargas parciales de la Estándar Internacional de la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) “La descarga parcial (PD) es una descarga eléctrica localizada que solo une limitadamente el aislamiento entre los conductores y que puede ocurrir o no adyacente a un conductor”.

Es de relevancia del estudio de las descargas parciales el poder estimar la vida útil de los aislamientos en los materiales eléctricos. Cada descarga que se lleva a cabo en un material, irá deteriorando el medio material por el impacto de electrones de alta energía, provocando transformaciones químicas de muchos tipos.

Las descargas parciales dependerán de los materiales dieléctricos empleados, por lo tanto, unen parcialmente a los electrodos con la tensión aplicada. El aislamiento los materiales puede ser: sólidos, líquidos o gaseosos, o cualquier combinación de los anteriores mencionados.

El término descarga parcial puede subdividirse en diversas descargas: (a) descargas internas que ocurren en huecos o cavidades dentro de dieléctricos sólidos o líquidos; (b) descargas superficiales o deslizantes que aparecen en el límite de diferentes materiales de aislamiento; (c) descargas de corona que ocurren en dieléctricos gaseosos en presencia de campos no homogéneos; (d) impacto continuo de descargas en dieléctricos sólidos que forman canales de descarga (arborización), figura 2.1 [12].



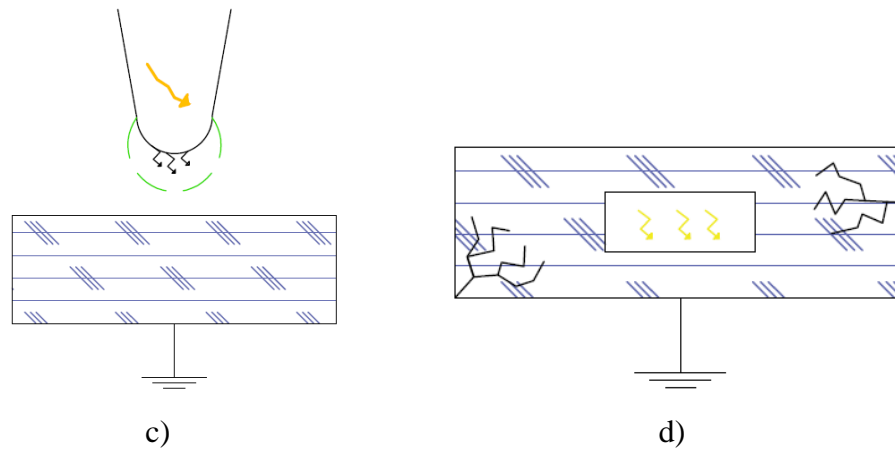


Figura 2. 1 Descargas Parciales. Descripción de cada inciso en el texto.

2.2 Fenómeno Electrohidrodinámico

Es una interacción entre los campos eléctricos y la materia líquida, que presenta una serie de fuerzas cambiantes dentro de la masa del fluido. Hertz fue uno de los primeros en observar el movimiento de rotación en sistemas dieléctricos líquidos-sólidos.

La electrohidrodinámica se puede considerar como una rama de la mecánica de fluidos relacionada con los efectos de la fuerza eléctrica. También puede considerarse como la parte de la electrodinámica que está involucrada con la influencia de los medios en movimiento en los campos eléctricos. En realidad, ambas son áreas combinadas, ya que muchos de los problemas más interesantes en electrohidrodinámica implican un efecto del movimiento del fluido como una influencia de los campos en el movimiento.

La palabra "electrohidrodinámica" es relativamente nueva. Los efectos electrostáticos en fluidos son conocidos por sus particularidades; a menudo son extremadamente dependientes de la conducción eléctrica. Sin embargo, los fundamentos de la mecánica de fluidos se forman a partir del trabajo que relaciona experimentos cuidadosamente diseñados con modelos analíticos.

Una característica destacada de las interacciones electrohidrodinámicas es la naturaleza de la intensidad del campo eléctrico, E . Las corrientes dinámicas son tan pequeñas que el campo magnético es despreciable, y las leyes que predominan son fundamentalmente la de la electrostática [13,14].

Capítulo 3

3.1 Instrumentación

Este capítulo se muestran los equipos, aparatos de medición y materiales empleados para el desarrollo experimental del proyecto.

En el capítulo 4 y 5 se muestra el montaje de la instrumentación para cada uno de los electrodos empleados.

3.2 Equipo eléctrico para medición

En este apartado se hace referencia a las características de operación de los equipos utilizados para determinar parámetros de medición para la parte de la caracterización de las descargas deslizantes (creeping discharge).

Fuente de alta tensión: Se empleo una fuente de alimentación reversible de alto voltaje en polaridad negativa, SPELLMAN, modelo SL600, con una salida de 0-20 kV y 30 mA. Esta fuente se presenta en la figura 3.1.



Figura 3. 1 Fuente de alto voltaje.

Electrómetro digital: Instrumento de medición de alta resistencia, KEITHLEY, modelo 6517A, para medición de corriente de descarga. Figura 3.2.



Figura 3. 2 Electrómetro digital.

Multímetro digital: Multímetro digital, KEYSIGHT, modelo U1231A, con una precisión de 0.5%.
Figura 3.3.



Figura 3. 3 Multímetro digital.

Sonda atenuadora de alta tensión: Atenuador de niveles de tensión, BK PRECISION, HIGH VOLTAGE PROBE, modelo PR-28A, salida DC 1-40 kV y en AC 1-28 kV. Figura 3.4.



Figura 3. 4 Sonda atenuadora de alta tensión.

En la figura 3.6a se observa el electrodo en forma de aro el cual tiene 39 mm de diámetro interno y 45 mm de diámetro externo y en el centro de este hay un círculo de 6 mm de diámetro. El aro y el círculo central están conectados entre sí.

En la figura 3.6b se observa el electrodo en forma de signo de interrogación, está formado por un semicírculo con un diámetro interno de 39 mm y un diámetro externo de 45 mm y la barra de la parte inferior de 35 mm de largo por 3 mm de ancho.

En la figura 3.6c se observa el electrodo de círculo de 45 mm de diámetro.

Electrodo de alta tensión: Aguja de acupuntura empleado como electrodo de alta tensión en polaridad negativa, con longitud de 0.04 m, con un diámetro de 0.22 mm y un radio de 90 micras.
Figura 3.7



Figura 3. 7 Electrodo de alta tensión (aguja de acupuntura).

Aceite vegetal de canola: Aceite de canola empleado como aislante líquido (fluido). Marca Great Value.

Alcohol isopropílico: Este se usó para la limpieza de los componentes empleados logrando así realizar otras pruebas.

Acido para grabar: Cloruro férrico (FeCl_3), para grabar circuitos impresos (electrodos aterrizados).

Computadora personal: Computadora personal para análisis y desarrollo del informe final, (computadora portátil marca HP, procesador AMD A8-7410 APU with AMD Radeon R5 Graphics 2.2.Ghz, memoria RAM 8GB, con sistema operativo Windows).

Capítulo 4

4.1 Caracterización de la descarga deslizante

Para la construcción experimental que permita visualizar la descarga deslizante, se requiere del análisis de diversas investigaciones que abordan este tipo de fenómeno, para así poder proponer un sistema que permita observar de manera sencilla el efecto que reproducen este tipo de fenómenos. Para nuestro montaje, la prioridad fue la seguridad de las personas y la seguridad de los equipos empleados para la maniobra experimental, así permitiendo obtener un mejor análisis del efecto de las descargas deslizantes.

4.2 Descripción del procedimiento experimental

El diseño del montaje experimental para la descarga deslizante, está individualizado a cada uno de los electrodos aterrizados, mencionados en el capítulo anterior. Este montaje general se muestra en la figura 4.1. empleando este montaje se caracterizó la curva de histéresis de la corriente y la tensión de la descarga deslizante.

La fuente de alimentación de corriente directa de alto voltaje en polaridad negativa se encuentra conectada a la sonda atenuada de alta tensión y al electrodo de alta tensión directamente. Mientras que de la sonda atenuadora se deriva a hacia el multímetro, el cual va a censar el voltaje aplicado al electrodo activo y su vez la sonda se aterriza a tierra. Por otra parte, del electrodo de alta tensión se encuentra colocado perpendicularmente al electrodo aterrizado, el cual que está sumergido en el fluido (aceite de canola) y la punta de la aguja se encuentra en contacto con el aislante sólido (papel Kraft). Para cada una de las pruebas realizadas la aguja es sustituida.

El papel Kraft, se encuentra pegado sobre el electrodo aterrizado y a su vez este electrodo está sujeto a la charola de acrílico. Se manejaron distintos volúmenes de fluido (200, 400 y 680 ml) para los experimentos.

El electrodo de baja tensión fue remplazado en cada prueba, a cada uno de ellos se conectó al electrómetro digital para censar la corriente de descarga en un rango de nanoamperes a microamperes.

En el soporte se coloca la charola, para facilitar su maniobra en cuanto a las alturas y ayudar a que las cámaras empleadas logran un mejor enfoque.

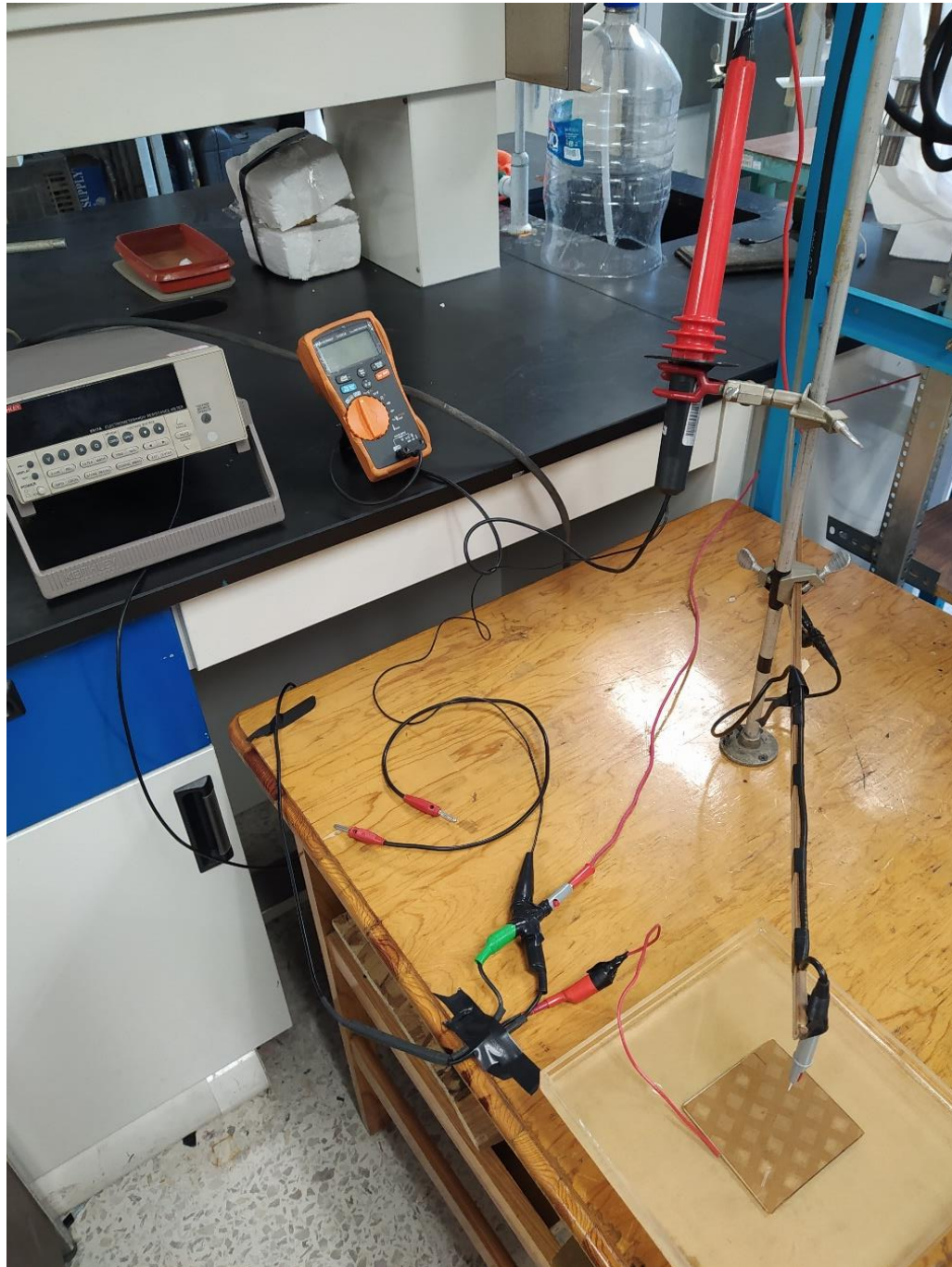


Figura 4. 1 Montaje físico del experimento para la caracterización de la descarga deslizando.

Capítulo 5

5.1 Caracterización y análisis de resultados de las pruebas

En este capítulo se reportan los datos obtenidos del a caracterización de la descarga deslizante por cada una de los electrodos empleados, así como el análisis de resultados.

5.2 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Aro (O).

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 15 kV.
- Nivel de líquido aislante 400 ml (aceite de canola).
- La altura del fluido empleado es $h=1\text{cm}$.
- Posición de los electrodos indicados en la figura 5.1 de montaje para el electrodo de Aro.

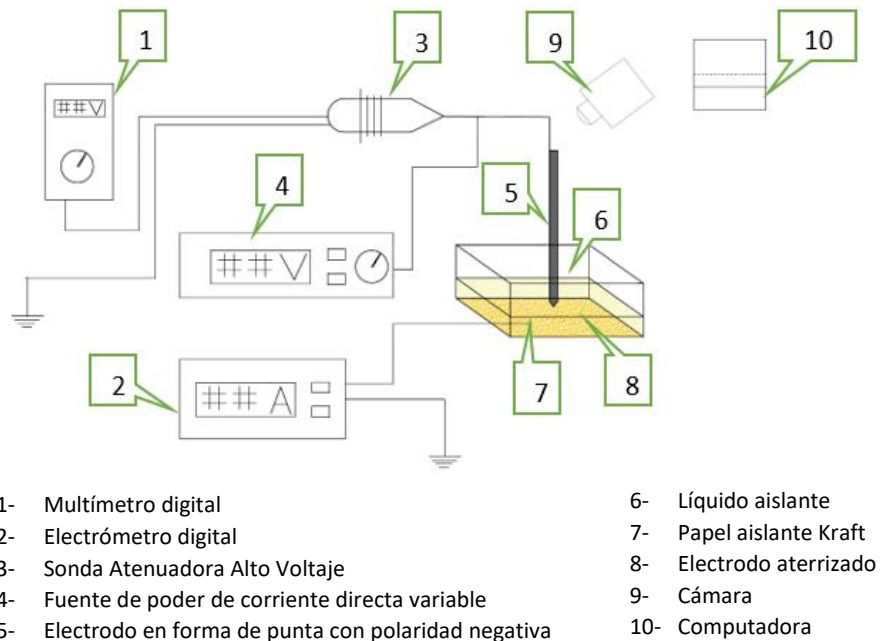


Figura 5. 1 Montaje experimental para la configuración de Aro.

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Aro.

En las tablas 5.1 y 5.2 se presentan los datos obtenidos del ascenso y descenso de la corriente y la tensión. A partir de estos datos registrados se gráfica la curva característica de corriente en función de la tensión mostrada en la gráfica 5.1.

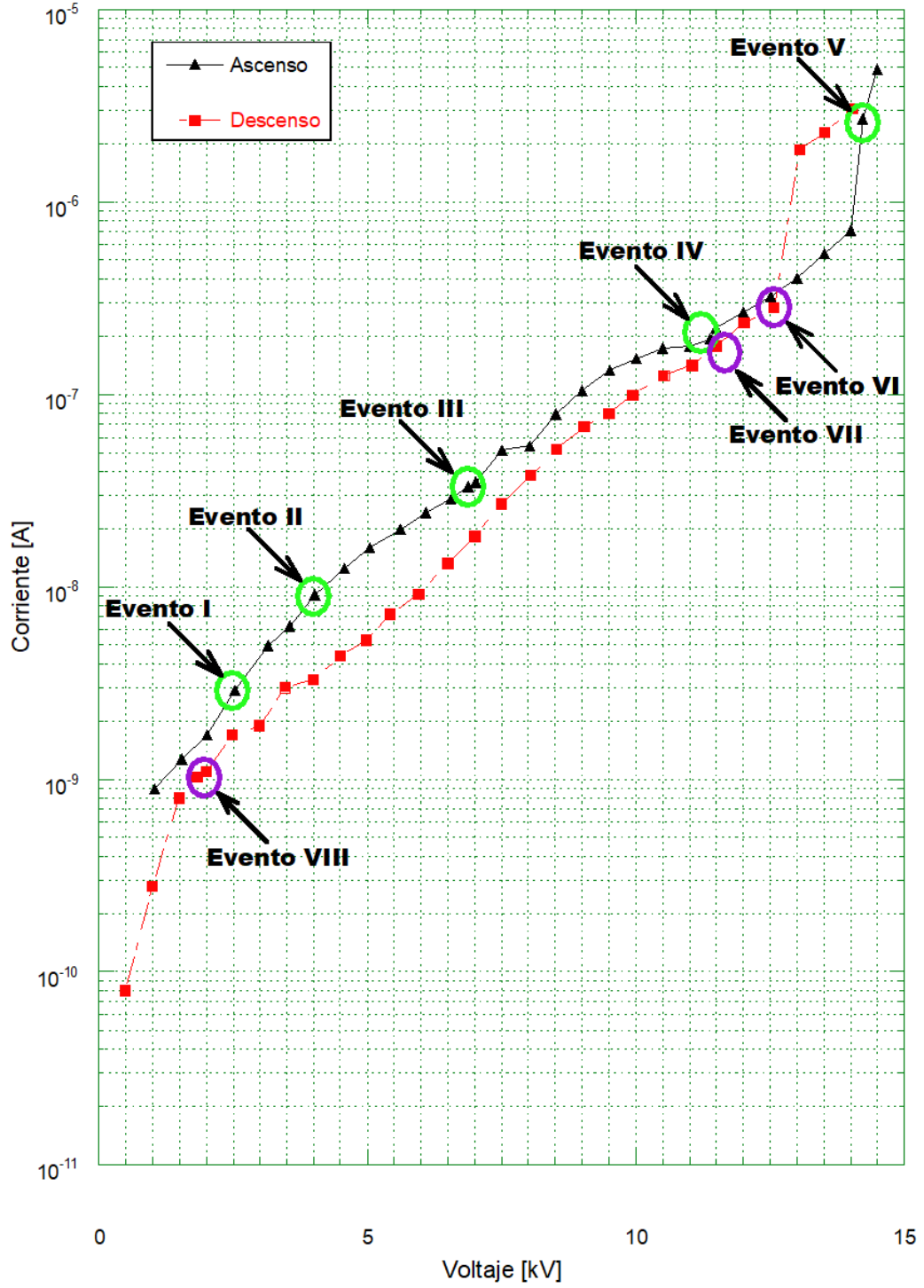
Tabla 5. 1 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Aro.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.516	5.840E-10
1.036	8.930E-10
1.553	1.273E-09
2.021	1.700E-09
2.527	2.900E-09
3.151	4.950E-09
3.555	6.250E-09
4.026	9.080E-09
4.572	1.248E-08
5.048	1.600E-08
5.610	1.990E-08
6.090	2.423E-08
6.551	2.871E-08
6.880	3.316E-08
7.020	3.490E-08
7.510	5.130E-08
8.020	5.420E-08
8.510	7.900E-08
9.000	1.050E-07
9.510	1.340E-07
10.000	1.540E-07
10.500	1.740E-07
11.000	1.790E-07
11.380	1.940E-07
11.500	2.205E-07
12.000	2.680E-07
12.520	3.250E-07
13.000	4.010E-07
13.510	5.390E-07
14.000	7.130E-07
14.230	2.700E-06
14.500	4.900E-06

Tabla 5. 2 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Aro.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
14.030	3.050E-06
13.520	2.300E-06
13.050	1.870E-06
12.570	2.810E-07
12.010	2.350E-07
11.500	1.790E-07
11.050	1.420E-07
10.520	1.250E-07
9.940	9.900E-08
9.500	8.000E-08
9.040	6.800E-08
8.520	5.200E-08
8.040	3.800E-08
7.500	2.700E-08
7.000	1.830E-08
6.500	1.320E-08
5.960	9.200E-09
5.420	7.200E-09
4.980	5.300E-09
4.500	4.400E-09
3.990	3.300E-09
3.470	3.000E-09
2.990	1.900E-09
2.490	1.700E-09
2.000	1.100E-09
1.828	1.030E-09
1.494	8.000E-10
0.994	2.800E-10
0.500	8.000E-11

Electrodo Aro - Día 1 - h=1cm



Gráfica 5. 1 Curva de histéresis corriente-tensión, electrodo Aro.

En la tabla 5.3 se describen los eventos señalados en la gráfica 5.1

Tabla 5. 3 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión, electrodo Aro.

Evento	Descripción
I	Aparición del efecto Sumoto
II	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	Presencia de la descarga deslizante
IV	Inicio de torbellinos
V	Evacuación del fluido
VI	Cierre del fluido
VII	Termino de torbellinos
VIII	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

5.2.1 Análisis de resultados electrodo Aro

Para el análisis de la caracterización de la descarga deslizante en el electrodo de aro, se aplicó una tensión en un rango de 500 a 15,000 volts y una corriente que variaba aproximadamente de los 8.0×10^{-11} a 4.90×10^{-6} amperes. En la gráfica 5.1, se muestran diversos eventos visualizados en la caracterización de la descarga, y donde el evento III es la parte fundamental que se analizó en este proyecto de investigación, correspondiente a de la descarga deslizante adicionalmente, se describe brevemente el resto de eventos observados.

- Evento I

En este evento se presenta el efecto Sumoto, el cual se presenta de la forma cónica ascendiendo a través del electrodo de alta tensión (aguja). La figura 5.2 muestra el cono creado por el efecto Sumoto. Al aumentar la tensión y la corriente, se incrementa la forma cónica, creciendo en volumen hasta alcanzar una altura máxima.



Figura 5. 2 Efecto Sumoto en el electrodo de Aro.

- Evento II

En este segundo evento, se presenta el fenómeno de movimiento electrohidrodinámico. La corriente radial da lugar a la fuerza de desplazamiento del fluido que depende de la intensidad del campo aplicado. La dirección del flujo va desde el centro donde se encuentra el electrodo de alta tensión desplazándose hacia el exterior del electrodo aterrizado. El efecto de electrohidrodinámico se observa en la figura 5.3. Este fenómeno se presenta hasta el evento VIII.

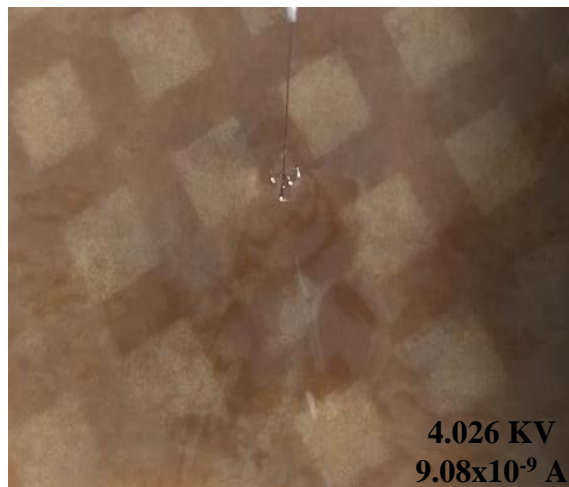


Figura 5. 3 Fenómeno Electrohidrodinámico en el electrodo de Aro.

- Evento III

Este es principal evento a analizar, ya que en este se producen las descargas deslizantes, que se logran apreciar a través de ligeros pulsos y que incrementan en frecuencia, conforme se aumenta el voltaje o el nivel de campo eléctrico. La descarga deslizante se da de forma más continúa logrando que el movimiento del fluido sea más notorio. Estos pulsos se observan en la figura 5.4.



Figura 5. 4 Descarga Deslizante en el electrodo de Aro.

- Evento IV

Para este cuarto evento se observa la aparición de torbellinos, los cuales se desplazan hacia el área transversal del electrodo aterrizado, localizándose en la forma del electrodo. Estos torbellinos van a ir apareciendo gradualmente conforme la tensión va incrementando. Este evento se visualiza en la figura 5.5.

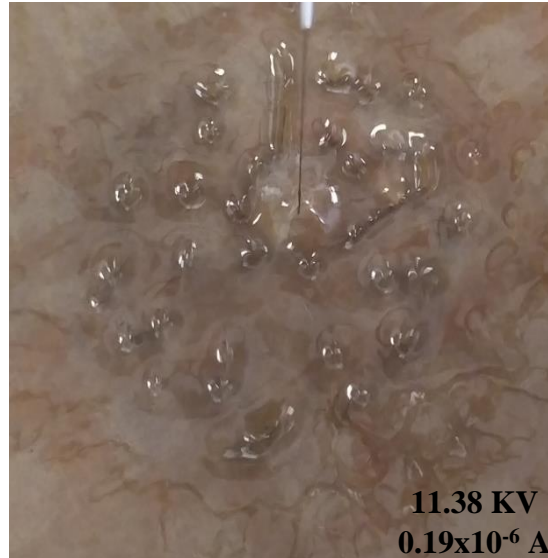


Figura 5. 5 Presencia de torbellinos en el electrodo de Aro.

- Evento V

En este último evento presentado del ascenso de la tensión, conforme se incrementa el voltaje se observa la evacuación del fluido hacia el exterior del límite del área del electrodo aterrizado se muestra en la figura 5.6 siguiente.

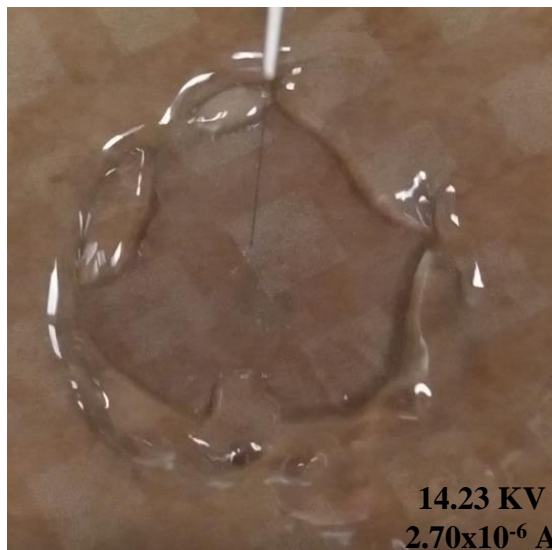


Figura 5. 6 Evacuación del fluido en el electrodo de Aro.

- Evento VI

En este evento se muestra el término del evento V. A partir de aquí se reduce la tensión aplicada y el fluido comienza a cerrar hasta dar por finalizado la evacuación del aceite y presentando nuevamente al evento IV que es la aparición de torbellinos.

- Evento VII

Ahora en este séptimo evento se da por finalizado el evento IV, desapareciendo los torbellinos y presentado nuevamente las descargas deslizantes a través de los pulsos y al movimiento de electrohidrodinámica.

- Evento VIII

Para esta zona de descenso de tensión, se observa la pérdida total de los eventos anteriores descritos.

En la tabla 5.4 mostrada a continuación se resumen los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos ya descritos. Los parámetros observados en esta tabla pueden oscilar debido a errores de percepción, contaminantes externos y también al factor de aire produciendo estas dos últimas afectaciones presente del campo eléctrico.

Tabla 5. 4 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	2.53	2.90×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	4.03	9.08×10^{-9}	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	6.88	3.32×10^{-8}	Presencia de la descarga deslizante
IV	11.38	1.90×10^{-5}	Inicio de torbellinos
V	14.23	2.70×10^{-6}	Evacuación del fluido
VI	12.57	2.80×10^{-7}	Cierre del fluido
VII	11.50	1.70×10^{-7}	Termino de torbellinos
VIII	2.00	1.10×10^{-9}	Finalización del efecto Sumoto y perdida del fenómeno de electrohidrodinámica

En la tabla 5.5 se observa las diferencias de tensión y corriente entre cada uno de los eventos señalados en la tabla 5.4. En esta tabla que se muestra a continuación, se logra observar que la diferencia de tensión requerida en estos eventos que es mayor es para que se produzcan el fenómeno de torbellinos, así como también se necesita de una mayor corriente que en los demás eventos para que el fluido pueda evacuarse hacia el límite del área del electrodo de Aro.

Tabla 5. 5 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo de Aro.

Δ / Δ Evento	$\Delta 1-2$	$\Delta 2-3$	$\Delta 3-4$	$\Delta 4-5$
ΔV [kV]	1.50	2.85	4.50	2.85
ΔI [A]	6.18×10^{-9}	2.41×10^{-8}	1.60×10^{-7}	2.50×10^{-6}

5.3 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Signo de interrogación (?).

Para realizar esta prueba con este otro electrodo aterrizado las condiciones utilizadas para generar la caracterización de la descarga deslizante son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 17,000 volts.
- Nivel de líquido aislante 400ml (aceite de canola).
- La altura del fluido empleado es $h=1\text{cm}$.
- Posición de los electrodos indicados en la figura 5.7.

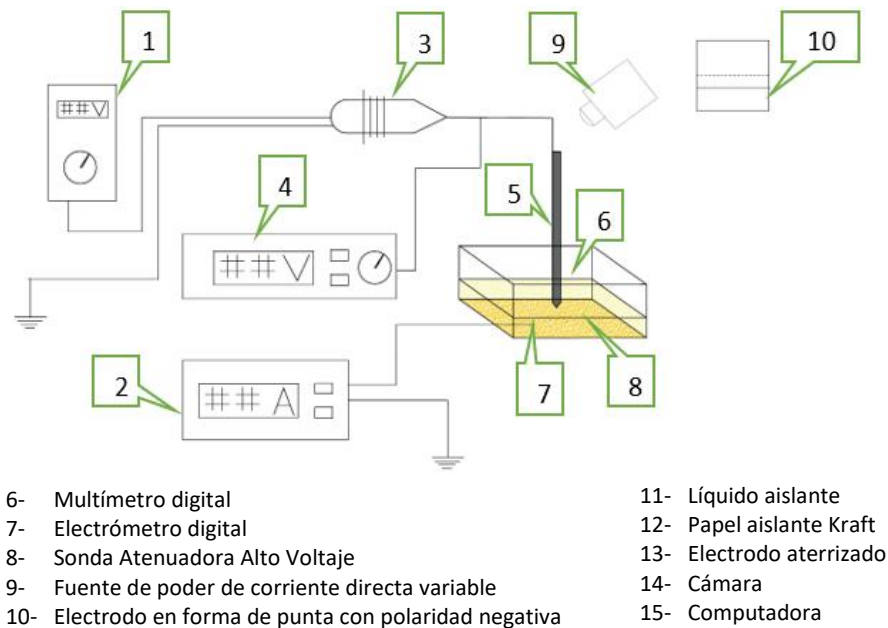


Figura 5. 7 Montaje experimental para la configuración de Signo de interrogación.

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Signo de interrogación.

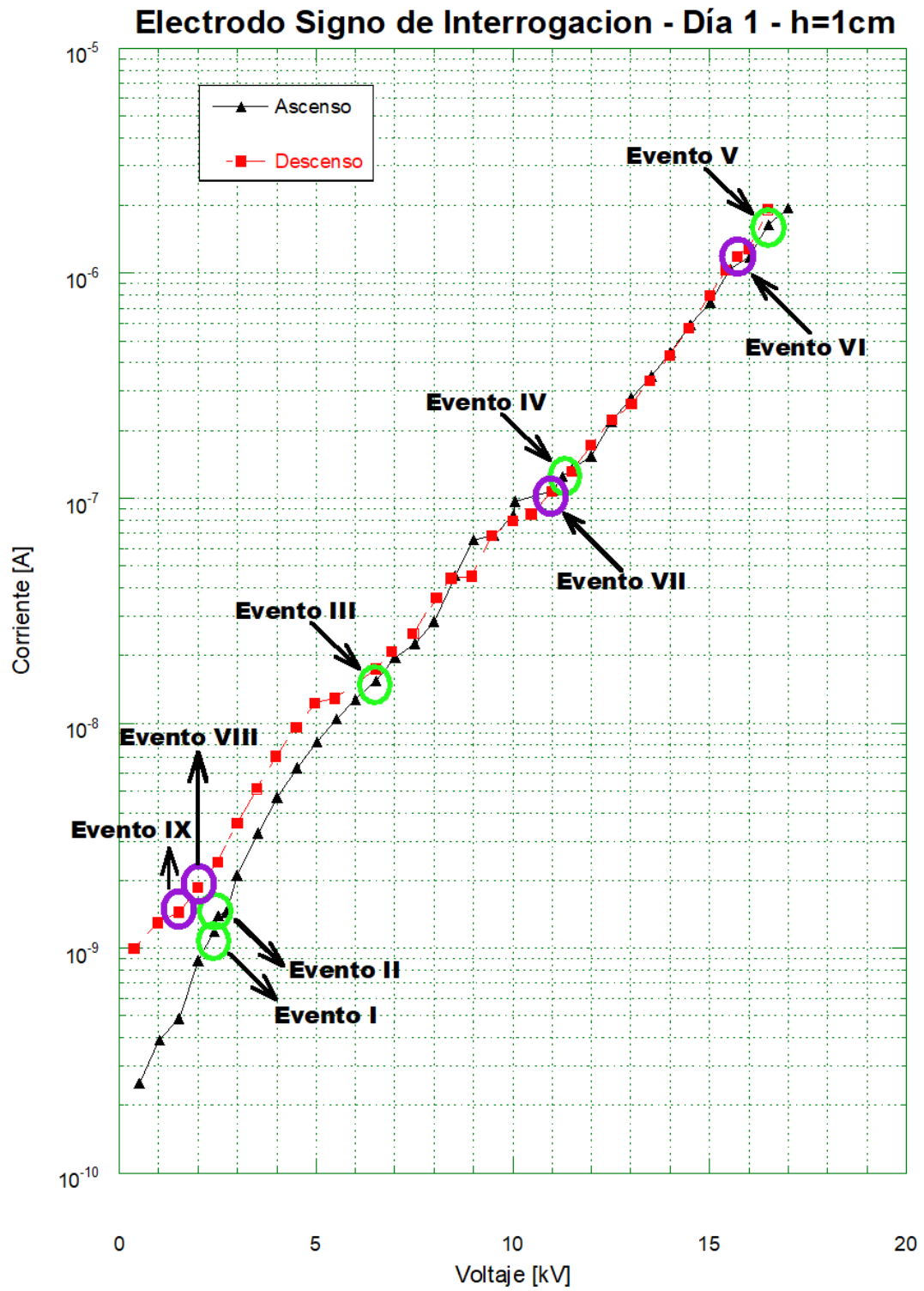
En las tablas 5.6 y 5.7 se muestran los datos del ascenso y descenso de la corriente en función de la tensión aplicada. A partir de estos registros se obtiene la curva característica de la tensión con la corriente que se muestra en la gráfica 5.2.

Tabla 5. 6 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Signo de interrogación.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.501	2.500E-10
1.027	3.900E-10
1.513	4.850E-10
2.006	8.790E-10
2.419	1.189E-09
2.512	1.395E-09
2.733	1.450E-09
3.005	2.108E-09
3.515	3.240E-09
4.011	4.690E-09
4.512	6.310E-09
5.018	8.270E-09
5.519	1.045E-08
6.000	1.275E-08
6.517	1.545E-08
7.010	1.963E-08
7.510	2.260E-08
8.000	2.830E-08
8.530	4.520E-08
9.010	6.530E-08
9.520	6.830E-08
10.010	8.400E-08
10.050	9.700E-08
11.010	1.080E-07
11.270	1.250E-07
11.510	1.350E-07
12.000	1.540E-07
12.510	2.200E-07
13.020	2.790E-07
13.530	3.490E-07
14.000	4.450E-07
14.510	5.890E-07
15.020	7.420E-07
15.540	1.043E-06
16.020	1.178E-06
16.510	1.643E-06
17.000	1.950E-06

Tabla 5. 7 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Signo de interrogación.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
16.490	1.920E-06
16.000	1.280E-06
15.700	1.190E-06
15.420	1.030E-06
15.000	7.950E-07
14.470	5.720E-07
13.990	4.320E-07
13.480	3.320E-07
13.020	2.620E-07
12.520	2.230E-07
11.990	1.720E-07
11.500	1.320E-07
11.000	1.070E-07
10.480	8.500E-08
10.000	7.900E-08
9.460	6.800E-08
8.960	4.500E-08
8.440	4.400E-08
8.060	3.600E-08
7.470	2.500E-08
6.920	2.080E-08
6.520	1.740E-08
5.490	1.290E-08
4.974	1.230E-08
4.490	9.600E-09
3.980	7.140E-09
3.492	5.120E-09
2.995	3.600E-09
2.502	2.400E-09
2.000	1.870E-09
1.524	1.450E-09
0.978	1.300E-09
0.363	1.000E-09



Gráfica 5. 2 Curva de histéresis corriente-tensión electrodo Signo de interrogación.

En la siguiente tabla 5.8 se muestran los eventos indicados en la gráfica 5.2

Tabla 5. 8 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión electrodo Signo de interrogación.

Evento	Descripción
I	Aparición del efecto Sumoto
II	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	Presencia de la descarga deslizante
IV	Inicio de torbellinos
V	Evacuación del fluido
VI	Cierre del fluido
VII	Termino de torbellinos
VIII	Finalización del efecto Sumoto
IX	Perdida del fenómeno de electrohidrodinámica

5.3.1 Análisis de resultados electrodo Signo de interrogación

Para analizar la caracterización de la descarga deslizante en el electrodo de signo de interrogación, la tensión aplicada se encuentra en un rango de 500 a 17,000 volts y una corriente variable aproximadamente de 2.50×10^{-10} a 1.95×10^{-6} amperes. En la gráfica 5.2, se observan los eventos señalados en la caracterización de la descarga, donde el evento III es la parte principal de este proyecto de investigación que es la caracterización de la descarga deslizante. Sin embargo, se presenta la descripción de los demás eventos.

- Evento I

Aquí de manera análoga al análisis anterior, se observa la aparición del efecto Sumoto, el cual incrementa su volumen al aumentar la tensión. La forma cónica de este efecto se muestra en la figura 5.8.



Figura 5. 8 Efecto Sumoto en el electrodo Signo de interrogación.

- Evento II

En este evento II comienza el fenómeno de electrohidrodinámico, el cual comienza con el desplazamiento hacia el área del electrodo aterrizado del fluido a consecuencia del campo eléctrico presente. Este efecto persiste hasta el evento IX y se observa en la figura 5.9.

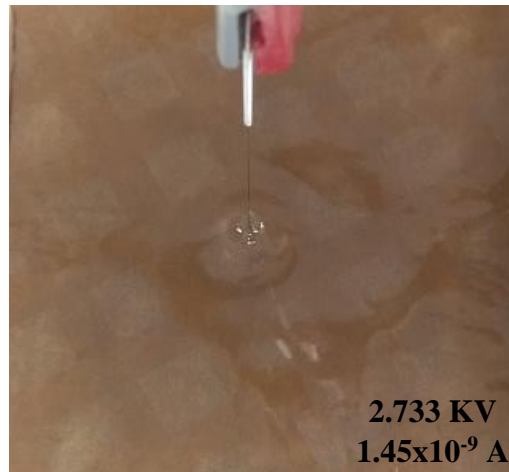


Figura 5. 9 Fenómeno Electrohidrodinámico en el electrodo Signo de interrogación.

- Evento III

Para este tercer evento se distingue por la presencia de pulsos ligeros que van haciéndose más intenso conforme incrementa la tensión. Este fenómeno se visualiza en el evento III en la figura 5.10, se observa la descarga deslizante.



Figura 5. 10 Descarga Deslizante en el electrodo Signo de interrogación.

- Evento IV

Se aprecia la formación de torbellinos en este evento, los cuales se despliegan a la frontera del electrodo aterrizado, esto se muestra en la figura 5.11.

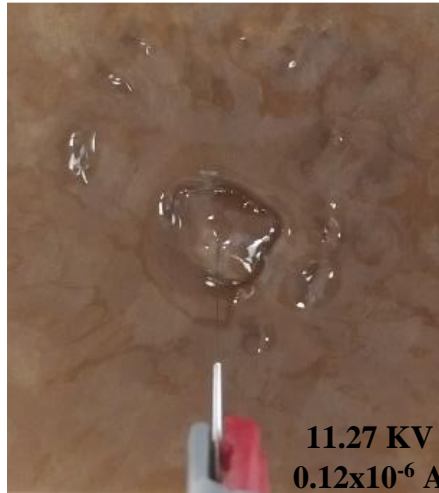


Figura 5. 11 Presencia de torbellinos en el electrodo Signo de interrogación.

- Evento V

En este evento de ascenso de tensión, se da la dispersión del aceite del electrodo activo hacia el límite del electrodo aterrizado. Este evento se visualiza en la figura 5.12.



Figura 5. 12 Evacuación del fluido en el electrodo Signo de interrogación.

En la tabla 5.9 presentada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos descritos anteriormente.

Tabla 5. 9 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	2.42	1.18×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	2.73	1.45×10^{-9}	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	6.52	1.54×10^{-8}	Presencia de la descarga deslizante
IV	11.27	1.20×10^{-7}	Inicio de torbellinos
V	16.51	1.64×10^{-6}	Evacuación del fluido
VI	15.70	1.19×10^{-6}	Cierre del fluido
VII	11.00	1.00×10^{-7}	Termino de torbellinos
VIII	2.00	1.80×10^{-9}	Finalización del efecto Sumoto
IX	1.52	1.40×10^{-9}	Perdida del fenómeno de electrohidrodinámica

En la tabla 5.10 se observa las diferencias de tensión y corriente entre cada uno de los eventos indicados en la tabla 5.9. En esta tabla que se muestra a continuación, se logra observar que la diferencia de tensión requerida en estos eventos que es mayor, es para que se produzcan el fenómeno de evacuación del aceite hacia la frontera del área del electrodo.

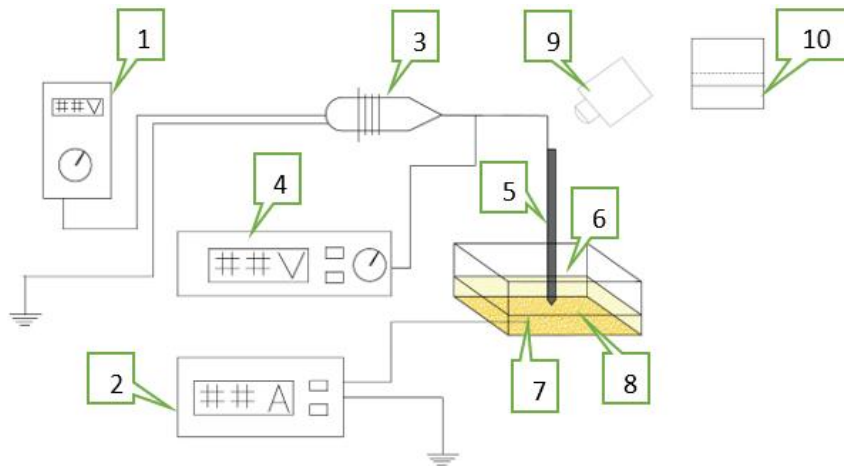
Tabla 5. 10 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo de Signo de interrogación.

Δ / Δ Evento	$\Delta 1-2$	$\Delta 2-3$	$\Delta 3-4$	$\Delta 4-5$
ΔV [kV]	0.314	3.784	4.753	5.24
ΔI [A]	2.60×10^{-10}	1.40×10^{-8}	1.09×10^{-7}	1.51×10^{-6}

5.4 Caracterización utilizando el electrodo aterrizado en forma de Círculo (●).

En esta prueba con otro electrodo aterrizado presentado las condiciones utilizadas para producir la caracterización de la descarga deslizante son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 12,000 volts.
- Nivel de líquido aislante 400ml (aceite de canola).
- La altura del fluido empleado es $h=1\text{cm}$.
- Posición de los electrodos indicados en la figura 5.13.



- | | |
|---|-------------------------|
| 1- Multímetro digital | 6- Líquido aislante |
| 2- Electrómetro digital | 7- Papel aislante Kraft |
| 3- Sonda Atenuadora Alto Voltaje | 8- Electrodo aterrizado |
| 4- Fuente de poder de corriente directa variable | 9- Cámara |
| 5- Electrodo en forma de punta con polaridad negativa | 10- Computadora |

Figura 5. 13 Montaje experimental para la configuración de Círculo.

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Círculo.

En las tablas 5.11 y 5.12 se muestran los datos del ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos registros se obtiene la curva característica de la corriente respecto a la tensión que se muestra en la gráfica 5.3.

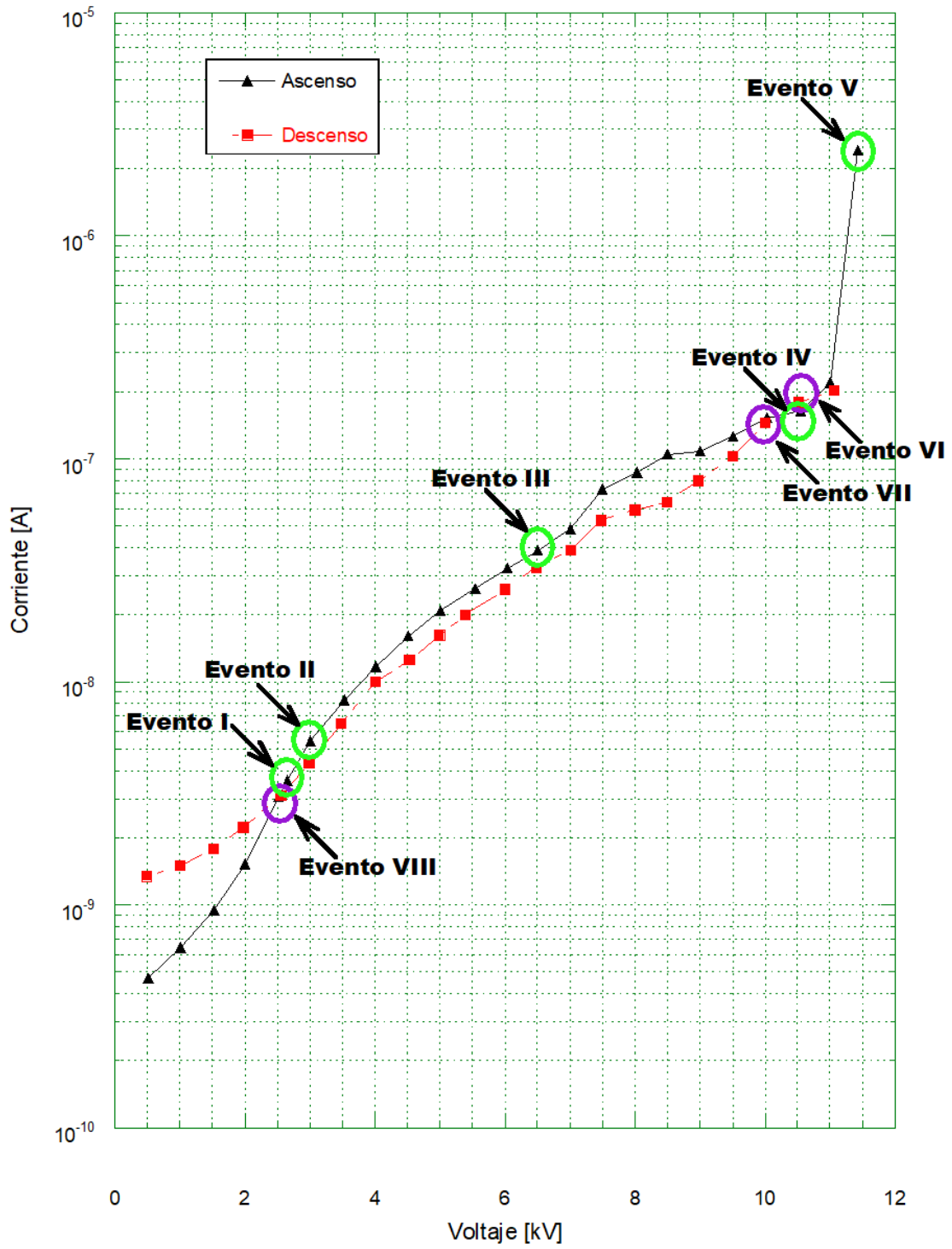
Tabla 5. 11 Registro del ascenso tensión-corriente, electrodo Círculo.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.506	4.690E-10
1.007	6.430E-10
1.528	9.450E-10
2.002	1.527E-09
2.515	3.057E-09
2.656	3.615E-09
3.009	5.450E-09
3.525	8.290E-09
4.017	1.170E-08
4.509	1.606E-08
5.004	2.087E-08
5.549	2.618E-08
6.031	3.227E-08
6.502	3.891E-08
7.010	4.840E-08
7.500	7.300E-08
8.030	8.700E-08
8.500	1.050E-07
9.000	1.079E-07
9.500	1.263E-07
10.030	1.530E-07
10.550	1.640E-07
11.010	2.200E-07
11.430	2.410E-06

Tabla 5. 12 Registro del descenso tensión-corriente, electrodo Círculo.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
11.070	2.020E-07
10.510	1.790E-07
10.000	1.450E-07
9.500	1.030E-07
8.980	8.000E-08
8.490	6.400E-08
8.000	5.900E-08
7.480	5.300E-08
7.010	3.900E-08
6.480	3.250E-08
6.000	2.600E-08
5.398	2.000E-08
4.995	1.620E-08
4.534	1.250E-08
4.000	1.000E-08
3.478	6.500E-09
2.989	4.300E-09
2.547	3.100E-09
1.971	2.230E-09
1.514	1.780E-09
1.006	1.500E-09
0.486	1.340E-09

Electrodo Círculo - Día 1 - h=1cm



Gráfica 5. 3 Curva de histéresis corriente-tensión electrodo Círculo.

En la siguiente tabla 5.13 se presentan los eventos encontrados en la caracterización de la descarga.

Tabla 5. 13 Eventos registrados en la caracterización de la curva corriente-tensión electrodo Círculo.

Evento	Descripción
I	Aparición del efecto Sumoto
II	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	Presencia de la descarga deslizante
IV	Inicio de torbellinos
V	Evacuación del fluido
VI	Cierre del fluido
VII	Termino de torbellinos
VIII	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

5.4.1 Análisis de resultados electrodo Círculo

Para el análisis de la caracterización de la descarga deslizante en el electrodo de aro, se aplicó una tensión en un rango de 500 a 12,000 volts y una corriente aproximadamente entre 4.69×10^{-10} a 2.41×10^{-6} amperes. La gráfica 5.3 muestra los eventos de caracterización de la descarga. De manera similar a los análisis anteriores se muestran los eventos hallados.

- Evento I

Aparición del efecto Sumoto, se observa en la figura 5.14.



Figura 5. 14 Efecto Sumoto electrodo Círculo.

- Evento II

Inicio del fenómeno de electrohidrodinámico, se muestra en la figura siguiente 5.15.



Figura 5. 15 Fenómeno Electrohidrodinámico electrodo Círculo.

- Evento III

Presencia de la descarga deslizante, visualizada a continuación en la figura 5.16.

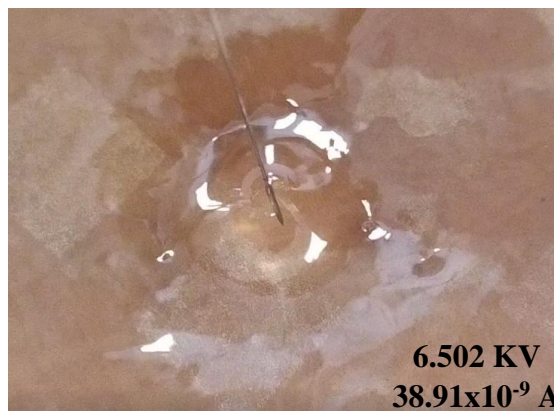


Figura 5. 16 Descarga Deslizante electrodo Círculo.

- Evento IV

Formación de torbellinos, figura 5.17.

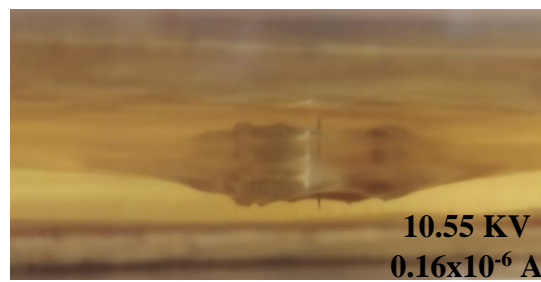


Figura 5. 17 Perturbación de torbellinos electrodo Círculo.

- Evento V

Evacuación de fluido, figura 5.18.

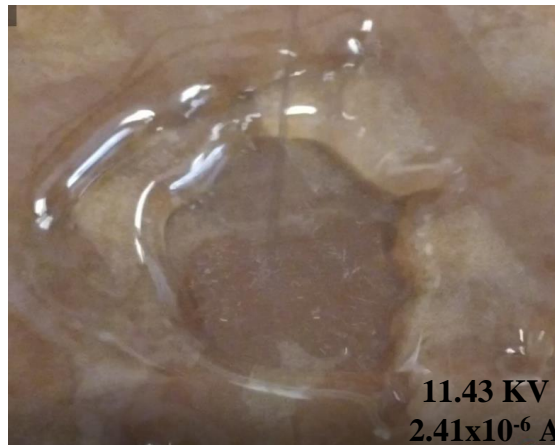


Figura 5. 18 Evacuación del aceite electrodo Círculo.

En la tabla 5.14 presentada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos descritos anteriormente.

Tabla 5. 14 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	2.67	3.61×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	3.09	5.45×10^{-9}	Comienzo del fenómeno de electrohidrodinámica (movimiento de fluido)
III	6.50	3.89×10^{-8}	Presencia de la descarga deslizante
IV	10.55	1.60×10^{-7}	Inicio de torbellinos
V	11.43	2.41×10^{-6}	Evacuación del fluido
VI	11.07	2.01×10^{-7}	Cierre del fluido
VII	10.51	1.70×10^{-7}	Termino de torbellinos
VIII	2.55	3.00×10^{-9}	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

En la tabla 5.15 se observa las diferencias de tensión y corriente entre cada uno de los eventos indicados en la tabla 5.14. En esta tabla que se muestra a continuación, se logra observar que la diferencia de tensión requerida en estos eventos que es mayor es para que se produzcan los torbellinos y la corriente mayor es la del fluido para que pueda evacuarse hacia la frontera del área del electrodo de Círculo.

Tabla 5. 15 Diferencia de tensión-corriente entre cada uno de los eventos del electrodo Círculo.

Δ / Δ Evento	$\Delta 1-2$	$\Delta 2-3$	$\Delta 3-4$	$\Delta 4-5$
ΔV [kV]	0.353	3.493	4.048	0.88
ΔI [A]	1.83×10^{-9}	3.35×10^{-8}	1.25×10^{-7}	2.24×10^{-6}

5.5 Comparación de los electros aterrizados empleados para la caracterización de la descarga.

En la tabla 5.16 que se muestra a continuación se encuentran especificados la tensión y la corriente en el momento que sucedió el fenómeno de la descarga deslizante en cada uno de los electrodos empleados. Gráfica 5.4.

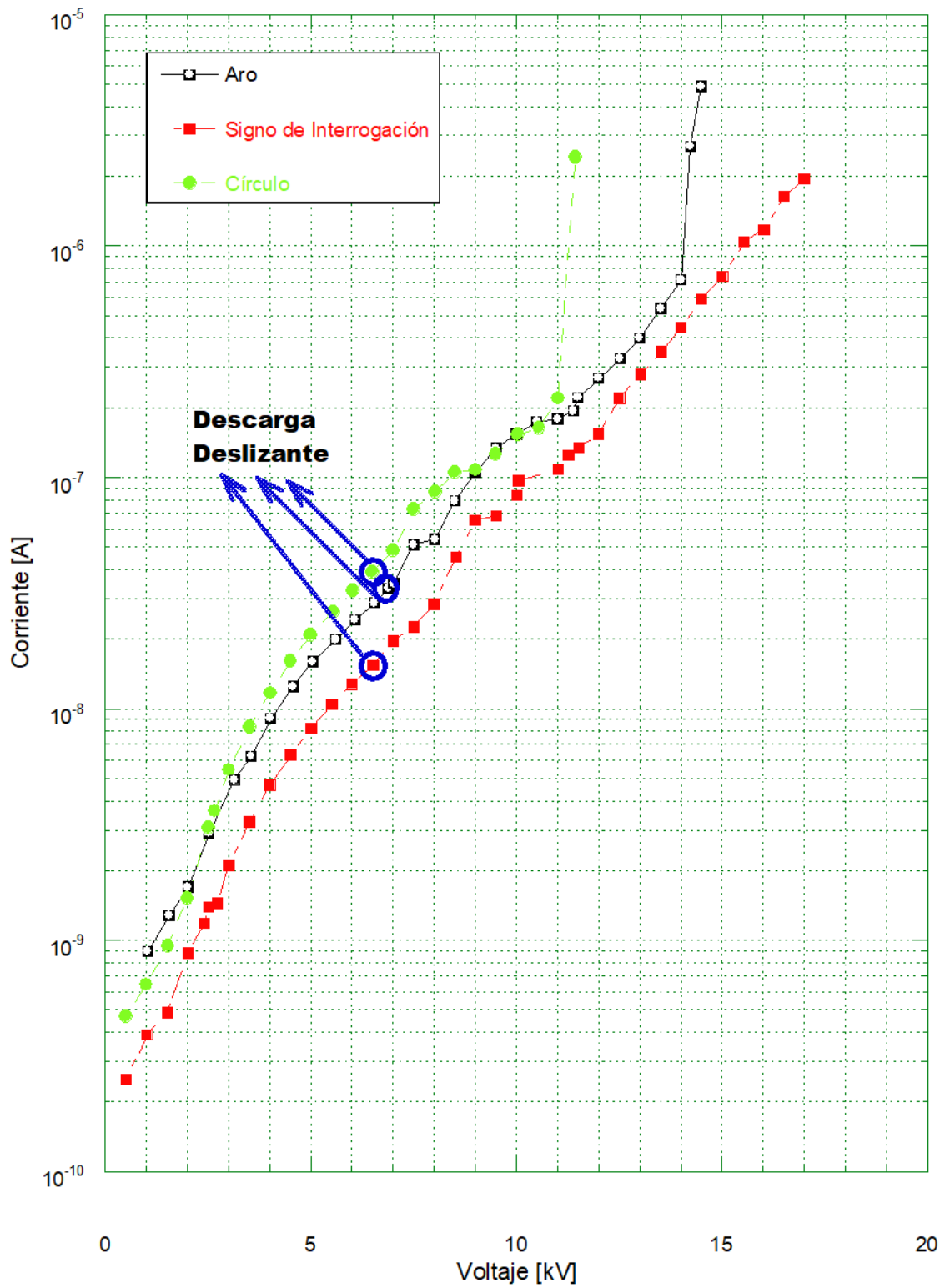
Tabla 5. 16 Descarga Deslizante por cada uno de los electrodos aterrizados.

Electrodo aterrizado	Voltaje [kV]	Corriente [A]
Aro	6.517	1.54×10^{-8}
Signo de interrogación	6.880	3.31×10^{-8}
Círculo	6.502	3.89×10^{-8}

Se observa que la descarga deslizante se presenta alrededor de los 6.5 kV para los tres casos, aunque las corrientes poseen distintos amperajes.

Electrodo que tiene mayor corriente es el electrodo de circulo y esto se debe a que el área transversal es superior que la de los demás.

Electrodos Aterrizados



Gráfica 5. 4 Comparación entre los electrodos empleados y aparición de descarga deslizante (DD).

En la tabla 5.17 y 5.18 se encuentran especificado la diferencia de tensión y corriente respectiva para la descarga deslizante de la tabla 5.16 en cada uno de los electrodos estudiados.

Tabla 5. 17 Diferencia de tensión de aparición de la DD en kV entre cada uno de los electrodos.

Δ Electrodo Aterrizado	Aro	Signo de interrogación	Círculo
Aro	-	0.363	0.378
Signo de interrogación	0.363	-	0.015
Círculo	0.378	0.015	-

Tabla 5. 18 Diferencia de corriente de aparición de la DD en Amperes entre cada uno de los electrodos.

Δ Electrodo Aterrizado	Aro	Signo de interrogación	Círculo
Aro	-	1.77×10^{-8}	7.75×10^{-9}
Signo de interrogación	1.77×10^{-8}	-	2.35×10^{-8}
Círculo	7.75×10^{-9}	2.34×10^{-8}	-

Capítulo 6

6.1 Propagación de la descarga deslizante

En este capítulo se desarrolla el análisis de propagación de la descarga deslizante. se determinan los parámetros de tiempo y distancia, para establecer una estimación de la velocidad de propagación de la descarga.

6.2 Determinación de la velocidad de propagación de la descarga deslizante

Para llevar a cabo el análisis, se propuso el uso de la Cámara Phantom, Model 1121, pero por inconvenientes diversos no se empleó este equipo y por consiguiente fueron realizadas las tomas con un celular personal y el análisis con los softwares Vegas Pro 13, video to JPG converter y ImageJ.

Con el software Vegas Pro 13 se realizó un primer filtro del video para determinar cuadro por cuadro la presencia de las descargas deslizante y con Video to JPG converter se efectuó otro filtro para la detallar más en forma de imágenes cuadro por cuadro y con esto poder estimar la duración del fenómeno de propagación de la descarga deslizante. Con el otro software ImageJ, se dedujo la distancia con la que se desplaza la descarga. Este software requiere indicar una escala de medición, la cual es dada a través de una hoja logarítmica colocada por debajo de la charola.

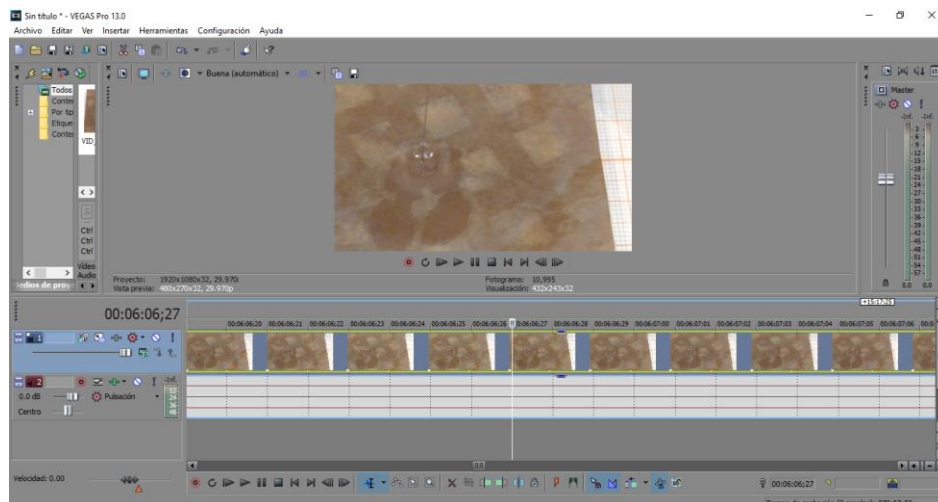


Figura 6. 1 Vegas Pro 13. Video cuadro por cuadro.

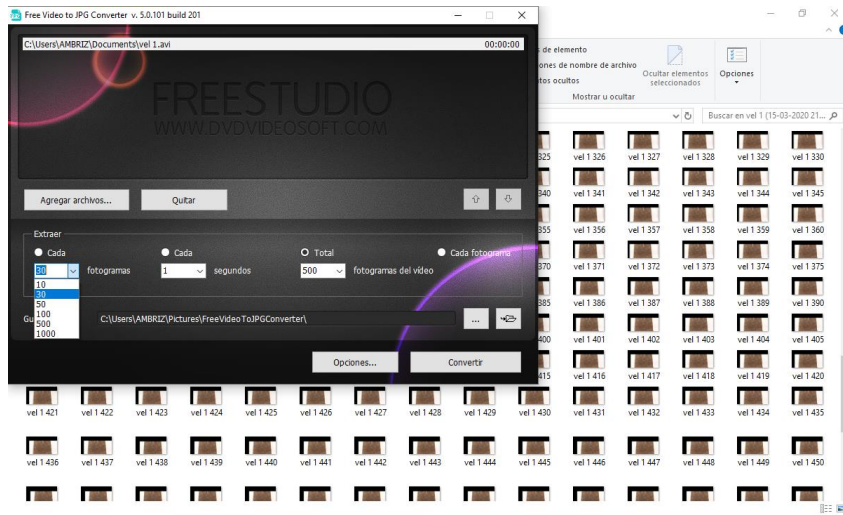


Figura 6. 2 Video to JPG converter. Imágenes cuadro a cuadro.

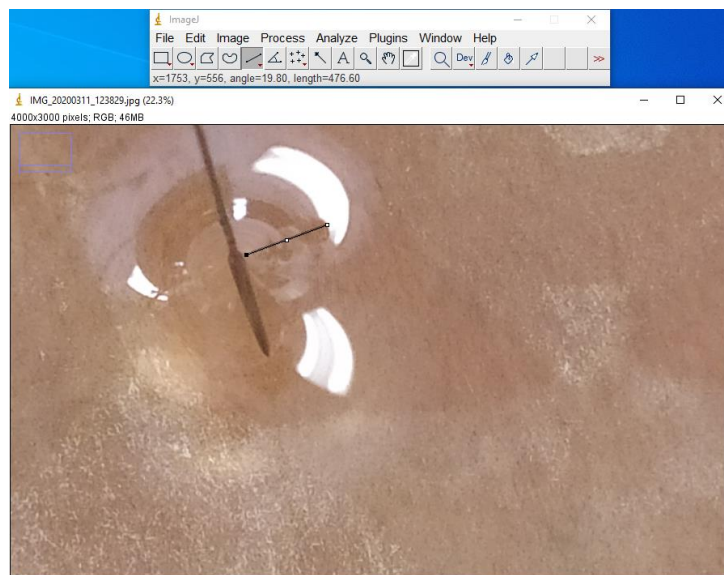


Figura 6. 3 ImageJ. Medición de Longitudes.

Para la determinación de la velocidad se empleará la siguiente ecuación 1. La cual nos dice que la velocidad esta dado por la diferencia de la distancia de dos puntos entre la diferencia entre el tiempo de esos dos puntos.

$$V = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde

Δl : Diferencia de longitud

Δt : Diferencia de tiempo

6.3 Propagación de la descarga deslizante electrodo Aro

Con los recursos empleados se estimaron los siguientes parámetros mostrados en la tabla 6.1, para la descarga deslizante en el electrodo de aro, tomando como referencia una de las diversas descargas visualizadas durante la parte experimental.

Tabla 6. 1 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Aro.

Suceso	Punto 1		Punto 2		Δ Tiempo [μ s]	Δ Longitud [mm]
	Tiempo [μ s]	Longitud [mm]	Tiempo [μ s]	Longitud [mm]		
1	3.74	129.73	4.09	177.79	0.26	48.06

A partir de datos de la tabla 6.1, se determinó la velocidad de propagación para este electrodo con la con la ecuación 1.

$$V = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{48.060}{0.260} = 184.84 \frac{mm}{\mu s}$$

La velocidad para el electrodo en forma de Aro es $184.84 \frac{mm}{\mu s}$

6.4 Propagación de la descarga deslizante electrodo Signo de interrogación

Ahora se determinaron los parámetros mostrados en la tabla 6.2, para la descarga deslizante en el *electrodo de signo de interrogación*, tomando como referencia una de las diversas descargas observadas durante la parte experimental.

Tabla 6. 2 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Signo de interrogación.

Suceso	Punto 1		Punto 2		Δ Tiempo [μ s]	Δ Longitud [mm]
	Tiempo [μ s]	Longitud [mm]	Tiempo [μ s]	Longitud [mm]		
1	2.40	96.53	2.52	120.92	0.12	24.39

A partir de datos de la tabla 6.2, se determinó la velocidad de propagación para este electrodo con la con la ecuación 1.

$$V = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{24.39}{0.120} = 203.25 \frac{mm}{\mu s}$$

La velocidad para el electrodo en forma de Signo de interrogación es $203.25 \frac{mm}{\mu s}$

6.5 Propagación de la descarga deslizante electrodo Círculo

Los parámetros mostrados en la tabla 6.3, son para la descarga deslizante en el electrodo de círculo, tomando como referencia una de las diversas descargas visualizadas durante la parte experimental.

Tabla 6. 3 Parámetros de tiempo-velocidad electrodo Círculo.

Suceso	Punto 1		Punto 2		Δ Tiempo [μs]	Δ Longitud [m]
	Tiempo [μs]	Longitud [mm]	Tiempo [μs]	Longitud [m]		
1	3.65	89.60	3.92	177.01	0.26	87.41

A partir de datos de la tabla 6.3, se determinó la velocidad de propagación para este electrodo con la ecuación 1.

$$V = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{87.41}{0.264} = 331.09 \frac{mm}{\mu s}$$

La velocidad para el electrodo en forma de Círculo es $331.09 \frac{mm}{\mu s}$

6.6 Comparación de la estimación de las velocidades de propagación de los electrodos utilizados

Se logra deducir que la propagación de la descarga deslizante es más rápida en el círculo, debido a que la cantidad de cobre es mayor en este electrodo y que el área del cobre se encuentra más próximo al electrodo de punta donde se genera la descarga deslizante y facilita su transmisión por el electrodo. Mientras que en los otros dos electrodos solo se encuentra una pequeña fracción de cobre formando la periferia del electrodo la cual no se encuentra localizada de bajo del electrodo punta como el electrodo círculo. La diferencia de velocidad que existe entre el círculo y los otros dos electrodos es de 44.17% (aro) y 38.61% (signo de interrogación).

Conclusión

Se realizó un estudio para distintas formas de electrodo aterrizados (aro, signo de interrogación y círculo), para identificar la descarga deslizante (creeping discharge) por medio de pulsos de descarga en aceite vegetal de canola con polaridad negativa y una interfaz líquido-sólido.

La caracterización de la descarga deslizante se efectuó trazando las curvas de histéresis. Se observa que el nivel de volumen de aceite influye en la presencia de la DD, por lo que, a menor volumen, las descargas deslizantes aparecen con una menor tensión, mientras que a mayor volumen se requiere de mayor tensión aplicada. Además, la pureza del aceite contribuye a la presencia de pulsos, dado que, entre menor pureza tenga el aceite menor es el voltaje en el que comienza la DD. También, la propagación de la DD depende de la proporción de cobre que contenga el electrodo, ya que, entre mayor cantidad de cobre, la descarga se presenta con una mayor velocidad.

Se observó que la aparición de la descarga para el mismo nivel de volumen no depende de la forma del electrodo aterrizado ya que las tensiones de inyección son similares (6.5 kV). Aunque los niveles de la corriente sí muestran dependencia de las condiciones experimentales.

Con este trabajo se ratificó que la descarga deslizante se presenta de forma radial, independientemente de la forma del electrodo de baja tensión.

Comparando la DD con respecto a la polaridad, para la polaridad positiva se requiere de una mayor tensión (38.2%) y corriente (78.7%) para la presencia de la descarga comparada con la polaridad negativa.

Trabajo futuro

Se puede realizar otra etapa para este trabajo, ya que durante la realización de la parte experimental se observaron otro tipo de fenómenos que requieren de un análisis mejor detallado para poder comprenderlos ya que estos están ligados a la Mecánica de Fluidos. Esto con el objetivo de comprender su comportamiento y efectos en las descargas.

Referencia

- [1] C.L. Wadhwa, *HIGH VOLTAGE ENGINEERING*, 2nd. Ed. New Age International publishers, 200, pp. 181-194.
- [2] M. Moises, I.U. Hernández, “Caracterización de una descarga deslizante en la interface de aceite de transformador y papel dieléctrico con alta tensión en corriente directa y polaridad positiva”, proyecto de integración, Departamento de Energía de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, CDMX, 2018.
- [3] K. L. Chrzan and P. Trzesicki, "Creeping discharges" in Workshop of Young Researches: National Workshop PhD, At /stebna, Poland Istebna, pp. 180-183, 2003
- [4] A. Beroual, M. L. Coulibaly, O. Aitken, and A. Girodet, "Study of creeping discharges propagating over epoxy resin insulators in presence of different gases and mixtures" in International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 89-92, 2010.
- [5] T. Nakamiya, K. Ebihara, T. Ikegami, Y. Sonoda, and R. Tsuda, "Acoustic signal analysis in the creeping discharge" in Journal of Physics Series, pp. 1- 4, 2008. A. Lokhanin, G. Shneider, V.
- [6] Saeed Zohdi, K. L. Wong, H. L. Rasara, Chris Henschke, “Study of creeping discharge on hardwood timber under AC and DC voltages”, Australia, 29 September - 3 October 2013.
- [7] Yuzhen Lv, You Zhou, Chengrong Li, Yang Ge, and Bo Qi, “Creeping Discharge Characteristics of Nanofluid-Impregnated Pressboards Under AC Stress”, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, november 2016.
- [8] X. Zhou, H.B. Shi, M. Kuhnke, P. Werle, E. Gockenbach and H. Borsi, “Evolution and Discharge Pattern of Creeping Discharge at Aged Oil/Pressboard Interface”, Leibniz University of Hannover, Germany.
- [9] M. Michelarakis, P. Widger, A. Haddad, A. Beroual, “Creeping Discharge Development Over Insulator Surfaces in Natural Gases: Design and Implementation of Test Procedure”.
- [10] A. Lokhanin, G. Shneider, V. Sokolov, V. Chornogotsky, and T. Morozova, "Internal insulation failure mechanisms of HV equipment under service conditions" Cigre Report 15, vol. 201, pp. 1-6, 2002.
- [11] M. L. Coulibaly, A. Beroual, O. Aitken, and A. Girodet, "Investigation on creeping discharges propagating over insulators immersed in gases and gas mixtures under lightning impulse voltage" in International Conference on High Voltage Engineering and Application, pp. 24-27, 2008.
- [12] E. Kuffel, W.S. Zaengl y J.Kuffel, *HIGH VOLTAGE ENGINEERING: FUNDAMENTALS*, 2nd. Ed. Oxford Auckland Boston Johannesburg Melbourne New Delhi: Newnes, 2000, pp. 421-459.

[13] J. R. Melchert y G. I. Taylor, “Electrohydrodynamics: a Review of the Role of Interfacial Shear Stresses”, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts and Farmfi Eld, Huntingdon Road, Cambridge, England.

[14] Wexler, A. D., López Sáenz, M., Schreer, O., Woisetschläger, J., Fuchs, E. C. The Preparation of Electrohydrodynamic Bridges from Polar Dielectric Liquids. *J. Vis. Exp.* (91), 2014.

Apéndices

Índice

<u>Apéndice 1</u>	54
<u>1.1 Pruebas para el electrodo en forma de Aro con altura 1cm del fluido</u>	54
<u>1.2 Prueba para el electrodo en forma de Aro con altura 0.5cm del fluido</u>	57
<u>1.3 Prueba para el electrodo en forma de Aro con altura 1.7cm del fluido</u>	59
<u>Apéndice 2</u>	62
<u>2.1 Pruebas para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 1cm del fluido</u> ..	62
<u>2.2 Prueba para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 0.5cm del fluido</u> ..	65
<u>2.3 Prueba para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 1.7cm del fluido</u> ..	67
<u>Apéndice 3</u>	70
<u>3.1 Pruebas para el electrodo en forma de Círculo con altura 1cm del fluido</u>	70
<u>3.2 Prueba para el electrodo en forma de Círculo con altura 0.5cm del fluido</u>	73
<u>3.3 Prueba para el electrodo en forma de Círculo con altura 1.7cm del fluido</u>	75

Índice de tablas

Tabla 1. 1 Registro de tensión-corriente prueba 2 electrodo Aro	54
Tabla 1. 2 Registro de tensión-corriente prueba 3 electrodo Aro	54
Tabla 1. 3 Registro de tensión-corriente prueba 4 electrodo Aro	55
Tabla 1. 4 Registro de la Descarga Deslizante para cada una de las pruebas del electrodo de Aro	55
Tabla 1. 5 Registro de ascenso tensión-corriente electro Aro, h=0.5cm	57
Tabla 1. 6 Registro de descenso tensión-corriente electro Aro, h=0.5cm	57
Tabla 1. 7 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro con h=0.5cm.	59
Tabla 1. 8 Registro de ascenso tensión-corriente electro Aro, h=1.7cm.	60
Tabla 1. 9 Registro de descenso tensión-corriente electro Aro, h=1.7cm.	60
Tabla 1. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro con h=1.7cm.	62
Tabla 2. 1 Registro de tensión-corriente prueba 2 electrodo Signo de interrogación.....	62
Tabla 2. 2 Registro de tensión-corriente prueba 3 electrodo Signo de interrogación.....	63
Tabla 2. 3 Registro de tensión-corriente prueba 4 electrodo Signo de interrogación.....	63
Tabla 2. 4 Registro de la Descarga Deslizante para cada una de las pruebas del electrodo de Signo de interrogación.....	64
Tabla 2. 5 Registro de ascenso tensión-corriente electro Signo de interrogación, h=0.5cm.	65
Tabla 2. 6 Registro de ascenso tensión-corriente electro signo de interrogación, h=0.5cm.....	65
Tabla 2. 7 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación con h=0.5cm.....	67
Tabla 2. 8 Registro de ascenso tensión-corriente electro Signo de interrogación, h=1.7cm.	68

Tabla 2. 9 Registro de ascenso tensión-corriente electro Sino de interrogación, h=1.7cm.	68
Tabla 2. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación con h=1.7cm.....	70
Tabla 3. 1 Registro de tensión-corriente prueba 2 electrodo Círculo.....	70
Tabla 3. 2 Registro de tensión-corriente prueba 3 electrodo Círculo.....	71
Tabla 3. 3 Registro de tensión-corriente prueba 4 electrodo Círculo.....	71
Tabla 3. 4 Registro de la Descarga Deslizante para cada una de las pruebas del electrodo de Círculo.	71
Tabla 3. 5 Registro de ascenso tensión-corriente electro Círculo, h=0.5cm.....	73
Tabla 3. 6 Registro de descenso tensión-corriente electro Círculo, h=0.5cm.	73
Tabla 3. 7 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo con h=0.5cm.....	75
Tabla 3. 8 Registro de ascenso tensión-corriente electro Círculo, h=1.7cm.....	76
Tabla 3. 9 Registro de descenso tensión-corriente electro Círculo, h=1.7cm.....	76
Tabla 3. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo con h=1.7cm	78

Índice de gráficas

Gráfica 1. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Aro.....	56
Gráfica 1. 2 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Aro con h=0.5cm.	58
Gráfica 1. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Aro con h=1.7cm.	61
Gráfica 2. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Signo de interrogación.	64
Gráfica 2. 2 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Signo de interrogación con h=0.5cm....	66
Gráfica 2. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Signo de interrogación con h=1.7cm....	69
Gráfica 3. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Círculo.	72
Gráfica 3. 2 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Círculo con h=0.5cm.....	74
Gráfica 3. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Círculo con h=1.7cm.....	77

Apéndice 1

1.1 Pruebas para el electrodo en forma de Aro con altura 1cm del fluido

En este apéndice se registran las pruebas realizadas durante un lapso de cuatro días, obteniendo como resultados las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 respectivamente para cada una de las pruebas. En la gráfica 1.1 se puede observar la curva característica de la descarga deslizante (creeping discharge) de la corriente-tensión y ahí se indica el momento en que ocurre ésta en cada prueba.

Las condiciones son las similares que la del apartado 5.2 para estas pruebas, a excepción que el aceite empleado no fue remplazado para los cuatro días de prueba.

Tabla 1. 1 Registro de tensión-corriente, prueba 2 electrodo Aro.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.50570	4.9200e-10
1.0080	8.8000e-10
1.5090	1.3010e-09
2.0090	1.7700e-09
2.5610	2.4400e-09
3.0050	2.7100e-09
3.5400	3.5300e-09
4.0410	3.9700e-09
4.5130	5.3000e-09
5.0140	6.1100e-09
5.5200	6.7200e-09
6.0160	8.9000e-09
6.5090	1.1920e-08
7.0400	1.6000e-08
7.5000	2.8000e-08
8.0000	3.3000e-08
8.5400	4.8000e-08
9.0000	6.0000e-08
9.5000	7.7000e-08
10.000	9.2000e-08
10.550	9.9000e-08
11.000	1.1800e-07
11.300	1.3400e-07
11.500	1.5300e-07
12.080	1.9700e-07
12.510	2.3200e-07
13.000	3.1400e-07
13.560	4.8700e-07
14.000	6.2300e-07
14.500	7.6000e-07

Tabla 1. 2 Registro de tensión-corriente, prueba 3 electrodo Aro.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.501	5.870E-10
1.000	6.300E-10
1.500	7.050E-10
2.020	9.130E-10
2.456	1.200E-09
3.024	1.282E-09
3.525	1.790E-09
3.997	2.552E-09
4.504	3.630E-09
5.019	5.060E-09
5.539	6.480E-09
6.021	8.983E-09
6.561	1.002E-08
7.050	1.280E-08
7.580	1.630E-08
8.070	2.830E-08
8.550	4.030E-08
9.020	4.730E-08
9.570	5.720E-08
10.070	6.700E-08
10.520	8.200E-08
11.030	1.020E-07
11.450	1.180E-07
12.060	1.580E-07
12.550	2.050E-07
13.050	2.390E-07
13.520	3.430E-07
14.050	4.890E-07
14.560	5.700E-07

Tabla 1. 3 Registro de tensión-corriente, prueba 4 electrodo Aro.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.525	4.830E-10
1.018	9.750E-10
1.514	1.172E-09
2.010	1.440E-09
2.527	2.040E-09
3.019	2.522E-09
3.551	3.440E-09
4.013	3.920E-09
4.548	6.115E-09
5.073	7.700E-09
5.554	8.800E-09
6.055	1.210E-08
6.570	1.510E-08
7.000	1.740E-08
7.560	2.080E-08
8.000	2.720E-08
8.510	3.730E-08
9.060	4.100E-08
9.500	5.000E-08
10.050	7.300E-08
10.540	9.200E-08
11.070	1.140E-07
11.540	1.300E-07
11.820	1.440E-07
12.080	1.630E-07
12.510	2.030E-07
13.020	2.500E-07
13.510	4.050E-07
14.000	4.970E-07
14.500	6.610E-07

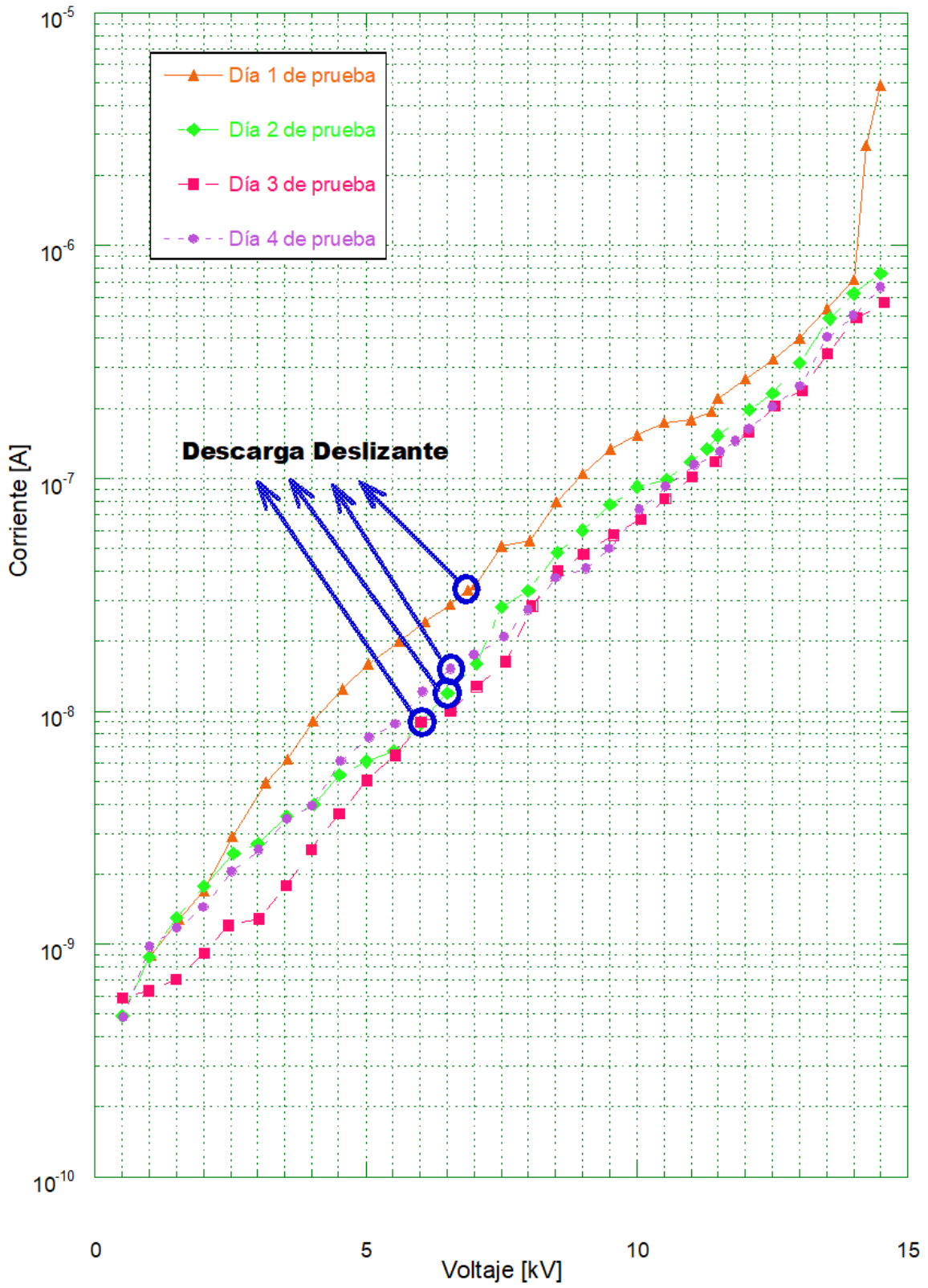
En la gráfica 1.1 se observa la caracterización de las pruebas realizadas, para las cuales se puede ver que conforme los días iban transcurriendo la descarga deslizante iba reduciendo la intensidad de la corriente con la que se inició, esto se debe a que en la interfaz de líquido-sólido existen otros factores como lo son el aire, las partículas externas a las que el modelo está expuesto, la percepción del ojo, entre otras.

En la tabla 1.4, se describe la tensión y la corriente en el momento en el que se observó la descarga deslizante para las cuatro pruebas de este electrodo de Aro.

Tabla 1. 4 Registro de la Descarga Deslizante para cada una de las pruebas del electrodo de Aro.

Día de Prueba	Voltaje [kV]	Corriente [A]
1	6.880	33.16x10 ⁻⁹
2	5.509	11.92x10 ⁻⁹
3	6.561	10.02x10 ⁻⁹
4	6.035	12.10x10 ⁻⁹

Electrodo Aro - h=1cm



Gráfica 1. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Aro.

1.2 Prueba para el electrodo en forma de Aro con altura 0.5cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 6,700 volts.
- Nivel de líquido aislante 200ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Aro.

En las tablas 1.5 y 1.6 se presentan los datos obtenidos del ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva característica de la tensión con la corriente que se muestra en la gráfica 1.2.

Tabla 1. 5 Registro de ascenso tensión-corriente, electrodo Aro, h=0.5cm.

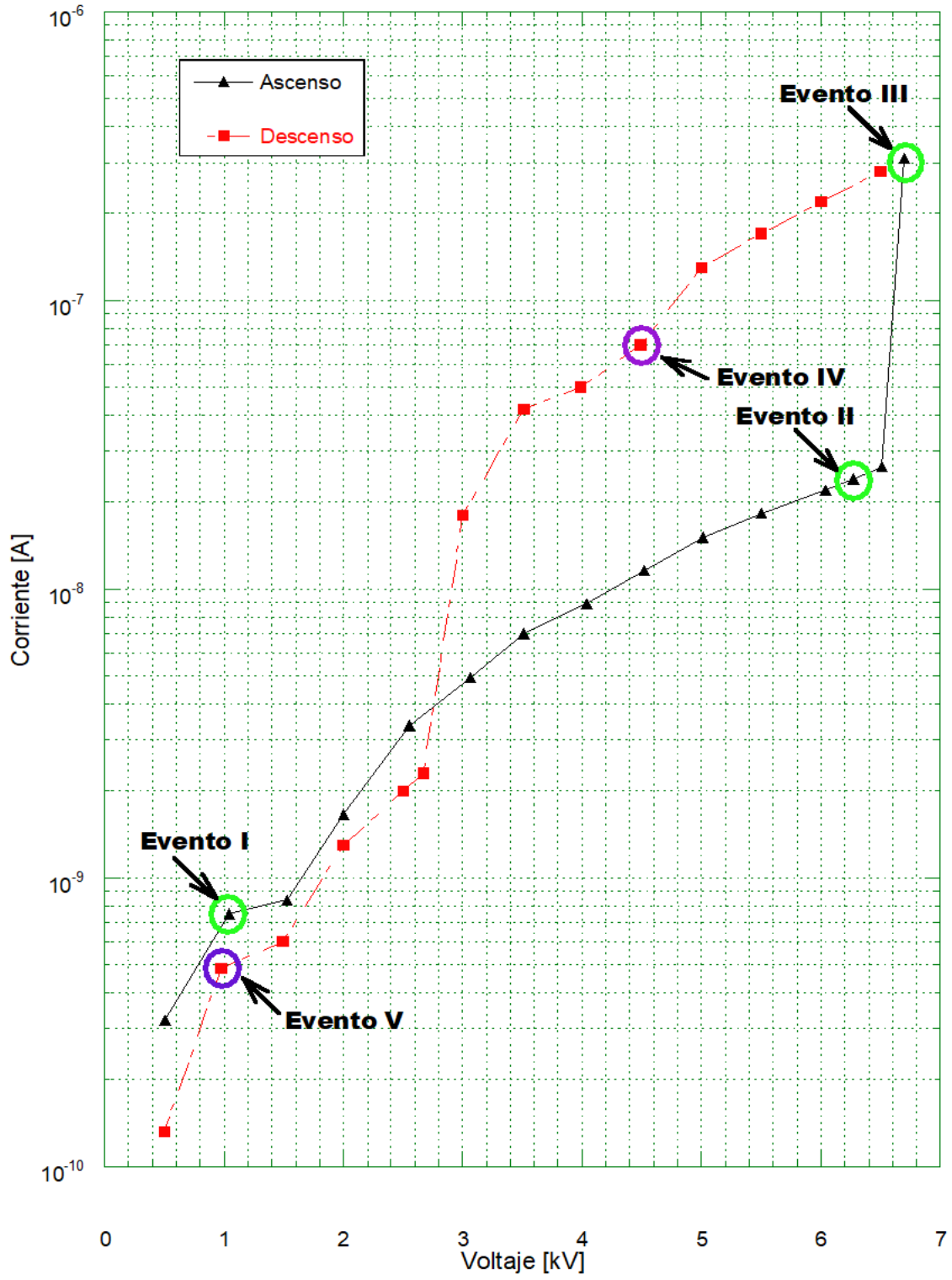
Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.5058	3.210E-10
1.0460	7.520E-10
1.5280	8.370E-10
2.0050	1.663E-09
2.5520	3.360E-09
3.0640	4.930E-09
3.5140	7.000E-09
4.0410	8.900E-09
4.5220	1.160E-08
5.0150	1.510E-08
5.5000	1.830E-08
6.0360	2.200E-08
6.2710	2.410E-08
6.5120	2.660E-08
6.7000	3.100E-07

Tabla 1. 6 Registro de descenso tensión-corriente, electrodo Aro, h=0.5cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
6.500	2.800E-07
6.000	2.200E-07
5.500	1.700E-07
5.000	1.300E-07
4.490	7.000E-08
3.990	5.000E-08
3.510	4.200E-08
3.000	1.800E-08
2.670	2.300E-09
2.500	2.000E-09
2.000	1.300E-09
1.490	6.000E-10
0.976	4.850E-10
0.500	1.320E-10

En la gráfica 1.2, se puede apreciar que la curva de descenso esta encima de la curva de ascenso, esto se debe a que hay presencia de carga remanente y al tener una altura de fluido pequeña, este fluido queda cargado debido a que no se disipa la corriente

Electrodo Aro - Día 1- h=0.5cm



Gráfica 1. 2 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Aro con h=0.5cm.

En la tabla 1.7 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de estos eventos.

Tabla 1. 7 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro con h=0.5cm.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	1.046	0.752×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	6.271	0.0241×10^{-6}	Presencia de la descarga deslizante
III	6.700	0.310×10^{-6}	Inicio de torbellinos y evacuación del fluido
IV	4.490	0.070×10^{-6}	Cierre del fluido
V	0.976	0.485×10^{-9}	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

1.3 Prueba para el electrodo en forma de Aro con altura 1.7cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 20,500 volts.
- Nivel de líquido aislante 680ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Aro.

En las tablas 1.8 y 1.9 se muestran los datos de ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva de histéresis de la tensión con la corriente en la gráfica 1.3.

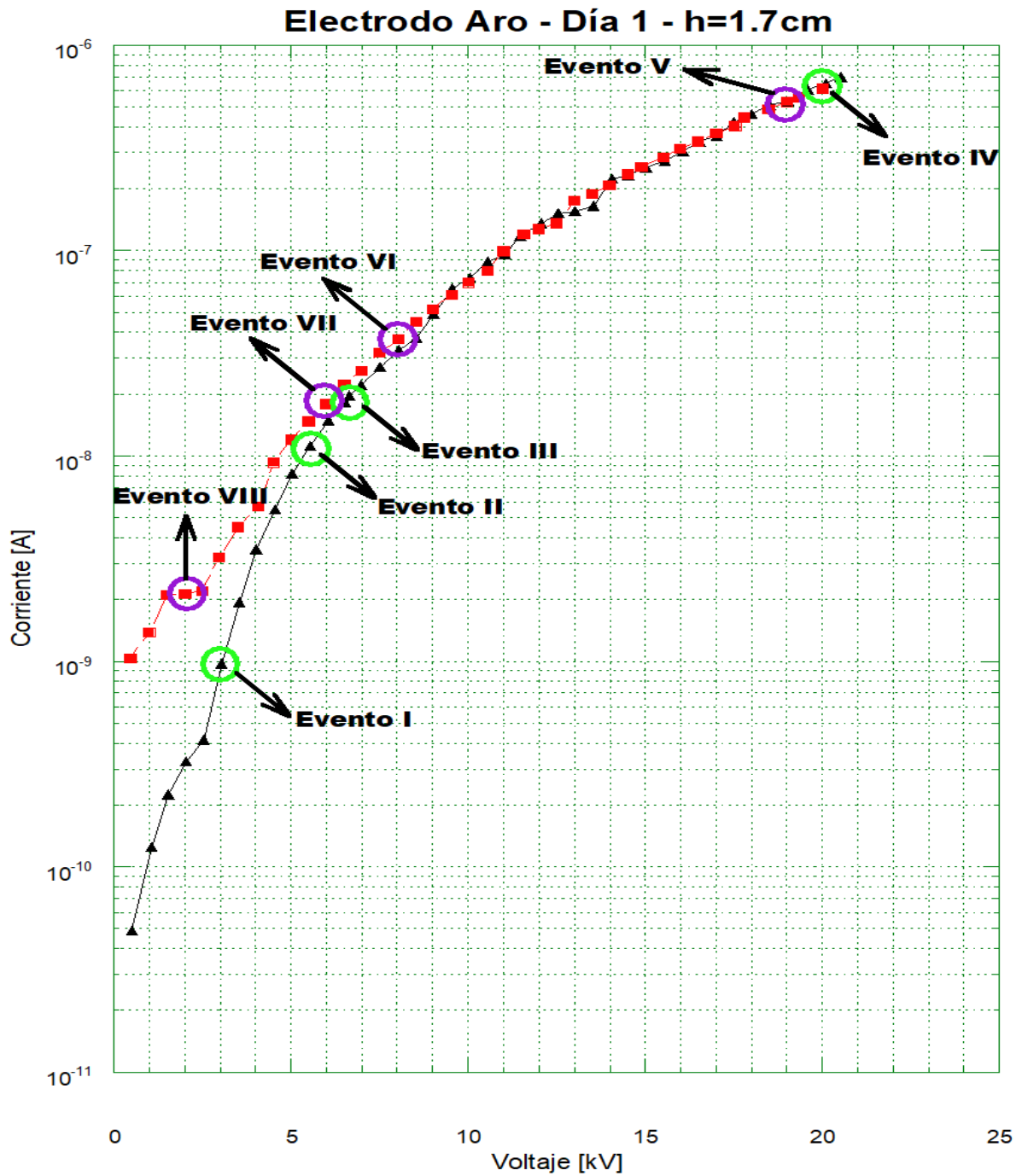
Para esta grafica 1.3 mostrada, se puede ver que la presencia de carga remanente es menor que la de la gráfica 1.2, ya que, al tener una altura mayor el fluido queda cargado también, pero la corriente se disipa más en el fluido. Por otra parte, no se logró la evacuación del fluido debido a que la fuente solo alcanza a entregar un voltaje de 20,000 volts y el nivel de aceite es mayor que en las otras pruebas.

Tabla 1. 8 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Aro, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.510	4.900E-11
1.049	1.250E-10
1.528	2.250E-10
2.035	3.260E-10
2.527	4.150E-10
3.038	9.780E-10
3.555	1.940E-09
4.021	3.510E-09
4.544	5.500E-09
5.024	8.170E-09
5.544	1.117E-08
6.058	1.488E-08
6.530	1.820E-08
6.650	1.980E-08
6.990	2.210E-08
7.510	2.700E-08
8.050	3.260E-08
8.540	3.770E-08
9.030	4.900E-08
9.550	6.520E-08
10.050	7.420E-08
10.560	8.830E-08
11.020	9.530E-08
11.480	1.180E-07
12.060	1.360E-07
12.540	1.520E-07
13.020	1.550E-07
13.530	1.650E-07
14.060	2.240E-07
14.520	2.340E-07
15.020	2.530E-07
15.550	2.730E-07
16.060	3.030E-07
16.550	3.400E-07
17.010	3.630E-07
17.510	4.210E-07
18.000	4.620E-07
18.540	5.130E-07
19.040	5.320E-07
19.590	6.090E-07
20.100	6.540E-07
20.530	6.980E-07

Tabla 1. 9 Registro de descenso tensión-corriente, electro Aro, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
20.000	6.140E-07
19.340	5.560E-07
19.000	5.300E-07
18.480	4.890E-07
17.790	4.450E-07
17.530	4.050E-07
17.000	3.710E-07
16.500	3.400E-07
16.000	3.140E-07
15.520	2.850E-07
14.900	2.560E-07
14.500	2.360E-07
13.990	2.070E-07
13.500	1.890E-07
13.000	1.750E-07
12.500	1.360E-07
12.000	1.270E-06
11.570	1.200E-07
11.000	9.900E-08
10.540	8.000E-08
10.000	7.000E-08
9.540	6.100E-08
9.000	5.200E-08
8.530	4.500E-08
8.030	3.700E-08
7.490	3.180E-08
7.000	2.600E-08
6.500	2.240E-08
5.990	1.790E-08
5.500	1.480E-08
5.000	1.200E-08
4.500	9.300E-09
4.070	5.700E-09
3.510	4.500E-09
2.970	3.200E-09
2.493	2.200E-09
2.000	2.130E-09
1.493	2.100E-09
1.000	1.380E-09



Gráfica 1. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Aro con h=1.7cm.

En la tabla 1.10 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de ellos.

Tabla 1. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Aro con $h=1.7\text{cm}$.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	3.038	0.978×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	5.544	11.17×10^{-9}	Presencia de la descarga deslizante
III	6.650	0.0198×10^{-6}	Inicio del fenómeno de electrohidrodinámico
IV	20.10	0.654×10^{-6}	Aparición de torbellinos
V	19.00	0.530×10^{-6}	Termino de los torbellinos
VI	8.030	0.0370×10^{-6}	Perdida de la descarga deslizante
VII	5.990	0.0179×10^{-6}	Perdida del fenómeno de electrohidrodinámica
VIII	1.457	0.0021×10^{-6}	Finalización del efecto Sumoto

Apéndice 2

2.1 Pruebas para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 1cm del fluido

En este apéndice se obtienen las pruebas realizadas durante un lapso de cuatro días, los datos registrados son la de las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 respectivamente para cada una de las pruebas. En la gráfica 2.1 se puede observar la curva característica de la descarga deslizante (creeping discharge) de la tensión-corriente y ahí se indica el momento en que ocurre esta descarga en cada una de las pruebas.

Las condiciones para estas pruebas son similares al apartado 5.3, solo con excepción que el aceite fue el mismo empleado para los cuatro días.

Tabla 2. 1 Registro de tensión-corriente, prueba 2 electrodo Signo de interrogación.

Voltaje [kV]	Corriente [A]		
0.515	2.010E-10	9.540	7.600E-08
1.077	2.970E-10	10.020	8.000E-08
2.009	8.700E-10	10.500	9.800E-08
2.291	9.400E-10	11.050	1.500E-07
2.517	1.340E-09	11.570	1.590E-07
3.033	4.620E-09	12.020	1.700E-07
3.534	6.210E-09	12.570	2.530E-07
4.007	8.690E-09	13.070	3.330E-07
4.518	1.086E-08	13.510	4.290E-07
5.004	1.358E-08	14.040	4.630E-07
5.510	1.621E-08	14.520	5.530E-07
6.016	1.923E-08	15.030	7.120E-07
6.527	2.175E-08		
7.030	2.559E-08		
7.510	2.930E-08		
8.040	3.620E-08		
8.540	4.300E-08		
9.050	5.900E-08		

Tabla 2. 2 Registro de tensión-corriente, prueba 3 electrodo Signo de interrogación.

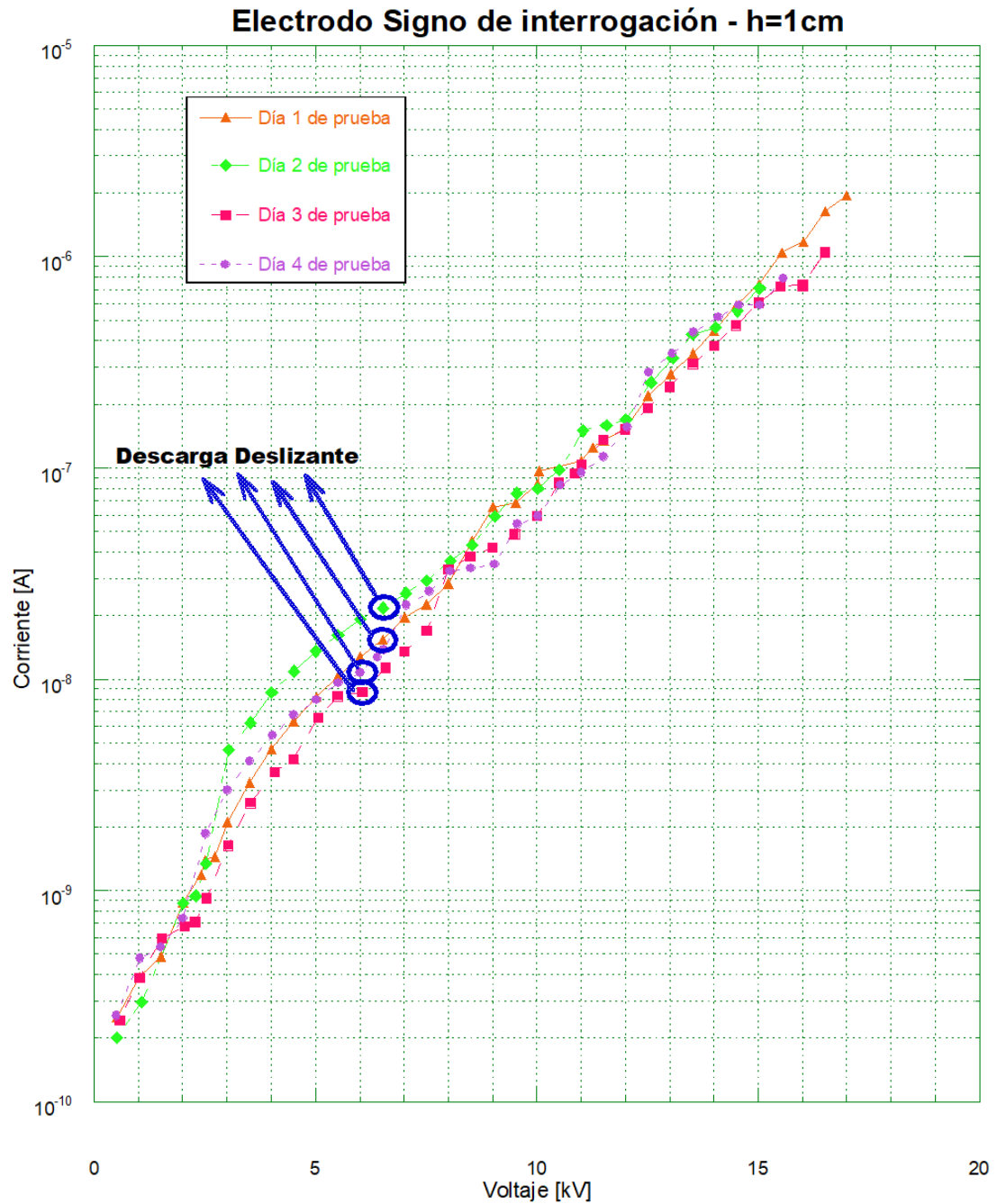
Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.576	2.430E-10
1.027	3.870E-10
1.533	5.920E-10
2.042	6.770E-10
2.281	7.100E-10
2.538	9.160E-10
3.024	1.630E-09
3.525	2.590E-09
4.069	3.630E-09
4.500	4.200E-09
5.053	6.550E-09
5.500	8.320E-09
6.057	8.700E-09
6.583	1.130E-08
7.000	1.350E-08
7.510	1.700E-08
8.000	3.300E-08
8.500	3.800E-08
9.000	4.200E-08
9.500	4.850E-08
10.000	5.920E-08
10.500	8.510E-08
10.850	9.400E-08
11.000	1.040E-07
11.500	1.360E-07
12.000	1.520E-07
12.500	1.920E-07
13.000	2.420E-07
13.520	3.100E-07
14.000	3.790E-07
14.500	4.740E-07
15.000	6.050E-07
15.500	7.210E-07
16.000	7.400E-07
16.510	1.050E-06

Tabla 2. 3 Registro de tensión-corriente, prueba 4 electrodo Signo de interrogación.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.495	2.540E-10
1.028	4.750E-10
1.508	5.400E-10
2.005	7.370E-10
2.517	1.850E-09
3.005	2.980E-09
3.515	4.080E-09
4.036	5.420E-09
4.508	6.750E-09
5.032	8.000E-09
5.521	9.600E-09
6.015	1.070E-08
6.394	1.270E-08
6.541	1.380E-08
7.050	2.230E-08
7.570	2.590E-08
8.040	3.250E-08
8.510	3.350E-08
9.050	3.500E-08
9.570	5.400E-08
10.030	5.900E-08
10.530	8.300E-08
11.000	9.500E-08
11.510	1.130E-07
12.040	1.560E-07
12.530	2.830E-07
13.060	3.480E-07
13.550	4.380E-07
14.100	5.180E-07
14.580	5.890E-07
15.050	5.900E-07
15.570	7.890E-07

En la gráfica 2.1 se observa la caracterización de las pruebas realizadas, para las cuales la descarga deslizando iba reduciendo la intensidad de la corriente con la que se inició, esto se debe a que en la interfaz de líquido-sólido existen otros factores como lo son el aire, las partículas externas a las que el modelo está expuesto, la percepción del ojo, etcétera.

En la tabla 2.4, se describe la tensión y la corriente en el momento en el que se observó la descarga deslizando para las cuatro pruebas de este electrodo de Signo de interrogación.



Gráfica 2. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Signo de interrogación.

Tabla 2. 4 Registro de la Descarga Deslizante para cada una de las pruebas del electrodo de Signo de interrogación.

Día de Prueba	Voltaje [kV]	Corriente [A]
1	6.517	15.45×10^{-9}
2	5.527	21.75×10^{-9}
3	6.067	8.700×10^{-9}
4	6.015	10.70×10^{-9}

2.2 Prueba para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 0.5cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 6,250 volts.
- Nivel de líquido aislante 200ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Aro.

En las tablas 2.5 y 2.6 se presentan los datos obtenidos del ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva característica de la tensión con la corriente que se muestra en la gráfica 2.2.

Tabla 2. 5 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Signo de interrogación, h=0.5cm.

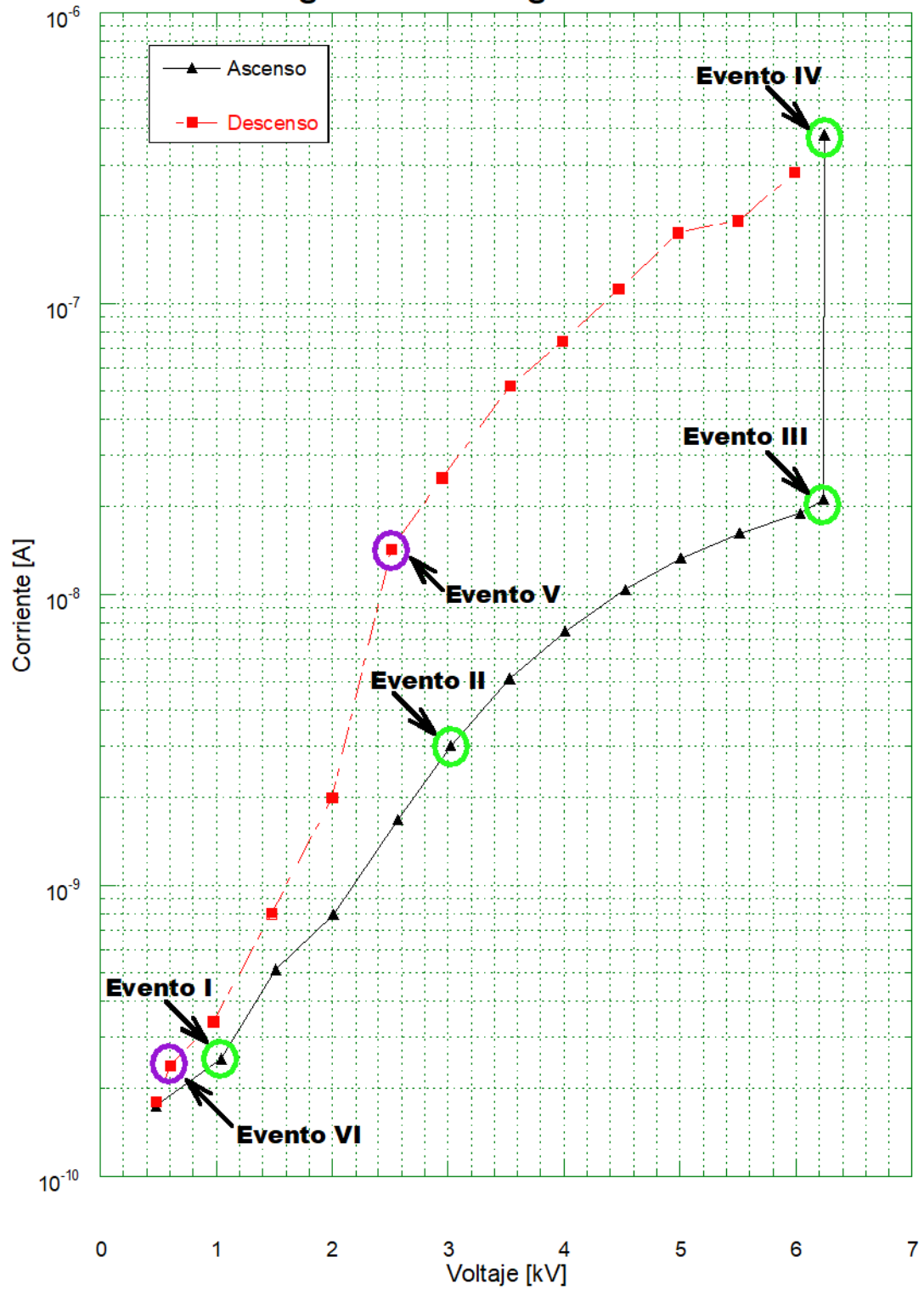
Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.481	1.750E-10
1.046	2.530E-10
1.513	5.130E-10
2.010	7.930E-10
2.566	1.680E-09
3.020	3.020E-09
3.530	5.130E-09
4.007	7.460E-09
4.528	1.041E-08
5.004	1.330E-08
5.511	1.620E-08
6.035	1.900E-08
6.238	2.120E-08
6.247	3.800E-07

Tabla 2. 6 Registro de descenso tensión-corriente, electro signo de interrogación, h=0.5cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
6.247	3.800E-07
5.988	2.820E-07
5.500	1.920E-07
4.980	1.750E-07
4.472	1.120E-07
3.990	7.400E-08
3.535	5.220E-08
2.950	2.520E-08
2.509	1.430E-08
2.000	2.000E-09
1.479	8.000E-09
0.974	3.400E-10
0.604	2.400E-10
0.481	1.800E-10

En la gráfica 2.2, se puede apreciar que la curva de descenso está por arriba de la curva de ascenso, se debe a que hay presencia de carga remanente y al tener una altura de fluido pequeña, este fluido queda cargado debido a que no se disipa la corriente.

Electrodo Signo de interrogación - Día 1 - h=0.5cm



Gráfica 2. 2 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Signo de interrogación con h=0.5cm.

En la tabla 2.7 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de estos eventos.

Tabla 2. 7 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación con $h=0.5\text{cm}$.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	1.046	0.253×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	3.026	3.020×10^{-9}	Fenómeno de electrohidrodinámica
III	6.238	0.0212×10^{-6}	Presencia de la descarga deslizante
IV	6.247	0.0380×10^{-6}	Inicio de torbellinos y evacuación del fluido
V	2.509	0.0143×10^{-6}	Cierre del fluido
VI	0.604	0.00024×10^{-6}	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

2.3 Prueba para el electrodo en forma de Signo de interrogación con altura 1.7cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90° .
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 20,000 volts.
- Nivel de líquido aislante 680ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Signo de interrogación

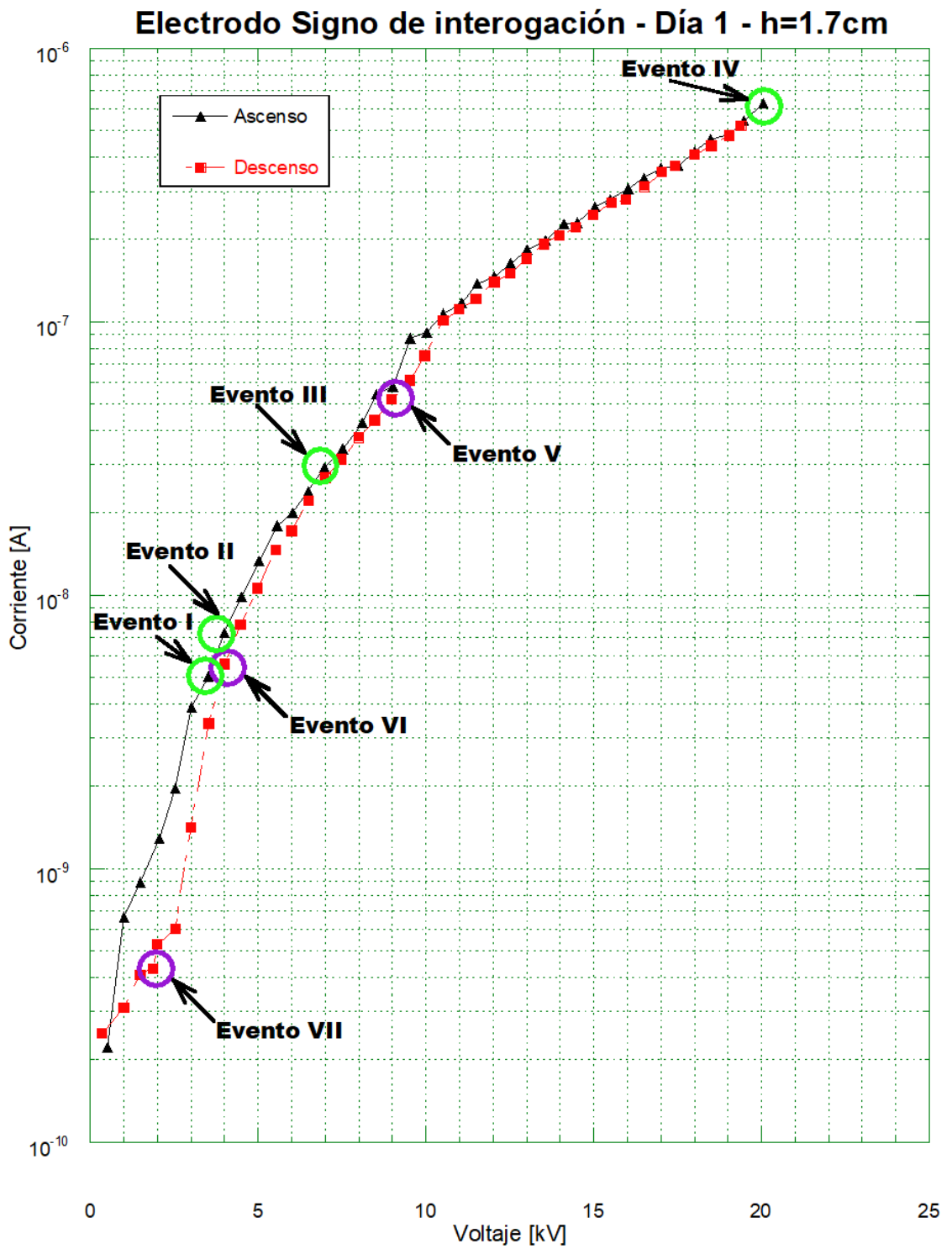
En las tablas 2.8 y 2.9 se muestran los datos de ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva de histéresis de la tensión con la corriente en la gráfica 2.3.

Tabla 2. 8 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Signo de interrogación, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.510	2.220E-10
1.007	6.650E-10
1.499	8.930E-10
2.065	1.290E-09
2.533	1.960E-09
3.019	3.910E-09
3.525	5.040E-09
4.000	7.290E-09
4.505	9.850E-09
5.028	1.329E-08
5.583	1.793E-08
6.025	2.002E-08
6.507	2.400E-08
6.980	2.930E-08
7.520	3.440E-08
8.110	4.270E-08
8.530	5.430E-08
9.030	5.800E-08
9.550	8.720E-08
10.020	9.120E-08
10.530	1.070E-07
11.060	1.170E-07
11.530	1.380E-07
12.030	1.460E-07
12.530	1.630E-07
13.010	1.830E-07
13.560	1.980E-07
14.120	2.280E-07
14.520	2.300E-07
15.030	2.630E-07
15.500	2.800E-07
16.040	3.060E-07
16.500	3.360E-07
17.000	3.640E-07
17.520	3.710E-07
18.000	4.200E-07
18.480	4.650E-07
19.020	4.830E-07
19.470	5.430E-07
20.050	6.310E-07

Tabla 2. 9 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Sino de interrogación, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
20.050	6.310E-07
19.380	5.200E-07
19.040	4.800E-07
18.500	4.400E-07
18.000	4.100E-07
17.420	3.710E-07
17.030	3.520E-07
16.510	3.120E-07
15.950	2.800E-07
15.520	2.730E-07
14.990	2.460E-07
14.460	2.210E-07
13.980	2.070E-07
13.520	1.920E-07
13.000	1.700E-07
12.510	1.500E-07
12.040	1.400E-07
11.500	1.210E-07
11.000	1.110E-07
10.520	1.010E-07
9.980	7.500E-08
9.530	6.120E-08
8.980	5.200E-08
8.480	4.360E-08
8.000	3.770E-08
7.490	3.140E-08
7.000	2.690E-08
6.510	2.220E-08
6.000	1.720E-08
5.530	1.460E-08
4.980	1.060E-08
4.489	7.800E-09
4.000	5.600E-09
3.539	3.400E-09
3.000	1.420E-09
2.532	6.000E-10
2.000	5.300E-10
1.868	4.300E-10
1.494	4.100E-10
1.000	3.100E-10
0.343	2.500E-10



Gráfica 2. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Signo de interrogación con h=1.7cm.

En la tabla 2.10 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de ellos.

Tabla 2. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Signo de interrogación con $h=1.7\text{cm}$.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	3.525	5.040×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	4.000	7.290×10^{-9}	Inicio del fenómeno de electrohidrodinámico
III	6.980	0.0293×10^{-6}	Presencia de la descarga deslizante
IV	20.05	0.631×10^{-6}	Movimiento brusco de la aguja
V	8.980	0.520×10^{-6}	Término de la descarga deslizante
VI	4.000	0.0056×10^{-6}	Perdida del fenómeno de electrohidrodinámica
VII	1.868	0.00043×10^{-6}	Finalización del efecto Sumoto

Apéndice 3

3.1 Pruebas para el electrodo en forma de Circulo con altura 1cm del fluido

En este apéndice se encuentran las pruebas realizadas durante un lapso de cuatro días, los datos registrados son la de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente para cada una de las pruebas. En la gráfica 3.1 se puede observar la curva característica de la descarga deslizante (creeping discharge) de la tensión-corriente y ahí se indica el momento en que ocurre esta descarga en cada una de las pruebas.

Las condiciones para estas pruebas son similares al apartado 5.4, solo con excepción que el aceite utilizado para los cuatro días fue el mismo.

Tabla 3. 1 Registro de tensión-corriente, prueba 2 electrodo Circulo.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.530	4.280E-10
1.007	1.219E-09
1.528	1.923E-09
1.720	2.032E-09
2.010	2.830E-09
2.528	3.990E-09
3.019	5.140E-09
3.520	1.140E-08
4.023	1.266E-08
4.513	1.390E-08
5.038	1.760E-08
5.526	2.030E-08
6.035	2.230E-08
6.399	2.400E-08
6.531	2.480E-08
7.000	3.100E-08
7.520	4.800E-08
8.030	6.100E-08
8.520	7.400E-08
9.000	7.900E-08
9.520	1.030E-07
10.010	1.060E-07
10.360	1.240E-07
10.570	1.320E-07
11.030	1.840E-07
11.500	2.650E-07
12.030	3.780E-07
12.530	4.580E-07
13.020	6.040E-07
13.520	7.840E-07

Tabla 3. 2 Registro de tensión-corriente, prueba 3 electrodo Círculo.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.510	2.530E-10
1.018	4.170E-10
1.582	8.230E-10
2.035	1.170E-09
2.520	2.460E-09
3.030	4.200E-09
3.526	5.970E-09
4.022	7.600E-09
4.518	1.070E-08
5.009	1.350E-08
5.525	1.780E-08
6.000	2.070E-08
6.512	2.720E-08
7.030	3.140E-08
7.560	4.120E-08
8.050	5.520E-08
8.500	7.500E-08
9.070	8.500E-08
9.570	1.030E-07
10.040	1.100E-07
10.490	1.250E-07
11.020	1.450E-07
11.530	2.020E-07
12.030	2.960E-07
12.510	3.920E-07

Tabla 3. 3 Registro de tensión-corriente, prueba 4 electrodo Círculo.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.516	3.150E-10
1.028	4.820E-10
1.529	1.035E-09
2.022	2.185E-09
2.532	5.210E-09
3.024	7.350E-09
3.545	1.029E-08
4.009	1.224E-08
4.562	1.621E-08
5.025	1.960E-08
5.561	2.460E-08
6.050	2.890E-08
6.522	3.190E-08
7.070	4.900E-08
7.520	6.500E-08
8.000	8.500E-08
8.500	9.120E-08
9.070	1.050E-07
9.560	1.200E-07
10.020	1.480E-07
10.610	1.930E-07
10.510	1.930E-07
11.020	2.040E-07
11.550	2.820E-07
12.050	3.620E-07
12.530	5.020E-07

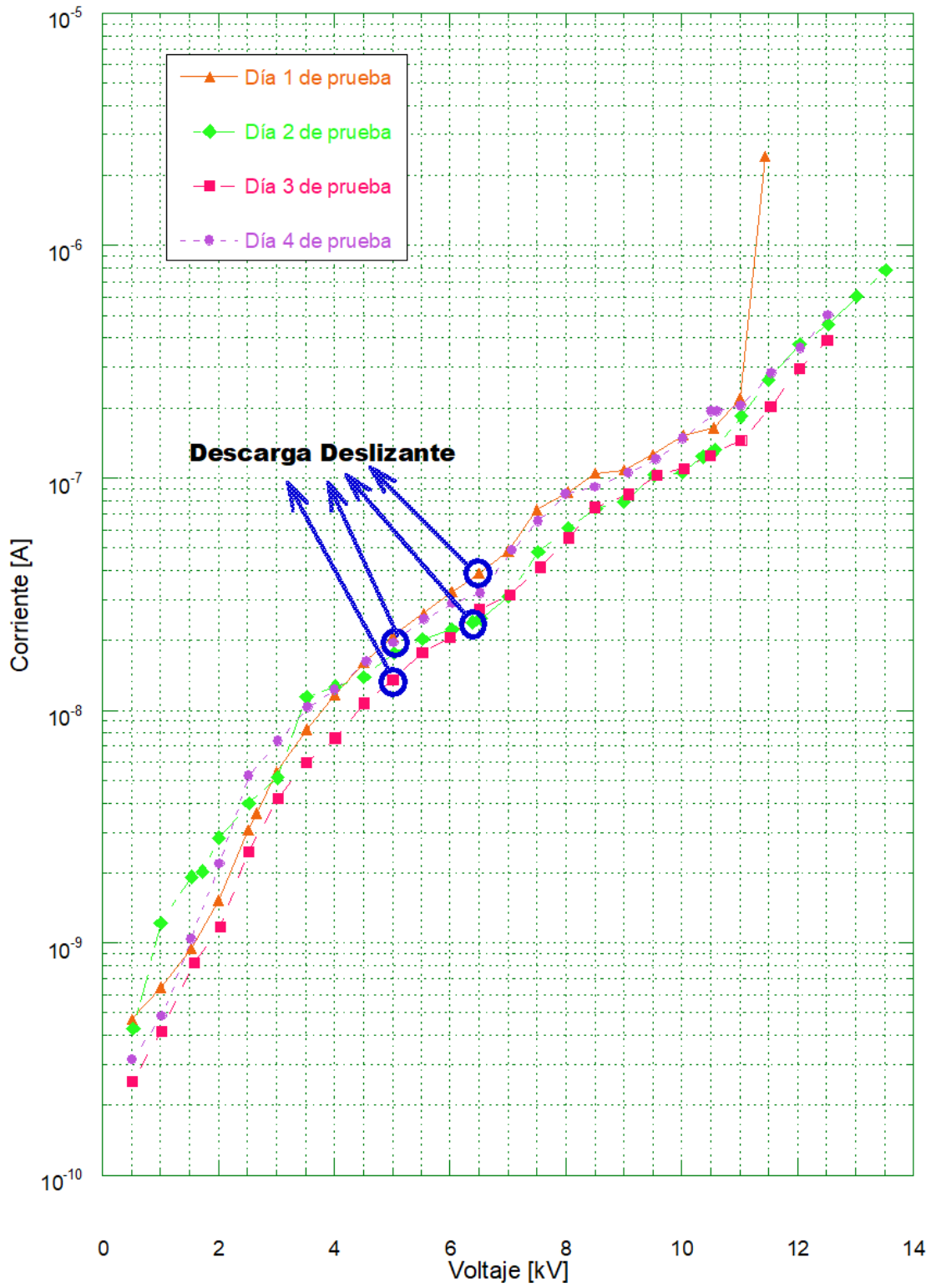
En la gráfica 3.1 se observa la caracterización de las pruebas realizadas, para las cuales la descarga deslizando iba reduciendo la intensidad de la corriente con la que se inició, esto se debe a que en la interfaz de líquido-sólido existen otros factores como lo son el aire, las partículas externas a las que el modelo está expuesto, la percepción del ojo, etcétera.

En la tabla 3.4, se describe la tensión y la corriente en el momento en el que se observó la descarga deslizando para las cuatro pruebas de este electrodo de Círculo.

Tabla 3. 4 Registro de la Descarga Deslizando para cada una de las pruebas del electrodo de Círculo.

Día de Prueba	Voltaje [kV]	Corriente [A]
1	6.502	0.0389×10^{-6}
2	6.339	0.0240×10^{-6}
3	5.525	0.0178×10^{-6}
4	5.561	0.0246×10^{-6}

Electrodo Círculo - h=1cm



Gráfica 3. 1 Descarga Deslizante para cada una de las curvas del electrodo de Círculo.

3.2 Prueba para el electrodo en forma de Círculo con altura 0.5cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 5,500 volts.
- Nivel de líquido aislante 200ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Aro.

En las tablas 3.5 y 3.6 se presentan los datos obtenidos del ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva característica de la tensión con la corriente que se muestra en la gráfica 3.2

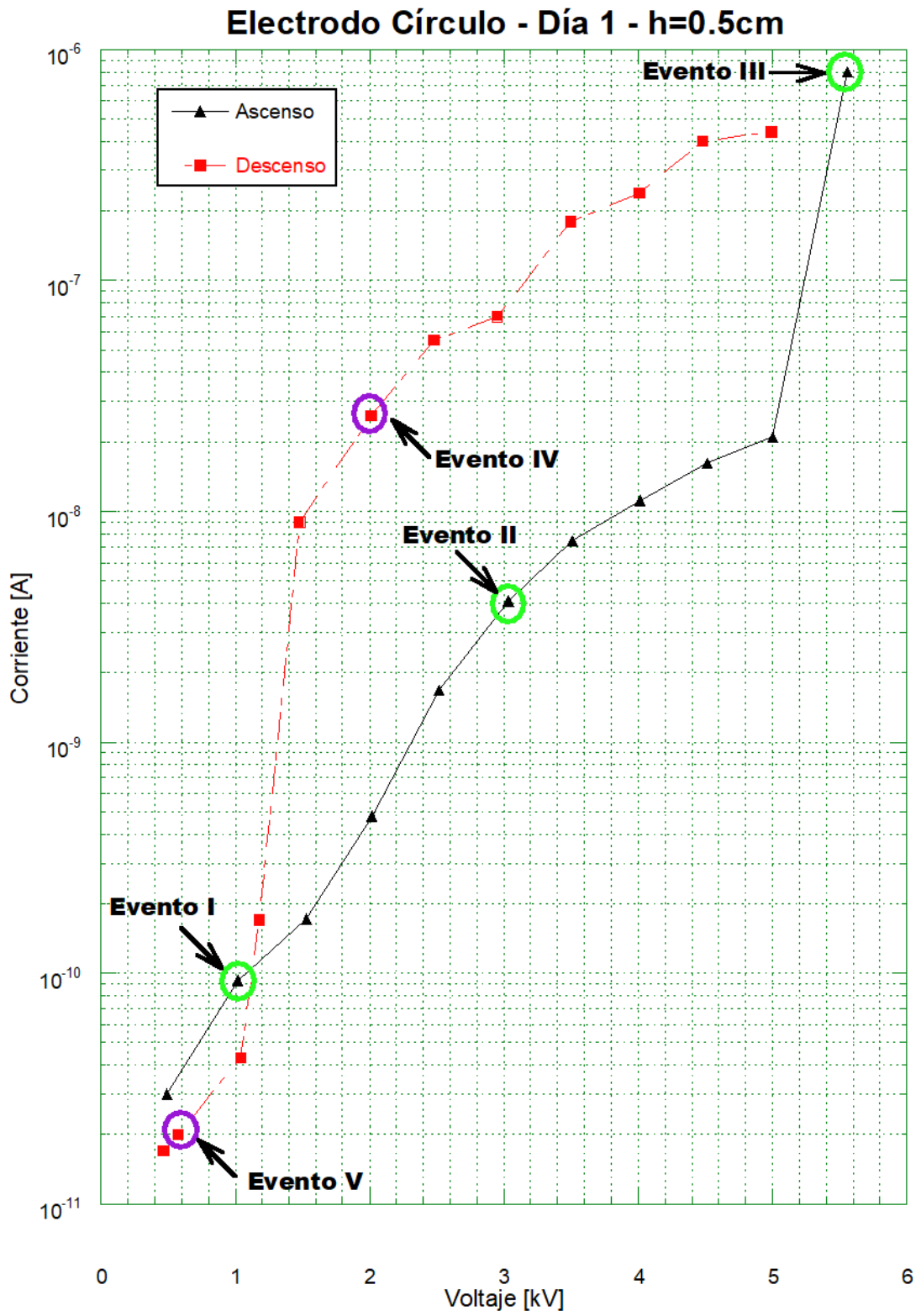
Tabla 3. 5 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Círculo, h=0.5cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.495	3.000E-11
1.017	9.300E-11
1.533	1.710E-10
2.020	4.780E-10
2.517	1.680E-09
3.034	4.108E-09
3.510	7.440E-09
4.015	1.114E-08
4.513	1.620E-08
5.004	2.100E-08
5.558	8.000E-07

Tabla 3. 6 Registro de descenso tensión-corriente, electro Círculo, h=0.5cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
4.990	4.400E-07
4.480	4.000E-07
4.008	2.400E-07
3.500	1.800E-07
2.950	7.000E-08
2.480	5.500E-08
2.012	2.600E-08
1.480	9.000E-09
1.179	1.700E-10
1.040	4.300E-11
0.575	2.000E-11
0.466	1.700E-11

En la gráfica 3.2, se puede apreciar que la curva de descenso está por arriba de la curva de ascenso, se debe a que hay presencia de carga remanente y al tener una altura de fluido pequeña, este fluido queda cargado debido a que no se disipa la corriente.



Gráfica 3. 2Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Círculo con h=0.5cm.

En la tabla 3.7 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de estos eventos.

Tabla 3. 7Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo con h=0.5cm.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	1.017	0.093×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	3.034	4.108×10^{-9}	Fenómeno de electrohidrodinámica
III	5.558	0.800×10^{-6}	Presencia de la descarga deslizante y evacuación del fluido
IV	2.012	0.0260×10^{-6}	Cierre del fluido
V	0.575	1.179×10^{-9}	Finalización del efecto Sumoto y pérdida del fenómeno de electrohidrodinámica

3.3 Prueba para el electrodo en forma de Círculo con altura 1.7cm del fluido

Condiciones empleadas para la caracterización de la descarga deslizante para este electrodo aterrizado son:

- Electrodo de alta tensión a 90°.
- Nivel de tensión aproximada aplicada de 18,000 volts.
- Nivel de líquido aislante 680ml (aceite de canola).

Día 1 de prueba para el electrodo aterrizado en forma de Signo de interrogación

En las tablas 3.8 y 3.9 se muestran los datos de ascenso y descenso de la tensión y la corriente respectivamente. A partir de estos datos registrados se adquiere la curva de histéresis de la tensión con la corriente en la gráfica 3.3.

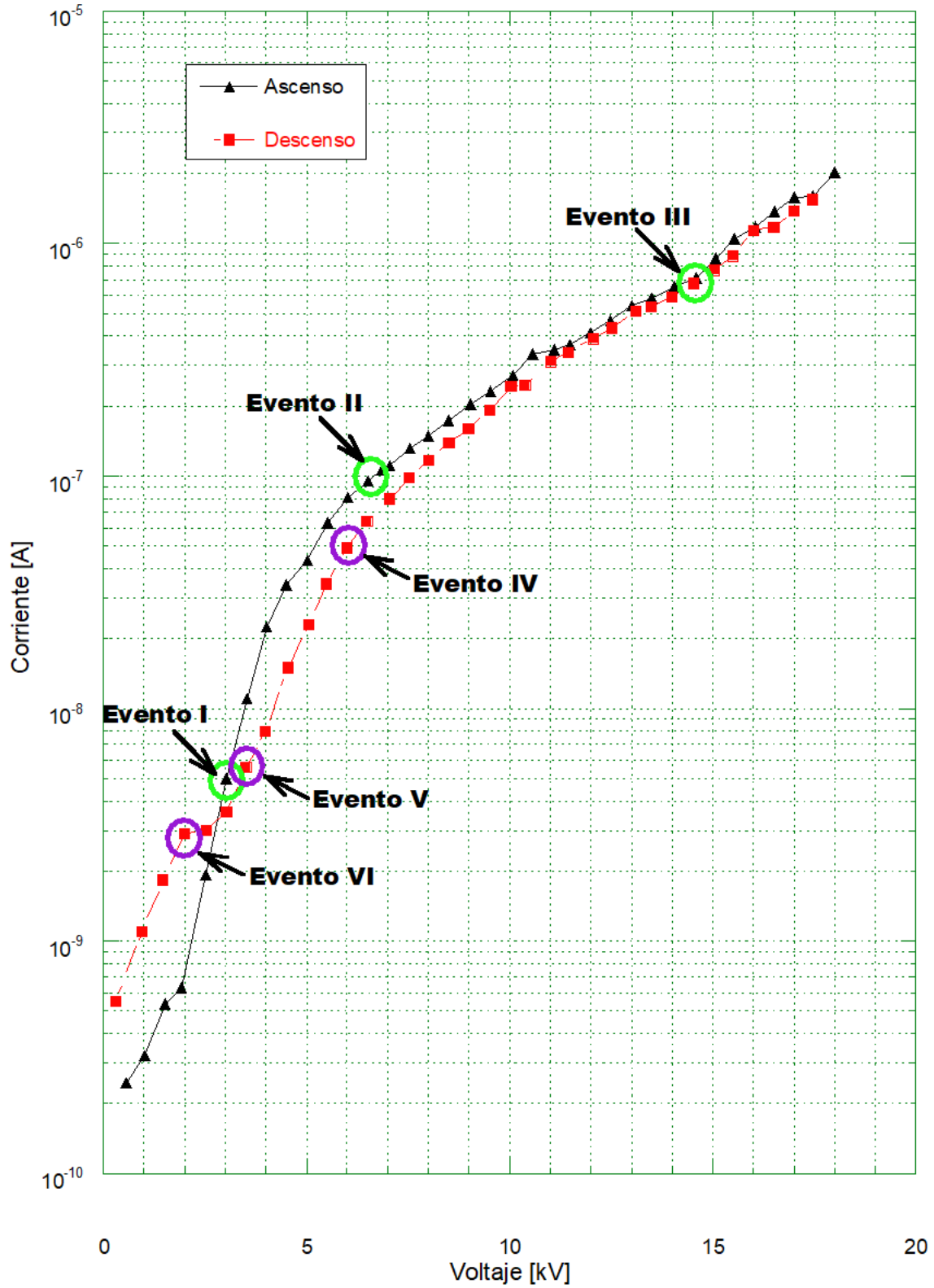
Tabla 3. 8 Registro de ascenso tensión-corriente, electro Círculo, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
0.561	2.450E-10
1.022	3.210E-10
1.524	5.360E-10
1.917	6.300E-10
2.512	1.930E-09
3.023	4.980E-09
3.525	1.104E-08
4.011	2.240E-08
4.502	3.400E-08
5.023	4.340E-08
5.524	6.290E-08
6.020	8.080E-08
6.511	9.530E-08
6.860	1.066E-07
7.040	1.110E-07
7.540	1.312E-07
8.000	1.490E-07
8.500	1.730E-07
9.040	2.040E-07
9.530	2.320E-07
10.080	2.720E-07
10.570	3.350E-07
11.100	3.490E-07
11.490	3.680E-07
11.990	4.130E-07
12.480	4.680E-07
13.000	5.430E-07
13.500	5.820E-07
14.060	6.520E-07
14.590	7.120E-07
15.080	8.620E-07
15.530	1.045E-06
16.060	1.182E-06
16.520	1.370E-06
17.010	1.580E-06
17.460	1.600E-06
18.000	2.020E-06

Tabla 3. 9 Registro de descenso tensión-corriente, electro Círculo, h=1.7cm.

Voltaje [kV]	Corriente [A]
18.000	2.020E-06
17.460	1.540E-06
17.000	1.380E-06
16.500	1.180E-06
16.000	1.140E-06
15.500	8.850E-07
15.040	7.690E-07
14.520	6.740E-07
14.000	5.910E-07
13.480	5.320E-07
13.100	5.100E-07
12.530	4.330E-07
12.060	3.910E-07
11.430	3.400E-07
11.010	3.100E-07
10.380	2.450E-07
10.030	2.430E-07
9.510	1.920E-07
8.990	1.600E-07
8.510	1.390E-07
8.000	1.170E-07
7.530	9.800E-08
7.040	8.000E-08
6.490	6.400E-08
6.000	4.910E-08
5.500	3.430E-08
5.050	2.300E-08
4.540	1.500E-08
3.990	8.000E-09
3.505	5.600E-09
3.024	3.600E-09
2.533	3.000E-09
2.000	2.900E-09
1.470	1.830E-09
0.948	1.100E-09
0.300	5.500E-10

Electrodo Círculo - Día 1 - h=1.7cm



Gráfica 3. 3 Curva de histéresis de la tensión-corriente electrodo Círculo con h=1.7cm.

En la tabla 3.10 mostrada a continuación, se muestran los valores de tensión y corriente conforme se presentaron los eventos, así como una descripción de ellos.

Tabla 3. 10 Niveles de tensión-corriente de los eventos del electrodo de Círculo con $h=1.7\text{cm}$.

Evento	Tensión [kV]	Corriente [A]	Descripción de eventos
I	3.023	4.980×10^{-9}	Aparición del efecto Sumoto
II	6.511	0.0953×10^{-6}	Presencia de la descarga deslizante
III	14.59	0.712×10^{-6}	Inicio de torbellinos
IV	6.00	0.0491×10^{-6}	Término de la descarga deslizante
V	3.505	0.0056×10^{-6}	Perdida del fenómeno de electrohidrodinámica
VI	2.000	0.0029×10^{-6}	Finalización del efecto Sumoto