UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio del envejecimiento de descargadores de sobretensión en la región de máxima tensión de operación continua empleando una fuente de corriente de extra alta impedancia

Jorge Enrique Rodríguez Manrique

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2017

Estudio del envejecimiento de descargadores de sobretensión en la región de máxima tensión de operación continua empleando una fuente de corriente de extra alta impedancia

Jorge Enrique Rodríguez Manrique

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a):

Prof. Francisco José Román Campos, Ph. D.

Línea de Investigación:

Protección contra sobretensiones

Grupo de Investigación:

Grupo de Compatibilidad Electromagnética Universidad Nacional de Colombia. EMC-UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2017

Dedicatoria

… A aquel que nunca se ha cansado de amar aun cuando no sea amado. Al que no ha negado ni su propia vida, incluso por aquellos que lo rechazan.… A Jesús.

Agradecimientos

A Dios por hacer nuevas todas las cosas en mi vida y permitirme alcanzar este sueño.
A mis padres y hermanos por su amor y apoyo a lo largo de todo este caminar. A mi novia Anlly por su paciencia e incansable aliento en cada momento de mi trabajo.

Al Ingeniero Francisco Román por su orientación y acompañamiento durante todo el desarrollo de la investigación, su experiencia y aportes fueron importantes para encaminar todo el trabajo realizado. Al Ingeniero Carlos Rivera y al Grupo de Compatibilidad Electromagnética EMC-UN por la ayuda brindada para la construcción de los sistemas de medición y la realización de pruebas.

Al Laboratorio de Ensayo Eléctricos Industriales – LABE por su inmensa colaboración para el desarrollos de las pruebas y préstamo del Generador de Impulsos de Corriente GIC. Al Ingeniero Francisco Amórtegui por sus aportes a través de las discusiones técnicas que enriquecieron el aprendizaje.

A la Ingeniera Isabel Niño por su ayuda en el tratamiento y análisis de los datos obtenidos en las mediciones. Al ingeniero Jorge Alejandro Cristancho por su ayuda en el manejo de las referencias y herramientas de búsqueda.

Que sea esta la oportunidad de agradecer a todos aquellos que de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo de investigación y que he olvidado mencionar.

A todos muchas gracias.

Resumen

El envejecimiento en descargadores de sobretensión es un tema que actualmente se estudia. Este trabajo propone un método para estudiar en envejecimiento en descargadores empleando una Fuente de Corriente de Alta Impedancia. Usando esta fuente es posible ver el proceso de envejecimiento de los descargadores causado por impulsos de corriente tipo rayo. Tanto el método de envejecimiento acelerado que se propone, como los pasos para su implementación son presentados. Los resultados obtenidos son expuestos y analizados en el presente trabajo de investigación.

Palabras clave: ***Descargador de sobretensión ó DPS, envejecimiento, impulso de corriente, fuente de alta impedancia, tensión de referencia.***

Abstract

Surge arresters Ageing is a topic still under study. This paper proposes a method to study surge arrester ageing employing an Extra High Impedance Current Source. Using this source, it is possible to observe the arrester ageing process caused by current impulses. Both, the methodology used to accelerate the ageing process of the arrester and the steps followed for its implementation are presented in this work. The results obtained are presented and analyzed in the present research work.

Keywords: ***Surge arrester, ageing, current impulse, high impedance current source, reference voltage***

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XVI**

Introducción **1**

Capítulo 1: El descargador de sobretensión **5**
1.1 Historia del descargador en los sistemas de potencia 5
1.1.1 El descargador entre 1750 y 1890 6
1.1.2 El descargador entre 1890 y 1965 8
1.1.3 El descargador de 1965 hasta hoy 12
1.2 Características de operación del descargador de ZnO 15

Capítulo 2: Métodos experimentales de envejecimiento **21**
2.1 Trabajo de Ibañez [26] 21
2.2 IEC60099-4:2014 [27] 22
2.3 Trabajo de Lee, Song, Kim, Lee B.S., Kwon [28] 22
2.4 Trabajo de Ramos y Torres [29] 22
2.5 Trabajo de Poveda D. [25] 23

Capítulo 3: Método de envejecimiento propuesto –Método ECO- **25**
3.1 Consideraciones generales 25
3.2 Consideraciones particulares 26
3.3 Determinación de la corriente de impulso 27
3.4 Circuitos de prueba 31
3.4.1 Circuito experimental DC - ETHICS 31
3.4.2 Circuito experimental AC e Impulso 33

Capítulo 4: Resultados y análisis **41**
4.1 Resultados en DC 42
4.1.1 Característica V – I 42
4.1.2 Tensión de referencia DC 46
4.1.3 Estimación del coeficiente de no linealidad (α) 51
4.2 Resultados en Impulso 52
4.3 Resultados en AC 65
4.4 Proceso de envejecimiento y mecanismo final de degradación 74

Conclusiones y recomendaciones **77**

5.1 Conclusiones.....77
5.2 Recomendaciones.....79

A. Anexo: Determinación de la amplitud para la corriente de impulso 81

B. Anexo: Circuito de AC e Impulso para envejecimiento acelerado 82

C. Anexo: Estructura aislada empleada para el método propuesto 85

D. Anexo: Sistema de medición 87

E. Anexo: Estimación de coeficiente de no linealidad.....94

Bibliografía 99

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Primer diseño de descargador empleado en líneas de telégrafo [2].....7
Figura 1-2: Patente de descargador de sobre tensión de A. Wurts [5]. 7
Figura 1-3: Descargador con cuernos de descarga 9
Figura 1-4: Descargador Electrolítico Tipo A – 25 kV Westinghouse [6]. 10
Figura 1-5: Primer descargador de Carburo de Silicio (SiC) [9].....11
Figura 1-6: Descargador de SiC para sistema de distribución (1960) [13].....11
Figura 1-7: Patente de Michio Matsuoka [17].....13
Figura 1-8: El descargador en 1910 y ahora [15]. 14
Figura 1-9: Microestructura de ZnO enriquecido con óxidos metálicos [22] 16
Figura 1-10: Característica tensión – corriente para una pastilla de un DPS de ZnO de 80 mm de diámetro y 20 mm de espesor**.** [23].....18
Figura 3-1: Procedimiento de ensayo – ECO: Secuencia de pruebas.....27
Figura 3-2: Estructura tipo semibandera con conductor de guarda 28
Figura 3-3: Ejemplo de impacto en conductor de guarda sección del circuito 29
Figura 3-4: Modelo de descargador de Pinceti P y Giannettoni M [32] empleado para simulación……..……..30
Figura 3-5: Fuente de Corriente de Extra Alta Impedancia – ETHICS [39] a) Vista superior, b) Vista isométrica, c) diagrama conexión de circuito. 32
Figura 3-6: Circuito experimental DC – ETHICS empleado, diagrama de circuito 33
Figura 3-7: Circuito experimental equivalente de AC e Impulso 35
Figura 3-8: Forma de onda de tensión esperada en fuente AC y descargador bajo prueba…… 36
Figura 3-9: Forma de onda de tensión esperada en fuente AC y descargador bajo prueba…… 36
Figura 3-10: Estructura aislada en PVC construida.....38
Figura 3-11: Respuesta del divisor capacitivo - medición tensión residual en la rama de baja, a) Respuesta simulación, b) Respuesta medición real. 39
Figura 4-1: Característica V – I para la muestra S-1 42
Figura 4-2: Característica V – I para la muestra S-2 43
Figura 4-3: Característica V – I para la muestra S-3 43
Figura 4-4: Característica V – I para la muestra S-4 44
Figura 4-5: Característica V – I para la muestra S-5 44
Figura 4-6: Característica V – I para la muestra S-6 45
Figura 4-7: Tensión de referencia muestra S-1.....46

Figura 4-8: Tensión de referencia muestra S-2 47
Figura 4-9: Tensión de referencia muestra S-3 47
Figura 4-10: Tensión de referencia muestra S-4 48
Figura 4-11: Tensión de referencia muestra S-5 48
Figura 4-12: Tensión de referencia muestra S-6 49
Figura 4-13: Tensión de referencia prefalla en PU. 50
Figura 4-14 Registro de oscilograma de impulso de corriente y tensión residual en descargador. 53
Figura 4-15 Oscilograma de impulso de corriente y tensión residual en descargador tratado con el software Matlab para análisis. 54
Figura 4-16 Registro de oscilogramas para cada una de las muestras probadas 54
Figura 4-17 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-1. 56
Figura 4-18 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-3. 56
Figura 4-19 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-4. 57
Figura 4-20 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-5. 57
Figura 4-21: Estimación energía acumulada por muestra 58
Figura 4-22: Impulso en semiciclo positivo de señal de AC 60
Figura 4-23: Impulso en semiciclo positivo de señal de AC – Zoom 61
Figura 4-24: Impulso en cruce por cero de señal de AC 62
Figura 4-25: Impulso en cruce por cero de señal de AC - zoom 62
Figura 4-26: Impulso en el semiciclo negativo de señal de AC 63
Figura 4-27: Impulso en el semiciclo negativo de señal de AC- zoom 63
Figura 4-28 Aportes de energía de la fuente AC para impulso de corriente de polaridad negativa. 64
Figura 4-29 Registro de oscilograma de tensión y corriente obtenido para uno de los descargadores energizados a tensión MCOV 67
Figura 4-30: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-1 68
Figura 4-31: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-2 68
Figura 4-32: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-3 69
Figura 4-33: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-4 69
Figura 4-34: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-5 70
Figura 4-35: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-6 70
Figura 4-36 Componente resistiva de la corriente prefalla en PU. 71
Figura 4-37 Capacitancia estimada prefalla en PU. 72

Figura 4-38: Oscilograma tensión-corriente en AC para descargador en falla 73
Figura 4-39: Imágenes termo-gráfica de descargadores en condición de falla 74
Figura 4-40: Estructura de pastillas de óxido de zinc y sus fallas [40] 75
Figura A-1: Circuito de media tensión empleado para determinar la amplitud de la corriente de impulso. 81
Figura B-2: Fuentes empleadas en el circuito de AC e Impulso 82

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Característica de descargadores empleados en el estudio – datos del fabricante……26
Tabla 3-2: Características generador de impulsos de corriente 34
Tabla 3-3: Características de la fuente AC empleada 34
Tabla 4-1: Cuadro resumen envejecimiento descargadores empleados en el estudio 41
Tabla 4-2: Estimación del coeficiente de no linealidad 52
Tabla 4-3: Estimación de energía aportada fuente de AC e Impulso.....64
Tabla 4-4: Estimación de energía aportada fuente de AC e Impulso.....65
Tabla D-1: Determinación de la relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado…….. 89
Tabla D-2: Verificación resistencia shunt para corriente AC (60 Hz).....91
Tabla D-2: Verificación resistencia shunt para corriente AC (60 Hz) - Continuación....92

Introducción

Desde su aparición, los descargadores de sobretensión o dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) han sido una parte fundamental en la protección de las redes eléctricas. Su evolución a través de la historia ha permitido mejorar su respuesta ante las muy rápidas sobretensiones transitorias originadas en las descargas eléctricas atmosféricas, al tiempo que ha reducido su tamaño hasta lograr diseños que se adaptan a las diferentes tipologías de las redes. Su versatilidad también ha permitido que estén presentes desde los sistemas de alta tensión hasta los de muy baja tensión, brindando protección a equipos e instalaciones.

Por su importante función en los sistemas eléctricos, es fundamental que el descargador esté siempre operando correctamente ya que una falla del mismo puede comprometer la seguridad de los equipos que protege o la del sistema en el que opera. En este sentido se hace importante entender el proceso de envejecimiento que sufren los descargadores en su operación, el cual lleva a comprometer su desempeño hasta producir su falla. Esto es particularmente importante, si se tiene en cuenta que en Colombia, muchos de estos dispositivos son instalados en zonas rurales, alejadas de los cascos urbanos, donde un cambio puede tomar días, dejando sin protección los transformadores de distribución, los cuales al final sufren daño y dejan sin servicio a sus usuarios.

El presente trabajo presenta los resultados de la investigación acerca del envejecimiento en descargadores de óxido de zinc (ZnO), la cual fue llevada a cabo en seis descargadores de media tensión, del mismo tipo que los empleados en las redes de distribución del país. Se propuso reproducir las condiciones de operación en una red de distribución evaluando la degradación sufrida por cada muestra ante sobretensiones debidas a descargas eléctricas atmosféricas.

Para llevar a cabo el estudio, fue necesario implementar un circuito de tensión alterna que simulara la tensión de la red, el cual fue acoplado a un generador de impulsos de corriente tipo rayo. De este modo fue posible superponer las señales de alterna e impulso, simulando lo que ocurriría en un real. Un aspecto importante que hay que resaltar para la correcta operación del circuito, es la protección de la fuente de AC en el momento del impulso, ya que fue necesario garantizar que la corriente del generador circulase por el descargador y no hacia la red, tal como se describe en el capítulo 3.

Se requirió el diseño y construcción de una estructura especial aislada y con un sistema neumático para aplicar los impulsos de corriente a cada una de las muestras de descargadores, mientras la misma se encontraba energizada en AC. La estructura permitió minimizar los riesgos por descargas a estructuras cercanas a otro potencial e incluso hacia los otros descargadores bajo ensayo.

Para la selección de la magnitud de la corriente de impulso, se realizó la simulación de un una red real, de modo que se pudiese estimar la corriente que finalmente sería aplicada a los objetos de prueba mediante el método de envejecimiento aquí propuesto.

Se obtuvo la característica tensión – corriente (V - I) de cada descargador empleando una versión de la Fuente de Corriente de Alta Impedancia desarrollada por Román [1]. A partir de las curvas V – I obtenidas se determinaron cambios en la respuesta de cada una de las muestras bajo ensayo, a medida que se aplicaban impulsos de corriente mientras se mantenían energizados los descargadores. El proceso se llevó a cabo hasta llevar a condición de falla a la totalidad de las muestras.

El diseño e implementación de sistemas de medición compatibles con la naturaleza de las señales a medir, fue un aspecto importante que permitió realizar adecuadamente la adquisición de las señales de tensión y corriente AC, DC e Impulso.

Mediante el uso de herramientas de software fue posible el procesamiento de las señales adquiridas y finalmente realizar los análisis respectivos de cada una de las muestras de descargador empleadas en el estudio.

Finalmente y a partir de los resultados obtenidos y su análisis, se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación. Se destacan los aspectos relevantes del proceso de envejecimiento en los descargadores de ZnO empleados en el estudio. De estos resultados es posible inferir lo que sucede con los descargadores de sobretensión dispuestos en las redes de distribución rural, especialmente en las regiones colombianas con alta densidad de descargas eléctricas atmosféricas (rayos) a tierra.

Capítulo 1: El descargador de sobretensión

Hoy por hoy no es posible hablar de sistemas eléctricos, ya sea de generación, transmisión, distribución o de uso final, sin considerar su protección. Esto es, porque la protección es inherente a los sistemas eléctricos, hace parte integral de su operación y permite que los mismos se desempeñen correctamente ante perturbaciones.

Las perturbaciones de los sistemas eléctricos, ya sean de origen externo, como las descargas eléctricas atmosféricas o las internas, como las operaciones de maniobra, producen variaciones fuertes tanto en tensión como en corriente que se salen de las condiciones de su operación normal. En este sentido, se consideran principalmente dos tipos de protecciones: las protecciones contra sobrecorriente y las protecciones contra sobretensiones, siendo a este último grupo al que pertenece el descargador de sobretensión o DSP (Dispositivo de protección contra sobretensión). El presente capitulo hace referencia al descargador de sobretensión, como uno de los elementos más importantes en la protección de los sistemas eléctricos, presentando un recorrido por la historia y su principio de operación.

1.1 Historia del descargador en los sistemas de potencia

Antes de profundizar en la operación del descargador de sobretensión, es importante conocer un poco de la historia de su evolución para entender el porqué de la tecnología que actualmente se emplea y sus efectos sobre los sistemas que se pretenden proteger.

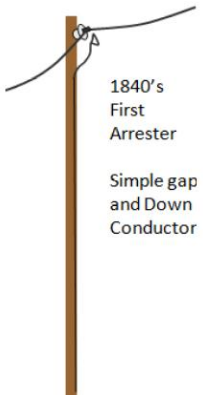
1.1.1 El descargador entre 1750 y 1890

Mucho antes de la aparición de los primeros sistemas de generación y transmisión de energía eléctrica, ya se hablaba de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, aplicada inicialmente a las viviendas y edificaciones altas. Este sistema fue desarrollado por Benjamin Franklin alrededor del año 1752 [2] y empleaba puntas captadoras (Varillas Franklin) junto con alambres interconectados que formaban una malla sobre la estructura a proteger. Estos mismos alambres eran empleados como bajantes para conducir la corriente de rayo a tierra mediante electrodos enterrados. Hoy día, este mismo principio permanece casi intacto y es empleado en los sistemas de protección contra rayos de edificaciones, subestaciones y estructuras que puedan ser víctimas de impacto directo por rayos. Mediante el método de la esfera rodante o método electro geométrico, se determina la altura de la punta y su distancia a otras que hagan parte del sistema de protección, determinando así el nivel de protección.

Antes de que aparecieran los sistemas de transmisión o distribución de energía eléctrica, ya las empresas de telégrafos contaban con líneas eléctricas que cubrían grandes distancias y que eran vulnerables a impactos por rayos. Fue sobre estos sistemas que se desarrollaron las primeras protecciones como la descrita por Joseph Henry en 1847 [3] la cual consistía en un conductor conectado a tierra en uno de sus extremos y el otro conectado en la parte superior del poste formando un gap con la línea del telégrafo como se muestra en la Figura 1-1, de modo que en operación normal el sistema de comunicación no era afectado por el conductor de tierra pero en presencia de una descarga atmosférica el gap hiciera de interruptor y la corriente fuese llevada a tierra.

Hacia la década de 1880, con la invención de la bombilla y el desarrollo de trenes movidos por electricidad creció la necesidad de llevar energía a través de redes aéreas, lo que trajo consigo una evolución de los sistemas de protección.

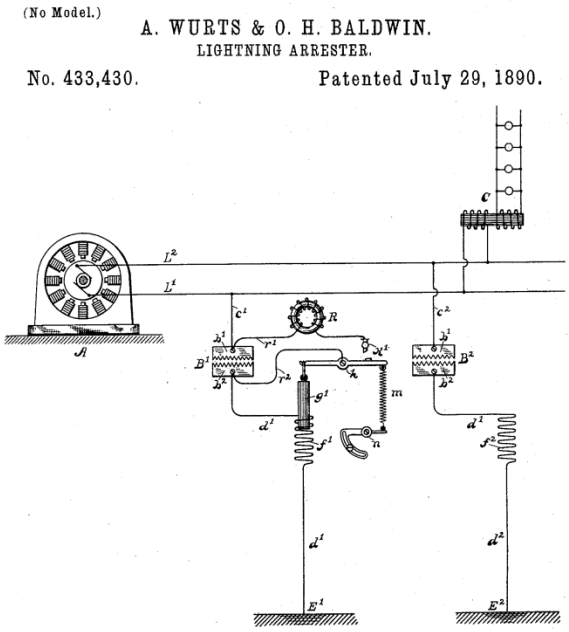
Figura 1-1: Primer diseño de descargador empleado en líneas de telégrafo [2]



Fuente: Woodworth, J. J., "History of Arresters on Power Systems 1750-1890." [Online]. Disponible:http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1750-1890.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016]

Para 1890 Elihu Thomson [4] y Alexander Wurtz [5] desarrollaron protecciones más sofisticadas, aunque mantenían el gap como elemento de protección como se muestra en la Figura 1-2.

Figura 1-2: Patente de descargador de sobre tensión de A. Wurts [5].



Fuente: Adaptado de A. Wurts, "Vania," Patente US433430 A, 29-Jul-1890.

1.1.2 El descargador entre 1890 y 1965

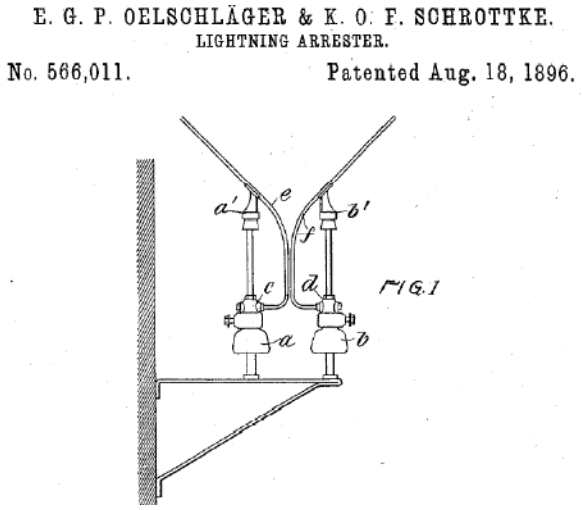
Con la aparición de los sistemas eléctricos de corriente alterna (AC), la expansión de las redes aéreas no se hizo esperar y con ella la necesidad de protegerlas frente a impactos de rayo. Sin embargo, no paso mucho tiempo para que los ingenieros de la época descubrieran que los descargadores, que funcionaban muy bien en los sistemas de telégrafo, no lo hacían en los sistemas de AC. La razón, la corriente de arco eléctrico de 60 Hz que sucedía a la operación del gap luego de una descarga atmosférica [6]. A diferencia de los sistemas de telégrafo que no operaban todo el tiempo, la red de AC tenía la capacidad de mantener el arco eléctrico producido en el gap luego de un impacto de rayo, lo que finalmente derivaba en una falla del sistema.

En este nuevo escenario, los diseñadores entendieron que para evitar esto era necesario controlar la corriente de arco de 60 Hz ya fuese apagando la fuente o limitando la corriente mediante una resistencia en serie con el gap.

La primera solución que se encontró fue aumentar la misma distancia del gap, con lo cual se aumentaba la resistencia de arco. Los primeros diseños lo hacían mecánicamente, sin embargo requerían ser reajustados para volver a operar correctamente. En 1896 fue introducido el descargador con cuernos de descarga como el que se muestra en la Figura 1-3 y que aún hoy es empleado. Este hace uso de la fuerza de empuje del campo magnético que lleva al arco hasta los extremos de los electrodos en su punto de mayor separación aumentando la resistencia y logrando la extinción del arco en el cruce por cero de la señal de tensión.

La investigación en el campo de la protección contra sobretensiones continuó y con ella la búsqueda de mejoras en el descargador. Es así como en 1907 el ingeniero Elmer Creighton presenta solicitud de patente para un nuevo tipo de descargador que empleaba una celda electrolítica de aluminio sumergida en aceite. Esta patente fue concedida finalmente en [6].

Figura 1-3: Descargador con cuernos de descarga [6]

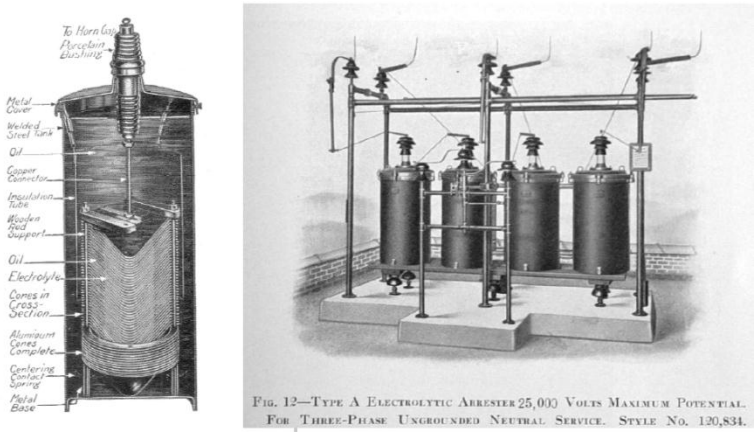


Fuente: Adaptado de Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1890-1930.” [Online] Available : http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_ Arresters_on_Power_Systems_1890-1930.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016

El descargador de celda electrolítica de aluminio o descargador electrolítico como también fue llamado, tenía como característica una alta impedancia y baja corriente de circulación en condiciones normales de operación, lo que permitía incrementar la tensión hasta un nivel crítico, punto en el cual la corriente crecía rápidamente mientras la tensión era fijada. La resistencia del hidróxido de aluminio que componía el descargador permitía que una vez superada la sobretensión transitoria, la corriente de 60 Hz subsecuente fuese limitada evitando la salida de la línea [7], [8]. La Figura 1-4 presenta la estructura interna del descargador electrolítico y su uso para la protección de los sistemas de potencia de la época

El uso del descargador electrolítico fue creciendo al tiempo que se continuaba investigando para tener nuevos desarrollos. Fue así como en 1926 John Robert McFarlin, quien trabajaba para la compañía Electric Service Supply Company (ESSCO) de Filadelfia., presento al mundo el primer descargador de carburo de silicio (SiC) [6], [9].

Figura 1-4: Descargador Electrolítico Tipo A – 25 kV Westinghouse [6].

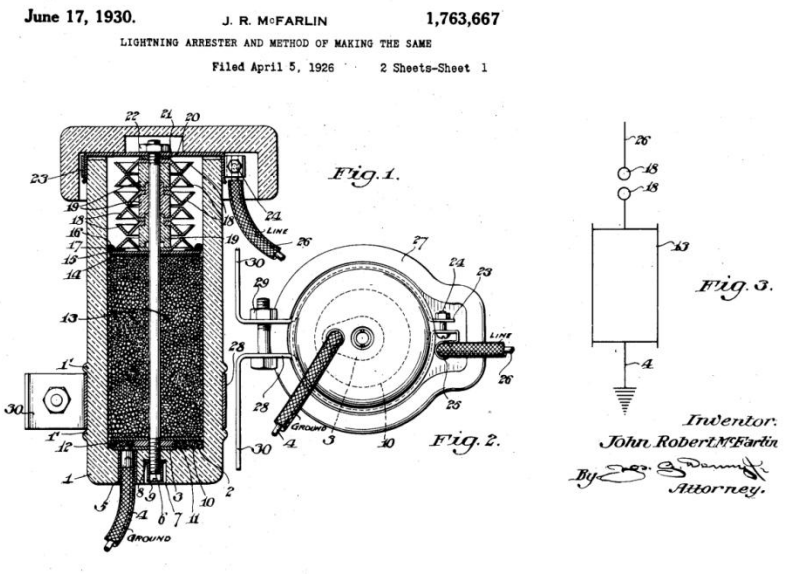


Fuente: Adaptado de Woodworth, J. J., "History of Arresters on Power Systems 1890-1930." [Online] Available : http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1890-1930.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016

Esta nueva tecnología demostró ser mucho más eficaz y durable que la empleada en los descargadores electrolíticos. Aunque al igual que su predecesor empleaba un gap en serie, las propiedades del carburo de silicio le permitieron al descargador tener una mejor respuesta ante las sobretensiones manteniendo una baja impedancia durante el transitorio para conducir el exceso de corriente a tierra, pero restaurando su muy alta impedancia al final del transitorio evitando fallas de la corriente de 60 Hz. La Figura 1-5 presenta la patente de McFarlin, para el primer descargador de SiC.

Las ventajas que ofrecía el carburo de silicio hicieron que rápidamente se convertirá en el principal insumo para la fabricación de descargadores de sobretensión de todos los niveles de tensión requeridos. A partir de ese momento los desarrollos se encaminaron a mejorar las características del descargador de SiC, incluyendo mejoras como el dispositivo de desconexión para caso de falla del descargador [10], [11] y reduciendo su tamaño [12], [13].

Figura 1-5: Primer descargador de Carburo de Silicio (SiC) [9].



Fuente: Adaptado de Mcfarlin John Robert, “Lightning arrester and method of making the same,” US1763667 A.

De esta manera, la era del descargador de SiC se extendería hasta 1965 cuando aparecería el descargador de Óxido de Zinc (ZnO). La Figura 1-6 presenta dos modelos de descargador de SiC para sistema de distribución del año 1960.

Figura 1-6: Descargador de SiC para sistema de distribución (1960) [13].

Fuente: Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1930-1965.” [Online]. Available:http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1930-1965.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016].

1.1.3 El descargador de 1965 hasta hoy

La invención del transistor en 1947 [14] marcó el inicio de una nueva era para la electrónica, que para la década de 1950 presentó el radio con transistores, como un gran desarrollo tecnológico. Este radio era más compacto y versátil que aquellos que hacían uso de tubos de vacío. No paso mucho tiempo para que su uso se popularizara, y esto fue posible en parte por la industrialización de su producción en masa. Es así como en 1952 el ministerio de comercio japonés licenció el uso de la tecnología desarrollada por los laboratorios Bell [15]. La industria japonesa creció rápidamente convirtiéndose en uno de los mayores productores de radio con transistores.

Para el año de 1965 ya era notorio que los varistores de carburo de silicio (SiC) desarrollados para la protección de los sistemas, como los que empleaban tubos de vacío no brindaban seguridad para la nueva tecnología de transistores. Se inició entonces una investigación para el desarrollo de un nuevo tipo de varistor que tuviese una tensión umbral de activación menor que sus contrapartes de SiC.

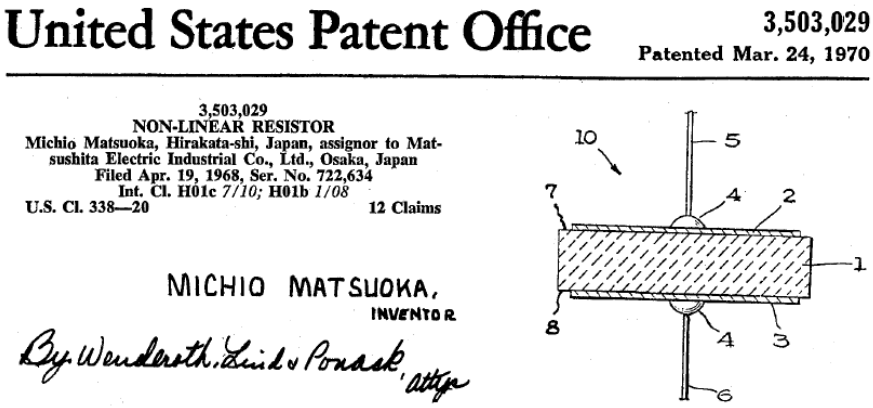
En el camino por desarrollar un mejor varistor, el grupo de investigación y desarrollo de la compañía japonesa Matsushita Electric Company, encontró en el Óxido de Zinc (ZnO) un material con buenas propiedades, sin embargo aún no era posible obtener las características de tensión requeridas para la protección [16]. Fue así, como en 1967, en el desarrollo de uno de tantos experimentos en los que se empleaba óxido de zinc en la cerámica junto con oxido de plata y vidrio granulado para los electrodos, un fallo en el control de temperatura de uno de los hornos usados en la sintetización de materiales, hizo que las muestras del experimento llevado a cabo por el investigador Michio Matsuoka [15], se sintetizaran a una temperatura mucho más alta de la esperada inicialmente.

Aunque las muestras ya no eran útiles para el objetivo del experimento, Matsuoka decidió medir sus características encontrando con sorpresa que la tensión umbral era mucho más alta que en cualquiera de los trabajos hasta el momento realizados y también que a

diferencia de resultados anteriores sus muestras ahora poseían la propiedad de conducir simétricamente tanto en polaridad positiva como negativa.

Este afortunado fallo en el experimento fue el punto de partida para una nueva investigación de Masuoka y su equipo que finalmente dio como resultado una patente [17] en el año de 1970 como se presenta en la Figura 1-7. De esta manera hizo su aparición en la historia de las protecciones el descargador de óxido de zinc (ZnO), aunque sus primeras aplicaciones no superaban los 500 V.

Figura 1-7: Patente de Michio Matsuoka [17]


United States Patent Office

3,503,029
Patented Mar. 24, 1970

3,503,029
NON-LINEAR RESISTOR
Michio Matsuoka, Hirakata-shi, Japan, assignor to Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Osaka, Japan
Filed Apr. 19, 1968, Ser. No. 722,634
Int. Cl. H01c 7/10; H01b 1/08
U.S. Cl. 338—20 12 Claims

MICHIO MATSUOKA,
INVENTOR

By Wenderoth, Lind & Ponack, attys

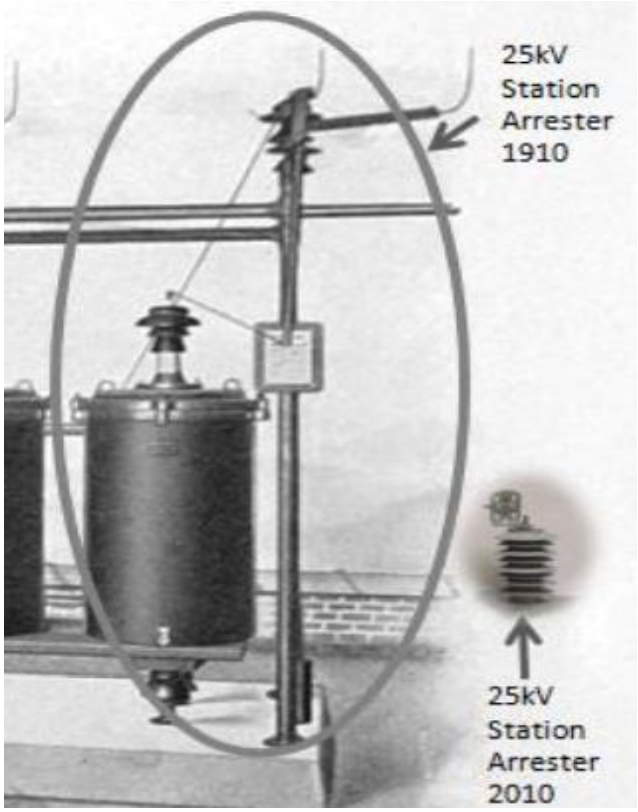
Fuente: Modificado de M. Michio, “Non-linear resistor,” US3503029 A, 24-Mar-1970.

Para 1972 General Electric firmo un acuerdo con Matsushita Electric Co para trabajar el material en Estados Unidos. No paso mucho tiempo para que los investigadores de General Electric desarrollaran en 1976, el primer descargador de ZnO para ser empleado en sistemas de potencia [18]. Las propiedades no lineales del ZnO hicieron innecesario el uso de gaps en serie dentro del descargador con lo cual se logró una importante reducción de peso y volumen. Se dio inicio así, a la era del descargador de óxido de zinc. Rápidamente el uso de la tecnología fue licenciada y los fabricantes de descargadores en Estados Unidos comenzaron a desarrollar dispositivos de ZnO, que fueron desplazando a sus contrapartes de SiC en una transición que no tomó muchos años.

En al año de 1984 el Ingeniero Donald E Raudabaugh patentó [19] por primera vez el uso de una cubierta polimérica para el descargador en lugar de la porcelana que hasta el momento se usaba. El uso del polímero no solamente hacía más liviano al descargador

sino que lo hacía más seguro al momento de falla, pues mantenía los discos de ZnO en su lugar evitando la emisión de material como ocurría con los recubrimientos en porcelana. Para el año de 1987 Ohio Brass producía el primer descargador polimérico del mundo [15]. Poco a poco, el uso de la cubierta polimérica extendió hasta los descargadores de sistemas de distribución que hoy conocemos [20]. La Figura 1-8 presenta una pequeña síntesis de la evolución del descargador desde 1910 hasta hoy.

Figura 1-8: El descargador en 1910 y ahora [15].



Fuente: Modificado de M. Michio, “Non-linear resistor,” US3503029 A, 24-Mar-1970

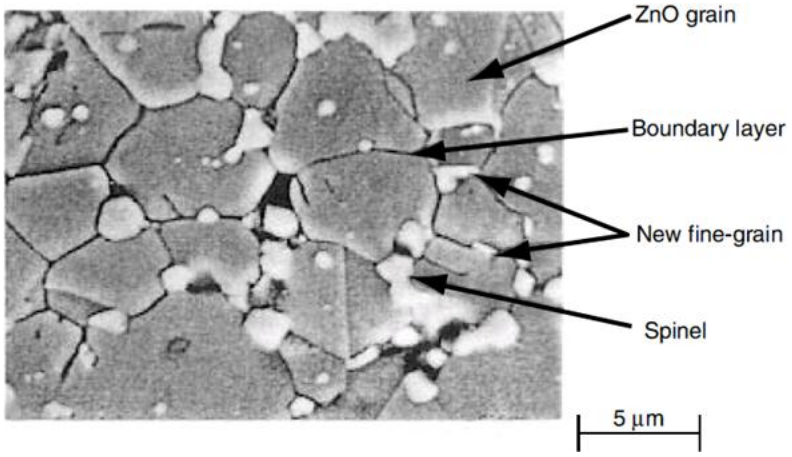
1.2 Características de operación del descargador de ZnO

El descargador tiene como función proteger los elementos que operan en un sistema eléctrico contra sobretensiones transitorias, cuyo nivel puede poner en riesgo su seguridad y la del sistema mismo, para ello debe fijar un nivel de tensión soportable por los equipos mientras lleva a tierra de manera segura el exceso de corriente producido por una descarga atmosférica o una sobretensión del tipo maniobra. Sin embargo, éste solo debe actuar en presencia de una sobretensión, manteniéndose casi imperceptible para la red en condiciones de operación normal, de modo que tenga una mínima conducción de corriente y se comporte casi como un circuito abierto

El modo particular en que debe operar el descargador ante una sobretensión y en operación normal de la red, solo pueden ser posibles gracias a la característica no lineal de su respuesta que le dan los materiales que lo constituyen y la forma como estos están dispuestos. El descargador está formado por pastillas de ZnO y su número depende de la tensión nominal del sistema en el cual va a operar. Estas pastillas están -principalmente constituidas por ZnO y otros aditivos como alúmina, tri-óxido de amonio, óxido de bismuto, oxido de cobalto, circonio (Bi 2 O 3 , MnO, Cr 2 O 3 , Sb 2 O 3) [21], [22], etc.

Al revisar la estructura de las pastillas se identifica una composición de gránulos compactados y sintetizados a los cuales se les adicionan algunos de los óxidos metálicos antes mencionados. Los gránulos de ZnO tienen baja resistividad, mientras los aditivos que establecen las fronteras entre los gránulos, presentan una alta resistividad. Debido a las altas temperaturas manejadas en el proceso de fabricación los componentes están fuertemente unidos formando la microestructura que caracteriza a un disco de ZnO como la presentada en la Figura 1-9.

Figura 1-9: Microestructura de ZnO enriquecido con óxidos metálicos [22]



Fuente: Modificado de E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, "High Voltage Engineering: Fundamentals", Second Edition. Newnes, 2000.

A partir de su estructura, es posible entonces entender cómo opera el descargador de óxido de Zinc. Cuando una pastilla es sometida a un potencial que aumenta desde un valor muy bajo (cercano a cero), la alta resistividad de los aditivos que establecen las fronteras entre los gránulos de ZnO, que es del orden de los 10^13 Ω-cm [21], establece una fuerte oposición al paso de la corriente, que aunque crece proporcionalmente a la tensión, es del orden de los µA. Sin embargo al continuar aumentando la tensión hasta un nivel umbral, se produce una inflexión en la respuesta tensión-corriente de descargador. Este punto es conocido en inglés como "knee" o rodilla en español y es el punto a partir del cual se hace evidente la característica no lineal.

Una vez alcanzada esta tensión umbral el efecto de la alta resistividad de los aditivos de las fronteras ya no es significativo y por el contrario son los grandes gránulos de ZnO quienes por su bajo valor óhmico permiten una mayor conducción, lo que se traduce en un rápido crecimiento en la corriente mientras la tensión por el contrario no tiene mayor incremento, tal y como sucede en un diodo cuando este entra en conducción fijando una tensión en sus terminales.

Se tienen entonces que para un descargador de ZnO se identifican tres regiones de operación importantes:

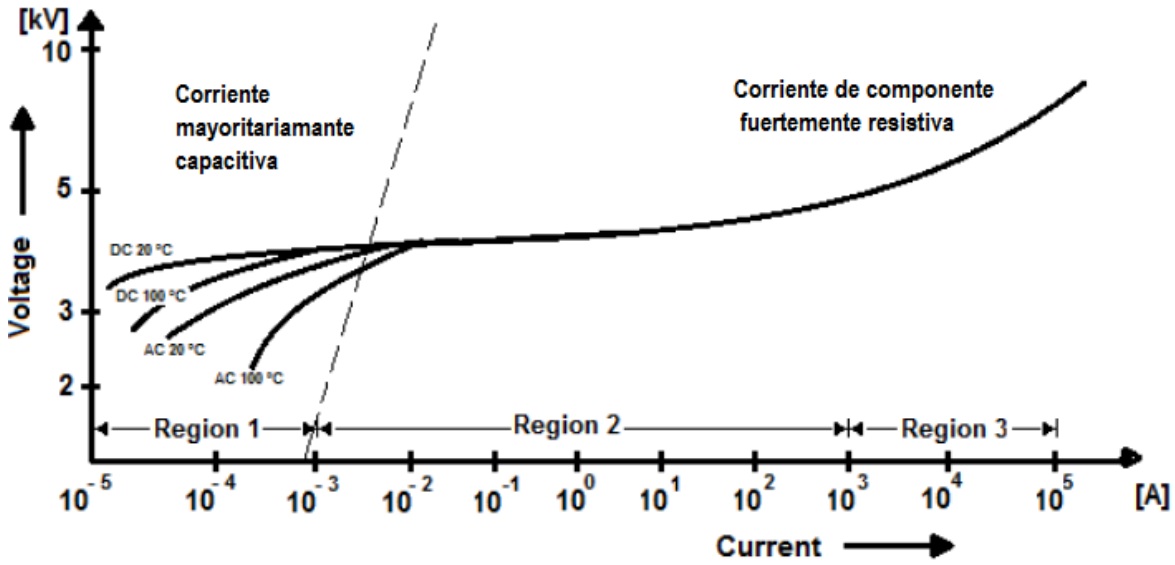
- La región de Máximo Voltaje de operación continua (MCOV) en la cual la corriente a través del dispositivo es menor a 1 mA (Corriente de referencia) y es principalmente capacitiva. Esta región de operación determina algunos de los criterios para la selección del DPS según el sistema en el cual operar. Estos criterios son el MCOV el cual no debe ser inferior a la tensión máxima a la que va a operar el descargador y la tensión de referencia que se define como la tensión que aparece cuando por el descargador circula la corriente de referencia. Estos parámetros son definidos por el fabricante y dependen del número de pastillas que componen al descargador.

- La región de sobretensión temporal (TOV) se caracteriza por tener una corriente entre 1mA y hasta 1 o 2 kA la cual es principalmente de tipo resistiva. En esta región de dan grandes variaciones de la corriente pero no así de la tensión que se mantienen casi constante.

- La región de descarga atmosférica (lightning region) se caracteriza por la presencia de corrientes de hasta 100 kA. En esta región se presenta una relación prácticamente lineal entre la tensión y la corriente llegando a ser un comportamiento puramente resistivo.

La Figura 1-10 muestra la característica tensión - corriente para en una pastilla de ZnO en la que se pueden identificar las zonas de operación antes descritas.

Figura 1-10: Característica tensión – corriente para una pastilla de un DPS de ZnO de 80 mm de diámetro y 20 mm de espesor**.** [23]



Fuente: Modificado de A. R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems. CRC Press, 1999.

Como puede apreciarse en la primera región, las corrientes que se manejan son muy pequeñas y existe una fuerte influencia de la temperatura y del tipo de señal de excitación. Dado que los descargadores de sobretensión o DPS´s (Dispositivo de protección contra sobretensiones) como también son llamados, permanecen en esta zona de operación la mayor parte del tiempo, el estudio de esta región reviste importancia pues en ella se determina el MCOV del DPS y su correcta operación en los sistemas eléctricos a proteger. En este sentido el trabajo previo realizado por Alarcón [24] presenta una caracterización de descargadores de ZnO de media tensión empleando la fuente de Extra Alta Impedancia desarrollada por Román [1] y el grupo de Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia aplicando una corriente DC y estudiando el comportamiento de la característica tensión – corriente en DPS´s bajo distintas condiciones de temperatura. [24]

Por otra parte los descargadores instalados en los diferentes sistemas se ven expuestos no solamente a un esfuerzo eléctrico continuo en su operación (región MCOV) sino

también a sobretensiones temporales producidas por el sistema mismo y por acción directa o indirecta de descargas eléctricas atmosféricas, de modo que los DPS´s sufren una degradación o envejecimiento propio de la naturaleza de su operación como lo muestra el trabajo de Poveda [25]. Este envejecimiento genera cambios en las propiedades del DPS que pueden llegar a comprometer la seguridad de personas y equipos.

Capítulo 2: Métodos experimentales de envejecimiento

Durante su operación en los sistemas eléctricos los descargadores pueden verse sometidos a diferentes situaciones que causen su falla llegando a comprometer los equipos que protegen. Una de estas situaciones corresponde al envejecimiento propio de su operación que genera una degradación de las pastillas de Óxido de Zinc que componen al descargador, y eventualmente van cambiando su respuesta no solamente a las sobretensiones sino a su régimen de conexión permanente a la red. Varios autores han trabajado el tema del envejecimiento mediante trabajos experimentales, algunos de los cuales son descritos en este capítulo.

2.1 Trabajo de Ibañez [26]

El trabajo desarrollado por el Ingeniero Henry Ibañez en 2004, refiere el análisis de la degradación de pastillas de Óxido de Zinc que constituían 3 descargadores de media tensión de 12 kV y MCOV de 10,2 kV, empleados en las redes de distribución del país. En su trabajo experimental, Ibañez sometió a las muestras a una tensión de 1,5 veces el MCOV mientras su temperatura era elevada mediante el uso de un horno. Aplicando varias veces estos ciclos de operación se simularon condiciones de operación que degradaran las pastillas. Las mediciones se realizan a cuatro niveles de temperatura diferentes, ambiente, 60°, 100° y 140 °C. Para obtener la característica tensión – corriente de las muestras fue empleada la fuente de corriente de alta impedancia desarrollada por Román [1]. Centro su análisis en el coeficiente de no linealidad y la potencia disipada concluyendo que estos son indicadores del proceso de degradación de las pastillas.

2.2 IEC60099-4:2014 [27]

El estándar IEC60099-4 contempla diferentes ensayos para los descargadores de óxido de zinc. Uno de los ensayos es el denominado Operating duty tests, el cual es considerado un método de envejecimiento acelerado. El procedimiento descrito consiste en aplicar una tensión constante al descargador mientras es sometido a una temperatura mayor de 100 °C, durante un periodo de 1000 horas. A continuación se aplican una serie de impulsos de corriente 8/20 µs y 4/10 µs acompañados de precalentamiento de 60 °C Al final del procedimiento de ensayo se establece como criterio de aceptación una variación no mayor al 5% entre los valores de tensión residual inicial y final, de la misma forma que se determina estabilidad térmica del descargador. En este sentido la tensión residual es considerada un indicador de la degradación del descargador.

2.3 Trabajo de Lee, Song, Kim, Lee B.S., Kwon [28]

Los autores refieren el uso de una cámara para simular condiciones ambientales reales de operación. En tal sentido se establece el control de variables como la radiación UV, humedad, temperatura, salinidad y lluvia. El objetivo del estudio fue someter a los descargadores de sobretensión a operación bajo condiciones simuladas de verano e invierno empleando la cámara, mientras eran energizadas a su tensión MCOV. El tiempo empleado para simular las dos condiciones estacionarias fue de 3000 horas, periodo en el cual se realizaron mediciones de corriente de fuga y análisis químicos de la superficie polimérica. Los resultados obtenidos dan cuenta de variaciones importantes en la corriente de fuga y la capacidad de absorción de agua de la cubierta polimérica.

2.4 Trabajo de Ramos y Torres [29]

Los autores proponen un método de envejecimiento en el cual los descargadores están continuamente energizados a un nivel de tensión de aproximadamente el 90% del MCOV mientras se aplican simultáneamente impulsos de corriente de forma 8/20 µs. El método simula condiciones de operación al superponer tanto la señal de AC como la de impulso. Para el desarrollo experimental se utilizaron cinco (5) descargadores de sobretensión con

tensión nominal de 10,2 kV y MCOV de 8,4 kV. La magnitud de la corriente de impulso seleccionada fue de 5 kA con la forma de onda antes mencionada.

El objetivo del trabajo fue la corriente de fuga de AC y su evolución con la degradación o envejecimiento del descargador. Como conclusión, los autores determinan el incremento de la corriente de fuga como un claro indicador del envejecimiento del descargador, corroborando lo hallado en los trabajos antes mencionados.

2.5 Trabajo de Poveda D. [25]

Poveda toma algunos de los elementos del trabajo realizado por Ramos y Torres [29], como el uso del mismo circuito para pruebas y las referencias de descargadores para el estudio. Sin embargo propone dos fases para el proceso de envejecimiento acelerado. La primera consiste en aplicar impulsos de corriente con forma de onda 8/20 µs y una amplitud de 10 kA a cinco muestras de descargadores mientras estos son energizados a la tensión MCOV. La segunda fase consiste en repetir el proceso de la primera fase, pero aplicando impulsos de corriente tipo maniobra con duración de 2 ms.

La medición de la corriente de fuga AC, corriente de impulso y la tensión residual fueron empleadas para determinar correlaciones con la energía acumulada por cada muestra. Como resultado, Poveda corrobora el incremento de la corriente de fuga AC como un indicador del deterioro del descargador y su correlación con la energía. También determinó la no existencia de variaciones significativas en la tensión residual a lo largo de la aplicación de los impulsos.

Capítulo 3: Método de envejecimiento propuesto –Método ECO-

3.1 Consideraciones generales

Buscando determinar la degradación sufrida por los descargadores en su operación normal, se planteó un método de envejecimiento que intentara reproducir de manera aproximada algunas de las condiciones reales en las que se encuentran en servicio los descargadores de sobretensión empleados en los sistemas de distribución del país. Por lo anterior denominaremos de ahora en adelante el método propuesto en este trabajo mediante la abreviatura ECO del “Método de Envejecimiento en Condiciones de Operación”.

A fin de generar unas condiciones similares a las de operación, el método ECO propone energizar cada muestra de descargador de ZnO a su tensión MCOV de modo que se garantice que se encuentre en la zona de no conducción (Región 1 de la zona de operación).

Se establece como parámetro de envejecimiento la corriente de impulso tipo rayo con forma de onda 8/20 μs como se establece en el referente IEC60099-4 [27] y los cuales han sido empleados por otros autores como Darveniza, Mercer y Tumman [30]. Los parámetros definidos para la medición fueron corriente de impulso, la tensión residual, corriente de fuga AC así como la característica tensión-corriente en DC de cada descargador.

Como se pudo identificar en el trabajo de Ibáñez [26], la temperatura es uno de los factores que incide en la degradación de los descargadores. Sin embargo, en el presente

trabajo no se sometieron las muestras a condiciones extremas de temperatura y se trabajó dentro de las condiciones determinadas por el estándar IEC60099-4 [27] para realización de pruebas a descargadores de óxido de zinc, las cuales son 20 °C ± 15 K.

3.2 Consideraciones particulares

Se seleccionaron seis (6) muestras de descargador de ZnO de idénticas características y disponibles en el mercado nacional para su uso por parte de empresas de distribución y usuarios en general. Las características de las muestras seleccionadas se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Característica de descargadores empleados en el estudio – datos del fabricante

Rated voltage	12 kV
Nominal discharge current	10 kA
Continuous operating voltage	10,2 kV
1/10us steep current impulse residual voltage	42 kV
8/20us lightning impulse residual voltage	37 kV

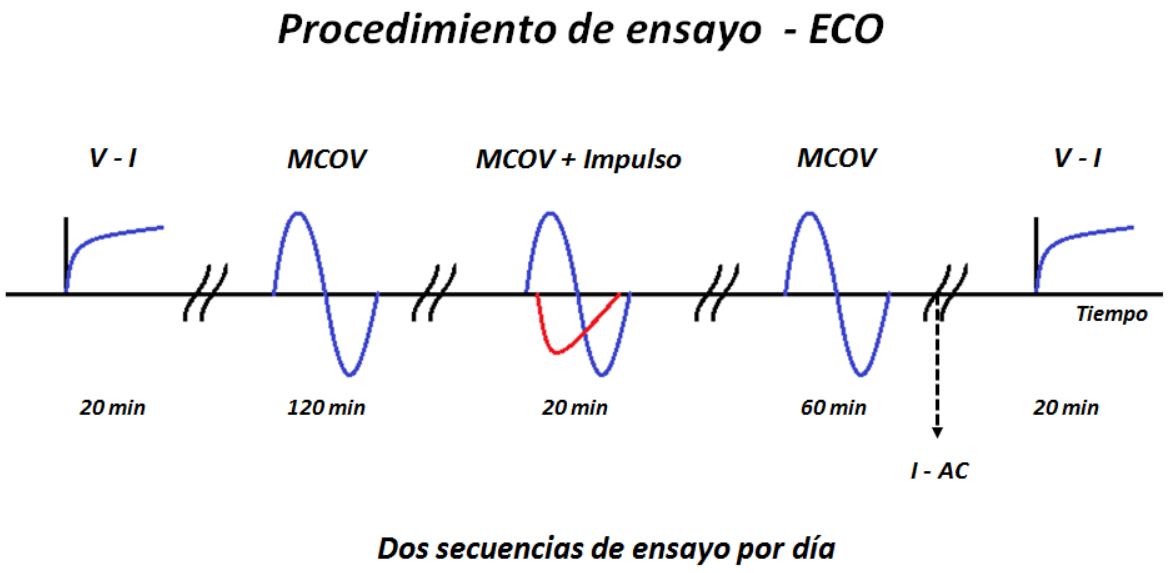
Se aplicaron impulsos de corriente 8/20 μs a cada muestra mientras estas eran energizadas simultáneamente con tensión AC a su nivel MCOV. Para ello se empleó el generador de impulsos de corriente del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales LABE de la Universidad Nacional de Colombia, el cual aplicaba los impulsos a un circuito AC diseñado para operar simultáneamente. Luego de aplicar un impulso a cada muestra se esperaba una hora para garantizar que el descargador se encontrase a temperatura ambiente y se midió la corriente de fuga AC de cada muestra.

La característica tensión-corriente DC se determinaba una vez medida la corriente de fuga AC y retirando las muestras del circuito de envejecimiento y llevándolas al circuito dispuesto para esta medición. Como fuente DC se empleó una versión de la fuente de

corriente de alta impedancia desarrollada por Román [1], la cual fue acondicionada para el ensayo a descargadores de ZnO de media tensión.

El periodo de energización de los descargadores a su tensión MCOV fue de aproximadamente 8 horas diarias (jornada de trabajo para pruebas) Se determinó aplicar entre dos y tres impulsos diarios de corriente 8/20 µs. Los impulsos fueron aplicados hasta llevar a falla cada una de las muestras. La figura 3-1 presenta de manera gráfica la secuencia establecida para la prueba a los descargadores de sobretensión.

Figura 3-1: Procedimiento de ensayo – ECO: Secuencia de pruebas.



3.3 Determinación de la corriente de impulso

La selección de la amplitud de la corriente de impulso tipo rayo, fue uno de los parámetros más importantes para la metodología de envejecimiento acelerado propuesta. Aunque trabajos anteriores habían seleccionado la mitad [29] y la totalidad [25] de la corriente nominal de descarga como la corriente de ensayo, en este trabajo se estableció a partir de la simulación de caso real.

Un circuito de media tensión ubicado en la Palma Cundinamarca, una de las regiones con más alta actividad de rayos en el país, fue simulado. Este circuito fue empleado por González [31], para estudiar las características de las descargas atmosféricas. Este circuito tiene una extensión de 12,5 km y un nivel de tensión de 34,5 kV, con un conductor de guarda y una estructura tipo semibandera como la que se presenta en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Estructura tipo semibandera con conductor de guarda

El circuito fue simulado empleando el programa EMTP/ATP Draw pero realizando algunas consideraciones para que fuese aplicable al tipo de descargador seleccionado para envejecimiento: El circuito empleado en la simulación se detalla en el Anexo A.

- El nivel de tensión fue ajustado a 13,2 kV.
- Se dividió en cinco secciones cada una de 2,5 km.
- Cada sección contó con un transformador de distribución cargado al 75% de su capacidad nominal y protegido en cada una de sus fases por un descargador de sobretensión en el lado de media tensión.

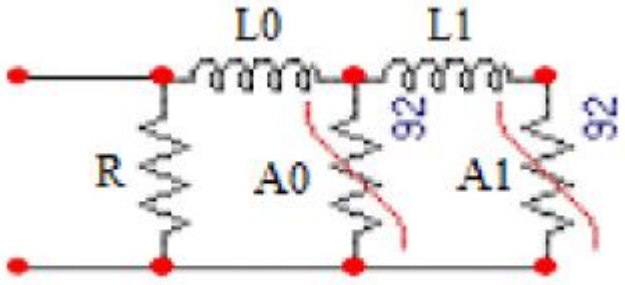
- El conductor de guarda fue aterrizado en cada una de las secciones, en el punto donde se ubicó el transformador

Las simulaciones se realizaron bajo la hipótesis de un impacto directo de rayo en el conductor de guarda para cada una de las secciones. La resistencia de puesta a tierra para cada sección fue de 30 Ω, valor obtenido a partir de las mediciones realizadas por González M. [31] en su estudio. Es importante resaltar que para la simulación solo se consideró el efecto de la resistencia en la puesta a tierra, es decir, se modelo como una resistencia pura, para efectos de simplificar el modelo.

Figura 3-3: Ejemplo de impacto en conductor de guarda sección del circuito

Para la inclusión del descargador en la simulación, el modelo simplificado de Pinceti P y Giannettoni M [32] fue seleccionado. Este modelo tiene como principal ventaja que los parámetros L0, L1 A0 y A1, pueden ser calculados a partir de datos suministrados por el fabricante en la ficha técnica del descargador y sus resultados de simulación son muy cercanos a los obtenidos por otros modelos propuestos y a resultados experimentales [33]–[35]. La Figura 3-4 presenta el modelo de descargador empleado en la simulación.

Figura 3-4: Modelo de descargador de Pinceti P y Giannettoni M [32] empleado para simulación.



La corriente de impulso empleada para la descarga atmosférica en los conductores de guarda fue una onda 10/350 µs con una amplitud de 20 kA y polaridad negativa. Esta magnitud de corriente fue seleccionada por tener una probabilidad acumulada de más del 80% como se establece en el Anexo A del estándar nacional para protección contra rayos [36].

Para cada tramo del circuito se simuló un impacto directo en el conductor de guarda y se evaluaron las corrientes que producto de la sobretensión generada que circulaban por cada uno de los descargadores del sistema, independientemente de su ubicación respecto al punto de impacto. Como era de esperarse, aquellos descargadores más cercanos al tramo impactado, presentaban las mayores corrientes. Sin embargo, aún los descargadores más alejados se veían afectados, aunque en menor magnitud, por sobretensiones que activan su conducción, como sucede en los sistemas reales.

A partir de todos los casos simulados y de la evaluación de las sobrecorrientes en cada uno de los descargadores, se estimó que en promedio por cada descargador circulaba un impulso de corriente de 700 A, con forma de onda 10/350 µs. Dado que el parámetro de envejecimiento establecido para el método ECO fue un impulso de corriente 8/20 µs, fue necesario hallar equivalente para la corriente calculada a partir de las simulaciones.

Considerando resultados teóricos y experimentales de algunos autores [37] así como recomendaciones de estándares internacionales [38], se estableció un factor de escala

para la magnitud de la corriente de 10 (ver Ecuación (3.1)). Este factor considera no solo las formas de onda sino el esfuerzo al que es sometido el descargador.

$$I_{(8/20\mu s)} = 10\, I_{(10/350\mu s)} \tag{3.1}$$

De esta manera una corriente de 7 kA con forma de onda 8/20 µs se estableció como corriente para el método de envejecimiento propuesto. Esta fue la corriente aplicada empleando el Generador de Impulsos de Corriente – GIC del laboratorio LABE de la Universidad Nacional.

3.4 Circuitos de prueba

Dos circuitos experimentales fueron propuestos para desarrollar esta investigación. El primero es la fuente DC de Alta Impedancia ETHICS usada para obtener la característica tensión-corriente de los objetos de prueba. El segundo corresponde al circuito de AC e Impulso mediante el cual se simula operación de los descargadores en la red. Mediante este segundo circuito experimental se aplica a cada uno de los objetos de prueba la corriente de prueba de 7 kA con forma de onda 8/20 µs mientras permanecen energizados a su tensión MCOV.

3.4.1 Circuito experimental DC - ETHICS

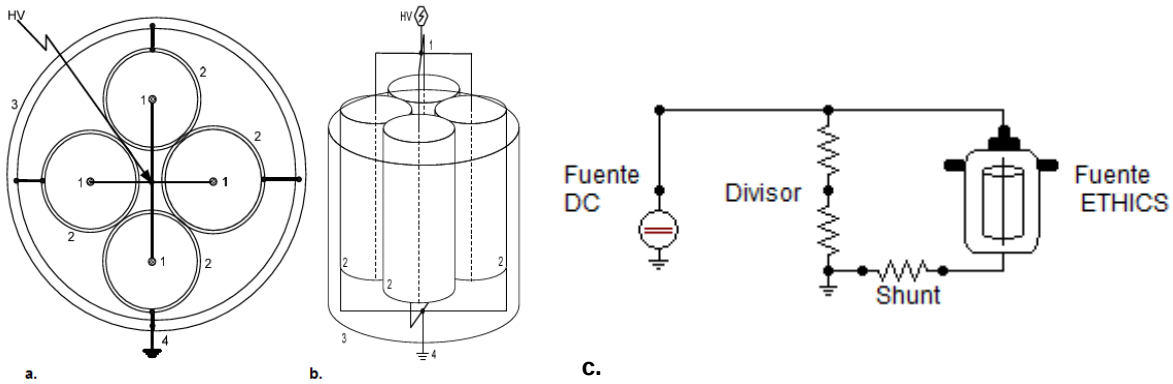
Este circuito experimental hace uso de la Fuente de Corriente de Extra Alta Impedancia [1] o ETHICS por sus siglas en ingles. Esta fuente se caracteriza por su altísima impedancia interna y por emplear descargas corona dentro de un arreglo coaxial para producir la corriente. Para el presente trabajo, una versión de la fuente empleada por Alarcón, Gómez, Santamaría y Román [39] fue adaptada para la prueba a descargadores. La Figura 3-2 presenta la configuración de la fuente ETHICS usada.

Esta fuente cuenta con cuatro cilindros coaxiales conectados en paralelo. Cada configuración coaxial consta de un conductor interno (alambre) con diámetro de 0,4 mm y

un cilindro externo con diámetro de 126 mm. El medio o dieléctrico empleado es el aire. Los cuatro coaxiales se encuentran conectados por la pantalla exterior entre si y al contenedor donde se alojan. Este contenedor se conecta en serie con el elemento a través del cual se quiere hacer circular la corriente, en este caso particular, al descargador.

Al igual que los cilindros externos, los conductores internos se encuentran conectados entre sí, y estos a su vez son conectados a una fuente de alta tensión DC con polaridad negativa. La Figura 3-5 presenta la estructura interna de la fuente de alta impedancia y su conexión al circuito para la generación de la corriente corona, la cual es medida a través de una resistencia shunt.

Figura 3-5: Fuente de Corriente de Extra Alta Impedancia – ETHICS [39] a) Vista superior, b) Vista isométrica, c) diagrama conexión de circuito.

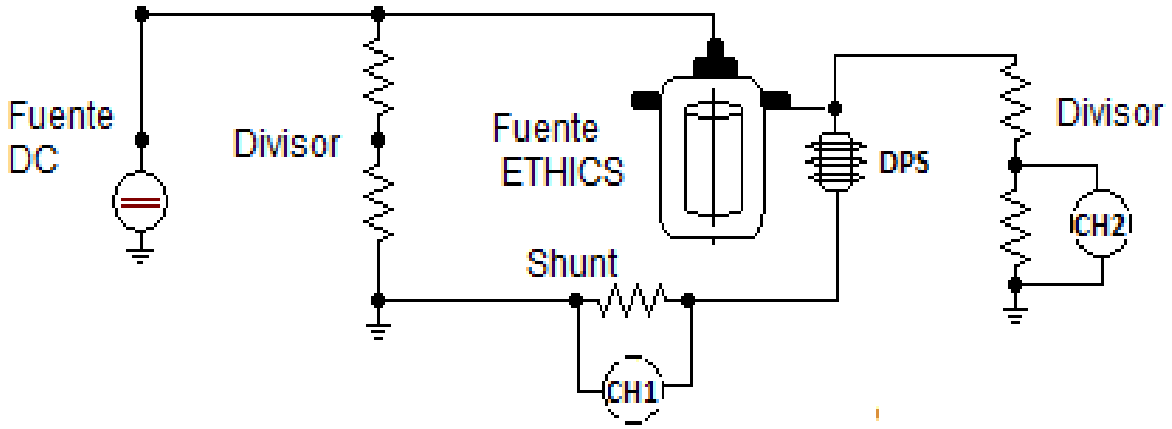


Fuente: A. Alarcón, C. Gómez, F. Santamaría, and F. Román, “Study of the behavior of the corona current under controlled environmental conditions,” in X International Symposium on Lightning Protection ICLP, ISSN, 2009, pp. 2176–2759.

En esta investigación, el objeto de prueba fueron los seis descargadores a los cuales se les hizo circular corriente para obtener su característica tensión- corriente mediante el uso de un divisor resistivo de 50 kV y una resistencia shunt de 1 kΩ construida, los cuales fueron calibrados en el laboratorio LABE, empleando equipos con trazabilidad metrológica al sistema internacional. La señal fue registrada empleando un osciloscopio

Agillent modelo DSO6104A del grupo EMC-UN. La Figura 3-6 muestra el diagrama de circuito y el montaje empleado.

Figura 3-6: Circuito experimental DC – ETHICS empleado, diagrama de circuito



Durante la implementación del método propuesto se realizó una primera medición de la característica tensión-corriente de los descargadores antes de comenzar pruebas a fin de conocer su estado inicial.

De acuerdo a la metodología establecida en el método, luego de la aplicación de cada impulso de corriente y pasado un tiempo de 1 hora, la característica V-I de cada una de las muestras fue obtenida. Los resultados de estas mediciones son presentados en el capítulo 4.

3.4.2 Circuito experimental AC e Impulso

El segundo circuito propuesto para el trabajo de investigación fue el circuito de AC e Impulso, cuya función era la de simular las condiciones de operación normal del descargador en la red, mientras permitía simultáneamente aplicar un impulso de corriente a cada uno de las muestras. El autor tomo como referencia los circuitos implementados por Ramos y Torres [29], así como por Poveda [25] realizando algunas modificaciones de forma que se adaptasen a las necesidades del método de envejecimiento propuesto.

El primer componente del circuito es el Generador de Impulsos de Corriente - GIC del laboratorio LABE, el cual está diseñado para generar impulsos de corriente de tipo rayo (4/10 µs y 8/20 µs) y tipo maniobra (1ms y 2 ms).

Tabla 3-2: Características generador de impulsos de corriente

Generador de Impulsos de corriente – GIC	
Máxima Tensión de carga	100 kV – (83 kV)
Energía Máxima de carga	80 kJ – (55 kJ)
Secuencia de impulsos	(1/min)
Número de condensadores	8
Capacidad de cada condensador	2 µF
Energía por condensador a la máxima tensión de carga	10 kJ - (7 kJ)
Peso	2300 kg
Diámetro	4,5 m
Altura	2,8 m

El segundo componente del circuito experimental es la fuente AC empleada para aplicar la tensión MCOV a los descargadores probados. Se empleó un transformador de 25 kVA, con tensión primaria nominal de 13,2 kV y secundaria de 220/110 V. El transformador fue alimentado por medio de un Variac de forma que fuese posible aplicar los 10,2 kV correspondiente al MCOV de las muestras probadas.

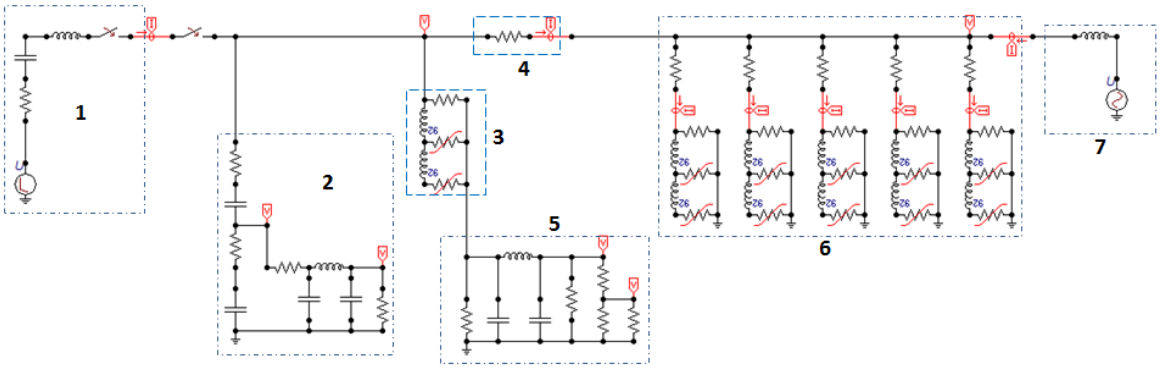
Tabla 3-3: Características de la fuente AC empleada

Transformador Siemens		
Potencia		25
Núm. Fases:		2
Tensión	Primario [kV]	13,2
	Secundario [V]	240 – 120
Corriente	Primario [A]	1,89
	Secundario [A]	104 – 208
Tensión CC (%)		1,62

Dado que el GIC no fue diseñado para operar simultáneamente con tensión AC sobre la muestra, fue necesario realizar algunas modificaciones en el mismo. Otro punto fundamental para la correcta y segura operación del circuito de AC e Impulso, tiene que ver con desacoplar el transformador del generador en el momento de la descarga de

corriente, de modo que la misma circulase por el descargador y no así por el devanado del transformador. Para esto se adicionó una resistencia de agua entre las dos fuentes como se muestra en la Figura 3-7.

Figura 3-7: Circuito experimental equivalente de AC e Impulso

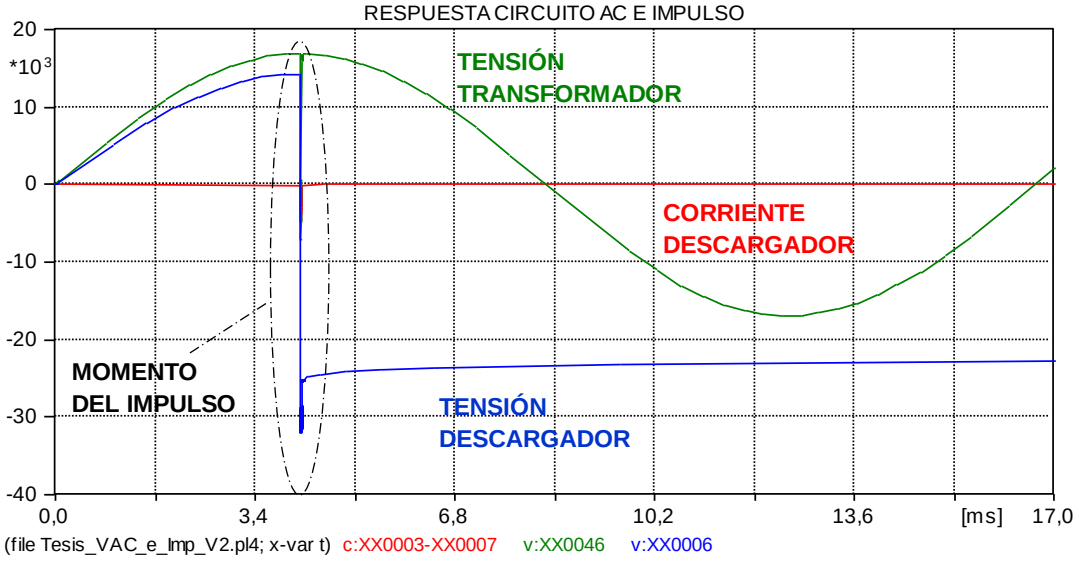


1. Generador de impulsos de corriente
2. Divisor capacitivo amortiguado
3. Descargador bajo prueba
4. Resistencia de agua
5. Resistencia shunt
6. Conjunto descargadores restantes
7. Fuente AC

Se construyeron un total de seis (6) resistencias de agua con un valor de aproximadamente 100 kΩ de manera que entre cada descargador y la fuente AC existiera una, asegurando que en el momento del impulso y la aparición de la tensión residual sobre el descargador, el transformador no se viese afectado por la sobretensión.

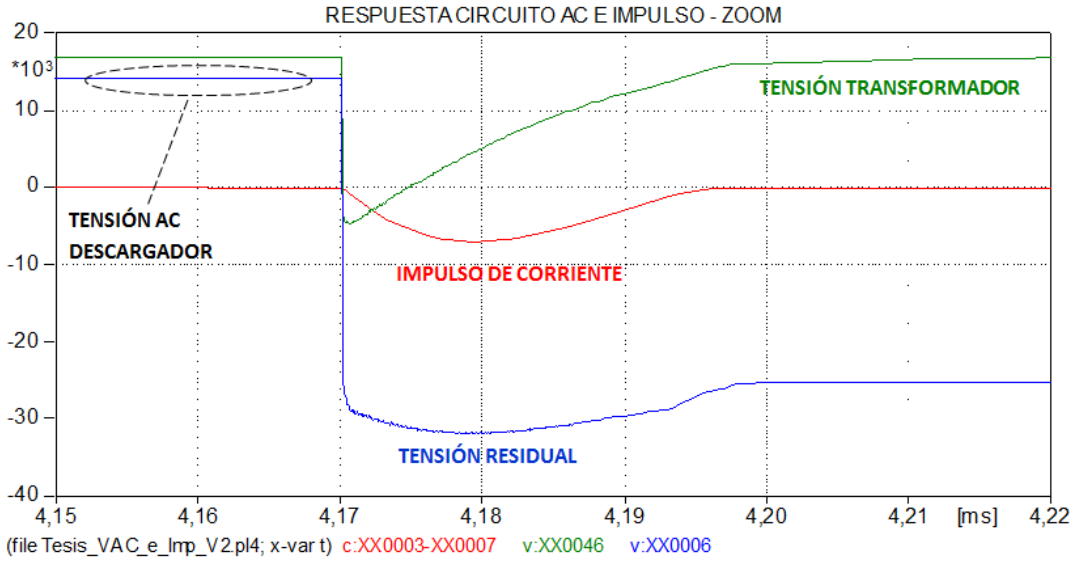
El circuito completo fue simulado con ayuda del software EMPT-ATP, para evaluar la correcta operación de todo el sistema incluyendo los seis descargadores. La Figura 3-8 presenta las tensiones esperadas tanto en el descargador como en las terminales de transformador.

Figura 3-8: Forma de onda de tensión esperada en fuente AC y descargador bajo prueba



Al realizar un zoom sobre la señal en el momento del impulso podemos observar más claramente la corriente de impulso así como la aparición de la tensión residual sobre el descargador.

Figura 3-9: Forma de onda de tensión esperada en fuente AC y descargador bajo prueba



Se puede apreciar la sobretensión que aparece en los terminales del transformador debido a la corriente de impulso, la cual, por efecto de la resistencia de agua, no representa un peligro para la seguridad de la fuente AC. También es posible ver lo que venía sucediendo con el descargador justo antes del impulso, esto es, la señal AC aplicada sobre el mismo.

Se debe considerar que el GIC fue diseñado para probar una sola muestra ubicada en el centro de su configuración radial, reduciendo al máximo la longitud de las conexiones requeridas, minimizando el efecto de lazos inductivos para garantizar los tiempos de la forma de onda. En este sentido uno de los problemas que se enfrentaron durante la implementación del método correspondió a la conexión física entre el generador de impulsos de corriente, los seis descargadores y la fuente AC. Trabajos previos [25], [29] hicieron uso de una estructura metálica para soportar las muestras, sin embargo sus dimensiones hacían necesario tener distancias considerables hacia los elementos energizados del circuito generador, por lo que las conexiones al mismo se hacían más largas.

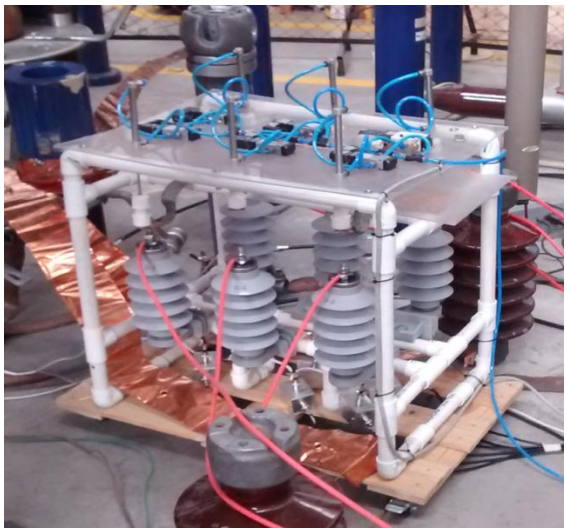
Como alternativa al uso de la estructura metálica, se realizó el diseño y construcción de una estructura aislada, hecha en PVC, de modo que minimizará el riesgo de descargas hacia la misma tanto en la operación en AC como en el momento del impulso, cuando se presenta la mayor sobretensión debida a la tensión residual del descargador. La Figura 3-10 presenta la estructura construida.

Esta nueva estructura mucho más liviana permitió no solo reducir el tamaño sino las distancias respecto al generador con lo cual las conexiones también fueron acortadas. Se especificó el uso de flejes de cobre para realizar las conexiones al generador de manera que la corriente de impulso tuviese el camino de menor impedancia posible.

La selección de la muestra para la aplicación del impulso de corriente se realizó con la ayuda de un sistema neumático, el cual fue implementado sobre la estructura aislante. El sistema que emplea seis (6) pistones operados por igual número de electroválvulas para controlar el paso de aire a presión, hace las veces de interruptor, cerrando el circuito del generador de impulsos a través del descargador seleccionado. De esta manera la

corriente 8/20 µs circula a través de la muestra mientras permanece energizada con tensión AC

Figura 3-10: Estructura aislada en PVC construida.



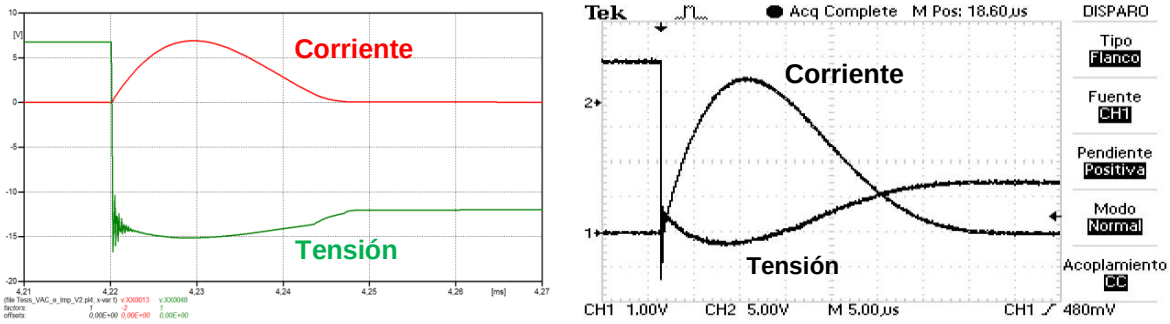
Una vez aplicado del impulso de corriente el pistón es accionado abriendo el circuito del generador, dejando al descargador solamente con su tensión alterna de alimentación. El proceso anteriormente descrito se repitió para cada una de las seis muestras. El anexo C presenta detalles acerca de la estructura aislada empleada durante las pruebas.

En referencia a la medición se definió el uso de un sistema alternativo al que viene de fábrica con el generador de impulsos de corriente. Esto a fin de registrar los datos mediante un osciloscopio Tektronics modelo TDS1012B. La medición de corriente se realizó a través de la resistencia shunt del GIG con valor de 5,4 mΩ. Para la tensión residual por su parte, se adaptó un divisor capacitivo amortiguado empleado para la medición de impulsos rápidos, para el cual fue necesario construir una nueva capacidad en la rama de baja a fin de ajustar una relación de transformación apropiada para la entrada del osciloscopio empleado.

El divisor empleado se instaló en paralelo a la estructura de modo que estuviese conectado lo más cerca posible a las muestras para medir su tensión prácticamente en

terminales. Este mismo divisor fue empleado para realizar la medición de la tensión alterna aplicada a cada muestra. La corriente de fuga por su parte fue medida a través de resistencias shunt construidas para cada una de las muestras. Cada una de las resistencias fue calibrada en el Laboratorio de metrología de LABE.

Figura 3-11: Respuesta del divisor capacitivo - medición tensión residual en la rama de baja, a) Respuesta simulación, b) Respuesta medición real.



a) Respuesta simulación. b) Respuesta medición real.

La Figura 3-11 presenta la respuesta de los sistemas de medición de tensión y de corriente ante un impulso tipo rayo 8/20 µs. Como se observa en la gráfica, la forma de la respuesta en tensión y en corriente para la rama de baja construida, así como para el acople y medición de la corriente, coinciden con los descritos en la simulación.

El anexo D presenta todos los detalles referentes a los elementos diseñados y construidos tanto para la medición de tensión como para la medición de corriente. Las pruebas ejecutaron hasta llevar a falla cada una de las seis muestras de descargadores probadas, tal y como se estableció en el método propuesto.

Capítulo 4: Resultados y análisis

Como se describió en el capítulo anterior, un total de seis muestras de descargador, fueron probadas aplicando el método de envejecimiento propuesto. Las pruebas se realizaron hasta llevar a falla cada una de los descargadores. En este punto es importante precisar que se consideraron como falla dos situaciones, la ruptura física del descargador (ruptura de polímero por fragmentación de pastilla de ZnO) y la muy baja impedancia de la muestra, lo que se traduce en una falla del sistema de alimentación de AC. En este sentido la Tabla 4-1 presenta el resumen de las muestras cuyos resultados se detallan en este capítulo.

Tabla 4-1: Cuadro resumen envejecimiento descargadores empleados en el estudio

Muestra	Número de impulsos soportados	Tipo de falla
S-1	47	Ruptura
S-2	42	Baja impedancia (Corto)
S-3	52	Baja impedancia (Corto)
S-4	6	Baja impedancia (Corto)
S-5	57	Ruptura
S-6	20	Baja impedancia (Corto)

Considerando el hecho de haber empleado tres tipos de circuitos para llevar a cabo el método de envejecimiento propuesto de los descargadores, se presentan a continuación los resultados obtenidos desde cada uno de los mismos.

4.1 Resultados en DC

4.1.1 Característica V – I

Como se describió en el capítulo 3, se empleó la Fuente de Corriente de Extra Alta Impedancia [1] para obtener la característica V – I (tensión – corriente) de cada uno de los descargadores sometidos a envejecimiento acelerado por el método propuesto en este trabajo. A continuación se presentan algunas de las respuestas obtenidas para cada muestra a lo largo del tiempo de pruebas. Para cada una de las gráficas se identifica en color azul y con el número cero (0), la curva V - I obtenida para las muestras antes de iniciar el envejecimiento (muestras nuevas). En color rojo se presentan las curvas obtenidas luego de aplicar impulsos de corriente 8/20 µs. El número que acompaña a cada curva corresponde al impulso después del cual se realizó la medición empleando la fuente de corriente ETHICS.

Figura 4-1: Característica V – I para la muestra S-1

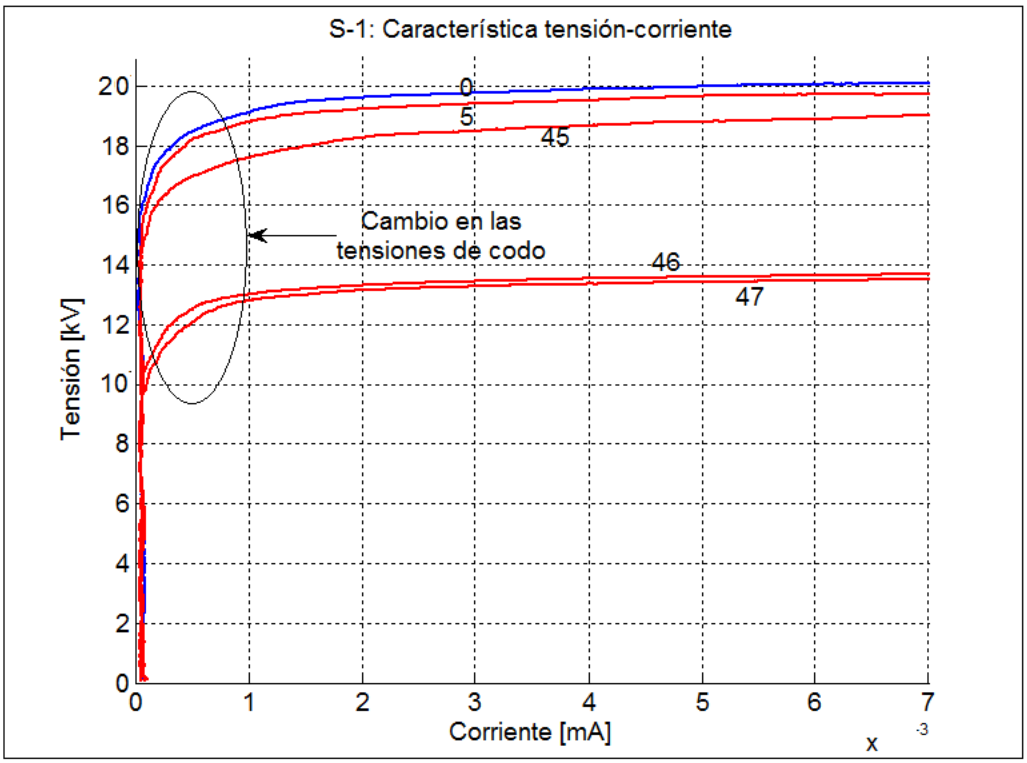


Figura 4-2: Característica V – I para la muestra S-2

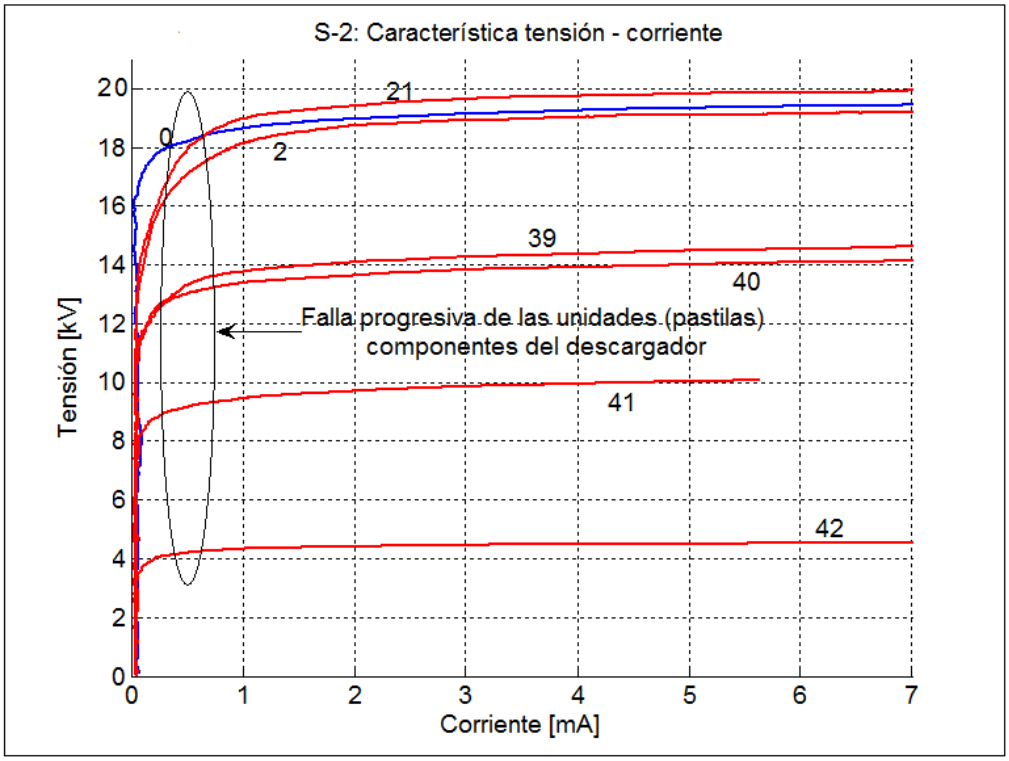


Figura 4-3: Característica V – I para la muestra S-3

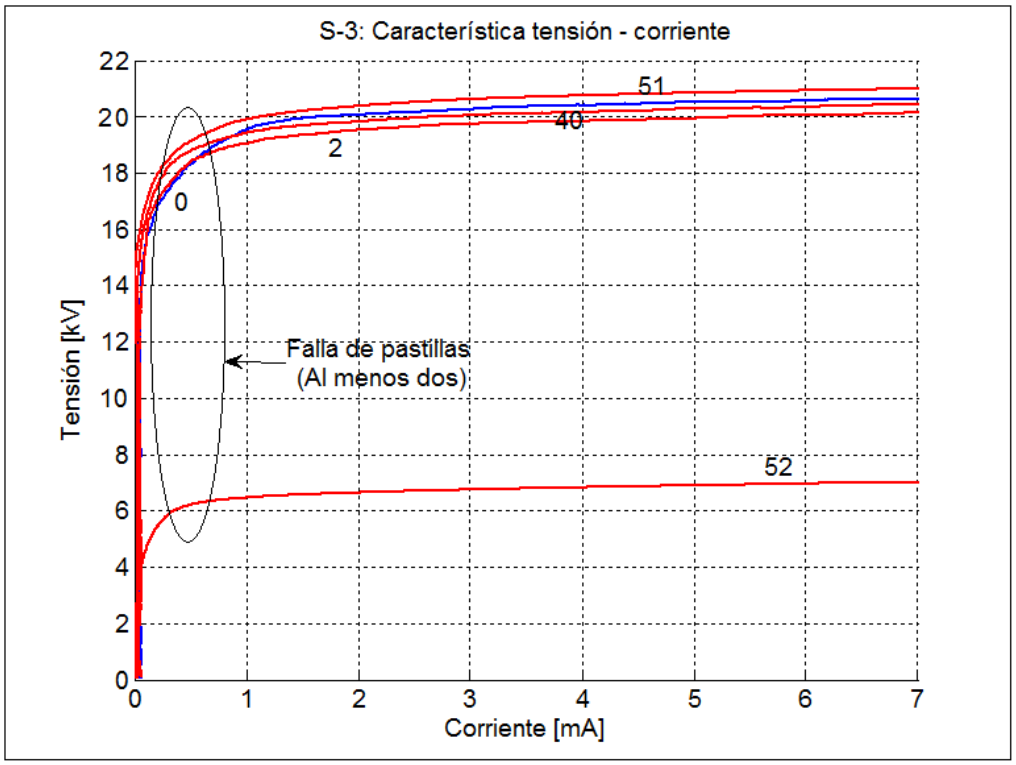


Figura 4-4: Característica V – I para la muestra S-4

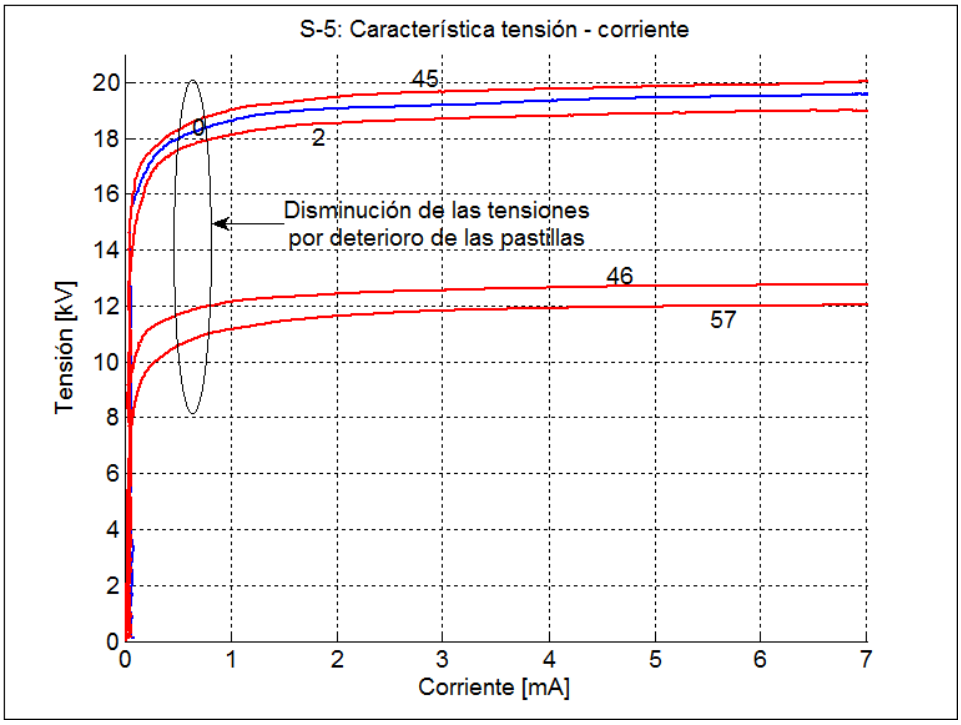


Figura 4-5: Característica V – I para la muestra S-5

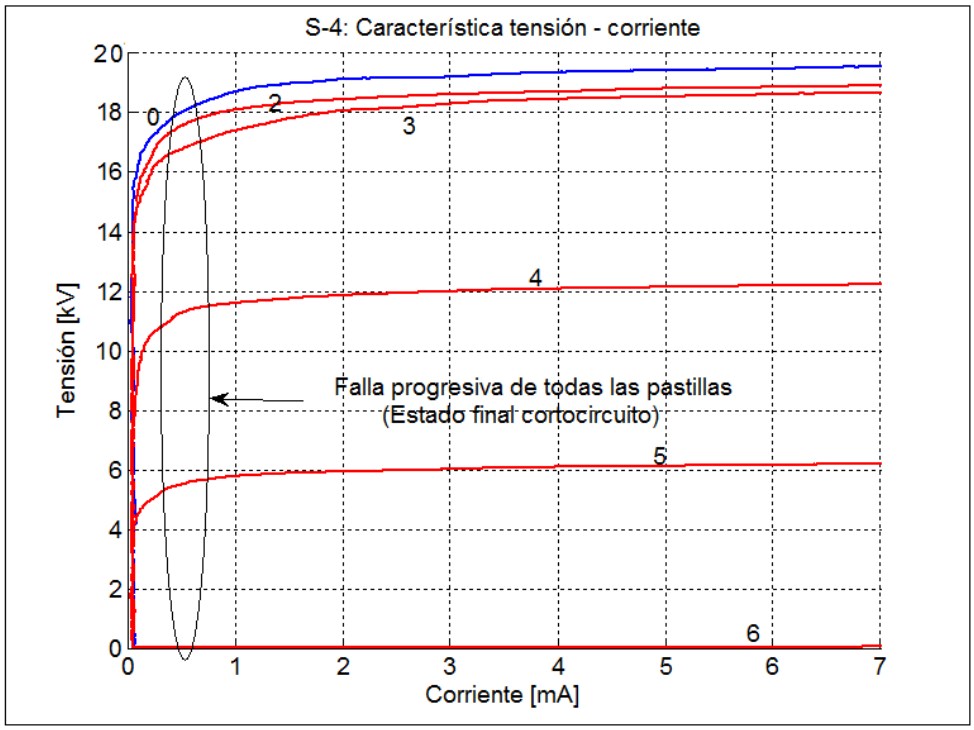
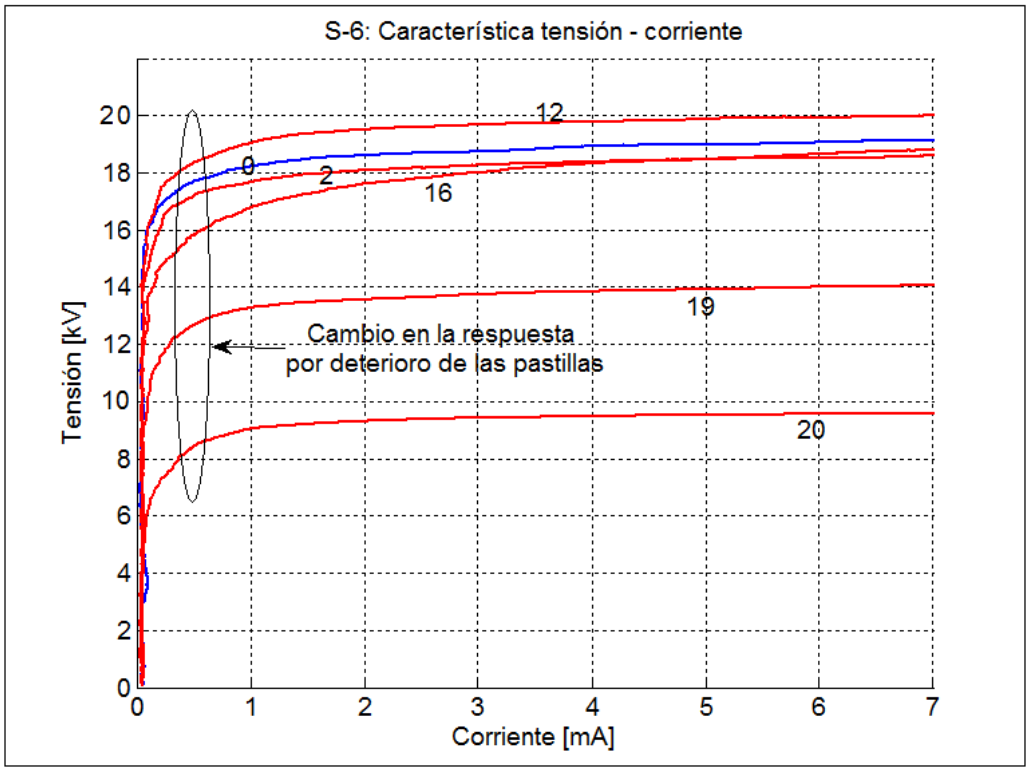


Figura 4-6: Característica V – I para la muestra S-6



A partir de las curvas V – I obtenidas para cada una de las muestras probadas se identifica que el envejecimiento provoca cambios en la manera como estos responden a los incrementos de corriente. La degradación que sufren las pastillas de óxido de zinc que componen el descargador se traduce en cambios en la tensión que aparece hacia el final de su vida.

Como pudo observarse en las muestras 1, 2, 3, 4 y 6, los cambios fuertes en tensión no son continuos, sino que se presentan de manera escalonada, lo que se explica por la forma constructiva del descargador, cuya respuesta es la suma de las respuestas de las pastillas que lo constituyen. Cuando se presenta la falla de una de las pastillas, inmediatamente la respuesta recae sobre las pastillas restantes lo que produce en una disminución en el nivel de tensión para un mismo nivel de corriente.

La disminución en la tensión umbral de conducción (codo de la curva), representa un riesgo para la operación del sistema, ya que con pastillas degradadas o en falla, un descargador puede entrar en conducción a las tensiones de operación nominal del

sistema, como fue evidente durante la realización del presente trabajo, en el cual algunas de las muestras tuvieron que ser retiradas al presentar una muy baja impedancia y circulación de corriente elevada (del orden de miliamperios) que provocaron la caída en la tensión del sistema de alimentación AC.

4.1.2 Tensión de referencia DC

Uno de los parámetros importantes a la hora de seleccionar un descargador de sobretensión tiene que ver con la tensión de referencia (*U ref o V ref*). Este parámetro se refiere a la tensión asociada al pico de la componente resistiva de la corriente de referencia (declarada por el fabricante) a través del descargador. En este sentido, la tensión de referencia es un indicador del estado del descargador.

A partir de la característica V- I antes determinada y considerando la naturaleza DC de la fuente de corriente empleada, se estimó el valor de la tensión de referencia DC. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la tensión de referencia de las seis muestras sometidas al método de envejecimiento propuesto en función de los impulsos soportados.

Figura 4-7: Tensión de referencia muestra S-1

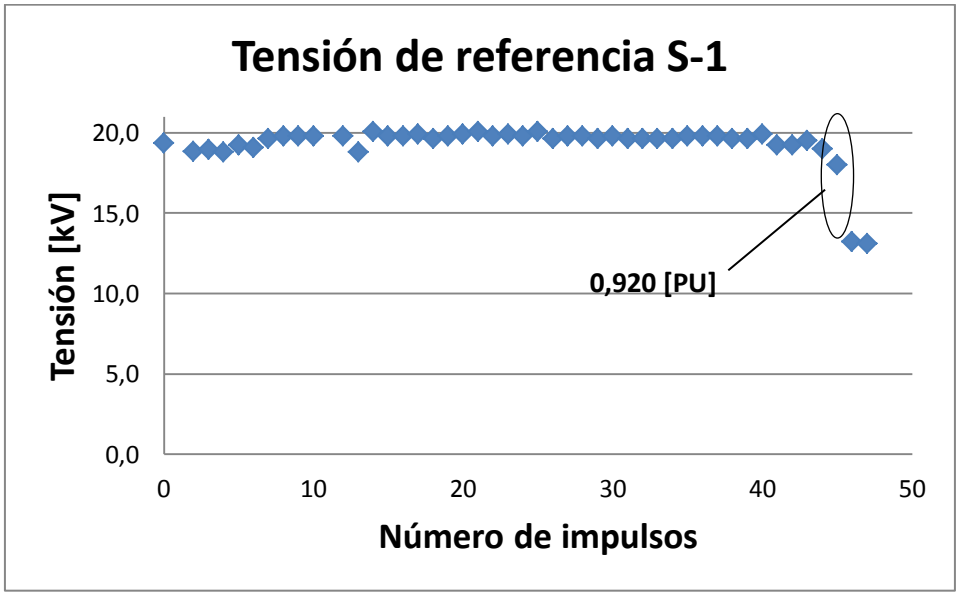


Figura 4-8: Tensión de referencia muestra S-2

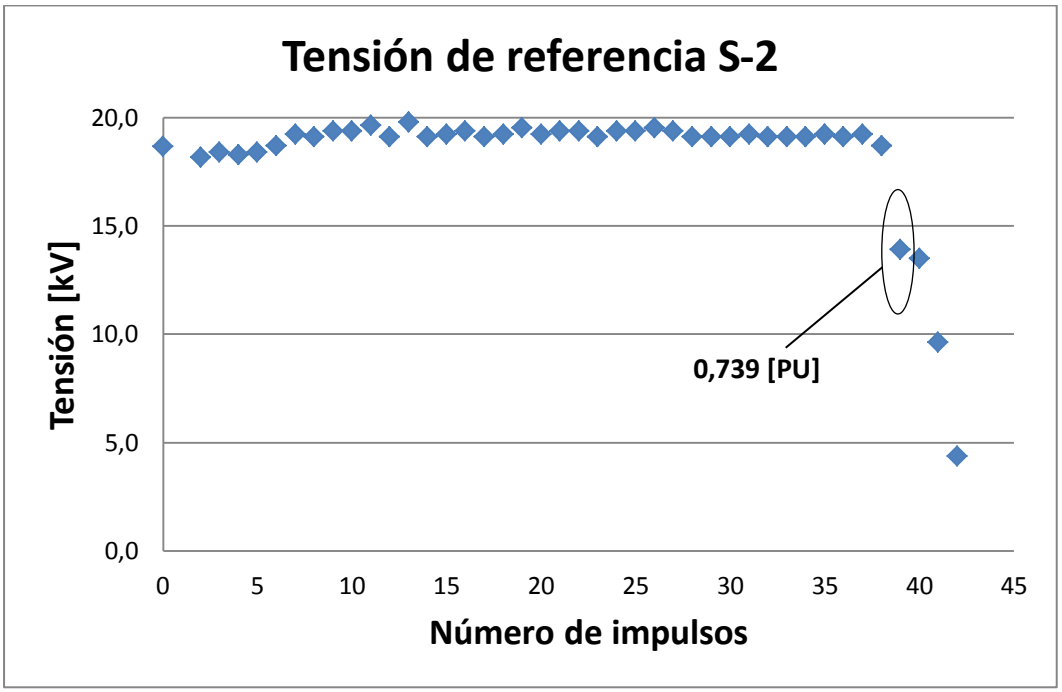


Figura 4-9: Tensión de referencia muestra S-3

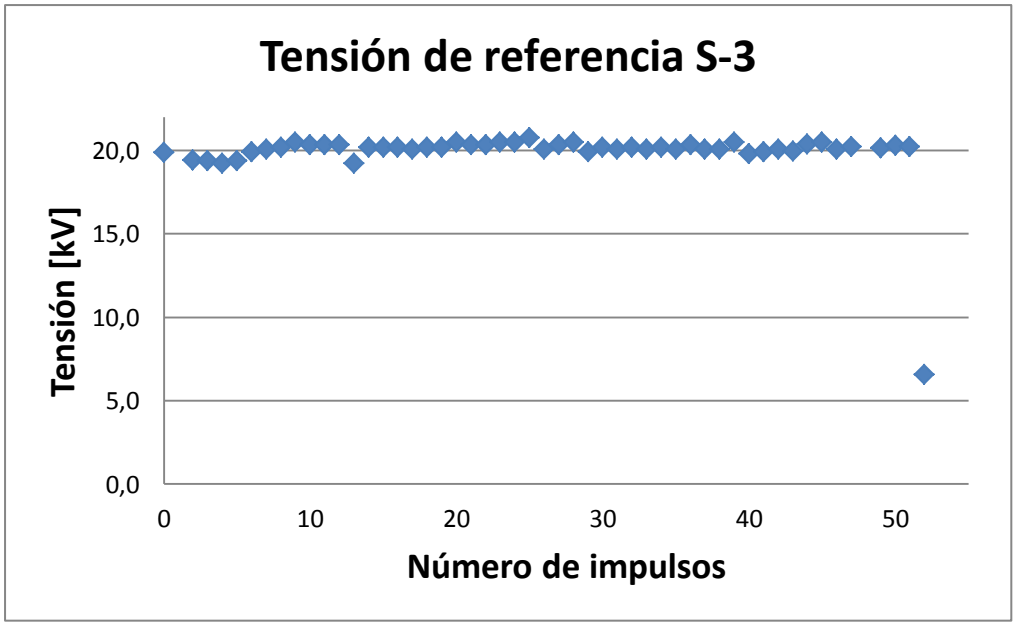


Figura 4-10: Tensión de referencia muestra S-4

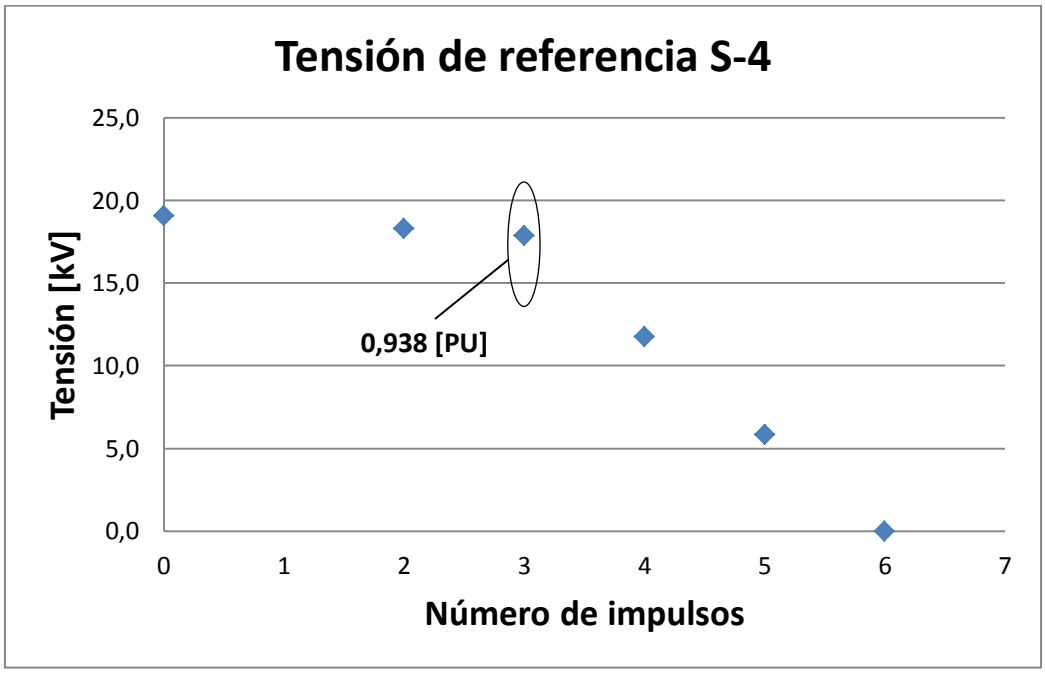


Figura 4-11: Tensión de referencia muestra S-5

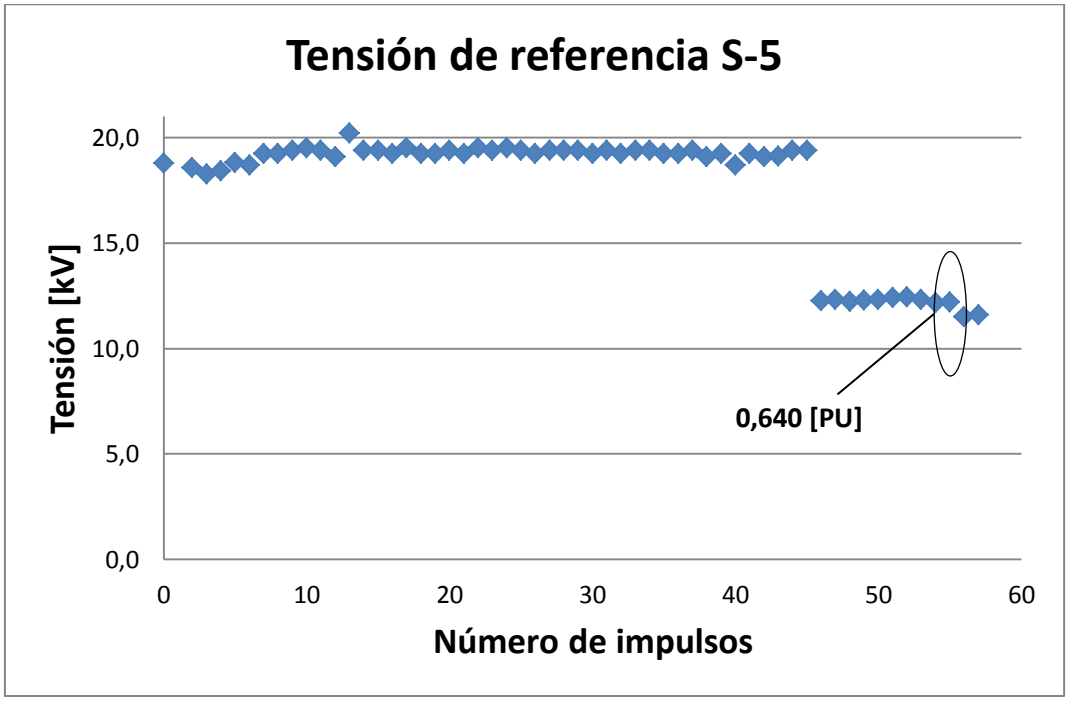
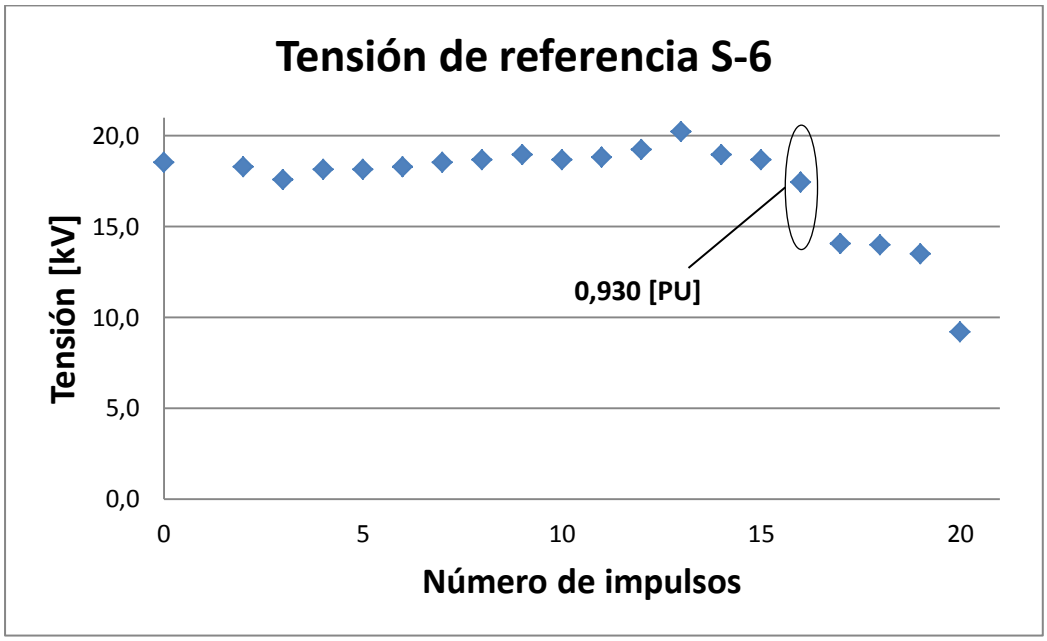


Figura 4-12: Tensión de referencia muestra S-6



Antes de continuar con el análisis de la información se debe indicar que el valor de la tensión correspondiente al primer impulso no fue registrado debido a problemas con el archivo correspondiente al canal de tensión, el cual no pudo ser procesado para análisis.

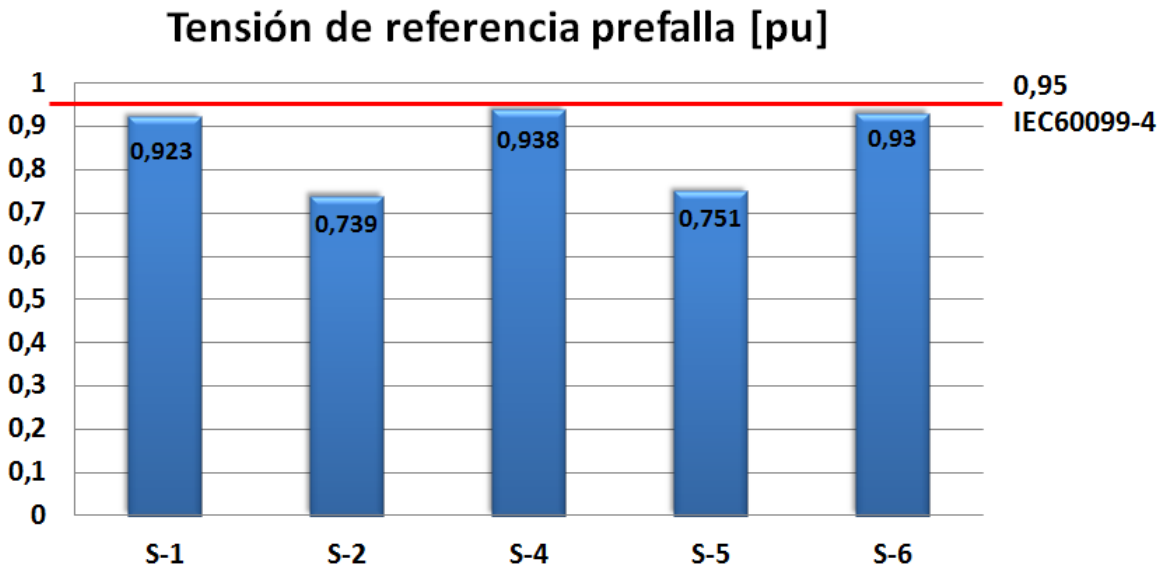
Como se evidencia en cada gráfica, se realizó la estimación de la tensión de referencia desde el estado inicial de cada muestra (nuevas). A partir de este momento se determinó a partir de la curva V – I, la evolución de la tensión en función de los impulsos de corriente aplicados. En este sentido se identifican dos tipos de cambios relacionados con el envejecimiento y falla de las pastillas de ZnO.

Aunque para la mayoría de los casos se evidenció un incremento en la tensión de referencia a medida que se implementaba el envejecimiento, hacia el final de su vida, la degradación de las pastillas se hizo evidente con una disminución de la tensión hasta niveles por debajo de la tensión pico MCOV a la cual se encontraban energizados. Esto hizo que la corriente de fuga en el estado AC fuese mayor, trayendo consigo un aumento en la componente resistiva de la misma, lo que se traducía en una mayor disipación de potencia y un aceleramiento en la degradación de las pastillas por el efecto térmico.

Los cambios o saltos fuertes en los niveles de tensión son indicadores del fallo de al menos una de las pastillas componentes de la unidad de descargador, lo que hace que el dispositivo entre en conducción en niveles de tensión para las cuales no debería operar. En este sentido la tensión de referencia permite determinar el estado del descargador, permitiendo anticipar una posible falla mediante un reemplazo oportuno.

Se determinó un valor de tensión de referencia pre-falla, el cual antecede a un comportamiento anormal en la respuesta del descargador. Este valor se identifica en las gráficas anteriores por encontrarse encerrado en un ovalo y cuyo valor se presenta en por unidad teniendo como valor base el valor medido inicialmente (condición de nuevo) para cada uno de los descargadores.

Figura 4-13: Tensión de referencia prefalla en PU.



Como se puede ver de la Figura 4-13, para 5 de las 6 muestras, cuando la tensión de referencia cayó por debajo del 0,95 PU, esto es, por debajo del 95 % del valor inicialmente medido, el siguiente impulso generó falla en el descargador. Estos resultados corroboran el criterio establecido por el estándar IEC 60099-4 : 2014 [27], para el ensayo de *Repetitive charge transfer rating (Qrs)*, el cual establece como criterio de

rechazo una variación en la tensión residual mayor al ± 5 %. Sin embargo es importante aclarar que este ensayo y el método descrito en este trabajo difieren en la cantidad de impulsos aplicados y la magnitud de los mismos.

4.1.3 Estimación del coeficiente de no linealidad (α)

La curva característica V – I describe la operación no lineal del descargador, la cual está descrita por una relación de tipo potencial, la cual se presenta en la ecuación 4.1:

$$I = kV^{\alpha} \tag{4.1}$$

La ecuación tiene dos constantes, la primera (*k*) se refiere a la parte constructiva de la pastilla de ZnO. La segunda (α), que es la potencia a la que se eleva la tensión, hace referencia al coeficiente de no linealidad que le da la característica a la respuesta del descargador. Este coeficiente puede ser determinado a partir de dos puntos de la curva V – I como se describe en la ecuación 4.2:

$$\alpha = \frac{log_{10}(I_2/I_1)}{log_{10}(V_2/V_1)} \tag{4.2}$$

Aunque inicialmente se intentó aplicar directamente esta expresión a las curvas obtenidas, errores de cálculo hicieron necesario emplear una curva de ajuste mediante el software Matlab, para estimar el coeficiente de no linealidad. Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo E. Los resultados obtenidos presentan variación asociada a condiciones térmicas, las cuales no eran controladas ya que se mantenían dentro de las permitidas por el estándar IEC 60099-4: 2014 [27]. Sin embargo es claro que este parámetro es altamente sensible a la temperatura. Se realiza una estimación para el coeficiente de las muestras nuevas y en el momento de pre-falla encontrándose disminución del α en las muestras, como se presenta en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Estimación del coeficiente de no linealidad

Muestra	α Inicial	α Pre-falla
S-1	48,3	46,5
S-2	53,8	40,5
S-3	47,7	47,6
S-4	51,4	49,0
S-5	48,3	46,9
S-6	48,4	37,4

Si bien se esperaban variaciones en el coeficiente de no linealidad la variabilidad en los datos obtenidos no permite realizar una correcta estimación del comportamiento del mismo. Sin embargo resultados como el obtenido para la muestra S-4 cuyo $\boldsymbol{\alpha}$ estimado en la condición de cortocircuito (estado final) es cercano a uno (1), aportan evidencia para soportar la tesis de una disminución del valor del coeficiente producto de la degradación de las pastillas como lo sugiere el trabajo de Alarcón [24]. Sin embargo se considera necesario realizar nuevos estudios experimentales.

4.2 Resultados en Impulso

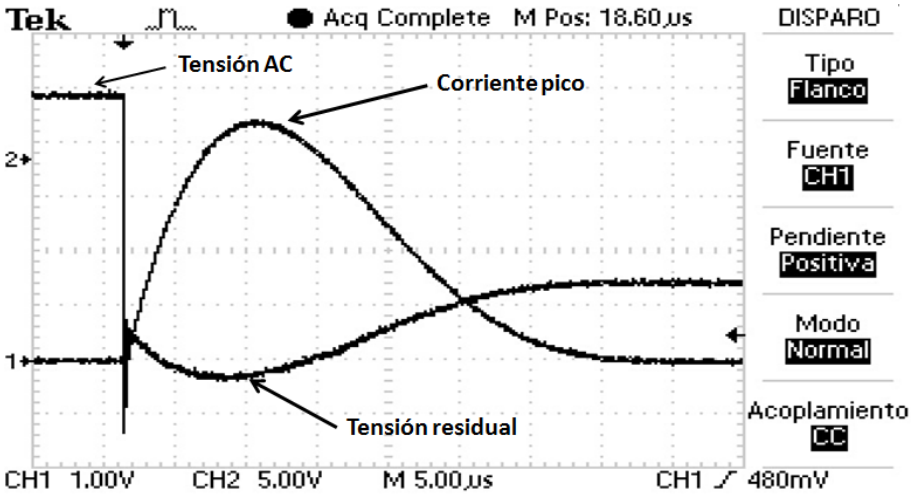
A partir de los oscilogramas de corriente de impulsos y tensión en el descargador se determina la energía aplicada al descargador, a fin de poder determinar una energía acumulada para cada muestra debido a los impulsos aplicados. La energía aplicada se determina como se expresa en la Ecuación 4.3.

$$E = \int v(t)\, i(t)\, dt \tag{4.3}$$

De esta manera, empleando el software Matlab, se procesaron los archivos de tensión y corriente obtenidos mediante el osciloscopio para determinar las energías acumuladas en cada una de las muestras probadas.

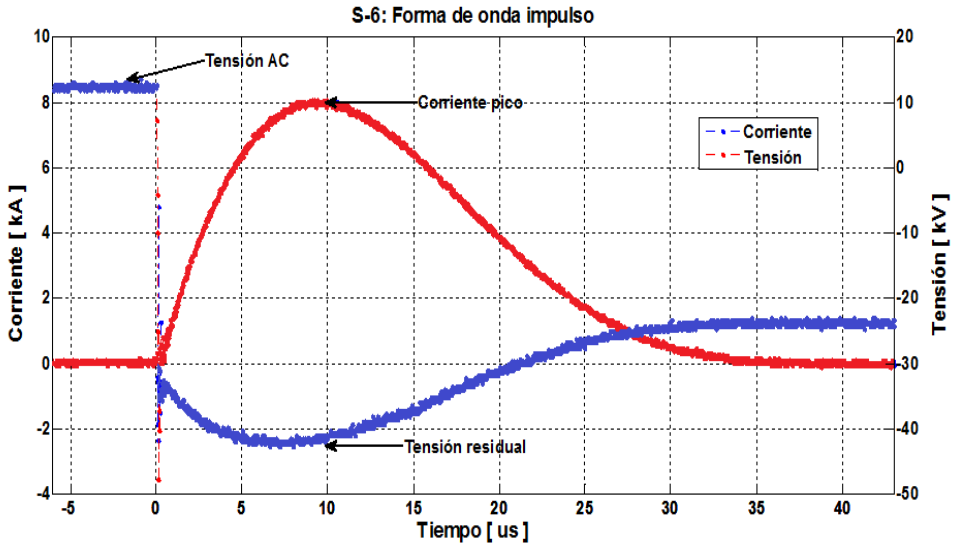
La siguiente figura presenta la medición de uno de los impulsos de corriente y tensión residual realizados sobre una muestra empleada para verificar el sistema de medida y ajustar la corriente de impulso. Se presenta el oscilograma tal y como lo registró el equipo de medición empleado (Osciloscópio Tektronix TDS1012B).

Figura 4-14 Registro de oscilograma de impulso de corriente y tensión residual en descargador.



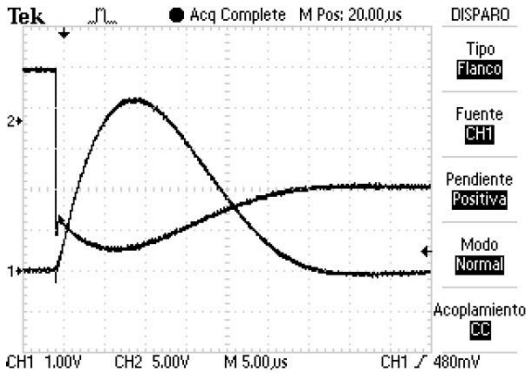
Es importante aclarar que dada la forma en la que la resistencia shunt está conectada en el generador para el circuito de impulso, la corriente aparece registrada en la polaridad opuesta, sin embargo esta es negativa de acuerdo a la tensión de carga del generador empleada para la totalidad de los impulsos realizados. Al igual que para la simulación, en la medición es posible observar la tensión AC sobre el descargador momentos antes de generar el impulso de corriente, durante el cual aparece la tensión residual sobre el descargador. Cada una de las señales obtenidas fue procesada en Matlab aplicando a las mismas el respectivo factor de la resistencia shunt (corriente de impulso) o del divisor capacitivo amortiguado.

Figura 4-15 Oscilograma de impulso de corriente y tensión residual en descargador tratado con el software Matlab para análisis.

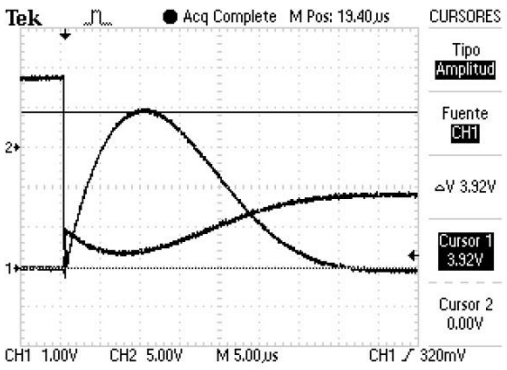


A continuación se presentan algunos de los oscilogramas registrados para cada uno de las muestras probadas:

Figura 4-16 Registro de oscilogramas para cada una de las muestras probadas

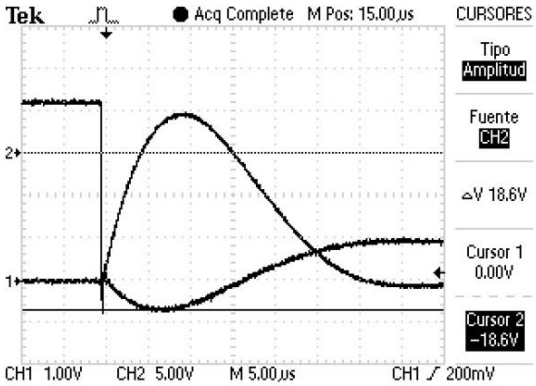


Forma de onda impulso muestra S-1

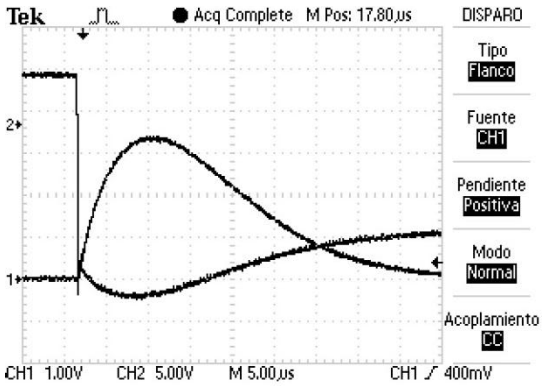


Forma de onda impulso muestra S-2

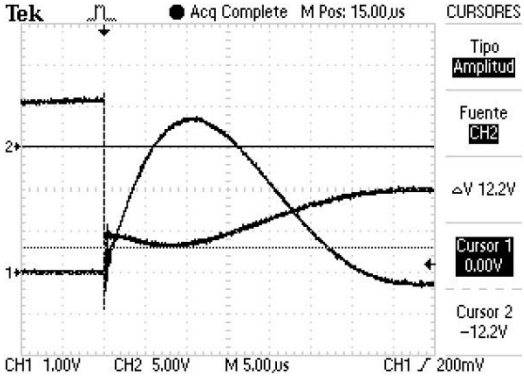
Figura 4-16 Registro de oscilogramas para cada una de las muestras probadas –Continuación-



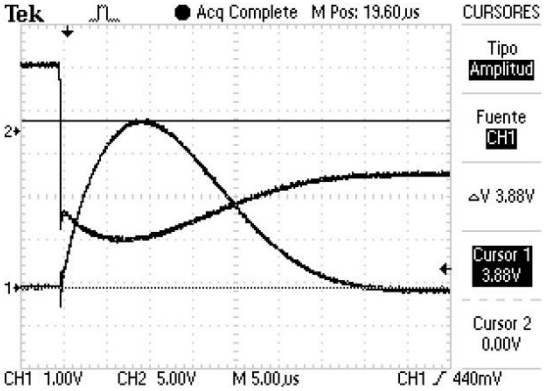
Forma de onda impulso muestra S-3



Forma de onda impulso muestra S-4



Forma de onda impulso muestra S-5



Forma de onda impulso muestra S-6

Se puede ver claramente que la totalidad de los impulsos de corriente ocurrieron cuando la onda de tensión alterna se encontraba en la polaridad opuesta a la tensión de carga del generador, esto es, el impulso (negativo) se presentaba en el semiciclo positivo de la señal de AC. Esto se explica por la forma como se genera el disparo en el generador de impulsos ajustando la distancia del gap de modo que en el momento requerido por efecto del campo eléctrico presente entre los dos casquetes esféricos que forman el gap, la tensión venza la rigidez dieléctrica del aire y se produzca la descarga. Cuanto mayor sea la tensión, más fácil se dará la descarga. En este sentido, es claro que si uno de los electrodos esta con el potencial de la tensión de carga requerida para el impulso y el otro esta con el potencial de la señal AC sobre el descargador, la mayor diferencia de

potencial se presenta cuando la señal de AC se encuentra en su valor máximo de la polaridad opuesta a la carga del generador. En este sentido es importante aclarar que para este trabajo, no se especificó que el disparo se realizaría en algún punto particular de la onda de 60 Hz. A continuación se presentan los resultados de tensión residual y amplitud de corriente de impulso para algunas de las muestras probadas:

Figura 4-17 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-1.

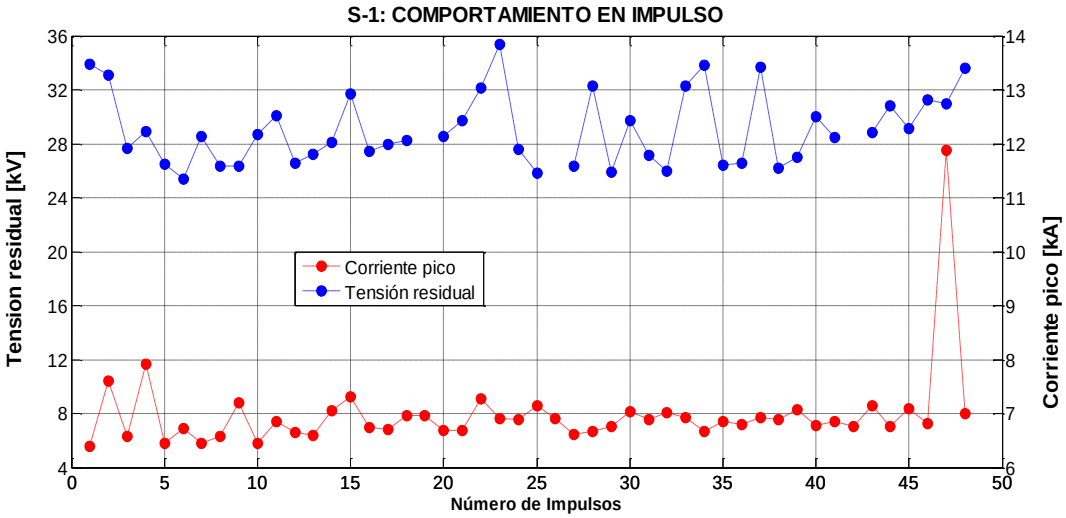


Figura 4-18 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-3.

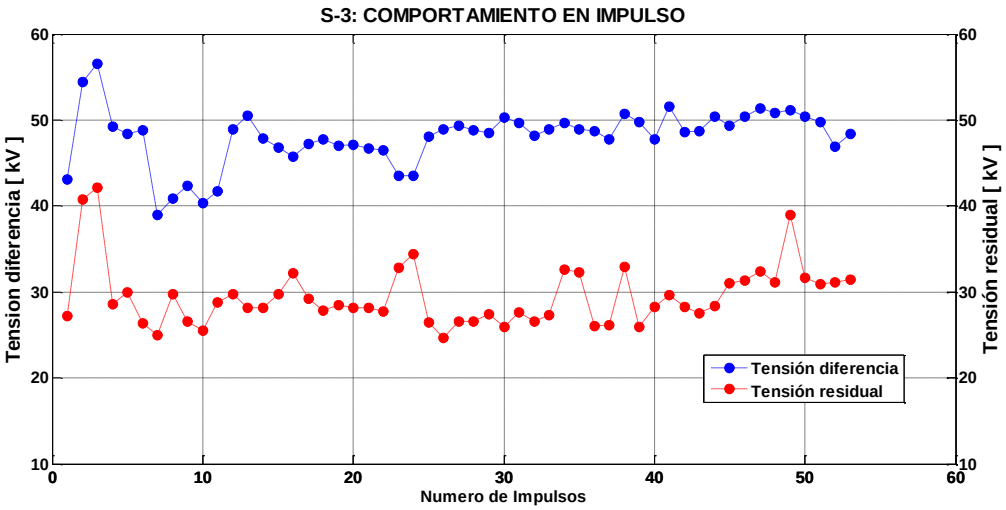


Figura 4-19 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-4.

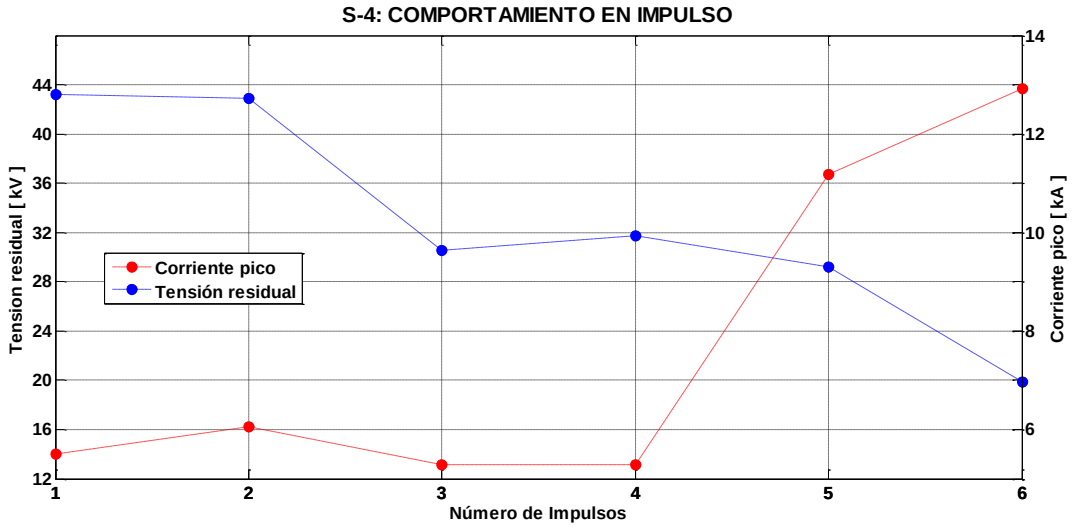
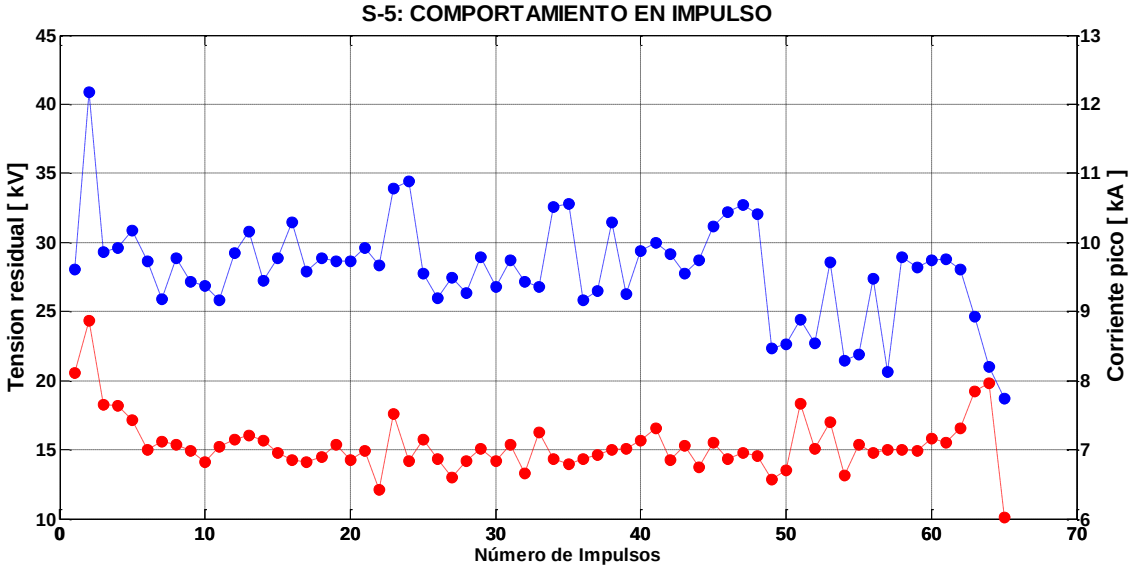


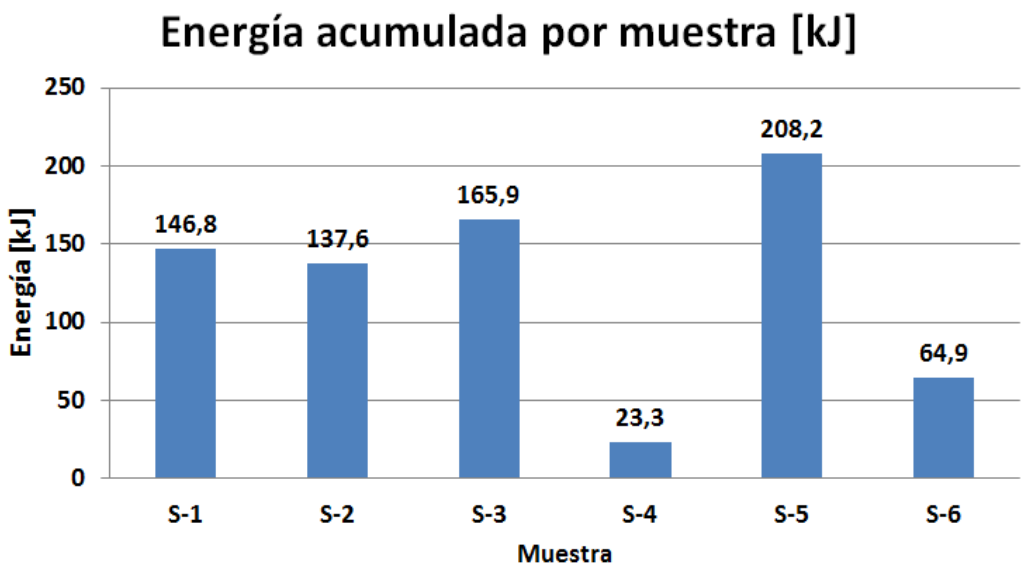
Figura 4-20 Comportamiento de la tensión residual y corriente de impulso para la muestra S-5.



Las figuras permiten determinar que se presentan variaciones de la tensión residual, debidas entre otros, a la variación de la corriente de impulso. En este sentido es importante indicar que no existen dos impulsos iguales, esto es, aunque se apuntó a los 7 kA definidos para el método, la degradación de los descargadores hacía necesario el reajuste de la tensión de carga del generador cada vez que se aplicara un impulso de corriente. En pocas palabras las corrientes de impulso no eran exactamente las mismas (con pequeñas variaciones) y el estado del descargador cambiaba con cada impulso. No es posible entonces comparar una a una las tensiones residuales, sin embargo si se observar para algunos de ellos una disminución de la tensión hacia el final de su vida útil.

Para el caso de la energía acumulada por cada descargador, como se mencionó anteriormente, empleando el software Matlab, se procesaron los archivos de tensión y corriente obtenidos mediante el osciloscopio y a partir de la ecuación (4.3) se estimó la energía total en cada descargador como se presenta en la Tabla 4-3.

Figura 4-21: Estimación energía acumulada por muestra



A partir de los resultados obtenidos es claro que no existe homogeneidad en el comportamiento de las muestras en cuanto a su vida útil. Esto se ve reflejado en la energía acumulada por muestra que tiene un mínimo de 23,3 kJ (muestra S-4) y un máximo de 208,2 kJ (Muestra S-5). Estos resultados están muy lejos de los aproximadamente 2 MJ alcanzados por Torres y Ramos en su trabajo [29] y aun es menor que el mínimo de 336,6 kJ alcanzado por Poveda [25]. Sin embargo hay que resaltar que existen variaciones importantes en los métodos de envejecimiento empleados anteriormente y el propuesto en este trabajo.

Considerando el método de envejecimiento aplicado, el cual buscaba simular algunas de las condiciones en la red, hay que decir que resulta un mal indicador que algunas de las muestras solo soporten 6 o 20 impulsos antes de fallar. Esto si se tiene en cuenta que muchos de ellos son instalados en zonas rurales donde un mantenimiento o cambio puede tomar días, afectando a los usuarios y poniendo en riesgo los transformadores instalados en estos lugares apartados.

Retomando el circuito que se empleó para determinar la corriente de impulso, hay que recordar que es un ejemplo representativo de un circuito ubicado en una zona de alta densidad de descargas a tierra, por lo que la situación aquí planteada es real, la calidad de los dispositivos de protección empleados por las empresas de distribución debe ser evaluada.

ESTIMACIÓN DE ENERGIA APORTADA POR LA CORRIENTE DE AC EN EL MOMENTO DEL IMPULSO

En este punto, es importante indicar que durante la aplicación del impulso, solo se realizó la medición de la corriente que circulaba a través del descargador bajo prueba, mediante la resistencia shunt del generador y la tensión en los terminales del mismo, mediante un divisor capacitivo amortiguado (Ver Figura 3-7 Circuito AC e impulso).

Dado que las mediciones se realizaron como se describió anteriormente, no se tiene registro de la corriente AC entregada por la fuente al descargador en el momento del impulso. En este sentido, la información que se describe en esta sección, se refiere a los resultados obtenidos por simulación del circuito de AC e Impulso empleado para el

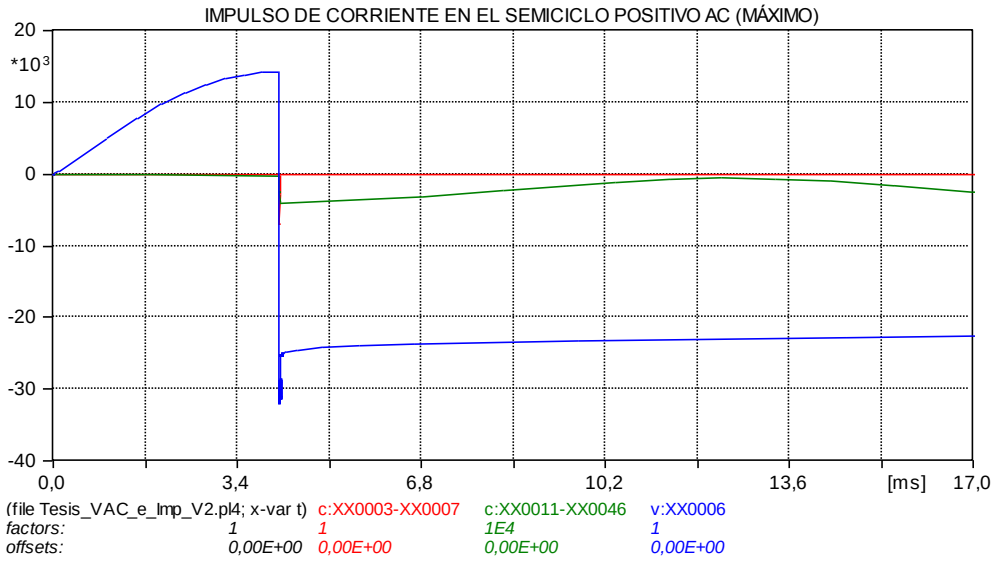
envejecimiento para el cual se determinó la corriente entregada por la fuente de tensión alterna al descargador en el momento del impulso y con la cual se realizó la estimación de la energía absorbida por el objeto de prueba debido a la señal AC en comparación con el impulso de corriente.

Para efectos de la estimación de la energía aportada por la corriente de 60 Hz se consideraron tres situaciones, esto es, ocurrencia del evento en el máximo (semi ciclo positivo), cruce por cero y en el mínimo (semi ciclo negativo) de la señal AC.

A. Ocurrencia del impulso en el máximo de la señal de AC (semiciclo positivo)

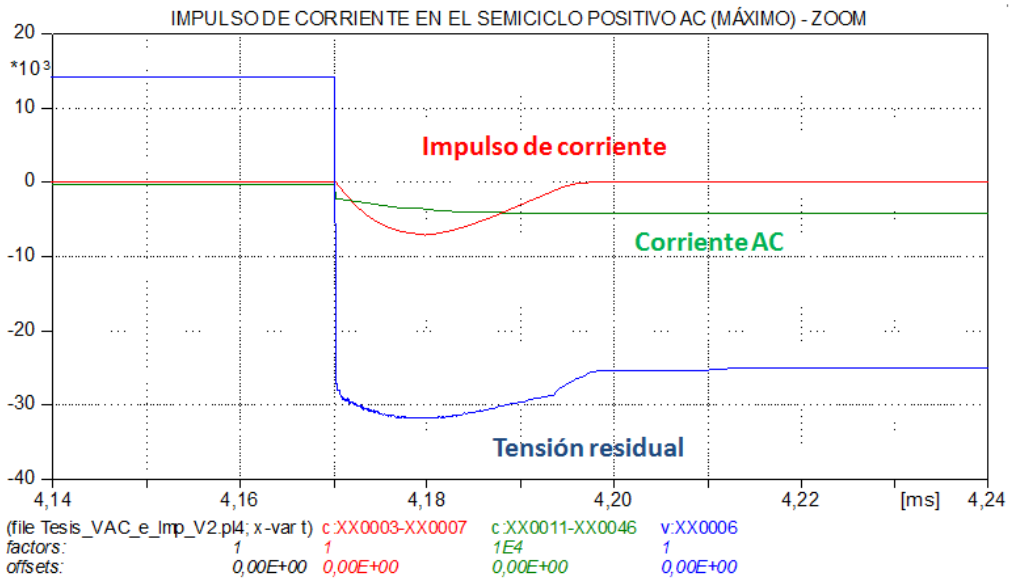
La siguiente figura muestra el instante para el cual, el impulso de corriente se produce en el valor máximo de la señal de AC, esto es en el semiciclo positivo. La corriente de AC (de color verde) entregada por la fuente al descargador ha sido amplificada por un factor de 10000, de modo que pueda ser observada.

Figura 4-22: Impulso en semiciclo positivo de señal de AC



Como se puede observar en la forma de onda, cuando curre el impulso en el máximo de la tensión AC, la tensión en el descargador (en color azul) cambia rápidamente en respuesta a la corriente 8/20 que circula a través de él. En color verde está la corriente AC entregada por la fuente al descargador y en color rojo la corriente de impulso. Al realizar un zoom en el instante del impulso se puede identificar el comportamiento de las señales a través del descargador.

Figura 4-23: Impulso en semiciclo positivo de señal de AC – Zoom



A partir de los resultados de la simulación con ATP Draw, se obtuvieron los archivos .csv de las señales con los cuales se estimó la energía en el descargador debida al impulso de corriente y la fuente de AC, de la misma forma que se realizó con los datos obtenidos de las pruebas para corriente de impulso y la tensión residual (punto a punto). La estimación se realizó considerando solo el tiempo de duración de la señal de impulso de corriente.

B. Ocurrencia del impulso en cruce por cero de la señal de AC

Figura 4-24: Impulso en cruce por cero de señal de AC

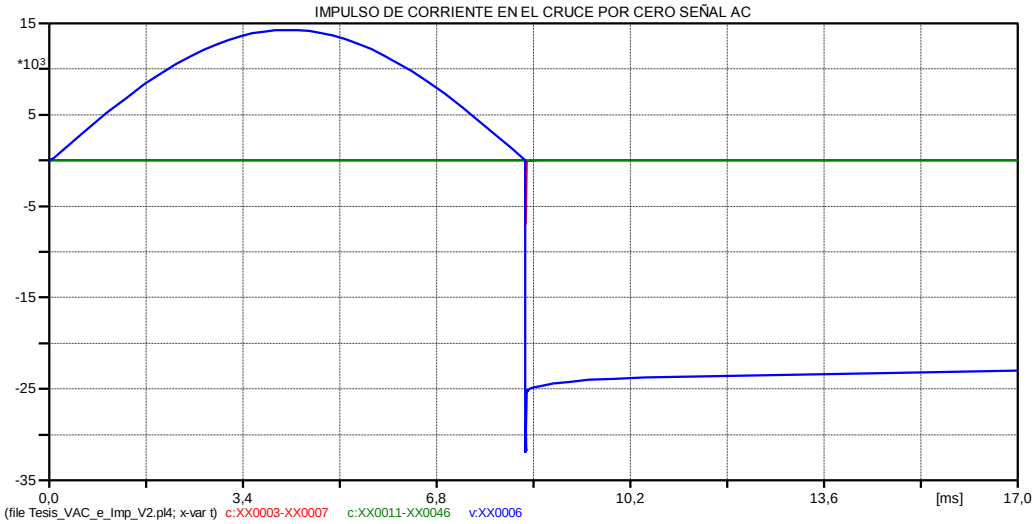
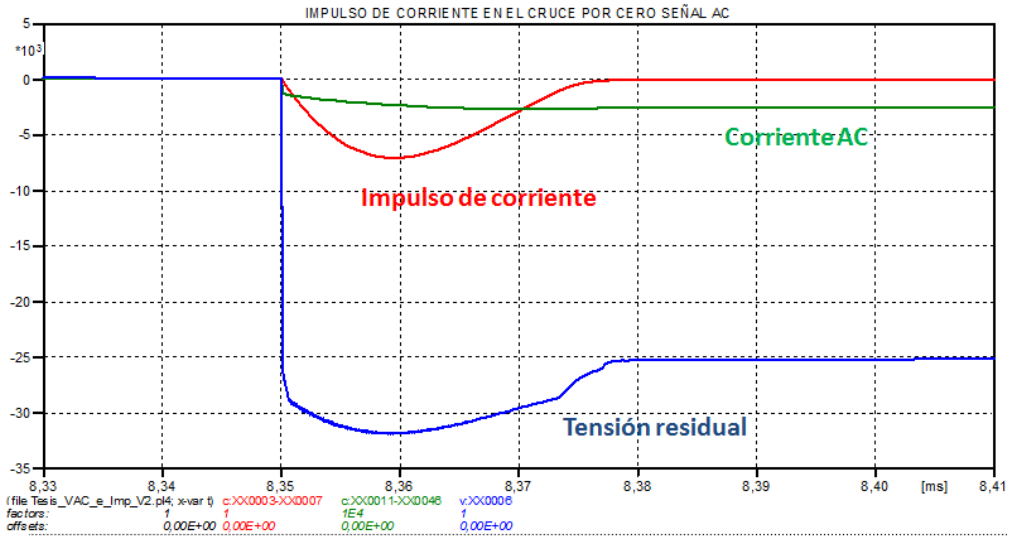


Figura 4-25: Impulso en cruce por cero de señal de AC - zoom



C. Ocurrencia del impulso en el semiciclo negativo de la señal de AC

Figura 4-26: Impulso en el semiciclo negativo de señal de AC

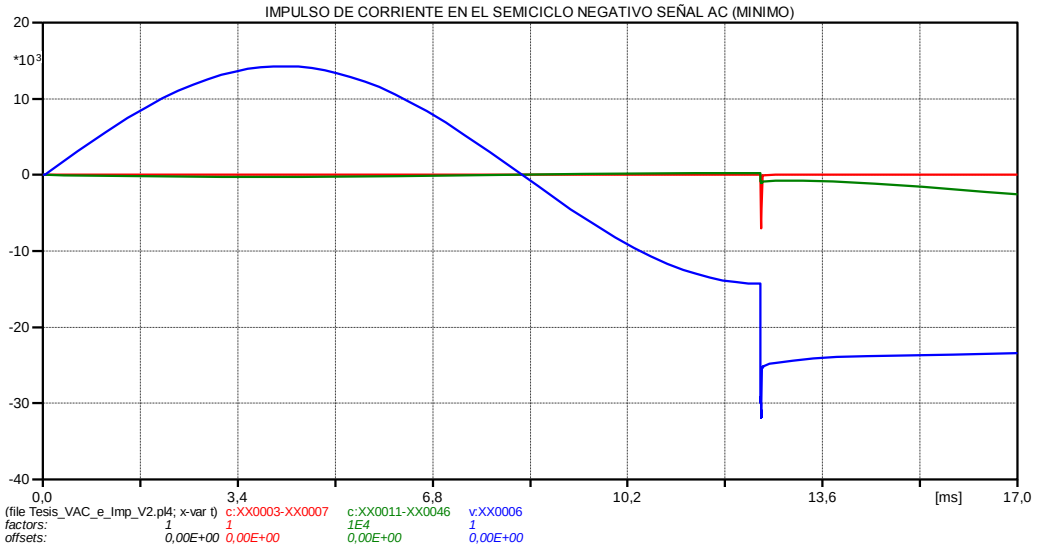
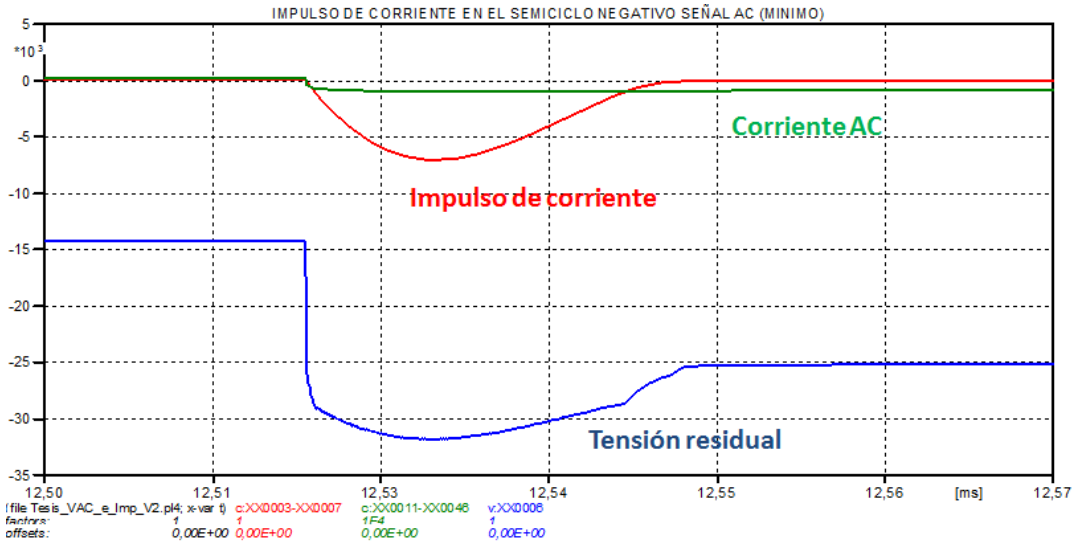


Figura 4-27: Impulso en el semiciclo negativo de señal de AC- zoom



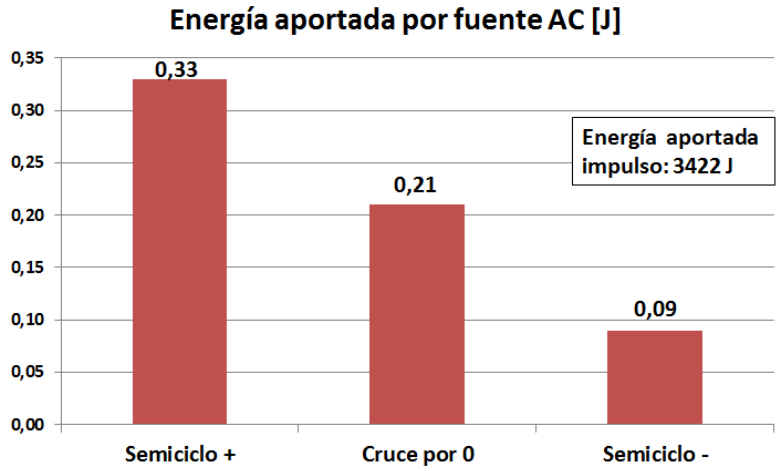
Finalmente, se tiene la estimación de la energía aportada tanto por el generador de impulsos como por la fuente de AC para cada uno de los tres casos estudiados. Los resultados son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 4-3: Estimación de energía aportada fuente de AC e Impulso

Ocurrencia	Energía aportada [J]		Relación (%)
	Impulso de corriente	Fuente AC	(E_AC/E_Imp)
Semiciclo +	3422	0,33	0,010
Cruce por 0		0,21	0,006
Semiciclo -		0,09	0,002

A partir de los resultados obtenidos mediante simulación, y como se identifica en la tabla 4-3, se puede determinar que el mayor aporte de energía de la fuente de AC ocurre cuando la onda se encuentra en el semiciclo con la polaridad inversa a la del impulso de corriente tal como se muestra en la figura 4-28.

Figura 4-28 Aportes de energía de la fuente AC para impulso de corriente de polaridad negativa.



A partir de los datos obtenidos de los oscilogramas de impulso de corriente y las respectivas tensiones residuales, se realizó la estimación de la energía específica (W_{th}) y la carga térmica transferida (Q_{th}) promedios para cada muestra.

Tabla 4-4: Estimación de energía aportada fuente de AC e Impulso

Muestra	Energía específica [kJ/kV]	Thermal charge transfer rating, Qth [C]
S-1	0,26	0,24
S-2	0,27	0,25
S-3	0,27	0,24
S-4	0,32	0,33
S-5	0,30	0,25
S-6	0,27	0,26
IEC 60099-4	≥ 7 (Station)	≥ 1,1

De acuerdo con el estándar IEC 60099-4:2014, para los descargadores de tipo distribución, se debe evaluar la carga térmica (Q_{th}), la cual debe ser mayor o igual a 1,1 C, sin embargo, este valor es resultado del ensayo de Heavy Duty, el cual difiere del método ECO propuesto en el trabajo. Sin embargo es posible determinar que a las muestras no se les aplicó en ningún momento una carga superior a la establecida por la norma.

En el caso de la energía específica (W_{th}), si bien esta solo aplica para descargadores tipo subestación, al igual que la carga térmica, está es resultado del ensayo de Heavy Duty. Se puede ver que la energía aplicada es menor a la establecida por la norma para un descargador de 10 kA (≥ 7 kJ/kV) [27].

4.3 Resultados en AC

Se realizó la medición de la corriente de fuga en AC durante la aplicación del método de envejecimiento propuesto, buscando cambios que indicasen degradación o envejecimiento del descargador. En este sentido es importante aclarar que la misma se

realizaba aproximadamente 60 minutos después de aplicar el impulso de corriente, buscando que el descargador se encontrase en equilibrio térmico con el ambiente.
La medición se realizó de manera indirecta, tomando la tensión sobre una resistencia shunt de aproximadamente 1 kΩ conectada en serie con las muestras. Fueron en total 6 resistencias dispuestas de modo tal que su lectura en tensión llegase directamente al osciloscopio Tektronics modelo TDS1012B en el cual se registraban tanto la señal de corriente como la tensión sobre el descargador. La figura 4-29 presenta un ejemplo de los oscilogramas obtenidos empleando el equipo antes descrito y los sistemas de medición descritos en el capítulo 3.

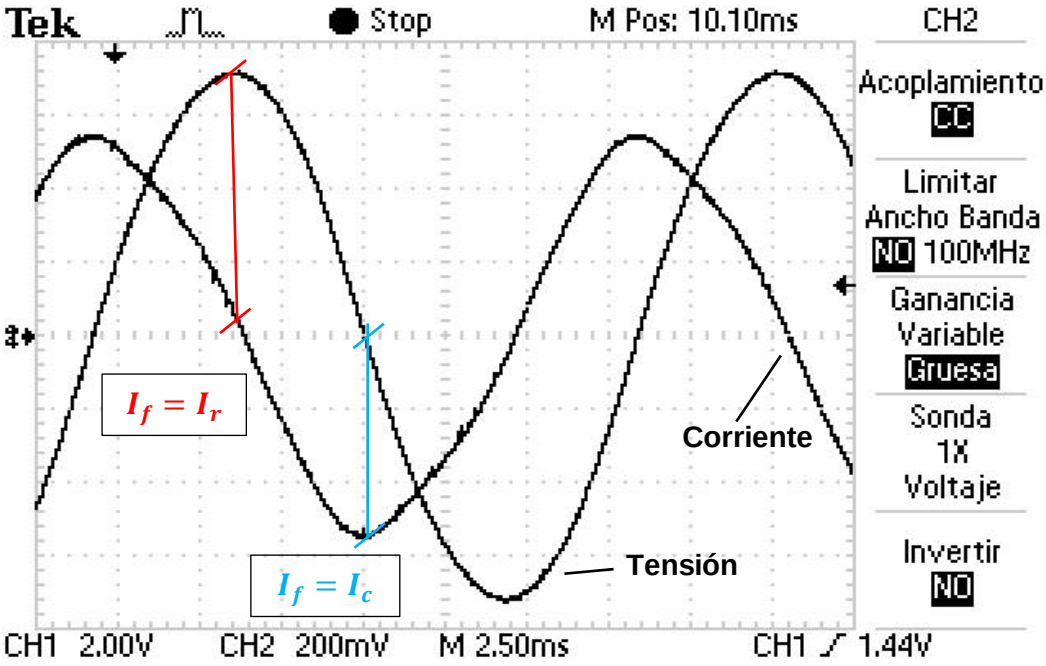
A partir de las señales de tensión y corriente registradas luego de cada impulso (60 minutos después) se estimó la componente resistiva de la corriente así como la capacitancia de los dispositivos. Para esto es necesario considerar que en operación normal con tensión MCOV el comportamiento del descargador es principalmente capacitivo por lo que para la corriente de fuga se tiene que esta presenta dos componentes, resistiva y capacitiva. Esto se expresa de manera simplificada como sigue:

$$I_{fuga} = I_{resistiva} + I_{capacitiva} \tag{4.4}$$

$$I_{fuga}(t) = \frac{V(t)}{R} + C\frac{dV(t)}{dt} \tag{4.5}$$

A partir de la expresión (4.5) y observando la Figura 4-29 es posible determinar que cuando la señal de tensión se encuentra en un máximo o un mínimo, el termino dependiente de la derivada de la tensión respecto al tiempo de la componente capacitiva se hace cero, por lo que para ese instante la corriente a través del descargador es debida únicamente a la componente resistiva. En el mismo sentido, cuando la tensión cruza por cero, se tiene que el término de la expresión que refiere a la componente resistiva se hace cero, entonces, para ese instante de tiempo, la corriente a través del descargador es meramente capacitiva.

Figura 4-29 Registro de oscilograma de tensión y corriente obtenido para uno de los descargadores energizados a tensión MCOV



A partir de lo establecido anteriormente y de los oscilogramas de corriente de fuga registrados para cada una de las muestras a lo largo de todo el proceso de envejecimiento, se estimó tanto la componente resistiva de la corriente como la capacidad de cada descargador y su evolución en el tiempo a medida que se aplicaban los impulsos.

A continuación se presentan los resultados en por unidad [pu] teniendo como valor base el medido por primera vez en su estado nuevos. Al igual que se hizo para la tensión de referencia se determinaron unos valores prefalla que anteceden condiciones de operación desfavorable en el descargador, los cuales se encuentran en recuadros e identificados en cada una de las figuras.

Figura 4-30: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-1

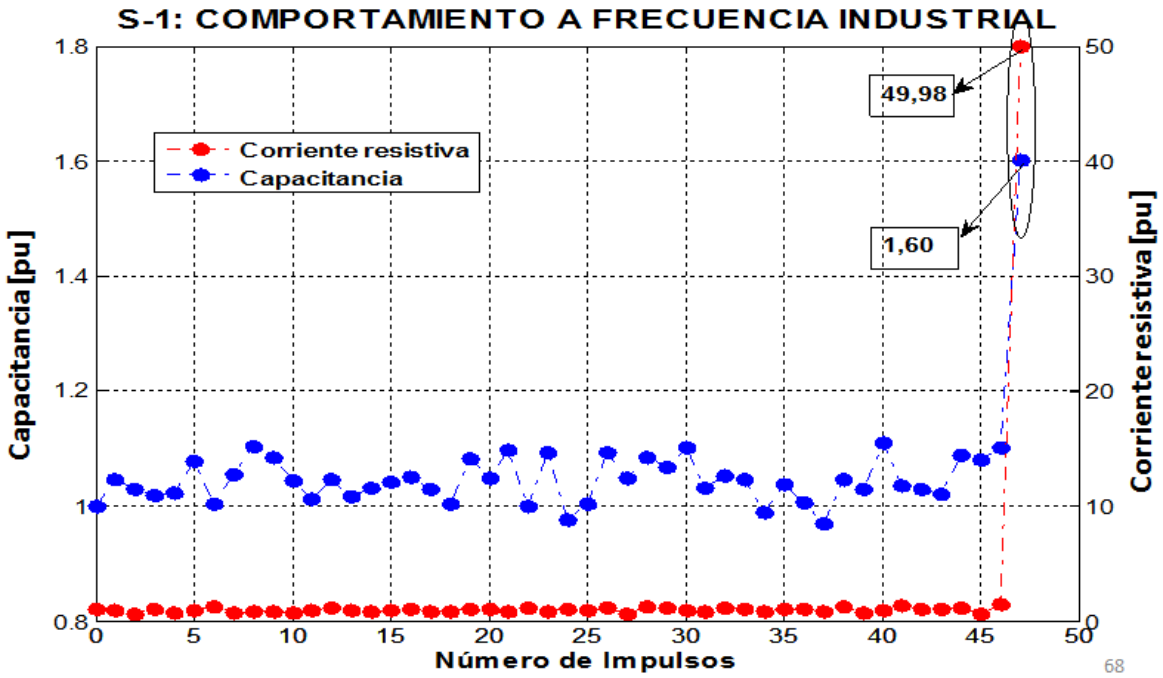


Figura 4-31: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-2

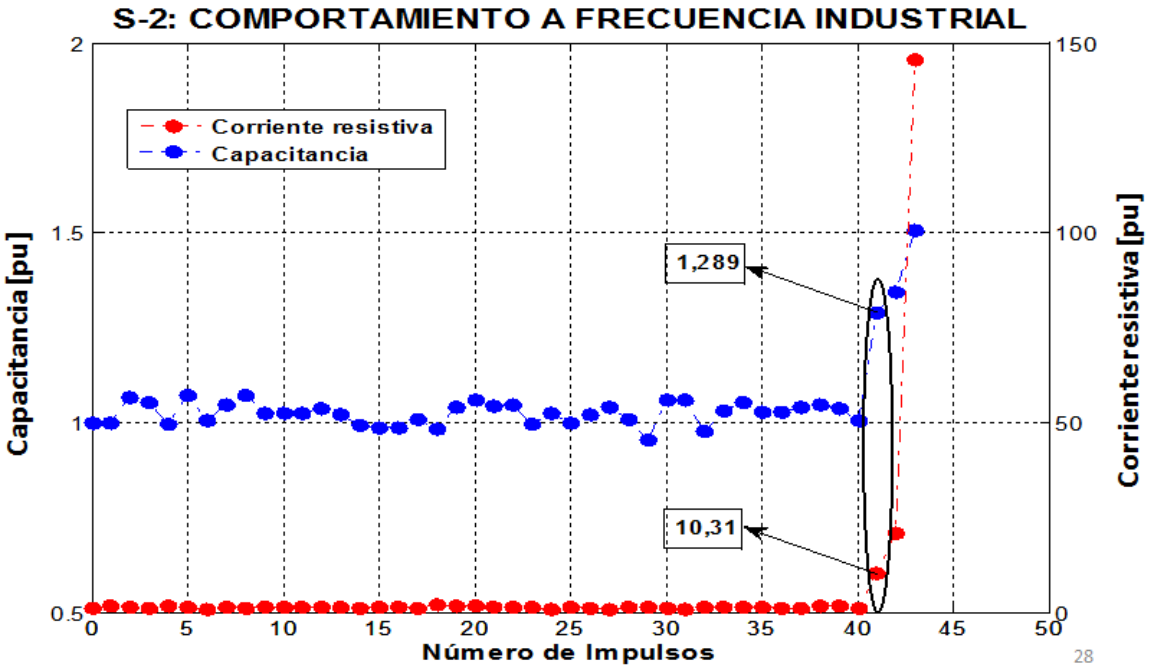


Figura 4-32: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-3

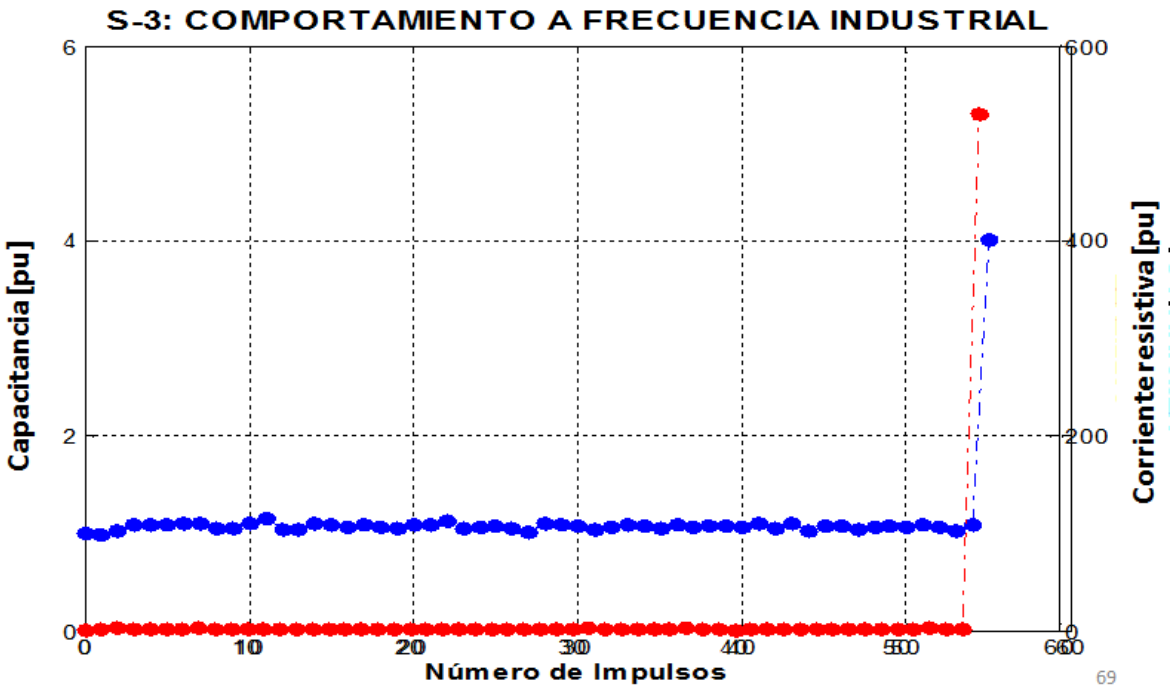


Figura 4-33: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-4

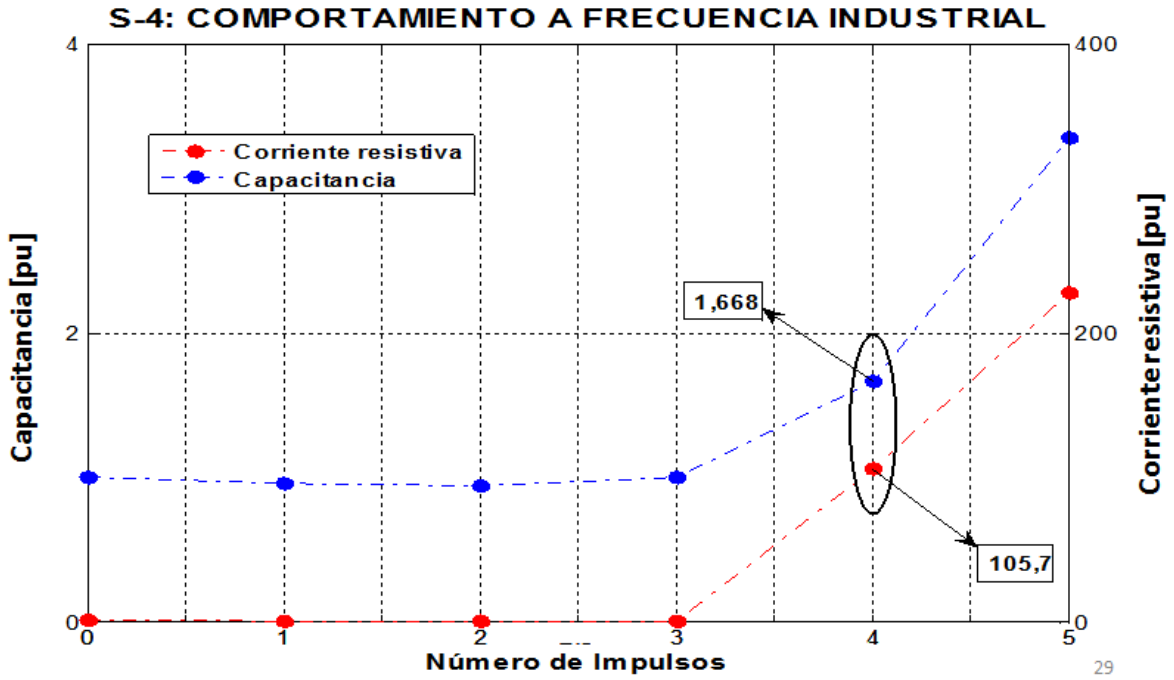


Figura 4-34: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-5

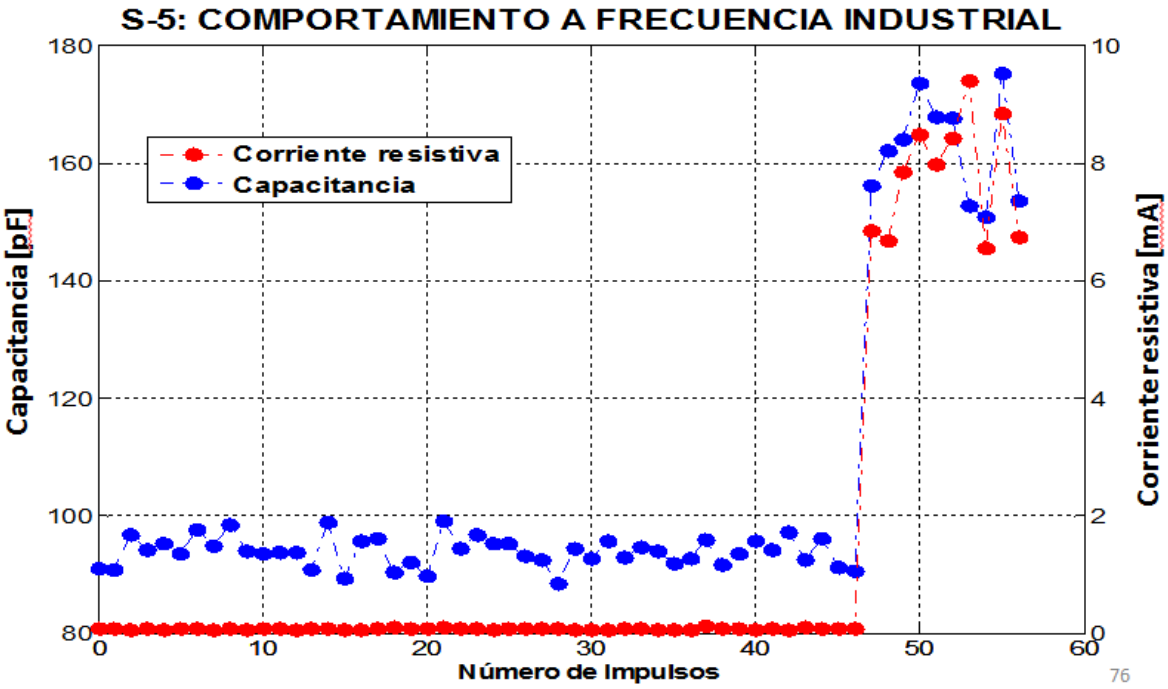
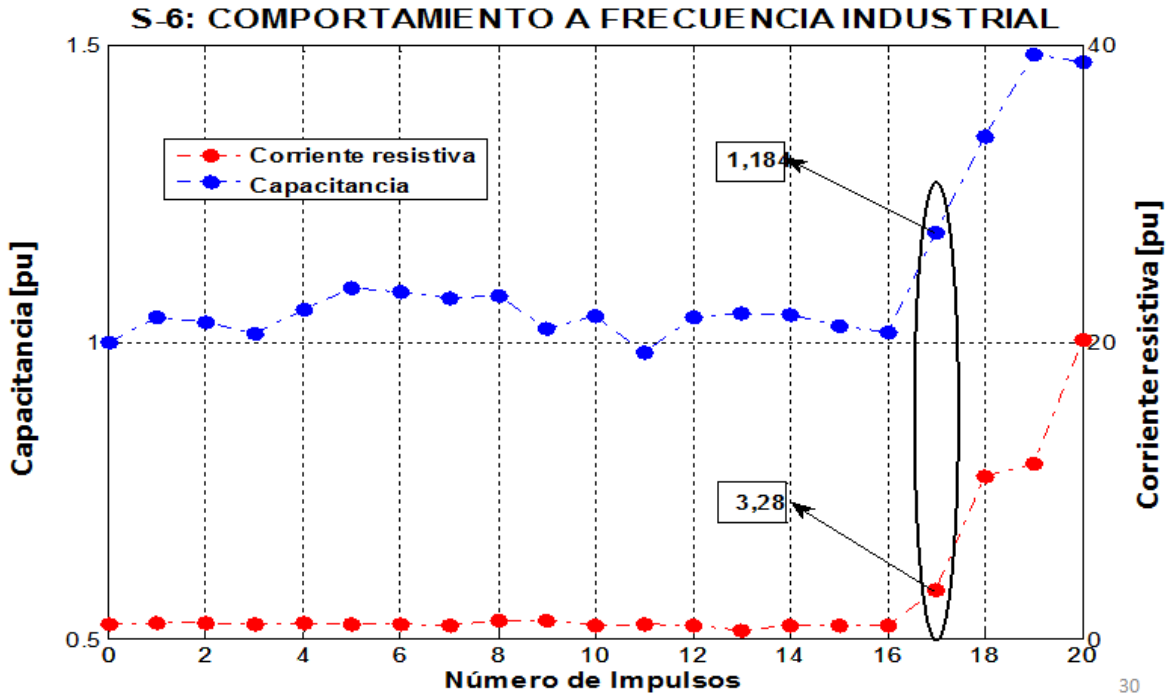


Figura 4-35: Capacitancia y componente resistiva de la corriente para la muestra S-6

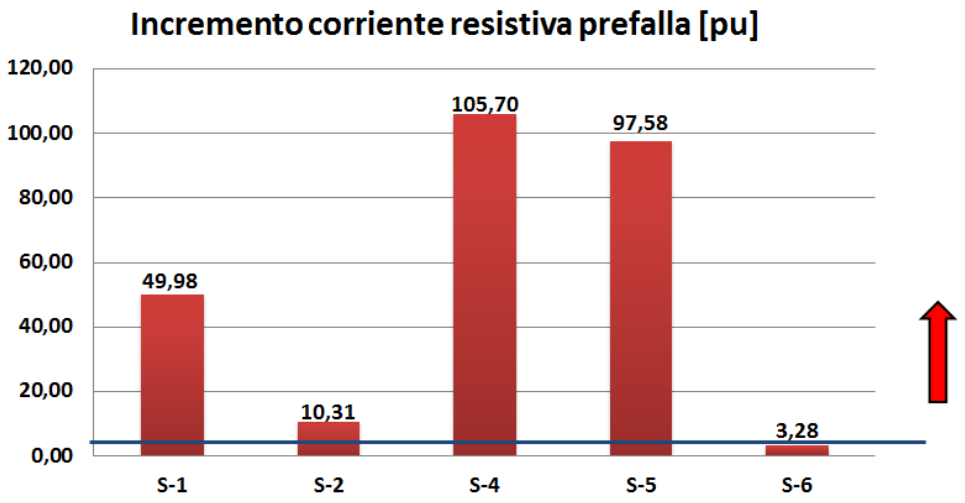


A partir de los resultados obtenidos, es evidente que la corriente de fuga a través del descargador tiende a incrementar con el envejecimiento de las muestras, sin embargo, no en todos los casos el incremento es notorio o progresivo, sino que está acompañado de saltos o incrementos importantes que se relacionan con la falla de una o más pastillas.

Para el caso de la muestra S-3 por ejemplo, el simple monitoreo de la corriente de fuga no hubiese sido un indicador que permitiese advertir la falla del mismo. Sin embargo, para las restantes, un aumento súbito de la corriente alerta sobre un cambio importante en el estado del descargador, que debe ser vigilado, ya que esto se traduce en incrementos de temperatura que aceleran el envejecimiento.

La figura 4-36 presenta el análisis de la corriente prefalla en por unidad determinada para cinco de las seis muestras probadas. En esta se puede observar que para cinco de los descargadores (esto es el 83,3 % de las muestras) cuando la componente resistiva de la corriente tiene incrementos por arriba de 3,28 en pu, el siguiente impulso produce deterioro fuerte y falla del descargador.

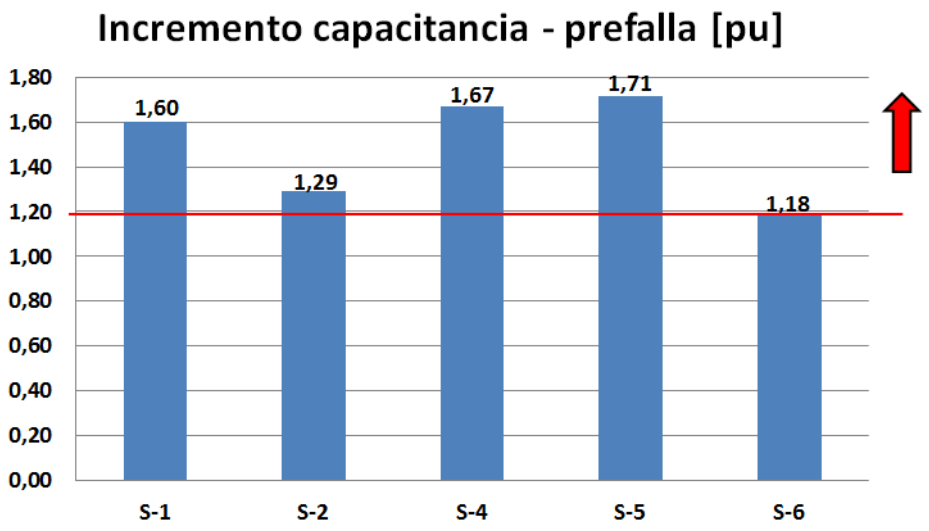
Figura 4-36 Componente resistiva de la corriente prefalla en PU.



Del mismo modo que para la componente resistiva de la corriente, para la capacitancia estimada de las muestras se puede evidenciar que esta sufre aumentos importantes cuando se presenta falla de al menos una de las pastillas que componen el descargador. Como se muestra en la figura 4-37, para cinco de seis muestras cuando la capacitancia

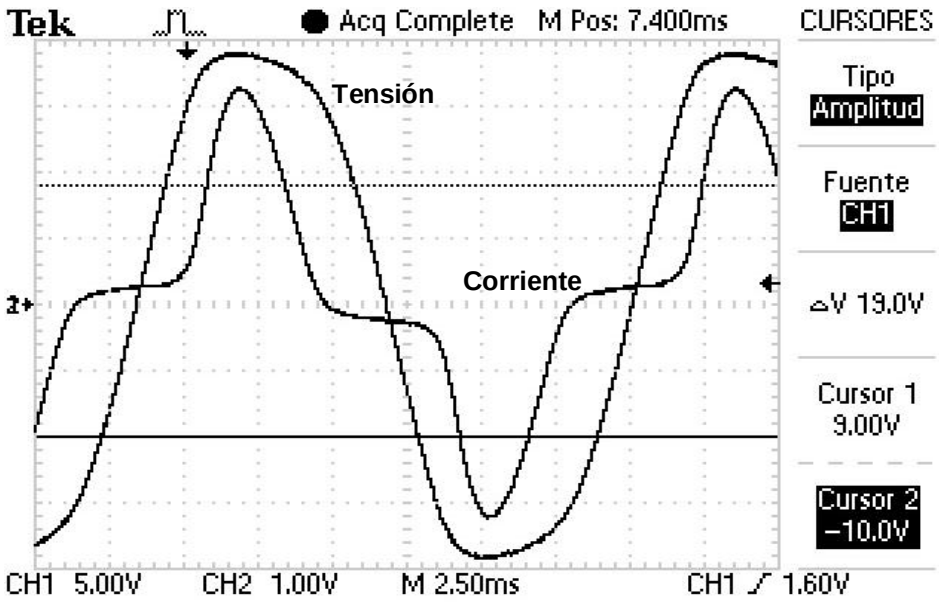
tiene incrementos por arriba del 18 % respecto a la inicial, el siguiente impulso produce falla del descargador.

Figura 4-37 Capacitancia estimada prefalla en PU.



Como se ha venido mencionando a lo largo del capítulo 4, la degradación y falla de al menos una pastilla en el descargador, hace que las restantes deban soportar la tensión de operación del sistema, llegando a ponerse en permanente conducción cuando la tensión de referencia cae por debajo del valor pico de la tensión alterna. La figura 4-38 presenta la forma de onda de tensión y corriente registrada para un descargador en falla.

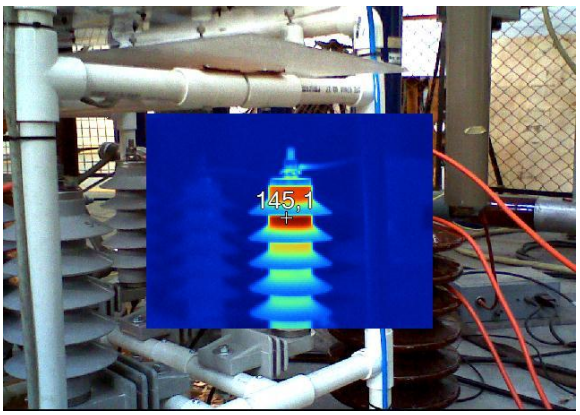
Figura 4-38: Oscilograma tensión-corriente en AC para descargador en falla

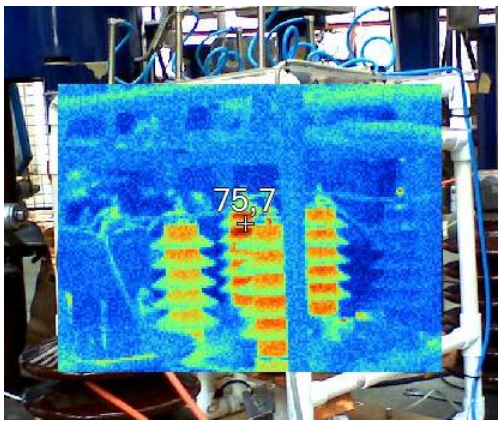


Se puede ver que la tensión sufre achatamientos de sus extremos o picos, mientras la corriente deja de ser sinodal pues el descargador se encuentra en zona de conducción permanente con la tensión alterna de alimentación, lo que representa una situación anómala que termina generando elevación de temperatura y afectación en el mismo. Un aspecto importante que se deja en evidencia en este oscilograma, es que la corriente y la tensión se ponen en fase, lo que demuestra que en esta condición para una gran parte de la señal de tensión alterna, la corriente a través del descargador es mayoritariamente resistiva.

Esta continua conducción de corriente contribuye también a la degradación y envejecimiento del descargador por efecto térmico, el cual puede llegar a ser mucho más severo que el causado por los impulsos de corriente, sin olvidar que estos últimos son los que dan origen al proceso de envejecimiento al presentarse las sobretensiones asociadas. La figura 4-39 presenta el comportamiento térmico de muestras en falla. Como se puede apreciar en las imágenes, cuando se degradan las pastillas, el trabajo recae sobre las restantes, lo que genera que la distribución de calor en el descargador no sea uniforme y comience a concentrarse en ciertas regiones.

Figura 4-39: Imágenes termo-gráfica de descargadores en condición de falla





Todo el fenómeno antes descrito, corresponde al escenario que enfrentarían los descargadores en una red de distribución la cual, a diferencia del circuito experimental AC empleado, tendría la capacidad de mantener la tensión del sistema, entregando más corriente, acelerando así la degradación de las pastillas y llevando a falla al descargador.

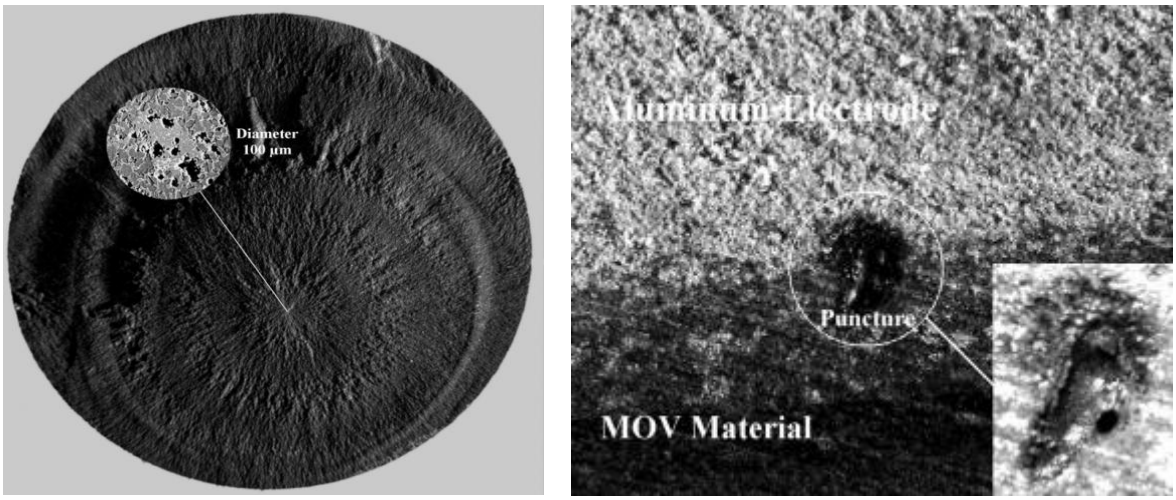
Bajo una condición de falla por corto circuito, se espera que el dispositivo desconectador que normalmente acompaña al descargador actuase, evitando la falla de alguna de las fases del sistema. Sin embargo, ante una próxima descarga atmosférica el transformador de distribución ya no contaría con protección alguna y se vería sometido a una sobretensión mayor. Esto es especialmente crítico en las zonas rurales con alta intensidad de descargas a tierra donde normalmente la falla del transformador es el indicador para el operador de red para la atención del evento.

4.4 Proceso de envejecimiento y mecanismo final de degradación

El proceso de envejecimiento en las muestras probadas tiene dos partes importantes, la primera de ellas se relaciona con los impulsos de corriente aplicados mientras el

descargador opera a su tensión MCOV. Cuando se revisa la estructura de la pastilla de óxido de zinc es encuentra que los gránulos de óxido de zinc están rodeados por impurezas que le dan su característica de alta impedancia a valores de tensión de operación normal. La circulación de la corriente de impulso comienza a generar deterioro en las fronteras de grano, de modo que la distribución de la corriente deja de ser uniforme. Cuando esto ocurre, la mayor parte de la corriente circula por áreas menores de la pastilla lo que acelera la degradación de la misma.

Figura 4-40: Estructura de pastillas de óxido de zinc y sus fallas [40]



Fuente: Modification de Quality of Metal Oxide Disks Impacts Surge Arrester Performance | INMR : Independent T&D Information Resources.

La segunda parte, derivada de la primera, es la degradación producida por la corriente de 60 Hz. Debido a la perdida de la barrera de grano, la impedancia del descargador comienza a bajar, de manera que se produce un incremento de la corriente de AC que circula a través del mismo ya que los gránulos de ZnO tiene una impedancia de solo algunos Ohmios. La potencia en el descargador comienza a incrementarse a niéveles superiores a los de operación normal, elevando así su temperatura y acelerando la degradación del mismo por el efecto térmico asociado a la componente resistiva de la corriente. Al final, se tiene una degradación de las pastillas y con ellas del desempeño y las características del descargador de sobretensión.

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El método propuesto para lograr el envejecimiento acelerado reproduce algunas de las condiciones a las cuales se ven sometidos los descargadores en operación normal en las redes de distribución.

Los sistemas de medición implementados se ajustaron a la naturaleza de las señales aplicadas a los descargadores, permitiendo obtener registro de las variables pertinentes para el análisis del proceso de envejecimiento.

La degradación en el comportamiento del descargador producto del envejecimiento no es necesariamente continua, por el contrario presenta cambios o saltos importantes en los niveles de tensión asociados a la corriente, esto debido a que las pastillas de ZnO que constituyen al descargador no se envejecen de la misma manera, como pudo evidenciarse a través de las características V - I obtenidas para cada muestra. No se puede considerar el descargador como una unidad, el envejecimiento no se da para las pastillas de manera uniforme.

Disminuciones bruscas o fuertes en la tensión de referencia son indicadores del fallo de al menos una de las pastillas componentes del descargador que hace que el dispositivo entre en conducción en niveles de tensión para las cuales no debería operar. En este sentido la tensión de referencia se constituye en un indicador importante para determinar el estado del descargador, permitiendo anticipar un posible fallo mediante un reemplazo oportuno.

Valores de tensión de referencia por debajo del 93,8 % de la inicial, fueron indicativos de falla en el 83% de los casos. Esto corrobora criterio del 95 % del estándar IEC 60099-4.

La estimación del coeficiente de no linealidad presenta variaciones entre los estados nuevos y pre-falla asociados a la degradación de las pastillas que componen el descargador, lo que resulta en una disminución de este parámetro asociado al envejecimiento, tal y como lo determinó Alarcón [24].

El incremento en la componente resistiva de la corriente de fuga AC a lo largo del proceso de envejecimiento corrobora los resultados de trabajos anteriores [25], [29] sobre su incidencia en la degradación del descargador. Mayores corrientes de fuga conllevan a incrementos en la disipación de potencia que se traduce en disipación de calor de los dispositivos que acelera su envejecimiento.

La calidad de los dispositivos empleados por las empresas de distribución, así como la de aquellos ofrecidos al público debe ser evaluada. Los resultados obtenidos muestras con preocupación que la tercera parte de las muestras no superaron los 25 impulsos, teniéndose para la muestra S-4 un total de 6. Considerando que muchos de estos dispositivos están instalados en zonas de alta densidad de descargas a tierra, es muy probable que los eventos a los que se vean sometidos produzcan falla de los mismos muy rápidamente.

Cada una de las características estudiadas ofrece información importante para entender el proceso de envejecimiento en los descargadores. Sin embargo, la curva característica V-I obtenida con la fuente ETHICS se convierte en la más valiosa fuente de información del estado del descargador. A partir de esta puede obtenerse la tensión de referencia, determinar la posible falla de alguna de las pastillas, así como observar el comportamiento del codo frente a la tensión del sistema a la que opera el descargador

Incrementos en la capacitancia estimada por arriba del 18 % respecto a la inicial fueron indicadores de falla en el 83 % de las muestras. La capacidad como la corriente de fuga brindan información del estado de los descargadores.

Si bien para este trabajo no se estableció un ángulo especifico de la señal de AC para el disparo, a través de la estimación mediante simulación fue posible establecer que el mayor aporte de energía de la señal de 60 Hz se da en el semiciclo de la onda AC de polaridad inversa a la del impulso.

5.2 Recomendaciones

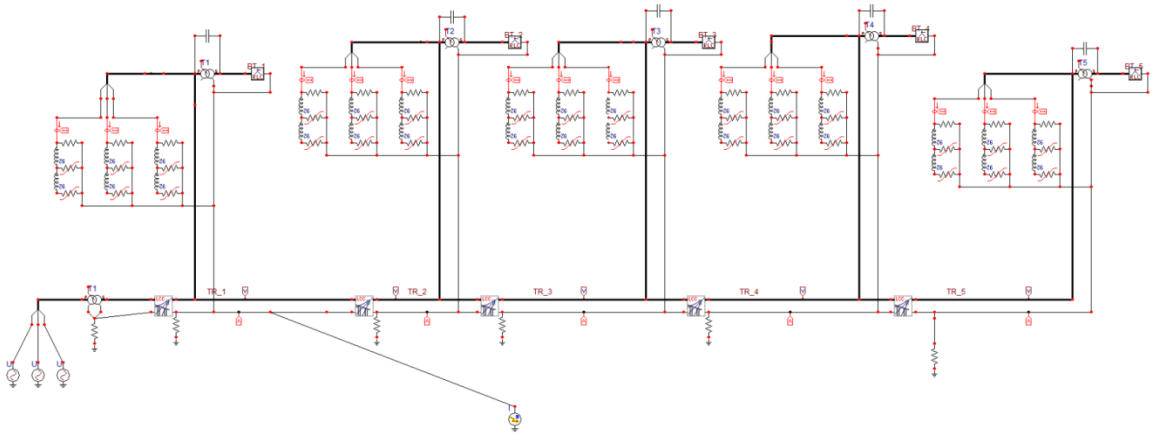
Para futuras investigaciones se propone profundizar en el estudio del coeficiente de no linealidad a partir de la curva V-I y su variación en función del envejecimiento sufrido por los descargadores, a fin de corroborar la hipótesis de disminución del mismo con la degradación de las pastillas, como lo presenta el trabajo de Alarcón [24].

Establecer la criticidad para el proceso de envejecimiento, del instante dela onda de 60 Hz para la cual se produce el impulso de corriente. Evaluar los aportes de energía para el proceso de la señal de AC según el ángulo en el cual se produzca la descarga.

A. Anexo: Determinación de la amplitud para la corriente de impulso

Como se mencionó en el capítulo 3, se realizó la simulación de un circuito de media tensión empleando el software EMTP/ATP Draw. A este circuito se le incluyeron los modelos de circuito de los descargadores. A continuación se presenta el circuito simulado:

Figura A-1: Circuito de media tensión empleado para determinar la amplitud de la corriente de impulso.



Para el circuito antes descrito se realizaron algunas consideraciones:

- El nivel de tensión fue ajustado a 13,2 kV.
- Se dividió en cinco secciones cada una de 2,5 km.
- Cada sección contó con un transformador de distribución cargado al 75% de su capacidad nominal y protegido en cada una de sus fases por un descargador de sobretensión en el lado de media tensión.
- El conductor de guarda fue aterrizado en cada una de las secciones, en el punto donde se ubicó el transformador

B. Anexo: Circuito de AC e Impulso para envejecimiento acelerado

El presente anexo describe mediante registro fotográfico el circuito AC e impulso empleado como parte del método de envejecimiento propuesto en este trabajo.

Figura B-2: Fuentes empleadas en el circuito de AC e Impulso

La figura B-1, presenta las dos fuentes de alimentación empleadas. La primera de ellas corresponde a un transformador de 25 kVA, monofásico, con tensiones 13,2 kV / 240-120 V (color naranja) que fue utilizado para alimentar a la tensión MCOV todas las muestras probadas. La segunda fuente corresponde a un transformador monofásico de 18 kVA, 50

kV / 220 V (Color gris). Esta segunda fuente fue empleada para cargar el generador de impulsos de corriente GIC del laboratorio LABE debido a daño en el circuito de carga del mismo.

Figura B-2: Generador de impulsos de corriente GIC del Laboratorio LABE

La figura B-2 muestra el generador de impulsos de corriente del laboratorio LABE, configurado para una forma de onda 8/20 µs. Empleando la fuente descrita anteriormente, se realizaba la carga de los condensadores hasta el nivel de tensión requerido para hacer circular por el descargador seleccionado la corriente de prueba de 7 kA, mientras esta era sometida a la tensión MCOV simultáneamente, simulando de esta manera operación normal en la red.

Figura B-3: Circuito AC e Impulso conexión a descargadores

La figura B-3 presenta el punto de unión de los circuitos de AC e Impulso que se da sobre los descargadores sometidos a prueba. Mediante una estructura aislada y empleando un sistema neumático se realizaba la superposición de la señal de AC con la de impulso de corriente de modo que esta solo circulase por un descargador a la vez, mientras los demás continuaban conectados a su tensión MCOV. La conexión al sistema de AC se realizó por medio de cables aislados del tipo bujía mientras que para llevar y retornar la corriente de impulso se emplearon flejes de cobre.

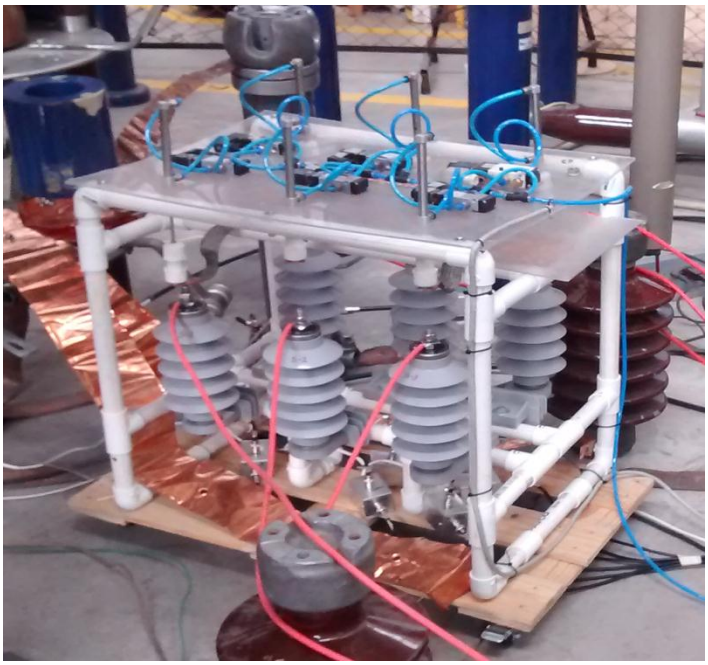
C. Anexo: Estructura aislada empleada para el método propuesto

Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, una estructura aislada fabricada a partir de PVC fue desarrollada para soportar las muestras bajo ensayo. Sin embargo, su función va más allá de soportar, ya que gracias al sistema neumático implementado en la misma, cada uno de los seis pistones actúa como un interruptor que conecta el circuito de impulso con la muestra a la cual se le pretendía aplicar dicha señal, mientras permanecía energizada a su tensión MCOV.

Figura C-1: Estructura aislada en PVC

A partir de la experiencia de los trabajos Torres y Ramos [25], así como de Poveda [29], quienes emplearon una estructura metálica, se propuso diseñar e implementar una estructura aislada que eliminase los problemas por flameos hacia la estructura y permitiese tener la misma más cerca al generador de impulsos de corriente, logrando así reducir el camino de la corriente en el momento de la descarga, a fin de no afectar los tiempos de la señal normalizada.

Figura C-2: Estructura aislada en PVC terminada con sistema neumático

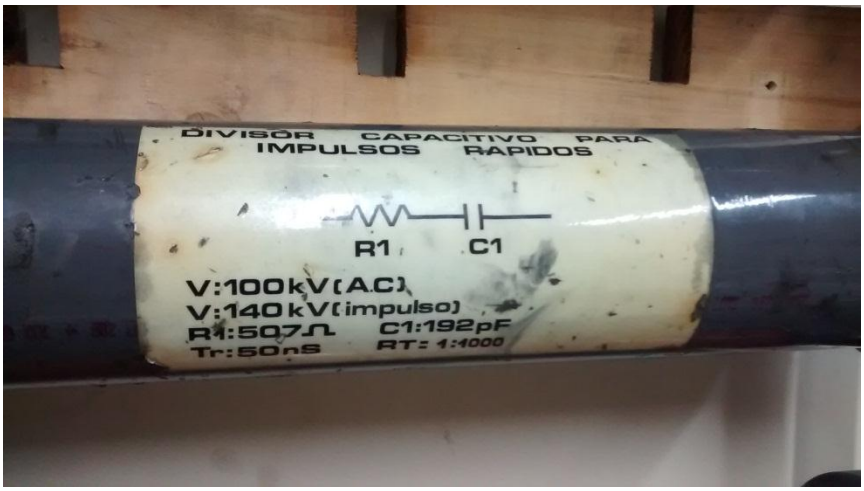


Como se mencionó antes se empleó fleje de cobre para disminuir la impedancia del camino y garantizar un muy buen camino para la corriente de impulso reduciendo los efectos peliculares dando mayor área superficial para la circulación de la corriente.

D. Anexo: Sistema de medición

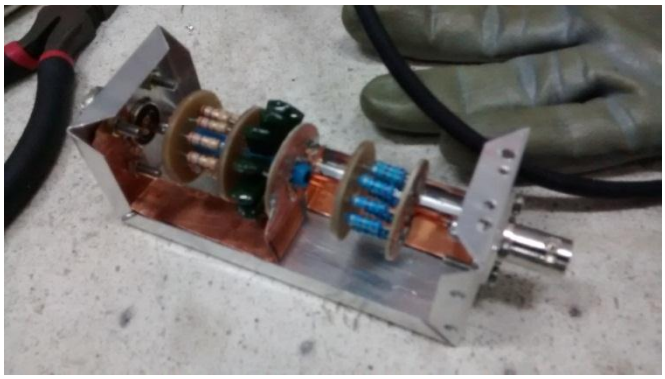
Los sistemas de medición empleados contaron con el desarrollo de elementos que permitieran adaptar la seña a medir de modo que pudiesen ser adquiridos por los equipos de registro como osciloscopios sin perder mayor detalle. En este sentido, para la medición de tensión tanto de AC como de Impulso se empleó el divisor capacitivo para impulsos rápidos del laboratorio docente. Sin embargo, dado que la relación de transformación no era apropiada para la medición con el osciloscopio, fue necesario diseñar y construir una capacidad en la rama de baja apropiada.

Figura D-1: Divisor capacitivo para medición de impulso y tensión AC (rama de alta)



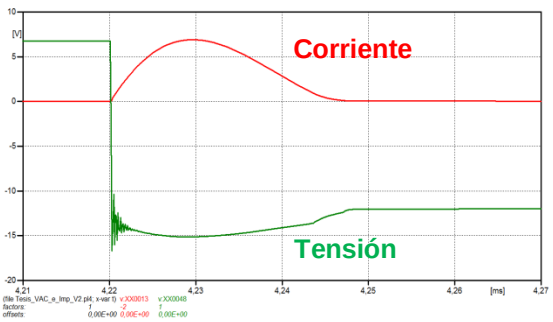
El diseño y construcción de la rama de baja del divisor buscaba tener una relación de transformación de aproximadamente 2000, esto es, el doble de la que inicialmente tenía el divisor (1000). Para esto, la rama de baja se compuso de una resistencia de 0,25 Ω en serie con una capacidad de 400 nF y la respectiva impedancia de acople, buscando eliminar los efectos de reflexión por cambio del sistema de medición.

Figura D-2: Rama de baja diseñada y construida para el Divisor capacitivo

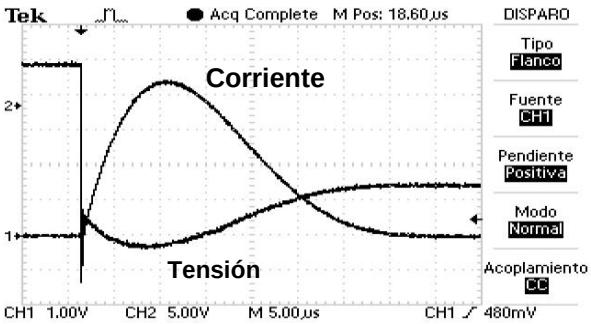


En la construcción se tuvieron en cuenta tanto la disminución de los efectos inductivos por la disposición de los elementos como las impedancias de acople y la seguridad en la conexión de los sistemas de referencia (tierra). La figura D-3 presenta la medición en la rama de baja diseñada del divisor para un impulso de corriente. La figura a) presenta el resultado de la simulación mientras que b) presenta la medición real con la rama construida.

Figura D-3: Respuesta del divisor capacitivo - medición tensión residual en la rama de baja, a) Respuesta simulación, b) Respuesta medición real.



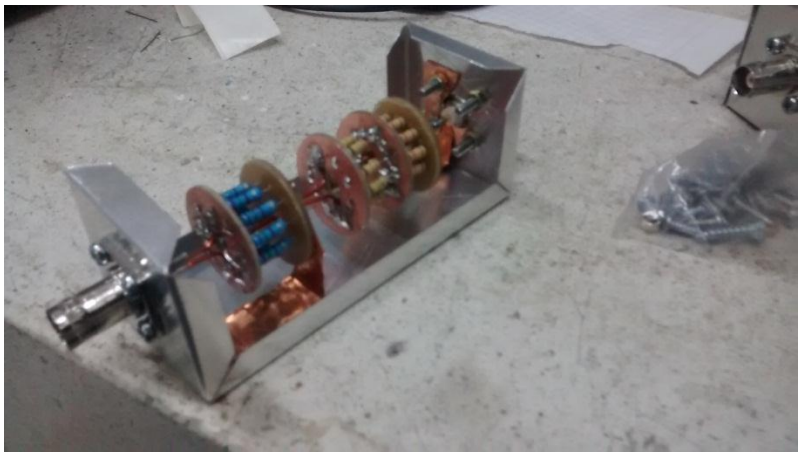
a) Respuesta simulación.



b) Respuesta medición real.

También se diseñó e implemento un atenuador para la señal de tensión proveniente de la shunt del generador de impulsos de corriente, de modo que pudiese ser leída de manera segura por el osciloscopio empleado para tal fin.

Figura D-4: Atenuador x 10 para la señal de corriente de impulso proveniente de la shunt



Al igual que para el caso del divisor resistivo, la Figura D-3 presenta la respuesta para la medición de la señal de corriente tanto en la simulación (a) como en la medición real realizada (b). Se debe aclarar que la señal presentada en la simulación para la medición de la corriente (a) ha sido amplificado por 2 para efectos de la comparación con la imagen de la medición real (b) obtenida en el osciloscopio.

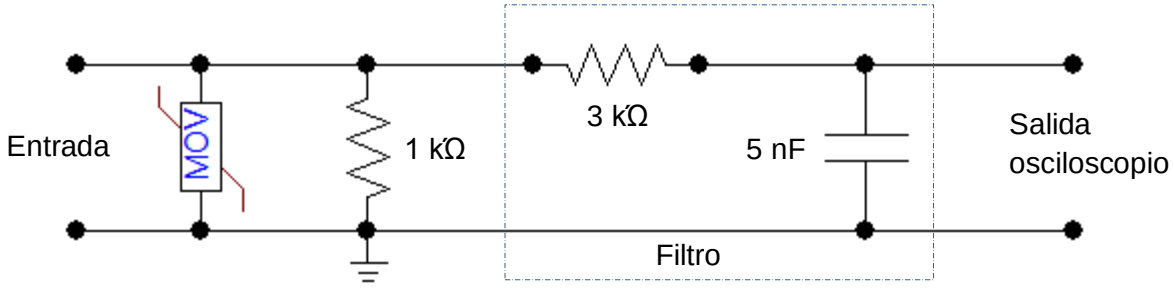
Tabla D-1: Determinación de la relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado

Oscilograma	Lectura patrón [kV] - CH2	Lectura OBC [V] - CH1	Rx calculada impulso [V/V]
ALL0019	-21,50	-9,76	2202,9
ALL0020	-20,40	-9,12	2236,8
ALL0021	-20,40	-9,20	2217,4
ALL0023	-19,80	-8,88	2229,7
ALL0024	-21,50	-9,76	2202,9
ALL0025	-21,00	-9,60	2187,5
Promedio			2212,9
Desviación estandar			18,6
Desviación estandar en % de la media			0,8

La determinación de la relación de transformación del divisor capacitivo con la rama de baja diseñada y construida, se llevó a cabo por comparación con el divisor patrón (400 kV) del laboratorio LABE y el sistema de medición DIAS del Generador de Impulsos de Corriente – GIC marca Haefely. La Tabla D-1 presenta algunas de las mediciones realizadas con los dos sistemas de medición.

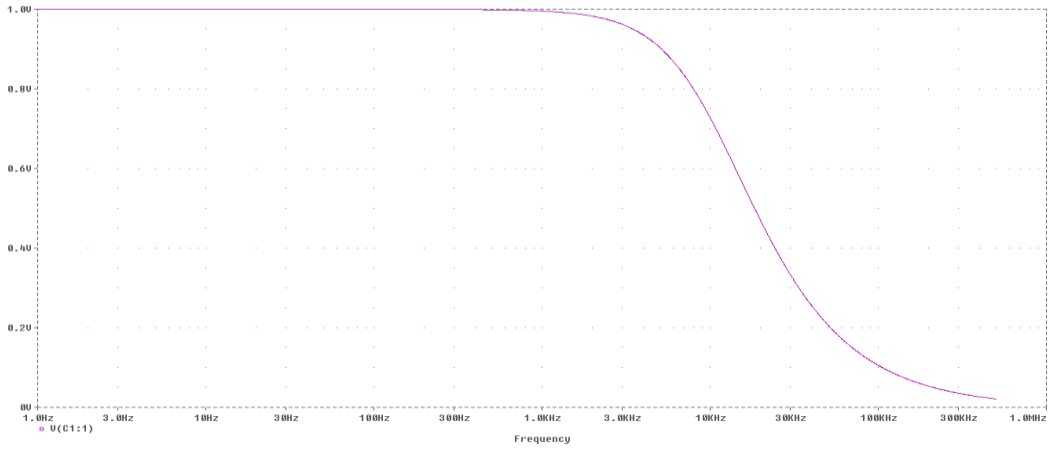
Para el caso de la medición de la corriente de fuga AC y corriente DC, se diseñaron y construyeron un total de 7 resistencias shunt, con un valor nominal de 1 kΩ. Para cada resistencia se implementó un filtro de modo que se atenuaran las frecuencias altas que pudiesen introducir ruido en la medición.

Figura D-5: Resistencia shunt para AC y DC



Dado que las mediciones a realizar tanto en DC como en AC son de baja frecuencia, el filtro diseñado suponía el rechazo de frecuencias a partir del orden de los kHz, de modo que el ruido y el espectro electromagnético de señales en el ambiente no contaminasen la lectura. La Figura D-6 presenta la respuesta en frecuencia para el filtro de la resistencia shunt.

Figura D-6: Respuesta en frecuencia del filtro diseñado y empleado para las resistencias shunt



Las resistencias shunt empleadas fueron verificadas por el área de metrología del laboratorio LABE empleando como patrones el calibrador multifunciones Fluke 5500 y un miltimetro Fluke 45. Los resultados obtenidos son presentados en la tabla D-2:

Tabla D-2: Verificación resistencia shunt para corriente AC (60 Hz)

Referencia	Corriente aplicada [mA]	Tensión medida [V]	Resistencia calculada [Ω]	R. Promedio [Ω]	Desviación estándar
S-1	0,350	0,3423	978,0	977,8	0,2
	0,350	0,3422	977,7		
	0,350	0,3422	977,7		
	1,000	0,9780	978,0	978,0	0,0
	1,000	0,9780	978,0		
	1,000	0,9780	978,0		
S-2	0,350	0,3443	983,7	983,7	0,0
	0,350	0,3443	983,7		
	0,350	0,3443	983,7		
	1,000	0,9840	984,0	984,0	0,0
	1,000	0,9840	984,0		
	1,000	0,9840	984,0		
S-3	0,350	0,3431	980,3	980,1	0,2
	0,350	0,3430	980,0		
	0,350	0,3430	980,0		
	1,000	0,9803	980,3	980,2	0,1
	1,000	0,9802	980,2		
	1,000	0,9802	980,2		

Tabla D-3: Verificación resistencia shunt para corriente AC (60 Hz) - Continuación

Referencia	Corriente aplicada [mA]	Tensión medida [V]	Resistencia calculada [Ω]	R. Promedio [Ω]	Desviación estándar
S-4	0,350	0,3442	983,4	983,6	0,2
	0,350	0,3443	983,7		
	0,350	0,3443	983,7		
	1,000	0,9839	983,9	983,9	0,1
	1,000	0,9839	983,9		
	1,000	0,9838	983,8		
S-5	0,350	0,3426	978,9	979,0	0,2
	0,350	0,3427	979,1		
	0,350	0,3426	978,9		
	1,000	0,9794	979,4	979,3	0,1
	1,000	0,9793	979,3		
	1,000	0,9793	979,3		
S-6	0,350	0,3443	983,7	983,7	0,0
	0,350	0,3443	983,7		
	0,350	0,3443	983,7		
	1,000	0,9841	984,1	984,1	0,0
	1,000	0,9802	980,2		
	1,000	0,9802	980,2		

Tabla D-3: Verificación resistencia shunt para corriente DC

Corriente aplicada [mA]	Polaridad	Tensión leida [mV]	Resistencia calculada [Ω]	Promedio	Desviación
0,1	+	98,603	986,03	986,03	0,0055
		98,603	986,03		
		98,603	986,03		
		98,602	986,02		
		98,602	986,02		
0,1	-	98,595	985,95	985,96	0,0055
		98,596	985,96		
		98,595	985,95		
		98,596	985,96		
		98,596	985,96		
		98,595	985,95		
1	+	985,94	985,94	985,93	0,0084
		985,92	985,92		
		985,93	985,93		
		985,92	985,92		
		985,93	985,93		
1	-	985,90	985,90	985,90	0,0055
		985,90	985,90		
		985,89	985,89		
		985,90	985,90		
		985,89	985,89		

E. Anexo: Estimación de coeficiente de no linealidad

Como se presentó en el capítulo 4, uno de los resultados alcanzados corresponde a la estimación del coeficiente de no linealidad $\boldsymbol{\alpha}$ a partir de los datos obtenidos de la curva V – I. El programa empleado para obtener la aproximación potencial y obtener la estimación de $\boldsymbol{\alpha}$ se presenta a continuación:

```
Rx=2211; %Relación de transformación divisor resistivo
Rshunt=985.9; % Rasistencia shunt
dirName = 'D:\UN\UN-MAESTRÍA\TESIS MAESTRIA\Pruebas oficiales\Programas
calculos\DC\S-1';  %# folder path
files = dir( fullfile(dirName,'*.CSV') ); %# list all *.CSV files
files = {files.name}';                    %'# file names
Iref=[1:numel(files)]';                   % Declaración de array de
dimensiones 1:numel(files)
Vref=[1:numel(files)]';                   % Declaración vector de
tensiones de referencia
Res=[1:numel(files)]';                    % Declaración de vector de
Resistencia en DC
alpha=[1:numel(files)]';                  % Declaración vector de
coeficiente de no linealidad alpha
for i=1:numel(files)
   fname=files{i};
   data=csvread(fname,2,0);   %Lee el archivo csv
   time=data(:,1,:);          %Vector de tiempo
   ch1=data(:,2,:);           %Vector de tensión leida en resistencia
shunt
   ch2=data(:,3,:);           %Vector de tensión leida en divisor
resistivo
   Current=abs(ch1/Rshunt);        %Señal de corriente [A]
   Current_f = tsmovavg(Current,'s',20,1);  % Promediador
```

```
   for j=1:1000
        H(j)=abs(Current_f(j)-0.001);
   end
   A=find(H==min(H),1); % Busca en el vector H la posición del valor
minimo y la asigna a B
   Iref(i)= Current_f(A); % Guarda en la posición i del vecto Iref el
valor de la posición B en el vector Current_f
   Voltage=abs(ch2*Rx);              %Señal de tensión en [V]
   Voltage_f = tsmovavg(Voltage,'s',71,1);
   f1= fit(Voltage_f(80:1000),Current_f(80:1000),'power1')
   B = coeffvalues(f1)
   alpha(i)=B(1,2)
end
```

Este código fue ejecutado para cada uno de los resultados de las muestras evaluadas obteniéndose los siguientes resultados:

Figura E-1: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-1

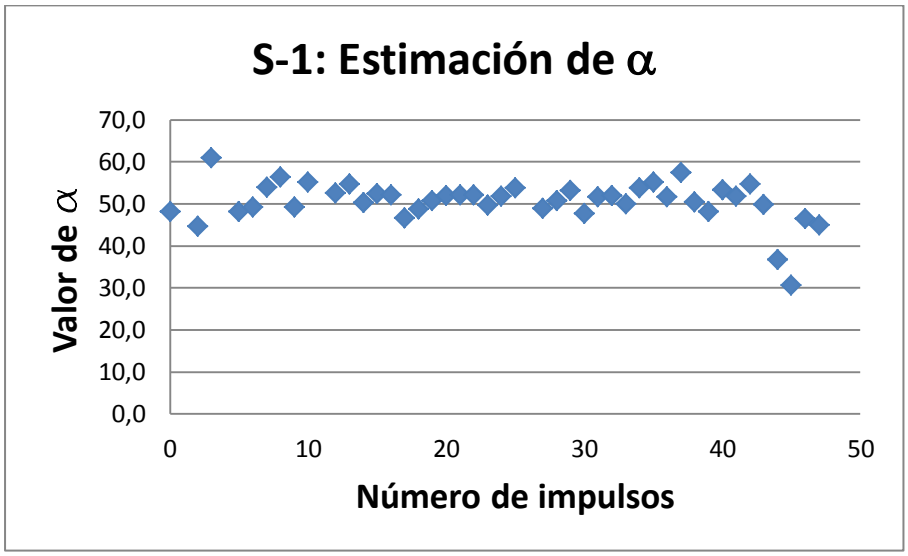


Figura E-2: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-2

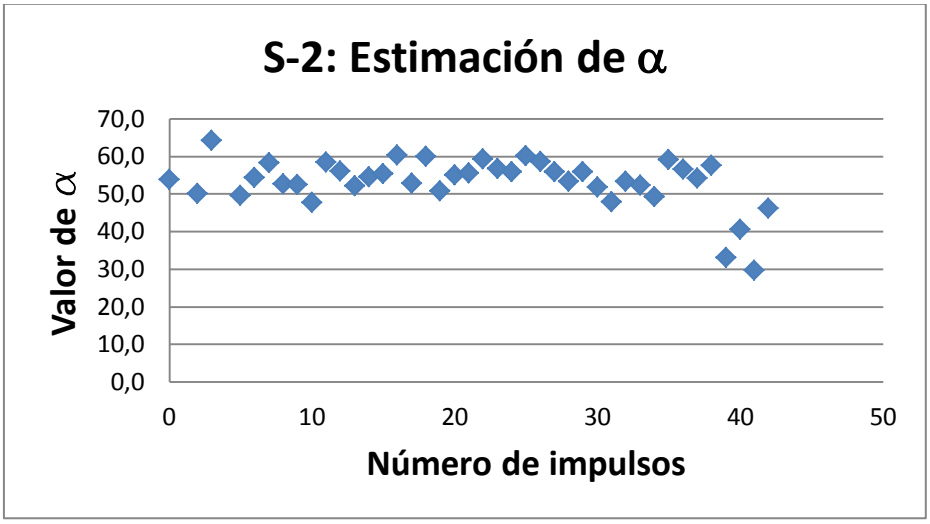


Figura E-3: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-3

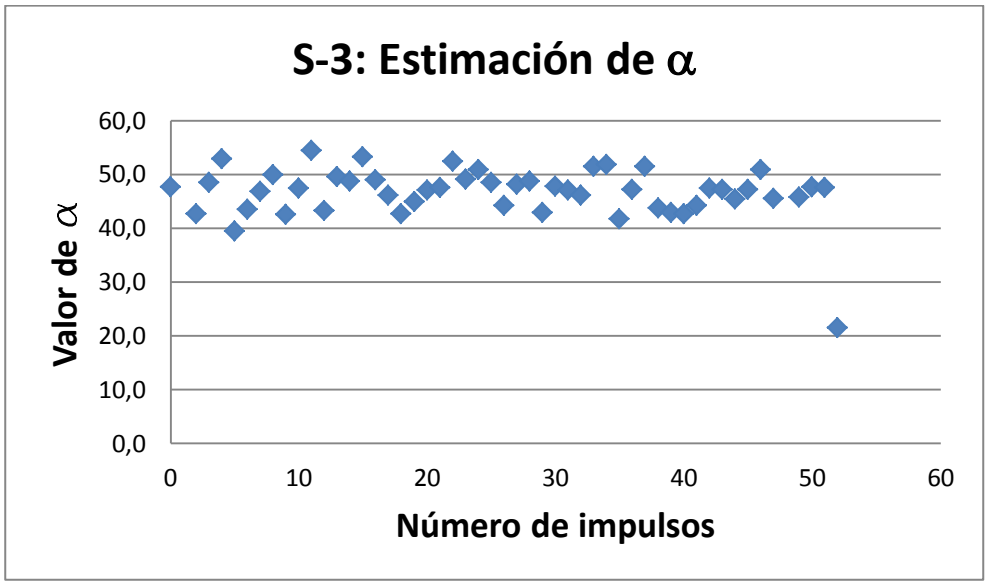


Figura E-4: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-4

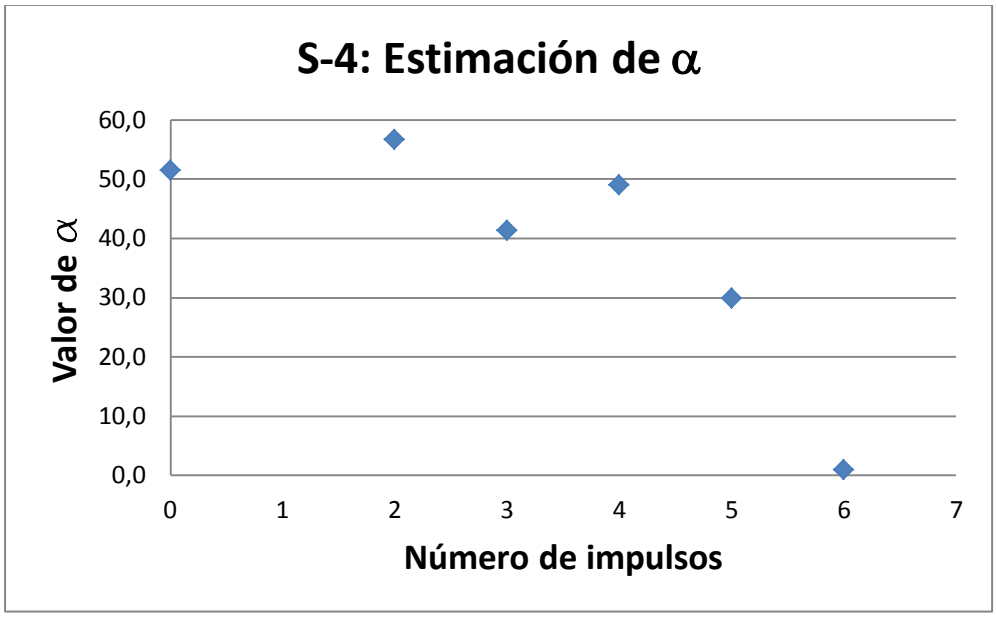


Figura E-5: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-5

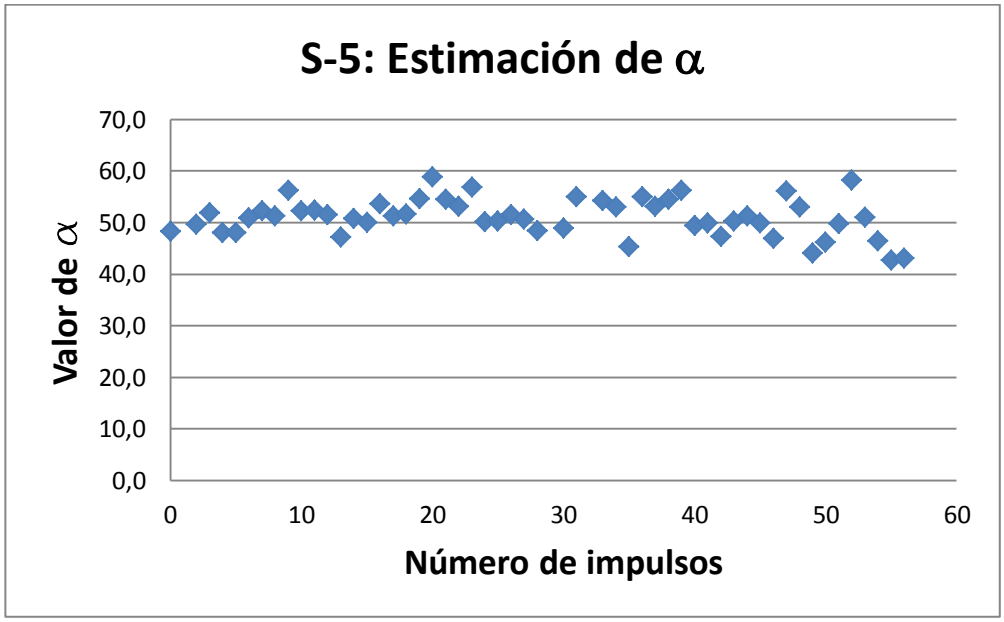
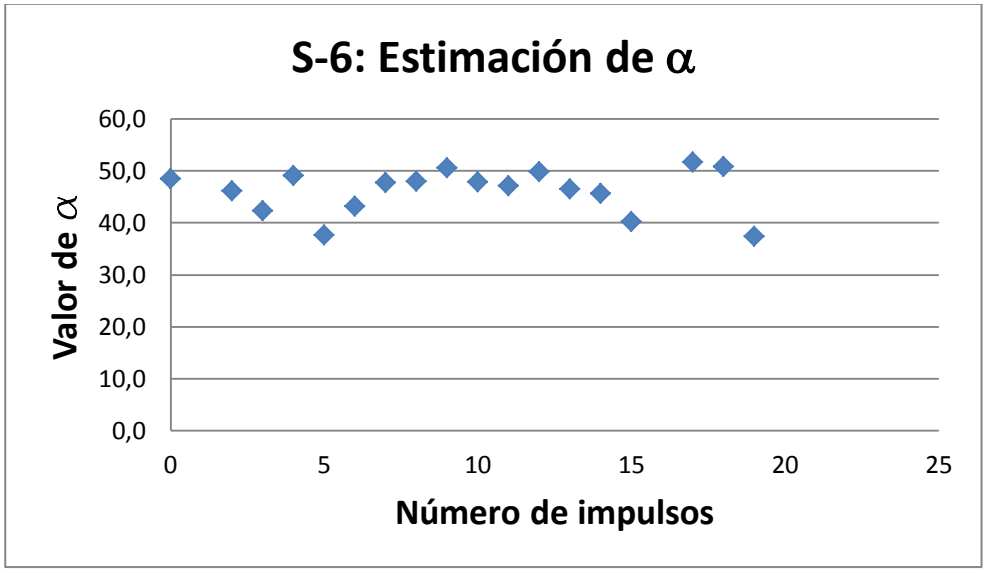


Figura E-6: Estimación del coeficiente de no linealidad α para la muestra S-6



Bibliografía

[1] Román F., “FUENTE DE CORRIENTE DE ALTA IMPEDANCIA,” 1007077.

[2] E. Philip Krider, “Benjamin Franklin and the First Lightning Conductors,” *International Commission on the History of Meteorology*. [Online]. Available: http://www.meteohistory.org/2004proceedings1.1/pdfs/01krider.pdf. [Accessed: 01-Nov-2016].

[3] Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1750-1890.” [Online]. Available: http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1750-1890.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016].

[4] G. W. Protectoe, “Guard-wire protector and lightning-arrester for electric railways,” US428653 A, 27-May-1890.

[5] A. Wurts, “Vania,” US433430 A, 29-Jul-1890.

[6] Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1890-1930.” [Online]. Available: http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1890-1930.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016].

[7] Woodworth, J. J., “The Electrolytic Arrester Story.” [Online]. Available: http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/electrolytic_arrester_story.pdf. [Accessed: 04-Nov-2016].

[8] Elmer E F Creighton, “Lightning-arrester.,” US992744 A.

[9] Mcfarlin John Robert, “Lightning arrester and method of making the same,” US1763667 A.

[10] G. L. R, “Indicating device for lightning arresters,” US1642239 A, 13-Sep-1927.

[11] E. R. H, “Circuit interrupting device,” US2296708 A, 22-Sep-1942.

[12] K. J. W, “Lighting arrester and gap unit therefor,” US3019367 A, 30-Jan-1962.

[13] Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1930-1965.” [Online]. Available: http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1930-1965.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016].

[14] W. H. Brattain and B. John, “Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials,” US2524035 A, 03-Oct-1950.

[15] Woodworth, J. J., “History of Arresters on Power Systems 1965-Present.” [Online]. Available: http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/History_of_Arresters_on_Power_Systems_1965-Present.pdf. [Accessed: 31-Oct-2016].

[16] Gawade Sudarshan Dilip, “ASCENDANCY OF SURGE ARRESTOR ON POWER SYSTEM,” *Int. J. Tech. Res. Appl.*, vol. 4, no. Issue 2, pp. 240–245.

[17] M. Michio, “Non-linear resistor,” US3503029 A, 24-Mar-1970.

[18] E. C. Sakshaug, J. S. Kresge, and S. A. Miske, “A new concept in station arrester design,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 96, no. 2, pp. 647–656, Mar. 1977.
[19] D. E. Raudabaugh, “Filament wrapped electrical assemblies and method of making same,” US4656555 A, 07-Apr-1987.
[20] D. W. Lenk, F. R. Stokum, and D. E. Grimes, “A new approach to distribution arrester design,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 2, pp. 584–590, Apr. 1988.
[21] M. Matsuoka, “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 6, p. 736, Jun. 1971.
[22] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Second Edition. Newnes, 2000.
[23] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. CRC Press, 1999.
[24] Alarcón A., Gamboa L., and Martinez J., “Caracterización de descargadores de sobretensión usando una fuente de corriente de alta impedancia,” Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá, Colombia, 2002.
[25] Poveda D., “Correlación experimental entre la corriente de fuga, la tensión residual, la energía acumulada debida a impulsos de corriente y la carga eléctrica en descargadores de sobretensión para distribución,” masters, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, 2014.
[26] Ibáñez H., “Estudio de degradación de descargadores de óxido de zinc tipo distribución,” Universidad Nacional de Colombia, 2004.
[27] “IEC 60099-4: 2014 ‘Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.’” International Electrotechnical Commission - IEC.
[28] J. B. Lee, I. K. Song, J. Y. Kim, B. S. Lee, and T. H. Kwon, “Aging characteristics of polymer lightning arrester by multi-stress accelerated aging test,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004*, 2004, vol. 1, p. 371–374 Vol.1.
[29] Torres L. Ramos J., “Evaluación de las corrientes de fuga en el envejecimiento de descargadores de media tensión,” Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
[30] M. Darveniza, D. R. Mercer, and L. R. Tumma, “Effects of multiple stroke lightning impulse currents on ZnO arresters,” in *12th International Conference on Electricity Distribution, 1993. CIRED*, 1993, p. 2.25/1-2.25/5 vol.2.
[31] González Mauricio, “Registro de la característica de los rayos en la línea experimental de la Palma Cundinamarca,” Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 1992.
[32] P. Pinceti and M. Giannettoni, “A simplified model for zinc oxide surge arresters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 393–398, Apr. 1999.
[33] C. A. Christodoulou, F. A. Assimakopoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopulos, “Simulation of metal oxide surge arresters behavior,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1862–1866.
[34] Meister, A, Shayani, R, and Gonçalves de Oliveira, M, “Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3(11), pp. 35–45, Oct. 2011.
[35] Mehdi Nafar, Ghahraman Solookinejad, and Masoud Jabbari, “Comparison of IEEE and Pinceti Models of Surge Arresters,” *Res. J. Eng. Sci.*, vol. Vol. 3(5), pp. 32–34, May 2014.
[36] ICONTEC, “NTC 4552-1 – PROTECCION CONTRA DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS (RAYOS). PARTE 1: PRINCIPIOS GENERALES.” 26-Nov-2008.

[37] J. G. Zola, “Correlation factor between standard surge waves for testing transient overvoltage suppressor devices,” *Ing. Cienc. Ingcienc*, vol. 4, no. 7, pp. 113–128, 2008.
[38] “IEEE Std C62.41.2^{TM}-2002 IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits.” 2002.
[39] A. Alarcón, C. Gómez, F. Santamaría, and F. Román, “Study of the behaviour of the corona current under controlled environmental conditions,” in *X International Symposium on Lightning Protection ICLP, ISSN*, 2009, pp. 2176–2759.
[40] “Quality of Metal Oxide Disks Impacts Surge Arrester Performance | INMR : Independent T&D Information Resources.” [Online]. Available: http://www.inmr.com/quality-metal-oxide-disks-impacts-arrester-performanc/. [Accessed: 19-May-2017].