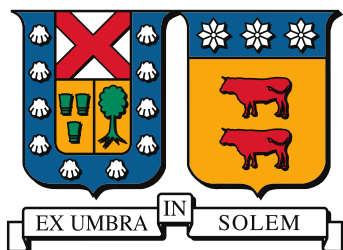


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO – CHILE



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**ANÁLISIS DE LA ENERGÍA ELECTROSTÁTICA
EN DESCARGAS PARCIALES COMO UNA
VARIABLE PARA DETERMINAR EL ESTADO DE
AVANCE DE ÁRBOLES ELÉCTRICOS**

EDUARDO ESTEBAN BAHAMONDE DELGADO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**PROFESORES GUÍAS: ROGER SCHÜRCH BRANDT
 JORGE ARDILA REY**

NOVIEMBRE – 2022

Resumen

En esta memoria se propone una nueva metodología de análisis del fenómeno sobre el crecimiento de árboles eléctricos, a través de la energía electrostática producida en las descargas parciales generadas en ensayos a probetas de resina epóxica. Estas probetas fueron sometidas a tensiones de 10, 12 y 14 [kV] y frecuencias que van de 50, 150, 350 y 550 [Hz], cuyos datos fueron registrados con un osciloscopio avanzado.

Los datos medidos fueron filtrados por medio de los mapas SF, cuya técnica consiste en clasificar diferentes fuentes de descargas parciales a partir del cálculo de parámetros característicos, siendo el ruido asociado a las mediciones el que interesa erradicar en el análisis. Esta técnica se centra en generar grupos característicos (*clustering*) desde los parámetros S y F . El primero caracteriza la forma de onda de los pulsos de cada descarga por medio del cálculo directo del parámetro *skewness* de la señal normalizada. En cuanto a la variable F se denomina frecuencia máxima ponderada, la que se puede entender como un caracterizador del contenido en frecuencia con mayor relevancia en cada una de las señales medidas. Posteriormente analizados con el método de series de tiempo no lineales, mediante la técnica matemática del máximo exponente de Lyapunov (LLE), la que entrega como información que tan caótica es una serie de datos de manera local por medio de su magnitud. Esto busca relacionar que tan caótica se va poniendo la serie de datos de energía, dada la naturaleza no determinista en los factores que dan pie a la generación de la DP. Además, la metodología propuesta es comparada de manera cualitativa con los métodos clásicos utilizados en el estudio de las DP (diagramas PRPD y PSA), con el objetivo de evaluar su desempeño.

Se observa en primer lugar que utilizar la función de energía acumulada (TCE) en vez de la energía como tal, entrega más información. Adicionalmente, se tendrá que tan caótica es la serie de datos, una relación entre la magnitud en los exponentes y la razón de crecimiento que tenga la función de energía acumulada, además la velocidad con la que vaya creciendo la longitud del árbol. Del análisis se tiene un comportamiento característico que se compone de tres tramos bien determinados. El primer tramo se establece de una cuantiosa actividad, la que es representada con un alza en magnitud y densidad del exponente. Luego viene un segundo tramo en que descienden la cantidad de descargas, siendo poca a nula la presencia de la variable de Lyapunov. Un tercer tramo donde surge una reactivación en las descargas parciales, dando lugar al crecimiento de la energía acumulada en las cercanías del largo máximo del árbol eléctrico, representada por una mayor densidad y magnitud en los valores del LLE. En dicho tramo al tener un elevado valor en magnitud del exponente, es una señal de que se está próximo al largo máximo del dieléctrico, siendo un indicativo del estado de

avance en el material y por lo tanto un indicio de una posible falla catastrófica. Por último, referente a la comparación con los métodos clásicos, se cumple una correlación entre la variable del máximo exponente de Lyapunov y la dispersión aleatoria en los datos graficados. En el patrón PRPD se asocia la dispersión de los datos registrados en cada semiciclo, de la misma manera ocurre con los grupos asociados a las descargas internas obtenidas del diagrama PSA. Esto indica la conexión entre la naturaleza caótica en la iniciación de las DP, a través de la variable LLE en la función TCE con la dispersión observada en ambos diagramas.

Abstract

This study proposes a new methodology for analyzing the phenomenon of the growth of electric trees, through the electrostatic energy produced in the partial discharges generated in tests on epoxy resin specimens. These specimens were subjected to voltages of 10, 12 and 14 [kV] and frequencies ranging from 50, 150, 350 and 550 [Hz], whose data were recorded with an advanced oscilloscope.

The measured data were filtered by means of the SF maps, whose technique consists of classifying different sources of partial discharges from the calculation of characteristic parameters, being the noise associated with the measurements the one that interests to eradicate in the analysis. This technique focuses on generating characteristic groups (*clustering*) from the parameters S and F . The first characterizes the waveform of the pulses of each discharge by means of the direct calculation of the *skewness* parameter of the normalized signal. As for the variable F , it is called the weighted maximum frequency, which can be understood as a characterizer of the content in frequency with greater relevance in each of the measured signals. Later analyzed with the method of nonlinear time series, using the mathematical technique of the maximum Lyapunov exponent (LLE), which delivers as information how chaotic is a series of data locally by means of its magnitude. This seeks to relate how chaotic the energy data series is getting, given the non-deterministic nature of the factors that give rise to the generation of PD. In addition, the proposed methodology is qualitatively compared with the classical methods used in the study of PD (PRPD and PSA diagrams), with the aim of evaluating their performance.

It is first noted that using the accumulated energy function (TCE) instead of energy as such, provides more information. Additionally, it will have to be so chaotic the data series, a relationship between the magnitude in the exponents and the growth ratio that the accumulated energy function has, in addition to the speed with which the length of the tree grows. The analysis has a characteristic behavior that is composed of three well-determined sections. The first section is established of a large activity, which is represented with an increase in magnitude and density of the exponent. Then comes a second section in which the number of discharges decreases, being little to zero the presence of the Lyapunov variable. A third section where a reactivation arises in the partial discharges, giving rise to the growth of the energy accumulated in the vicinity of the maximum length of the electric tree, represented by a greater density and magnitude in the values of the LLE. In this section, having a high value in magnitude of the exponent, it is a sign that it is close to the maximum length of the dielectric, being an indication of the state of progress in the material and therefore an indication of a possible catastrophic failure. Finally, regarding the comparison

with classical methods, there is a correlation between the variable of the maximum Lyapunov exponent and the random dispersion in the graphed data. In the PRPD pattern, the dispersion of the data recorded in each half-cycle is associated, in the same way it happens with the groups associated with the internal discharges obtained from the PSA diagram. This indicates the connection between the chaotic nature in the initiation of PD, through the variable LLE in the TCE function with the dispersion observed in both diagrams.

Glosario

- DP : Descarga parcial.
- PRPD : Análisis resuelta en fase de descargas parciales (*“Phase-Resolved Partial Discharge”*).
- PSA : Análisis de secuencia de pulsos (*“Pulse Sequence Analysis”*).
- CE : Energía acumulada (*“Cumulative Energy”*).
- TCE : Función de energía acumulada en el dominio del tiempo (*“Time domain Cumulative Energy function”*).
- LLE : Máximo exponente de Lyapunov (*“Largest Lyapunov Exponent”*).
- AT : Alta tensión.

Índice General

Resumen	I
Abstract	III
Glosario	V
Índice General	VI
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	X
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcance	4
Capítulo 2 Marco Teórico	5
2.1 Marco general	5
2.2 Descargas parciales	6
2.2.1 Tipos de DP	7
2.2.1.1 DP internas	7
2.3 Análisis clásicos de DP	8
2.3.1 Análisis resuelto en fase de DP (PRPD)	8
2.3.2 Análisis de secuencia de pulsos (PSA)	8
2.4 Energía en las DP	9
2.4.1 Energía electrostática	9
2.4.2 Función de energía acumulada	10
2.5 Análisis de series de tiempo no lineales	11
2.5.1 Reconstrucción del estado de fase	11
2.5.2 Tiempo de retardo	12
2.5.3 Dimensión de incrustación	12

2.5.4	Cálculo del máximo exponente de Lyapunov _____	13
Capítulo 3	Metodología _____	14
3.1	Fabricación de probetas _____	14
3.2	Banco de prueba _____	15
3.2.1	Fuente de tensión _____	15
3.2.2	Circuito de medición de DP _____	15
3.2.3	Correlación entre la actividad de DP y crecimiento del árbol eléctrico _____	17
3.3	Procesamientos de los datos y metodología de análisis. _____	18
3.4	Bases de datos generada. _____	23
Capítulo 4	Resultados y Análisis _____	28
4.1	Análisis de la energía a través del LLE _____	28
4.1.1	Ensayos a 12 [kV] y 50 [Hz] _____	28
4.1.2	Ensayos a 10 [kV] y 50 [Hz] _____	36
4.1.3	Ensayos a 14 [kV] y 50 [Hz] _____	38
4.1.4	Ensayos a 12 [kV] y 150 [Hz] _____	40
4.1.5	Ensayos a 10 [kV] y 150 [Hz] _____	43
4.1.6	Ensayos a 14 [kV] y 150 [Hz] _____	45
4.1.7	Ensayos a 12 [kV] y 350 [Hz] _____	47
4.1.8	Ensayos a 10 [kV] y 350 [Hz] _____	50
4.1.9	Ensayos a 14 [kV] y 350 [Hz] _____	52
4.1.10	Ensayos a 12 [kV] y 550 [Hz] _____	54
4.1.11	Ensayos a 10 [kV] y 550 [Hz] _____	57
4.1.12	Ensayos a 14 [kV] y 550 [Hz] _____	59
4.2	Evaluación y comparación de la metodología propuesta con los modelos clásicos (diagramas PRPD y PSA) _____	61
4.2.1	Evaluación y comparación a 12 [kV] y 50 [Hz] _____	61
4.2.2	Evaluación y comparación a 12 [kV] y 150 [Hz] _____	65
4.2.3	Evaluación y comparación a 12 [kV] y 350 [Hz] _____	68
4.2.4	Evaluación y comparación a 12 [kV] y 550 [Hz] _____	71
Capítulo 5	Conclusiones y trabajos futuros _____	74
5.1	Conclusiones _____	74

Índice General

5.2	Trabajos futuros	77
Referencias		78
Anexo A	Detalles electrodo Ogura	82

Índice de Figuras

Figura 1.1: Ejemplo de árboles eléctricos creciendo en resina epóxica [7].	3
Figura 2.1: Esquema de cada tipo de DP: internas, superficiales y corona [21].	7
Figura 2.2: Ejemplo de diagramas PRPD para distintos tipos de DP [13].	8
Figura 2.3: Ejemplo de diagramas PSA para distintos tipos de DP [13].	9
Figura 3.1: Esquema y un ejemplo fotográfico de una probeta.	15
Figura 3.2: Circuito balanceado según Norma IEC 60270 [2].	16
Figura 3.3: Circuito de medición y monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos.	16
Figura 3.4: Elementos utilizados en el registro de las señales de pulsos DP.	17
Figura 3.5: Cámara óptica y lente macro para registro fotográfico.	17
Figura 3.6: Parámetros de caracterización skewness.	18
Figura 3.7: Diagrama de obtención del parámetro F .	19
Figura 3.8: Ejemplo de filtrado utilizando el mapa SF.	20
Figura 3.9: Representación gráfica de los tramos y punto LLE obtenido en cada uno.	22
Figura 4.1: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] utilizando la señal de energía.	32
Figura 4.2: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz].	36
Figura 4.3: Resultados gráficos a 10 [kV] y 50 [Hz].	37
Figura 4.4: Resultados gráficos a 14 [kV] y 50 [Hz].	39
Figura 4.5: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz].	43
Figura 4.6: Resultados gráficos a 10 [kV] y 150 [Hz].	44
Figura 4.7: Resultados gráficos a 14 [kV] y 150 [Hz].	46
Figura 4.8: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz].	50
Figura 4.9: Resultados gráficos a 10 [kV] y 350 [Hz].	51
Figura 4.10: Resultados gráficos a 14 [kV] y 350 [Hz].	53
Figura 4.11: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz].	57
Figura 4.12: Resultados gráficos a 10 [kV] y 550 [Hz].	58
Figura 4.13: Resultados gráficos a 14 [kV] y 550 [Hz].	60
Figura 4.14: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] en probeta P24.	63
Figura 4.15: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] en probeta P25.	64
Figura 4.16: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz] en probeta P26.	66
Figura 4.17: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz] en probeta P27.	67
Figura 4.18: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz] en probeta P28.	69
Figura 4.19: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz] en probeta P30.	70
Figura 4.20: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz] en probeta P32.	72
Figura 4.21: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz] en probeta P33.	73
Figura A.1: Geometría y sus dimensiones electrodo Ogura.	82

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Características de las probetas. _____	25
Tabla 3.2: Características principales de los ensayos realizados. _____	26
Tabla 3.3: Características principales de los tramos 1 y 2. _____	27
Tabla 3.4: Características principales de los tramos 3 y 4. _____	27

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En los sistemas eléctricos de potencia (SEP), el suministro de energía debe ser seguro y confiable para mantener la continuidad de este. Con el tiempo los niveles de tensión sometidos a los equipos eléctricos son mayores y esto ha llevado al uso de nuevos materiales, como también afrontar nuevos desafíos en el campo de la mantención y diagnóstico de los materiales aislantes utilizados. Conocer el estado del aislamiento de los equipos en alta tensión ha pasado a ser un tema de suma importancia para cumplir estas propiedades requeridas en el sistema. Uno de los ejemplos en equipamientos eléctricos primordial hoy en día en los SEP son los cables en alta tensión, los cuales utilizan aislamientos poliméricos [1] que han sido lo más adecuados en cuanto a sus propiedades dieléctricas y de costos para la industria.

En la fabricación en la aislación de los equipos pueden quedar imperfecciones tales como vacuolas, partículas contaminantes ajenas al material dieléctrico, entre otras. Al estar sometidos a altas tensiones son comúnmente afectados por descargas parciales dada la aparición de campos eléctricos elevados que da pie a este fenómeno, siendo rupturas eléctricas localizadas involucrando solo una pequeña parte de material aislante [2]. En [3] definen a las DP como descargas eléctricas localizadas al interior de cualquier sistema de aislamiento. Dentro de su dinámica es influenciada por la forma de onda de la tensión aplicada que estresa el dieléctrico, siendo la amplitud, frecuencia y distorsión armónica variables importantes en su comportamiento [4], [5]. Estas descargas pueden ser del tipo superficiales, corona o internas [6]. Las descargas superficiales aparecen entre el borde de dos dieléctricos, siendo el caso más habitual entre aislante y aire, con una gran intensidad de campo tangencial en los bordes y siendo magnificadas por la presencia de contaminación y/o humedad del ambiente. Un caso típico de descargas superficiales son las cadenas de aisladores o entre espiras de máquinas eléctricas. Las del tipo corona ocurren en puntos de conducción agudos que amplifican el campo eléctrico, lo que ioniza el medio circundante generando microarcs. Un ejemplo típico es en los conductores de alta tensión con el efecto corona que ioniza el gas alrededor del conductor, siendo visible como un halo luminoso. Finalmente, las descargas internas suelen ocurrir en vacuolas de baja rigidez dieléctrica presentes en el medio aislante, siendo consideradas las más dañinas y difíciles de detectar en

los equipos eléctricos. Un tipo de DP que se generan internamente son los árboles eléctricos, siendo un mecanismo de degradación a largo plazo, variable y progresivo con el tiempo. Este mecanismo afecta el aislamiento polimérico sólido en equipos eléctricos de alto voltaje [7]. Los árboles eléctricos son uno de los principales causantes de fallas catastróficas en equipamiento de alta tensión, por la degradación de material que provoca, esto se puede apreciar en la **Figura 1.1**. Los árboles eléctricos son difíciles de detectar y el daño que causan es irreversible. Bajo la acción de las descargas parciales irán creciendo por medio de canales de degradación que en definitiva llevar a la falla del aislamiento [8]. El crecimiento de árboles es un proceso que se puede describir en dos etapas [9]. La primera etapa es la iniciación del árbol, donde se forma una pequeña vacuola en una región sometida a un alto estrés eléctrico local. Luego en la segunda etapa viene la propagación del árbol, formando pequeños túbulos huecos llenos de gas interconectados que son generados por las descargas internas que van degradando el material aislante. Este proceso sigue en el tiempo hasta el punto donde la longitud del árbol abarca la totalidad del material aislante, provocando la ruptura.

Normalmente el análisis de las DP viene dado a partir de los modelos clásicos de PRPD y PSA. El modelo PRPD se representa la magnitud de carga a una tensión aplicada en un ciclo de referencia y magnitud para cada fase [10]. Este método se utiliza en la identificación de fuentes de DP y realizar diagnósticos en la aislación de materiales eléctricos a través del análisis y clasificación de los patrones PRPD. Este método generalmente utiliza herramientas estadísticas en el análisis, por lo cual se asocia a un enfoque estocástico de las descargas parciales [11]. Una problemática de utilizar este método es que se pierde la temporalidad del fenómeno, dado que se pierde información de pulsos de DP sucesivos y por tanto de la dinámica del crecimiento de los árboles [12].

En tanto el modelo PSA utiliza diferencias en la magnitud de tensión en la DP actual con la siguiente y actual con la anterior [13]. Este método ha mostrado un gran desempeño a la hora de diagnosticar el aislamiento eléctrico para varios defectos presente [14]. También ha mostrado un mejor desempeño en el pronóstico de vida útil de los aislamientos para el fenómeno de árboles eléctricos en comparación al método PRPD [15].

Ambos modelos entregan patrones que caracterizan cada tipo de DP. Estas técnicas de análisis entregan información para caracterizar el crecimiento de árboles eléctricos, los cuales permiten saber el estado de degradación en los materiales aislantes. Sin embargo, las técnicas antes mencionadas no son capaces de describir completamente el crecimiento y predecir la vida útil restante del material ante de la falla catastrófica, entregando solo patrones para determinar el o los tipos de DP que están afectando al material aislante.

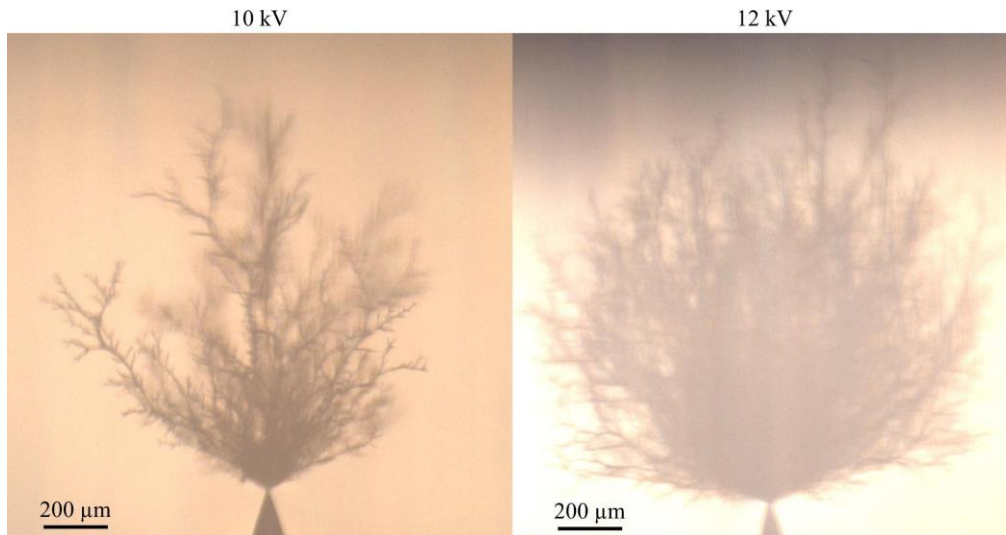


Figura 1.1: Ejemplo de árboles eléctricos creciendo en resina epóxica [7].

En la actualidad, la energía involucrada en una DP no se utiliza mayormente como método de diagnóstico, a pesar de que varios modelos de degradación atribuyen a que la acción de erosión de las descargas parciales son las causantes de degradación y progresión de los árboles eléctricos. Existen algunos modelos de propagación de árboles que se basan en cómo la energía de las DP daña el material, o dictan un nivel de energía requerido para la formación de nuevas ramas [7]. Además, se propone un modelo que relaciona la energía en DP y el volumen evaporado del material, a partir de la rotura de los enlaces covalentes y la energía que se requiere para esto [7]. De esta relación entre la energía de los enlaces y de las descargas, se obtiene un porcentaje de la energía de las DP que pasa efectivamente a la disociación de material y se entrega una cifra que indica la cantidad de volumen que se evapora por joule eléctrico de energía. También se ha correlacionado la radiación electromagnética y la carga aparente de acuerdo con el estándar IEC60270 en ensayos de DP para diferentes geometrías [16].

A partir de esto surge la idea de analizar la energía producida en las descargas parciales desde otra perspectiva, donde se relacione el comportamiento del crecimiento de árboles eléctricos y la energía como una variable directa. Con este nuevo enfoque se busca una técnica que pueda describir el avance que tiene el árbol eléctrico, igualmente tener la capacidad de determinar su estado de avance en el material, se logre estimar la vida útil restante de este. A partir de esto se puede mejorar el programa de mantenimiento y evitar posibles fallas catastróficas de equipamiento eléctrico de gran importancia. Con esta nueva técnica se busca establecer un nuevo punto de vista en el análisis de este fenómeno, donde la energía electrostática en descargas parciales se utilice como una variable y pueda ser capaz de determinar el estado de avance de árboles eléctricos, bajo amplitud y frecuencia variable.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Evaluar el uso de la energía electrostática en descargas parciales como una variable para determinar el estado de avance de árboles eléctricos en resina epóxica bajo excitación de amplitud y frecuencia variable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Generar una base de datos experimental de crecimientos de árboles eléctricos a distintas tensiones y frecuencias en probetas de resina epóxica.
- Analizar la energía electrostática producida en las descargas parciales y relacionarla con el comportamiento del crecimiento de árboles eléctricos sujetos a distintas magnitudes y frecuencias en la tensión.
- Desarrollar una técnica de análisis en el comportamiento del crecimiento de árboles eléctricos basado en la energía involucrada en las descargas parciales.
- Realizar ensayos experimentales en probetas poniendo a prueba la técnica propuesta y evaluar su desempeño en comparación a modelos clásicos como PRPD (*“Phase-resolved partial discharge”*) y PSA (*“Pulse Sequence Analysis”*).

1.3 Alcance

El alcance de este trabajo de memoria busca un nuevo enfoque en el análisis del crecimiento de árboles eléctricos mediante la energía electrostática involucrada en las descargas parciales generadas dentro de probetas de resina epóxica. Con el objetivo de determinar si existe una relación entre el grado de avance del árbol y la energía involucrada en las DP. Brindando una nueva técnica de análisis para este fenómeno, como también complementar las ya existente tales como PRPD y PSA.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se hace una descripción breve sobre el estado del arte en el uso de la energía con respecto al fenómeno de las descargas parciales. Además, se hace una explicación en los métodos de análisis empleados en este trabajo.

2.1 Marco general

En la actualidad la confiabilidad, fiabilidad y un suministro continuo de energía de los sistemas eléctricos de potencia es de vital importancia. Para cumplir con este propósito el diagnosticar y conocer el estado en el aislamiento eléctrico en los equipos es clave. Los dieléctricos utilizados en los equipos de alta tensión que van de resinas epóxica, papel impregnado en aceite y polietileno pueden quedar con imperfecciones en su proceso de fabricación. Estas imperfecciones van de vacuolas a contaminaciones que quedan en el material, entre otras que modifican sus propiedades dieléctricas. Otro escenario es que en el transcurso de su uso están constantemente sometidos a esfuerzos mecánicos, térmicos y eléctricos que también van degradando sus propiedades y en consecuencia su vida útil se ve afectada. Esto puede desencadenar una falla catastrófica, llevando a la interrupción del suministro eléctrico.

Esta degradación en las propiedades en los materiales aislante trae como consecuencia que localmente se hallan campos eléctricos elevados en magnitud, lo que genera el fenómeno de descargas parciales internas. La acción continua de las DP en el aislante da lugar al crecimiento de los llamados arboles eléctricos. Estas constan de canales de material degradado localmente por la DP, que al paso del tiempo el daño es acumulativo llegando incluso a la pérdida en la propiedad aislante del material y por consiguiente a la falla catastrófica. Si se tiene la suficiente información al estudiar este fenómeno, se puede estimar en forma precisa la vida útil restante de los aislantes en los equipos eléctricos, mejorando los planes de mantenimiento de estos y hacer una buena gestión en los SEP.

En el estudio de la condición en los aislamientos a través de la energía electrostática generadas por las DP, es prácticamente nulo. En [10] hacen un estudio de 3 tipos de descargas que afectan a maquinas rotativas (delaminación, descargas en vacío y descargas en ranuras), usando la energía disipada de los diferentes tipos de DP. Esto se elabora a través de un

diagrama PRPD haciendo uso de la energía efectiva en vez de la magnitud de carga, lo que llaman “patrón de energía”. Esto entrega información adicional en la clasificación de tipos de DP que están sometidos en los equipos, pero no entrega el estado de degradación (vida útil restante) del material aislante. También hace mención que se consigue establecer una correlación entre el “patrón de energía” y mediciones de $\tan(\delta)$ para calificar la salud del aislamiento, pero no ahonda más en cuanto a precisar el estado de avance en la degradación del material. En la sección 1.1 se hace mención del uso de la energía electrostática en descargas parciales de varias formas. Estas van desde el empleado en el daño en el material, establecer niveles para la formación de nuevas ramas, relación entre el volumen evaporado y la rotura de los enlaces en las moléculas y correlación entre la radiación electromagnética y la carga aparente de acuerdo con el estándar IEC60270 para diversas geometrías. Por otra parte, se puede agregar el uso de la energía en la separación de fuente y los tipos de DP que están presentes con diferentes técnicas, como se describe en [17]–[19]. Este trabajo busca emplear la energía electrostática en descargas parciales como una variable y sea capaz de determinar el estado de avance de árboles eléctricos, bajo amplitud y frecuencia variable.

2.2 Descargas parciales

Anteriormente en las secciones 1.1 y 2.1 se entregaron algunas definiciones de las descargas parciales. En [2] también se describe como “descarga de baja energía, localizada en un microvolumen del material, que no compromete el espacio dieléctrico existente entre los electrodos. Cuando estos se someten a una sollicitación de voltaje”. Este fenómeno se caracteriza por ser un proceso transitorio de ionización, al estar expuesto a un alto campo eléctrico en una zona no homogénea de material. Estas zonas sensibles van de vacuolas de gas en dieléctricos sólidos, burbujas en líquidos, alrededor de electrodos muy agudos, grietas entre estratos de dos materiales, elementos extraños en el material y la degradación en la homogeneidad del aislamiento, entre otros factores.

El proceso de ocurrencia de la DP es un proceso estocástico, debido a que se requiere de un electrón libre para la iniciación de este fenómeno [8]. Se puede describir tres estados característicos que van ocurriendo a lo largo de su desarrollo [3], [8], [20]. El primer estado que se presenta es llamado *Streamer*, en el cual al haber una concentración de carga por un alto campo eléctrico ejerce que haya descargas de una densidad de energía muy alta, dañando gravemente la superficie del polímero donde chocan. Por esta razón la magnitud en las DP son pulsos de corriente casi instantáneas, en el orden de los nanosegundos y valores entre 10 – 100 [mA], dentro de los primeros 10 a 60 minutos iniciales de la actividad. Pasado este tiempo vienen el segundo estado llamado *Townsend*, que es una sucesión de ionizaciones de las moléculas en el material por electrones libres, las cuales se van generando en el mismo proceso, dando así una avalancha autosostenida. Este proceso es más lento en comparación al anterior, el cual deja fluir una corriente de una magnitud menor, apreciándose un mayor deterioro y oxidación en el aislante que principalmente son causadas por las descargas de tipo *Streamer*. Finalmente, después de una actividad permanente que va desde horas a días

viene el estado de *Pitting*, donde la magnitud de las DP decrece hasta el orden de los μA , sin embargo, aumenta la cantidad de descargas a decenas por microsegundo. En este estado se produce la mayor degradación del aislante por medio de dos mecanismos, los iniciados por bombardeo de iones y por reacciones químicas, dando pie a la formación de árboles eléctricos y posterior falla catastrófica del aislante.

2.2.1 Tipos de DP

Dentro del fenómeno de DP, se puede encontrar tres tipos: superficiales, corona e internas [21], las cuales se presenta en el esquema de cada una en la **Figura 2.1**. Las del tipo superficiales se producen en la superficie de los aisladores, al encontrar un camino de mayor conducción debido a la presencia de humedad o contaminación, lo que provoca perdida en su eficacia. Esta se da en aisladores aéreos, terminales de cables y en la superficie de los devanados de motores y transformadores. Las de tipo corona son descargas que se producen al exceder la tensión de ruptura del aire o gas circundante, en zonas puntiagudas o afiladas que generan una concentración de campo eléctrico por la tensión sometida. Estas forman un halo luminoso alrededor de los conductores de AT en forma de corona, de ahí el nombre. Se forman en bordes afilados de máquinas, tornillos o pernos de los conductores. Por último, queda la DP de tipo internas que se producen al interior de aislante del tipo sólido o líquido, en cavidades generalmente microscópicas que poseen una rigidez dieléctrica menor al material. Dichas cavidades pueden ser defecto o burbujas de los materiales aislante tales como: resina, mica, papel o polietileno, la que también se pueden generar en las cercanías de algunos electrodos.

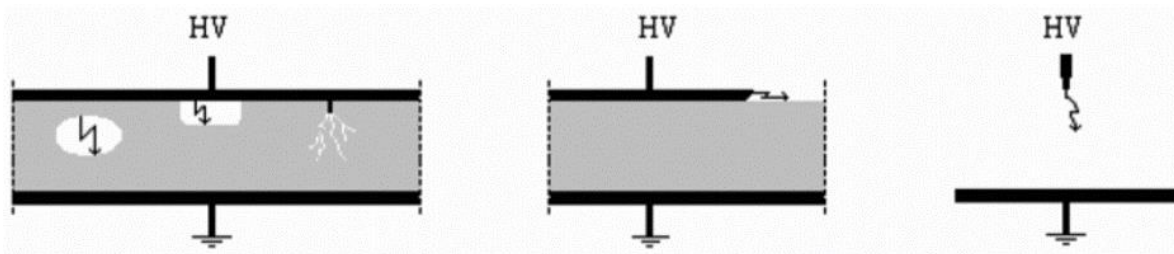


Figura 2.1: Esquema de cada tipo de DP: internas, superficiales y corona [21].

2.2.1.1 DP internas

Las DP internas son las de mayor dificultad de detectar en campo, puesto que no presentan síntomas visibles o audibles de fácil detección. Su actividad de forma prolongada en los puntos débiles del dieléctrico logra generar una rotura y posterior falla catastrófica. Por esta razón se considera la DP más dañina en los equipos eléctricos, provocando que la mayoría de los trabajos asociados a la medida de DP en aislante se suelen centrar en este tipo de descargas en motores, transformadores y cables.

2.3 Análisis clásicos de DP

En la medición de las descargas parciales en el tiempo siempre ha estado el inconveniente de la presencia del ruido electromagnético. Esto conduce a sacar conclusiones erróneas al momento de realizar análisis, así como no aportar ninguna información relevante del estado de los aislamientos. Esta problemática ha llevado a que la identificación y posterior separación de las distintas fuentes de DP pase a ser un requerimiento fundamental para el correcto análisis del estado en el aislamiento. A continuación, se describen las técnicas tradicionales en la clasificación de las DP.

2.3.1 Análisis resuelto en fase de DP (PRPD)

El análisis por diagramas PRPD (“*Phase-resolved partial discharge*”) es la forma más clásica y robusta en el análisis del fenómeno de las DP hasta la fecha para realizar su clasificación y diagnóstico de aislamiento. Este método consiste en tomar la magnitud de carga y ángulo de fase de la tensión aplicada en que ocurre la descarga parcial, además se considera el número de ocurrencia por ángulo de fase. El proceso se representa en un ciclo del tipo sinusoidal para todas las DP que ocurren durante el proceso. Este método utiliza diferentes parámetros estadísticos para realizar la clasificación de las DP, debido a que dicho fenómeno es un proceso estocástico. Un inconveniente del análisis es que se pierde la evolución temporal de los pulsos sucesivos, por ende, la información física del proceso en sí.

En la **Figura 2.2** se presenta ejemplos de diagramas PRPD para descargas en una burbuja de vacío a 24 [kV], descarga superficial a 6 [kV] y descarga tipo corona a 14 [kV].

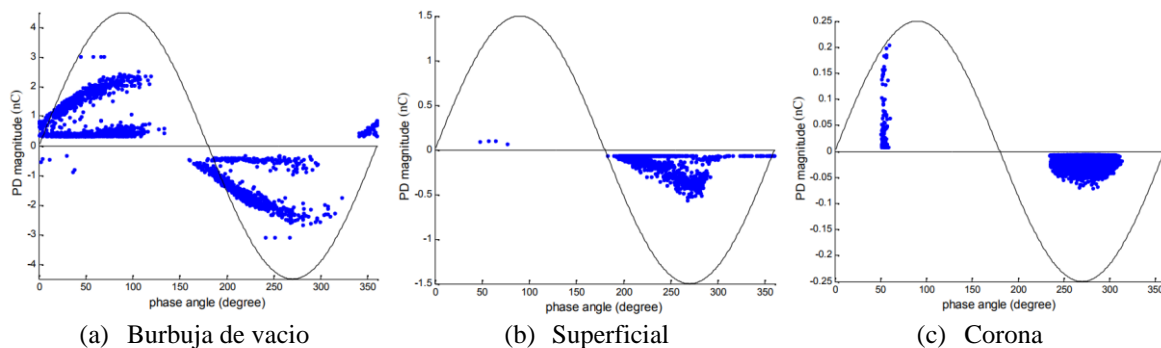


Figura 2.2: Ejemplo de diagramas PRPD para distintos tipos de DP [13].

2.3.2 Análisis de secuencia de pulsos (PSA)

Los diagramas PSA (“*Pulse Sequence Analysis*”) realizan un análisis entre los pulsos sucesivos que se generan en las DP. Se basa en que la carga espacial que queda posterior a un evento de DP tiene un efecto para el siguiente pulso. En consecuencia, no se puede considerar pulsos sucesivos como eventos independientes sin perder información de su origen físico que la originó. El método forma un registro de valores de interés en las DP, como amplitud de carga, polaridad, posición, número de ciclos absoluto y valor instantáneo de la tensión aplicada cuando se produce la DP. Estos datos permiten graficar la diferencia

entre pulsos consecutivos, tal como la diferencia de tensión entre el pulso actual y el pulso siguiente ($\Delta U_n = U_{n+1} - U_n$) versus el pulso actual con el pulso anterior ($\Delta U_{n-1} = U_n - U_{n-1}$), siendo este grafico conocido como patrón ΔU_n vs ΔU_{n-1} . De este diagrama, además de otras variantes como la relación diferencial $\Delta U/\Delta t$, se ha concluido que son aptos para determinar el estado de degradación de aislamientos por su sensibilidad a los fenómenos físicos involucrados en las DP. Con el pasar del tiempo ha ido tomando fuerza este método, pues se ha ido introduciendo nuevas versiones, lo cual brinda nueva información e interpretaciones de los diagramas.

En la **Figura 2.3** se presenta ejemplos de diagramas PSA para descarga en una burbuja de vacío a 24 [kV], descarga superficial a 6 [kV] y descarga tipo corona a 14 [kV].

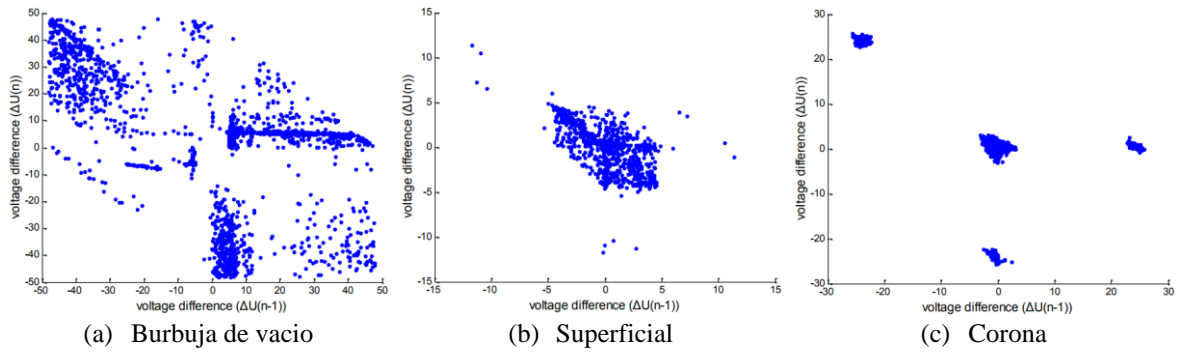


Figura 2.3: Ejemplo de diagramas PSA para distintos tipos de DP [13].

2.4 Energía en las DP

A continuación, se presenta las bases en la que se sustenta la energía electrostática por medio de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo y de la definición del trabajo en física, formando una relación con la energía electrostática. Posteriormente se presenta la definición de energía acumulada, cuyo uso facilita el análisis de los datos y entrega información relevante de estos mismos.

2.4.1 Energía electrostática

La energía electrostática involucrada en cualquier fenómeno eléctrico esta descrita a partir de la interacción de un conjunto de cargas puntuales en un sistema definido. Dicha interacción está dada por la fuerza de Coulomb, donde la fuerza ejercida sobre una partícula cargada ubicada en un espacio de influencia electrostático esta dado por la ecuación (2.1).

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (2.1)$$

Donde \vec{F} es la fuerza electrostática aplicada a la carga q y \vec{E} es el campo eléctrico al que está sometida la carga. El trabajo realizado por la fuerza electrostática de llevar la partícula cargada desde un punto A hasta un punto B se define como la energía electrostática. En la ecuación (2.2) se presenta la definición matemática.

$$U_E(B) - U_E(A) = -W_{A \rightarrow B} = -q \int_A^B \vec{E} d\vec{r} \quad (2.2)$$

Se debe considerar que al punto A es de referencia de potencial, siendo igual a cero dado que se considera que se encuentra en el infinito, dependiendo solamente de los puntos inicial y final, lo que hace irrelevante el camino que se recorra. Esto ocurre cuando el rotor del campo eléctrico $\nabla \times E = 0$ (E es irrotacional), correspondiendo a un campo conservativo. De la ley de Faraday en un sistema electrocuasistático, en el que no varía el campo magnético, se puede obtener el potencial eléctrico entre los puntos A y B [22], la cual se aprecia en la ecuación (2.3).

$$V(B) = - \int_A^B \vec{E} d\vec{r} \quad (2.3)$$

Quedando finalmente la ecuación (2.4) para la energía electrostática. Esta última indica la estrecha relación que existe entre el potencial eléctrico y la energía.

$$U_E = qV \quad (2.4)$$

Asimismo, la ley de Gauss satisface la ecuación de Poisson en una distribución de carga espacial dentro de un medio dieléctrico, obteniendo la ecuación de campo del potencial eléctrico en la ecuación (2.5).

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.5)$$

Donde ρ es la densidad de carga total y ϵ es la permitividad del dieléctrico.

2.4.2 Función de energía acumulada

Se utiliza la función de energía acumulada en el dominio del tiempo (TCE) en el análisis de los datos. Dado que interesa la evolución del crecimiento del árbol eléctrico, es una buena forma de analizar la energía involucrada en dicho proceso sin ninguna otra influencia, solamente el aumento acumulativo de la energía en cada DP. Adicionalmente el trabajo computacional se aliviana levemente en tiempos de simulación. En la ecuación (2.6) se presenta la fórmula matemática del TCE.

$$E_T(t_k) = \left(\sum_{i=1}^k v(t_i)^2 / \sum_{i=1}^N v(t_i)^2 \right) * 100 \quad (2.6)$$

Donde $k = 1, \dots, N$, N es el número total de descargas que se obtuvieron en el ensayo. $E_T(t_k)$ es la energía acumulada (CE) en el dominio del tiempo hasta el tiempo t_k , $v(t_i)$ es la señal máxima que se tuvo en cada pulso de DP en el tiempo t_i . La TCE se divide por la energía total para dejarla normalizada y eliminar la influencia de la amplitud en cada señal.

2.5 Análisis de series de tiempo no lineales

El análisis de las series de tiempo no lineales son una importante rama de estudio en la teoría del caos. Las dinámicas no lineales ofrecen nuevas clases de modelos basados en el paradigma estocástico. Se entregan algoritmos de pronóstico en diversas áreas que poseen una mayor precisión en comparación a modelos estocásticos lineales tradicionales. El caos dentro de las series de tiempo tiene un origen que va de oscilatorio a aleatorio. Se ha demostrado que un sistema matemático caótico posee un origen determinista, adonde el comportamiento futuro del sistema caótico consigue estar determinado completamente por las condiciones iniciales. Cabe destacar que lo anteriormente descrito es en forma local, puesto que al trabajar en rangos muy holgados se pierde la predictibilidad del sistema, al haber cambios muy pequeños a las condiciones iniciales, el sistema evoluciona de una forma muy distinta a la anterior.

Un ejemplo se presenta en el pronóstico del tiempo como se muestra en el trabajo de Edward Lorenz [23], a partir de ciertas ecuaciones¹ quería predecir el tiempo en la atmósfera, sin embargo, dependiendo de la cantidad de decimales empleados en las condiciones iniciales arrojaban predicciones muy distantes entre sí, lo que actualmente se conoce como atractor de Lorenz. Las técnicas de análisis de series de tiempo no lineales se basan principalmente en lo descrito teóricamente por el teorema de Takens, el cual se explica en detalle más adelante.

2.5.1 Reconstrucción del estado de fase

Si un sistema de un proceso dado es del tipo determinista caótico y puede ser representado en el espacio de estado por d variables, se logra realizar la reconstrucción del espacio de fase que entrega las características caóticas. Esto tiene como propósito restaurar los atractores de la serie de tiempo del proceso determinista caótico. Los atractores comparten ciertas características con los atractores originales, siendo “invariantes” entre ambos espacios. Las “invariantes” puede ser el exponente de Lyapunov y la dimensión de correlación, consiguiendo obtener información del proceso físico original. Lo descrito se basa del teorema de Takens [24], que expresa que se puede reconstruir un espacio de fase de m dimensiones a partir de una considerable serie de tiempo medida en el sistema y se puede obtener un conjunto de vectores de espacio de fase. Si la serie de tiempo es $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, se obtienen los vectores espaciales reconstruidos como se aprecia en la ecuación (2.7).

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = (x_1, x_{1+\tau}, x_{1+2\tau}, \dots, x_{1+(m-1)\tau}) \\ X_2 = (x_2, x_{2+\tau}, x_{2+2\tau}, \dots, x_{2+(m-1)\tau}) \\ X_3 = (x_3, x_{3+\tau}, x_{3+2\tau}, \dots, x_{3+(m-1)\tau}) \\ \vdots \\ X_n = (x_{N-(m-1)\tau}, x_{N-(m-2)\tau}, x_{N-(m-3)\tau}, \dots, x_{N+(m-1)\tau}) \end{array} \right. \quad (2.7)$$

¹ Ahora conocidas como ecuaciones de Lorenz.

Donde τ es el tiempo de retardo y m es la dimensión incrustada. X_i es el punto de fase en el nuevo espacio de fase reconstruido. n es el número de puntos de fases, calculándose como se indica en la ecuación (2.8).

$$n = N - (m - 1)\tau \quad (2.8)$$

La elección en los parámetros τ y m no tiene mayores restricciones en la formulación original del teorema de Takens. En la opción de estos parámetros se obtiene por elección libre, ya que nada en si lo impide. Dentro de los años han surgido distintas metodologías para dar con los valores óptimos en los parámetros, disminuyendo la carga matemática y computacional detrás de su cálculo. En este trabajo se utiliza el método de la función de autocorrelación en el tiempo de retardo (τ) y para la dimensión incrustada m se calculó con el algoritmo G-P, los cuales se describirán en detalle en los siguientes apartados.

2.5.2 Tiempo de retardo

El tiempo de retardo comúnmente se calcula con el método de la función de autocorrelación. Si la serie de tiempo es $\{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, se define en la ecuación (2.9).

$$R_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+\tau} \quad (2.9)$$

Cuando el valor de la función de autocorrelación es menor a $1/e$ veces al valor inicial [25], el tiempo τ obtenido es el tiempo de retardo para la reconstrucción del espacio de fase.

2.5.3 Dimensión de incrustación

La dimensión incrustada m se calcula con el algoritmo G-P, propuesto por Grassberger and Procaccia [26]. El cual dice que es posible estimar la dimensión fractal de un atractor a través de la dimensión de correlación D_2 , donde se espera que un determinado rango de r se cumpla $C(r) \propto \exp(D_2)$. Los pasos del algoritmo son:

- a) Se usa un valor pequeño para m para hacer una reconstrucción del espacio de fase.
- b) Se calcula la función de correlación:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |Y_i - Y_j|) \quad (2.10)$$

Donde $|Y_i - Y_j|$ es la distancia euclidiana entre Y_i y Y_j y $\theta(z)$ es la función escalón Heaviside.

- c) Para un rango apropiado de r , la dimensión del atractor y la fórmula anterior deben satisfacer la relación lineal logarítmica, donde $d(m) = \ln C(r) / \ln r$. En que calculamos $d(m_0)$.

- d) Luego se escoge un $m_1 > m_0$, repitiéndose los pasos (b) y (c) hasta que la dimensión estimada $d(m_0)$ no varíe con el aumento de m , con un cierto error. La d que se obtiene es la dimensión de correlación del atractor y m es la dimensión incrustada.

Teniendo τ y m se tiene el nuevo espacio de fase reconstruido y se calcula el parámetro “invariante” del exponente de Lyapunov, para un posterior análisis del proceso.

2.5.4 Cálculo del máximo exponente de Lyapunov

El exponente de Lyapunov λ es comúnmente utilizado en el análisis de la dinámica de sistemas no lineales. La cual muestra la tasa de divergencia o convergencia de las trayectorias cercanas en el espacio de fase, siendo un elemento clave en la dinámica caótica. También se puede explicar que en sistemas no lineales (caóticos) hay una gran dificultad de predecir el comportamiento de estos sistemas, dado que son muy sensibles a las condiciones iniciales que posea el sistema.

El máximo exponente de Lyapunov (LLE, por sus siglas en inglés) se estima con el algoritmo de Rosenstein-Kantz, el cual lo trabajaron en forma independiente cada autor [27], [28]. Este se calcula a partir de la ecuación (2.11) [29].

$$S(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{1}{|U_i|} \sum_{Y_{i+\tau} \in U_i} |Y_{i+\tau} - Y_{j+\tau}| \right) \quad (2.11)$$

Donde U_i es vecino a $Y_{i+\tau}$ con diámetro ε , $|Y_{i+\tau} - Y_{j+\tau}|$ es la distancia euclidiana entre la trayectoria de referencia Y_i y un vecino Y_j después del tiempo relativo τ . Para un rango intermedio de τ , se puede utilizar la aproximación lineal para el cálculo de exponente de Lyapunov como se muestra en la ecuación (2.12).

$$S(\tau) \approx a + \lambda_1 \tau \quad (2.12)$$

Si se considera que la señal posee contenido de ruido, se puede utilizar la aproximación presentada en la ecuación (2.13) [30].

$$S(\tau) \approx a + \lambda_1 \tau + \frac{k\tau}{e^{\lambda_1 \tau}} \quad (2.13)$$

Se utiliza esta aproximación para el cálculo del LLE, puesto que es más fiel a la realidad, al considerar el ruido inherente en las mediciones por diversas razones.

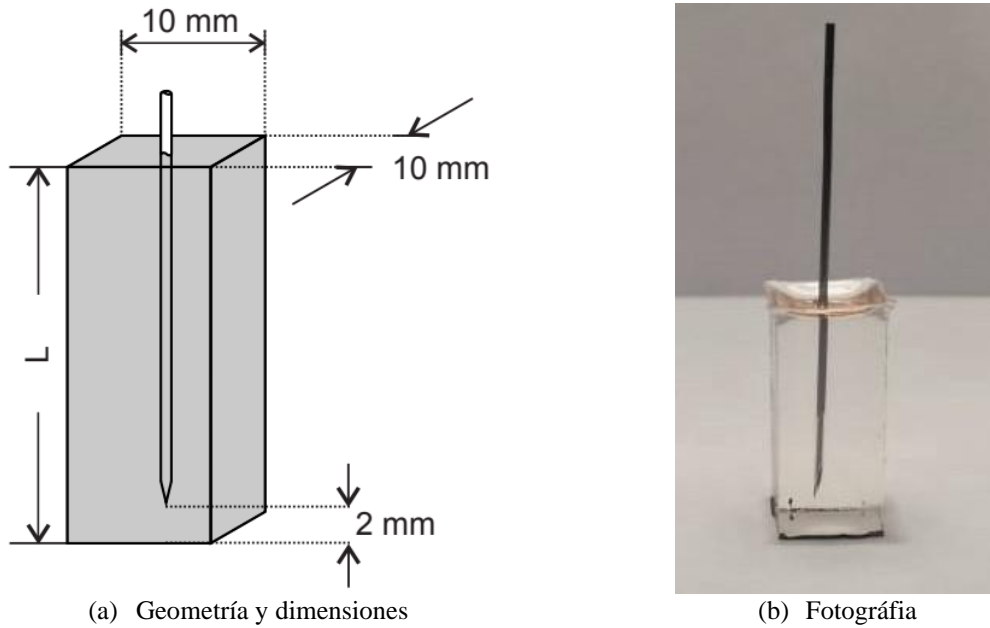
Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se detalla los principales procedimientos experimentales que fueron utilizados en el desarrollo de este trabajo, además de los componentes principales en los equipos y circuitos de medición empleados para la obtención de la base de datos de DP en los ensayos de crecimientos de árboles eléctricos. También se detalla y explica los métodos de filtrado, procesamiento y análisis aplicados a la data generada de las descargas parciales que fueron empleada en este documento.

3.1 Fabricación de probetas

Para la realización de los ensayos se fabricaron probetas de resina epóxica, ya que se usa de forma extendida como dieléctricos en los equipos eléctricos y permite la visualización de la arborescencia. Se utiliza la resina MEPOX 1685/L (un sistema epoxico DGBA) dada sus propiedades de baja viscosidad y alta transparencia. En su preparación se utiliza un endurecedor en una relación 2:1 con la resina. Al realizar la mezcla se debe tener cuidado de no generar burbujas, no obstante, de contenerlas que sean la menor cantidad posible. Para eliminar las burbujas de la mezcla se realiza un proceso de desgasificación en una cámara de vacío, dejándola lo más cercano al vacío absoluto por unos 20 *min* a temperatura ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). Luego se vierte en un molde de acrílico, previa limpieza con alcohol, cuidando que no queden partículas indeseadas para el posterior proceso de curado de la mezcla. El proceso consta en dejar los moldes al interior de un horno a 25°C durante 24 horas. Finalmente se efectúa el post-curado al material, donde nuevamente se deja en el horno, pero a 50°C durante 15 horas y a presión ambiente. Se utiliza una geometría de punta-plano en las probetas, donde se utiliza una punta especialmente diseñada para este tipo de ensayos en el laboratorio, cuya fabricación es encomendada a una joyería de Japón (ver Anexo A para más detalle). Posee un radio de curvatura de $\sim 5 [\mu\text{m}]$ que será el electrodo AT, debiendo quedar lo más centrada y derecha posible, verificando que la distancias entre los electrodos sea de 2 [mm] aproximadamente. En la **Figura 3.1** se presenta la geometría utilizada y las dimensiones físicas dispuestas en la probeta, además de un ejemplo fotográfico. Habiendo pasado los procesos de curado y post-curado, se extrae la probeta con cuidado del molde de acrílico, haciendo una inspección de cada una de ellas. Las probetas que cumplan con las características deseadas se les adhiere una cinta de cobre, la cual ejercerá de electrodo plano de la configuración.



(a) Geometría y dimensiones

(b) Fotografía

Figura 3.1: Esquema y un ejemplo fotográfico de una probeta.

3.2 Banco de prueba

Para la obtención de datos en los ensayos de DP se hizo uso de un banco de prueba, el cual inicialmente fue construido por un exalumno memorista en el contexto de su trabajo de título [31], no obstante, ha tenido una serie de modificaciones desde su puesta en servicio en el laboratorio de alta tensión (LAT).

3.2.1 Fuente de tensión

Este banco cuenta con un amplificador de alto voltaje (HVA) como fuente principal, modelo Trek 20/20C-HS que puede amplificar por 2000 señales entre ± 10 [V]. La señal de entrada es suministrada por un generador de señales (SG) Rigol DG-1022, donde a través de MATLAB se cargan las señales. Para la monitorización del voltaje y corriente entregado por la HVA se utiliza un osciloscopio digital básico (DO). También se instala una resistencia (R_x) de 600 [k Ω] entre la fuente de alimentación y la muestra de prueba, cuyo objetivo es evitar las perturbaciones y limitar la corriente en caso de falla. En la **Figura 3.3** se aprecia la disposición dentro del circuito utilizado en el laboratorio de los elementos descritos en la fuente de tensión.

3.2.2 Circuito de medición de DP

Para las mediciones de descargas parciales se aplica el estándar técnico IEC 60270 [2] como base. Esta norma permite varias configuraciones en la medición de DP, siendo utilizado en concreto un circuito balanceado debido a que rechaza el ruido, asimismo permite mejorar la sensibilidad en las señales medidas, cuyo esquema básico se muestra en la **Figura 3.2**.

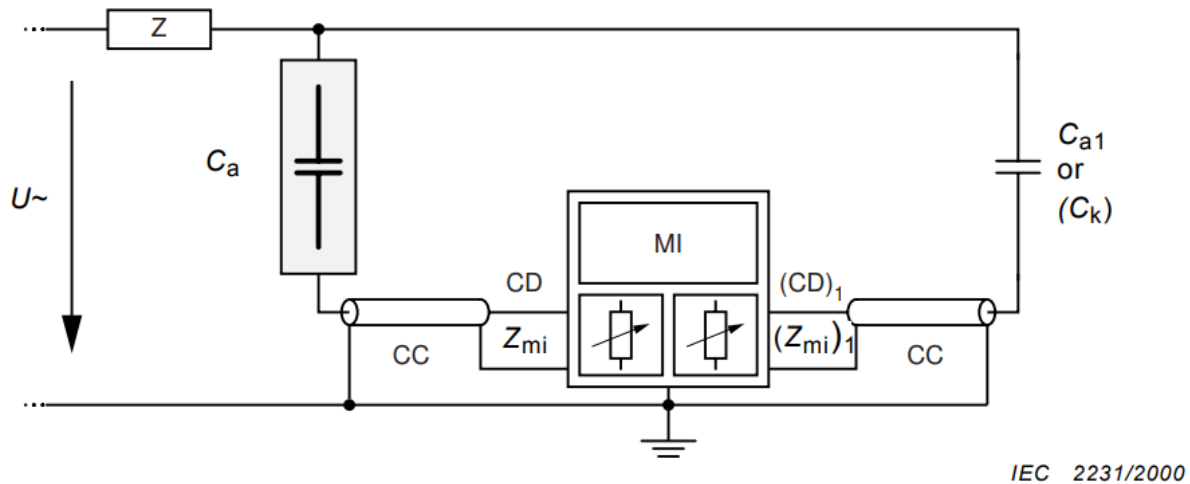


Figura 3.2: Circuito balanceado según Norma IEC 60270 [2].

En la **Figura 3.3** se dispone del circuito de medición utilizado en el laboratorio. Siguiendo la norma se generan las señales de probeta ensayada, donde se forma el crecimiento del árbol (C_a) y una probeta libre de DP (C_k). Estas se restan en el circuito de sustracción (SC), cuya salida va a un equipo comercial de medición y adquisición DP Omicron por medio del dispositivo de acoplamiento MPD 600, registrando continuamente la actividad de DP con fines de seguimiento, sin embargo, no son utilizadas en este trabajo. Tanto C_a y C_k están inmersas en un estanque con aceite de silicona para evitar descargas superficiales que lograrán afectar a las mediciones.

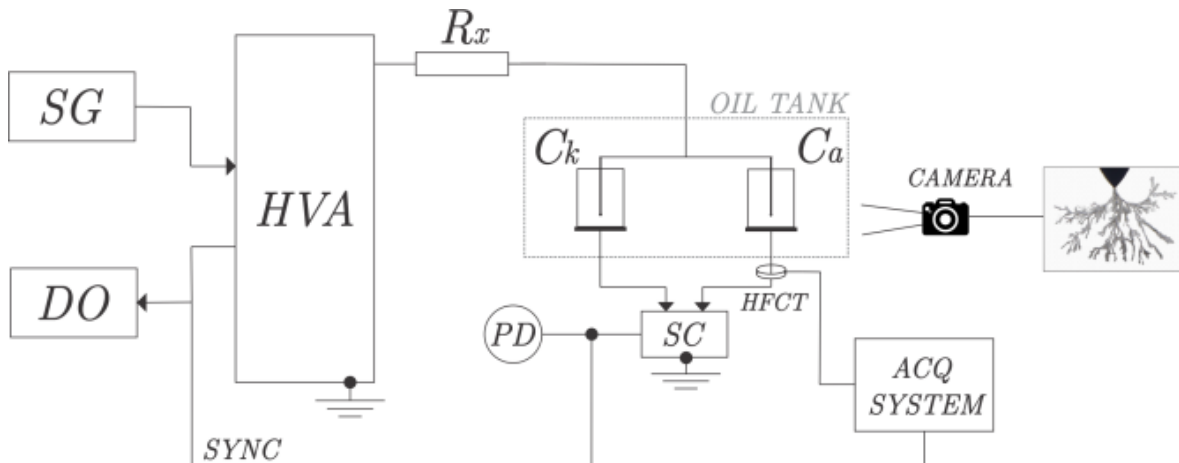


Figura 3.3: Circuito de medición y monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos [32].

El registro de las señales en los pulsos de DP se utiliza un transformador de corriente de alta frecuencia marca Techimp HFCT-39mm (HFCT). Este se ubica en el cable de tierra de la probeta ensayada, donde su señal de salida es enviada a un osciloscopio avanzado (ACQ SYSTEM). Este osciloscopio es el Keysight modelo Infiniium S-Series DSOS104A, el cual cuenta con 1 [GHz] de banda ancha y un muestreo de 20 [GSa/s], configurado en modo de memoria segmentada. En la **Figura 3.4** se aprecia el transformador de corriente, así también el osciloscopio utilizado para registrar las señales de DP.



(a) Osciloscopio Keysight modelo Infiniium S-Series DSOS104A (b) Transformador de corriente de alta frecuencia Techimp HFCT-39mm

Figura 3.4: Elementos utilizados en el registro de las señales de pulsos DP.

3.2.3 Correlación entre la actividad de DP y crecimiento del árbol eléctrico

También se cuenta con una cámara óptica para el registro de carácter físico de las descargas parciales, adquiriendo fotografías cada cierto intervalo de tiempo durante el proceso de crecimientos de los árboles eléctricos al interior de las probetas ensayadas. Este registro se efectúa con una cámara óptica modelo réflex Canon T6, además incorpora un lente macro Canon MP-E 65 mm f/2.8 1-5x. En la **Figura 3.5** se especifica cada componente utilizado.



(a) Cuerpo principal cámara óptica Canon modelo T6



(b) Lente macro Canon MP-E 65 mm f/2.8 1-5x

Figura 3.5: Cámara óptica y lente macro para registro fotográfico.

3.3 Procesamientos de los datos y metodología de análisis.

Para un análisis más fidedigno de los datos relacionados a las descargas parciales obtenidas a partir del osciloscopio, se emplea un filtrado del ruido en las mediciones a través de parámetros característicos que ocasionan separación de diferentes fuentes DP, en que una de ellas corresponde al ruido involucrado en las mediciones. Un pre-filtrado se hizo a las señales que presenta saturación en la medición. Una técnica recientemente empleada en identificación de fuentes de DP que ha dado buenos resultados son los mapas SF. Este mapa caracteriza cada señal DP a partir de los parámetros S y F , la cual genera grupos representativos (*clustering*) de las distintas fuentes de descargas que reúnen las mismas características. El parámetro S hace una caracterización de la forma de onda de los pulsos de cada DP por medio del cálculo directo del parámetro *skewness* de la señal normalizada. En la ecuación (3.1) se muestra cómo se calcula dicho parámetro, donde $x(n)$ son los datos en cada instante de tiempo (datos muestreados) normalizados, σ es la desviación estándar de los datos normalizados, \bar{x} es el promedio y N es la cantidad total de datos.

$$S = \frac{\sum(x(n) - \bar{x})^3}{(N - 1)\sigma^3} \quad (3.1)$$

Este parámetro indica la medida del sesgo que tiene el conjunto respecto a una distribución normal. Si es cercana a cero es comparable a una distribución normal, con disposición hacia la derecha es mayor a cero y si la tendencia es hacia la izquierda es menor a cero. Esto se representa gráficamente en la **Figura 3.6**.

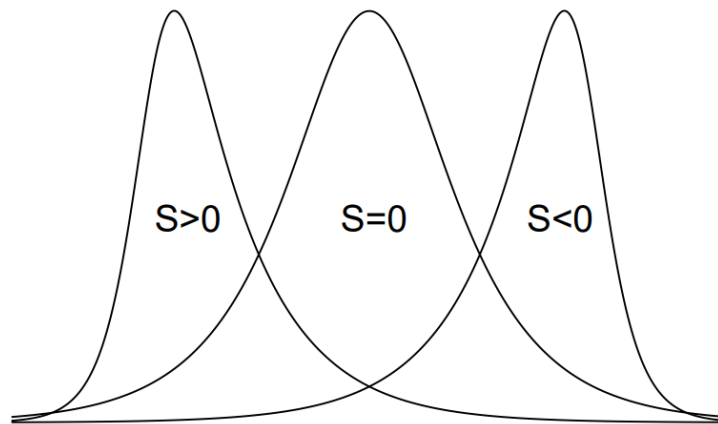


Figura 3.6: Parámetros de caracterización skewness.

El segundo parámetro F se denomina frecuencia máxima ponderada y se puede entender como un caracterizador del contenido en frecuencia con mayor relevancia en cada una de las señales medidas. En la ecuación (3.2) se muestra la definición algebraica del parámetro, donde $F(f)$ corresponde al espectro de frecuencias de la señal, f_{max} es la frecuencia en que se encuentra la máxima amplitud del espectro, la que se divide por la energía espectral total

de la señal, entre las frecuencias 0 y f_{end} , multiplicándose por la energía espectral en el rango de frecuencia entre f_a y f_b .

$$F = f_{max} \cdot \frac{\int_{f_a}^{f_b} F(f)df}{\int_0^{f_{end}} F(f)df} \quad (3.2)$$

Los valores de estas frecuencias se obtienen en donde $F(f)$ intersecta el valor P_{5-95} , siendo f_a el primer punto que cumple desde el máximo a la izquierda y f_b el primer punto que cumple desde el máximo a la derecha. El valor P_{5-95} tiene que ver con calcular el promedio de los datos entre 5% y 95% más significativo del espectro, eliminando los datos excedentes. Con esto se logra eliminar la influencia de la gran cantidad de datos del espectro que son valores muy cercanos a cero y al máximo. Lo anteriormente explicado queda representado gráficamente en la **Figura 3.7**.

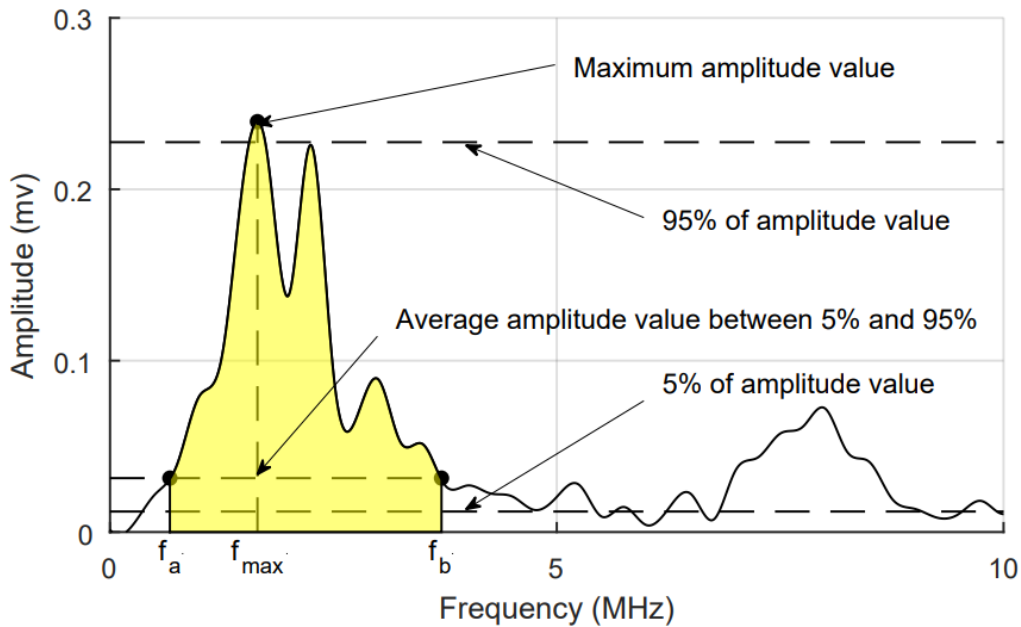


Figura 3.7: Diagrama de obtención del parámetro F .

Como ejemplo práctico de este proceso de filtrado en las señales, tomamos una probeta ensayada en el laboratorio para ver de forma práctica cómo funciona. En la **Figura 3.8** se aprecia el ejemplo de la probeta P14, la cual fue ensayada a 12 [kV] y 50 [Hz]. Esta consta de 4 archivos generados por el osciloscopio, disponiendo con una cantidad de señales medidas en cada uno. De la figura se tiene en la primera columna el diagrama PRPD para cada archivo, donde se aprecia ruido y señales anómalas que se salen de escala. En la segunda columna se tiene el mapa SF para cada archivo y en la tercera se tiene el diagrama PRPD con los datos filtrados. Se aprecia que el proceso de filtrado realizado limpia de manera eficiente el ruido en las mediciones, dejando en su mayoría las señales de interés.

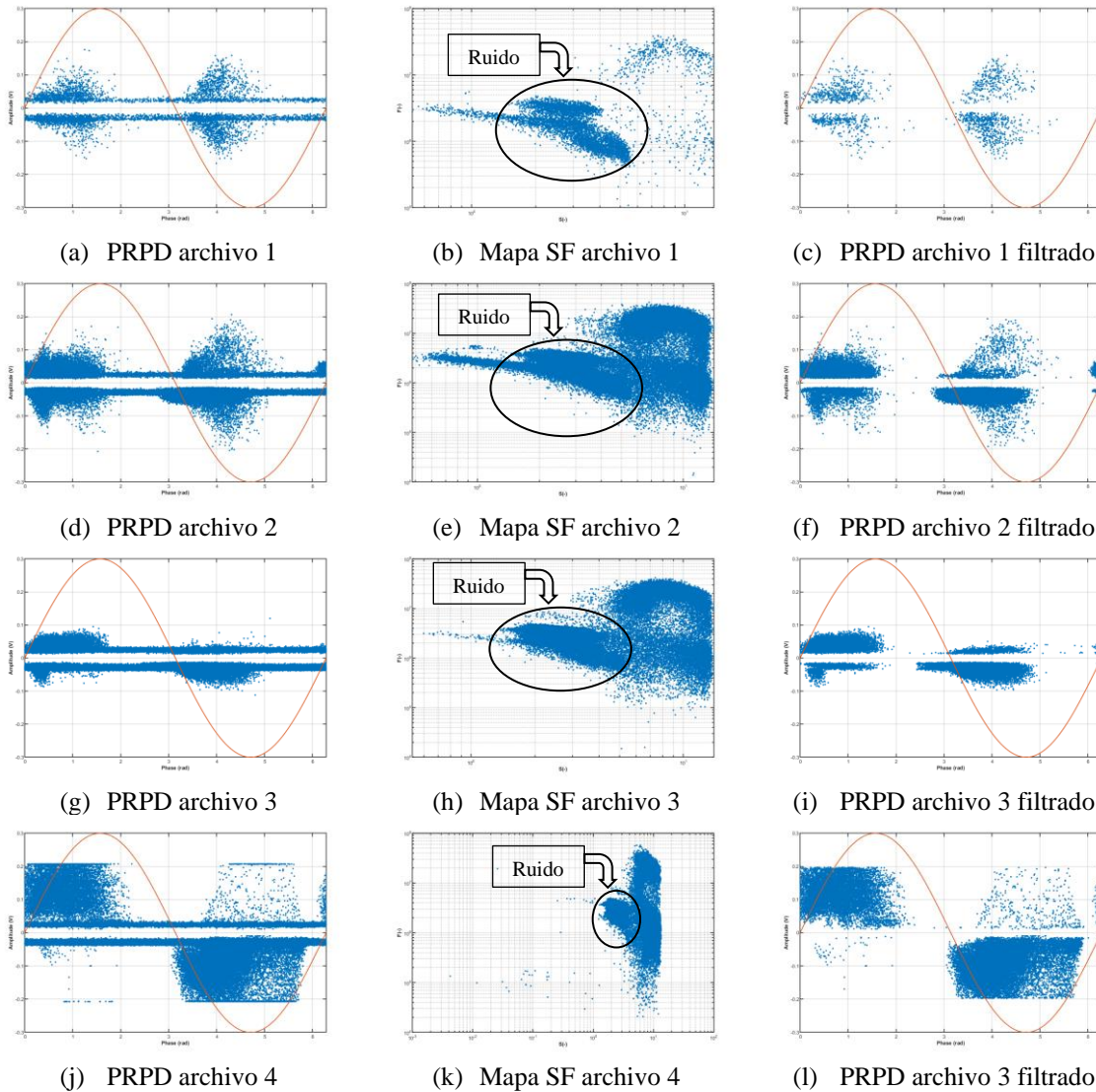


Figura 3.8: Ejemplo de filtrado utilizando el mapa SF.

Posterior al filtrado de los datos, se procede al cálculo de la energía involucrada en cada descarga parcial siguiendo el siguiente procedimiento. Teniendo la señal medida de la descarga que se encuentra en $[mV]$, se pasa a corriente por medio de un parámetro de máxima sensibilidad que relaciona la corriente de entrada con la tensión de salida (V_{out}/I_{in}) del transformador de corriente de alta frecuencia, el cual equivale a $19 [mV/mA]$. La señal se divide por este valor y obtenemos la señal de corriente de la DP, como se aprecia en la ecuación (3.3). También se cuenta con el dato en la señal de tensión de ocurrencia registrada para la DP, por lo que se toma la media como se muestra en la ecuación (3.4) para efecto del cálculo de la energía con dicha tensión promedio. Teniendo la señal de corriente de la DP y la tensión de ocurrencia, se procede a calcular la potencia generada por la descarga a partir de la ecuación (3.5). Por último, teniendo la potencia de la señal se procede a la integración numérica trapezoidal en MATLAB, aplicando la función *trapz* y calculándose como está escrito en la ecuación (3.6), donde por fin obtenemos la energía generada por cada descarga.

$$I_{pd} = \frac{V_{pd}(t_i)}{19 [mV/mA]} \quad (3.3)$$

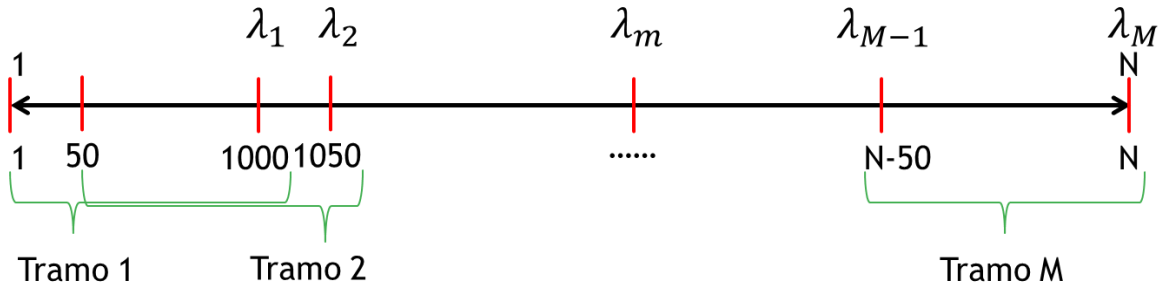
$$\overline{V_{oc}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{oc}(t_i) \quad (3.4)$$

$$P_{pd} = \overline{V_{oc}} \cdot I_{pd} \quad (3.5)$$

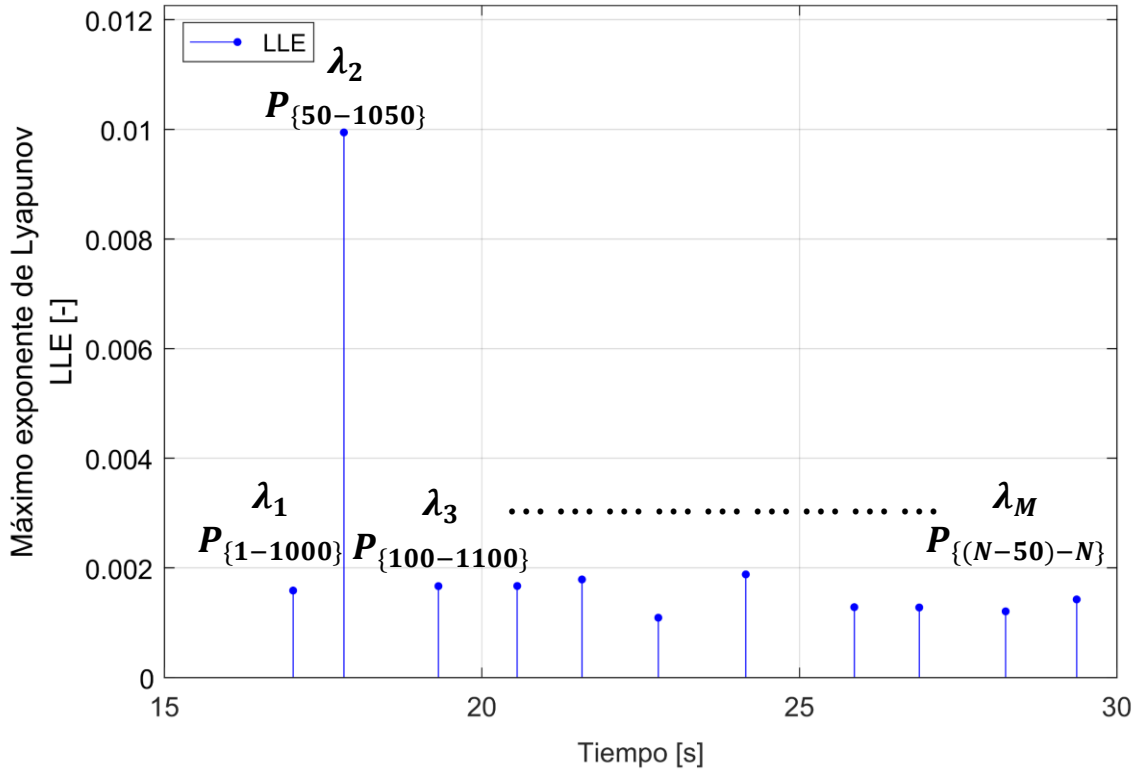
$$E_{pd} = \int_0^{t_{i-end}} P_{pd}(t) dt \approx \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (t_{i+1} - t_i) [P_{pd}(t_i) + P_{pd}(t_{i+1})] \quad (3.6)$$

Luego de haber filtrados los datos y habiendo calculado la energía electrostática en cada una de las descargas parciales generadas, se procede a calcular la energía acumulada a partir de la ecuación (2.6), la que se encuentra en la sección 2.4.2. Ahora bien, se prosigue con el cálculo del máximo exponente de Lyapunov a la función de energía acumulada ya descrita. Para este análisis se define una serie de tiempo de los datos, con el objetivo de escoger la manera en la que se puede extraer más información sobre qué tan caótica se va tornando el proceso a medida que se generan las DP, de manera que tenga sentido el análisis del LLE. Se definen tramos iguales de 1000 puntos y con un paso de 50 puntos. Primero se toma 1000 puntos para el análisis, ejemplo el tramo [1 – 1000] y se obtiene el valor del exponente λ_1 . Luego se toman los siguientes 1000 puntos haciendo uso del paso, a partir del número 50, es decir el tramo comprendido entre los datos [50 – 1050], obteniendo el exponente λ_2 . Se repite este procedimiento sucesivamente hasta terminar la totalidad de los puntos obtenidos, posterior al filtrado. El objetivo del análisis LLE a partir de estos tramos, es describir de mejor manera la característica caótica que presenta las descargas a lo largo del ensayo, siendo de forma local el análisis donde tiene sentido como indica la literatura. En la primera grafica de la **Figura 3.9** se muestra la construcción de cada tramo para el cálculo de cada exponente.

Habiendo definido la mejor manera en los tramos para el análisis, se procede con el cálculo del LLE empleando el procedimiento explicado en detalle en la sección 2.5, donde la magnitud del máximo exponente de Lyapunov indica la naturaleza caótica en un sistema dinámico a partir de una serie temporal de los puntos considerados. En cada tramo M-ésimo se obtiene un valor de exponente abarcando la totalidad de las señales registradas en el ensayo. Utilizando el mismo caso de ejemplo a 12 [kV] y 50 [Hz] entre los 15 y 30 segundos del ensayo, se logra como resultado la segunda grafica de la **Figura 3.9**. Primero se obtiene el primer valor del LLE λ_1 , comprendido entre los puntos $P_{\{1-1000\}}$. El segundo valor del exponte denominado λ_2 entre los puntos $P_{\{50-1050\}}$, así también el tercer valor del máximo exponente de Lyapunov λ_3 en el tramo definido entre los datos de energía acumulada $P_{\{100-1100\}}$. Consecutivamente se realiza el cálculo del exponente para toda la data, llegando finalmente hasta λ_M del tramo comprendido entre $P_{\{(N-50)-N\}}$, siendo N el número total de datos de la función de energía acumulada (TCE).



(a) Construcción de cada tramo



(b) Grafica del LLE.

Figura 3.9: Representación gráfica de los tramos y punto LLE obtenido en cada uno.

En este ejemplo se aprecia que la serie de puntos $P_{\{50-1050\}}$ analizada a partir de la variable LLE presenta una mayor naturaleza caótica en comparación al resto de series, representada por su valor de λ respectivo.

3.4 Bases de datos generada.

Utilizando el proceso descrito anteriormente en la fabricación de las probetas a ensayar, se procede con la iniciación de la arborescencia aplicando una magnitud de tensión y frecuencia determinada, la que se detalla en la **Tabla 3.1**. Además, se presentan otros datos relevantes en cada probeta utilizada durante este trabajo tales como, su nombre, la fecha de fabricación, la resina empleada, si cuentan con el proceso de curado y post curado, fecha de iniciación del árbol, el tiempo aplicado para dar inicio de la arborescencia y algunas observaciones de su estado, como particularidades durante su ensayo. En el apartado de observaciones hay casos en los cuales puede haber presencia de burbujas y/o impurezas, sin embargo, se encuentran en lugares que no afectan la realización de los ensayos. En otros casos se dio el crecimiento de dos árboles y/o crecen por el costado de la aguja, no obstante, no afectan en gran envergadura a las mediciones.

Probeta	Fecha de fabricación	Resina	Curado	Post curado	Fecha de iniciación	V_{ini} [kV] y f [Hz]	t_{inicio}	Observaciones
P14	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	30 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina, con burbuja grande, pero alejada de la punta.
P15	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	30 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta. Al iniciar se ven 2 árboles
P16	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	15 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
PO2	21-11-2019	MEPOX 1685/L	si	si	22-11- 2019	10 [kV]- 50 [Hz]	3 [min]	Probeta con punta mal adherida a la resina, No tiene nada extraño en la punta.
PO6	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Punta con pequeña burbuja, sin película separada, pequeña basura alejada de la punta, punta algo deforme.
P34	05-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	10-11- 2020	14 [kV]- 150 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P46	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	18-12- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P36	05-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	11-11- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	10 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P38	12-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	17-11- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 50 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P13	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	30 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina, pero punta en buen estado.
P18	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	14-01- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 30 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina y con forma extraña.

P23	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	14-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	10 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina y con forma extraña.
PO1	21-11-2019	MEPOX 1685/L	si	si	22-11- 2019	10 [kV]- 50 [Hz]	3 [min]	Este ensayo se quedó estancado o lo que la medición se detuvo
PO7	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Punta sin burbujas ni suciedad, en general en buen estado.
P47	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	18-12- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta. Árbol crece por el costado de la aguja.
P48	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-12- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P39	12-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	17-11- 2020	14 [kV]- 250 [Hz]	3 [min] 20 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P40	26-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-11- 2020	14 [kV]- 450 [Hz]	4 [min] 13 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta. Árbol crece por el costado de la aguja.
P11	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	10 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P19	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	15-01- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	30 [s]	Probeta mal adherida a la aguja, pero sin imperfecciones en los bordes.
P20	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	15-01- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 30 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina y con forma extraña.
PO4	21-11-2019	MEPOX 1685/L	si	si	22-11- 2019	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Tiene una capa de aire que produce bastantes descargas durante la iniciación.
PO8	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Probeta sin problemas en la punta, pero si en el borde. Inició con dos árboles
P45	17-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	18-12- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	10 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P54	17-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-12- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P42	24-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-11- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta. El árbol nace desde la punta. Burbuja en la base (plano).
P43	24-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-11- 2020	14 [kV]- 150 [Hz]	2 [min] 23 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P12	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	50 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina y punta en buen estado. Inicia con dos árboles.

P21	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	15-01- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 40 [s]	Probeta mal adherida a la aguja, pero sin imperfecciones en los bordes.
P22	10-01-2020	MEPOX 1685/L	si	si	15-01- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 30 [s]	Probeta con punta mal adherida a la resina, sin bordes.
PO5	21-11-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-12- 2019	10 [kV]- 50 [Hz]	20 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
PO9	26-12-2019	MEPOX 1685/L	si	si	03-01- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	30 [s]	Probeta sin problemas en la punta, pero si en el borde.
P49	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-12- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P52	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-12- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P44	26-11-2020	MEPOX 1685/L	si	si	09-12- 2020	14 [kV]- 150 [Hz]	30 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P51	17-12-2020	MEPOX 1685/L	si	si	30-12- 2020	14 [kV]- 150 [Hz]	2 [min] 30 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina. No tiene nada extraño en la punta.
P24	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-10- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 40 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P25	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-10- 2020	14 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 45 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P26	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-10- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	15 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P27	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-10- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	1 [min] 30 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P28	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	28-10- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 02 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado. Inicio por el costado de la aguja.
P30	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	29-10- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	2 [min] 40 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P32	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	29-10- 2020	10 [kV]- 50 [Hz]	10 [s]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.
P33	22-10-2020	MEPOX 1685/L	si	si	29-10- 2020	12 [kV]- 50 [Hz]	1 [min]	Probeta con punta bien adherida a la resina y punta en buen estado.

Tabla 3.1: Características de las probetas.

En cuanto a la **Tabla 3.2** se presentan datos relevantes de los ensayos realizados a cada una de las probetas. Estos van desde la fecha de ensayo, la tensión y frecuencia aplicada durante cada medición, el tiempo de duración de cada ensayo. Cabe mencionar que en todos los casos hubo ruptura entre los electrodos.

Probeta	Fecha de ensayo	Tensión [kV]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]
P14	14-01-2020	12	50	1667.7
P15	14-01-2020	12	50	2034.5
P16	14-01-2020	12	50	2785.1
PO2	28-11-2019	12	50	2418.4
PO6	07-01-2020	12	50	3445.5
P34	16-11-2020	10	50	7739.1
P46	22-12-2020	10	50	2091.8
P36	19-11-2020	14	50	2334.1
P38	20-11-2020	14	50	2090.1
P13	10-01-2020	12	150	2106.6
P18	15-01-2020	12	150	1016.9
P23	17-01-2020	12	150	1096.1
PO1	19-11-2019	12	150	13451.6
PO7	07-01-2020	12	150	2952.0
P47	23-12-2020	10	150	5269.6
P48	29-12-2020	10	150	2629.2
P39	01-12-2020	14	150	1030.3
P40	01-12-2020	14	150	1129.4
P11	09-01-2020	12	350	9673.9
P19	15-01-2020	12	350	1297.9
P20	15-01-2020	12	350	1253.1
PO4	03-12-2019	12	350	2101.2
PO8	08-01-2020	12	350	1105.6
P45	06-01-2021	10	350	1480.0
P54	05-01-2021	10	350	835.2
P42	03-12-2020	14	350	1364.0
P43	10-12-2020	14	350	1790.6
P12	10-01-2020	12	550	848.8
P21	16-01-2020	12	550	1483.5
P22	15-01-2020	12	550	629.7
PO5	04-12-2019	12	550	1080.6
PO9	08-01-2020	12	550	813.6
P49	07-01-2020	10	550	1255.6
P52	05-01-2020	10	550	2922.0
P44	11-12-2020	14	550	853.6
P51	07-01-2021	14	550	851.4
P24	29-10-2020	12	50	3185.9
P25	30-10-2020	12	50	2273.1
P26	02-11-2020	12	150	1863.5
P27	02-11-2020	12	150	2055.0
P28	04-11-2020	12	350	1370.8
P30	12-11-2020	12	350	1054.4
P32	13-11-2020	12	550	865.8
P33	16-11-2020	12	550	660.5

Tabla 3.2: Características principales de los ensayos realizados.

En la sección de evaluación y comparación de la metodología desarrollada en este trabajo con las técnicas clásicas, se efectúa el análisis de cuatro intervalos dada la serie de tiempo proveniente de los ensayos. El propósito es poder evaluar y comparar en función del crecimiento que desarrolle el árbol eléctrico. Estos intervalos deben cumplir con ciertas características y/o requerimientos que se señalan a continuación.

En las mediciones realizadas con una fuente a frecuencias de 50 – 150 – 350 [Hz] y 12 [kV] han de poseer como mínimo 5000 puntos (eventos DP), asimismo un tiempo mínimo de 100 [s] en cada intervalo. También deben cumplir que el primer intervalo comienza 100 [s] después del inicio del ensayo, dado que la actividad en las descargas es estable, adicionalmente el último intervalo debe finalizar como máximo 100 [s] antes del fin de las mediciones registradas. En cuanto a las mediciones realizadas a 550 [Hz] y 12 [kV] debe haber como mínimo 1000 puntos (eventos DP) y un tiempo de duración de al menos 50 [s] en los intervalos seleccionados. También debe cumplir con que el primer intervalo comience 10 [s] después del inicio del ensayo, como fue mencionado anteriormente, la actividad de las descargas es estable. Adicionalmente el último intervalo también debe cumplir con que finalice 10 [s] antes del término de las mediciones. Los requerimientos en este último caso son menores puesto que hay menor cantidad de datos registrados, así como menor tiempo de extensión en los ensayos. Finalmente, los intervalos seleccionados en todos los casos deben mantener una actividad lo más estable posible, reduciendo la variabilidad en los datos que integran cada tramo generado.

En la **Tabla 3.3** y **Tabla 3.4** se presentan los tiempos de inicio y fin correspondiente a cada uno de los ensayos efectuados en los tramos 1-2 y tramos 3-4 respectivamente. Se muestra el tiempo de duración de cada intervalo que se encuentra en la columna Δt_T . También se indica la cantidad de DP registrada en cada tramo en la columna nombrada Eventos DP.

Probeta	Tramo 1				Tramo 2			
	t_i [s]	t_f [s]	Δt_T [s]	Eventos DP	t_i [s]	t_f [s]	Δt_T [s]	Eventos DP
P24	160	260	100	5444	950	1050	100	7115
P25	245	345	100	5998	690	793.7	103.7	5000
P26	160	260	100	18379	460	1018	558	5000
P27	130	230	100	20653	950	1050	100	7336
P28	100	356.6	256.6	5000	400	500	100	42223
P30	130	230	100	10245	310	410	100	11733
P32	50	100	50	4278	170	220	50	6367
P33	10	60	50	2658	107	157	50	40867

Tabla 3.3: Características principales de los tramos 1 y 2.

Probeta	Tramo 3				Tramo 4			
	t_i [s]	t_f [s]	Δt_T [s]	Eventos DP	t_i [s]	t_f [s]	Δt_T [s]	Eventos DP
P24	1700	1800	100	32722	2150	2250	100	16599
P25	1120	1220	100	5033	2000	2100	100	21010
P26	1130	1230	100	12126	1500	1600	100	15512
P27	1300	1400	100	19404	1954	2054	100	15004
P28	555	655	100	50235	1240	1340	100	19937
P30	550	803.5	253.5	5000	870	970	100	15406
P32	745	795	50	18589	805	855	50	14832
P33	380	497.8	117.8	1000	610	660	50	21389

Tabla 3.4: Características principales de los tramos 3 y 4.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

En el siguiente capítulo se presenta los resultados y gráficos obtenidos aplicando la metodología presentada en el Capítulo 3, haciendo uso del Máximo exponente de Lyapunov (LLE) en la base de datos de energía generada por las DP como variable directa en el análisis, además de la función de energía acumulada (TCE). También se elabora una comparación con los métodos clásicos de análisis en descargas parciales, en particular los diagramas PRPD y PSA. Lo anterior tiene como fin el análisis del estado en el crecimiento de árboles eléctricos dentro de probetas de resina epóxica.

4.1 Análisis de la energía a través del LLE

La siguiente sección presenta el análisis en los datos obtenidos de los ensayos de DP, a partir del equipo de medición conformado por el sensor de corriente y el osciloscopio avanzado Keysight. Las probetas fueron sometidas a varios valores de tensión y frecuencia con el fin de estudiar su comportamiento en los diferentes escenarios. Los gráficos mostrados están compuestos por las señales medidas de la energía involucradas en el ensayo (curva de color verde) y la función de energía acumulada (curva de color magenta) calculada a partir de la ecuación (2.6) en la gráfica superior de cada imagen, menos en la sección 4.1.1 donde se explica la razón de esto. En la misma gráfica, pero en la parte inferior se tiene el máximo exponente de Lyapunov (curva de color azul) y el largo del árbol normado al largo máximo²(curva de color rojo).

4.1.1 Ensayos a 12 [kV] y 50 [Hz]

En una primera instancia del análisis, se considera solamente la señal de energía generada en las descargas. De la **Figura 4.1** se observa que la forma en la energía de las descargas entre las distintas probetas no existe un comportamiento similar que sea apreciable. No hay una correlación evidente en su desarrollo entre ellas, lo cual indica la naturaleza estocástica y caótica en la generación de DP a través del tiempo, como fue mencionado anteriormente.

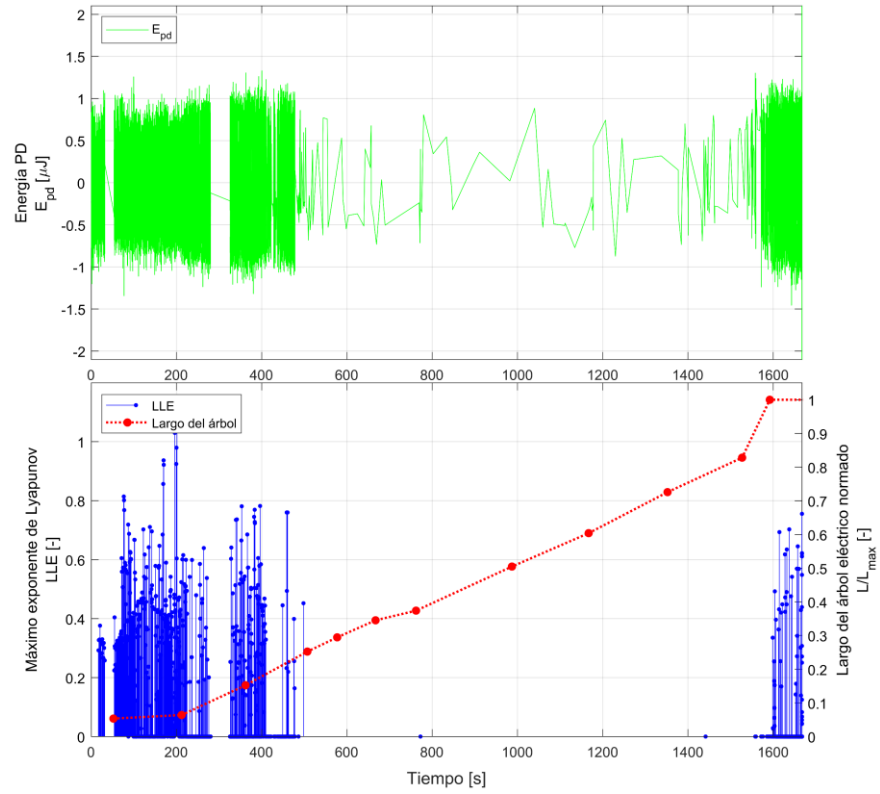
Se aprecia que a medida que se van generando las DP, hay una representación efectiva con la magnitud de los exponentes, asimismo si se genera una concentración de las descargas

² Distancia entre los electrodos de la probeta.

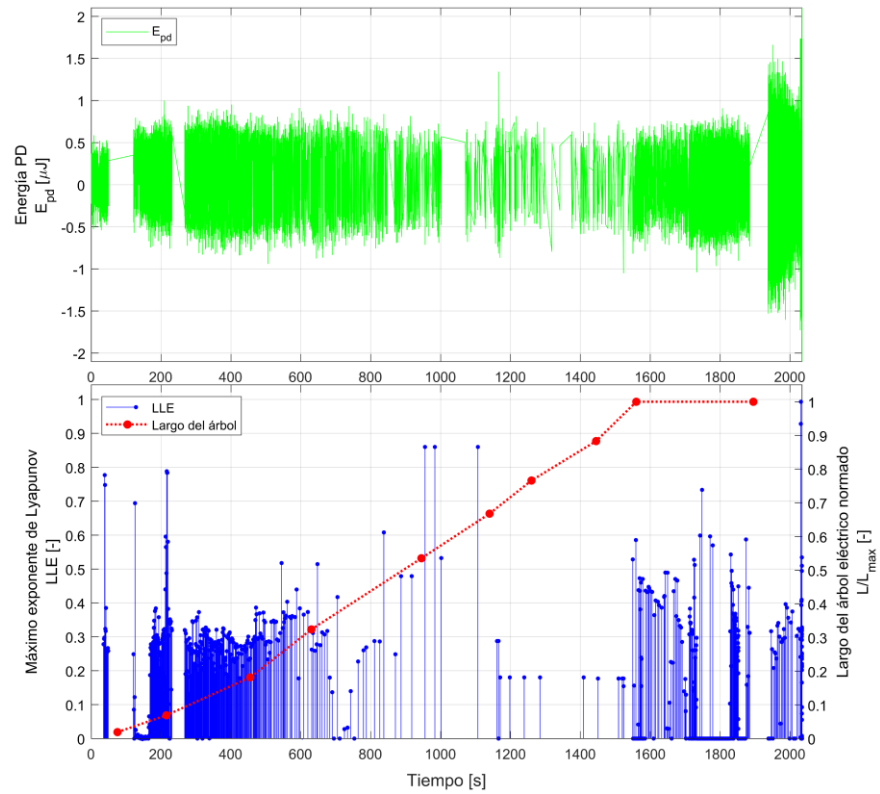
provoca también una concentración de la LLE. Esto se aprecia de forma clara con un primer tramo muy marcado de alta concentración del exponente, al mismo tiempo que las DP. Posteriormente se sigue con un tramo de reposo, donde la actividad desciende considerablemente apreciándose en las probetas P15 y PO6, llegando al punto de no haber descargas en absoluto, tal es el caso en las probetas P14 y P15. Al aproximarse al largo máximo de los árboles, se reactiva la actividad en forma importante, manteniéndose entre pequeños lapsos de tiempo hasta el término del ensayo. Cabe destacar que la probeta PO2 es la única que no sigue este comportamiento, donde las descargas medidas son contantes durante todo el proceso.

Lo anteriormente descrito entrega información relevante en la descripción del comportamiento de las DP a través de su energía. No obstante, en la magnitud del LLE no se puede obtener información relevante. Se atribuye a que el valor del máximo exponente de Lyapunov indica la presencia de caos en un sistema dinámico a partir de una serie temporal de los puntos considerados. Al tomar únicamente los valores de energía, estos varían de tal manera que en ciertos tramos no es posible extraer información que sea exclusivamente atribuible a esto último. Por ejemplo, si observamos la gráfica de la probeta P16, hay datos con una magnitud elevada en los momentos que encontramos un salto de tiempo sin gran actividad apreciable, provocando que la magnitud del LLE se dispare, al punto de empañar el análisis por estos sucesos. Esto se repite en las otras probetas en menor medida, causando que no se pueda extraer información confiable a partir de la magnitud del exponente.

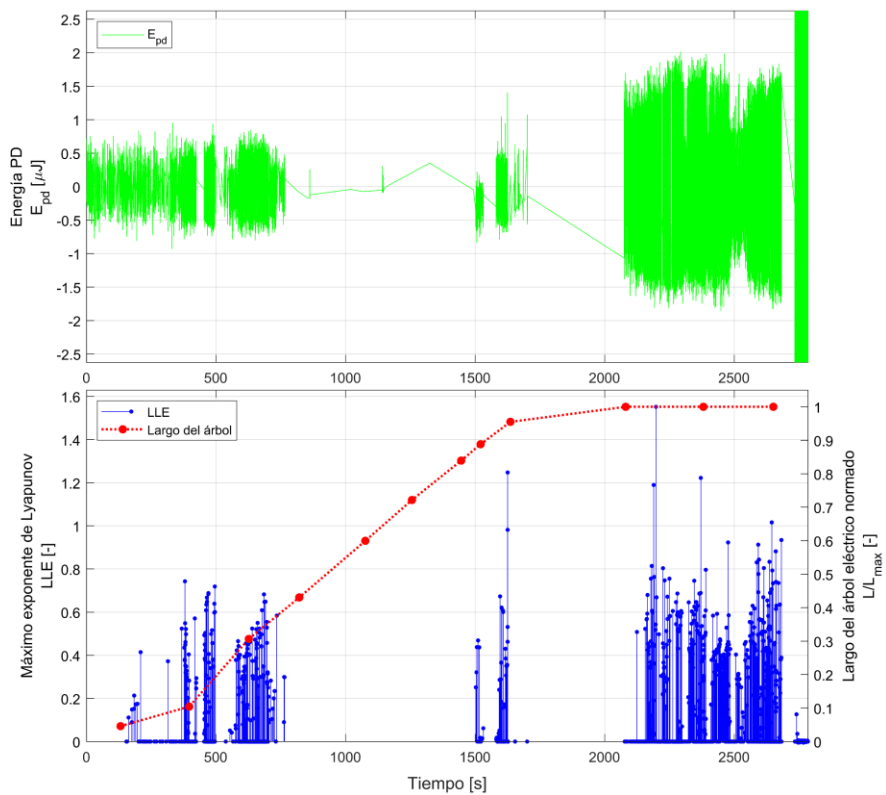
Para solucionar esta problemática se introdujo el concepto de la función de energía acumulada (TCE), en vez de la energía propiamente tal de las descargas. Se explica con mayor detalle en la sección 2.4.2, pero básicamente va haciendo una descripción en la evolución que va teniendo la actividad de las DP generadas a lo largo del ensayo. Este desarrollo se puede comparar con el crecimiento que posea el árbol, dado que la TCE siempre es de forma creciente al no considerar la influencia de la polaridad y al estar normalizada, lo que elimina la influencia de la amplitud en cada señal. Además, más adelante de este análisis se encontrará una relación entre la magnitud de los exponentes y el ritmo de crecimiento que adquiera la TCE, como también la velocidad de crecimiento en la longitud del árbol. relación entre la magnitud de los exponentes y el ritmo de crecimiento que adquiera la TCE



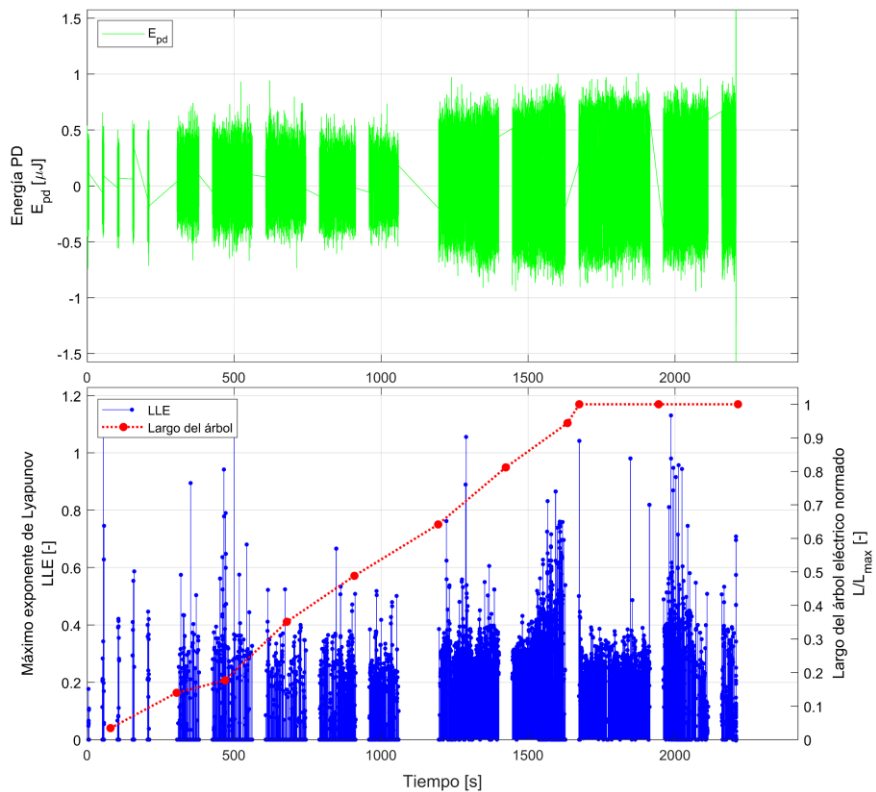
(a) Probeta P14



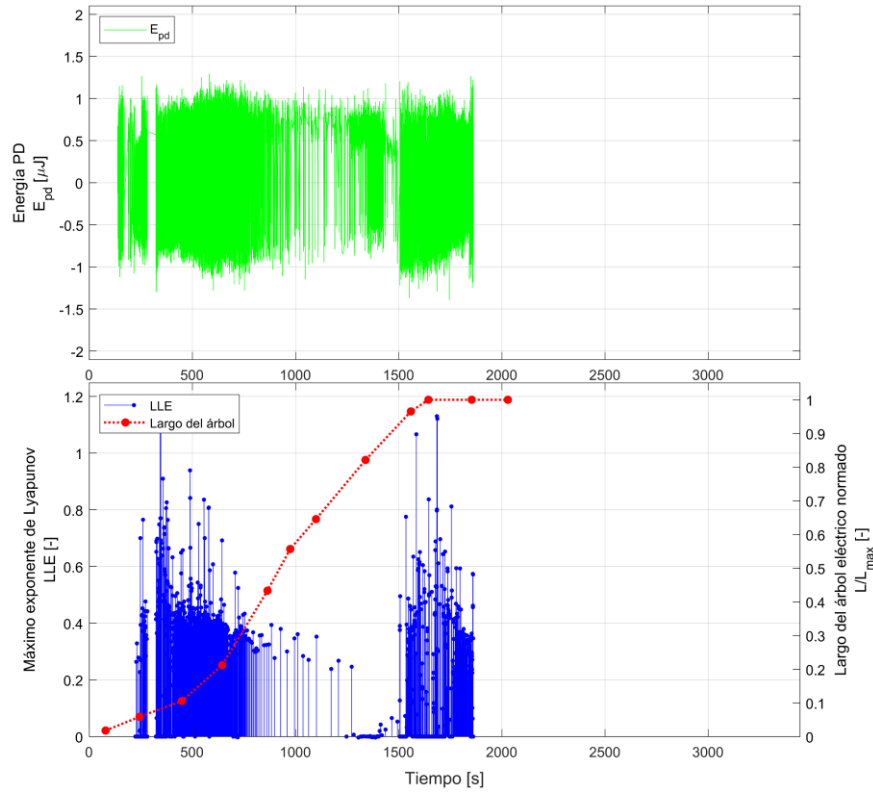
(b) Probeta P15



(c) Probeta P16



(d) Probeta PO2



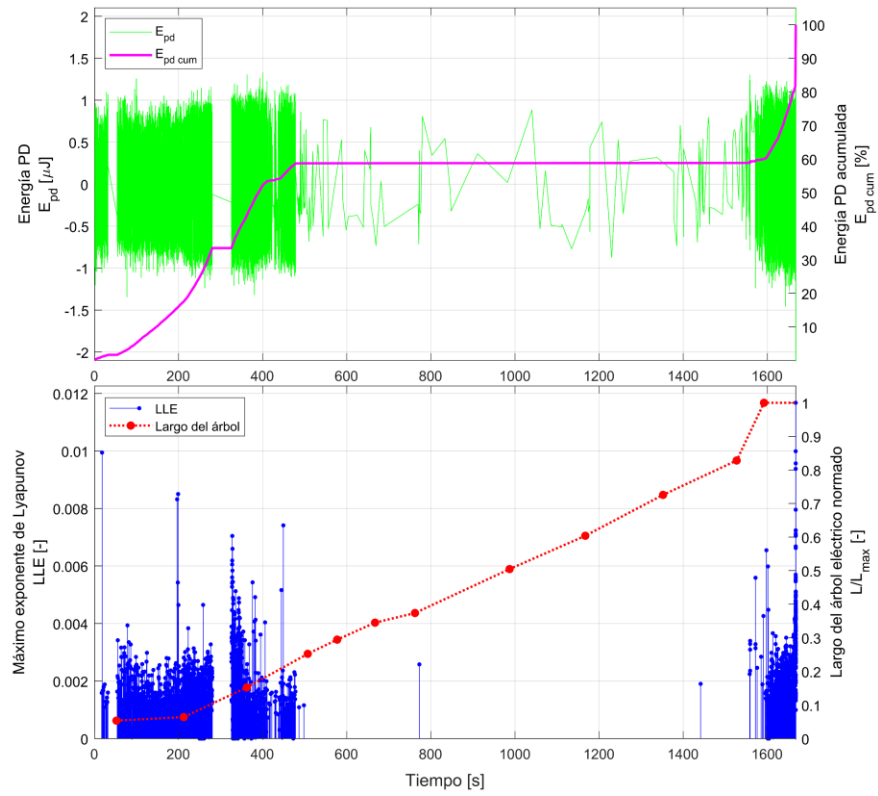
(e) Probeta PO6

Figura 4.1: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] utilizando la señal de energía.

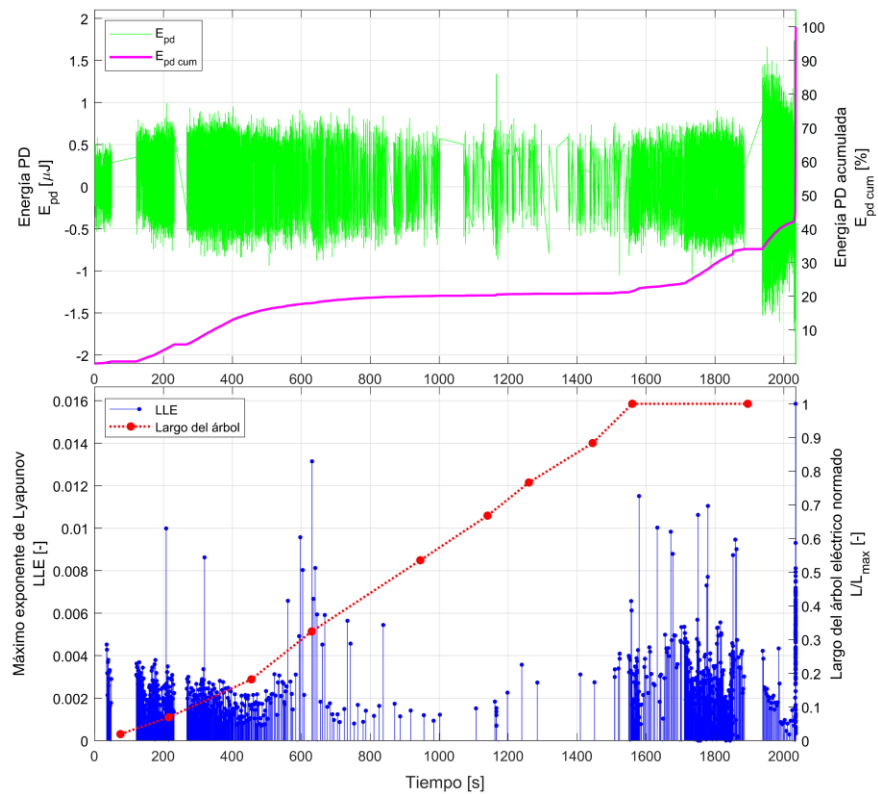
En las gráficas presentadas en la **Figura 4.2** se elabora el análisis a partir de la función de energía acumulada (TCE), a diferencia del caso anterior que se utilizó la energía directamente. La TCE dada su definición algebraica, siempre es de forma creciente durante el desarrollo del proceso, lo cual se cumple en la totalidad de los ensayos.

Al observar las gráficas de LLE (curva azul) se establece una relación evidente con el aumento en la función de energía acumulada producto de las DP (curva magenta), lo cual en el análisis utilizando la energía como tal, no se pudo conseguir. En los instantes que hubo incremento en la TCE, igualmente se origina un incremento en el valor del exponente, tanto en magnitud y densidad de los puntos. También se puede mencionar que a medida que el aumento es de una mayor proporción en la curva de energía acumulada, teniendo como resultado que la magnitud del exponente de Lyapunov sea mayor. Esto se explica porque en los instantes de aumento en la TCE, se debe a la mayor actividad de DP que se están produciendo, las que son de forma caótica dada la naturaleza de este fenómeno para su formación. Una característica importante que se observa en la mayoría de las curvas es al comienzo del ensayo, donde hay un tramo inicial con elevada cantidad de descargas, viéndose representada por el incremento del LLE. Se tiene una mayor densidad de puntos, dada la concentración de datos en este tramo y al mismo tiempo un alza en la magnitud, manifestada por valores peak bastante claros de carácter local en la curva del exponente. Luego surge un segundo tramo en el cual la actividad sufre un descenso considerable en comparación a la

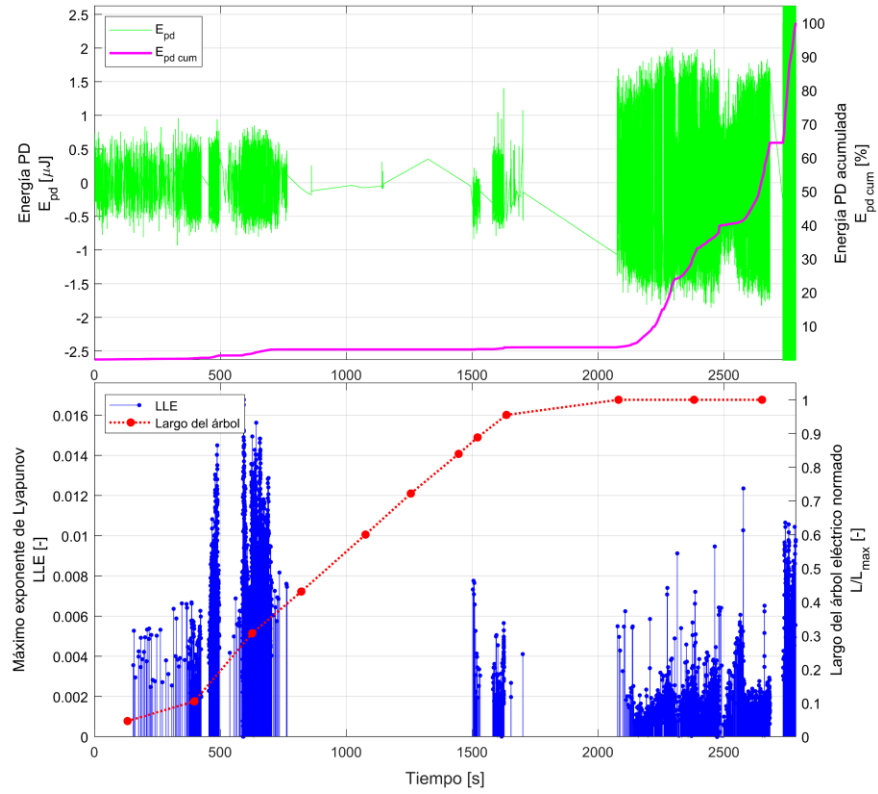
inicial, tanto en densidad y magnitud del exponente tal como se observa en las probetas P15 y PO6, llegando a ser nula la presencia de puntos en las probetas P14 y P16. Posteriormente al ir alcanzando el largo máximo del árbol (curva roja), vuelve a reactivarse la actividad de las DP, provocando la creciente en la curva de energía acumulada, al mismo tiempo reflejándose con el alza en la magnitud y densidad del LLE, distinguiéndose un tercer y último intervalo característico. En este tramo se sobrepasa la magnitud de los iniciales peak, siendo en las probetas P15 y PO6 los casos que sucede esto último. En este tramo final la actividad en las descargas es incesante en el tiempo, pero de manera caótica lo que, en consecuencia, la función de energía acumulada va ascendiendo en magnitud, ocasionando la aparición de numerosos peak entorno al LLE dentro de este tramo. La probeta PO2 es el único caso que no posee el comportamiento descrito antes, ocurriendo de manera constante las DP y por consiguiente el exponente de Lyapunov también lo es, sin ninguna variación considerable en su magnitud.



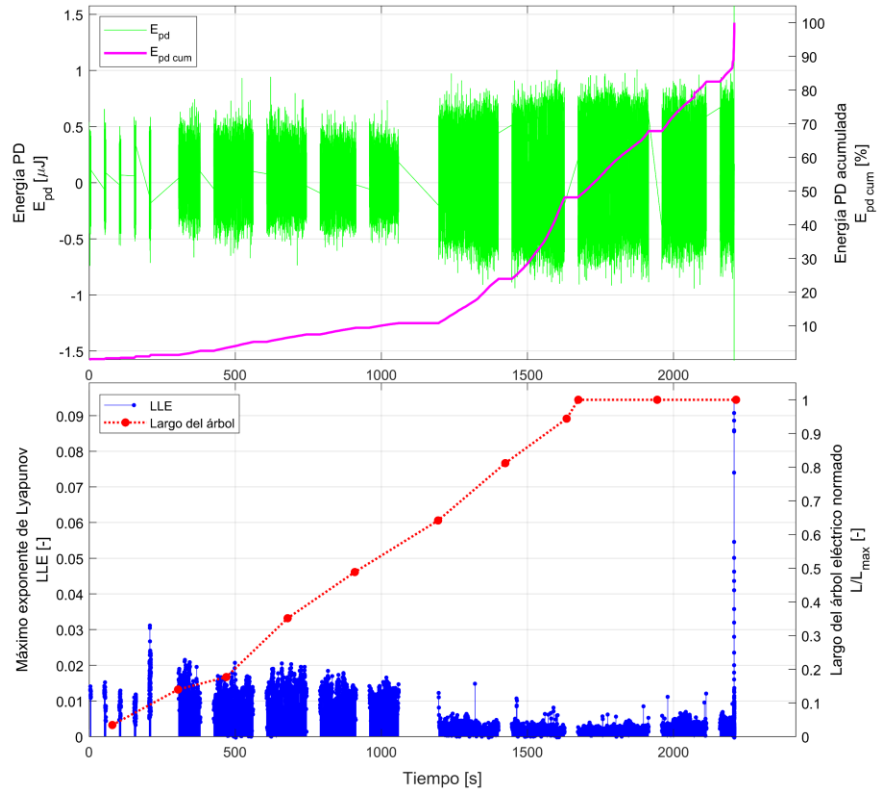
(a) Probeta P14



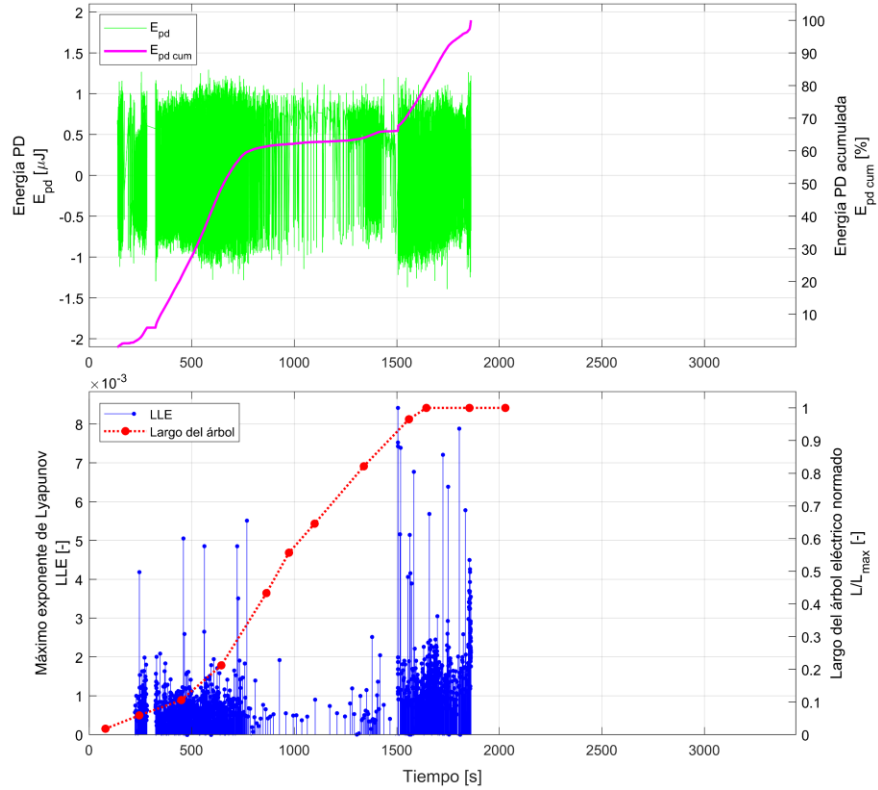
(b) Probeta P15



(c) Probeta P16



(d) Probeta PO2

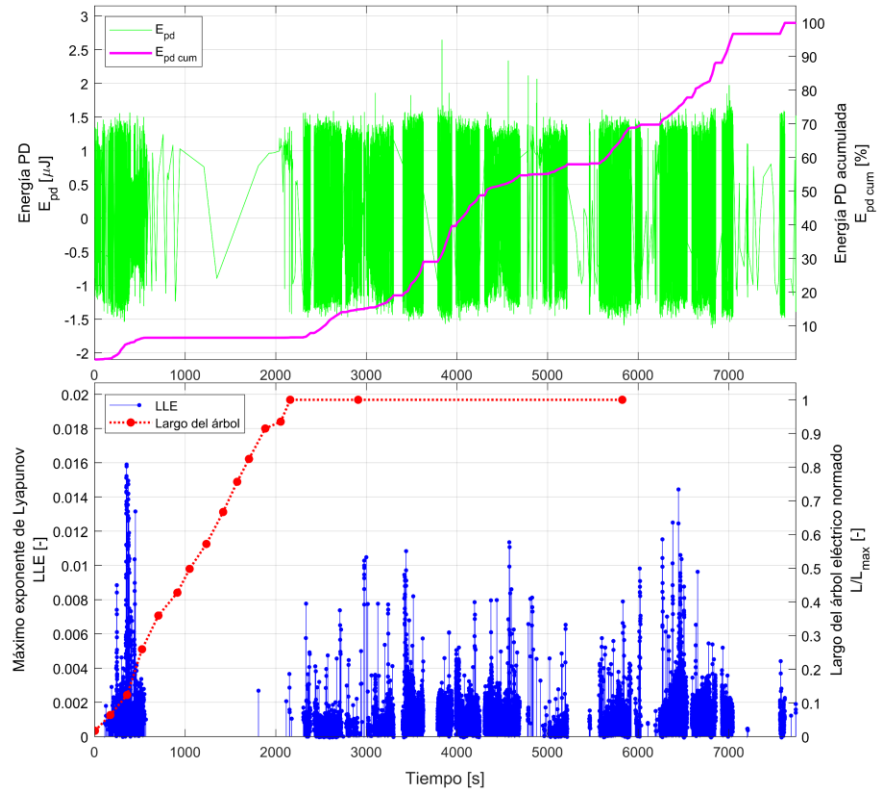


(e) Probeta PO6

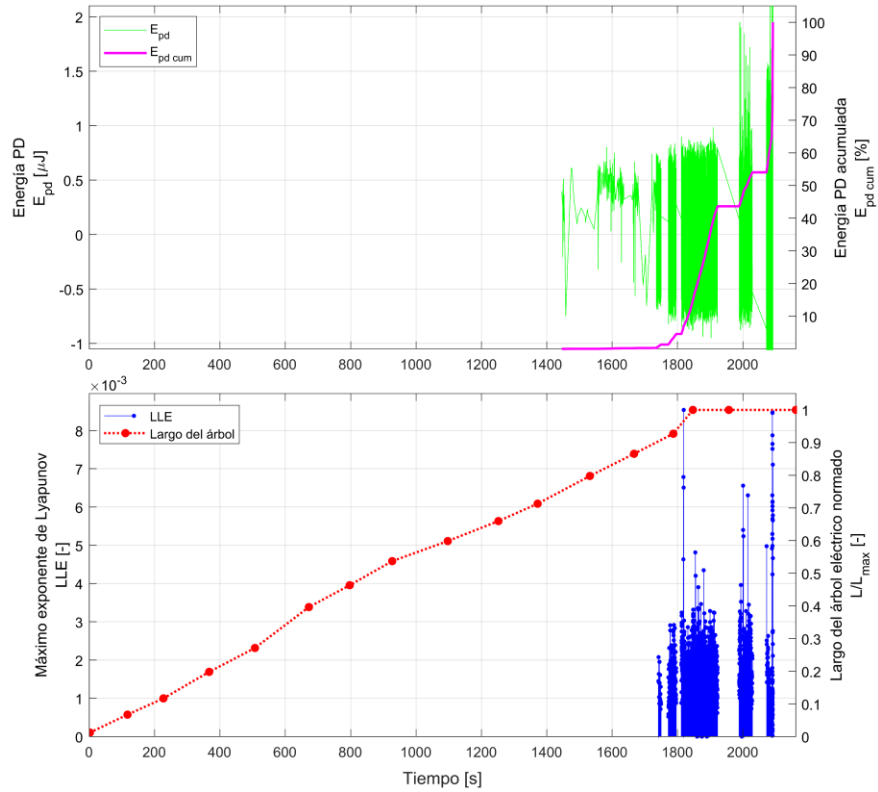
Figura 4.2: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz].

4.1.2 Ensayos a 10 [kV] y 50 [Hz]

Al ver la **Figura 4.3** se aprecia en la probeta P34 el mismo comportamiento en los tramos característicos descritos del caso a 12 [kV] y 50 [Hz], siendo este a menor magnitud de tensión. Se parte con el primer intervalo de incremento en la TCE, dada la alta actividad de DP, lo cual se manifiesta en una mayor concentración y magnitud en la variable del exponente de Lyapunov. Luego se tiene un tramo de nula actividad y sin valores de LLE. Se finaliza con el tercer tramo habiendo reactivación de las descargas, análogo al crecimiento en la función TCE y siendo representada por la mayor presencia del exponente en densidad y magnitud nuevamente. Una particularidad en este tercer tramo es de mayor duración si lo comparamos con los ensayos realizados a 12 [kV], lo que puede deberse al ser de menor magnitud en la tensión. En cuanto a la probeta P46 no incluye el primer tramo con descargas, no obstante, se presenta los tramos siguientes sin actividad y DP previamente de llegar al largo máximo entre los electrodos, lo cual se da en todos los casos de esta manera. En ambos ensayos la función de energía acumulada es creciente, dada su formulación algebraica.



(a) Probeta P34

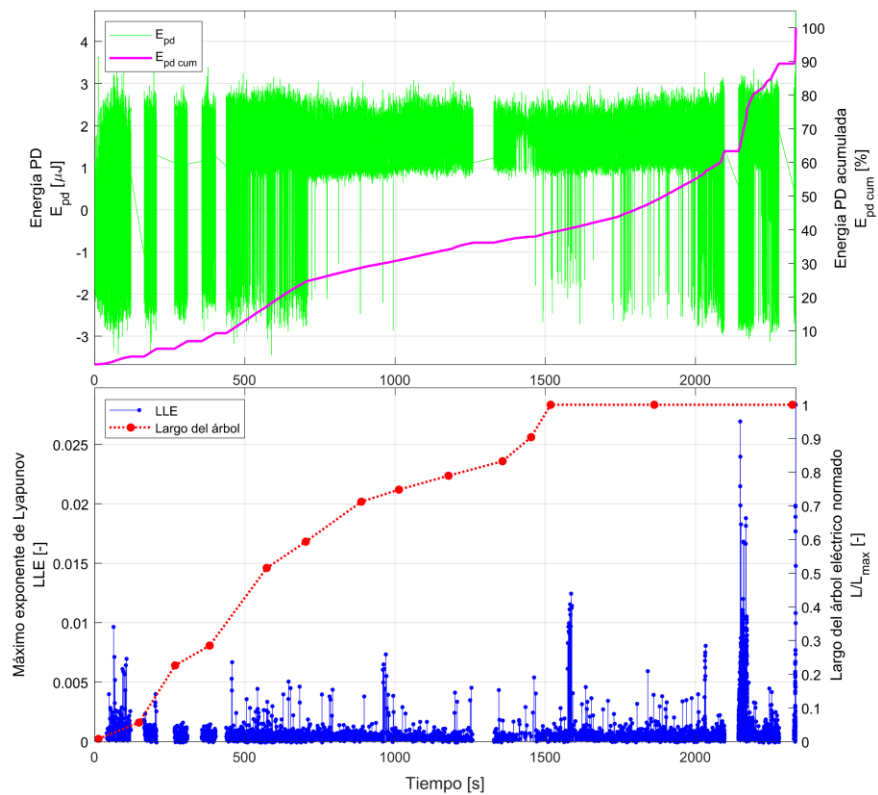


(b) Probeta P46

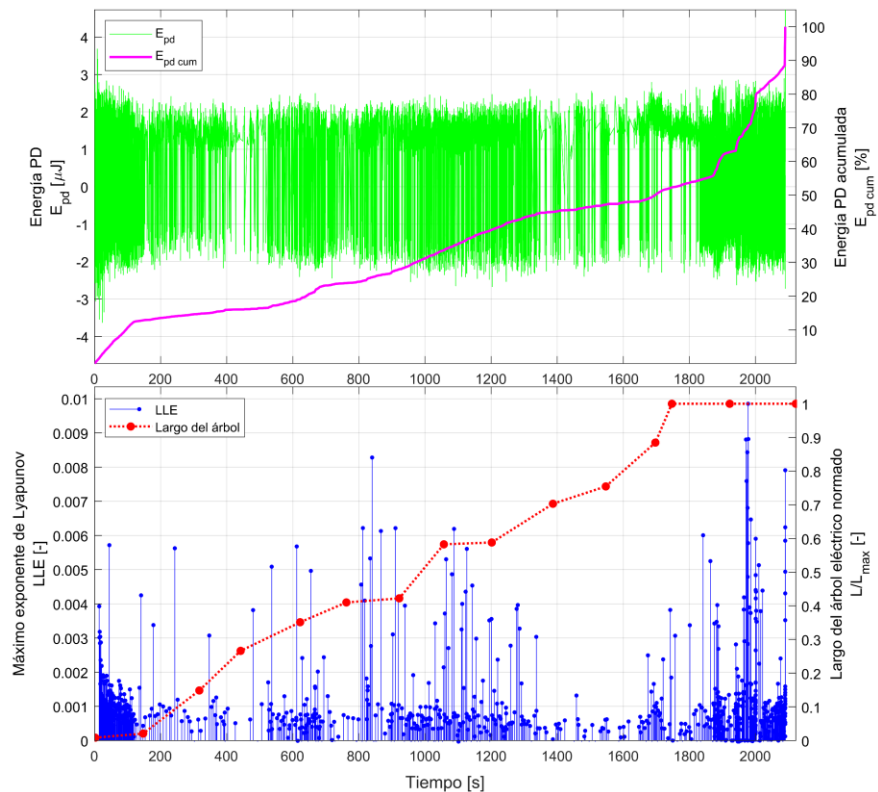
Figura 4.3: Resultados gráficos a 10 [kV] y 50 [Hz].

4.1.3 Ensayos a 14 [kV] y 50 [Hz]

A partir de la **Figura 4.4** y al ser comparada con los ensayos a 12 [kV] y 50 [Hz] se puede decir que las descargas generadas en este caso son de forma constantes a lo largo del ensayo. Al tener este comportamiento se halla en la curva de energía acumulada un permanente y acentuado aumento en su magnitud, generando que los puntos del LLE no se modifiquen en prácticamente la totalidad del ensayo. Lo anterior se puede relacionar a la mayor tensión aplicada, lo que proporciona una mayor posibilidad de generar DP. Sin perjuicio de lo anterior, se distinguen los tramos característicos ya mencionados. En la probeta P38 se aprecia con mayor claridad un tramo inicial con mayor densidad y magnitud en el exponente de Lyapunov. Luego baja cuantiosamente la densidad de esta variable, habiendo zonas con aumento en magnitud, lo cual se puede explicar por lo ya mencionado en la mayor probabilidad de iniciar descargas a mayor tensión aplicada. En cercanías del largo máximo surge nuevamente la actividad, representada por el crecimiento en la TCE, por lo tanto, mayor densidad y magnitud de la variable LLE. En cuanto a la probeta P36 se aprecia con menos claridad los tramos, sin embargo, hay un aumento de forma local en magnitud al inicio, luego las descargas se mantienen estable, siendo constante el aumento de la TCE y por consiguiente el carácter caótica es baja, lo cual se muestra con menor magnitud del exponente. También se observa un aumento destacable en la curva del exponente en forma local, o sea un periodo de tiempo breve al alcanzar el valor de 1 en el largo del árbol. En ambos ensayos se repite que la función de energía acumulada es creciente, dada su fórmula algebraica.



(a) Probeta P36



(b) Probeta P38

Figura 4.4: Resultados gráficos a 14 [kV] y 50 [Hz].

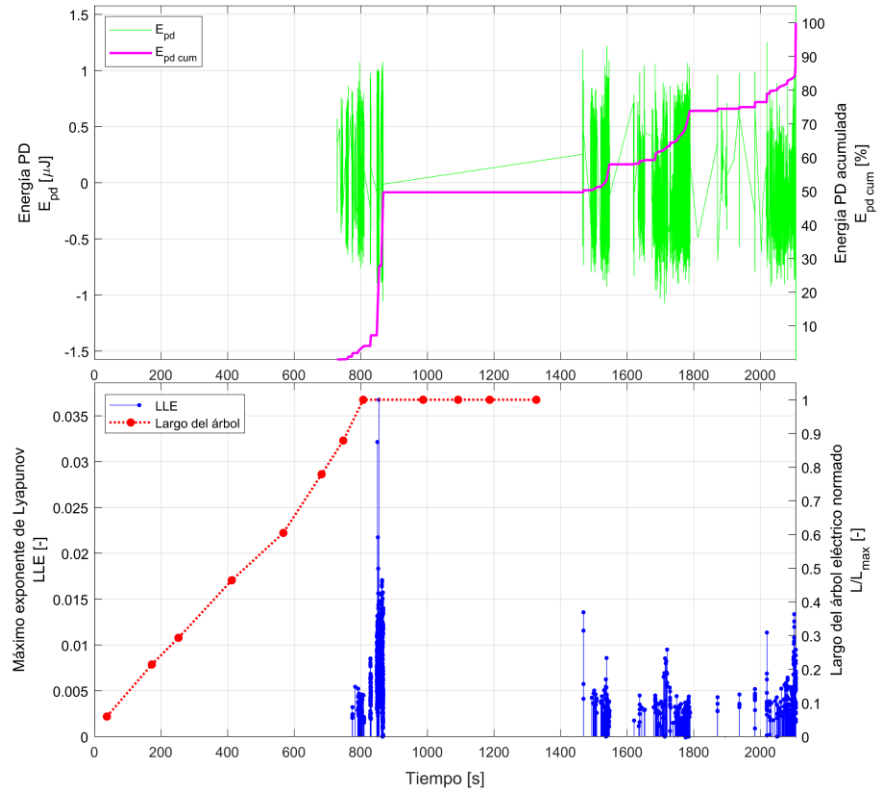
4.1.4 Ensayos a 12 [kV] y 150 [Hz]

A partir de la **Figura 4.5** se observa que al igual que el caso anterior no hay una similitud apreciable en las curvas de energía entre las probetas. Esto indica nuevamente la naturaleza estocástica y caótica en la generación de DP a través del tiempo, dando respaldo al uso del máximo exponente de Lyapunov para su análisis. También se aprecia de las curvas de la función de energía acumulada siempre es de forma creciente, a raíz de la definición algebraica.

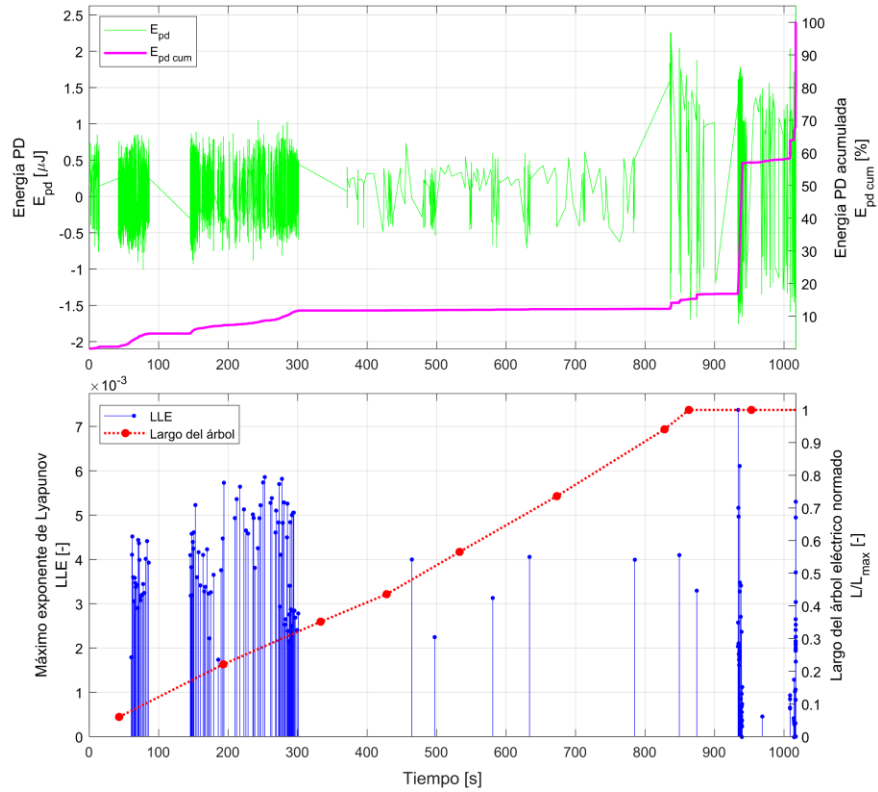
Al igual que en el caso a 12 [kV] y 50 [Hz], en los periodos que la curva de TCE experimenta un incremento, igualmente se origina un aumento en el valor del exponente, tanto en magnitud y densidad de los puntos. Además, se repite que, a mayor tasa de aumento en la energía acumulada, como resultado hay alza en la magnitud del LLE que la representa. Como ya se mencionó anteriormente, esto se explica puesto que en los instantes de mayor actividad de DP que se están produciendo, se tendrá mayor índice de caos en el desarrollo de este fenómeno, traduciéndose en un mayor valor en el máximo exponente de Lyapunov.

En las curvas de LLE se aprecia nuevamente los tramos característicos descritos en el caso anterior. El tramo inicial con alta actividad de DP y en consecuencia un incremento en la TCE, igualmente se origina un incremento en el valor del exponente, con valores peak concretos de manera local en el exponente. El único caso que no presenta este comportamiento es la probeta P13. Inicialmente no hay descargas presentes y por lo tanto no hay valores apreciables en la curva del exponente. También está presente el segundo tramo característico de baja actividad, generando la escasa presencia del LLE, por ejemplo, en la probeta P18, llegando a ser nula en los casos P13, P23, PO1 y PO7. Cabe mencionar que en la última probeta señalada hay un tramo menor que se reactivó la generación de energía, luego desciende la presencia en el LLE y pasa a ser nulo. Finalmente tenemos el tercer tramo característico en el máximo exponente de Lyapunov, donde al aproximarse al largo máximo del árbol (representado con el valor 1 en la curva) vuelve a reactivarse la actividad de las DP, provocando el alza en la curva de energía acumulada y reflejándose en el incremento en la magnitud y densidad del LLE. También hubo el caso donde la magnitud del LLE no sobrepasa a los peak alcanzados en el tramo inicial, siendo la probeta P23 una muestra de esto. Este último tramo característico, al tener una magnitud mayor que los predecesores en cuanto al exponente, da a entender que la ocurrencia de las descargas es de mayor ritmo caótica que las anteriores.

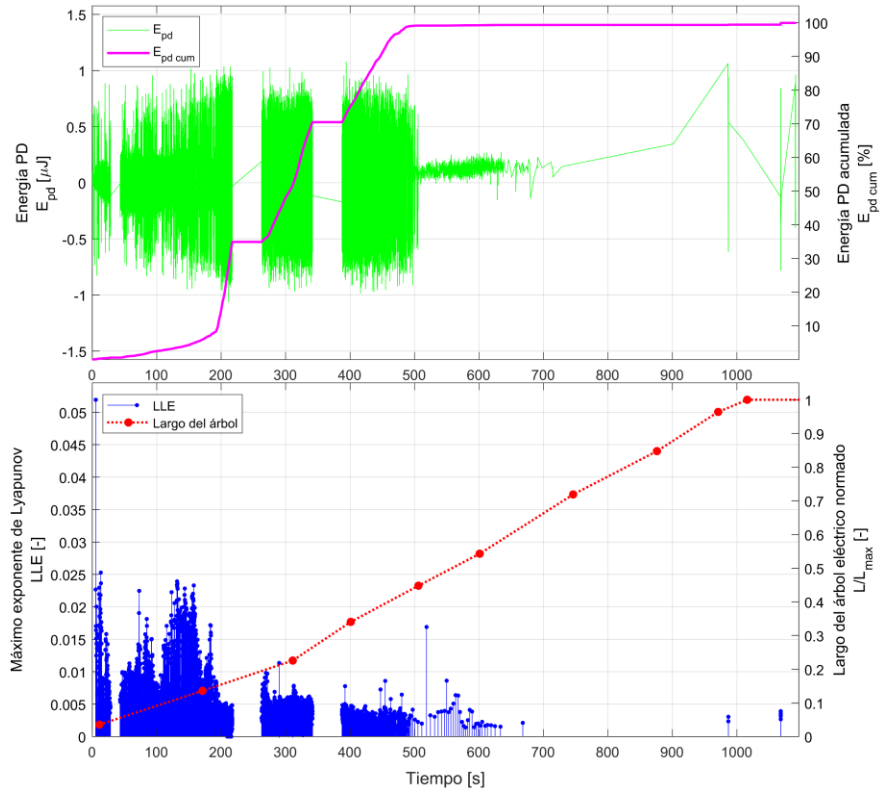
Se entiende de nuevo que a medida que el aumento es de una mayor proporción en la curva de energía acumulada, se tiene como resultado que la magnitud del exponente de Lyapunov sea mayor. Esto se explica porque en los instantes de crecida en la TCE, se debe a la mayor actividad de DP que se están produciendo, las que son de forma caótica dada la naturaleza de este fenómeno para su formación.



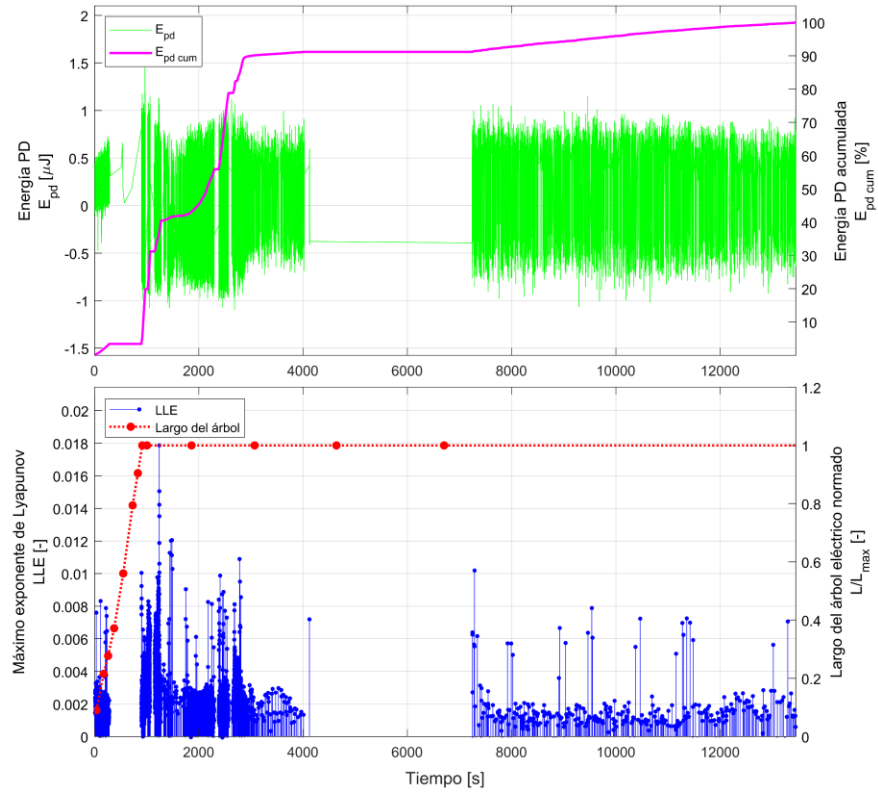
(a) Probeta P13



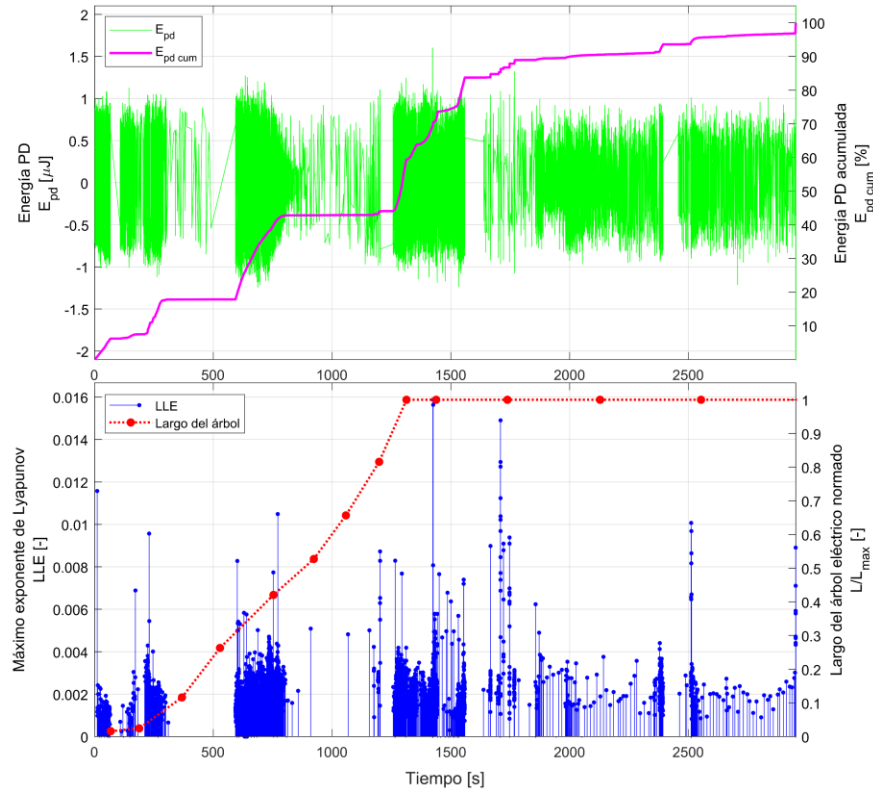
(b) Probeta P18



(c) Probeta P23



(d) Probeta PO1

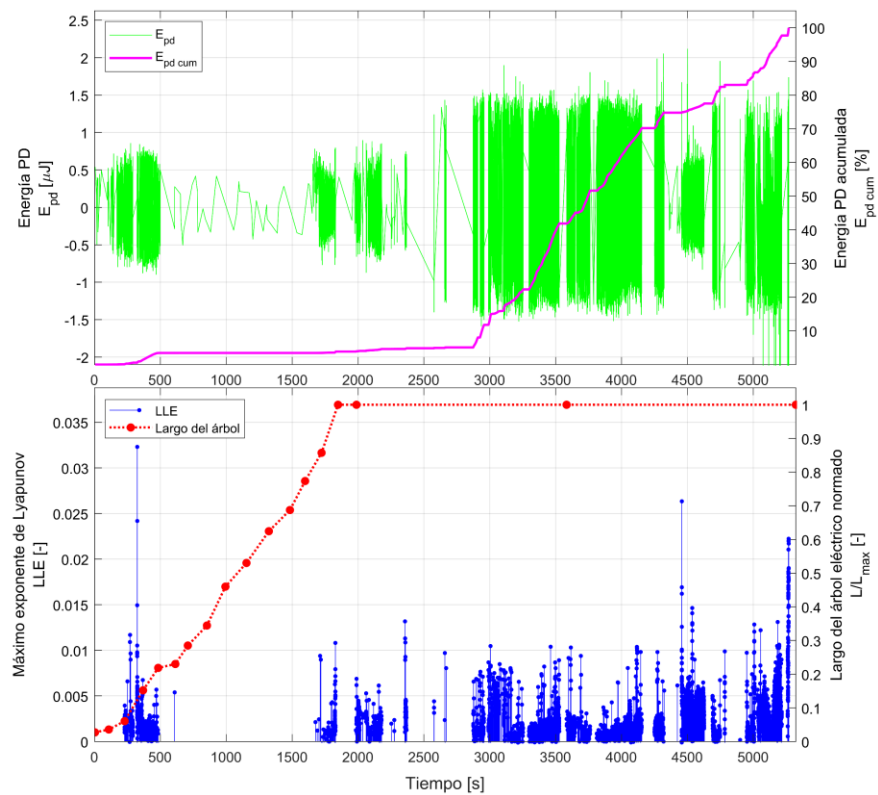


(e) Probeta PO7

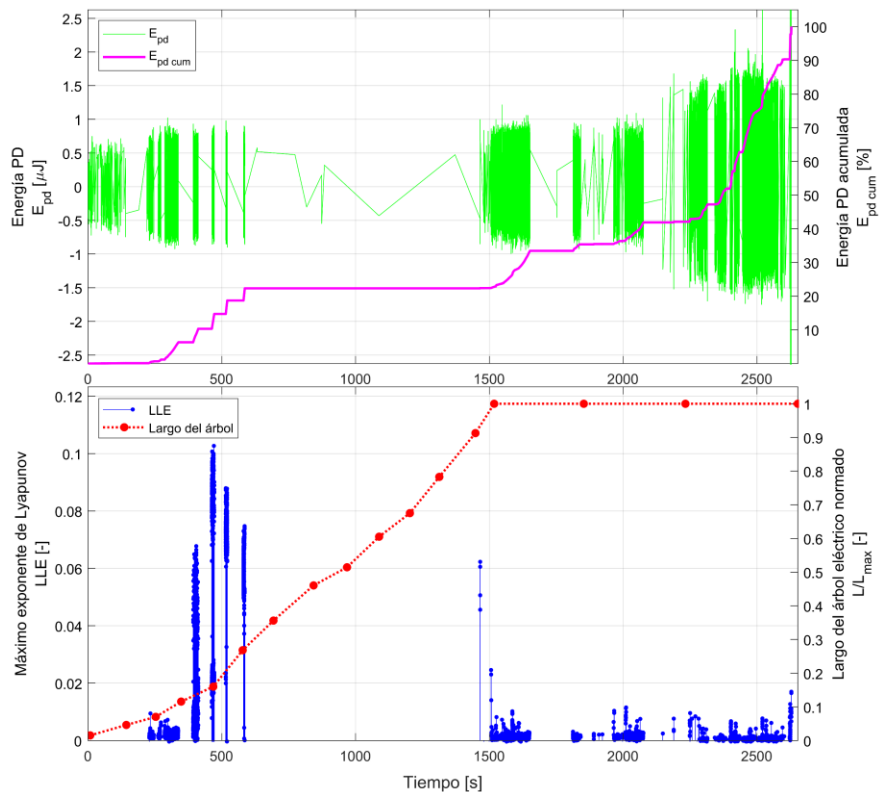
Figura 4.5: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz].

4.1.5 Ensayos a 10 [kV] y 150 [Hz]

Ahora manteniendo la frecuencia y una tensión de 10 [kV] se obtienen las gráficas de la **Figura 4.6**, apreciándose nuevamente los tres tramos característicos ya descritos, lo cual indica un comportamiento evidente en el fenómeno gracias al análisis de la curva de máximo exponente de Lyapunov. También se repite como en el caso a 10 [kV] y 50 [Hz] una particularidad del tercer tramo, con una extensión mayor en comparación a los dos tramos restantes. Además, se produce el mayor crecimiento de curva TCE en este tramo, lo cual nuevamente se puede asociar a la menor magnitud de la tensión aplicada, tomando más tiempo en provocarse la falla catastrófica de acuerdo con variados estudios realizados. Se repiten varios elementos mencionados del caso a 12 [kV], tales como la naturaleza caótica de las DP en su iniciación, validando el uso del LLE como variable de análisis, la mayor tasa de incremento de la energía acumulada es representada por un aumento en la magnitud del exponente de Lyapunov.



(a) Probeta P47

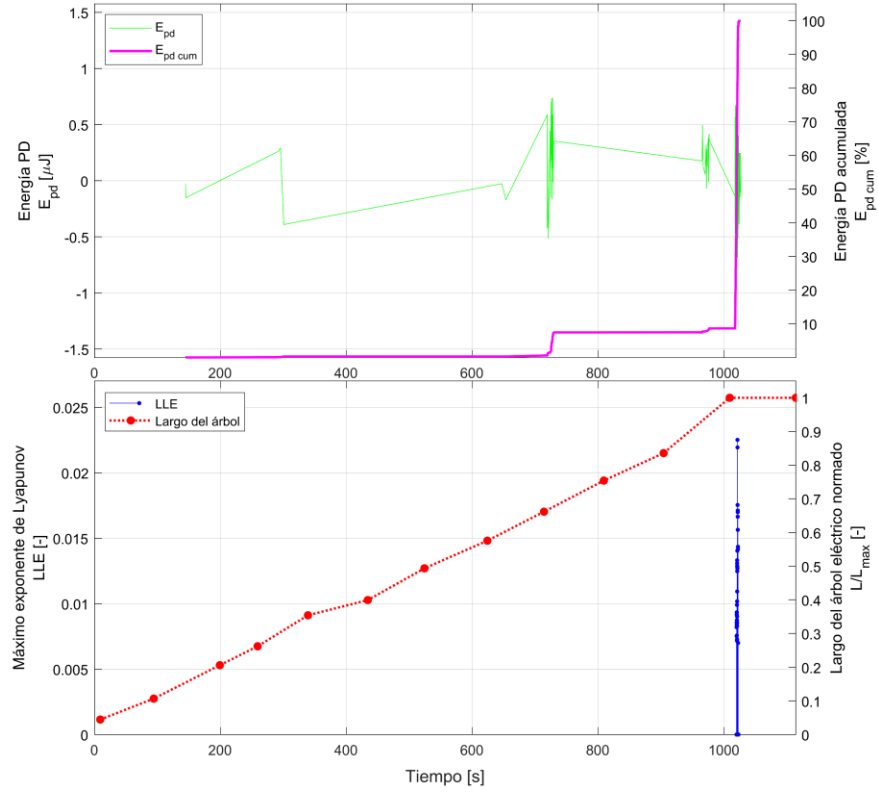


(b) Probeta P48

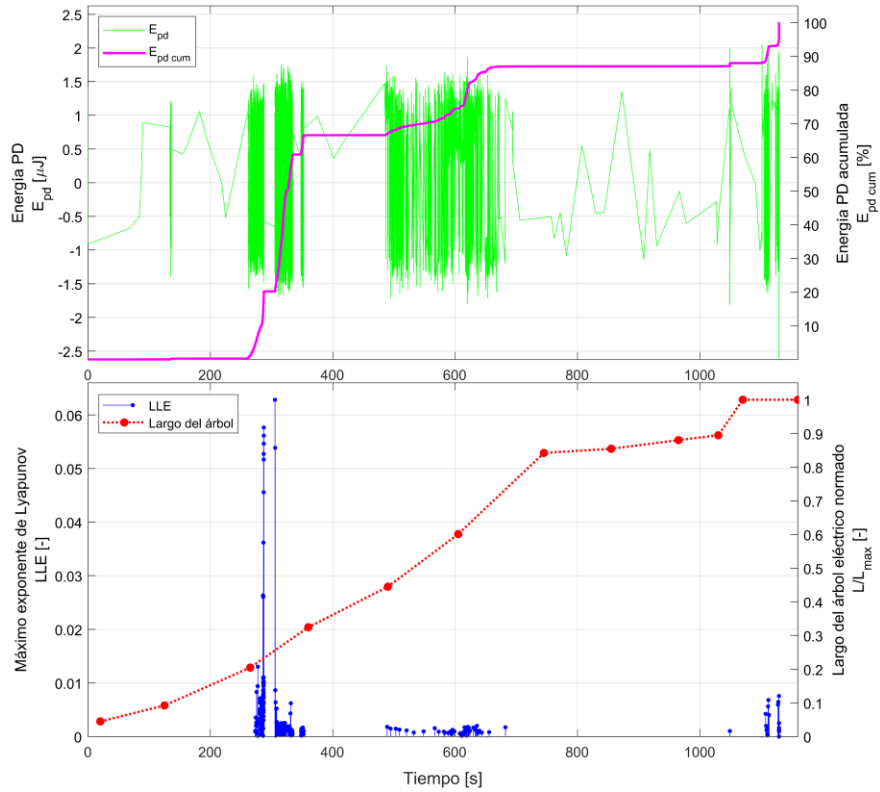
Figura 4.6: Resultados gráficos a 10 [kV] y 150 [Hz].

4.1.6 Ensayos a 14 [kV] y 150 [Hz]

En este caso se da un particular comportamiento en la probeta P39 de la **Figura 4.7**, donde la cantidad de DP es escasa y conjuntamente de una concentración elevada. Esto puede ser debido al proceso de filtrado aplicado, pudiendo dejar atrás algunas mediciones reales de DP y no solamente ruido. Cabe mencionar que nuevamente los valores de LLE se encuentran próximo al largo máximo del árbol. Por otro lado, en la probeta P40 están reflejados los tramos característicos, pero con la diferencia que ahora el mayor valor de la magnitud del exponente se da en el primer tramo y no en el tercero, con una distancia en valor considerable. También se puede mencionar que a comparación del caso a 10 [kV], el tercer tramo es mucho más acotado en duración. Por último, la densidad de puntos del LLE es menor a diferencia de los ensayos a 10 [kV] y 12 [kV] e igual frecuencia, en contraste a los casos a 50 [Hz] que no ocurre esto.



(a) Probeta P39



(b) Probeta P40

Figura 4.7: Resultados gráficos a 14 [kV] y 150 [Hz].

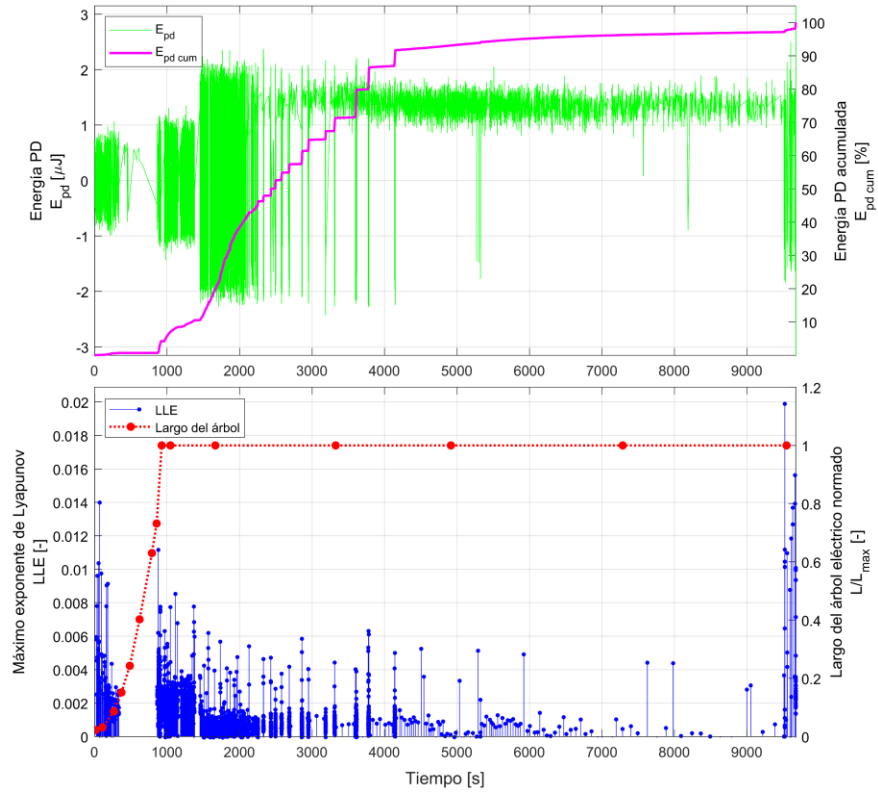
4.1.7 Ensayos a 12 [kV] y 350 [Hz]

Al igual que los casos anteriores no hay una similitud apreciable en el comportamiento de las curvas de energía electrostática generadas por las descargas (curvas de color verde) de la **Figura 4.8**. Esto reafirma la naturaleza estocástica y caótica presente en la iniciación de las DP a través del tiempo. También se puede mencionar que se verifica el comportamiento esperado en la función de energía acumulada, siempre de forma creciente en el tiempo. Esta característica está dada por su definición algebraica, la cual se menciona en la sección 2.4.2.

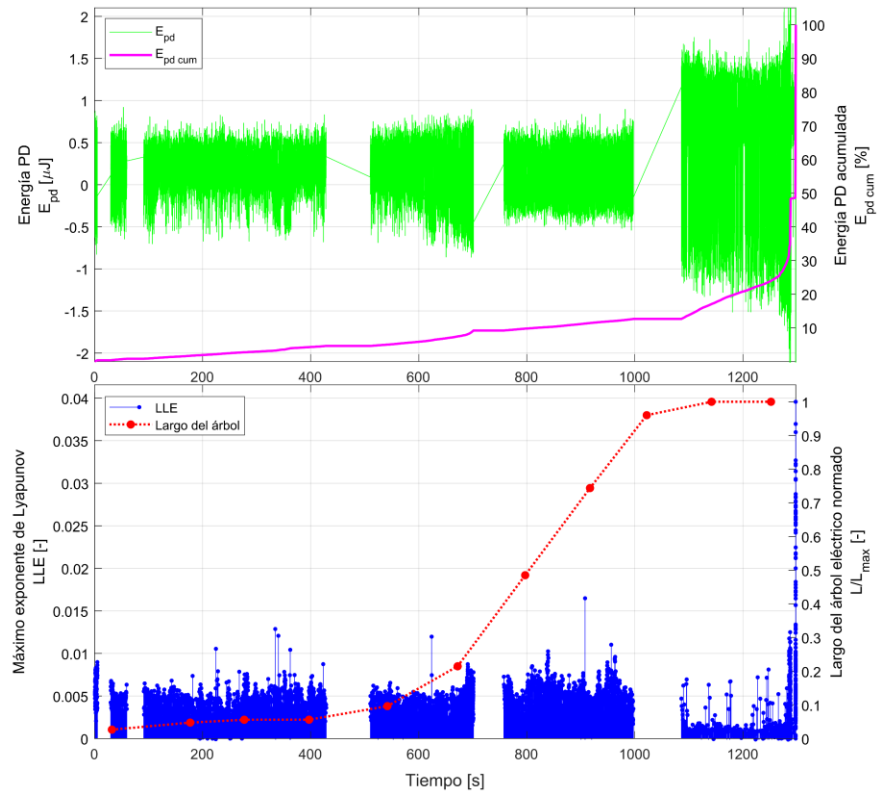
Al igual que los dos casos anteriores a 12 [kV], en los lapsos de tiempo la curva de TCE experimenta un incremento, igualmente se origina un incremento en el valor del exponente, tanto en magnitud y densidad de los puntos. También se cumple que, a mayor tasa de aumento en la energía acumulada, como resultado hay un alza en la magnitud del LLE que la representa. Esto se encarna por la naturaleza caótica en el fenómeno de las descargas en su iniciación y posterior disipación de energía, o sea mayor a actividad de DP que se están produciendo, se tendrá mayor índice de caos en el desarrollo de este fenómeno, lo que se traduce en un mayor valor en el máximo exponente de Lyapunov.

Al fijarse en las curvas de magnitud del exponente y del largo de árbol, posee el mismo comportamiento. Se compone de un primer tramo inicial con alta actividad de DP y en consecuencia un incremento en la TCE, igualmente se origina un acrecentamiento en el valor y cantidad de puntos en el exponente que representa el señalado aumento. Luego sigue el segundo intervalo característico de baja actividad, generando la escasa o nula presencia del LLE. Un tercer tramo característico en el máximo exponente de Lyapunov, donde al aproximarse al largo máximo del árbol (representado con el valor 1 en la curva) vuelve a reactivarse la actividad de las DP, provocando el alza en la curva de energía acumulada y por consiguiente en el incremento en la magnitud y densidad del LLE. En este tercer tramo, al tener una magnitud mayor que los predecesores en cuanto al exponente, da a entender que la ocurrencia de las descargas es de mayor ritmo caótica que las anteriores. Esto es un comportamiento reiterado en los ensayos, operando como indicativo de estar próximos al largo máximo del dieléctrico y por tanto de la falla catastrófica.

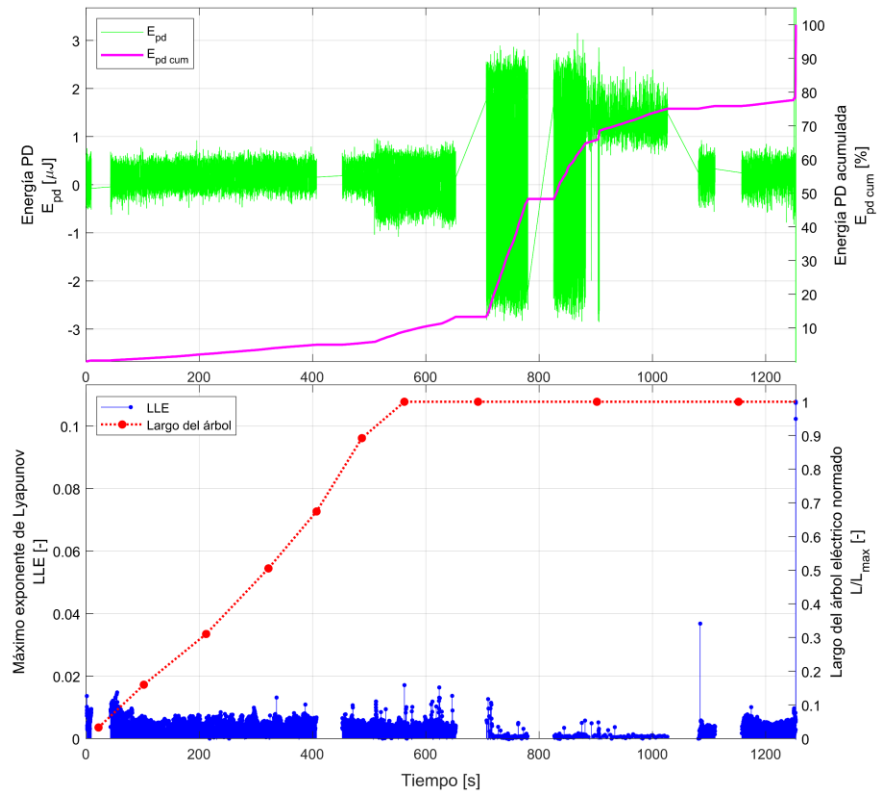
Un punto para destacar en este caso, al observar las probetas P19 y P20, no son exactamente iguales los tramos como se describieron, más bien se da actividad constante y de poca intensidad en los primeros dos tramos. Además, se condice con que el crecimiento del árbol en ambas probetas, las cuales fueron a una tasa estable, al igual la curva TCE. Por otro lado, en la probeta P11 también hay un comportamiento diferente, dado que el crecimiento del árbol fue de manera abrupta, en un corto periodo de tiempo. Esta conducta se manifiesta con la abrupta alza en la magnitud del LLE, siendo provocada por la mayor razón de incremento en la TCE, siguiendo una disipación de energía de manera constante hasta finalizar la medición. Cabe mencionar, aunque se dio este comportamiento particular, se exhiben los tres tramos característicos descritos en párrafos anteriores.



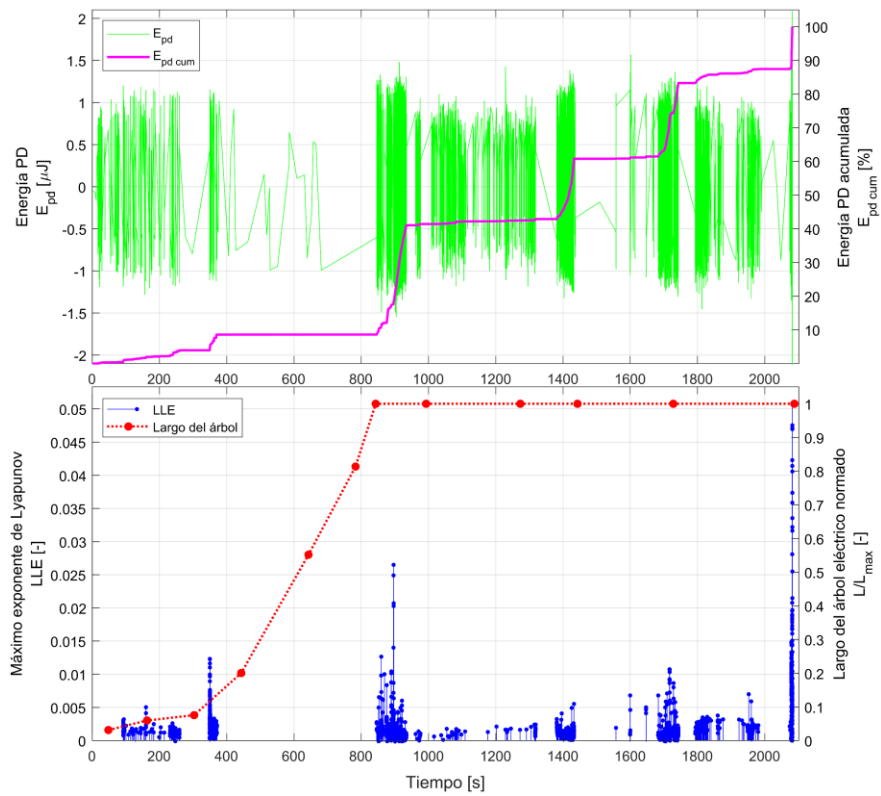
(a) Probeta P11



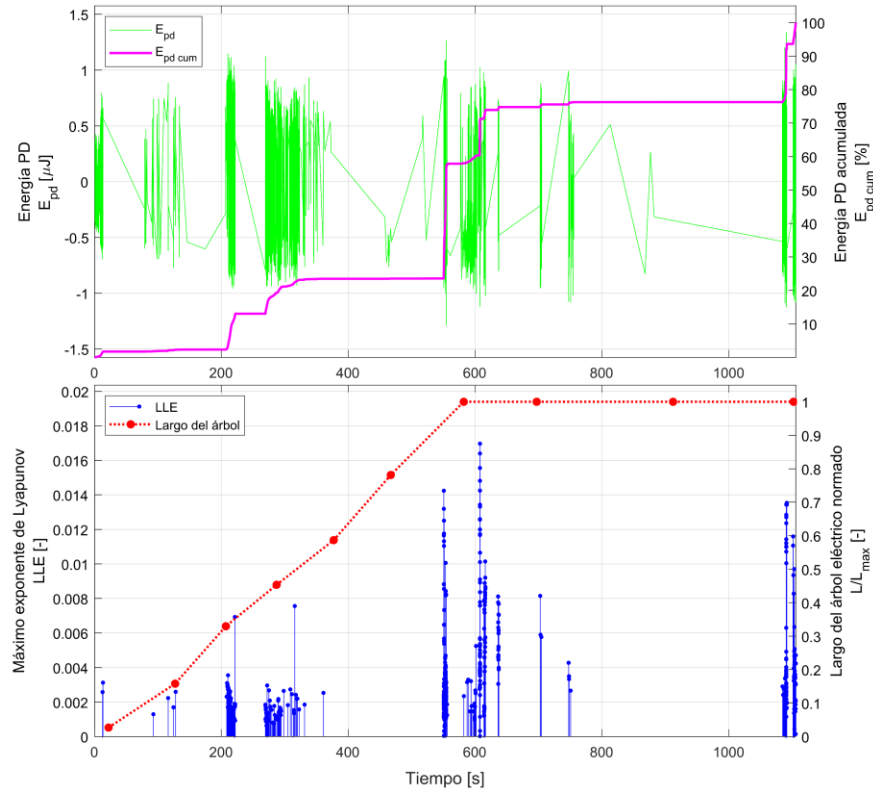
(b) Probeta P19



(c) Probeta P20



(d) Probeta PO4

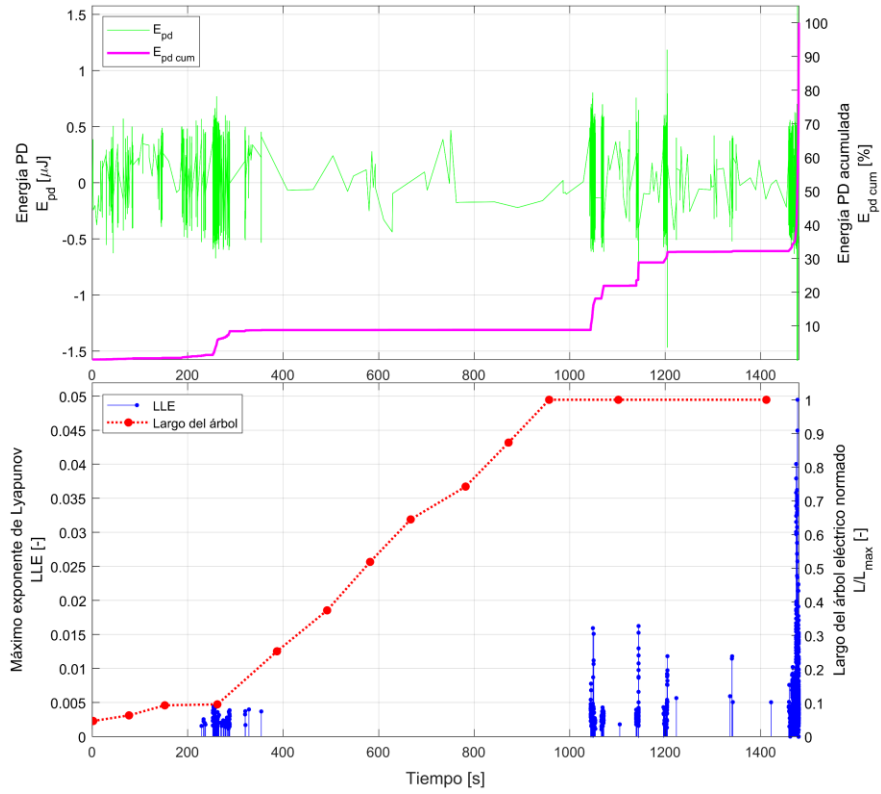


(e) Probeta PO8

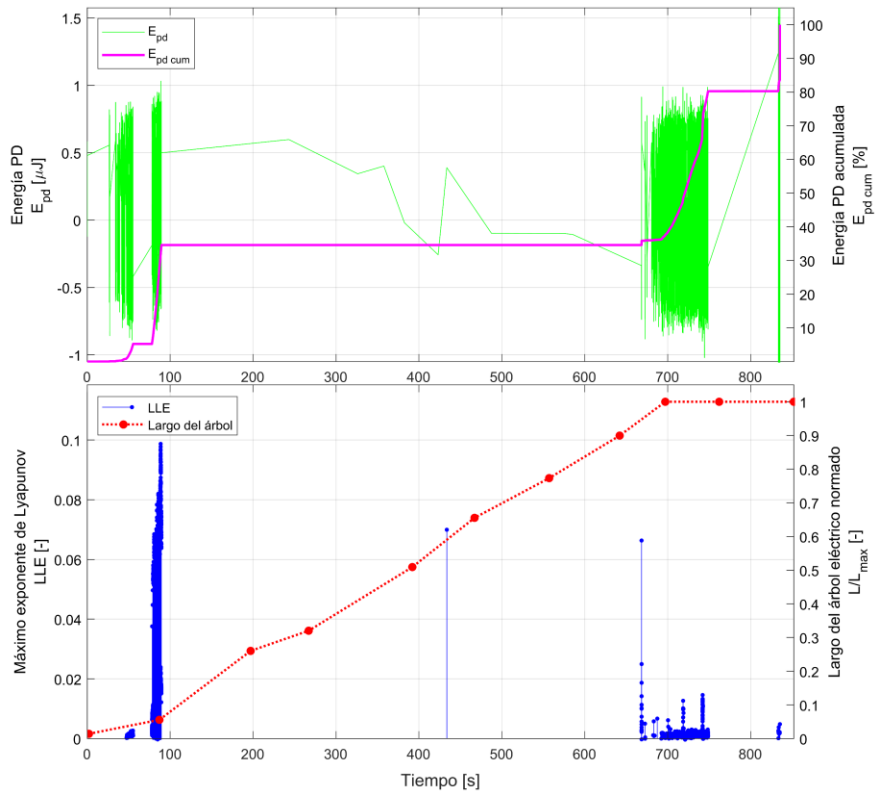
Figura 4.8: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz].

4.1.8 Ensayos a 10 [kV] y 350 [Hz]

En la **Figura 4.9** se aprecia claramente los tramos representativos que se han dado en la curva del exponente de Lyapunov. En ambas probetas se tiene un primer lapso de actividad inicial, con crecida del TCE y expresándose en el aumento del exponente, seguido de un periodo de nula presencia de DP, al mismo tiempo no hay puntos en la variable LLE, finalizando con un último tramo con reactivación de las descargas y por tanto un incremento en la pendiente en la TCE, próximas al largo máximo del árbol eléctrico. Al igual que en los casos a 50 [Hz] y 150 [Hz] presentados con anterioridad, el tercer tramo es de mayor tiempo que los previos, coincidiendo en la magnitud de tensión, sin embargo, es más breve a diferencia de los casos 50 [Hz] y 150 [Hz] a 10 [kV].



(a) Probeta P45

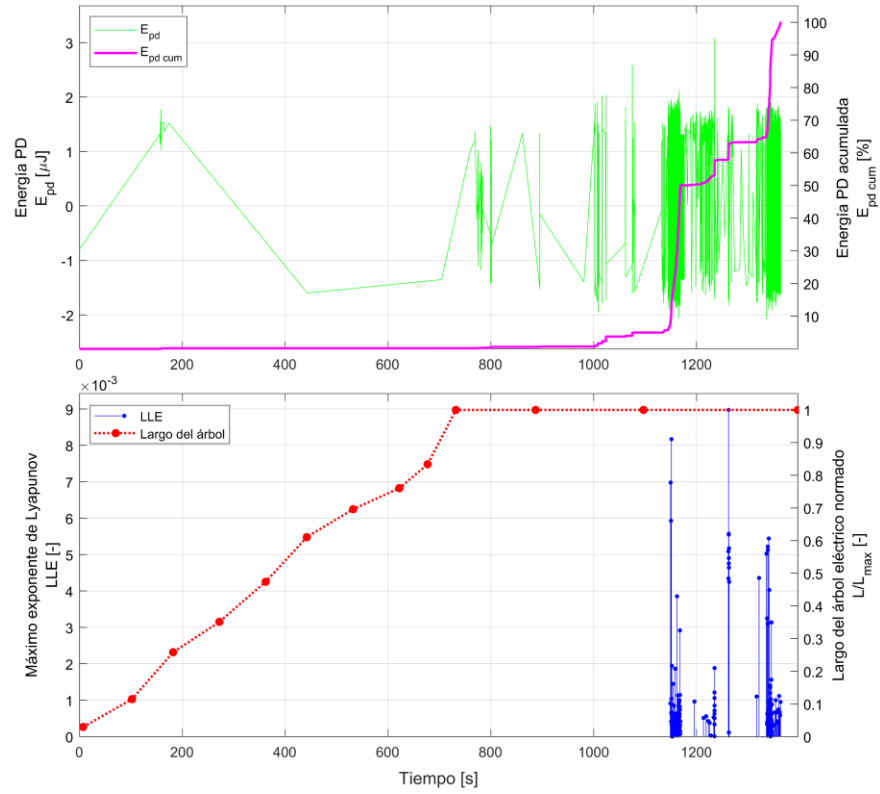


(b) Probeta P54

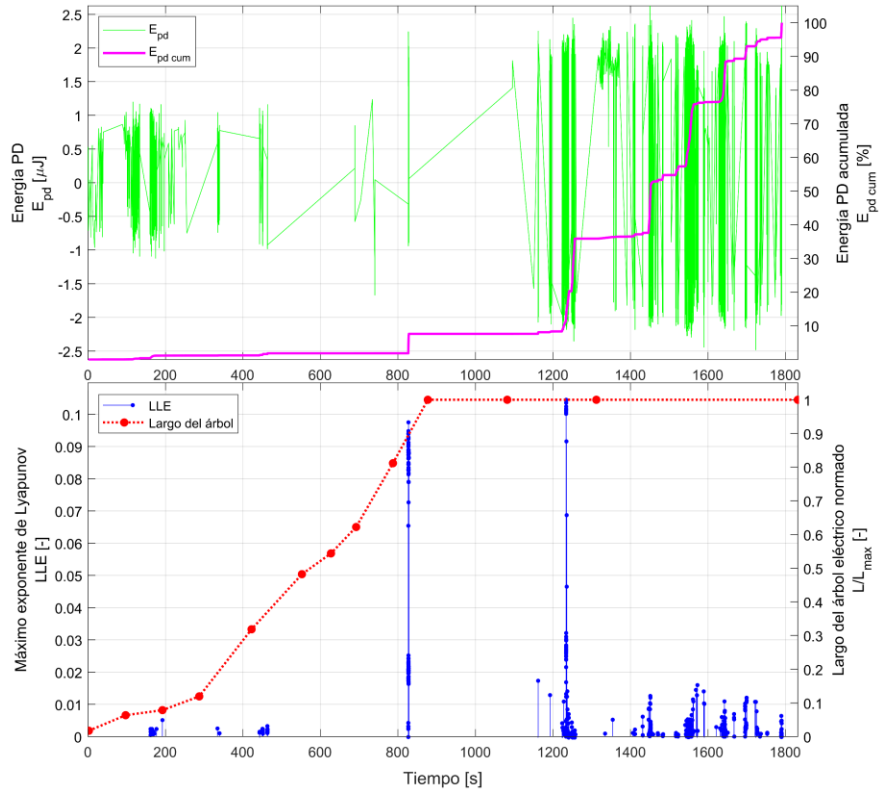
Figura 4.9: Resultados gráficos a 10 [kV] y 350 [Hz].

4.1.9 Ensayos a 14 [kV] y 350 [Hz]

Al aumentar la tensión a 14 [kV] manteniendo la frecuencia se obtienen dos escenarios distintos como se distinguen en la **Figura 4.10**. En el primero (probeta P42) se aprecia inicialmente que las descargas generadas son prácticamente inexistentes, originando que no haya puntos del exponente de Lyapunov y la ausencia del primer tramo característico. Al igual que la probeta P39, que se ensayó a 150 [Hz] e igual magnitud de tensión, no está presente el tramo inicial atribuido nuevamente al proceso de filtrado de los datos. En el segundo caso (probeta P43) se exhiben los tres tramos, con la diferencia que el primero muestra una magnitud claramente reducida al tercer intervalo, siendo prácticamente despreciable. También se distingue que la cantidad de puntos en la curva LLE es menor que los casos a 10 [kV] y 12 [kV] de los puntos anteriores. Del mismo modo se tuvo este comportamiento en los ensayos a 150 [Hz], indicando que a medida que se aumenta la magnitud de tensión en los casos a igual frecuencia, descienden los puntos obtenidos del LLE. Asimismo, aparece en forma de peak perfectamente determinados a lo largo de los ensayos.



(a) Probeta P42



(b) Probeta P43

Figura 4.10: Resultados gráficos a 14 [kV] y 350 [Hz].

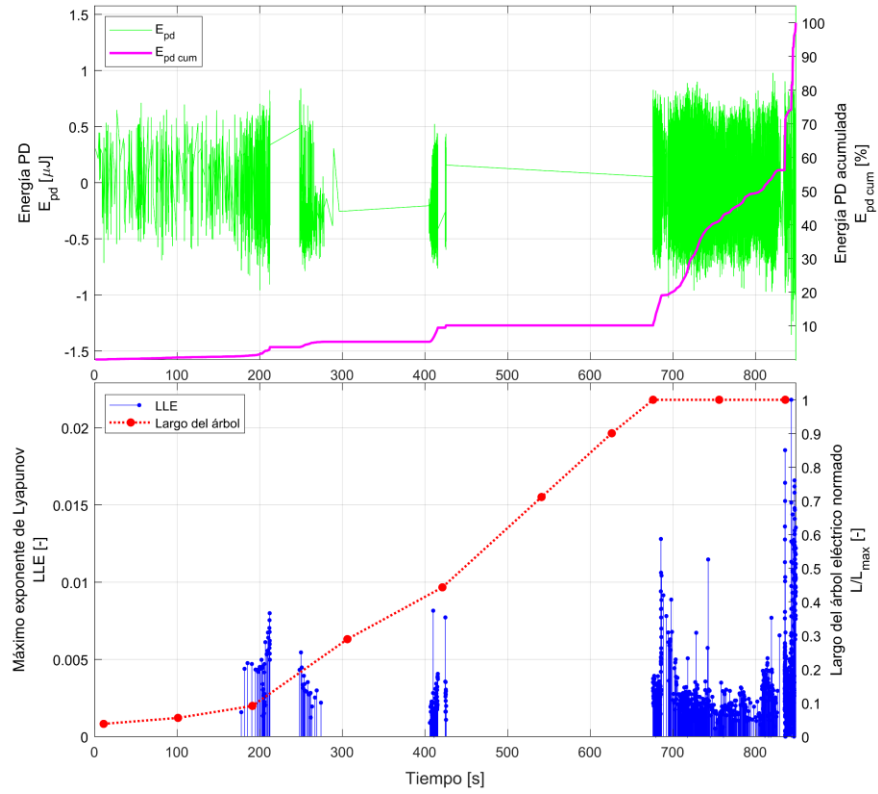
4.1.10 Ensayos a 12 [kV] y 550 [Hz]

Las curvas de energía causadas por las descargas de la **Figura 4.11** no hay un patrón de similitud apreciable entre las distintas probetas. Esto nuevamente indica la naturaleza estocástica y caótica del fenómeno de DP a través del tiempo. La tendencia en la función de energía acumulada es de forma creciente, lo cual es esperable dada la definición matemática.

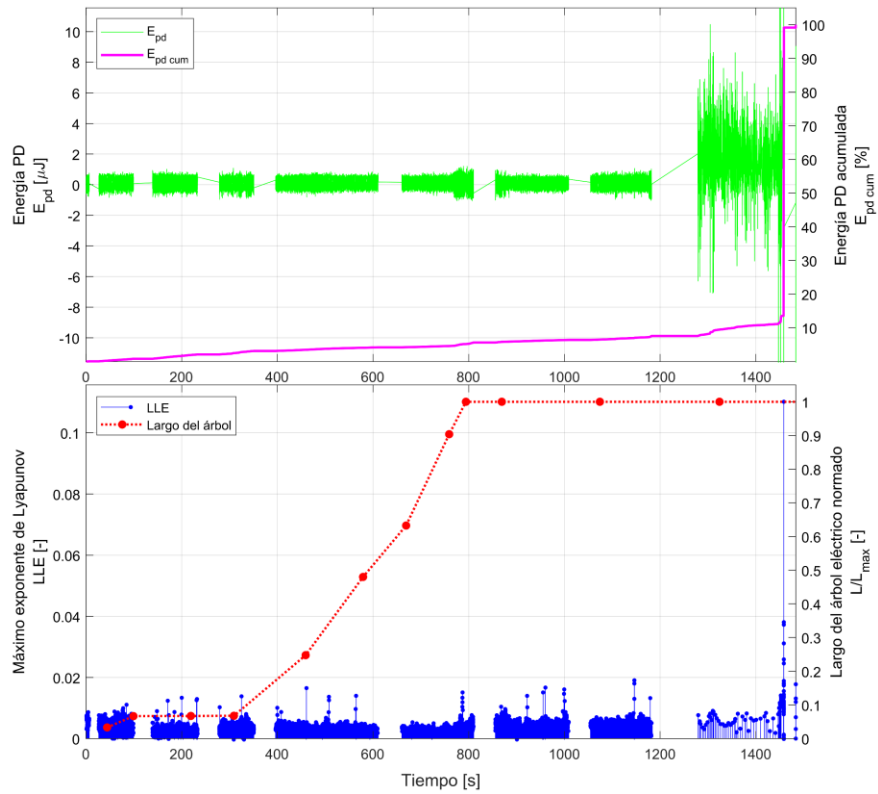
Al observar las gráficas ensayadas a 12 [kV] y 550 [Hz] se vuelve a tener la correlación en los periodos donde la curva de TCE exhibe un incremento, igualmente se origina un incremento en el valor del exponente, tanto en magnitud y densidad de los puntos. Nuevamente se repite que, a mayor tasa de aumento en la energía acumulada, como resultado hay alza en la magnitud del LLE que la representa. En los casos anteriores se explicó la razón de aquello, pero en pocas palabras a mayor actividad de DP, habrá mayor índice de caos que vienen de los elementos implicados de iniciación, lo que es reflejado con mayor magnitud en el máximo exponente de Lyapunov que lo cuantifica.

Al analizar las curvas del LLE, están en tres de las cinco probetas ensayadas los tramos característicos que fueron detallados. En las probetas P12 y P22 se tiene un tramo inicial con alta actividad de DP y en consecuencia un incremento en la TCE, a la par se origina un incremento en el valor y cantidad de puntos en el exponente que representa el señalado aumento. Luego viene un segundo tramo en el cual decae considerablemente la actividad, traduciéndose en la escasa o nula presencia del LLE. Finalmente, próximos al largo máximo del árbol se reactiva la iniciación de las DP, causando el alza en la curva de energía acumulada y reflejándose en el incremento en la magnitud y densidad del LLE. En este tramo la ocurrencia de las descargas es de mayor ritmo caótica que las primeras, pues tiene una mayor magnitud. Esto último, puede ser aplicado como indicativo de estar próximos a la ruptura del dieléctrico y posterior falla catastrófica, siendo recurrente en todos los ensayos.

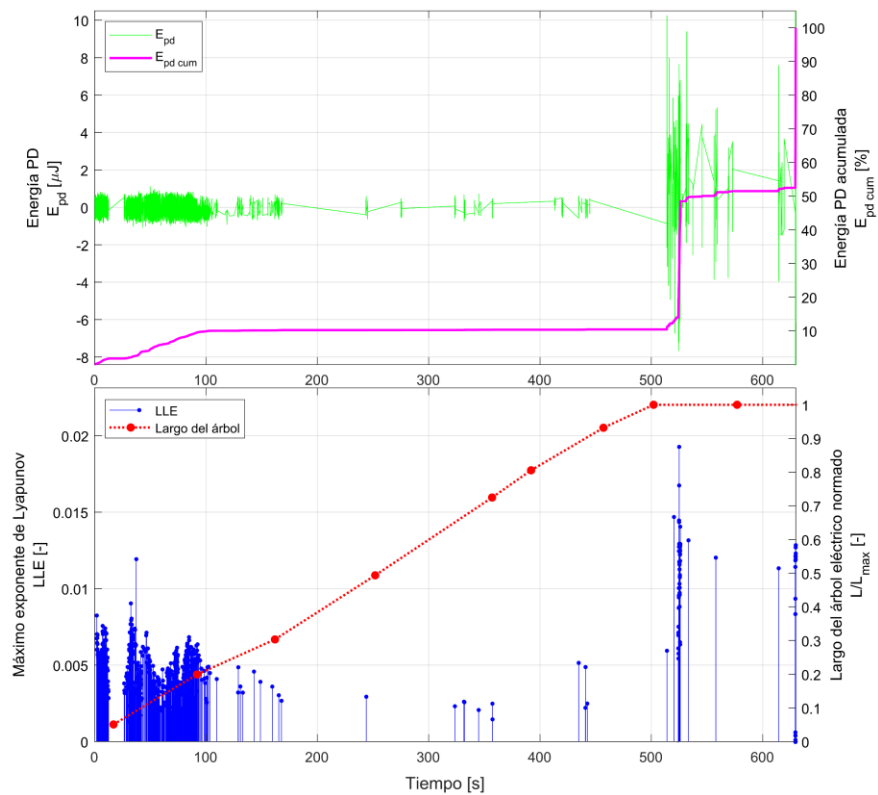
En la probeta P21 se obtuvo el mismo comportamiento a 12 [kV] y 350 [Hz], donde las descargas se produjeron en forma constante en el tiempo, por ende, el crecimiento del árbol y la curva TCE fue a una tasa estable durante el ensayo. Por otro lado, en las probetas PO5 y PO9 no aparece el primer tramo con actividad significativa, sino hasta el punto donde se alcanza el largo máximo (el valor normado de 1). Provocando que hasta el tercer tramo surge los primeros puntos en el parámetro LLE.



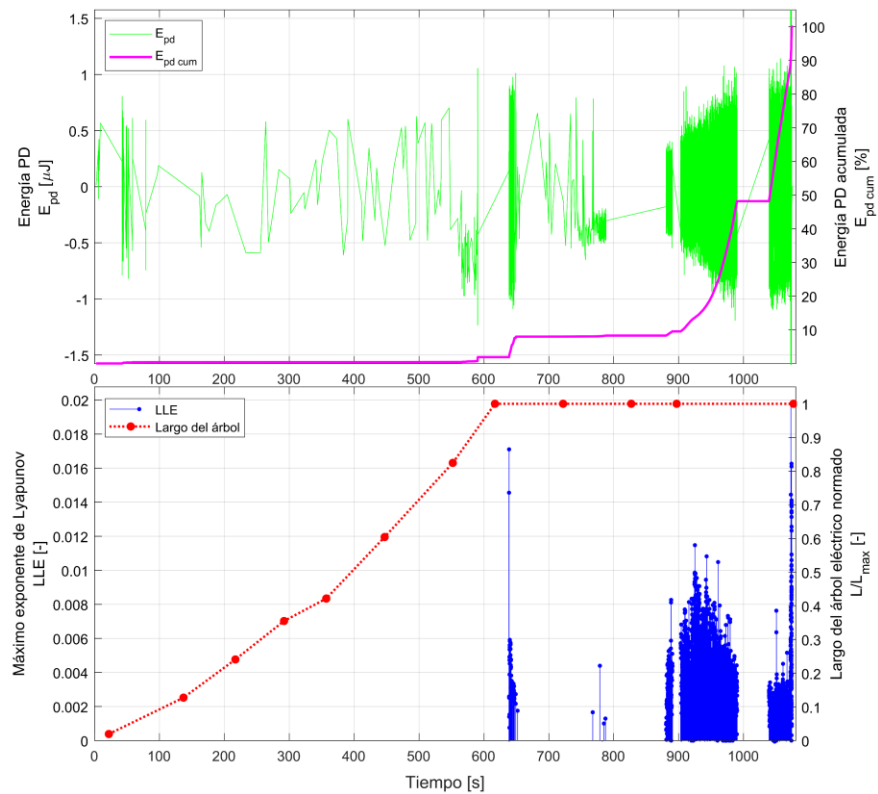
(a) Probeta P12



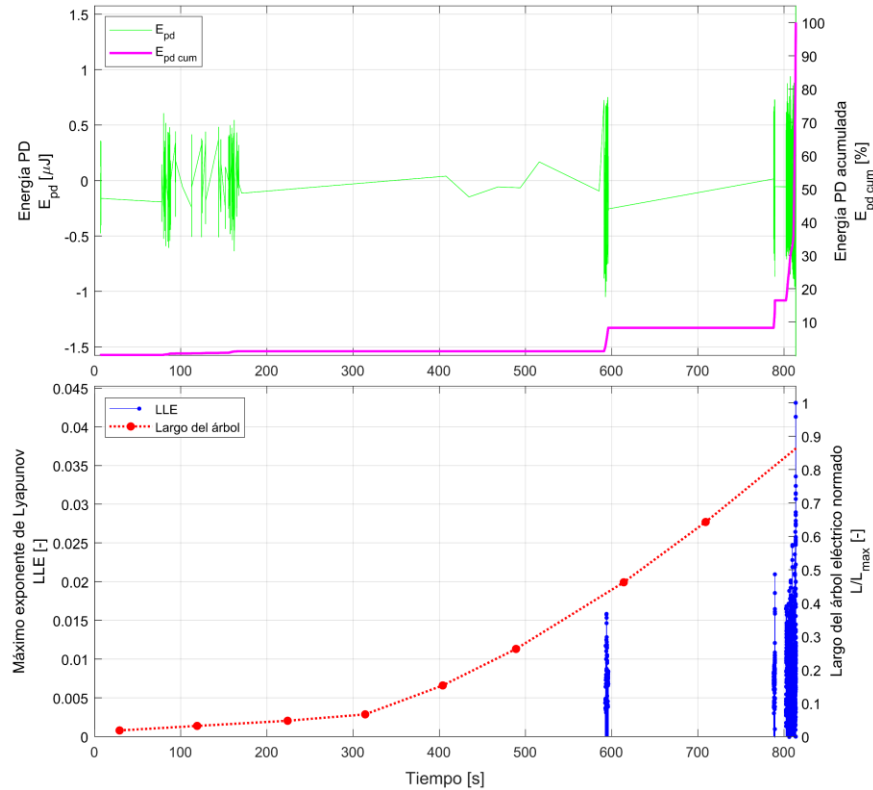
(b) Probeta P21



(c) Probeta P22



(d) Probeta PO5

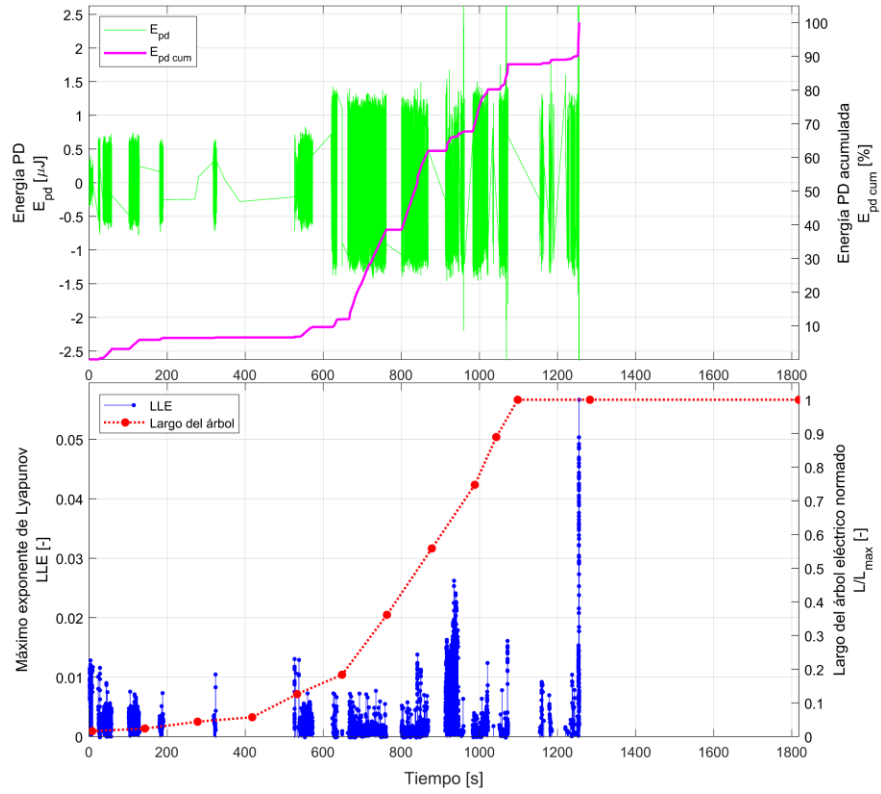


(e) Probeta PO9

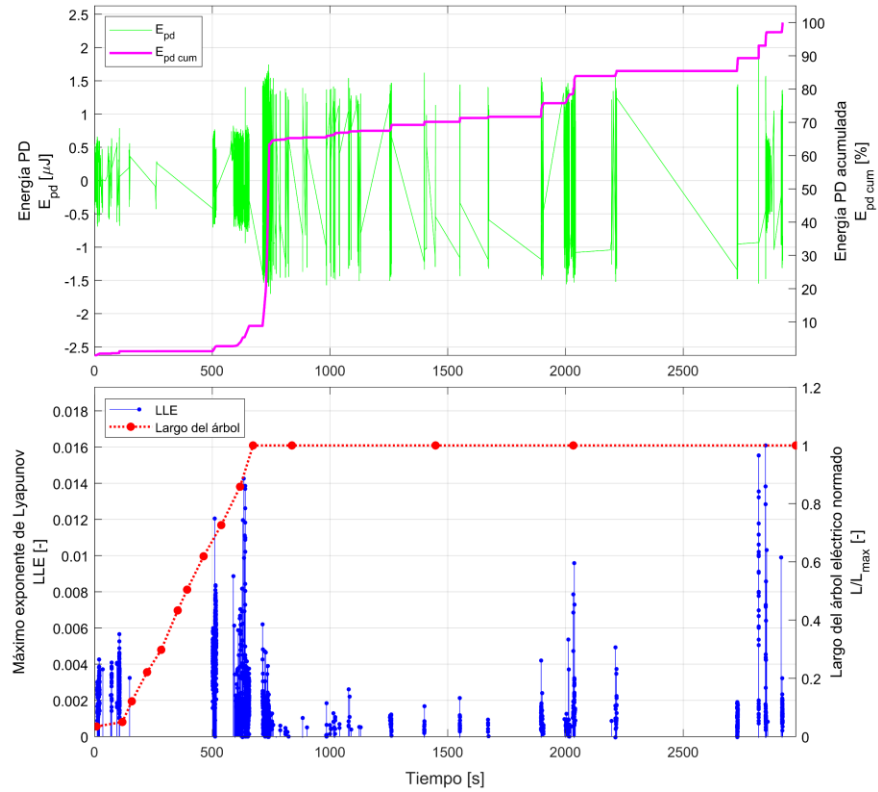
Figura 4.11: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz].

4.1.11 Ensayos a 10 [kV] y 550 [Hz]

En la **Figura 4.12** se tiene que al realizar los ensayos a 10 [kV] y a la misma frecuencia se distinguen los tramos característicos. En ambas probetas se tiene un primer lapso de actividad inicial, con crecida del TCE y causando el aumento del exponente, sigue un periodo sin descargas, por tanto, sin puntos en la variable LLE, finalizando con el último tramo con reactivación de las descargas y por tanto se incrementa la pendiente en la TCE, próximas al largo máximo del árbol eléctrico. Asimismo, se reitera que, a mayor incremento en la función de energía acumulada, como resultado la magnitud del exponente de Lyapunov va siendo mayor. Se establece una relación entre los instantes de crecida en la TCE, provocado gracias a la mayor actividad de DP, originadas de forma caótica dada su naturaleza, manifestándose con el aumento en la magnitud del LLE. Cabe resaltar que el tercer tramo tiene la particularidad de ser más extenso en comparación a los dos tramos restantes, al igual que en los casos a 10 [kV], a 50 [Hz] y 150 [Hz], siendo el único caso a 350 [Hz] que no posee esta característica. Adicionalmente, el tramo final parte notoriamente antes de llegar al largo máximo entre los electrodos, lo cual no había ocurrido con tanta antelación.



(a) Probeta P49

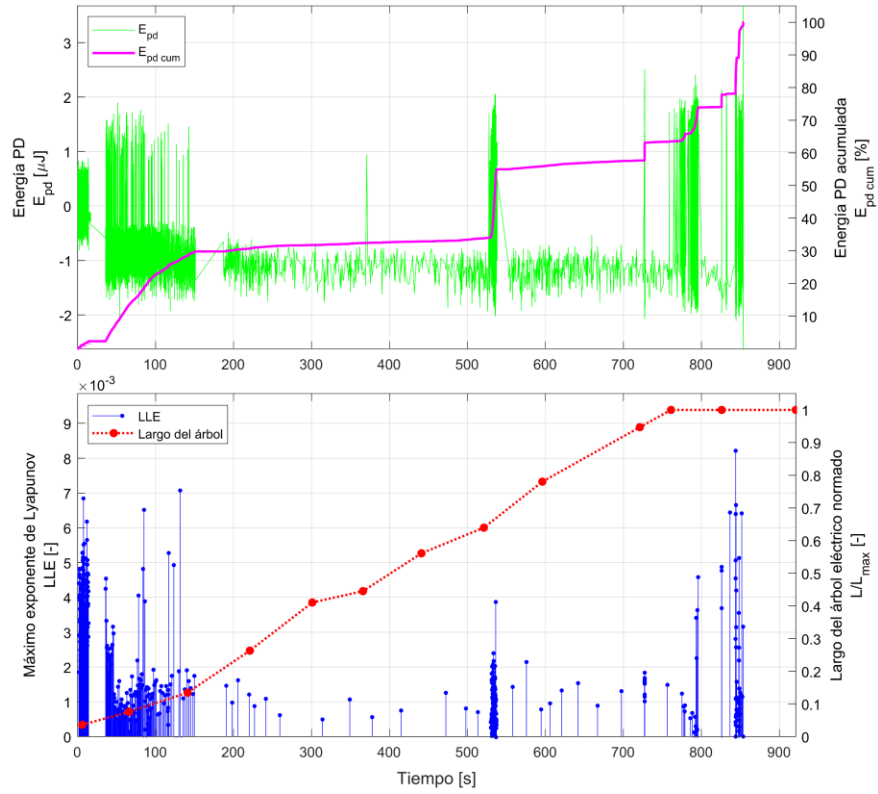


(b) Probeta P52

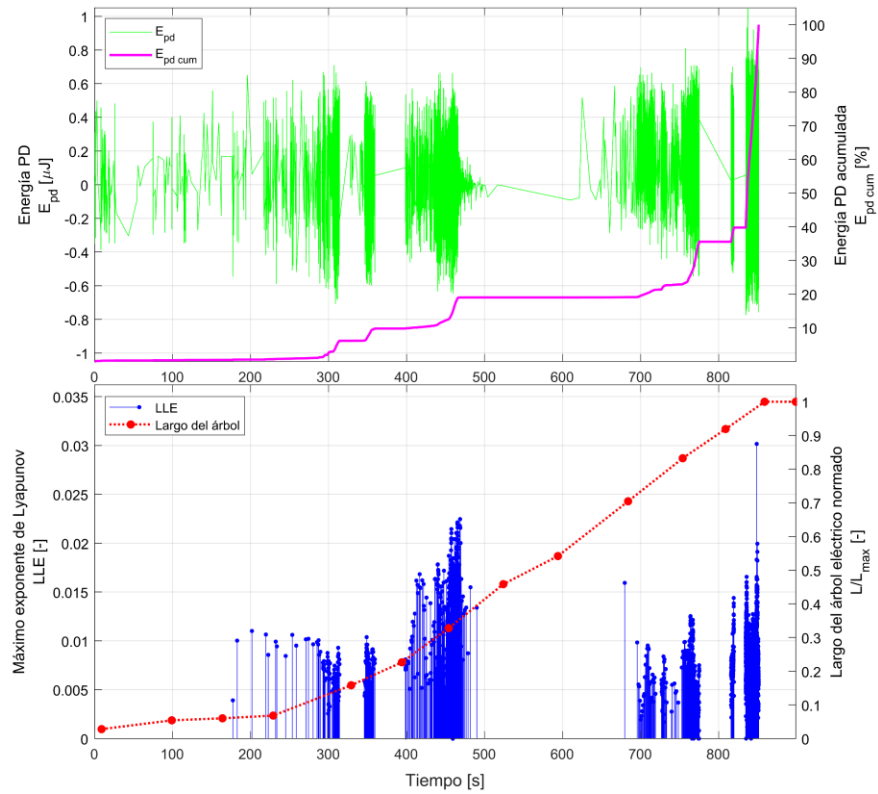
Figura 4.12: Resultados gráficos a 10 [kV] y 550 [Hz].

4.1.12 Ensayos a 14 [kV] y 550 [Hz]

Al aumentar la magnitud de tensión a 14 [kV] como se muestra en la **Figura 4.13**, nuevamente aparecen los tres tramos característicos que relaciona el incremento en la curva de TCE con mayor magnitud y cantidad de puntos en el LLE. Como en la mayoría de los ensayos se cumple la relación entre el aumento a una mayor proporción en la curva de energía acumulada, se tiene como resultado que la magnitud del exponente de Lyapunov sea mayor. Esto se explica porque en los instantes de crecida en la TCE, hay mayor actividad de DP que generan una mayor disipación de energía, las que son de forma caótica dada la naturaleza de este fenómeno para su iniciación. En este caso se vuelve a tener la particularidad que el tercer tramo comienza con bastante antelación al tiempo que se llega al largo máximo. Cabe resaltar que a 0.4 [–] del largo normalizado del árbol comienzan a surgir los puntos en el LLE.



(a) Probeta P44



(b) Probeta P51

Figura 4.13: Resultados gráficos a 14 [kV] y 550 [Hz].

4.2 Evaluación y comparación de la metodología propuesta con los modelos clásicos (diagramas PRPD y PSA)

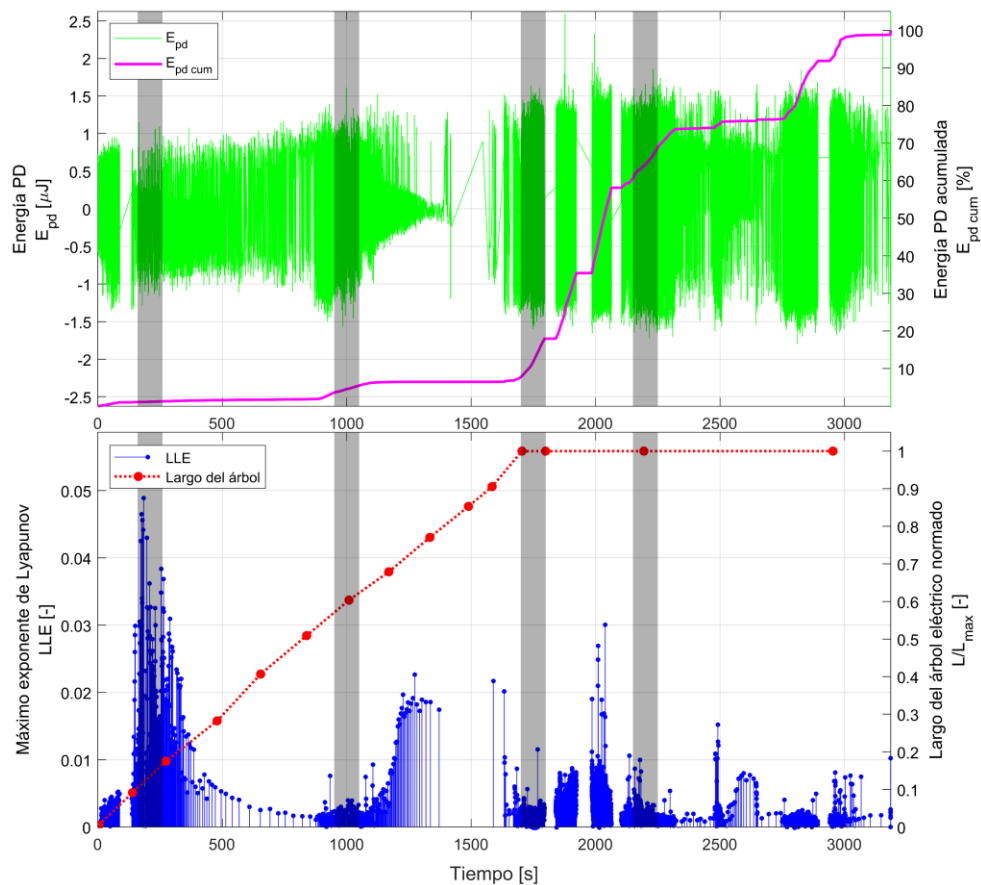
En esta sección se presenta la evaluación y comparación en la metodología propuesta en este trabajo con las técnicas clásicas utilizadas, siendo estas los diagramas PRPD y PSA explicadas en detalle en la sección 2.3. Se genera una nueva base de datos para este propósito, además de poner a prueba la metodología propuesta en este trabajo y comparándola con las técnicas mencionadas anteriormente. Se ensaya en probetas sometidas a frecuencias que van de 50 [Hz], 150 [Hz], 350 [Hz] y 550 [Hz] y todas a una tensión de 12 [kV]. Los gráficos mostrados se componen de las mismas curvas mostradas en la sección 4.1, sin embargo, se añade una franja distintiva de color gris en los tramos seleccionados, para realizar dicha evaluación y comparación. Los diagramas PRPD y PSA se obtienen con los datos pertenecientes en cada franja que fue definida, las que se muestran en detalle en la **Tabla 3.3** y **Tabla 3.4**.

4.2.1 Evaluación y comparación a 12 [kV] y 50 [Hz]

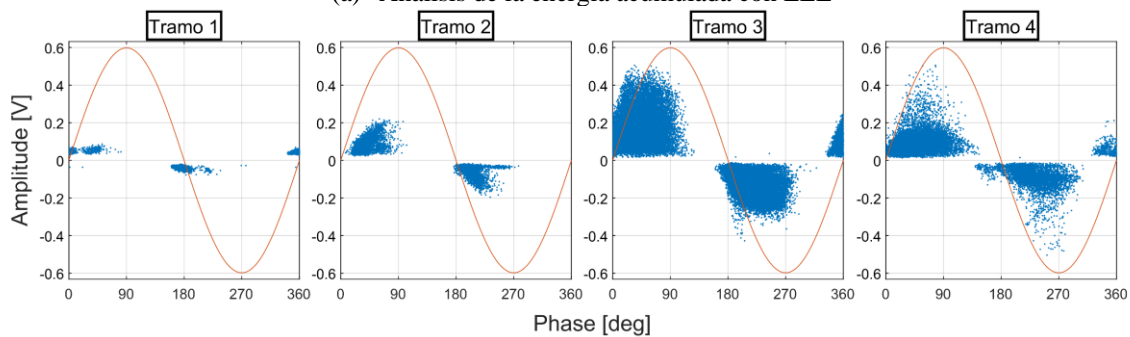
Al observar los diagramas PRPD y PSA de ambas probetas, el comportamiento es el esperado en descargas del tipo internas. Poseen una alta concentración de DP en el semiciclo positivo como negativo, las cuales siguen el mismo signo y forma de la señal sinusoidal representativa del diagrama. También se tiene que la magnitud de las DP es de mayor valor cuando se va aproximando al largo máximo de árbol eléctrico. Al comparar con la curva LLE en la probeta P25 con los diagramas PRPD, se observa una relación entre el comportamiento de ambas magnitudes a lo largo del tiempo, aumentando o disminuyendo a igual secciones analizadas. Al segmentar en los tres tramos característicos, el primero posee un incremento en la magnitud del exponente, al mismo tiempo es semejante al aumento en la magnitud y dispersión de los puntos en el diagrama resuelto en fase, habiendo una clara relación entre ambas variables. En el segundo tramo característico de la curva LLE disminuye su intensidad, al igual que la magnitud del PRPD siendo mostrada en los tramos 2 y 3, además, los datos son más concentrados. Por último, el tercer y último tramo característico se hace más evidente la relación entre ambos parámetros, donde incrementa considerablemente el valor del exponente y al mismo tiempo lo realiza tanto la magnitud como dispersión en el diagrama PRPD. Esto evidencia una clara relación entre la naturaleza caótica y estocástica en el proceso de iniciación de las descargas por medio del análisis a su curva TCE, habiendo un aumento del parámetro LLE y la mayor dispersión en el diagrama PRPD. En cuanto a la probeta P24 no se cumple con lo anterior, puesto que los tres tramos característicos no son visibles tan claramente.

En los diagramas PSA se disponen en ambas probetas una mínima diferencia en su disposición, con siete zonas bien concentradas, las que son esperadas en descargas del tipo internas. Cabe mencionar que la agrupación central es básicamente ruido que no fue filtrado. Al igual que en el diagrama PRPD, también se establece una relación entre la magnitud de la

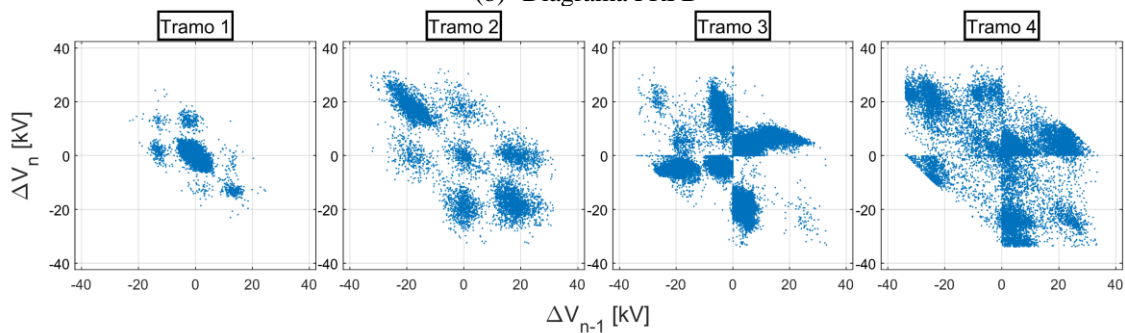
curva del máximo exponente de Lyapunov y la dispersión de los grupos del diagrama de secuencia de pulsos que se obtengan de cada tramo. En la probeta P25 se aprecia lo mencionado en el párrafo anterior, el primer tramo característico del LLE hay un aumento de magnitud y asimismo en el diagrama PSA del tramo 1 con mayor dispersión. El segundo intervalo característicos del exponente decrece en magnitud, como también la dispersión de los grupos del PSA graficados en los tramos 2-3. Por último, el tercer tramo característico del LLE presenta un incremento considerable alrededor del largo máximo, igualmente se representa con una elevada dispersión de los grupos, casi indistinguibles en el diagrama PSA obtenido a partir del tramo 4. Nuevamente en la probeta P24 no se cumple con lo mencionado previamente de forma clara.



(a) Análisis de la energía acumulada con LLE

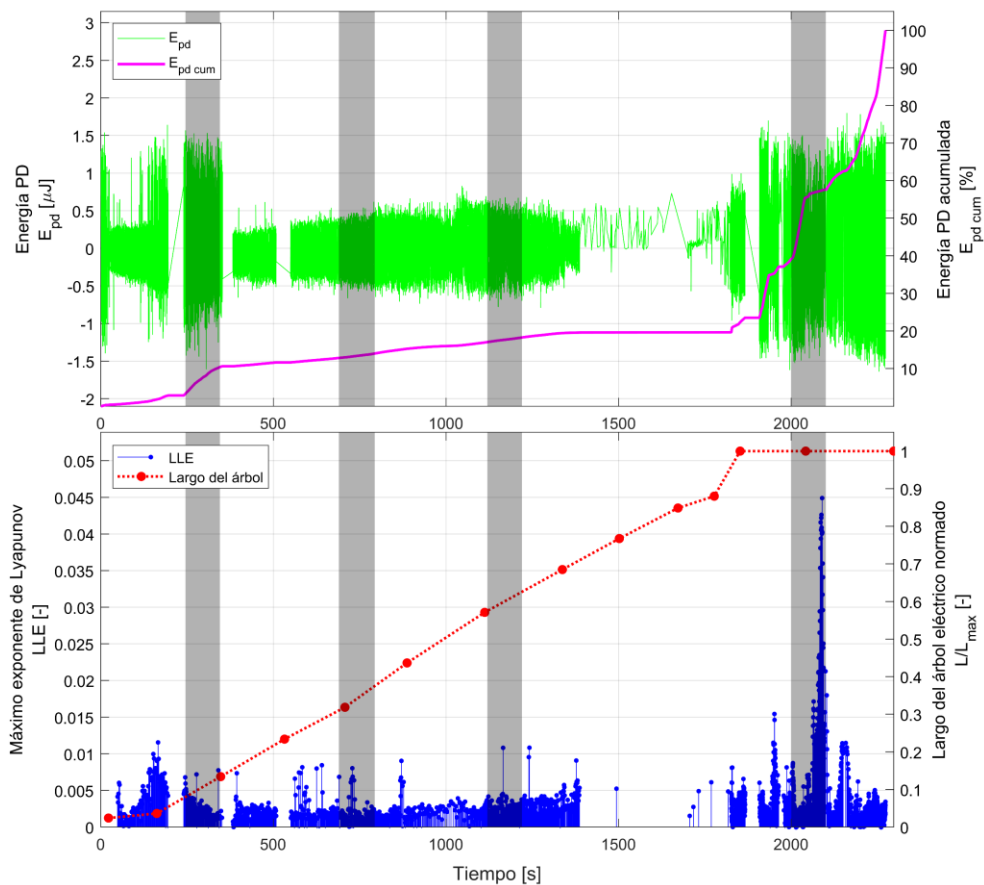


(b) Diagrama PRPD

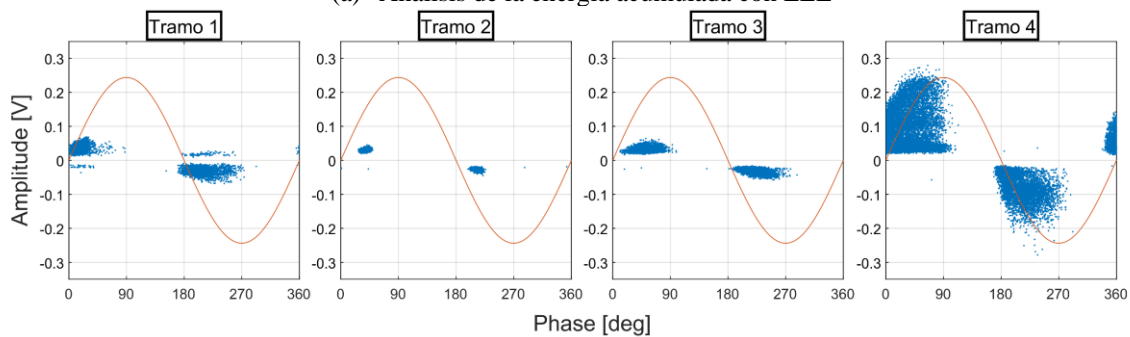


(c) Diagrama PSA

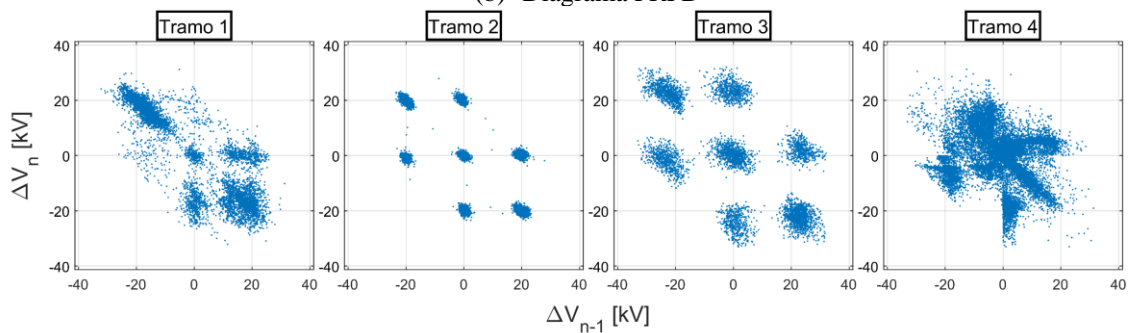
Figura 4.14: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] en probeta P24.



(a) Análisis de la energía acumulada con LLE



(b) Diagrama PRPD



(c) Diagrama PSA

Figura 4.15: Resultados gráficos a 12 [kV] y 50 [Hz] en probeta P25.

4.2.2 Evaluación y comparación a 12 [kV] y 150 [Hz]

En los diagramas PRPD en ambas probetas se obtiene el comportamiento esperado al desarrollarse descargas de tipo internas. Estas son con una gran concentración de puntos tanto en el semiciclo positivo como negativo, las cuales van siguiendo el mismo signo y forma de la señal sinusoidal representativa del diagrama.

En cuanto a los diagramas PSA presentan en ambas probetas mínimas diferencias, contando con las siete zonas altamente concentradas y que son propias en DP de tipo internas. Cabe mencionar que el conjunto central de puntos es básicamente mediciones de ruido que no fueron capaces de filtrarse.

En este caso, también se establece una relación entre la magnitud del LLE, obtenida de los puntos en la curva TCE con el nivel de dispersión aleatoria en los datos en los diagramas PRPD y la dispersión de los grupos obtenidos del diagrama PSA. El máximo exponente de Lyapunov representa la naturaleza caótica en la iniciación de las descargas, representada en el incremento de la función de energía acumulada, descritas en tres tramos característicos. En ambas probetas se aprecia, tanto en el PRPD y PSA una relación entre la mayor dispersión en los datos en el tramo 1, con el incremento en la magnitud en el LLE del primer tramo. En los tramos 2-3 para la probeta P26 y el tramo 2 en la P27, decrece la dispersión en los diagramas clásicos al igual que la intensidad en la curva del exponente. Finalmente, el tercer tramo característico del LLE presenta un alza en la magnitud a la altura del largo máximo, como también en los diagramas PRPD y PSA en el tramo 4 para la probeta P26 y tramo 3-4 en la P27. Dichos tramos poseen una mayor dispersión en los datos y los grupos respectivamente. Esto evidencia una clara relación entre la naturaleza caótica y estocástica en el proceso de iniciación de las descargas, por medio del análisis a su curva TCE y representada con el aumento del parámetro LLE, asimismo la mayor dispersión en los datos del semiciclo positivo como negativo, respecto al diagrama PRPD y los grupos formados en el diagrama PSA.

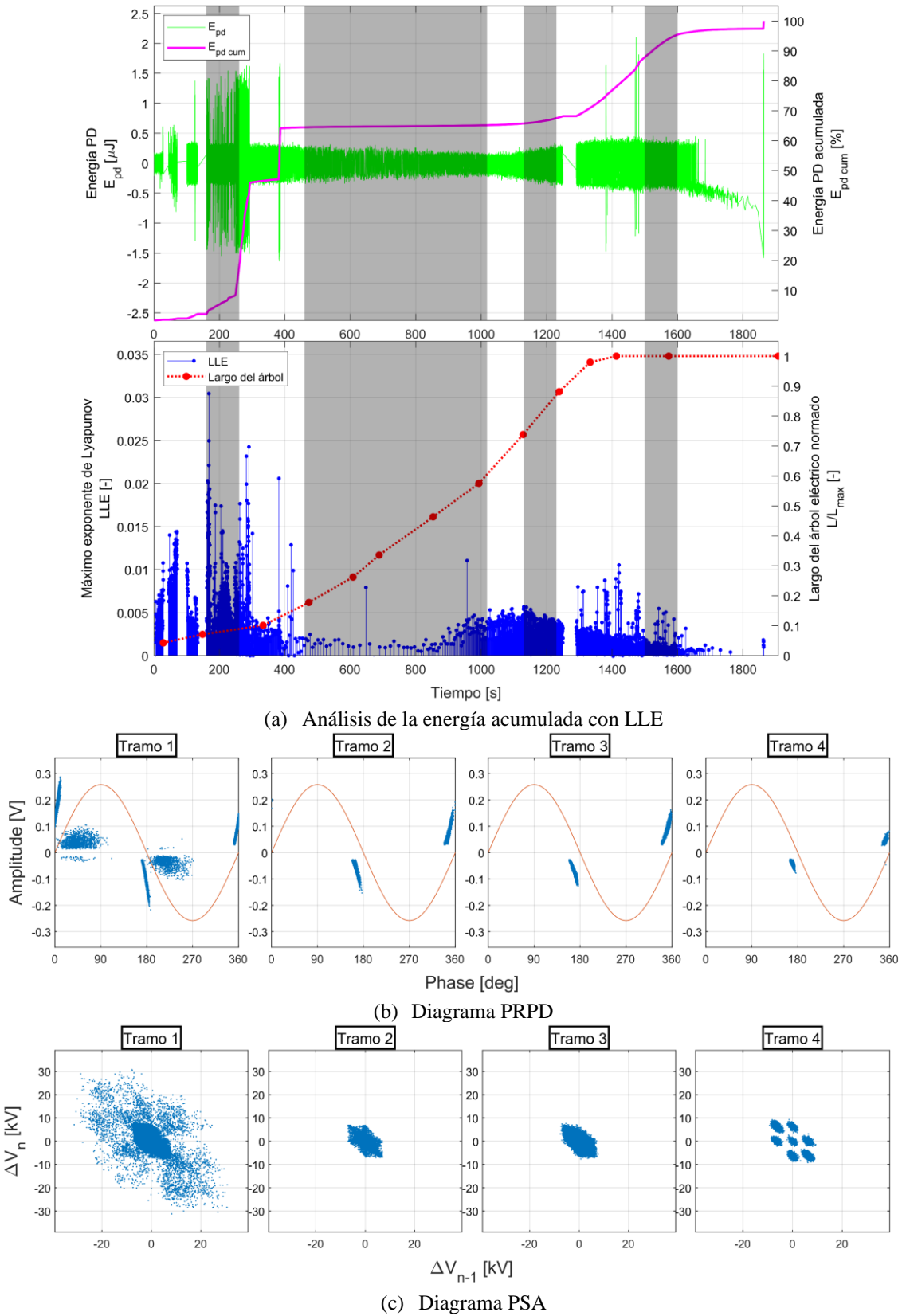


Figura 4.16: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz] en probeta P26.

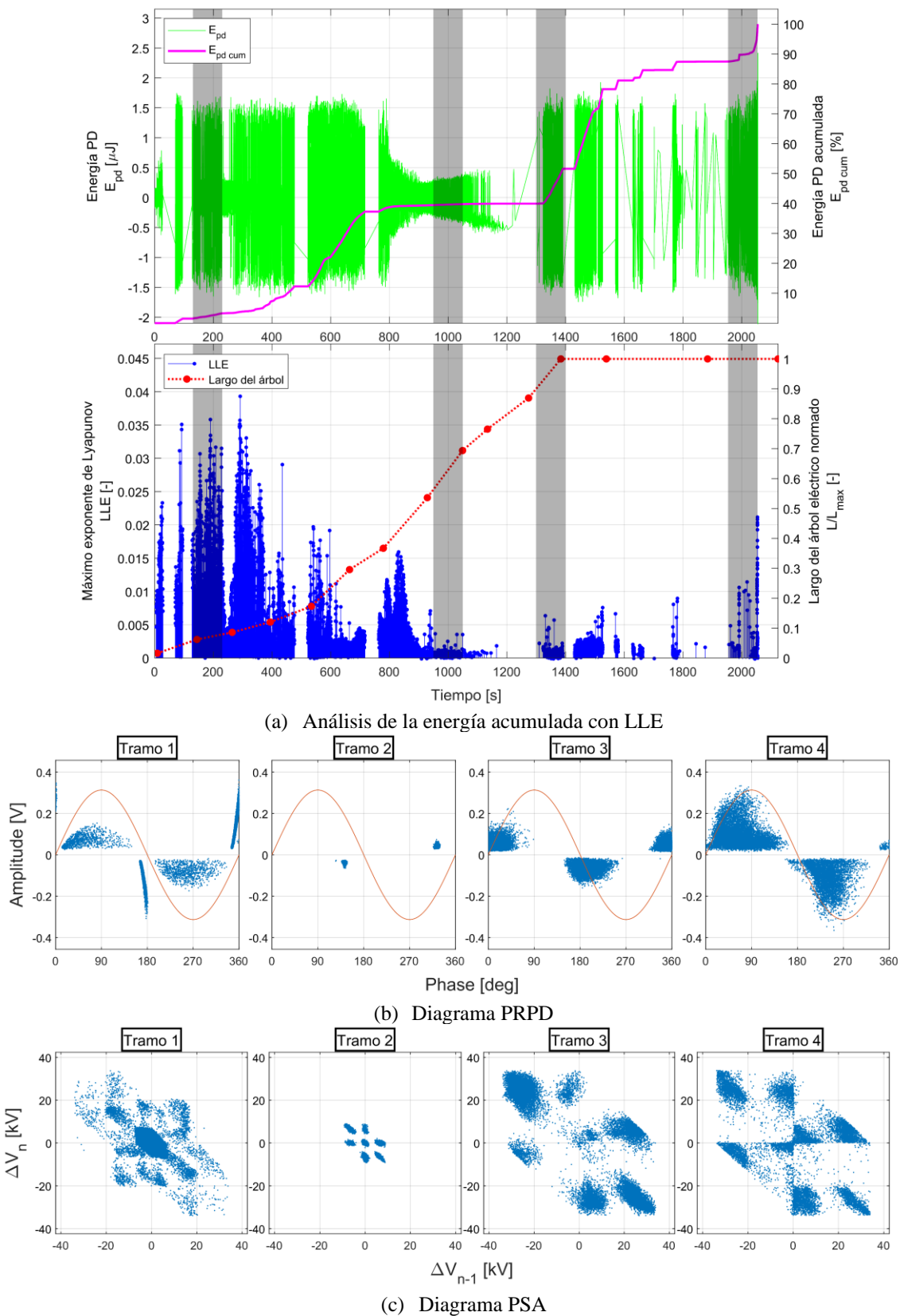


Figura 4.17: Resultados gráficos a 12 [kV] y 150 [Hz] en probeta P27.

4.2.3 Evaluación y comparación a 12 [kV] y 350 [Hz]

En los diagramas PRPD en ambas probetas se obtiene el comportamiento esperado al desarrollarse descargas de tipo internas. Estas son con una gran concentración de puntos tanto en el semiciclo positivo como negativo, las cuales van siguiendo el mismo signo y forma de la señal sinusoidal representativa del diagrama.

En cuanto a los diagramas PSA se tienen en ambas probetas mínimas diferencias, contando con las siete zonas altamente concentradas y que son propias en DP de tipo internas. Cabe mencionar que el conjunto central de puntos es básicamente mediciones de ruido que no fueron capaces de filtrarse.

Al igual que en los dos casos anteriores, se establece una relación entre la magnitud del LLE, obtenida de los puntos en la curva TCE con el nivel de dispersión aleatoria en los datos en los diagramas PRPD y la dispersión de los grupos obtenidos del diagrama PSA. En ambas probetas se aprecia, tanto en el PRPD y PSA una relación entre la mayor dispersión en los datos en el tramo 1-2-3 para la probeta P28 y los tramos 1-2 en la probeta P30, con el incremento en la magnitud en el LLE del primer tramo característico. En la probeta P28 no hay actividad en el segundo tramo del exponente y en el tramo 3 para la probeta P30, decrece la dispersión en los diagramas clásicos con periodos muy concentrados de DP, al igual que la intensidad en la curva del exponente. Finalmente, el tercer tramo característico del LLE presenta un alza en la magnitud a la altura del largo máximo, como también en los diagramas PRPD y PSA en el tramo 4 para la probeta P28, con un aumento evidente en la dispersión de ambos diagramas. En cuanto a la probeta P30 no se presenta un incremento cuantioso en la dispersión de los datos en el PRPD y los grupos del PSA, sin embargo, ninguno de los cuatros tramos alcanza la zona del largo máximo, dado que en dicha zona no cumplen con las condiciones impuestas para los tramos definidos dentro del análisis.

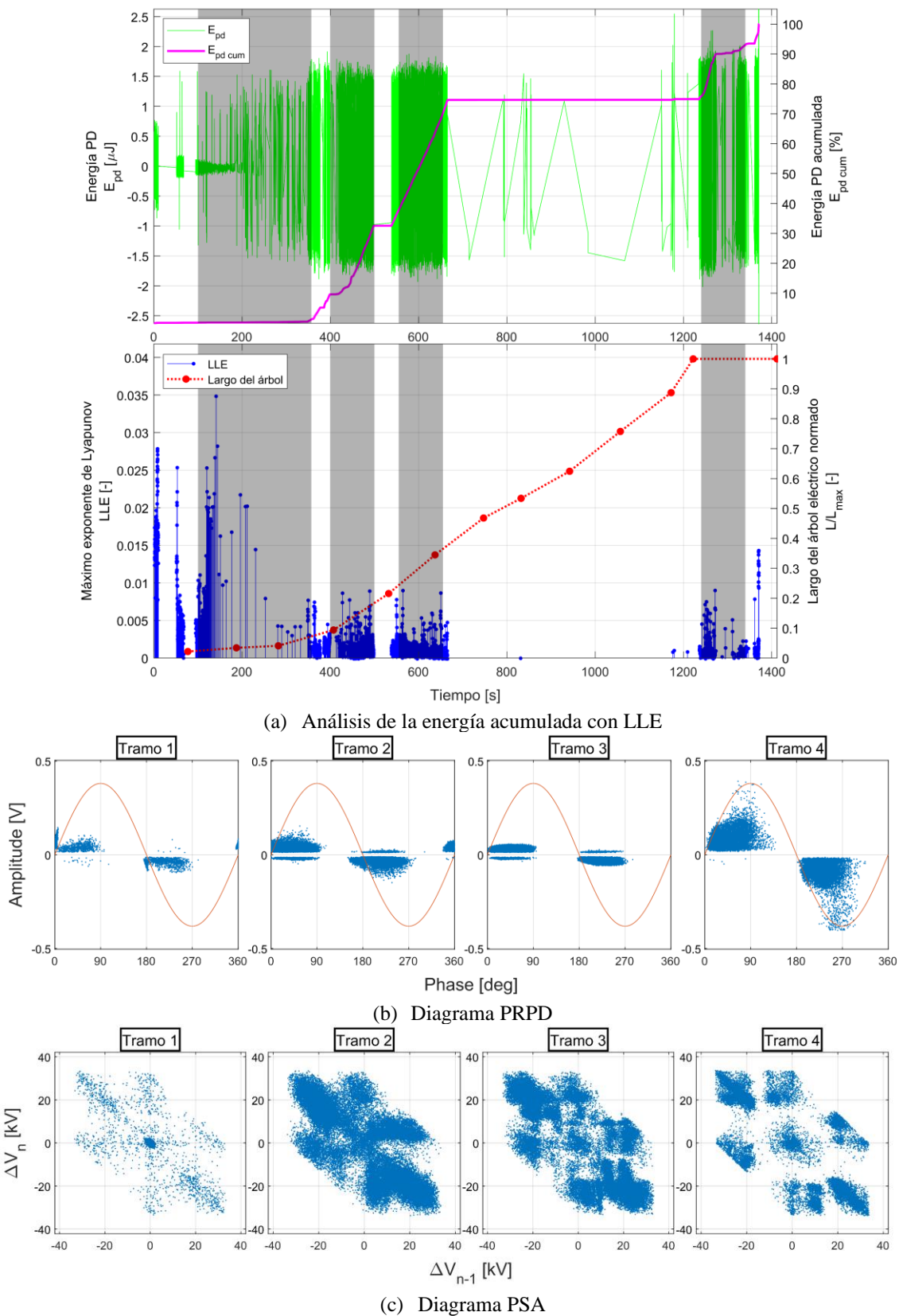
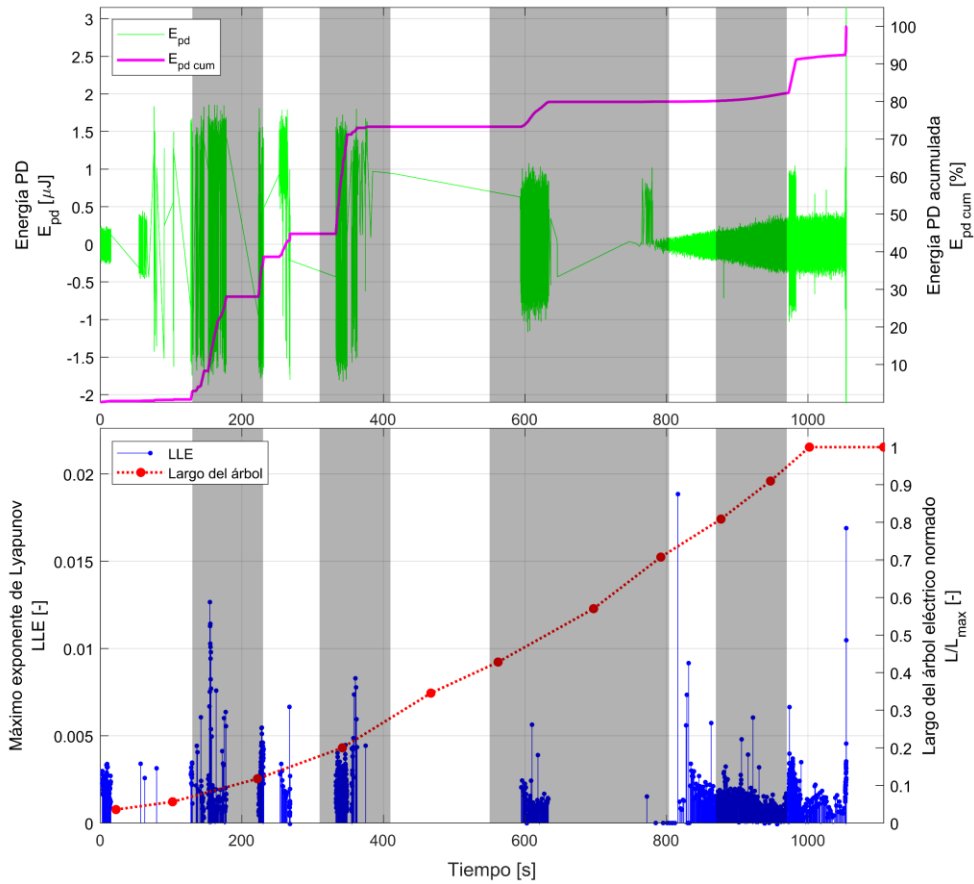
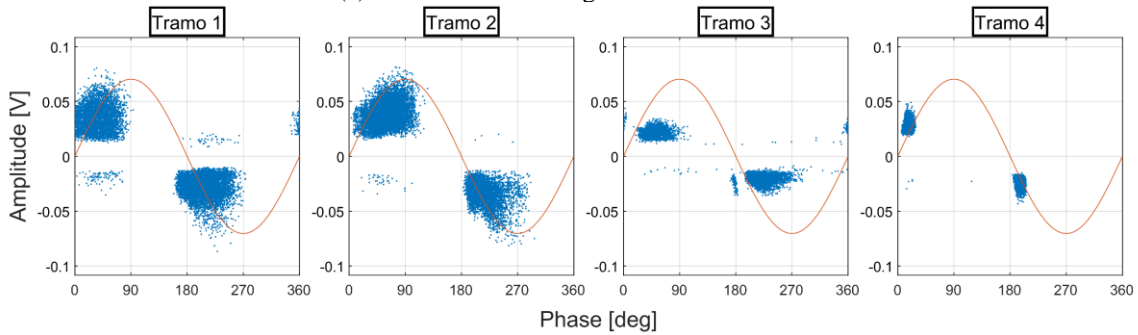


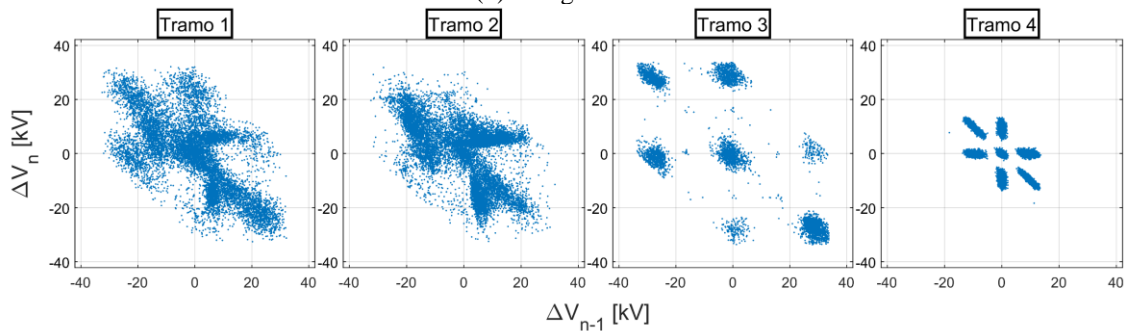
Figura 4.18: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz] en probeta P28.



(a) Análisis de la energía acumulada con LLE



(b) Diagrama PRPD



(c) Diagrama PSA

Figura 4.19: Resultados gráficos a 12 [kV] y 350 [Hz] en probeta P30.

4.2.4 Evaluación y comparación a 12 [kV] y 550 [Hz]

En los diagramas PRPD en ambas probetas se obtiene el comportamiento esperado al desarrollarse descargas de tipo internas. Estas son con una gran concentración de puntos tanto en el semiciclo positivo como negativo, las cuales van siguiendo el mismo signo y forma de la señal sinusoidal representativa del diagrama.

En cuanto a los diagramas PSA se tienen en ambas probetas mínimas diferencias, contando con las siete zonas altamente concentradas y que son propias en DP de tipo internas. Cabe mencionar que el conjunto central de puntos es básicamente mediciones de ruido que no fueron capaces de filtrarse.

Del mismo modo que los casos a 50 [Hz], 150 [Hz] y 350 [Hz], se establece una relación entre la magnitud del LLE, obtenida de los puntos en la curva TCE con el nivel de dispersión aleatoria en los datos en los diagramas PRPD y la dispersión de los grupos obtenidos del diagrama PSA. En las probetas P32 y P33 se aprecia que tanto en el PRPD y PSA una relación entre la mayor dispersión en los datos en el tramo 1-2, con el incremento en la magnitud en el LLE del primer tramo característico. En la probeta P32 no hay actividad en el segundo tramo descrito del exponente y en el tramo 3 para la probeta P33, decrece la dispersión en los diagramas clásicos, al igual la intensidad en la curva del exponente. Finalmente, el tercer tramo característico del LLE presenta un alza en la magnitud a la altura del largo máximo, como también en los diagramas PRPD y PSA en el tramo 3-4 para la probeta P32 y en el tramo 4 para la probeta P33, con mayor dispersión en los datos y los grupos respectivamente. Nuevamente se evidencia una clara relación entre la naturaleza caótica y estocástica en el proceso de iniciación de las descargas, por medio del análisis a su curva TCE con el aumento del parámetro LLE y la mayor dispersión en los datos del semiciclo positivo como negativo, respecto al diagrama PRPD y los grupos formados en el diagrama PSA.

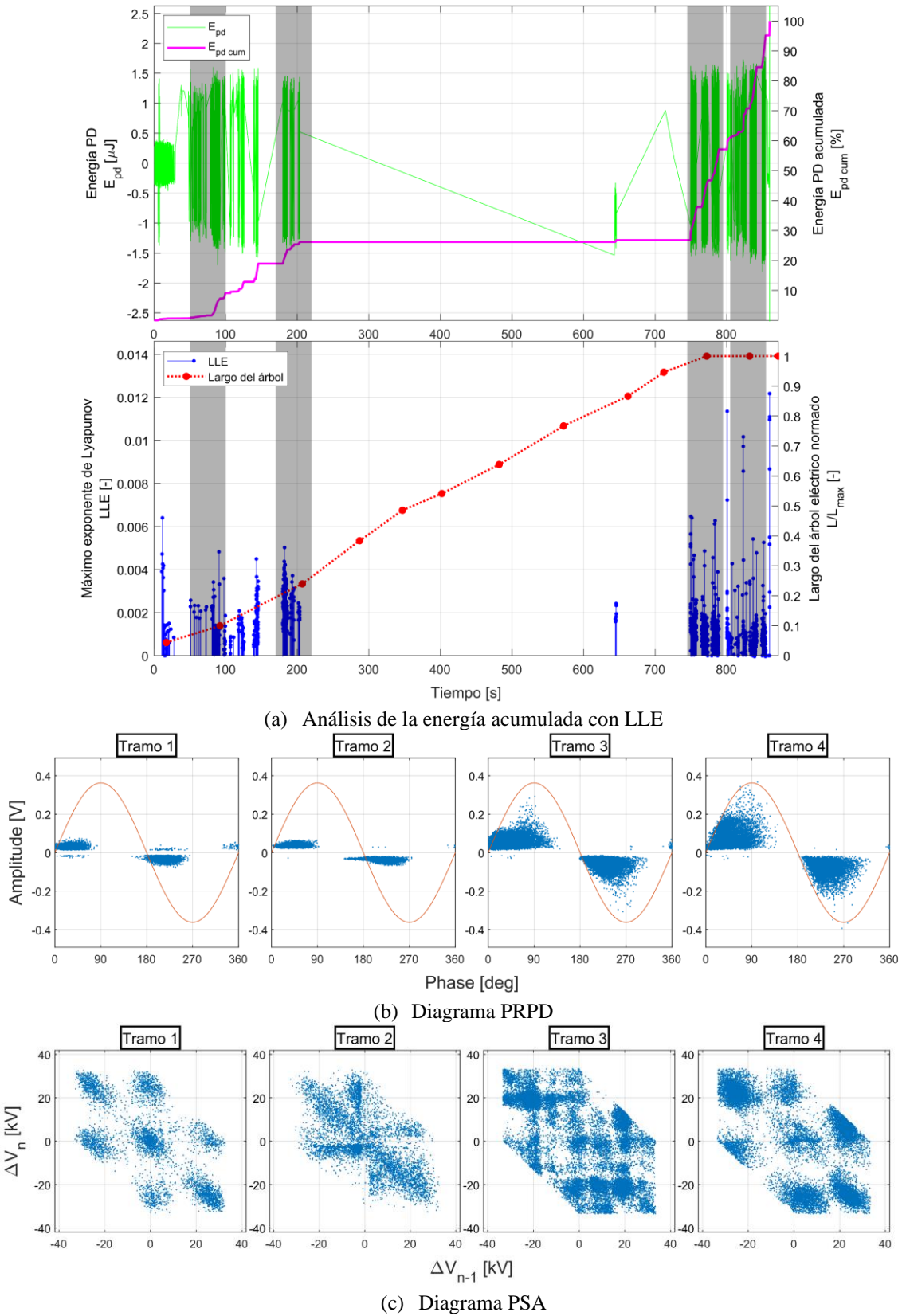


Figura 4.20: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz] en probeta P32.

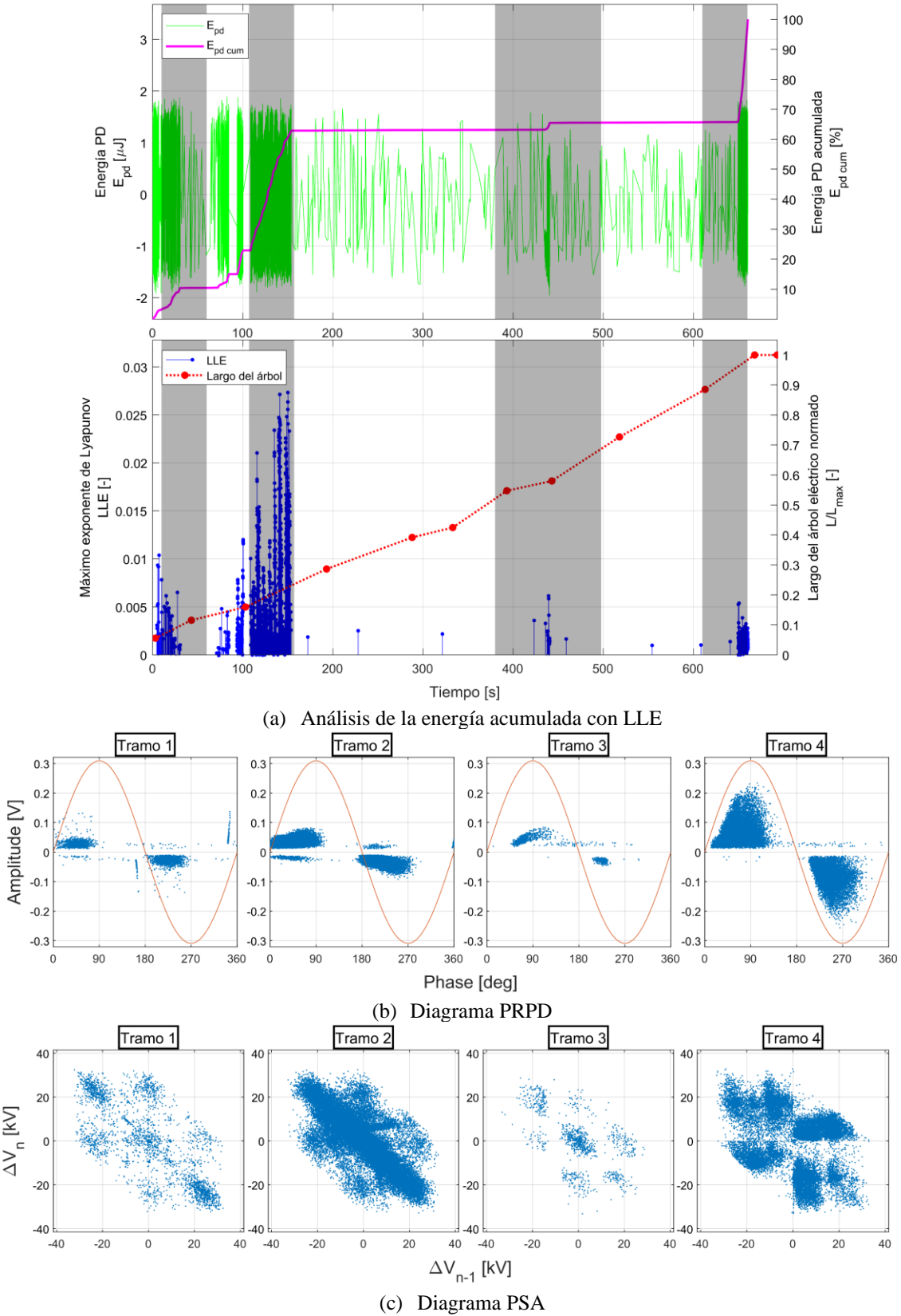


Figura 4.21: Resultados gráficos a 12 [kV] y 550 [Hz] en probeta P33.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos

futuros

En este capítulo se entregan las conclusiones obtenidas de este trabajo, a partir de la metodología propuesta en el análisis del crecimiento de árboles eléctricos generadas en las descargas parciales. También se menciona posibles trabajos futuros que pueden ser abordados a partir de este trabajo.

5.1 Conclusiones

En este trabajo se elabora un análisis de la energía electrostática generadas en las descargas parciales, dentro del fenómeno de crecimiento de árboles eléctricos en probetas de resina epóxica. Estas probetas fueron sometidas a valores de tensión que van de 10, 12 y 14 [kV] y frecuencias de 50, 150, 350 y 550 [Hz], cuyos datos fueron registrados con un osciloscopio avanzado. Los datos registrados fueron filtrados por medio de separación de diferentes fuentes a través de mapas SF y analizados con la técnica matemática del máximo exponente de Lyapunov (LLE). Esta entrega información de la naturaleza caótica de una serie de datos por medio de su magnitud, relacionando los factores que inciden en la generación de las DP. Se utilizó la función de energía acumulada (TCE) en vez de la energía electrostática directamente, dado que entrega una mayor cantidad de información al momento de realizar el análisis con la técnica de LLE. Por último, la metodología propuesta es comparada de manera cualitativa con métodos clásicos de análisis de DP, siendo los diagramas PRPD y PSA, evaluando posteriormente su desempeño.

En primer lugar, se puede establecer una relación entre la razón de crecimiento que tenga en el tiempo la función de energía acumulada con la magnitud que se obtenga del máximo exponente de Lyapunov en los mismos periodos. Esto se explica porque en los instantes de aumento en la TCE, hay mayor actividad de DP que se están produciendo, las que son de forma caótica dada la naturaleza de este fenómeno en su formación.

A través de las gráficas obtenidas de LLE para la TCE de las descargas, se aprecia un comportamiento representativo que se conforma de tres tramos particulares. Un primer

periodo que presenta un aumento en la actividad en las descargas, provocando un incremento en la curva TCE, lo que igualmente se genera un incremento en el valor del LLE, con uno o más valores peak característico en este primer tramo. Luego hay un segundo tramo de escasa actividad en comparación al periodo anterior, llegando a ser nula la cantidad de DP en algunos ensayos. Esto se ve reflejado con un descenso en la magnitud y densidad que se registra en la gráfica del LLE en dicho tramo. En cuanto al tercer periodo característico se reactiva la actividad de las DP, provocando el alza en la curva de la función de energía acumulada, siendo reflejada en el incremento en la magnitud y densidad del LLE. Esto ocurre próximos al largo máximo del árbol eléctrico (representado con el valor 1 en la curva) que se generó en la probeta, siendo representada con una mayor densidad y magnitud en los puntos del LLE, con uno o varios valores peak en el que generalmente son mayores a los obtenidos del primer tramo. En este último intervalo al tener mayores valores en magnitud del exponente de Lyapunov, se da a entender que la ocurrencia de las descargas poseen una mayor naturaleza caótica que los dos tramos predecesores. Esto último, puede ser aplicado como un indicativo de que tan próximos se encuentra de la ruptura del dieléctrico y posterior falla catastrófica, siendo recurrente en todos los ensayos.

En varios casos se tuvo que a medida que se aumenta la magnitud de tensión aplicada a igual frecuencia, hay una caída considerable en la densidad de puntos en la variable LLE. Esto se nota principalmente en los tramos con actividad (primer y tercer tramo), desarrollando principalmente con peak bien definidos durante la medición de las descargas. Esto se le adjudica a una mayor concentración en la generación de DP en los lapsos donde se está cercano al peak de tensión (tanto en subida como en bajada de la señal), ya que en este periodo se produce la ruptura dieléctrica de la probeta por la mayor magnitud de tensión solicitante.

Se aprecia que en la mayoría de los casos analizados a una menor tensión aplicada e igual frecuencia, se tiende acrecentar el tercer tramo característico en la curva del máximo exponente de Lyapunov en comparación a los dos tramos anteriores. Esto tiene sentido puesto que estos ensayos toman más tiempo en llegar a la falla catastrófica, dada la menor tensión.

Al ser comparado de forma cualitativa con los métodos clásicos mayormente utilizados, los cuales son los diagramas PRPD y PSA se obtiene una correlación entre ellos. La relación se establece entre la magnitud del LLE, obtenida de los puntos en la curva TCE con el nivel de dispersión aleatoria en los datos graficados en el diagrama PRPD y la dispersión de los grupos generados en el diagrama PSA, a partir de descargas parciales del tipo internas. Esto evidencia una clara relación entre la naturaleza caótica y estocástica en proceso de iniciación de las DP por medio del análisis a su curva TCE, con el aumento del parámetro LLE y la mayor dispersión en los datos del semiciclo positivo como negativo respecto al diagrama PRPD, al igual que en los grupos formados en el diagrama PSA.

Para finalizar, la metodología propuesta posee un correcto desempeño a la hora de hacer una descripción del crecimiento del árbol eléctricos, dada la utilización de la variable del máximo exponente de Lyapunov en la curva TCE. Anteriormente mencionado, se establecen tres tramos característicos a lo largo de los ensayos registrados, que en resumen se describen como de alta disipación de energía electrostática por el visible aumento en la curva TCE (alta actividad de DP) en el primero, provocando incremento en el valor del LLE con uno o varios peak distintivos. Siguiendo de un segundo tramo de escasa a nula actividad apreciable, reflejándose en un descenso en la magnitud y densidad en la gráfica del exponente. Luego un tercer tramo que se reactiva la actividad representada con el aumento de la curva TCE y a la vez un alza en la magnitud y densidad de la curva LLE. Asimismo, con mayor fuerza que en el primero dado que los peak obtenidos son de un mayor valor. Esto último da a entender que la ocurrencia de las descargas en dicho tramo posee una mayor naturaleza caótica que los dos predecesores, lo que indica que la medición de la dinámica caótica en la iniciación de las descargas por medio del Máximo Exponente de Lyapunov es una variable funcional en la descripción de crecimiento de los árboles eléctricos. Además, una particularidad en este último tramo es que el aumento señalado de la curva LLE inicia en instantes próximos del largo máximo del árbol eléctrico (caracterizado por el valor unitario de esta variable). Esto es un claro indicativo que se está próximo a la ruptura del dieléctricos y posterior falla catastrófica, pudiéndose aplicar con un predictor en fallas de componentes dieléctricos. Al momento de ser compradas el LLE con los métodos clásicos PRPD y PSA se establece una correlación entre sus comportamientos, principalmente entre la dispersión aleatoria en los datos graficados en el diagrama PRPD y la dispersión de los grupos generados en el diagrama PSA con el valor obtenido en la magnitud del LLE por la naturaleza caótica y estocástica en proceso de iniciación de las DP. Dado esto se puede afirmar que la metodología propuesta en este trabajo es una mejor técnica de descripción y monitoreo del proceso de crecimiento del árbol eléctrico, además de entregar un punto indicativo en la proximidad a la ruptura en una única gráfica, mientras que las metodologías clásicas no poseen esta cualidad y se les dificulta realizar una descripción continua, sino más bien de identificar las diferentes fuentes como dice la literatura en general, donde a lo más se puede realizar gráficas en diferentes instantes para generar una descripción del fenómeno, siendo esta de manera discreta en el tiempo.

5.2 Trabajos futuros

- Ampliar la base de datos con una mayor cantidad de probetas que sean ensayadas. Asimismo, considerar en los ensayos más valores de amplitud de tensión como de frecuencia aplicada, con énfasis en mediciones a VLF, las cuales no fueron consideradas, pudiendo entregar más información o reafirmar lo que se obtuvo en este trabajo. Esto ayudara a tener una mayor confiabilidad en el análisis y posteriores conclusiones obtenidas.
- Realizar mejoras en la técnica de filtrado en los datos para su posterior análisis, lo cual es de suma importancia a la hora de la veracidad en los resultados obtenidos. El ruido es un factor crucial en las mediciones dado que puede limitar o llevar a conclusiones erróneas.
- Considerar nuevas metodologías en el cálculo de la energía generadas en la DP. Si bien en este trabajo se obtienen de una manera correcta, hay ciertas consideraciones que llevan a una aproximación en la energía real disipadas en las descargas. Realizar un cálculo más preciso en el valor puede mejorar la información extraídas de la metodología aplicada, lo que puede conducir a nuevas aplicaciones del uso del Máximo Exponente de Lyapunov o reafirmar las conclusiones obtenidas de este trabajo en el crecimiento de árboles eléctricos.
- Mejorar la técnica aplicada en el cálculo de LLE, dado que en este trabajo se utilizó un cálculo aproximado para esta variable. Esto puede contribuir en un perfeccionamiento de las conclusiones extraídas a partir de esta variable. En el área del análisis de las series de tiempo no lineales, en particular con la variable del máximo exponente de Lyapunov que se utilizó en este trabajo, hay una infinidad de métodos y fórmulas que aun hoy en día siguen desarrollándose para obtener dicho valor.

Referencias

- [1] Y. Zhou, S. Peng, J. Hu, and J. He, “Polymeric insulation materials for HVDC cables: Development, challenges and future perspective,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 3, pp. 1308–1318, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006205.
- [2] IEC 60270, “High-voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements,” *International Standard*, vol. 3.0, 2015.
- [3] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals, Second Edition*, vol. 1, no. c. Butterworth-Heinemann, 2000. doi: 10.1016/B978-075063634-6/50010-1.
- [4] I. Idrissu and S. M. Rowland, “The impact of harmonic frequencies on electrical tree growth in epoxy resin,” *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, pp. 753–756, 2017, doi: 10.1109/CEIDP.2017.8257504.
- [5] Y. Zhang, Y. Zhou, L. Zhang, Z. Zhou, and Q. Nie, “Electrical trees and their growth in silicone rubber at various voltage frequencies,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020327.
- [6] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, “Classification of Partial Discharges,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 917–931, 1993, doi: 10.1109/14.249365.
- [7] R. Schurch, S. M. Rowland, and R. S. Bradley, “Partial discharge energy and electrical tree volume degraded in epoxy resin,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, Dec. 2015, vol. 2015-Decem, pp. 820–823. doi: 10.1109/CEIDP.2015.7352053.
- [8] L. A. Dissado and C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. 1962.
- [9] M. A. Brown, J. v. Champion, S. J. Dodd, and P. Mudge, “An investigation of partial discharge energy dissipation and electrical tree growth in an epoxy resin,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD 2004*, 2004, vol. 1, pp. 288–291. doi: 10.1109/icsd.2004.1350347.

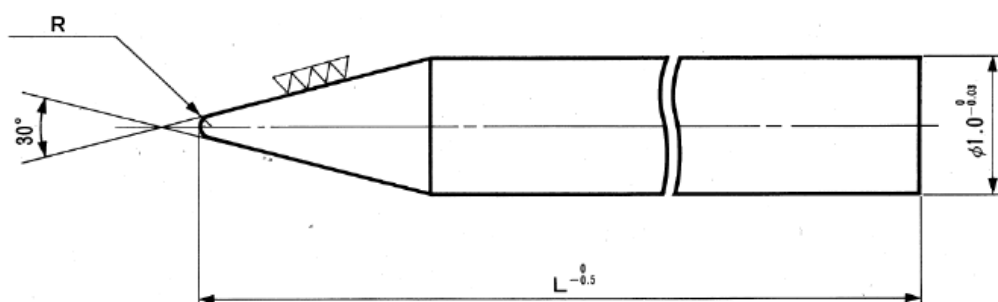
- [10] A. S. Deshpande, H. A. Mangalvedekar, and A. N. Cheeran, "Partial discharge analysis using energy patterns," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 184–195, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.
- [11] C. Heitz, "A GENERAL STOCHASTIC APPROACH TO PARTIAL DISCHARGE PROCESSES," 1998.
- [12] M. Hoof and R. Patsch, "Pulse-Sequence Analysis : a new method for investigating the physics of PD-induced ageing."
- [13] H. Illias, Teo Soon Yuan, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, and P. L. Lewin, "Partial discharge patterns in high voltage insulation," in *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power and Energy*, 2012, pp. 750–755. doi: 10.1109/PECon.2012.6450316.
- [14] R. Patsch and F. Berton, "Pulse Sequence Analysis-a diagnostic tool based on the physics behind partial discharges," 2002. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0022-3727/35/1/306>
- [15] N. H. Aziz, M. Catterson, S. M. Rowland, and S. Bahadoorsingh, "Analysis of Partial Discharge Features as Prognostic Indicators of Electrical Treeing," 2017.
- [16] S. Venkatesan, B. G. Stewart, M. D. Judd, A. J. Reid, and R. A. Fouracre, "Analysis of PD in voids using correlation plots of RF radiated energy and apparent charge," in *2007 International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, 2007, pp. 548–551. doi: 10.1109/ICSD.2007.4290872.
- [17] M. X. Zhu *et al.*, "Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 482–493, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005481.
- [18] M. X. Zhu *et al.*, "Self-adaptive separation of multiple partial discharge sources based on optimized feature extraction of cumulative energy function," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 246–258, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2016.005893.
- [19] M. X. Zhu *et al.*, "Discrimination of three or more partial discharge sources by multi-step clustering of cumulative energy features," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 149–159, 2019, doi: 10.1049/iet-smt.2018.5240.
- [20] J. L. Dinamarca, "Técnicas de Alta Tensión: Teoría y aplicaciones," Valparaíso, Chile, 2007.

- [21] R. Albarracín Sánchez, “Medida de descargas parciales en radiofrecuencia,” Leganés, España, 2014.
- [22] H. A. Haus and J. R. Melcher, “Electromagnetic Fields and Energy, (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare),” Prentice-Hall, p. 742, 1989.
- [23] E. N. Lorenz, “Deterministic Nonperiodic Flow,” *J Atmos Sci*, vol. 20, no. 2, pp. 130–141, Mar. 1963, doi: 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2.
- [24] F. Takens, “Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In D. Rand & L.-S. Young (Eds.), *Dynamical systems and turbulence*, Warwick 1980. Lecture notes in mathematics (pp. 366–381). Springer.,” *Springer*, no. 10.1007/BFb0091924, 1981, doi: 10.1007/bfb0091924.
- [25] H. Ma, X. Li, G. Wang, C. Han, J. Xu, and X. Zhu, “Selection of embedding dimension and delay time in phase space reconstruction,” *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi’an Jiaotong University*, vol. 38, no. 4, pp. 335–338, 2004, doi: 10.1007/s11460-005-0023-7.
- [26] P. Grassberger and I. Procaccia, “Measuring the strangeness of strange attractors,” *Physica D*, vol. 9, no. 1–2, pp. 189–208, 1983, doi: 10.1016/0167-2789(83)90298-1.
- [27] M. T. Rosenstein, J. J. Collins, and C. J. de Luca, “A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets,” *Physica D*, vol. 65, no. 1–2, pp. 117–134, 1993, doi: 10.1016/0167-2789(93)90009-P.
- [28] H. Kantz, “A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series,” *Phys Lett A*, vol. 185, no. 1, pp. 77–87, 1994, doi: 10.1016/0375-9601(94)90991-1.
- [29] H. Kantz and T. Schreiber, *Nonlinear Time Series Analysis*, Second Edi. Cambridge, 2004.
- [30] H. F. Liu, Z. H. Dai, W. F. Li, X. Gong, and Z. H. Yu, “Noise robust estimates of the largest Lyapunov exponent,” *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, vol. 341, no. 1–4, pp. 119–127, 2005, doi: 10.1016/j.physleta.2005.04.048.
- [31] M. Maureira Retamales, “Implementación de un banco de pruebas de laboratorio para el monitoreo del crecimiento de árboles eléctricos y sus descargas parciales asociadas a excitación de frecuencia industrial y VLF,” Valparaíso, Chile, 2017.

- [32] R. Schurch, O. Munoz, and J. Ardila-Rey, “Electrical tree growth under harmonic frequencies characterized by partial discharges waveforms,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, Oct. 2020, vol. 2020-October, pp. 168–171. doi: 10.1109/CEIDP49254.2020.9437511.

Anexo A

Detalles electrodo Ogura



No.	Tip SR (μ m)	Length (mm)	Part number
1	1-0/+1 μ m	50	X-253-16
2	3 ± 1 μ m	50	X-253-3
3		60	X-253-2
4	5 ± 1 μ m	50	X-253-1
5		60	X-253-4
6	10 ± 2.5 μ m	50	X-253-5
7		60	X-253-6
8	20 ± 2.5 μ m	50	X-253-7
9		60	X-253-8
10	40 ± 5 μ m	50	X-253-9
11		60	X-253-10
12	100 ± 10 μ m	50	X-253-11
13		60	X-253-12
14	200 ± 20 μ m	50	X-253-13
15		60	X-253-14
16	500 ± 20 μ m	50	X-297-1
17		60	X-297-2

Figura A.1: Geometría y sus dimensiones electrodo Ogura.