



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frentes muy rápidos (VFTO)

Clara Rosa Rojo Ceballos I, E. M. Sc

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2021

Caracterización de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frentes muy rápidos (VFTO)

Clara Rosa Rojo Ceballos

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctora en Ingeniería Sistemas Energéticos

Director:

PhD. Farid Chejne Janna

Codirector (a):

PhD. Ernesto Pérez González

Línea de Investigación:

Energía

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Minas, Departamento de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2021

Dedicatoria

A Dios, mi eterno compañero.

*A Andrés y Alejandro, pilares de mi
alegría.*

A Alejandro y Andrés, mi mayor logro.

A mi alma, quien susurra:

I've loved, I've laughed and cried

I've had my fill, my share of losing.

And now, as tears subside.

I find it all so amusing.

To think I did all that.

And may I say, not in a shy way?

Oh, no, oh, no, not me, I did it my way.

En la voz de Frank Sinatra

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Clara Rosa Rojo Ceballos

Nombre

Fecha 16/01/2023

Fecha

Agradecimientos

«¿Cuándo te vas a graduar?» Acá por fin la respuesta. Esa pregunta difícil, compleja, cuestionadora y retadora es hoy merecedora del primer agradecimiento. A todos los que la pronunciaron, también gracias; esta es la respuesta material a su inquietud.

A todos los grandes que me han acompañado y elevado mi espíritu paso a paso para alcanzar la apreciada meta, inmenso agradecimiento: Farid Chejne J., Ernesto Pérez G., Jaime Blandón D., Alexander Correa E., Guillermo Mesa B., Andrés Osorio S. y David Hurtado S.; son grandes hombros sobre los cuales elaboré mis ideas y también fueron consuelo. Gracias por sus aportes, comentarios acertados, correcciones oportunas e incondicionales. Ustedes han sido compañía grata en la bella odisea.

A mis grandes hijos, agradezco todo.

Resumen

Caracterización de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frentes muy rápidos (VFTO)

Este trabajo presenta la caracterización de un tipo de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frente muy rápido (VFTO. Very Fast Transient Overvoltages), mediante un desarrollo teórico-experimental. Tradicionalmente, los varistores son analizados para transitorios un poco más lentos, del orden de los cientos de kHz, asociados principalmente a descargas eléctricas atmosféricas. Sin embargo, existen fenómenos de muy alta frecuencia, principalmente en estaciones encapsuladas o dispositivos aislados en gases, que podrían presentar transitorios muy rápidos, y este tipo de protección no está ampliamente estudiada frente a estos fenómenos.

En la primera etapa, se realiza el estado del arte que comprende el estudio de los diferentes modelos de los descargadores de sobretensión ante sobretensiones con tiempos de frente muy rápido. Estos son el punto de partida para la caracterización de dichos dispositivos ante los pulsos de tensión VFTOs. Además, se presenta un análisis teórico sobre la estructura interna del varistor de ZnO, permitiendo establecer los efectos no lineales causados por los aditivos que contiene este material, del mismo modo, se estudian los mecanismos de conducción eléctrica que explican el porqué de la desviación de la ley de Ohm en estos dispositivos. Mas adelante, se planea y se lleva a cabo un diseño experimental con un solo factor, para un total de 5 unidades experimentales, a las cuales se le realizaron 20 réplicas. Este diseño experimental permitió seleccionar un solo varistor en representación de la población muestral, mediante el Análisis de Varianza (ANOVA. Analysis Of Variance).

En la última parte, se presenta la forma de onda obtenida por el generador de pulsos de tensión diseñado, la cual se caracterizó por su nivel de voltaje, frecuencia y tiempo de

X Caracterización de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frentes muy rápidos (VFTO)

frente (Rise Time); finalmente, se presentan las pruebas de laboratorio al varistor seleccionado, cuya respuesta en el voltaje residual y corriente de descarga permitió establecer el dominante efecto capacitivo en el comportamiento de varistor ante pulsos de tensión VFTOs.

Palabras clave: Descargadores de sobretensión, ANOVA, varistor, tiempo de frente, réplicas, voltaje residual y corriente de descarga.

Abstract

Study of the behavior of low voltage ZnO varistors against very fast transient overvoltages (VFTO).

This work performs the characterization of a type of ZnO varistor, used in low voltage against very fast transient overvoltages with front time (VFTO), using a means theoretical-experimental development. Traditionally, varistors are analyzed for transients slower, that is about hundreds of kHz, mainly associated with atmospheric electrical discharges. However, there are very high-frequency phenomena, essentially in encapsulated stations or devices insulated-gas, which could present very fast transients, and this type of protection, has not been widely studied in the face of these phenomena.

In the first stage, the state of the art is carried out, which includes the study of the different models of surge arresters in the event of surges with fast front times. These are the starting point for the characterization of these devices in the face of voltage pulses. VFTOs. Furthermore, a theoretical analysis of the internal structure of the ZnO varistor is presented, establishing the non-linear effects caused by the additives contained in this material, as well as the electrical conduction mechanisms that explain the reason for the deviation of Ohm's law in these devices. Then an experimental design with a single factor is planned and carried out, for five experimental units, to which 20 replications were made. This experimental design allowed the selection of a single varistor in the sample population representation, using the Analysis of Variance (ANOVA).

In the last part, the waveform obtained by the designed voltage pulse generator is presented, which was characterized by parameters such as voltage level, frequency, and rise time. Finally, the laboratory tests at the selected varistor are presented. Thus, the response in the residual voltage and discharge current allowed to establish the dominant capacitive effect in the behavior of the varistor before voltage pulses VFTOs

XII Caracterización de varistores de ZnO ante sobretensiones transitorias con tiempo de frentes muy rápidos (VFTO)

Keywords: Surge arresters, ANOVA, varistor, head-on time, replica, residual voltage and discharge current

Contenido

Pág.

Contenido

1. Descargadores de sobretensiones de ZnO	5
1.1 Varistores de ZnO	5
1.2 Generalidades del varistor de ZnO.....	6
1.3 Comportamiento eléctrico del varistor de ZnO.....	8
1.4 Modelos de descargadores de sobretensión con varistores de óxido metálico (ZnO) 10	
2. Comportamiento no lineal de los varistores de ZnO	16
2.1 La relación entre corriente de descarga y la tensión residual en un descargador de sobretensión de ZnO	17
2.2 Relación entre la curva tensión-corriente y la microestructura del varistor de ZnO 19	
2.3 Desviación de la ley de Ohm en los varistores de ZnO	20
2.3.1 Derivación de la densidad de corriente en función del campo eléctrico mediante la solución aproximada de la ecuación de transporte de Boltzmann	21
3. Generación de sobretensiones transitorias muy rápidas	26
3.1 Características de las sobretensiones transitorias con tiempo de frente muy rápidos (VFOT).....	27
3.1.1 Frecuencia de la onda de las tensiones transitorias de frente muy rápido	28
3.1.2 Tiempo de frente de las sobretensiones transitorias	28
3.1.3 Análisis de las formas de ondas de las sobretensiones transitorias muy rápidas (VFOT)	29
3.2 Generador de pulsos de tensión de gran magnitud con tiempos de frente muy rápidos.....	31
3.2.1 Características de la onda de tensión del generador de pulsos VFOT en vacío 40	
3.2.2 Caracterización de la zona de interés	44
3.2.3 Expresión matemática de la forma de onda de tensión de la zona de interés 46	
3.2.4 Verificación mediante la comparación entre la forma de onda obtenida con los datos experimentales y la forma de la curva ajustada	47
3.2.5 Simulaciones	49
4. Desarrollo experimental.....	51
4.1 Establecimiento de las réplicas de las pruebas de ensayo	51
4.2 Circuito de prueba	53

4.3	Procedimiento de ensayo.....	55
4.4	Análisis estadístico de los resultados.....	57
4.4.1	Análisis de Varianza realizado a los resultados experimentales	58
4.4.2	Aplicación del Análisis de Varianza a los resultados experimentales.....	60
4.5	Caracterización del comportamiento de los varistores de ZnO ante impulsos tipo VFTO	66
4.6	Relación de los campos eléctricos versus densidad de corriente y/o tensión versus corriente en el varistor de ZnO sometido a prueba.....	71
5.	Conclusiones	75
5.1	Conclusiones generales.....	75
5.2	Trabajos futuros.....	77
C. 1	Resultados experimentales de los valores máximos de tensión residual los cinco varistores.....	87
Bibliografía		105

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Estructuras cristalinas de ZnO: wurtzita hexagonal.	7
Figura 1-2: Fases en la microestructura de los varistores de ZnO.	7
Figura 1-3: Circuito equivalente de las fases de la microestructura del varistor ZnO.	8
Figura 1-4: Formación de la barrera Schottky.	9
Figura 2-1: Curva tensión-corriente.	18
Figura 2-2: Relación de la curva tensión-corriente con la microestructura del varistor de ZnO [30].	19
Figura 3-1: Forma de onda del VFTO.	27
Figura 3-2: Circuito equivalente del generador de pulsos con tiempos de frente muy rápidos.	32
Figura 3-3: Componentes del generador de pulsos VFTO(s).	33
Figura 3-4: Esquema circuital de la etapa de energización y protección del generador de pulsos con tiempo de frente muy rápido.	34
Figura 3-5: Montaje del sistema de energización y protección del generador de pulsos VTFO.	34
Figura 3-6: Esquema de conexión de los devanados del transformador de pulsos.	35
Figura 3-7: Circuito equivalente del MPC diseñado. Su función es aumentar la magnitud y reducir el tiempo de frente de la tensión inicial del generador de pulsos VFTO.	36
Figura 3-8: Implementación del sistema del MPC en el generador de pulsos diseñado.	37
Figura 3-9: Disposición física del TLT en el generador de pulsos.	37
Figura 3-10: Circuito equivalente del transformador de línea de transmisión (TLT) [2].	38
Figura 3-11: Esquema de conexión serie a la salida del TLT [42].	38
Figura 3-12: Proceso de la generación de alta tensión en la tercera línea.	39
Figura 3-13: Proceso de generación de pulsos de tensión con tiempo de frentes muy rápidos a través de las diferentes etapas del generador de pulsos VFTO.	40
Figura 3-14: Forma de onda de tensión de salida del generador de pulsos VFTO.	41
Figura 3-15: Forma de la onda de tensión y el espectro de frecuencia de la <i>zona I</i>	42
Figura 3-16: Forma de la onda de tensión y espectro de frecuencia de la <i>zona II</i>	43
Figura 3-17: Forma de onda de tensión y espectro de frecuencia de la <i>zona III</i>	44
Figura 3-18: Valores pico de la señal de tensión versus tiempo de la zona de interés... ..	45
Figura 3-19: Comparación entre la curva ajustada por el método de mínimos cuadrados y la curva originada por los datos experimentales de tensión en vacío del generador de pulsos VFTO.	48
Figura 3-20: Compresión del pulso desde C1 hasta el TLT.	49

Figura 3-21: Modelo en ATP de circuito generador de VFOT.....	50
Figura 3-22: Tensión de circuito abierto del generador de pulsos tipo VFOT comparada con la señal real (32 kV, 41.6 ns).....	50
Figura 4-1: Circuito de prueba para determinar la tensión virtual y la corriente de descarga que circula por los terminales de los cinco varistores de referencia B40K150.	54
Figura 4-2: Circuito experimental, realizado para el caso de estudio, planteado para determinar el comportamiento de un varistor comercial de uso en bajo voltaje.....	54
Figura 4-3: Comparación del comportamiento de los dos divisores, el resistivo y resistivo compensado, ante la frecuencia.	55
Figura 4-4: Disposición de las sondas de tensión y de corriente del osciloscopio para la detección de tensiones residuales y corrientes de descarga de los varistores.	57
Figura 4-5: Verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor 1 de ZnO.	60
Figura 4-6: Comportamiento de los varistores respecto al intervalo de confianza.	62
Figura 4-7: Comportamiento del intervalo de confianza de los varistores 2,4 y 5.	65
Figura 4-8: Gráfica de residuos de tensión residual de los varistores 2, 4 y 5.	65
Figura 4-9: Forma de onda de la tensión residual y de la corriente de descarga del varistor de ZnO.	67
Figura 4-10: Desfase entre el valor máximo de tensión residual y el valor máximo de la corriente de descarga del varistor de ZnO.	68
Figura 4-11: Tensión residual y su correspondiente espectro de frecuencia del varistor de ZnO referencia B40K150.	69
Figura 4-12: Corriente de descarga del varistor de ZnO referencia B40K150 y su correspondiente espectro de frecuencia.....	70
Figura 4-13: Curva característica de densidad de corriente -campo eléctrico del varistor bajo prueba.....	71
Figura 4-14: Curva característica densidad de corriente versus campo eléctrico (C-J-E).....	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de los modelos que describen el comportamiento dinámico de los varistores de ZnO.	11
Tabla 3-1: Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones.	30
Tabla 3-2: Formas de VFTO generadas en una subestación encapsulada de 800 kV [39].	31
Tabla 3-3: Fichas técnica de los componentes de la etapa de energización.	34
Tabla 3-4: Características técnicas del transformador de pulsos.	35
Tabla 3-5: Valores del tiempo de frente que presentan los pulsos de tensión de la zona de interés para diferentes divisiones de tiempo.	45
Tabla 3-6: Tabla de los coeficientes de la forma de onda de los pulsos de tensión VFTO de la zona de interés.	47
Tabla 3-7: Características transitorias de la forma de onda de los pulsos VFTO en la zona de interés o zona uno.	48
Tabla 3-8: Principales parámetros del circuito MPC.	49
Tabla 4-1: Estadística descriptiva de la prueba.	52
Tabla 4-2: Valores de la corriente de fuga de los cinco varistores.	56
Tabla 4-3: Resultado de la verificación de los datos de tensión residual y corriente de descarga de los cinco varistores de ZnO.	59
Tabla 4-4: Análisis de Varianza aplicado a los resultados de tensión residual usando MINTAB19.	61
Tabla 4-5: Resumen del modelo. Coeficiente de determinación.	61
Tabla 4-6: Medias de cada grupo de resultados asociados a los cinco varistores.	62
Tabla 4-7: Contrastaciones de los intervalos de confianza utilizando el método de comparación de Tukey con un intervalo de confianza de 95%.	63
Tabla 4-8: Análisis de Varianza usando MINITAB para el factor varistor.	64
Tabla 4-9: Medias de cada grupo de resultados asociados a los tres varistores con relación a la tensión residual.	64

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
VFTO	Very Fast Transient Overvoltages
DPS	Descargadores de sobretensiones
ZnO	Óxido de Zinc
SiO	Carburo de Silicio
Bi ₂ O ₃	Óxido de Bismuto
CoO	Óxido de Cobalto
MnO	Óxido de Manganeso
Sb ₂ O ₃	Trióxido de Antimonio
mA	Miliamperio
kA	Kiloamperio
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
kV	Kilovoltio
MPa	Megapascal
TLT	Transmission Line Transformer
GIS	Gas Insulated Switchgear

Introducción

Las subestaciones encapsuladas en SF₆ GIS (Gas Insulated Switchgear) se han convertido en una buena solución para los sistemas de potencia de ultra y extra alta tensión, debido a que requieren menor mantenimiento en comparación con las subestaciones convencionales; además, son a prueba de contaminación ambiental, brindan mayor seguridad para los operadores, no producen radio interferencia y son de tamaño reducido [3].

Ahora bien, las principales limitaciones técnicas que afectan el funcionamiento eficiente de las GIS son: las fallas del aislamiento provocadas por tensiones transitorias de tipo externo e interno, problemas mecánicos, fugas de gas, fallas monofásicas y la generación de sobretensiones transitorias con tiempos de frente de onda del orden de los nanosegundos (VFTO. Very Fast Transient Overvoltages) [1]; Asimismo, cuando se operan los equipos de conmutación y cuando llegan los cortes rápidos de tensión, producidos por flameos inversos cercanos a la subestación. Estos transitorios de tensión se producen como resultado de la falla del aislamiento, durante las condiciones de servicio y de la descomposición de las partículas del gas entre los contactos de los equipos de maniobra durante su operación, con la consecuente conductividad molecular que se convierte en un cortocircuito que termina siendo alimentado por la red potencia.

La forma de onda de los VFTO no está estandarizada, pues depende del punto de falla y de la configuración de la subestación. No obstante, se han realizado estudios que buscan no solo obtener una forma de onda estándar, sino también establecer sus características principales: gran amplitud, tiempo de frente rápido para alcanzar el valor máximo y el contenido de altas frecuencias.

Los VFTO producen ondas viajeras que se propagan por toda la GIS y experimentan reflexiones y refracciones de acuerdo con la teoría de la línea de transmisión electromagnética por cables. De esta manera, la magnitud, polaridad y dirección de desplazamiento están determinados por las impedancias características de los equipos a los cuales afectan. Las subestaciones encapsuladas, para protegerse contra este tipo de sobretensiones, utilizan Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS), cuya parte principal son los varistores de óxido metálico, generalmente Óxido de Zinc (ZnO) [2].

La evolución de la tecnología de los DPS se ha caracterizado por el mejoramiento de su parte activa (el varistor), para obtener un nivel de protección acorde con las exigencias del aislamiento y la capacidad de energía de las redes eléctricas; situación que ha incentivado la investigación con el fin de proponer diferentes modelos que verifiquen el comportamiento no lineal del varistor, ante descargas atmosféricas y de maniobra. La mayoría de los modelos propuestos responden a sobretensiones transitorias con tiempo de frente rápido como las causadas por los rayos y de tiempo de frente lento como las de tipo maniobra.

En este sentido, diferentes grupos de investigación han propuesto modelos, con aceptable precisión, para analizar el comportamiento dinámico de estos dispositivos ante este tipo de eventos transitorios con tiempo de frente mayor o igual a $1\mu\text{s}$. En relación con los VFTO, estos modelos presentan algunas deficiencias por no considerar la capacitancia propia del varistor y la parasita con respecto a tierra.

Investigaciones sobre la naturaleza, origen, el espectro de frecuencia y posibles formas de ondas de los VFTO posibilitan no solo el proceso de su estandarización, sino también la caracterización del comportamiento y conducción no lineal de DPS de ZnO, ante este tipo de sobretensiones transitorias.

Lo anterior propiciará el desarrollo de normas, procedimientos y ensayos que permitan a los fabricantes establecer el comportamiento de los descargadores de sobretensiones y coordinarlo con el aislamiento de los diferentes equipos del sistema eléctrico de potencia.

Por lo tanto, se desarrolló la tesis doctoral cuyo objetivo general fue caracterizar los varistores de ZnO parte activa de los DPS, ante pulsos de tensión tipo VFTO, determinando

el voltaje residual y la corriente de descarga como respuesta de su comportamiento dinámico, mediante realización de pruebas de laboratorio. A su vez, los objetivos específicos fueron:

- Caracterizar la parte activa (varistor de ZnO) de los descargadores de sobretensión, ante sobretensiones transitorias con un tiempo de frente en el rango de 20ns a 50ns.
- Proponer una ecuación constitutiva de la densidad de corriente de un varistor de ZnO cuando se le aplica una sobretensión tipo VFOT.

Por otra parte, la estrategia metodológica partió, inicialmente, de una detallada revisión del estado del arte. Luego se caracterizó la señal de salida del generador de pulsos de voltaje tipo VFOT, el cual fue diseñado y construido para esta investigación. De igual modo, se analizó el comportamiento de la microestructura de los varistores de ZnO y se dedujo, mediante la ecuación del transporte de Boltzmann, la ecuación constitutiva de la densidad de corriente de los portadores de carga de los varistores de ZnO ante campos eléctricos de gran magnitud.

Finalmente, se desarrolló la parte experimental, en la cual se eligió el tipo de varistor para ser estudiado y el equipo de medición a ser utilizado. Se realizaron las diferentes pruebas, cuyos resultados permitieron realizar el análisis estadístico de varianza con el fin de seleccionar el varistor que representa a la muestra poblacional. Después de realizar las anteriores actividades, se centró la atención en el varistor escogido, para realizar su caracterización mediante el voltaje residual, la corriente de descarga y las curvas J versus E .

1. Descargadores de sobretensiones de ZnO

Todos los equipos de una red eléctrica son vulnerables a las diferentes sobretensiones que se puedan presentar, debido a descargas atmosféricas y a operaciones por maniobra; por este motivo, los descargadores de sobretensiones (DPS) han adquirido una gran importancia como elemento de protección para garantizar la confiabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos de potencia.

Sin embargo, debido a la imposibilidad de diagnosticar el funcionamiento los DPS en sitio, es necesario proponer modelos que simulen el comportamiento dinámico de estos dispositivos en el sistema [4]. Los grupos de investigación no solo han planteado modelos que simulan el comportamiento de los DPS frente a diferentes tipos de sobretensiones, sino que también han estudiado las propiedades eléctricas de los varistores de ZnO, cuya red cristalina tiene un comportamiento no lineal bajo la acción del campo eléctrico [5], [6], [7], [8].

El presente capítulo se enfoca en el descargador de sobretensiones de ZnO como elemento de protección, centrandó la atención en el análisis de la estructura cristalina de su componente activo (varistores) y de su respuesta a campos eléctricos intensos; al tiempo que se estudian los modelos propuestos para simular el comportamiento no lineal del varistor.

1.1 Varistores de ZnO

Los varistores de ZnO son materiales cerámicos semiconductores que se caracterizan por una respuesta no lineal ante la aplicación de una sobretensión. El varistor ZnO fue desarrollado inicialmente por el grupo de trabajo de Matsuoka y ha estado disponible en el

mercado desde 1972. A partir de este momento, se reconoció su superioridad sobre los varistores de SiC (carburo de silicio) para su uso en el área de protecciones eléctricas [9].

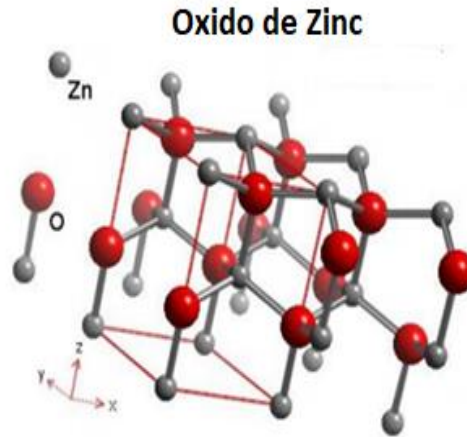
Los varistores de ZnO al ser sometidos a altas tensiones pasan de un estado altamente capacitivo a una condición de alta conductividad. Dichos dispositivos se caracterizan porque su tensión-corriente es similar a la de dos diodos Zener en conexión *back to back*, cuya función principal es mantener una tensión constante en sus terminales, aunque exista un cambio importante de corriente. No obstante, la gran diferencia entre el varistor de ZnO y estos diodos es que el ZnO pueden limitar sobretensiones en ambas direcciones [10].

Ahora bien, las características eléctricas de los varistores están estrechamente relacionadas con su microestructura, la cual está compuesta de granos de ZnO y pequeñas cantidades de dopantes de otros óxidos metálicos, tales como Bi_2O_3 , CoO, MnO, Sb_2O_3 , y Cr_2O_3 . El óxido de bismuto (Bi_2O_3) genera estados electrónicos de superficie capaces de atrapar carga en la interfase ZnO-ZnO, contribuyendo eficazmente a la formación de la barrera de potencial y provocando el comportamiento no lineal del material, elementos que constituyen el punto de mayor interés de los investigadores [11].

1.2 Generalidades del varistor de ZnO

El ZnO es uno de los compuestos semiconductores de los grupos II y VI; es un policristalino tipo *n* con una estructura Wurtzita. La diferencia de electronegatividades entre el Zinc y el Oxígeno produce uno de los compuestos más iónicos de dicha familia, lo que contribuye a formar una estructura cristalina hexagonal más estable, como se ilustra en la **figura 1.1**

Figura 1-1: Estructuras cristalinas de ZnO: wurtzita hexagonal.

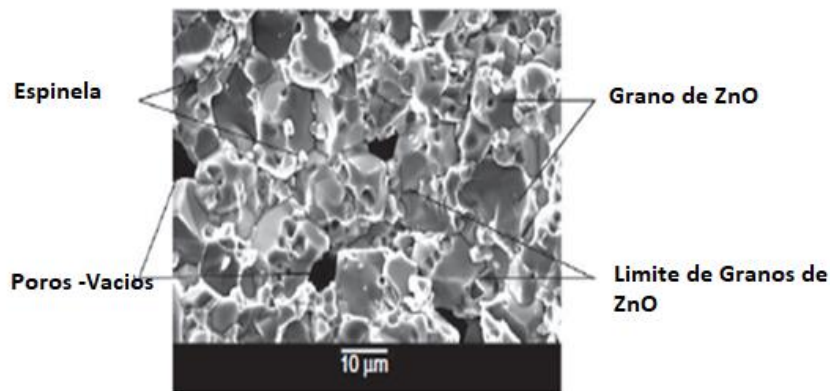


Nota. Las esferas sombreadas en gris y rojo representan átomos de Zinc (Zn) y Oxígeno (O), respectivamente [10].

Durante el proceso de sinterización del varistor de ZnO se forman, en su microestructura, diferentes fases: los granos conductores de ZnO, la capa intergranular eléctricamente aislante o límite de grano y los cristales con estructura de espinela. Cada una de estas regiones se caracteriza por una estructura electrónica específica que interactúa con la de las otras, contribuyendo, de esta manera, a la estructura total [12].

En la **figura 1.2** se muestran las fases presentes en la microestructura de los varistores de ZnO.

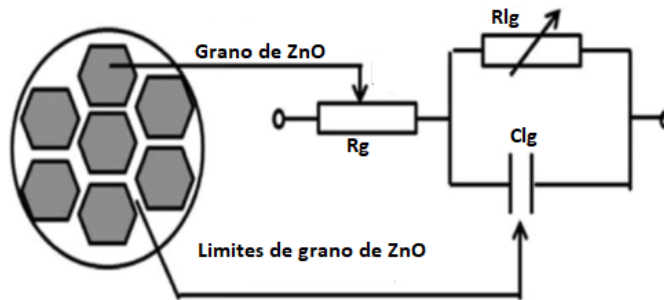
Figura 1-2: Fases en la microestructura de los varistores de ZnO.



Nota. Parámetros, tamaño del grano y su distribución, fases secundarias de Bi_2O_3 a lo largo de los límites del grano y el tamaño de porosidades que hacen parte de la microestructura del varistor de ZnO [11].

En la **figura 1.3** se presenta el circuito equivalente asociado con la estructura del varistor de ZnO. De esta representación circuital, se puede establecer que la corriente fuga total tiene dos componentes, una resistiva y una capacitiva [13].

Figura 1-3: Circuito equivalente de las fases de la microestructura del varistor ZnO.



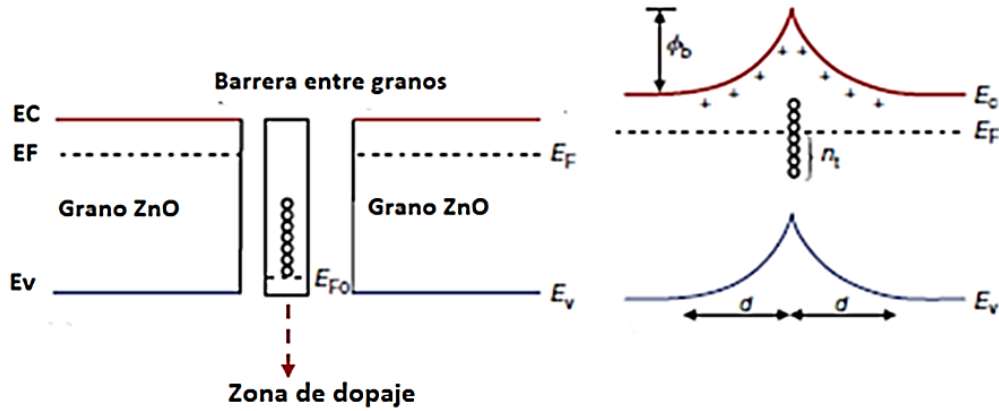
Nota. Circuito equivalente de las fases de la microestructura del varistor de ZNO donde R_g es la resistencia asociada al grano de ZnO y R_{lg} y C_{lg} resistencia y capacitancia asociadas a la zona de bornes de los granos de ZnO; [19]. En esta zona aparece una barrera electrostática, la cual se comporta como un semiconductor tipo n-p-n, y controla la característica no lineal del varistor [12].

1.3 Comportamiento eléctrico del varistor de ZnO

Por los resultados obtenidos en la investigación realizada por Matsuoka en 1971, se ha generado mucho interés en explicar dónde y por qué se produce esta no linealidad en el varistor. Entre los modelos de conducción propuestos, el más relevante es el presentado por Pike, en el cual se establece que la no linealidad de la característica V-I es causada por los portadores de carga que fluyen a través de la doble barrera de Schottky (DSB), formada por los límites de grano. A su vez, esta barrera está constituida por dos placas de ZnO separadas por material de ZnO dopado y por la capa intermedia que se puede observar en la **figura 1.4**. En consecuencia, cuando se unen estos tres componentes se origina un flujo de electrones para establecer el equilibrio térmico, el cual mantiene la carga

atrapada, creándose una doble barrera de potencia electrostática simétrica $\phi(x)$ que provoca la curvatura de las bandas de energía [10], [14].

Figura 1-4: Formación de la barrera Schottky.



Nota. En esta figura se muestra la formación de la barrera Schottky en los bordes de grano de ZnO, donde ϕ_b es la altura de la barrera, d el ancho de la zona de depleción o agotamiento y n_t es carga atrapada entre las bandas de valencia y la de conducción.

La altura inicial de la barrera electrostática (ϕ_b), es función de la tensión aplicada como se expresa en la ecuación 1.1:

$$\phi_b(V) \approx \frac{V_c}{4} \left[1 - \frac{V}{V_c} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

Donde:

- V_c : voltaje de corte del varistor.
- V : voltaje aplicado.

Es decir, los electrones tendrán energía suficiente para atravesar la barrera Schottky, si $V = V_c$. Este proceso no es tan simple, ya que el aumento de voltaje crea dos efectos opuestos: un efecto directo que tiende a disminuir ϕ_b y otro indirecto que tiende a aumentar la carga atrapada y por tanto a aumentar Φ_B . A este fenómeno se le conoce con el nombre de anclaje de la barrera de potencial, dicha barrera solo colapsará cuando todos los estados de interfase hayan sido ocupados [13].

1.4 Modelos de descargadores de sobretensión con varistores de óxido metálico (ZnO)

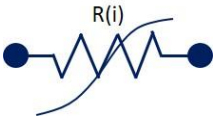
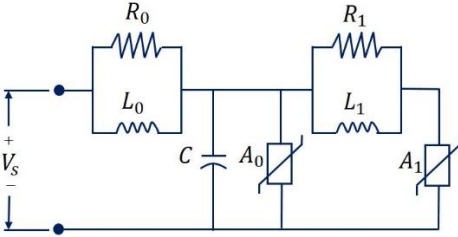
El comportamiento dinámico de los varistores de ZnO depende de la frecuencia y está representado por la curva característica no lineal I versus V o J versus E. Debido a la imposibilidad de probar los DPS en condiciones operativas de la red, es necesario diseñar modelos circuitales que permiten analizar su comportamiento dinámico ante diferentes condiciones de tensión, frecuencia y temperatura [15].

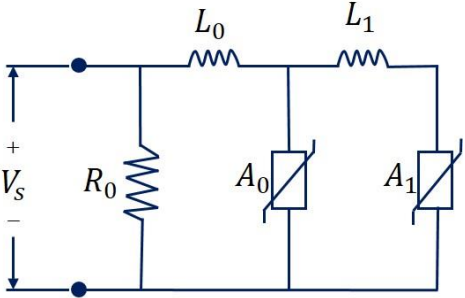
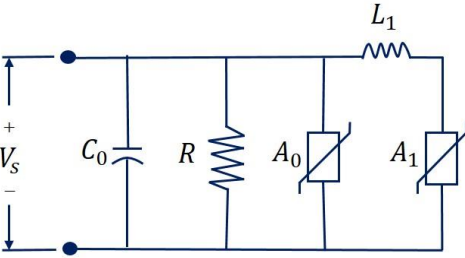
En este sentido, la proliferación de modelos computacionales de simulación ha aumentado debido a las nuevas experimentaciones en laboratorios, relacionadas con el comportamiento del varistor de ZnO ante sobretensiones tipo maniobra, de frente rápidos y muy rápidos [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Estos modelos han sido propuestos como herramientas para estudios de coordinación de aislamiento, incluyendo la selección correcta y ubicación óptima del DPS en el sistema de potencia.

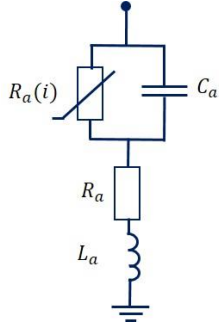
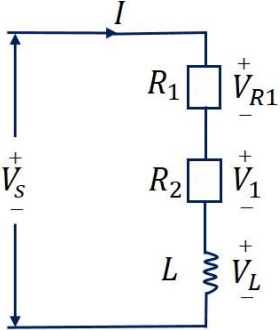
Así pues, algunos modelos fueron desarrollados para demostrar el comportamiento de los DPS ante condiciones específicas, pero la mayoría de ellos se utilizan para sobretensiones de frente rápido y, en menor proporción, para el estudio de los efectos de los fenómenos transitorios de tiempo de frente muy rápidos en sistemas de ultra y extra alta tensión, especialmente en subestaciones encapsulada en SF6.

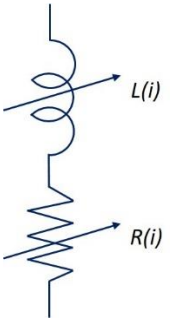
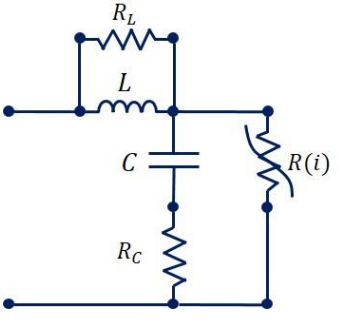
Actualmente se encuentran disponibles muchos modelos de descargadores de sobretensión, los cuales se muestran en la **tabla 1.1**, algunos de ellos son una simplificación del modelo propuesto por el IEEE Working Group.

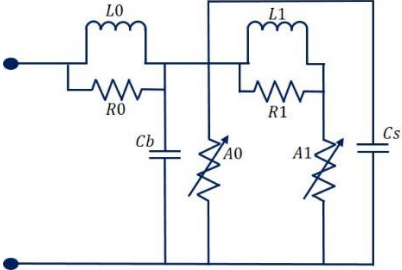
Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de los modelos que describen el comportamiento dinámico de los varistores de ZnO.

Modelo	Descripción
<p data-bbox="201 386 401 415">Convencional</p> 	<p data-bbox="695 386 1871 516">Modelo convencional o modelo de resistencia no lineal independiente de la frecuencia. La característica V versus I puede ser representada por un número arbitrario de segmentos exponenciales, donde cada segmento se expresa por la siguiente ecuación:</p> $i = p \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q$ <p data-bbox="695 537 1885 748">donde p y q dependen del material del varistor y V_{ref} es una tensión arbitraria, que normaliza la ecuación durante la exponenciación. Su desventaja es la imposibilidad de simular el efecto dinámico del varistor, es decir, el valor pico de la tensión residual ocurre en el mismo tiempo en que el valor pico de la corriente es alcanzado [22].</p>
<p data-bbox="201 816 638 898">Propuesto por el IEEE Working Group.</p> 	<p data-bbox="695 816 1871 1052">En este modelo la característica no lineal V versus I se obtiene mediante dos resistencias no lineales: A_0 y A_1, separados por el filtro pasa bajo (R_1, L_1), el cual, para tiempos de frente lento, presenta una impedancia baja; en cambio, para impulsos de corriente con tiempos de frente rápidos, la corriente de descarga se deriva entre las dos resistencias no lineales. C es la capacitancia asociada al DPS.</p> <p data-bbox="695 1068 1885 1304">Para impulsos de corriente de descarga con tiempo de frente en el rango de $0.5\mu s$ a $45\mu s$, el modelo proporciona resultados satisfactorios comparados con la tensión residual dado por el fabricante. Este modelo sugiere un proceso iterativo para la corrección de sus parámetros, los cuales se determinan teniendo en cuenta las características físicas del DPS [23].</p>

Modelo	Descripción
<p data-bbox="254 329 753 358">Propuesto por Pinceti y Giannettoni</p> 	<p data-bbox="831 329 1890 776">El modelo de Pinceti y Giannettoni se obtiene por la simplificación del modelo propuesto por el grupo de la IEEE, por lo tanto, su comportamiento es muy similar a este. En este modelo, las resistencias R_0, R_1 son reemplazadas por una resistencia de derivación de $1M\Omega$ que evita las oscilaciones numéricas; además, se elimina la capacitancia asociada al varistor porque su efecto es de poca significancia en el comportamiento dinámico de este. Como la función de L_0 y L_1 es caracterizar el comportamiento del varistor ante impulsos de corriente de frente rápido, sus valores deben ser calculados en función de la tensión residual: $V_{residual8/20} \mu s \circ V_{residual30/60} \mu s$ [24].</p>
<p data-bbox="205 849 632 878">Propuesto por Fernández et al.</p> 	<p data-bbox="831 849 1890 1138">Este modelo es una modificación del propuesto por el grupo de trabajo de la IEEE, donde R_o y L_o son eliminados por su poca incidencia en el comportamiento del varistor ante impulsos de corriente $8/20 \mu s$ y C_o es la capacitancia del varistor. La resistencia R se utiliza para evitar oscilaciones numéricas. Este modelo proporciona resultados satisfactorios para corrientes con tiempo de frente de $8 \mu s$. [17].</p>

Modelo	Descripción
<p data-bbox="254 375 632 407">Propuesto por Popov et al.</p> 	<p data-bbox="709 326 1896 610">Es otra simplificación del modelo Schmidt. Se conserva el efecto capacitivo, sin embargo, la dependencia con la temperatura es despreciada, lo cual lo hace no apto para el análisis del comportamiento del varistor en la zona de baja corriente. Este modelo no es apropiado para impulsos con un tiempo de frente del orden de los nanosegundos y solo se puede utilizar para determinar el comportamiento del varistor ante sobrevoltajes por maniobra con tiempos de frente de 30 μs y sobrevoltajes tipo rayo 8/20 μ [6].</p>
<p data-bbox="205 862 604 894">Propuesto por Hileman et al.</p> 	<p data-bbox="709 911 1896 1097">El modelo propuesto por Hileman es una simplificación del modelo de Schmidt, también conocido como modelo CIGRE. Se elimina el efecto de temperatura y la capacitancia, esto implica que no es adecuado para el análisis del comportamiento del varistor en la zona de baja corriente [19].</p>

Modelo	Descripción
<p data-bbox="199 328 546 360">Propuesto por Kim et al.</p> 	<p data-bbox="688 328 1892 609">Este modelo es la conexión de una resistencia no lineal en serie con una inductancia no lineal. Proporciona una buena respuesta a impulsos de corriente con tiempo de frente menores a $1 \mu\text{s}$. El modelo requiere de un número relativamente grande de puntos de la curva V-I de la resistencia no lineal, información que no es dada por el fabricante. El valor de la inductancia se logra mediante pruebas de laboratorio, ajustando su valor cuando el impulso de corriente aplicado tipo 8/20 μs alcance un valor máximo de 10 o 20 KA [25].</p>
<p data-bbox="199 815 546 847">Propuesto por Brito et al</p> 	<p data-bbox="688 815 1864 938">En este modelo, la inductancia L representa el campo magnético asociado con la corriente que fluye a través de los terminales del varistor y depende de la longitud y del número de columnas de varistores en el interior del DPS.</p> <p data-bbox="688 961 1864 1198">La capacitancia C representa la permitividad del varistor y es muy importante para el modelado en la región de prruptura de la curva tensión corriente. Las resistencias R_L y R_C se utilizan para eliminar oscilaciones, debido a que algunos softwars utilizan para la simulación la regla de integración trapezoidal. la resistencia variable no lineal $R(I)$, representa el varistor [14].</p>

Modelo	Descripción
<p data-bbox="201 329 596 407">Propuesto por Kannadasan, Valsalal</p> 	<p data-bbox="709 329 1850 509">El modelo propuesto por Kannadasan, Valsalal se deriva del de la IEEE, con la particularidad de la inclusión de las capacitancias asociadas al varistor con respecto a tierra; los parámetros R_0, L_0, R_1 y R_0 se calculan teniendo en cuenta las características físicas del DPS. Los efectos capacitivos se obtienen con las siguientes ecuaciones [26].</p> <p data-bbox="709 529 1535 578">$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r * A}{d}$ [F] : donde C_b es la capacidad asociada al varistor.</p> <p data-bbox="709 597 1608 630">ϵ_0 : permitividad del vacío, ϵ_r: permitividad relativa del óxido de Zinc.</p> <p data-bbox="709 649 1283 682">A: área del varistor y d: longitud del varistor.</p> <p data-bbox="709 701 936 734">$C_s = k - 0.004 * d$</p> <p data-bbox="709 753 1331 786">C_s: Capacidad del varistor con respecto a tierra.</p> <p data-bbox="709 805 1808 886">$K \leq 5$ Constante, cuyo valor se calculó para diferentes DPS mediante el método de ensayo y error [25], [27].</p>

2. Comportamiento no lineal de los varistores de ZnO

El mecanismo de conducción de los portadores de carga y el origen de la no linealidad han atraído la atención de los investigadores desde la invención del varistor de ZnO por Matsuoka. Tradicionalmente, el mecanismo de conducción de un varistor de ZnO se puede analizar por medio del modelo de la barrera Schottky y mediante modelos circuítales que emulan y verifican el comportamiento dinámico del varistor [14], [28] .

De esta manera, como el varistor de ZnO es un semiconductor tipo p-n puede variar sus propiedades bajo la acción de un campo eléctrico y originar los efectos no lineales en el varistor [29]. Para comprender la conducción de la corriente en este tipo de semiconductores es necesario tener en cuenta que los portadores de carga (electrones y huecos) experimentan choques con la red cristalina, el movimiento originado es aleatorio y en condiciones de equilibrio térmico no se produce un desplazamiento neto de los portadores de carga. Esta situación es modificada por la presencia de un campo eléctrico, el cual origina corriente de arrastre y variaciones en las concentraciones de los portadores que causan las corrientes de difusión [30].

En este capítulo se presenta la relación corriente versus tensión o densidad de corriente versus campo eléctrico, al igual que la deducción de la expresión no lineal de la densidad de corriente.

2.1 La relación entre corriente de descarga y la tensión residual en un descargador de sobretensión de ZnO

La relación entre la tensión residual y la corriente de descarga de los varistores de ZnO de los DPS se puede establecer por la reacción de estos dispositivos ante unas sobretensiones transitorias. A frecuencia industrial el varistor está bajo una tensión de referencia o crítica menor que la tensión de ruptura y, en consecuencia, origina una corriente de fuga que puede alcanzar un valor máximo de 1 mA, a partir de este punto la corriente experimenta cambios en su magnitud, lo cual indica que el varistor entra a la zona de conducción o de descarga.

Del mismo modo, los varistores de ZnO son dispositivos de conmutación dependiente de la tensión y este comportamiento dinámico obedece, de manera significativa, a la tensión aplicada y a la frecuencia asociada a la sobretensión transitoria que lo impacta [31]. De otro lado, la relación densidad de corriente versus campo eléctrico es comúnmente expresada por ley de potencia

$$J = KE^{\beta} \quad (2.1)$$

Donde:

J : densidad de la corriente $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$

K, β : constantes que dependen del material y de su geometría. El coeficiente de no linealidad se puede expresar como: $\beta = \frac{V dj}{j dv}$

E : campo eléctrico $\left[\frac{KV}{cm^2}\right]$

Esta relación entre corriente y tensión se materializa mediante una curva característica V versus I, I versus V, J versus E o E versus J.

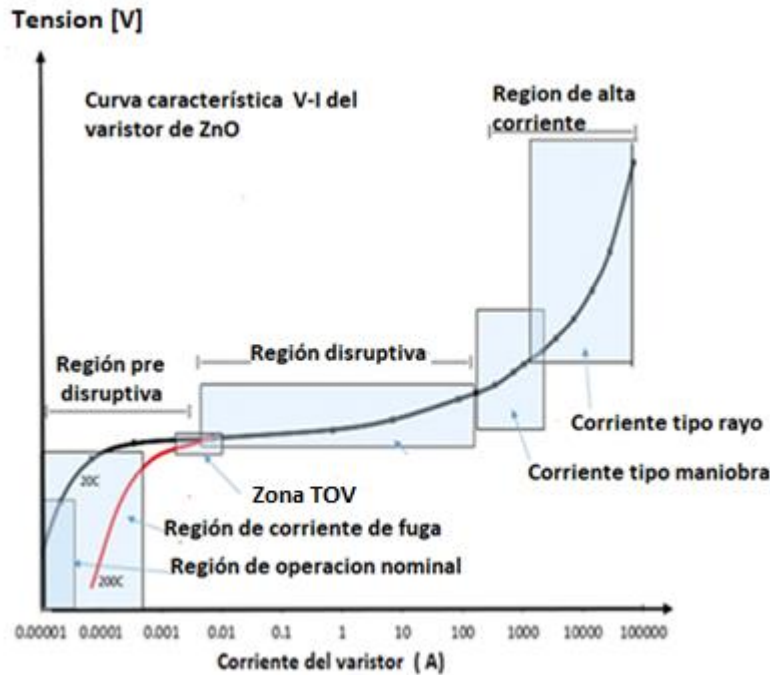
En la **Figura 2.1** se presenta la curva tensión corriente (V-I) de un varistor de ZnO con sus tres regiones de funcionamiento:

- **Región 1 predisruptiva o predescarga**

Llamada región de corriente de fuga o de la máxima tensión de operación continua (MCOV). En ella el varistor no está en conducción severa, ya que la corriente es menor a 1 mA y es de naturaleza capacitiva. Esta zona es el punto de operación del DPS a frecuencia industrial del sistema eléctrico en el cual está instalado. La

sección roja presentada en la curva de la **figura 2.1** representa la variación de la característica tensión-corriente si el DPS estuviera sometido a 200°C, dicha zona es muy vulnerable a la temperatura.

Figura 2-1: Curva tensión-corriente.



Nota. La curva de tensión-corriente presenta las tres zonas de funcionamiento del varistor, la corriente de referencia establecida es de 1 mA. Figura modificada de la referencia [30].

▪ **Región 2 disruptiva o sobretensión temporal**

Esta región está ubicada entre 1 mA y 1 kA, en ella se presenta una alta variación de corriente para una tensión que se mantiene constante. Se caracteriza por el comportamiento no lineal y está controlada por el factor de no linealidad β . Es una zona de conmutación debido a que la resistencia del varistor comienza a disminuir rápidamente y este empieza a conducir a medida que la tensión entre límite de grano disminuye. El factor de no linealidad se determina entre dos puntos de la zona de ruptura y se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{\log(j_2/j_1)}{\log(E_2/E_1)} \quad (2.2)$$

Este factor de no linealidad puede alcanzar valores entre 30-80 para muchos varistores comerciales y, debido a ello, la corriente puede variar en magnitud, ante pequeños incrementos de la tensión aplicada [30].

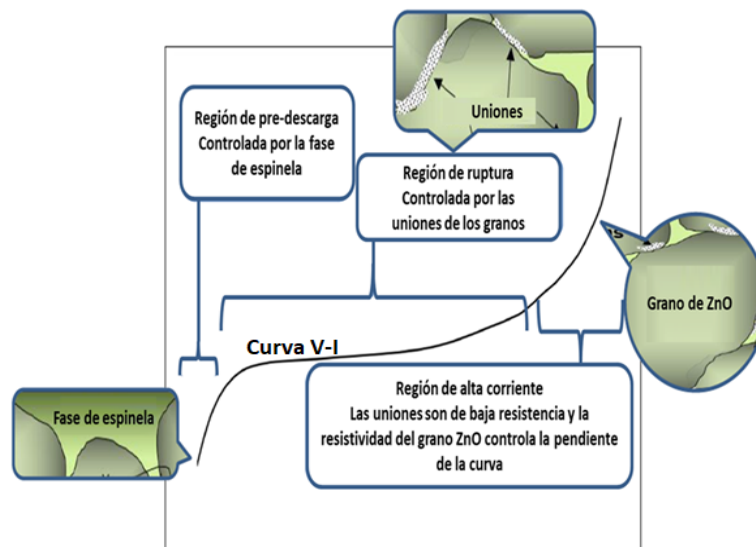
- **Región 3 de alta corriente**

Se caracteriza por la presencia de altas corrientes del orden de los 100 kA y una relación casi lineal entre la tensión y la corriente del varistor. En esta región los granos de ZnO controlan la resistencia del varistor [30].

2.2 Relación entre la curva tensión-corriente y la microestructura del varistor de ZnO

En la **figura 2.2** se aprecia la curva tensión-corriente relacionada con la microestructura del varistor; en el caso de la región de predescarga el varistor se comporta como un circuito abierto, por lo tanto, entre los límites de grano se origina una alta barrera, cuya tensión es menor que la tensión crítica o de referencia del varistor. Esta tensión no es suficiente para vencer la barrera Schottky, pues la fase espinela es un dopante a base de óxido de magnesio que contribuye a aumentar el potencial de la barrera e incrementa la no linealidad del varistor.

Figura 2-2: Relación de la curva tensión-corriente con la microestructura del varistor de ZnO [30].



En la región de ruptura los límites de grano controlan esta zona porque fijan la tensión en un valor constante, independiente de la magnitud de la corriente; esto es lo que se llama avalancha Zener y el varistor, en este punto, actúa como regulador de voltaje. Cuando el varistor se encuentra en esta zona de alta corriente, la barrera Schottky es superada y solo actúa la resistencia de grano, debido a una cuasi relación lineal entre la tensión y la corriente.

2.3 Desviación de la ley de Ohm en los varistores de ZnO

La tensión residual del varistor se puede expresar por la ecuación 2.3:

$$V_{\text{varistor}} = I[R_{\text{grano}} + R_{\text{límite de grano}}] \quad (2.3)$$

$$V_{\text{varistor}} = I[R_{\text{grano}} + kI^{\beta-1}] \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 indica que, al aplicar campos eléctricos o magnéticos de gran magnitud al varistor de ZnO, los portadores de carga emigran de una condición de equilibrio térmico, donde la corriente neta es cero, a una condición de desequilibrio donde la energía promedio (aportada por el campo eléctrico) es mayor que la energía térmica, dando origen a eventos eléctricos, tales como corriente de arrastre, corriente de difusión y recombinación de portadores en la red cristalina del varistor. El campo eléctrico aplicado debe ser variable en magnitud y dirección, y su valor debe superar el umbral del campo eléctrico asociado a la tensión de referencia.

Para analizar la situación de la desviación de la ley de Ohm en los varistores de ZnO se utiliza la ecuación cinética de Boltzmann, la cual estudia los fenómenos físicos asociados al transporte de carga eléctrica. A continuación, se presentarán los resultados de la solución de dicha ecuación y su desarrollo se presenta en el Anexo A.

2.3.1 Derivación de la densidad de corriente en función del campo eléctrico mediante la solución aproximada de la ecuación de transporte de Boltzmann

Generalmente, el flujo de corriente que atraviesa un material depende de la diferencia de tensión en sus terminales, por lo tanto, se puede establecer una función $I = f(V)$, donde tanto el voltaje como la corriente dependen del tipo de material. Para el caso de los varistores de ZnO esta relación es aproximadamente exponencial, pues los varistores están sometidos a intensos campos eléctricos; dichos campos son producidos por las sobretensiones transitorias y sus portadores de carga pierden el equilibrio termodinámico, lo cual origina diferentes fenómenos en su microestructura, uno de ellos es el comportamiento no lineal de la corriente eléctrica.

En efecto, para analizar este estado de no equilibrio de los portadores de carga se utiliza la ecuación de transporte de Boltzmann, la cual describe el cambio o evolución de cantidades macroscópicas, tales como la energía, la carga o el número de partículas en los semiconductores (varistores) y se expresa por la ecuación 2.5.

$$\vec{v} \cdot \nabla_{\rho} f + \frac{e}{m^*} \vec{E} \cdot \nabla_v f = \frac{(f_0 - f)}{\tau} \quad (2.5)$$

Donde:

e : carga del electrón.

m^* : masa efectiva de la partícula que en este caso es del electrón.

\vec{E} : es el campo eléctrico.

f : es una función de distribución de probabilidad de los portadores de carga.

∇_{ρ} : gradiente con respecto a la posición.

∇_v : gradiente con respecto a la velocidad.

f_0 : es la distribución en el equilibrio, que es constante respecto a la posición, pero es dependiente de la velocidad.

En tal sentido, el objetivo de este tratamiento matemático es demostrar que la densidad de corriente en el varistor se desvía de la ley de Ohm, al presentar en su formulación posibles términos superiores del campo eléctrico (cuadrático o cúbico). Inicialmente se parte de un campo eléctrico variable en magnitud.

La ecuación 2.5 se resuelve mediante la expansión de la serie de potencia en términos de las variables α y β y está dada por la siguiente expresión [27]:

$$f = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \quad (2.6)$$

Donde f_{ij} son los coeficientes de la serie de potencia, por lo tanto, la ecuación de Boltzmann transformada está dada por la ecuación 2.7:

$$\beta \vec{v} \cdot \nabla_r \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) + \left(\frac{e}{m^*} \right) \alpha \vec{E}(r) \cdot \nabla_v \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) = \left(f_0 - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) / \tau \quad (2.7)$$

Incorporando β, α a la doble sumatoria se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \beta v \cdot \nabla_r \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^{j+1} f_{ij} \right) + (e/m^*) \alpha E(r) \cdot \nabla_v \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^{i+1} \beta^j f_{ij} \right) \\ = \left(f_0 - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) / \tau \end{aligned} \quad (2.8)$$

Solo se requiere un polinomio de segundo orden, así que, los límites de las sumatorias son $i = 2$ y $j = 1$ y la expresión expandida está dada por la ecuación 2.9

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \nabla_r (\beta f_{00} + \alpha \beta f_{10} + \beta^2 f_{01} + \alpha \beta^2 f_{11} + \alpha^2 \beta f_{20} + \alpha^2 \beta^2 f_{21}) \\ + \left(\frac{e}{m^*} \right) \vec{E} \cdot \nabla_v (\alpha f_{00} + \alpha^2 f_{10} + \alpha \beta f_{01} + \alpha^2 \beta f_{11} + \alpha^3 f_{20} + \alpha^3 \beta f_{21}) \\ = (f_0 - (f_{00} + \alpha f_{10} + \beta f_{01} + \alpha \beta f_{11} + \alpha^2 f_{20} + \alpha^2 \beta f_{21})) / \tau \quad (2.9) \end{aligned}$$

Realizando la igualación de los coeficientes de la ecuación 2.9 se obtienen los siguientes resultados:

$$f_0 = f_{00} \quad i = 0, \quad j = 0 \quad (2.10)$$

$$f_{10} = -(e\tau/m^*)E \cdot \nabla_v f_{00} \quad i = 1, \quad j = 0 \quad (2.11)$$

$$f_{01} = 0 \quad i = 0, \quad j = 1 \quad (2.12)$$

$$f_{11} = -\tau v \cdot \nabla_r f_{10} \quad i = 1, \quad j = 1 \quad (2.13)$$

$$f_{20} = -(e\tau/m^*)E \cdot \nabla_v f_{10} \quad i = 2, \quad j = 0 \quad (2.14)$$

$$f_{21} = -\tau[v \cdot \nabla_r f_{20} + (e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{11}] \quad i = 2, \quad j = 1 \quad (2.15)$$

Reemplazando $f_{00} = f_0, f_{01} = 0$ se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$f_{10} = -(e\tau) \frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot v \quad (2.16)$$

$$f_{11} = (e\tau^2) \frac{df_0}{d\varepsilon} v \cdot \nabla_r (E \cdot v) \quad (2.17)$$

$$f_{20} = \frac{e^2\tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot \nabla_v (E \cdot v) + E \cdot \left(E \cdot v \nabla_v \frac{df_0}{d\varepsilon} \right) \right) \quad (2.18)$$

Como $E \cdot \nabla_v (E \cdot v) = \|E\|^2$ y que $E \cdot (E \cdot v)v = (E \cdot v)^2$, se obtiene:

$$f_{20} = \frac{e^2\tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} \|E\|^2 + m^* \frac{d^2f_0}{d^2\varepsilon} (E \cdot v)^2 \right) \quad (2.19)$$

$$f_{21} = -\frac{e^2\tau^3}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} [v \cdot \nabla_r \|E\|^2 + E \cdot \nabla_v (v \cdot \nabla_r (E \cdot v))] \right) - \frac{e^2\tau^3}{m^*} \frac{d^2f_0}{d^2\varepsilon} v \cdot \nabla_r (E \cdot v)^2 + (E \cdot v)v \cdot \nabla_r (E \cdot v) \quad (2.20)$$

Como todas las anteriores ecuaciones están expresadas en términos de f_0 , la solución de la ecuación de Boltzmann es:

$$f(r, v) = F_{00} + \alpha F_{10} + \beta F_{01} + \alpha\beta F_{11} + \alpha^2 F_{20} + \alpha^2\beta F_{21} \quad (2.21)$$

Para simplificar la solución se toman α y β igual a 1 y se obtiene la ecuación 2.22:

$$f(r, v) = F_{00} + F_{10} + F_{01} + F_{11} + F_{20} + F_{21} \quad (2.22)$$

El valor de la densidad de corriente se calcula mediante la expresión:

$$J = (e/4\pi^3)(m^*/\hbar) \int \int \int_{-\infty}^{\infty} f(r, v) v dv_x dv_y dv_z \quad (2.23)$$

Para realizar esta integral se debe definir f_0 con base en la función de distribución de equilibrio de Maxwell-Boltzmann en la expresión

$$f_0 = A e^{-\frac{\epsilon}{kT}} \quad (2.24)$$

Donde A y k son constantes de normalización y de temperatura, respectivamente, y T es la temperatura absoluta. Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, la expresión no lineal de la densidad de corriente está dada por la ecuación 2.25:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} - (e\tau^2/m^*)\sigma [3\vec{E}(\nabla \cdot \vec{E}) + 2(\vec{E} \cdot \nabla)\vec{E}] \quad (2.25)$$

Donde $\sigma = (1/3\pi^2)[(em^*)^2/\hbar^3]v_f^2$ y v_f es la velocidad de Fermi.

Como se observa en la ecuación 2.25, el primer término cumple con la ley de Ohm lineal y resulta de la integración de f_{10} , mientras que los demás términos representan la componente no lineal y resultan de la integración de f_{21} .

De acuerdo con la ecuación 2.25, suponiendo un campo no nulo en la dirección x , $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$, se tiene:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x}, \text{ esto implica que } \vec{E}(\nabla \cdot \vec{E}) = E_x \frac{\partial E_x}{\partial x} \quad (2.26)$$

Siendo :

$$\vec{E} \cdot \nabla = E_x \frac{\partial}{\partial x}, \text{ se obtiene: } (\vec{E} \cdot \nabla)\vec{E} = E_x \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

Reemplazando las anteriores expresiones en la ecuación 2.26, se obtiene la ecuación

2.27

$$J_{e,x} = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{m^*} \sigma \left(E_x \frac{\partial E_x}{\partial x} \right) \quad (2.27)$$

Llevando la ecuación 2.27 a una expresión simple, aplicando el concepto de derivada se obtiene la ecuación 2.28:

$$J_{e,x} = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{m^*} \sigma \left(E_x \frac{E_x}{d} \right) = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{dm^*} \sigma E_x^2 \quad (2.28)$$

Donde:

e : carga del electrón [$-1,6 \times 10^{-19} \text{C}$]

m : masa del electrón [$9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$]

τ : tiempo de relajación de los portadores de carga: $1.25 - 3.5 \cdot 10^{-8} \text{s}$

d : distancia de separación [$10 \mu\text{cm}$]

σ : conductividad eléctrica [S/m]

La ecuación 2.28 presenta las componentes de la densidad de corriente del varistor, en la cual existe una componente lineal que hace referencia a la ley de Ohm y otra componente no lineal que muestra el aporte de las potencias mayores a uno del campo eléctrico, es decir, existe un campo crítico que diferencia la zona de preruptura con la zona de ruptura del varistor en la curva J versus E .

3. Generación de sobretensiones transitorias muy rápidas

Durante las operaciones de maniobras en las GIS, los contactos del equipo de conmutación se mueven muy lentamente, como resultado se puede presentar, varias veces, el preencendido o reinicio del arco entre ellos, lo que, a su vez, genera sobretensiones cuyas ondas presentan reflexiones y refracciones en los puntos donde hay cambios de la impedancia característica del medio de propagación. Estas reflexiones y refracciones pueden superar la tensión nominal del sistema y presentar oscilaciones de alta frecuencia [32].

Por su parte, la medida y caracterización de estos transitorios ha sido de gran interés para los diseñadores Y fabricantes de los equipos de las subestaciones encapsuladas en SF₆ (Hexafluoruro de azufre), quienes han realizados medidas en sitio utilizando sensores capacitivos, transductores de tensión con alta precisión y convenientes para la medición de las tensiones transitorias con tiempo de frente muy rápido (Very Fast Transient Overvoltages-VFTO) [33], [34], [35].

De modo que, en este capítulo se abordan las características de los VFTO y de la señal de salida de tensión del generador de pulsos VFTO, el cual fue diseñado en el laboratorio de Alto Voltaje de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en la modalidad de trabajo de grado de maestría, bajo mi dirección.

3.1 Características de las sobretensiones transitorias con tiempo de frente muy rápidos (VFTO)

Los VFTO generados en los anteriores eventos poseen una forma de onda que se caracteriza por su gran magnitud, tiempo de frente corto y oscilaciones de alta frecuencia.

En la **figura 3.1** se presenta el esquema de una de las formas de onda no normalizada, originada por el cierre de un seccionador en una subestación encapsulada en gas, con los siguientes parámetros:

$V(t)$: VFTO en función del tiempo.

V_0 : tensión de la carga atrapada en la operación de conmutación.

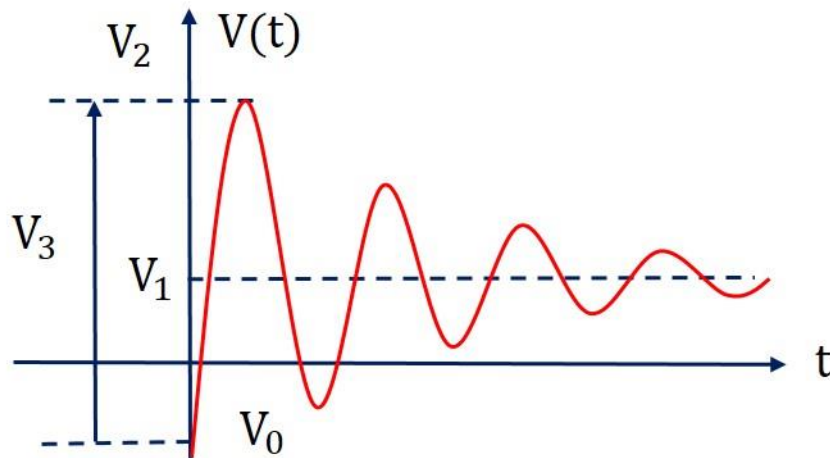
V_1 : valor instantáneo (promedio) de la tensión de la fuente de alimentación.

$V(t)$: antes del reencendido.

V_2 : magnitud máxima del VFTO, la cual no se presenta necesariamente en el primer pico, porque puede presentarse en cualquier momento que sea de interés para el estudio de aislamiento.

V_3 : valor del pico inicial del VFTO ($V_2 - V_1$).

Figura 3-1: Forma de onda del VFTO.



Nota. Forma de onda del VFTO originada en la operación de cierre de un seccionador en una subestación encapsulada en SF6 [36].

3.1.1 Frecuencia de la onda de las tensiones transitorias de frente muy rápido

Los VFOT en las subestaciones tienen un espectro de altas frecuencias en el rango de 100 kHz a 500 MHz, esto se debe a que la subestación encapsulada en SF6 es más compacta que las subestaciones convencionales; por consiguiente, los tiempos de refracción y reflexión de la onda viajera de los VFOT son muy cortos [33]. La frecuencia de oscilación es función de la inductancia y la capacitancia del barraje encapsulado y se puede expresar por la ecuación 3.1

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Donde:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}, \text{ siendo } \mu \text{ la permeabilidad del SF6,}$$

b es el diámetro del recinto o cápsula del aislamiento,

a es el diámetro del barraje

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{b}{a}},$$

ε permitividad del SF6.

3.1.2 Tiempo de frente de las sobretensiones transitorias

La pendiente de la onda de los VFOT depende de la intensidad del campo eléctrico entre los contactos del equipo de conmutación; en consecuencia, es función del factor de utilización del campo eléctrico (h) y del gas usado como aislamiento, el cual se expresa por la relación entre su rigidez dieléctrica E y su presión P :

$$t_f = 13.3 \frac{K_T}{\left[\frac{E}{P}\right]^{p*h}} \quad (3.2)$$

k_T : es la constante de Toepler [50kVns/cm]

Si la rigidez eléctrica del SF₆ es de 860 *kV/cm* y la presión es de 0.5 *MPa*, la pendiente de la onda puede alcanzar los nanosegundos.

3.1.3 Análisis de las formas de ondas de las sobretensiones transitorias muy rápidas (VFTO)

Con el objetivo de verificar el aislamiento de los equipos de un sistema eléctrico de potencia, la norma IEC-60071-1 [37] ha establecido formas de ondas normalizadas, a las cuales se les asigna el rango de tensión, la frecuencia, el tiempo de frente y tiempo de cola; este tipo de formas de onda se presenta en la **tabla 3.1** y en ella no se establece una forma de onda estandarizada para las sobretensiones transitorias con tiempo de frente muy rápido. La dificultad para plantear una forma de onda específica se debe a la complejidad de la superposición de ondas reflejadas y refractadas en las discontinuidades que encuentra la onda viajera en la subestación encapsulada; así que esta tarea se le ha asignado a los comités relacionados con los equipos que pueden ser afectados por este tipo de sobretensiones.

El grupo de investigación de Shigemitsu Okabe [38] identificó nuevos tipos de formas de ondas, obtenidas durante pruebas realizadas en sitio en una subestación encapsulada en SF₆ de 800kV, donde los seccionadores fueron sometidos a maniobras de aperturas y cierre, estas nuevas formas de ondas se presentan en la **tabla 3.2** y sus especificaciones son las siguientes:

C2: forma de onda oscilatoria amortiguada con tiempo de frente muy corto. Espectro de frecuencia entre 2.5 a 5 MHz y el tiempo de amortiguación es del orden de 1.2 a 2.9 μ s.

E: en este tipo de onda de doble frecuencia, la oscilación se produce debido a superposición de señales de diferentes frecuencias, siempre y cuando la sobretensión sea medida en el barraje de la subestación. Su espectro de frecuencia oscila alrededor de 2 MHz y el tiempo de amortiguamiento τ es del orden de 1.4 a 3.8 μ s.

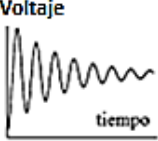
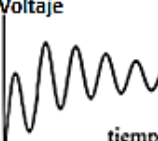
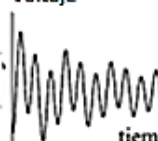
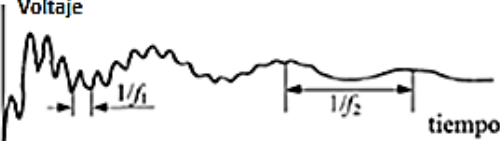
Tabla 3-1: Clases, formas de onda y tiempos característicos de las sobretensiones.

Clase	Baja frecuencia		Transitorios		
	Continuos	Temporales	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de de tensión y sobretension					
Rango de tensión o sobretension	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz $T_1 \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de ondas de tensión normalizadas					a
	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz T_1^a	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensayo de tensión sostenida	a	Ensayo de corta duración a frecuencia Industrial	Ensayo de impulso de maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	a

^a Debe ser especificado por los comités de los dispositivos

D: forma de onda caracterizada por oscilación amortiguada. Alcanza la mayor magnitud en el primer y tercer pico y su espectro de frecuencia oscila alrededor de los 2MHz; el tiempo de amortiguamiento τ es aproximadamente de 4 μs .

Tabla 3-2: Formas de VFOTO generadas en una subestación encapsulada de 800 kV [39].

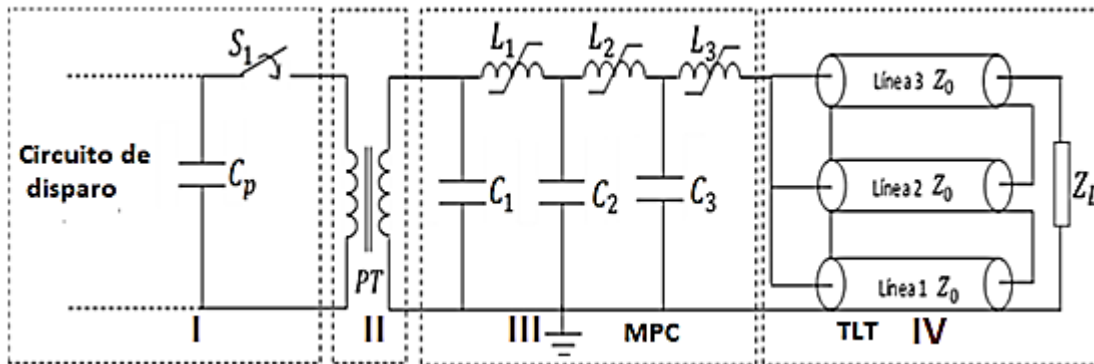
<p>Tipos de VFOTO</p>	<p>C2</p>  <p>Frecuencia: 2.5-5.0 MHz τ: 1.2-9.1 μs</p>	<p>E</p>  <p>Frecuencia: Alrededor de 2.0 MHz τ: 1.4-3.8 μs</p>	<p>D</p>  <p>Frecuencia más baja: Alrededor de 1 MHz Frecuencia más alta: 4.0-5.0 MHz τ: Alrededor de 4.0 μs</p>
<p>Forma de onda de los VFOTO establecidos por la norma IEC 60071-1</p>	<p>F</p>  <p>0.3 MHz < f_1 < 100 MHz, 30 kHz < f_2 < 300 kHz</p>		

F: forma de onda presentada en la norma IEC20071-1, en la cual se establece el rango de frecuencia y no su amplitud, ya que esta depende de la construcción y localización del seccionador, la configuración de la subestación y el tipo de falla.

3.2 Generador de pulsos de tensión de gran magnitud con tiempos de frente muy rápidos

Para llevar a cabo este proyecto de investigación se diseñó, en el laboratorio de Alto Voltaje, un generador de pulsos de tensión con tiempo de frentes muy rápido. Su diseño se basa en las tecnologías compresión de pulsos magnéticos (MPC. Magnetic Pulse Compression) y transformador de línea de transmisión (Transmission Line Transformer-TLT), para obtener una señal de salida de pulsos de tensión de gran magnitud y con un tiempo de frente en el rango de los nanosegundos. La tecnología TLT es un tipo de transformador de pulsos, desarrollado a partir de la combinación de la teoría de las líneas de transmisión y el principio de transformador convencional; su principal característica es el ancho de banda de alta frecuencia y la reducción de los efectos de la inductancia y capacitancia presentes en el transformador tradicional. El modelo teórico básico del generador de pulsos, diseñado y construido, se muestra en la **figura 3.2**.

Figura 3-2: Circuito equivalente del generador de pulsos con tiempos de frente muy rápidos.



Nota. Gráfica modificada de la referencia [40].

Las componentes del generador son las siguientes:

C_p : capacitor primario que se carga previamente para generar los pulsos de descarga sobre el transformador de pulsos.

PT : transformador de pulsos encargado de elevar la señal de tensión obtenida del circuito de disparo. La relación de transformación de tensión implementada fue de 1:53.

C_1, C_2 y C_3 : capacitores de baja inductancia y de alta frecuencia, su objetivo es el de almacenar la energía obtenida del transformador de pulsos y descargarse cuando los interruptores magnéticos L_1, L_2 y L_3 alcancen su punto de saturación.

L_1, L_2 y L_3 : interruptores magnéticos, los cuales son inductancias saturables que transmiten la energía almacenada en los capacitores C_1, C_2 y C_3 , respectivamente. Las inductancias se encargan de recortar el pulso cuando este alcanza su valor máximo y, de esta forma, se logra que el tiempo de frente sea cada vez más corto.

Líneas 1, 2 y 3 corresponden a cables coaxiales de alta tensión con impedancia característica igual a Z_0 , los cuales se conectan en paralelo, a la entrada, y en serie, a la salida, formando el TLT (Transmission Line Transformador).

Z_L : carga ubicada a la salida del generador, la cual será lineal (resistencia) o no lineal (descargador de sobretensión), según la prueba requerida.

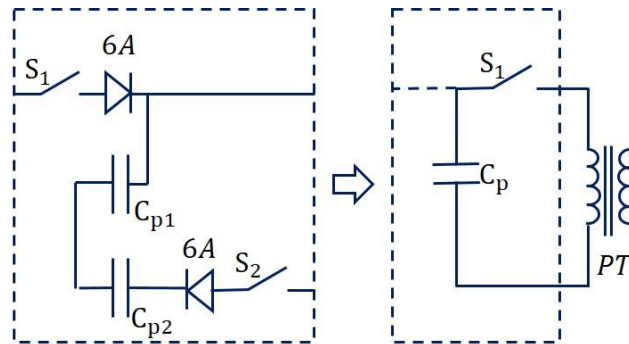
En la **figura 3.3** se presentan las cuatro etapas del generador construido.

Figura 3-3: Componentes del generador de pulsos VFTO(s).



Etapa I: comprende la zona de energización del equipo, el sistema de protección y el condensador primario; este último es reemplazado por dos condensadores comerciales conectados en serie, los cuales suplen las necesidades planteadas en el diseño para C_p . En la **figura 3.4** se presenta el circuito de carga y disparo del generador. La activación de los contactores S_1 y S_2 se realiza por medio de un pulsador normalmente abierto (retorno automático). La activación S_1 permite la carga de los capacitores C_{p1} y C_{p2} , para transmitir la energía almacenada en los capacitores se debe activar el contactor S_2 .

Figura 3-4: Esquema circuital de la etapa de energización y protección del generador de pulsos con tiempo de frente muy rápido.



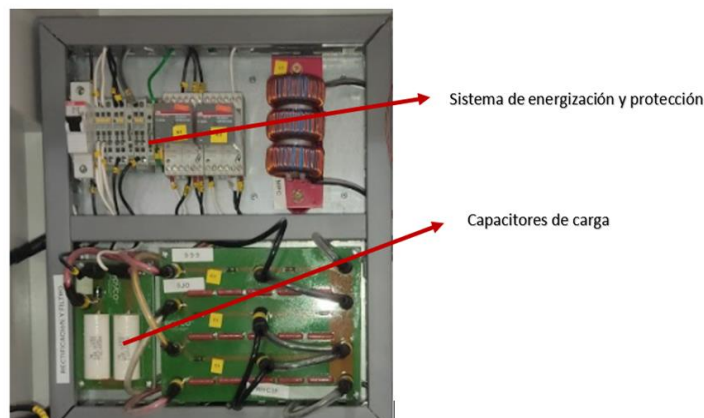
En la **tabla 3.3.** se presentan los diferentes valores de los elementos del sistema de energización y protección.

Tabla 3-3: Fichas técnica de los componentes de la etapa de energización.

Capacidad	Referencia
100 μ F 200	338-3157 alta frecuencia
600V-6A	Tipo encapsulado R-6

En la **figura 3.5** se presenta el sistema de energización y protección implementado en el generador construido.

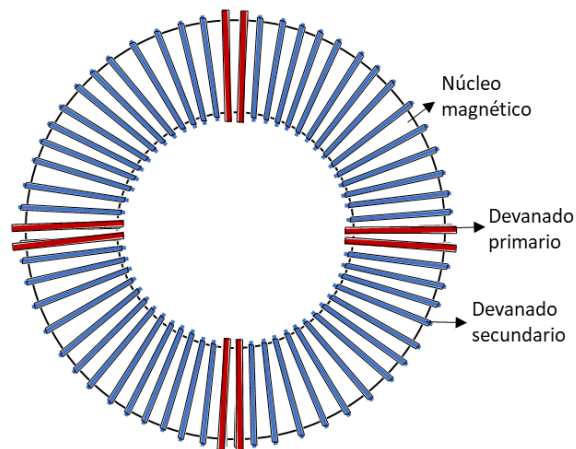
Figura 3-5: Montaje del sistema de energización y protección del generador de pulsos VTFO.



Etapa II: zona del transformador de pulsos con relación 1:53, cuya función es aumentar la amplitud de la señal de entrada del generador. Se adopta un transformador de pulsos de alta eficiencia para reducir el tiempo de descarga de C_p a C_1 , condensador que hace parte de la etapa de compresión magnética o MPC.

En la **figura 3.6** se muestra el núcleo toroidal de ferrita y la ubicación de los devanados primarios y secundario en este. El devanado secundario está enrollado alrededor del núcleo de alta densidad de flujo de saturación y el devanado primario está ubicado encima del secundario para disminuir la inductancia de fuga entre devanados [40].

Figura 3-6: Esquema de conexión de los devanados del transformador de pulsos.



Las características técnicas del núcleo de las ferritas, utilizadas en el transformador de pulso, se presentan en la siguiente tabla:

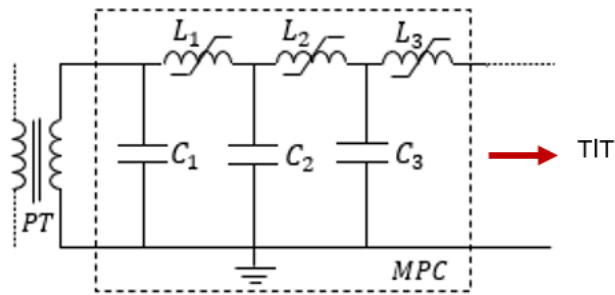
Tabla 3-4: Características técnicas del transformador de pulsos.

Núcleo toroidal	Material ferrita, 2.88 μ H N87
Área efectiva	267.2 mm ²
Permeabilidad	2200 (T · m)/A
Diámetro	104.8 mm
Valor pico de la densidad de flujo magnético [B]	0.25 mT

Etapa III: mediante el uso de la compresión magnética de pulsos se logra una mayor pendiente y máximas magnitudes de la señal de tensión de entrada del generador; los capacitores C_1 , C_2 y C_3 son de baja inductancia y de alta frecuencia; su función es la de almacenar la energía obtenida del transformador de pulso y descargarse cuando las inductancias no lineales L_1 , L_2 y L_3 alcancen la tensión de saturación, permitiendo así el paso de la energía almacenada.

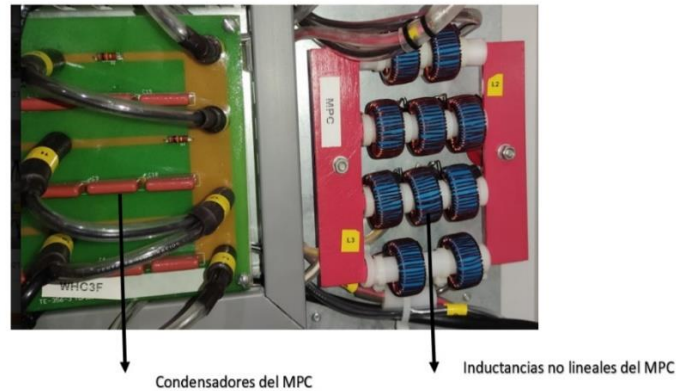
Esta etapa se conoce como la zona de reducción o compresión del tiempo de frente del pulso. En la **figura 3.7** se presenta el circuito equivalente del MPC, el cual está conformado por inductores no lineales y condensadores que forman una cadena de circuitos de transferencia de energía resonante.

Figura 3-7: Circuito equivalente del MPC diseñado. Su función es aumentar la magnitud y reducir el tiempo de frente de la tensión inicial del generador de pulsos VFOT.



En la **figura 3.8** se presenta el montaje del sistema de compresión magnética de pulsos en el generador diseñado, en él se utilizan diez inductancias no lineales y seis condensadores de baja inductancias, para logra una alta frecuencia y gran magnitud de la señal de salida del generador.

Figura 3-8: Implementación del sistema del MPC en el generador de pulsos diseñado.



Etapa IV: en esta etapa se eleva la tensión mediante el transformador de línea de transmisión (Transmission line Transformer). El TIT se compone de tres líneas de transmisión coaxiales conectadas en paralelo, a la entrada, y en conexión serie, a la salida; posee un ancho de banda de frecuencia que lo hace más eficiente que el transformador convencional, ya que la inductancia y la capacitancia están uniformemente distribuidas en toda la línea, de modo que no existe un circuito de oscilación LC.

En la **figura 3.9** se presenta la conexión del TLT en el generador de pulso, cada línea de transmisión tiene una impedancia característica Z_0 y para garantizar la elevación de tensión de entrada se eligió un cable de referencia PO 05302017JF/ 48 Ω /20kV, la impedancia de salida es de 100 Ω .

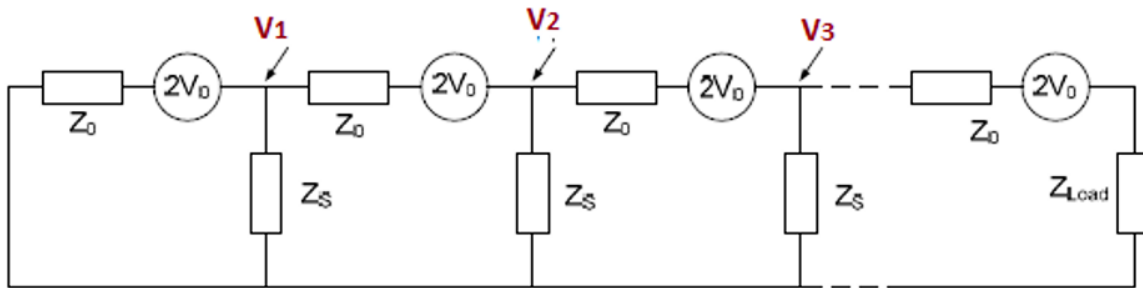
Figura 3-9: Disposición física del TLT en el generador de pulsos.



En la práctica se presenta una caída de tensión debido a la impedancia mutua que se origina entre la pantalla de conexión a tierra y el conductor interno del cable coaxial. Cada cable fue enrollado en un cilindro con una altura (L) de 200 mm y de diámetro 120 mm, número de vuelta de cada línea 11, para una inductancia de $80.21\mu\text{H}$.

El circuito equivalente del TLT se presenta en la siguiente **figura 3.10**:

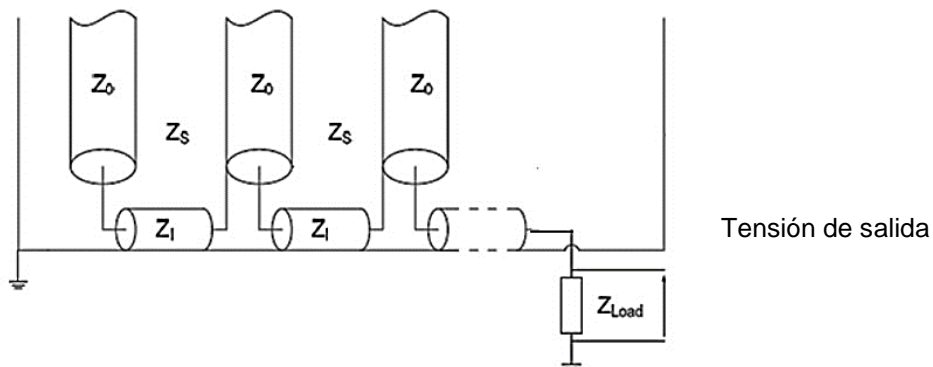
Figura 3-10: Circuito equivalente del transformador de línea de transmisión (TLT) [2].



En este circuito cada línea se puede representar por una fuente de tensión igual a dos veces la tensión de salida V_0 y en conexión serie con la impedancia del cable Z_0 . La carga de cada línea es la suma de las otras líneas combinada con la impedancia mutua de modo secundario (Z_s), la cual actúa como retorno para la onda que se propaga entre el conductor externo y el plano de tierra. Esta impedancia puede ser eliminada ya sea por el uso de núcleos de ferritas, o porque su valor es mayor que la impedancia del cable.

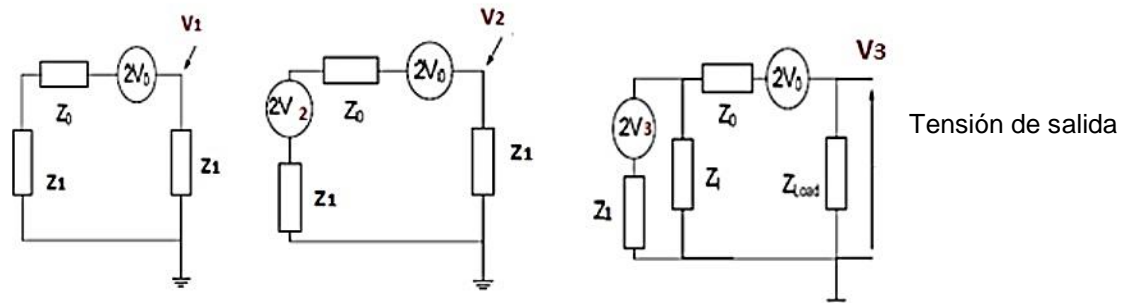
A la salida del TLT los cables coaxiales se conectan en serie, lo cual origina una impedancia de conexión Z_1 , como se muestra en la **figura 3.11**.

Figura 3-11: Esquema de conexión serie a la salida del TLT [42].



La onda viajera, en cada etapa, tiene dos componentes: la tensión ($2V_0$) y el pulso de tensión transmitido de las líneas inferiores, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3-12: Proceso de la generación de alta tensión en la tercera línea.



La tensión de salida de la línea uno se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$V_1 = k \cdot 2V_0 \tag{3.3}$$

Donde:

$$k = \frac{Z_1}{2Z_1 + Z_0} \text{ y } k_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{2Z_1 + Z_0} \text{ factores de refracción y reflexión de onda viajera.}$$

La tensión de salida de líneas 2 y 3 s se puede expresar como:

$$V_2 = k(V_1 - 2V_0) \tag{3.4}$$

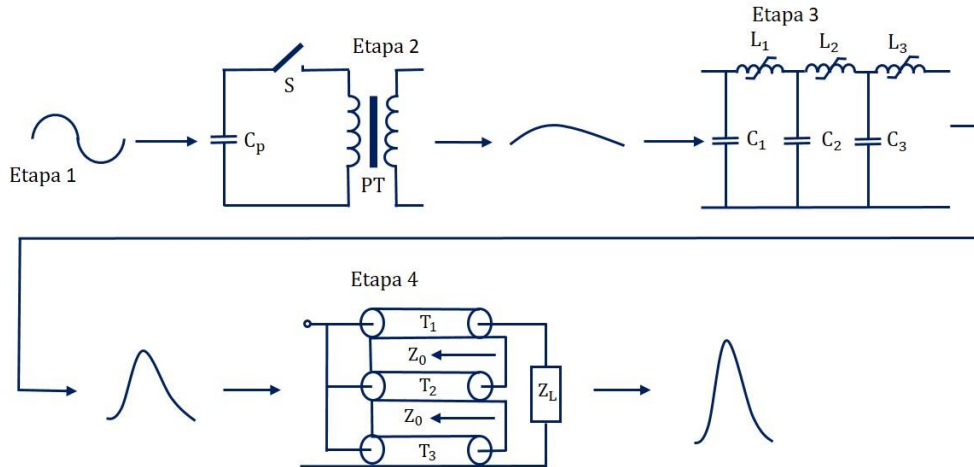
$$V_3 = k(V_2 - 2V_0) \tag{3.5}$$

La tensión de salida considerando la impedancia de la carga (V_{carga})

$$V_3 = k(V_3 - 2V_0) \frac{Z_{carga}}{Z_{carga} + \frac{Z_1}{2} + Z_0}, \text{ para } Z_0 = 48\Omega \text{ y } Z_1 = 100\Omega$$

El proceso de la generación de los pulsos de tensión VFTO se presenta en la **figura 3.13**, en la cual se observa el cambio de la señal de entrada al pasar por cada etapa del generador.

Figura 3-13: Proceso de generación de pulsos de tensión con tiempo de frentes muy rápidos a través de las diferentes etapas del generador de pulsos VFTO.



3.2.1 Características de la onda de tensión del generador de pulsos VFTO en vacío

La forma de onda de tensión de salida del generador de pulsos VFTO en vacío se presenta en la **figura 3.14**, esta señal fue obtenida mediante dos divisores de tensión tipo resistivo con compensación capacitiva, ambos con una relación de transformación de 20/0.2 kV. Estos divisores se acoplan a un osciloscopio, el cual detecta transitorios rápidos del orden de los 5 ns a $4\ \mu\text{s}/\text{div}$, hasta $1,25\text{ Gmuestras}/\text{s}$, con una impedancia de entrada de $1\text{M}\Omega (\pm 1\%)//14\text{ pF} (\pm 2.25\text{ pF})$.

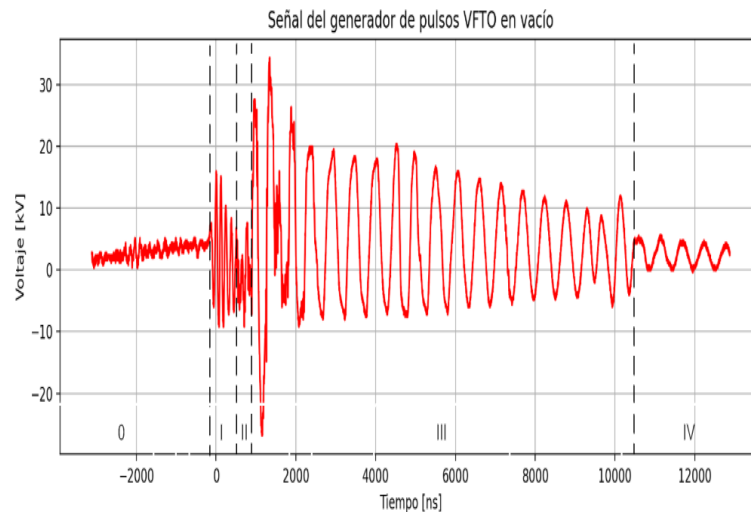
De esta manera, las señales capturadas constan de 10.000 muestras y tienen una resolución de 0.4 ns , lo cual se representa, en el dominio de la frecuencia, con una frecuencia mínima de 125 kHz y una frecuencia máxima 1.25 GHz.

Las escalas utilizadas en la medición en el eje (y) son $100\text{V}/\text{div}$ con atenuación de 10:1 respectivamente.

Asimismo, la forma de onda se detecta en el rango de los μs , con el objetivo de obtener el comportamiento total de la señal, tal como se muestra en la **figura 3.14**; adicionalmente, se realizaron capturas de señal de tensión para escalas de tiempos de $1\ \mu\text{s}/\text{div}$, $40\text{ ns}/\text{div}$, $100\text{ ns}/\text{div}$, $200\text{ ns}/\text{div}$ y $400\text{ ns}/\text{div}$.

Ahora bien, la forma de onda de tensión en vacío del generador de pulsos VFTO es amortiguada con múltiples frecuencias, en ella se pueden establecer 4 zonas características separadas por magnitud, frecuencias y presencia o ausencia de componentes de muy altas frecuencias.

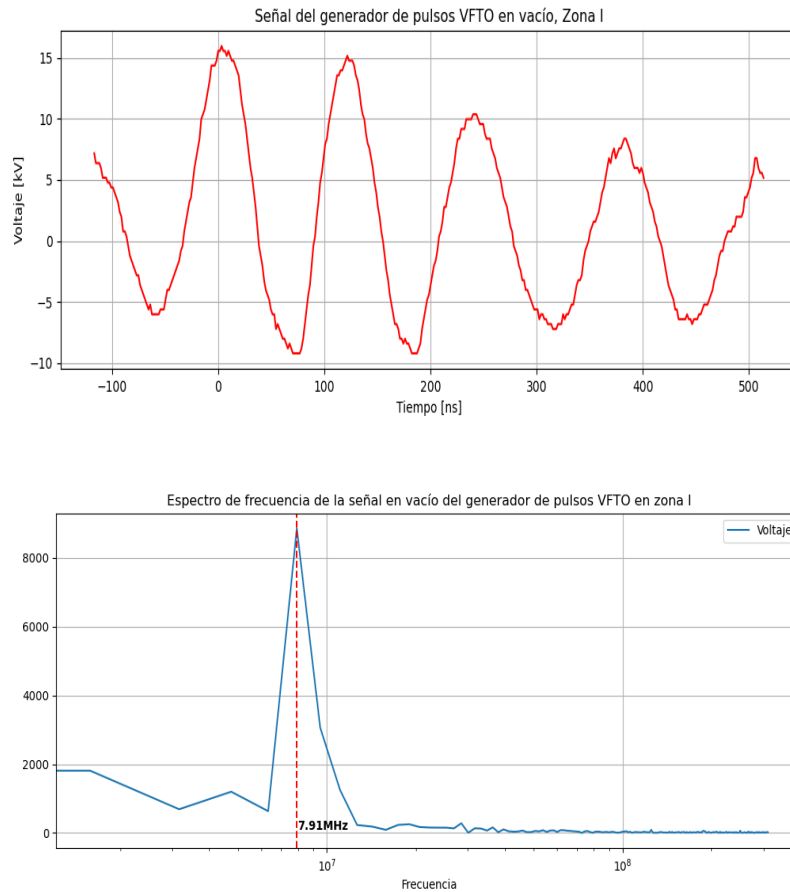
Figura 3-14: Forma de onda de tensión de salida del generador de pulsos VFTO.



La forma de onda del generador en vacío se dividió en cuatro zonas, las cuales presentan características diferentes con relación a la magnitud y frecuencia.

Zona 0: se presentan reflexiones y refracciones de la onda incidente (tensión de salida del generador de pulsos VFTO), debido al cambio de impedancia entre el equipo y las sondas del osciloscopio; en esta zona se presentan tensiones del orden de 185V.

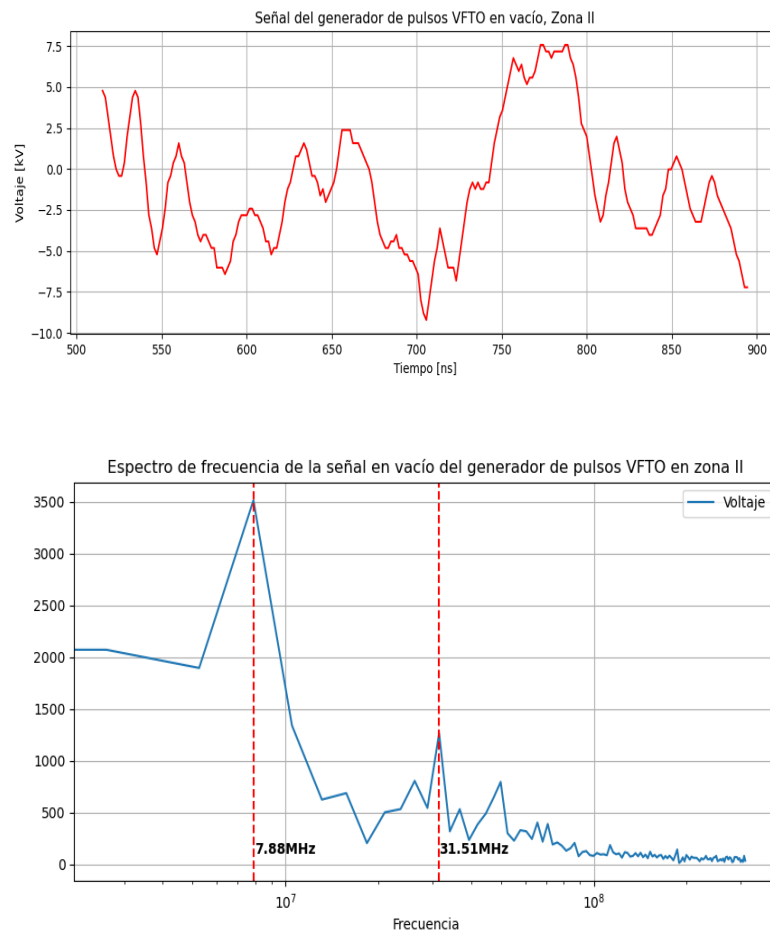
Zona I: zona de interés para el estudio del comportamiento del varistor de ZnO, en la cual se presentan magnitudes de tensiones de 15.3 KV y una componente de frecuencia de 7.91 MHz; en la **figura 3.15** se presenta la forma de onda de tensión y su espectro de frecuencia.

Figura 3-15: Forma de la onda de tensión y el espectro de frecuencia de la *zona I*.

Zona II: se presentan magnitud máxima de tensión de 5.42 kV y componentes de frecuencias del orden de 7.88 y 31.52 MHz, esto se debe a que al componente de frecuencia de la *zona I* se le suma una nueva componente de frecuencia mayor, esta zona se caracteriza por bajas magnitudes de tensión y altas frecuencias.

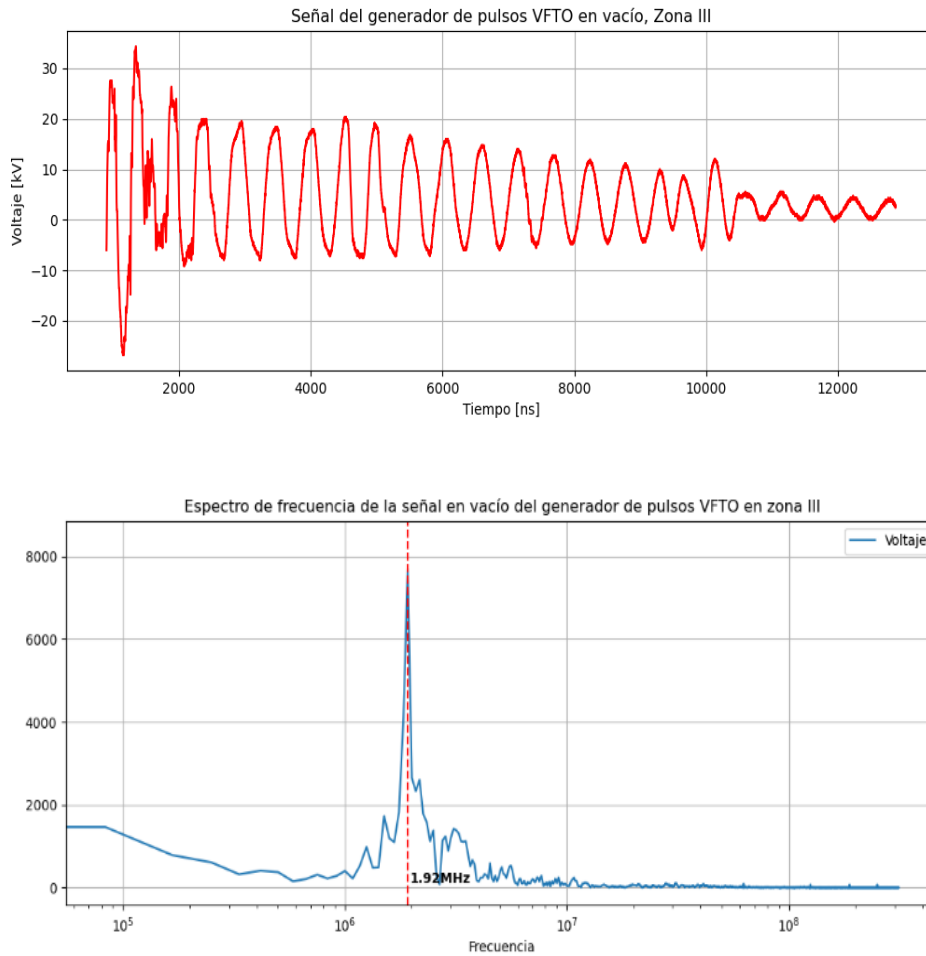
En la **figura 3.16** se presenta la forma de onda de tensión y el respectivo espectro de frecuencia de la *zona II*.

Figura 3-16: Forma de la onda de tensión y espectro de frecuencia de la zona II.



Zona III: en esta zona predominan tensiones de alta magnitud, pero con componentes de frecuencias bajas del orden de 1.92 MHz. Es una zona de amortiguamiento intermedio donde la onda de tensión alcanza una magnitud máxima de 24 kV, para luego decrecer hasta 9.7kV.

La forma de onda de tensión y el espectro de frecuencia se presentan en la **figura 3.17**.

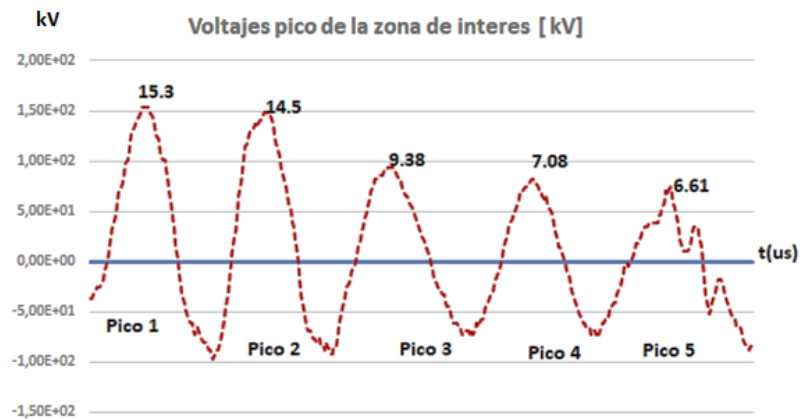
Figura 3-17: Forma de onda de tensión y espectro de frecuencia de la zona III.

Zona IV: zona de poco interés, en ella se presenta el decrecimiento total de la onda.

3.2.2 Caracterización de la zona de interés

Esta zona es amortiguada y presenta cinco picos de tensión, siendo el pico inicial (1) con el valor máximo de tensión, tal como se observa en la **figura 3.18**.

Figura 3-18: Valores pico de la señal de tensión versus tiempo de la zona de interés.



En la siguiente tabla se presentan los valores máximos de tensión y el tiempo de frente para alcanzar dichos valores.

Tabla 3-5: Valores del tiempo de frente que presentan los pulsos de tensión de la zona de interés para diferentes divisiones de tiempo.

Tiempo de frente (rise time) [ns]					
Tiempo/ división	Primer pico	Segundo pico	Tercer pico	Cuarto pico	Quinto pico
1µs/ div	38,4	31,4	33,6	34,1	29,8
40 ns / div	40,1	32	34,2	33,4	32,3
100ns /div	40	32,2	31,8	34,2	30,2
200ns /div	42,2	30,3	34,4	37,2	31,2
400ns / div	41,8	32,2	33,4	35,9	32,2
Media	40,5	31,62	33,48	34,96	31,14
Desviación	1,532970972	0,80746517	1,0256705	1,5533834	1,13490088

3.2.3 Expresión matemática de la forma de onda de tensión de la zona de interés

Establecer la forma de onda exacta de los pulsos de tensión VFTO es complicado, debido a los tiempos de frente muy cortos y a la amplia banda de frecuencia que se presenta en este tipo de sobretensiones.

En esta investigación se utiliza el método de mínimos cuadrados para encontrar la ecuación que describe los VFTO de la zona de interés. Lo anterior se logra empleando el software MATLAB 2020b [41].

Los mínimos cuadrados permiten minimizar la suma del cuadrado de distancias entre la aproximación y los datos, es decir, modificar los valores de una función modelo para lograr un mejor ajuste de un conjunto de datos experimentales.

La ecuación modelo utilizada para el ajuste de los datos experimentales es la siguiente:

$$f(x) = a_1 * \text{seno}(b_1 * x + c_1) + a_2 * \text{seno}(b_2 * x + c_2) + a_3 * \text{seno}(b_3 * x + c_3) + a_4 * \text{seno}(b_4 * x + c_4) + a_5 * \text{seno}(b_5 * x + c_5) + a_6 * \text{seno}(b_6 * x + c_6) + a_7 * \text{seno}(b_7 * x + c_7) + a_8 * \text{seno}(b_8 * x + c_8) \quad (3.6)$$

Donde:

a : amplitud [kV]

b : frecuencia [Hz]

c : argumento [radianes]

En la **tabla 3.6** se presentan los coeficientes que explican la función $f(x)$, la cual representa la magnitud de los VFTO en [kV] y (x) el tiempo.

Estos coeficientes se calcularon con una confianza del 95% y se obtuvo como indicador de la bondad del ajuste $R^2 = 0.994$, valor que permite establecer la proximidad de los datos experimentales a la curva ajustada.

Tabla 3-6: Tabla de los coeficientes de la forma de onda de los pulsos de tensión VFTO de la zona de interés.

Coeficientes de la función	
$a_1: 8.928$ $b_1: 4.996 \cdot 10^7$ $c_1: 2.011$	$a_5: 1.183$ $b_5: 6.995 \cdot 10^7$ $c_5: -2.246$
$a_2: 2.936$ $b_2: 5.994 \cdot 10^7$ $c_2: 0.1311$	$a_6: 0.7412$ $b_6: 3.997 \cdot 10^7$ $c_6: -1.009$
$a_3: 2.342$ $b_3: 4.996 \cdot 10^7$ $c_3: 0.3061$	$a_7: 1.31$ $b_7: 9.992 \cdot 10^7$ $c_7: 0.4434$
$a_4: 1.247$ $b_4: 2.998 \cdot 10^7$ $c_4: -1.825$	$a_8: 0.4447$ $b_8: 1.998 \cdot 10^7$ $c_8: -0.9629$

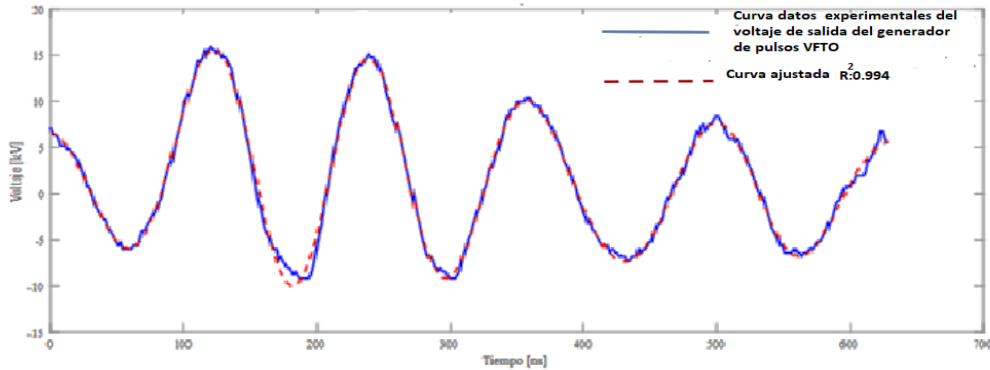
Reemplazando los valores de la **tabla 3.6**, en la ecuación 3.6, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V(t) = 8.928\text{seno}(4.996 \cdot 10^7 t + 2.011) + 2.936\text{seno}(5.994 \cdot 10^7 t + 0.1311) + 2.342\text{seno}(4.996 \cdot 10^7 t + 0.3061) + 1.247\text{seno}(2.998 \cdot 10^7 t - 1.825) + 1.183\text{seno}(6.995 \cdot 10^7 t - 2.246) + 0.7412\text{seno}(3.997 \cdot 10^7 t - 1.009) + 1.31\text{seno}(9.992 \cdot 10^7 t + 0.447) + 0.447\text{seno}(1.998 \cdot 10^7 t - 0.9629)$$

3.2.4 Verificación mediante la comparación entre la forma de onda obtenida con los datos experimentales y la forma de la curva ajustada

En la **figura 3.19** se ilustran las formas de onda de tensión del generador de pulsos VFTO en condición de vacío, tanto la señal experimental como la ajustada por el método de mínimos cuadrados muestra la misma tendencia.

Figura 3-19: Comparación entre la curva ajustada por el método de mínimos cuadrados y la curva originada por los datos experimentales de tensión en vacío del generador de pulsos VFTO.



Por su parte, la **tabla 3.7** ilustra las características transitorias de los pulsos VFTO con relación al valor máximo de los picos de onda, tiempo de frente de cada pico y la frecuencia asociada a la onda de tensión total experimental; dichas características son ajustadas a la zona de interés o zona 1.

Tabla 3-7: Características transitorias de la forma de onda de los pulsos VFTO en la zona de interés o zona uno.

Parámetros característicos de los pulsos VFTO	Curva de datos experimentales	Curva ajustada	Error [%]	
Máxima amplitud [kV]	<i>Valor pico₁</i>	15.3	16.6	7.8
	<i>Valor pico₂</i>	14.5	14.6	0.7
	<i>Valor pico₃</i>	9.38	10.07	6.9
	<i>Valor pico₄</i>	7.08	7.63	7.2
	<i>Valor pico₅</i>	6.61	6.73	1.8
Tiempo de frente rápido [ns]	<i>Valor pico₁</i>	40.5	41	1.2
	<i>Valor pico₂</i>	31.62	32.4	2.4
	<i>Valor pico₃</i>	33.48	31.4	6.6
	<i>Valor pico₄</i>	34.96	33.2	5.3

	$ Valor\ pico_5$	31.4	30.4	3.3
Frecuencia [MHz)		7.91	7.816	1.3

De esta tabla se concluye que, bajo las mismas condiciones, los resultados experimentales son coherentes con los resultados de la curva ajustada.

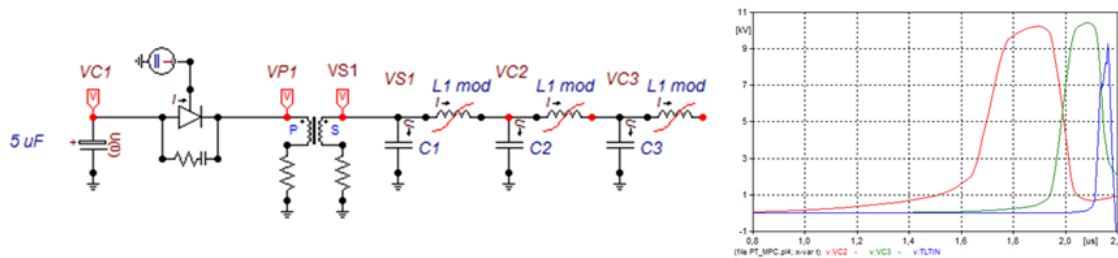
3.2.5 Simulaciones

Se realizaron simulaciones para validar el comportamiento, en las diferentes etapas, del generador de pulsos tipo VFTO, esto con el objetivo de efectuar posibles ajustes.

Simulación del MPC

Para esta etapa de simulación se tomó en cuenta la integración del circuito de disparo del PT y MPC, obteniéndose las formas de ondas de tensión con diferentes tiempos de frente, tal como se observa en la figura 3.20.

Figura 3-20: Compresión del pulso desde C1 hasta el TLT.



En esta figura se aprecia una compresión de la onda final de tensión que pasa de un valor máximo de 10 kV a 9 kV. Los parámetros obtenidos se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

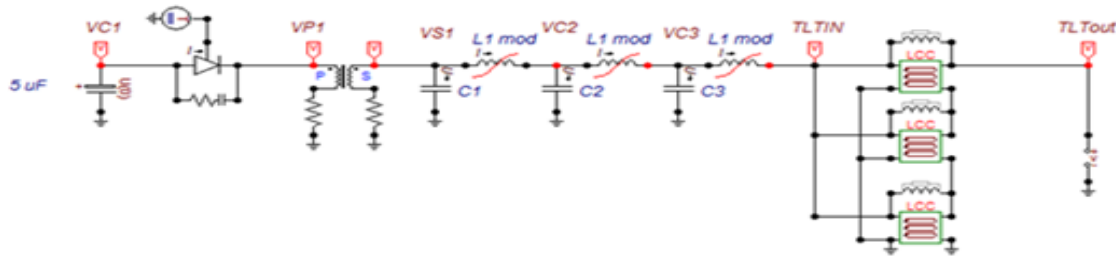
Tabla 3-8: Principales parámetros del circuito MPC.

Transmisión	Tensión	Tiempo de frente
C1-C2	15-20 kV	380ns
C2-C3	15-20 kV	220ns
C3-TLT	5-10 kV	41.6ns

Simulación del generador de pulsos VFTO

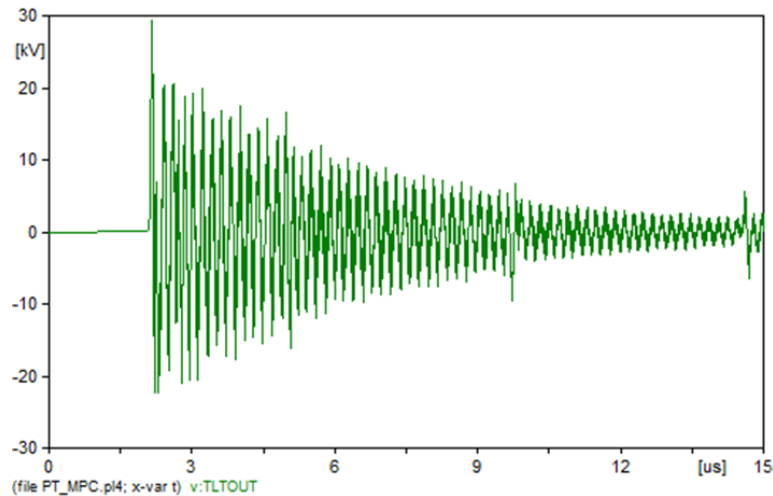
Para validar la forma de onda del voltaje de salida, en cuanto a magnitud y tiempo de frente, se establece el modelo en ATP del generador de pulsos tipo VFTO, resultado de la unión del MPC con el TLT. De esta manera, puede observarse en la figura 3.21

Figura 3-21: Modelo en ATP de circuito generador de VFTO.



En consecuencia, la simulación arrojó una forma de onda de tensión de circuito abierto con un valor máximo de 31 kV y un tiempo de frente de 42.2 ns. Dichos resultados se evidencian en la figura 3.22

Figura 3-22: Tensión de circuito abierto del generador de pulsos tipo VFTO comparada con la señal real (32 kV, 41.6 ns).



En la figura anterior se presenta una desviación de 0.5 kV con relación al valor máximo de tensión y una desviación de 0.85 ns en el tiempo de frente.

4.Desarrollo experimental

En este capítulo se aborda el diseño experimental, cuyo objetivo es determinar la similitud del comportamiento de cinco varistores ZnO comerciales de igual referencia; con este fin, se aplicarán sobrevoltajes transitorios con tiempo de frente muy rápidos (VFOT) y, mediante el Análisis de Varianza (ANOVA), se seleccionará un solo varistor para realizar el caso de estudio.

En este sentido, las variables de entrada fueron los datos experimentales de tensión residual y corriente de descarga de los cinco varistores. La metodología utilizada para llevar a cabo el desarrollo experimental fue la siguiente:

- a) Establecimiento del número de réplicas de las pruebas a realizar en cada varistor.
- b) Planteamiento del procedimiento, montaje del circuito de prueba y detección de los resultados.
- c) Análisis estadístico de los resultados, el cual se realiza mediante el Análisis de Varianza o ANOVA, usando el software MINITAB 19.
- d) Análisis de los datos experimentales de los varistores y selección del varistor que representa el comportamiento de los cinco varistores bajo prueba.
- e) Caracterización del comportamiento dinámico del varistor seleccionado, mediante el análisis de la tensión residual, la corriente de descarga y su curva J versus E.

4.1 Establecimiento de las réplicas de las pruebas de ensayo

El número de réplicas está condicionado por el costo de ejecución y los recursos requeridos en el experimento, lo cual afecta la precisión de las estimaciones de las medias de los tratamientos y la potencia de la prueba [42].

Debido a que no se tienen antecedentes sobre el experimento propuesto, se realizó una prueba inicial a un varistor de referencia B40K150, el cual fue sometido a 12 réplicas con

el objetivo de obtener un criterio para aceptar o disminuir el posible error, a su vez se realizó una estadística descriptiva cuyos resultados se presentan en la **tabla 4.1**. La tensión de prueba para estos ensayos previos fue tomada del generador de pulsos de tensión tipo VFOT.

Tabla 4-1: Estadística descriptiva de la prueba.

RÉPLICA	TENSIÓN RESIDUAL [V]	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA [V]	
1	15984,375	Media	15628,90625
2	15993,75	Error típico	95,47662301
3	15643,75	Mediana	15653,125
4	15653,125	Moda	15653,125
5	15878,125	Desviación estándar	330,740724
6	15384,375	Varianza de la muestra	109389,4265
7	15231,25	Curtosis	-1,345677762
8	15653,125	Coficiente de asimetría	-0,414110499
9	16012,5	Rango	900
10	15112,5	Mínimo	15112,5
11	15171,875	Máximo	16012,5
12	15828,125	Suma	187546,875

Como resultado, se observa que la media, la mediana y la moda tienen aproximadamente el mismo valor; esto permite establecer que los datos tienen el comportamiento de una distribución normal, sin sesgo ni modas, por lo que no se requieren pruebas de normalidad, ni transformaciones Box-Cox sobre la muestra.

El error típico obtenido es de 0.61089%. Para disminuir este error es necesario aumentar la cantidad de réplicas, para ello se utilizó la ecuación 4.1:

$$\geq 2 \left[\frac{Z_{\alpha}}{2} + Z_{\beta} \right]^2 \left(\frac{\sigma}{\delta} \right)^2 \quad (4.1)$$

Donde:

r : número de réplicas

$\frac{Z_{\alpha}}{2}$: variable estándar con probabilidad $\frac{\sigma}{\delta}$.

Z_{β} : variable estándar con probabilidad β .

σ : desviación estándar.

δ : diferencias entre medias.

Para un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), con un porcentaje de diferencias entre las medias de ($\% \delta = 10\%$) y la potencia de la prueba ($1 - \beta$); de esta manera se obtuvo un total de 20 réplicas, lo cual reduce el error a 0.3145%. [43]

4.2 Circuito de prueba

El montaje del circuito de prueba se presenta en la **figura 4.1** y consta de los siguientes equipos:

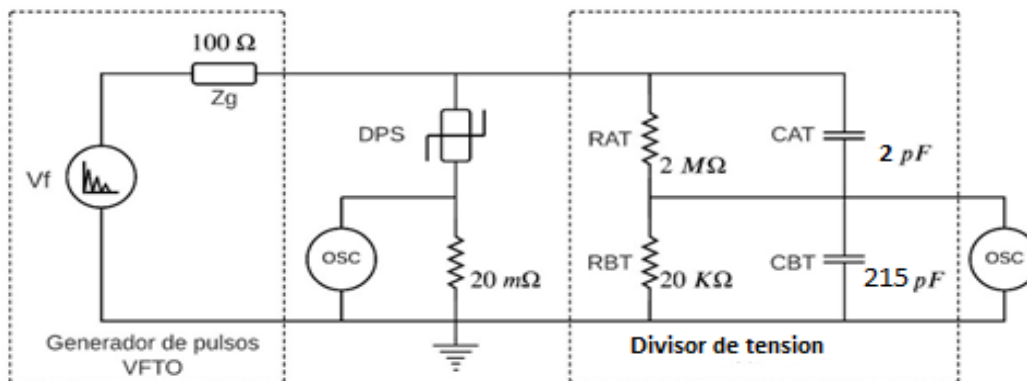
- Generador de tensión. Tensión de alimentación 220V.
- Divisores resistivos de tensión: relación 20 kV/200V.
- Divisor de tensión resistivo compensado: 20 kV/200V.
- Osciloscopio digital. Posee un ancho de banda de 200MHz y una sonda de relación 10:1 con un rango de sensibilidad de 20mV a 1000 V/div y una precisión de $\pm 2\%$.
- Resistencia shunt de 20 m Ω .
- Objeto de prueba: varistor de ZnO referencia B40K150, con ficha técnica: VRMS 150 V, $I_{max} (8/20\mu s)$: 40 kA, energía 360 J y potencia 1.4 W [44]. La ficha técnica del varistor se presenta en el Anexo B.

Figura 4-1: Circuito de prueba para determinar la tensión virtual y la corriente de descarga que circula por los terminales de los cinco varistores de referencia B40K150.



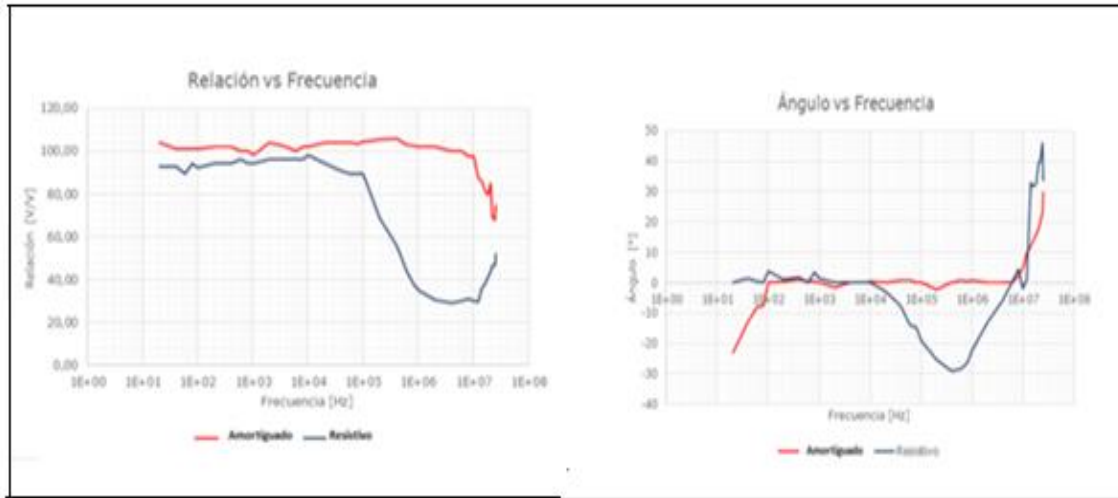
El circuito equivalente del montaje de prueba que se realizó, se presenta en la figura 4.2, este incluye el divisor de tensión resistivo amortiguado con relación de transformación 100:1.

Figura 4-2: Circuito experimental, realizado para el caso de estudio, planteado para determinar el comportamiento de un varistor comercial de uso en bajo voltaje.



Ahora bien, se construyeron dos divisores de tensión: resistivo puro y resistivo amortiguado. El comportamiento de la relación de transformación y el ángulo de ambos resistores se presenta en la figura 4-3.

Figura 4-3: Comparación del comportamiento de los dos divisores, el resistivo y resistivo compensado, ante la frecuencia.



En esta figura se observa que la relación de transformación del divisor resistivo compensado se mantiene constante hasta el nivel de frecuencia de 10 MHz. Por lo tanto, fue seleccionado para obtener los valores de voltaje residual y corriente de descarga del varistor seleccionado.

4.3 Procedimiento de ensayo

El objeto de prueba se coloca lo más cerca posible de la salida del generador debido a que, con el incremento de la frecuencia, la capacitancia e inductancia asociadas con los cables de conexión tienden a tener un efecto mayor sobre la impedancia equivalente y el cambio de impedancia puede originar reflexiones y refracciones de la onda electromagnética de tensión y corriente.

En este orden de ideas, antes de realizar los ensayos, se adecuan las escalas del osciloscopio con relación a la amplitud y al tiempo. Los valores de la escala de tensión y tiempo por división seleccionados fueron (100 V/div) y (100 ns/div), respectivamente.

Para conocer el estado inicial de los varistores, se diagnostica mediante la medición de la corriente de fuga para una tensión nominal de 150 Vac, los resultados se presentan en la **tabla 4.2**.

Tabla 4-2: Valores de la corriente de fuga de los cinco varistores.

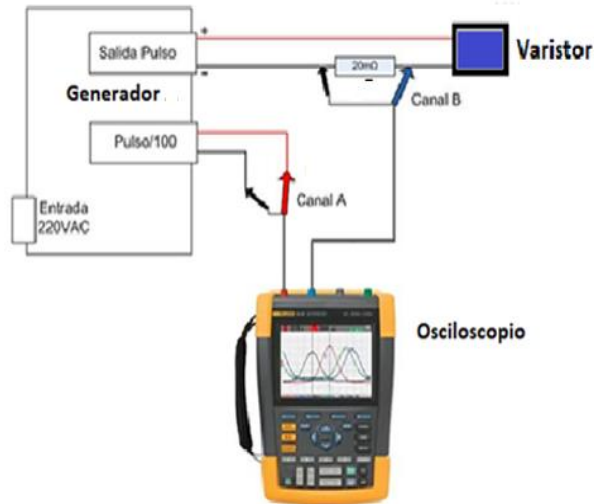
Corriente de fuga [mA]	Varistor 1	Varistor 2	Varistor 3	Varistor 4	Varistor 5
	0.22	0.225	0.22	0.219	0.223
Media [mA]	0.22175	Desviación [mA]	0.0027		

En la **tabla 4.2** se puede observar que los valores de la corriente de fuga, obtenidos en cada varistor, son menores que la corriente máxima de referencia dada por el fabricante (0.33 mA), lo cual indica que los varistores están en buenas condiciones de funcionamiento.

Así pues, a cada uno de los cinco varistores, seleccionados como elementos de prueba, se les aplicó un total de 20 pulsos de tensión VFTO. De las diferentes formas de onda de tensión residual y de corriente de descarga se tomó el valor máximo. En efecto, estos cien resultados fueron las variables de entrada para el Análisis de Varianza y se presentan en el Anexo C.

En la **figura 4.4** se presenta la conexión de las sondas del osciloscopio en el circuito de prueba. La sonda del canal B mide de forma indirecta la corriente de descarga a través de la resistencia de 20 mΩ. El canal A mide la tensión residual y se conecta en paralelo a los terminales del varistor.

Figura 4-4: Disposición de las sondas de tensión y de corriente del osciloscopio para la detección de tensiones residuales y corrientes de descarga de los varistores.



4.4 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados, obtenidos en los diferentes ensayos, tiene como objetivo seleccionar un solo varistor para caracterizar el comportamiento de este tipo de varistores de ZnO ante los pulsos de tensión VFTO. Para dicha selección se utiliza el Análisis de Varianza o ANOVA, técnica estadística que prueba la hipótesis que establece la igualdad de las medias de dos o más poblaciones [45].

Las hipótesis planteadas para esta investigación fueron:

- Hipótesis nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$, las medias de los cinco varistores son iguales, en lo que se refiere a la tensión residual y la corriente de descarga.
- Hipótesis alternativa: H_1 : por lo menos una media de uno de los varistores probados es diferente.

Los datos iniciales son:

- Factor o variable independiente: varistor referencia B40K150.
- Niveles o variables dependientes: es el número de varistores (1, 2, 3, 4,5)

- Nivel de confianza $\alpha = 95\%$.

La teoría sobre el Análisis de Varianza se presenta en el anexo C, donde también se incluyen los resultados obtenidos.

El Análisis de Varianza de los resultados experimentales se realiza con el programa MINITAB19, cuyo criterio de decisión gira alrededor del valor p , que es la probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta y es el mínimo valor que puede tomar de nivel significancia (α). Por lo tanto, el criterio de decisión es el siguiente:

Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H_0).

Si $p > \alpha$, se acepta la hipótesis nula (H_0).

4.4.1 Análisis de Varianza realizado a los resultados experimentales

Inicialmente el programa realiza la verificación de los requisitos de parametricidad, siendo estos: la normalidad de los datos experimentales, varianza de los errores constantes y la aleatoriedad de los datos.

Para realizar esta verificación se plantean las siguientes hipótesis por defecto en el MINITAB:

- Hipótesis nula (H_0): los datos de tensión residual y corriente de descarga de cada uno de los varistores de ZnO se ajustan a una distribución normal con media μ y desviación σ .
- Hipótesis alternativa (H_1): los datos de tensión residual y corriente de descarga de cada uno de los varistores de ZnO no se ajustan a una distribución normal con media μ y desviación σ .

Los resultados de esta verificación en los cinco varistores se presentan en la **tabla 4.3**, al igual que, de manera gráfica, en la **figura 4.5**.

En **tabla 4.3** el criterio de decisión lo constituye el valor de p , allí se puede observar que los cinco varistores superan el valor del nivel de significancia (0.05), lo cual demuestra que los resultados se ajustan a una distribución normal. Esta decisión es confirmada por el

estadístico Anderson Darling (AD), cuyos valores también superan al nivel de significancia (α).

Tabla 4-3: Resultado de la verificación de los datos de tensión residual y corriente de descarga de los cinco varistores de ZnO.

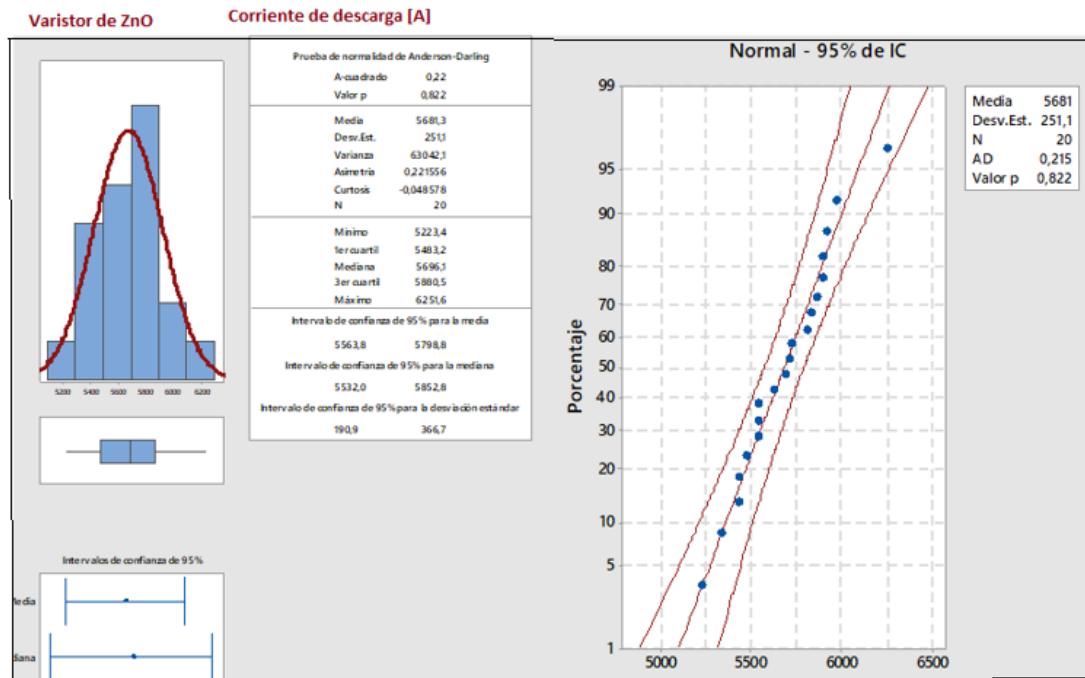
Varistor	Señal	Valor de la probabilidad p	Valor del estadístico AD
1	Tensión	0,361	0,384
	Corriente	0.822	0,215
2	Tensión	0.093	0,618
	Corriente	0.826	0,517
3	Tensión	0.399	0,367
	Corriente	0.888	0,18
4	Tensión	0.264	0,439
	Corriente	0.094	0,615
5	Tensión	0.068	0,671
	Corriente	0.113	0,584

De modo que, el hecho de que los datos se ajusten a una distribución normal establece que los requisitos de varianza constante y aleatoriedad de los datos se dan por cumplidos, tal como se observa la figura 4.5.

De esta manera, en dicha figura, se presenta el cumplimiento de los requisitos del comportamiento normal de los datos de tensión residual y la corriente de descarga del varistor uno, en la cual se observa que los intervalos de la media y la mediana se traslapan, por lo que se puede afirmar que son aproximadamente iguales, característica propia de una distribución normal.

Además, no se presentan valores atípicos fuera de las líneas de ajuste, debido a que el valor del estadístico AD es menor que la unidad en todos los varistores.

Figura 4-5: Verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor 1 de ZnO.



4.4.2 Aplicación del Análisis de Varianza a los resultados experimentales

Después de realizar la verificación de los requisitos de parametricidad se procede a realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor, el cual compara los cinco grupos de datos en una variable cuantitativa, para el caso de tensión residual y corriente de descarga. Este método se aplica con el fin de contrastar la igualdad de medias, de tres o más poblaciones, independientes y con distribución normal [44], [46].

- Hipótesis nula: todas las medias de las tensiones residuales son iguales.
- Hipótesis alterna: no todas las medias de las tensiones residuales son iguales.
- Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

Se propone igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor: tensión residual

Nivel: 5 (1, 2, 3,4 y 5 varistores)

Valores: tensión residual de los varistores 1, 2, 3, 4 y 5.

En las siguientes tablas se presentan los resultados del Análisis de Varianza realizado inicialmente

Tabla 4-4: Análisis de Varianza aplicado a los resultados de tensión residual usando MINTAB19.

Fuente	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados ajustados (SC)	Cuadrados medios ajustados (MC)	Valor F	Valor P
Factor	5-4= 4	63462565	15865641	15.44	0.00
Error	100-5= 95	97602105	1027391		
Total	99	161064670			

Como el valor de P (0.00) es menor que el nivel de significancia α (0.05), las medias de las tensiones difieren significativamente, es decir, se rechaza la hipótesis nula. Lo anterior lo confirma el estadístico F cuyo valor es de (15.44) y mayor que valor crítico (2.006).

Tabla 4-5: Resumen del modelo. Coeficiente de determinación

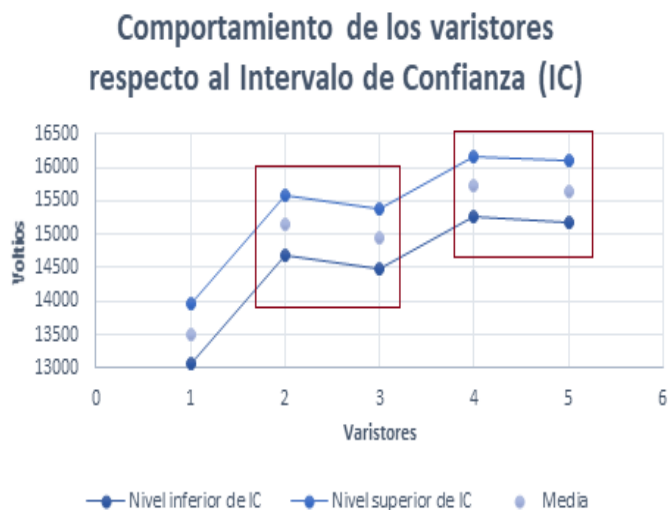
S	R ² .	R ² (ajustado)	R ² . (predeterminado)
1013,60	39,40%	36,85%	32,86%

Como el coeficiente de determinación asociado con la varianza S es un valor bajo (39.4%), es conveniente utilizar otras técnicas, como la comparación de los intervalos de confianza, que permitan establecer grupos de interés y seleccionar un posible varistor [46].

En la tabla 4.6 se puede observar que los valores de intervalos de confianza, para una probabilidad del 95%, se traslapan a los varistores 2-3 y 4 -5, esta situación de formación de parejas indica un comportamiento similar entre estos, lo cual se confirma en la figura 4.6.

Tabla 4-6: Medias de cada grupo de resultados asociados a los cinco varistores.

Factor	N	Media	Desviación estadística.	IC de 95%
Tensión Res varistor 1	20	13506	1170	(13056; 13956)
Tensión Res varistor 2	20	15137	1729	(14687; 15587)
Tensión Res varistor 3	20	14938,1	392,2	(14488,2; 15388,1)
Tensión Res varistor 4	20	15714	559	(15264; 16164)
Tensión Res varistor 5	20	15639	557	(15189; 16089)

Figura 4-6: Comportamiento de los varistores respecto al intervalo de confianza.

En la **figura 4.4** se observa que el varistor 1 no tiene conectividad con los cuatro varistores restantes, lo que permite concluir, inicialmente, que este es el varistor que presenta diferencias significativas con los demás varistores.

No siendo suficiente la información, sobre el comportamiento de los cinco varistores, suministrada por el ANOVA, se indaga cuáles son los varistores que presentan diferencias puntuales y significativas, para lo cual se utiliza la opción de intervalos de Tukey en el MINITAB. Este método crea intervalos de confianza para todas las diferencias entre las medias de cada pareja que se puedan formar entre los cinco niveles del factor (varistor);

además, controla la tasa de error en un nivel específico y crea grupos estadísticos de interés.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.7, donde se observan los siguientes grupos de interés:

- Grupo A: los varistores 2, 4 y 5 son significativamente iguales.
- Grupo B: los varistores 2 y 3 son significativamente iguales.
- Grupo C: el varistor 1 es significativamente diferente de los grupos anteriores.

Tabla 4-7: Contrastaciones de los intervalos de confianza utilizando el método de comparación de Tukey con un intervalo de confianza de 95%.

Factor	N	Media	Agrupación		
Tensión Res varistor 4	20	15714	A		
Tensión Res varistor 5	20	15639	A		
Tensión Res varistor 2	20	15137	A	B	
Tensión Res varistor 3	20	14938,1		B	
Tensión Res varistor 1	20	13506			C

Como se observa en esta tabla, los varistores 1 y 3 no poseen afinidad estadística significativa con los varistores 2,4 y 5. En este sentido, para seleccionar el varistor que permita analizar el comportamiento de los varistores ante pulsos de tensión VFTO, se realizó de nuevo el Análisis de Varianza a los datos de los varistores del grupo A obteniéndose los siguientes resultados:

ANOVA de un solo factor: tensión residual de los varistores 2, 4 y 5

Método:

- Hipótesis nula: todas las medias de los varistores 2, 4 y 5 son iguales.
- Hipótesis alterna: no todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia: 0.05

Se propone igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

- Factor: tensión residual.
- Nivel: 3 (varistores 2, 4 y 5).

Tabla 4-8: Análisis de Varianza usando MINITAB para el factor varistor.

Fuente	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados ajustados (SC)	Cuadrados medios ajustados (MC)	Valor F	Valor P
Factor	3-1=2	3939751	1969876	1.64	0.204
Error	60-3=57	68657473	1204517		
Total	59	72597224			

De la tabla 4.8 se observa que el valor de P (0.204) es mayor que el nivel de significancia (0.05), por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0), es decir, que las diferencias entre las medias de los varistores 2, 4 y 5 no son estadísticamente significativas. En la tabla 4.9 se presenta el comportamiento estadístico de los tres varistores escogidos (2, 4, 5).

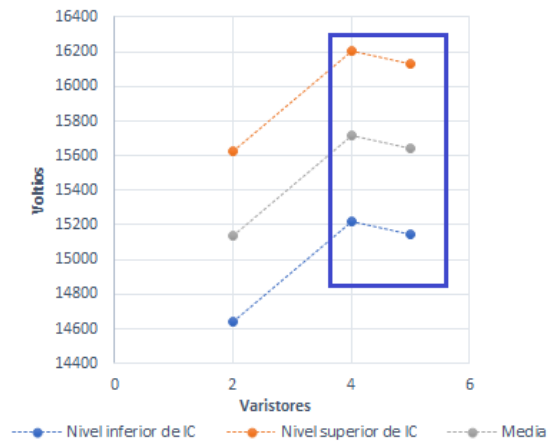
Tabla 4-9: Medias de cada grupo de resultados asociados a los tres varistores con relación a la tensión residual.

Factor	N	Media	Desviación estadística.	IC de 95%
Tensión Res varistor 2	20	15137	1729	(14687; 15587)
Tensión Res varistor 4	20	15714	559	(15264; 16164)
Tensión Res varistor 5	20	15639	557	(15189; 16089)

En la figura 4-7 se observa que los intervalos de confianza de los voltajes residuales de los varistores 2, 4 y 5 se traslapan, es decir, que las medias son aproximadamente iguales.

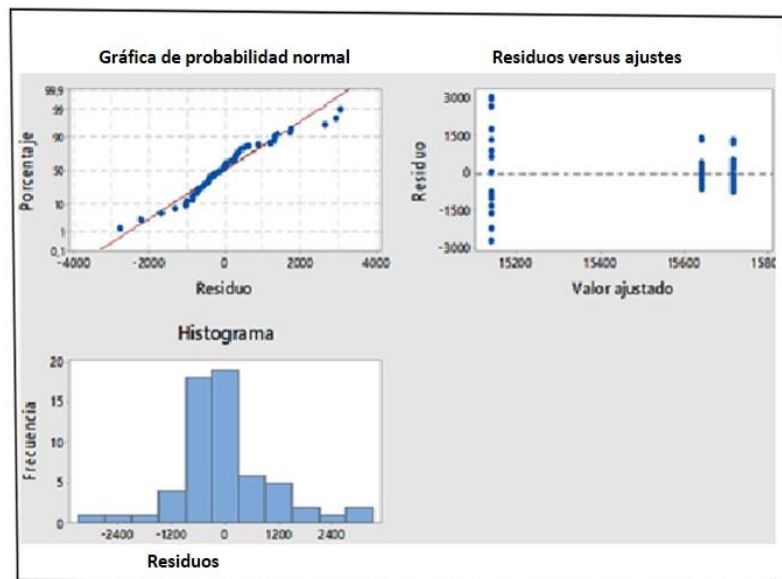
Figura 4-7: Comportamiento del intervalo de confianza de los varistores 2,4 y 5.

Comportamiento de los varistores 2,4 y 5 respecto al Intervalo de Confianza



De los varistores 2,4 y 5 se selecciona el que presenta menor variación en los resultados experimentales. El criterio de selección lo proporciona la figura 4.7, en ella se presenta una gráfica de los residuos de la tensión residual de dichos varistores, entendiéndose como residuos la diferencia entre los datos experimentales y los valores ajustados.

Figura 4-8: Gráfica de residuos de tensión residual de los varistores 2, 4 y 5.



De igual manera, la figura 4.8 se utiliza para examinar la bondad de ajuste de los datos experimentales de cada varistor, esto con el fin de determinar si se cumplen los supuestos de los mínimos cuadrados mediante los siguientes aspectos:

- El histograma de residuos muestra la tendencia de los residuos de los datos de estos varistores a distribuirse normalmente.
- La prueba de normalidad de los residuos comprueba el supuesto de que estos están distribuidos normalmente. Dado que la mayoría de los puntos están sobre la línea de ajuste y solo 4 puntos atípicos están fuera de ella.
- Los residuos vs el ajuste muestran que los residuos del varistor 4 presentan la menor variación (varianza).

Por lo anterior, se selecciona el varistor 4 para determinar el comportamiento del varistor de ZnO ante pulsos de tensión VFTO. Los datos experimentales se presentan en el Anexo D.

4.5 Caracterización del comportamiento de los varistores de ZnO ante impulsos tipo VFTO

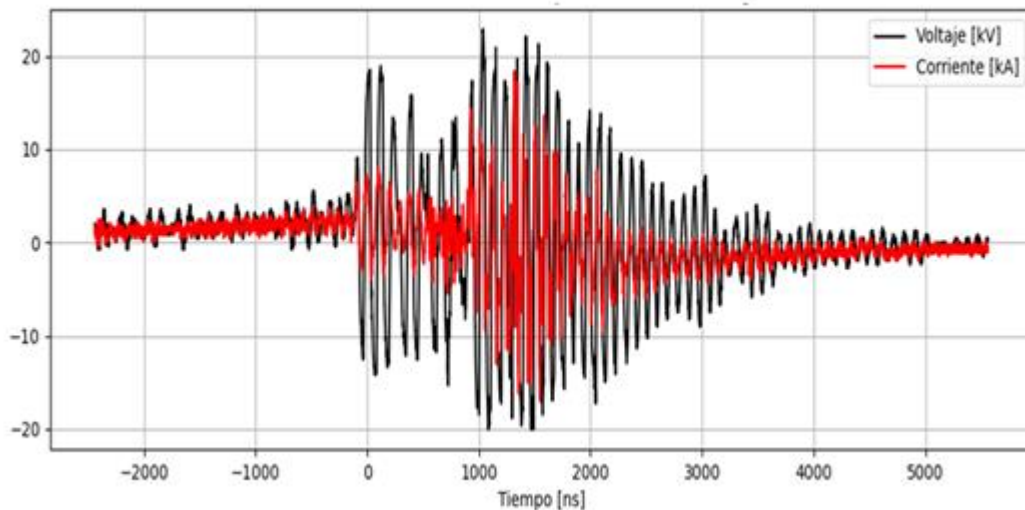
En condición de operación los descargadores de sobretensión se ven sometidos a espectros de frecuencia que van desde los 60Hz a varios MHz, debido al impacto de diferentes transitorios de tensión. Estos dispositivos se pueden describir completamente mediante tres parámetros principales:

- La tensión máxima de operación continua (MCOV) o su tensión relacionada que es la tensión nominal.
- La curva tensión corriente (C V I), siendo esta la que muestra el comportamiento dinámico del varistor, es decir, su paso de un estado puramente capacitivo (o abierto) a un estado resistivo.
- La energía que puede almacenarse en su volumen como consecuencia de la integración de su potencia durante el tiempo que opere adiabáticamente.

Por lo que se refiere al varistor 4, se le sometió a nuevas pruebas con el objetivo de determinar su tensión residual y la consecuente corriente de descarga que circula por sus terminales. Los datos experimentales se presentan en el Anexo D.

En la siguiente figura se presentan las formas de onda de tensión residual y su corriente de descarga para el varistor bajo prueba. Las características de estas formas de onda son: un tiempo de frente muy rápido, una gran magnitud y corresponder a oscilaciones tanto de alta frecuencia como de menor frecuencia.

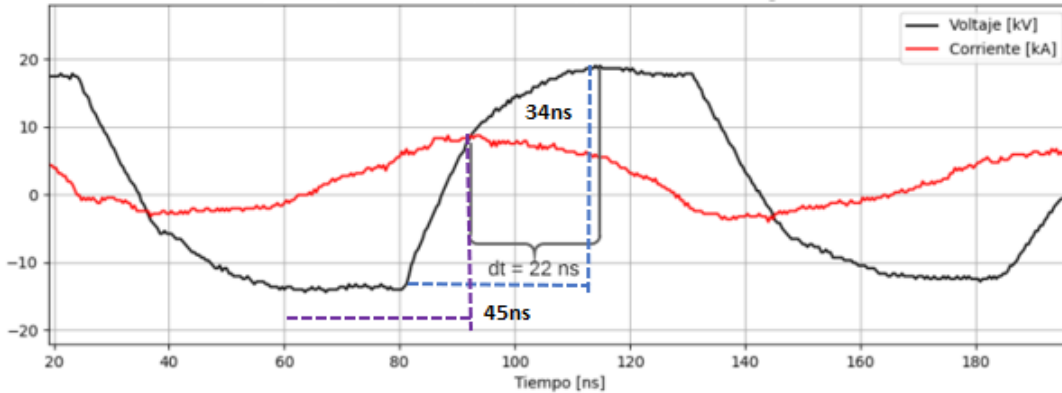
Figura 4-9: Forma de onda de la tensión residual y de la corriente de descarga del varistor de ZnO.



En la figura 4.9 la tensión alcanza su valor máximo cuando la corriente de descarga ha sobrepasado su pico máximo. La tensión residual y la corriente de descarga alcanzan unos valores máximos de 22kV y 17kA, respectivamente.

Ahora bien, en la figura 4.10 se presenta el desfase entre el valor máximo de tensión y el valor máximo de la corriente de descarga, así como el tiempo de frente (rise time) de cada pulso.

Figura 4-10: Desfase entre el valor máximo de tensión residual y el valor máximo de la corriente de descarga del varistor de ZnO.



En la figura 4.10 se muestran los tiempos de frente de 34 ns y 45 ns para el tensión residual y la corriente de descarga, respectivamente. El desfase entre el tensión residual y la corriente de descarga es de 22 ns , este retraso es equivalente a un ángulo de desfase de 72° , el cual se debe a la capacitancia del varistor. En tal sentido, cuando la corriente de descarga aparece entre sus terminales este efecto debe disminuir, demostrando así la caída del potencial de la barrera Schotky.

Si el efecto capacitivo no se reduce en el tiempo de frente de la corriente de descarga, el varistor no conmuta hacia el modo de conducción, por consiguiente existe un retraso en su respuesta provocando la aparición del voltaje residual después del pico máximo del impulso de la corriente de descarga.

De otro lado, en la figura 4.11 se presenta la forma de onda de la tensión residual **a** y el espectro de frecuencia asociado **b**, evidenciando que son señales con múltiples frecuencias (bajas y altas), así como de diferentes magnitudes.

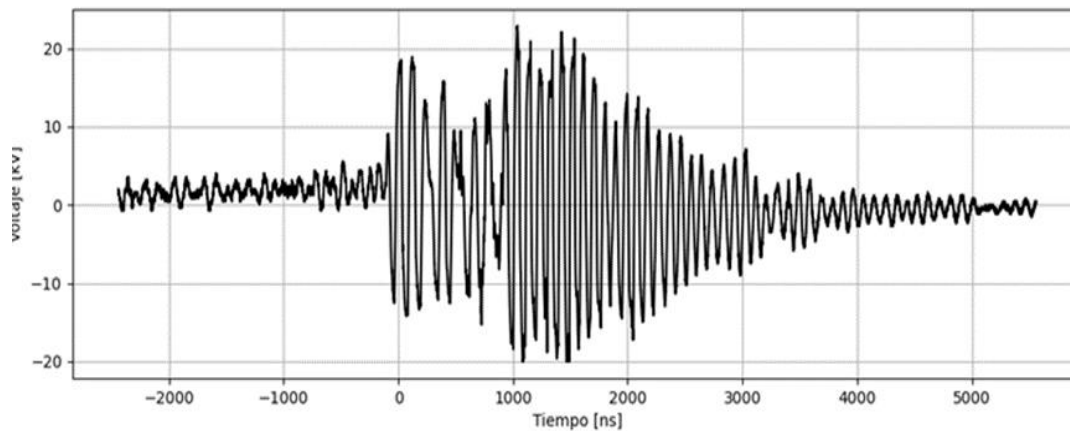
En relación con la forma de onda de la tensión residual se presentan valores de tensión desde 299 V hasta 23 KV , con una duración total de $4.22 \mu\text{s}$ y un amortiguamiento (τ) de 844 ns de la envolvente de la señal de tensión.

La magnitud de la tensión residual es función del tiempo de frente de la sobretensión transitoria que lo impacta, de tal forma que se pueden presentar reflexiones y picos

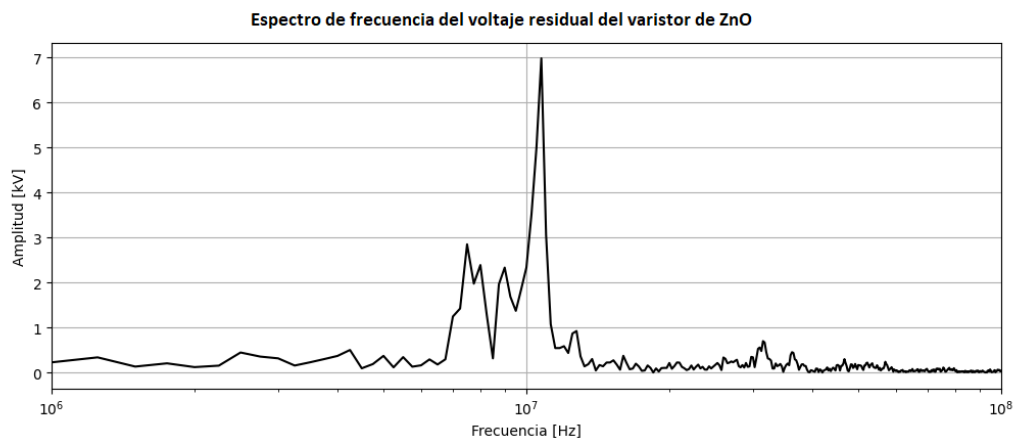
ruidosos originados por las inductancias y capacitancias parásitas de los cables de medición y del propio equipo de prueba.

Figura 4-11: Tensión residual y su correspondiente espectro de frecuencia del varistor de ZnO referencia B40K150.

a) Forma de onda de tensión residual del varistor 4 de ZnO ante pulsos de tensión tipo VFTO.



b) Espectro de frecuencia de tensión residual del varistor 4 de ZnO.

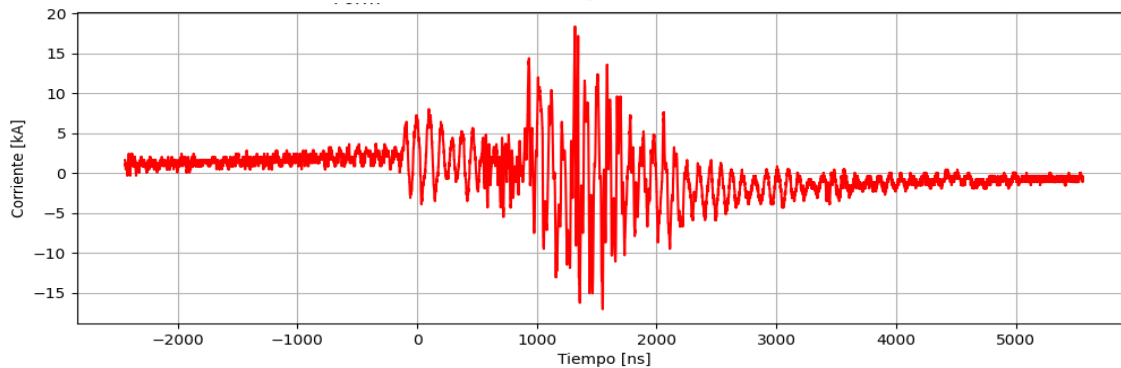


En la parte **b** se presenta el espectro de frecuencia, obtenido aplicando la Transformada Rápida de Fourier, y se observa que alrededor de una frecuencia de 10,8 MHz se pueden presentar más altas frecuencias, pero la magnitud de la tensión asociada es muy baja, por lo que carece de interés para los fines de esta investigación.

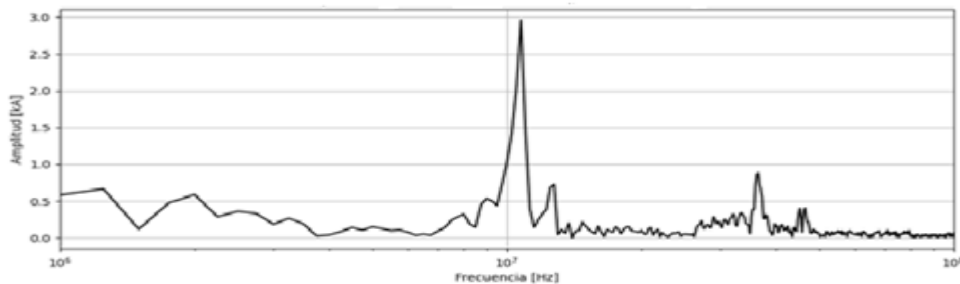
Por otra parte, en la figura 4.12 se presenta la forma de onda de la corriente de descarga y su espectro de frecuencia.

Figura 4-12: Corriente de descarga del varistor de ZnO referencia B40K150 y su correspondiente espectro de frecuencia.

a) Forma de onda de la corriente de descarga del varistor de ZnO referencia B40K150.



b) Espectro de frecuencia de la corriente de descarga del varistor de ZnO.



De esta manera, se puede observar que la forma de onda presenta amplitudes desde 364 A hasta 10.9 kA, con un tiempo de amortiguamiento de 416 ns para la envolvente de la onda, la cual tiene una duración total de 2.08 μ s. En el espectro de frecuencia se observa una frecuencia máxima de 10.8 MHz para una corriente asociada de 2.95 kA.

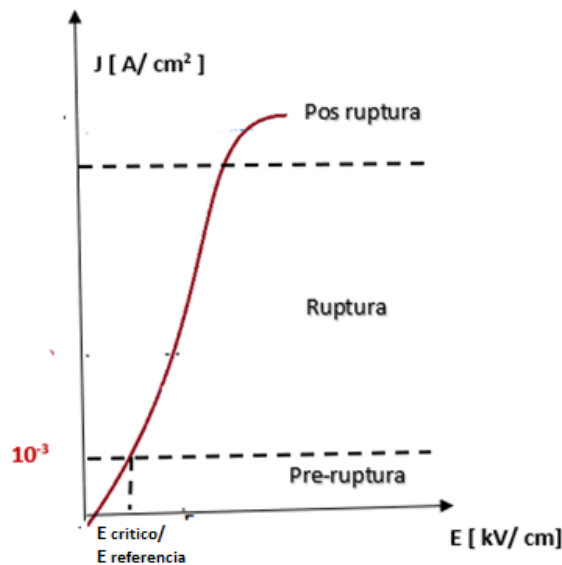
Ambas señales de tensión residual y la corriente de descarga tienen los mismos componentes en el dominio de la frecuencia. No obstante, el contenido de armónicos para frecuencias superiores a 10 MHz es ligeramente más alto en la componente de corriente que en la componente de tensión, según se muestra en las **Figuras 4.11 a** y **4.12 b**; dicho

resultado sugiere que en el comportamiento dinámico del varistor prima el efecto capacitivo frente al inductivo del DPS, en relación con el objeto de la investigación que es la tensión.

4.6 Relación de los campos eléctricos versus densidad de corriente y/o tensión versus corriente en el varistor de ZnO sometido a prueba

El comportamiento dinámico que presenta el varistor ante sobretensiones transitorias tipo descargas atmosféricas, tipo maniobra o tipo VFTO se manifiesta en las curvas J-E (E-J) o V-I (I-V), las cuales son construidas con datos obtenidos en laboratorios, estas curvas presentan tres regiones específicas, tal como se muestra en la **figura 4.13**. En el límite superior de la región de preruptura es una densidad de corriente de 10^{-3} A, correspondiente a la tensión de referencia (V_r) o campo crítico (E_r) del varistor.

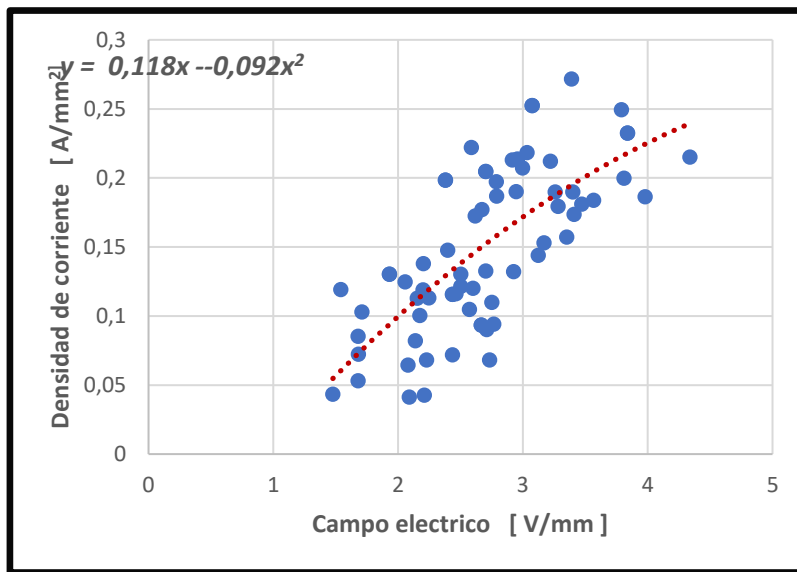
Figura 4-13: Curva característica de densidad de corriente -campo eléctrico del varistor bajo prueba.



A partir de este valor de corriente, llamada también corriente de fuga, se inicia la región de ruptura en la cual pequeños cambios en el campo eléctrico originan incrementos grandes de corriente; esta es la región del comportamiento no lineal del varistor y la de mayor interés para las protecciones eléctricas de sobretensiones.

En la **figura 4.14** se presenta la curva característica de densidad de corriente de descarga versus campo eléctrico (J-E), la cual se obtuvo al realizar una regresión polinomial de grado 2 a los datos obtenidos durante la experimentación. Esta gráfica permite establecer la ecuación aproximada de la densidad de corriente de descarga en función del campo eléctrico aplicado. Dicha ecuación está constituida por dos términos: uno lineal que refleja el cumplimiento de la ley de Ohm y el otro término de orden cuadrático que confirma el comportamiento no lineal del varistor, es decir, evidencia la desviación de la ley de Ohm.

Figura 4-14: Curva característica densidad de corriente versus campo eléctrico (C-J-E).



Al comparar la ecuación de la **figura 4.14** con la **ecuación 2.34**, establecida en el capítulo 2, se puede concluir que:

$$J = 0.118E - 0.092E^2$$

$$J_{e,x} = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{dm^*} \sigma E_x^2$$

- El primer término se asocia a la región de preruptura, donde la conducción eléctrica es gobernada por la resistencia de límite de los granos de ZnO; en esta zona se cumple la ley de Ohm, siendo el valor de la conductividad $[\sigma]$ 0.0.118 [S/cm].

- El segundo término refleja la no linealidad del varistor en la región de ruptura y en esta zona comienza a disminuir la resistencia entre los límites de grano, permitiendo el paso de corrientes del orden de los kA. El valor del campo eléctrico en esta zona es mayor que el valor asociado al campo eléctrico crítico, la estructura del varistor experimenta el movimiento de los portadores de carga, tales como: corrientes de arrastre, difusión y recombinación. La relación (J-E) en esta zona se expresa en términos de la ley de potencia empírica:

$$J = kE^\beta \quad (4.2)$$

Donde J es la densidad de corriente, E es campo eléctrico promedio, k depende de la microestructura y de las dimensiones del material y β es el coeficiente de no linealidad y depende de las propiedades del material del varistor.

La tensión total en el varistor se puede expresar por la ecuación 4.3 que incluye la parte lineal y la no lineal.

$$V = I[1R_g + R_{lg}] = I[R_g + KI^{\beta-1}] \quad (4.3)$$

Donde:

R_g : resistencia del grano de ZnO [Ω].

R_{lg} : resistencia entre límites de grano [Ω].

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones generales

En esta tesis se presentó la realización de un caso de estudio sobre la caracterización de varistores de ZnO de referencia B40K150, de bajo voltaje, ante sobretensiones transitorias con tiempo de frente muy rápido (VFTO por sus siglas en inglés), mediante un desarrollo teórico y experimental.

Los objetivos inicialmente propuestos se lograron cumplir a cabalidad mediante un análisis teórico de los modelos que representan el comportamiento dinámico de los varistores ante sobretensiones, concluyendo que:

- a) El principal objetivo de estos modelos era determinar la curva característica tensión versus corriente (CCV-I) frente a sobretensiones transitorias con tiempo de frente rápido, donde el voltaje residual aumenta a medida que el tiempo de la corriente disminuye y alcanza su valor máximo antes del pico máximo de la corriente. En la mayoría de estos modelos no tienen en cuenta la capacidad asociada y parásita con respecto a tierra del varistor.
- b) Desde el punto de vista de la microestructura del varistor, la relación voltaje versus corriente muestra que la no linealidad del varistor es controlada por la barrera entre límites del grano de ZnO, cuya diferencia de potencial se debe al campo aplicado. Este voltaje crítico constituye el límite entre las zonas de prerruptura y de ruptura y, a partir de este punto, es necesario considerar magnitudes del campo eléctrico de orden superior. Por lo tanto, se determina la densidad de corriente en el varistor de ZnO, teniendo en cuenta los términos no lineales del campo eléctrico aplicado, mediante la ecuación de transporte de Boltzmann que, a partir de la segunda

iteración, la densidad de corriente presenta una contribución no lineal del campo eléctrico.

- c) Con el fin de analizar experimentalmente los varistores ante impulsos muy rápidos, se diseñó y se construyó un generador de impulso basado en la tecnología de transformadores de línea de transmisión (TLT por sus siglas en inglés), el cual permitió producir impulsos de alta energía con tiempos de frente de ns y frecuencias superiores cercanas a los 10 MHz. Con este generador se alcanzaron picos de tensión superiores a los 15 kV y corrientes mayores a 20 kA.
- d) El desarrollo teórico experimental de esta investigación constituye un punto de referencia para el diagnóstico de los varistores bajo pulsos tipo VFTO y el análisis de las formas de onda del pulso aplicado, el voltaje residual y la corriente de descarga en el varistor.
- e) Los varistores fueron sometidos a varios ensayos que permitieron mostrar las características de su comportamiento ante pulsos de alta tensión a muy alta frecuencia.
- f) El diseño experimental se basó en el Análisis de Varianza de los datos experimentales obtenidos, lo que permitió seleccionar al varistor que representa la población muestral.
- g) Al caracterizar el comportamiento de los varistores ante pulsos de tensión VFTO, se ratifica la influencia del tiempo de frente del sobrevoltaje aplicado sobre el efecto capacitivo del varistor, el cual se manifiesta por el desfase entre el voltaje residual y la corriente de descarga, este retraso puede alcanzar un valor cerca de los noventa grados, lo que hace que el voltaje residual aparezca después de que el impulso de corriente alcanza su valor máximo. Lo anterior demuestra que el varistor no conduce con éxito bajo la presencia de este tipo de pulsos y la conmutación del varistor, del estado capacitivo al estado resistivo, es lenta comparada con el pulso de corriente, ya que el tiempo necesario para disminuir el efecto capacitivo es mayor que el tiempo de frente del impulso de corriente tipo VFTC (Very Fast Transient Current).
- h) Considerando el efecto de las sobretensiones tipo VFTO sobre el aislamiento de los equipos de las subestaciones encapsuladas, es importante tomar medidas para mitigar o suprimir este tipo de sobretensiones; sin embargo, debido a las

limitaciones en su detección, las medidas a ser tomadas pueden ser no factibles de aplicar en la práctica. Algunas prácticas son:

Resistores en conexión paralelo con los contactos del equipo de conmutación, los cuales en los procesos de apertura y cierre de estos equipos actúan como elemento de amortiguamiento absorbiendo la energía de la sobretensión transitoria [47].

Condensadores de acoplamiento

La instalación de condensadores en paralelo en el lado de alta tensión del transformador puede reducir la amplitud y el tiempo de frente de la sobretensión tipo VFTO y filtrar sus componentes de alta frecuencia, sin embargo, en algunos casos puede causar ferro resonancia [33].

Trampas de ondas

La conexión de trampas de ondas en el lado de alta tensión del transformador puede filtrar significativamente las componentes de alta frecuencia, pero la reducción de la amplitud de la tensión no es obvia y se pueden inducir armónicos de alta frecuencia en la subestación [33].

Anillos de ferrita

La ferrita es un material magnético no lineal de alta frecuencia y los anillos de ferrita se utilizan alrededor de los conductores de la subestación encapsulada de GIS para absorber la energía transitoria de la sobretensión [48].

5.2 Trabajos futuros

Es importante continuar estudiando esta temática para poder tener mejores criterios de protección ante este tipo de fenómenos. Algunos trabajos futuros que se podrían derivar de esta investigación son:

- Establecer la forma de onda normalizada para los pulsos de tensión tipo VFTO con el objetivo de diagnosticar, mediante pruebas de laboratorio, los equipos de las subestaciones encapsuladas que son afectados por este tipo de tensiones transitorias.
- Establecer la eficacia de los DPS en un entorno GIS, que es diferente al que normalmente existe en las subestaciones convencionales.
- Análisis del impacto en los descargadores de sobretensión, del transformador de tensión tipo capacitivo, de los cables subterráneos y otras fuentes de efectos capacitivos presentes en la red eléctrica.
- Establecer si estas fuentes de efecto capacitivo pueden ser consideradas como factores beneficiosos o dañinos para el comportamiento dinámico de los DPS.

A. Anexo: Corrección de la ley de Ohm mediante la solución aproximada de la ecuación de transporte de Boltzmann

Se pretende establecer la corrección de la ley de Ohm mediante la solución aproximada de la ecuación del transporte de Boltzmann, esta ecuación en coordenadas esféricas está dada por la ecuación A.1:

$$\frac{(f_0-f)_-}{\tau} = \mathbf{v} \cdot \nabla_{\rho} f + \frac{e}{m^*} \mathbf{E} \nabla_{\mathbf{v}} f \quad \text{A.1}$$

Donde:

e : carga del electrón.

m^* : masa efectiva de la partícula, en este caso del electrón.

\mathbf{E} : es el campo eléctrico.

f : es la función de distribución de probabilidad de los portadores de carga.

∇_{ρ} : gradiente con respecto a la posición.

$\nabla_{\mathbf{v}}$: gradiente con respecto a la velocidad.

f_0 : es la distribución en el equilibrio y, por ende, es constante respecto a la posición, pero es dependiente de la velocidad.

En este caso, ∇_{ρ} y $\nabla_{\mathbf{v}}$ representan la variación respecto a la posición espacial ρ y la velocidad \mathbf{v} . Donde ρ y \mathbf{v} son vectores de tres componentes x, y, z y v_x, v_y, v_z , respectivamente. En este caso se asume que f_0 representa la distribución de probabilidad inicial de los electrones, la cual es **invariante en la posición** ρ , pero depende de la velocidad \mathbf{v} . Al observar a A.1 se tiene que la única variable desconocida es f

(asumiendo conocidas f_0 y las demás constantes). Finalmente, esta variable permite establecer la expresión final para la ley de Ohm.

Entonces, para observar el efecto microscópico que tiene el campo eléctrico sobre los electrones, se propone variar dicho campo desde la magnitud y desde la dependencia espacial mediante los parámetros variables α y β , para crear, de esta manera, una familia de campos eléctricos dada por la ecuación A.2.

$$E_{\alpha\beta} = \alpha E(\beta\rho) \quad \text{A.2}$$

Reemplazando la ecuación A.2 en la ecuación A.1 se obtiene la ecuación A.3

$$v \cdot \nabla_{\rho} f + (e/m^*) \alpha E(\beta\rho) \cdot \nabla_v f = \frac{(f_0 - f)}{\tau} \quad \text{A.3}$$

Realizando un cambio de variable la expresión A.3 se convierte en A.4:

$$\beta v \cdot \nabla_r f + (e/m^*) \alpha E(r) \cdot \nabla_v f = \frac{(f_0 - f)}{\tau} \quad \text{A.4}$$

Para encontrar la solución de la anterior ecuación se propone expandir la función f como una serie de Taylor en términos de α y β .

La serie de Taylor de dos variables para f está dada por la siguiente expresión:

$$f = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \quad \text{A.5}$$

Donde f_{ij} son los coeficientes de la serie de Taylor que se buscan encontrar para obtener la solución de la ecuación de Boltzmann. Con esta nueva formulación de f , la ecuación de Boltzmann se obtiene en la siguiente expresión:

$$\beta v \cdot \nabla_r \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) + (e/m^*) \alpha E(r) \cdot \nabla_v \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij} \right) = (f_0 - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij}) / \tau \quad \text{A.6}$$

Haciendo β, α factores de la doble sumatoria se tiene la siguiente expresión:

$$\beta v \cdot \nabla_r \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^{j+1} f_{ij} \right) + (e/m^*) \alpha E(r) \cdot \nabla_v \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^{i+1} \beta^j f_{ij} \right) = (f_0 - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha^i \beta^j f_{ij}) / \tau \quad \text{A.7}$$

Solo se requieren los términos correspondientes al polinomio de segundo orden, por lo tanto, $i = 2$ y $j = 1$ y la expresión completa está dada por la ecuación A.8.

$$v \cdot \nabla_r (\beta f_{00} + \alpha \beta f_{10} + \beta^2 f_{01} + \alpha \beta^2 f_{11} + \alpha^2 \beta f_{20} + \alpha^2 \beta^2 f_{21}) + (e/m^*) E \cdot \nabla_v (\alpha f_{00} + \alpha^2 f_{10} + \alpha \beta f_{01} + \alpha^2 \beta f_{11} + \alpha^3 f_{20} + \alpha^3 \beta f_{21}) = (f_0 - (f_{00} + \alpha f_{10} + \beta f_{01} + \alpha \beta f_{11} + \alpha^2 f_{20} + \alpha^2 \beta f_{21})) \quad \text{A.8}$$

En la anterior ecuación no se coloca la dependencia de r en el campo eléctrico E . Sin embargo, esta dependencia sigue existiendo.

Dado que α y β no dependen de r ni de v , pueden salir del gradiente y la ecuación A.8 es una igualdad de polinomios de segundo orden, donde se pueden igualar los coeficientes de cada término del polinomio. Esto se debe a que, en este caso, el conjunto de polinomios de grado 2 P_2 es un espacio vectorial, por lo tanto, para que la multiplicación por un escalar sea cero es porque el escalar es cero o el vector lo es.

Igualando los respectivos coeficientes en la ecuación A.8:

- ✓ Igualación de los términos independientes a derecha e izquierda

$$0 = \frac{f_0 - f_{00}}{\tau} \quad \text{A.9}$$

Lo anterior implica $f_0 = f_{00}$.

- ✓ Se igualan los coeficientes que solo tienen α y no tienen a β , a derecha e izquierda, para obtener la ecuación A.10:

$$(e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{00} = -\frac{f_{10}}{\tau} \quad \text{A.10}$$

$$f_{10} = -(e\tau/m^*)E \cdot \nabla_v f_{00}$$

- ✓ Se igualan los coeficientes que solo tienen β y no tienen a α , a derecha e izquierda, y con esto se obtiene la ecuación A.11

$$v \cdot \nabla_r f_{00} = -\frac{f_{01}}{\tau} \quad \text{A.11}$$

Como f_0 es invariante en ρ y en r y lo es también f_{00} , se puede concluir que $\nabla_r f_{00} = 0$ y se obtiene $f_{01} = 0$

- ✓ Se igualan los coeficientes que tienen β y α en su primera potencia, a derecha e izquierda, y se obtiene la ecuación A.12

$$v \cdot \nabla_r f_{10} + (e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{01} = -\frac{f_{11}}{\tau} \quad \text{A.12}$$

De las ecuaciones A.11 y A.12 se obtiene la siguiente expresión:

$$f_{11} = -\tau v \cdot \nabla_r f_{10} \quad \text{A.13}$$

- ✓ Se igualan los coeficientes que tienen α^2 y no tienen β , a derecha e izquierda, y se obtiene las siguientes expresiones:

$$(e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{10} = -\frac{f_{20}}{\tau} \quad f_{20} = -(e\tau/m^*)E \cdot \nabla_v f_{10} \quad \text{A.14}$$

- ✓ Se igualan los coeficientes que tienen α^2 y β , a derecha e izquierda, obteniéndose:

$$v \cdot \nabla_r f_{20} + (e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{11} = -\frac{f_{21}}{\tau} \quad \text{A15}$$

$$f_{21} = -\tau [v \cdot \nabla_r f_{20} + (e/m^*)E \cdot \nabla_v f_{11}] \quad \text{A16}$$

Aprovechando algunas propiedades del cálculo:

$$\nabla_v f_0 = \frac{df_0}{dv} = \frac{df_0}{dv} \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon} = \frac{df_0}{d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dv} = \frac{df_0}{d\varepsilon} \frac{d\left(\frac{1}{2}m^*v^2\right)}{dv} = m^* \frac{df_0}{d\varepsilon} v \quad \text{A.17}$$

$$\nabla_v \frac{df_0}{d\varepsilon} = \frac{d^2 f_0}{dv d\varepsilon} = \frac{d^2 f_0}{dv d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon} = \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dv} = \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} \frac{d\left(\frac{1}{2}m^*v^2\right)}{dv} = m^* \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} v \quad \text{A.18}$$

Como: $f_{00} = f_0$, $f_{01} = 0$, se obtiene:

$$f_{10} = -(e\tau/m^*)E \cdot \nabla_v f_{00}$$

$$f_{10} = -(e\tau) \frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot v \quad \text{A.19}$$

$$f_{11} = \tau v \cdot \nabla_r \left((e\tau) \frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot v \right)$$

$$f_{11} = (e\tau^2) \frac{df_0}{d\varepsilon} v \cdot \nabla_r (E \cdot v) \quad \text{A.20}$$

$$f_{20} = \frac{e^2 \tau^2}{m^*} E \cdot \nabla_v \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot v \right)$$

$$f_{20} = \frac{e^2 \tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} E \cdot \nabla_v (E \cdot v) + E \cdot (E \cdot v \nabla_v \frac{df_0}{d\varepsilon}) \right)$$

Como $E \cdot \nabla_v (E \cdot v) = \|E\|^2$ y $E \cdot (E \cdot v)v = (E \cdot v)^2$, por lo tanto, se obtiene:

$$f_{20} = \frac{e^2 \tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} \|E\|^2 + m^* \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} (E \cdot v)^2 \right) \quad \text{A.21}$$

$$f_{21} = -\tau \left[v \cdot \nabla_r \left(\frac{e^2 \tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} \|E\|^2 + m^* \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} (E \cdot v)^2 \right) \right) + (e/m^*) E \cdot \nabla_v \left((e\tau^2) \frac{df_0}{d\varepsilon} v \cdot \nabla_r (E \cdot v) \right) \right]$$

$$f_{21} = -\tau \left[v \cdot \nabla_r \left(\frac{e^2 \tau^2}{m^*} \left(\frac{df_0}{d\varepsilon} \|E\|^2 + m^* \frac{d^2 f_0}{d^2 \varepsilon} (E \cdot v)^2 \right) \right) + (e/m^*) E \cdot \nabla_v \left((e\tau^2) \frac{df_0}{d\varepsilon} v \cdot \nabla_r (E \cdot v) \right) \right] \quad \text{A.22}$$

Todas las ecuaciones están expresadas en términos de f_0 , lo cual implica que la solución de la ecuación de Boltzmann se puede expresar como:

$$f(r, v) = F_{00} + \alpha F_{10} + \beta F_{01} + \alpha\beta F_{11} + \alpha^2 F_{20} + \alpha^2 \beta F_{21} \quad \text{A.23}$$

Y si se imponen α y β igual a 1, para simplificar la solución, se tendrá:

$$f(r, v) = F_{00} + F_{10} + F_{01} + F_{11} + F_{20} + F_{21}$$

El valor de la densidad de corriente podrá ser calculado mediante la expresión:

$$J = (e/4\pi^3)(m^*/\hbar) \int \int \int_{-\infty}^{\infty} f(r, v) v dv_x dv_y dv_z \quad \text{A.24}$$

Dado que la integral se realiza sobre todo el espacio, las funciones impares dentro del integrando serán cero, en consecuencia, los términos que contengan múltiplos pares de v en la función f serán anulados en la integral, esto implica que la densidad de corriente estará dada por:

$$J = (e/4\pi^3)(m^*/\hbar) \int \int \int_{-\infty}^{\infty} (f_{10} + f_{21}) v dv_x dv_y dv_z \quad A.25$$

Para realizar esta integral se debe definir primero f_0 , a partir de la función de distribución de equilibrio de Maxwell-Boltzmann, en la expresión.

$$f_0 = A e^{-\frac{\epsilon}{kT}} \quad A.26$$

Donde A y k son constantes de normalización y de temperatura, respectivamente, y T es la temperatura absoluta. De esta manera, se puede establecer la expresión no lineal de la densidad de corriente como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} - (e\tau^2/m^*)\sigma [3\vec{E}(\nabla \cdot \vec{E}) + 2(\vec{E} \cdot \nabla)\vec{E}] \quad A.25$$

Donde $\sigma = (1/3\pi^2)[(em^*)^2/\hbar^3]\tau v_f^2$ y v_f es la velocidad de Fermi. Como se observa en (A.25), el primer término es la ley de Ohm lineal, este término resulta de la integración de f_{10} , mientras que los demás términos representan la componente no lineal y resultan de la integración de f_{21} .

Con base en la ecuación A.25 y suponiendo un campo no nulo en la dirección x $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$, se tiene:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x}, \text{ esto implica que } \vec{E}(\nabla \cdot \vec{E}) = E_x \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

$$\text{Siendo } \vec{E} \cdot \nabla = E_x \frac{\partial}{\partial x}, \text{ se obtiene: } (\vec{E} \cdot \nabla)\vec{E} = E_x \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

Reemplazando las anteriores expresiones en la ecuación A.25 se obtiene la expresión de la densidad de corriente:

$$J_{e,x} = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{m^*} \sigma \left(E_x \frac{\partial E_x}{\partial x} \right) \quad A.27$$

Aplicando el concepto de derivada a la ecuación 2.26 se puede llegar a una expresión simple, la cual será comparada con los resultados experimentales:

$$J_{e,x} = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{m^*} \sigma \left(E_x \frac{E_x}{d} \right) = \sigma E_x - 5 \frac{e\tau^2}{dm^*} \sigma E_x^2 \quad \text{A.28}$$

Donde:

e : carga del electrón [$-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$].

m : masa del electrón [$9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$].

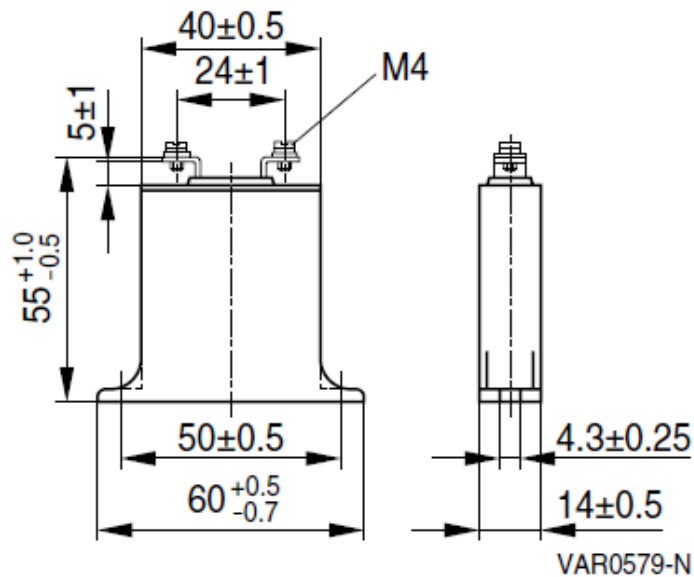
τ : tiempo de relajación de los portadores de carga: $1.25-3.5 \times 10^{-8} \text{ s}$.

d : distancia de separación [$10 \text{ } \mu\text{cm}$].

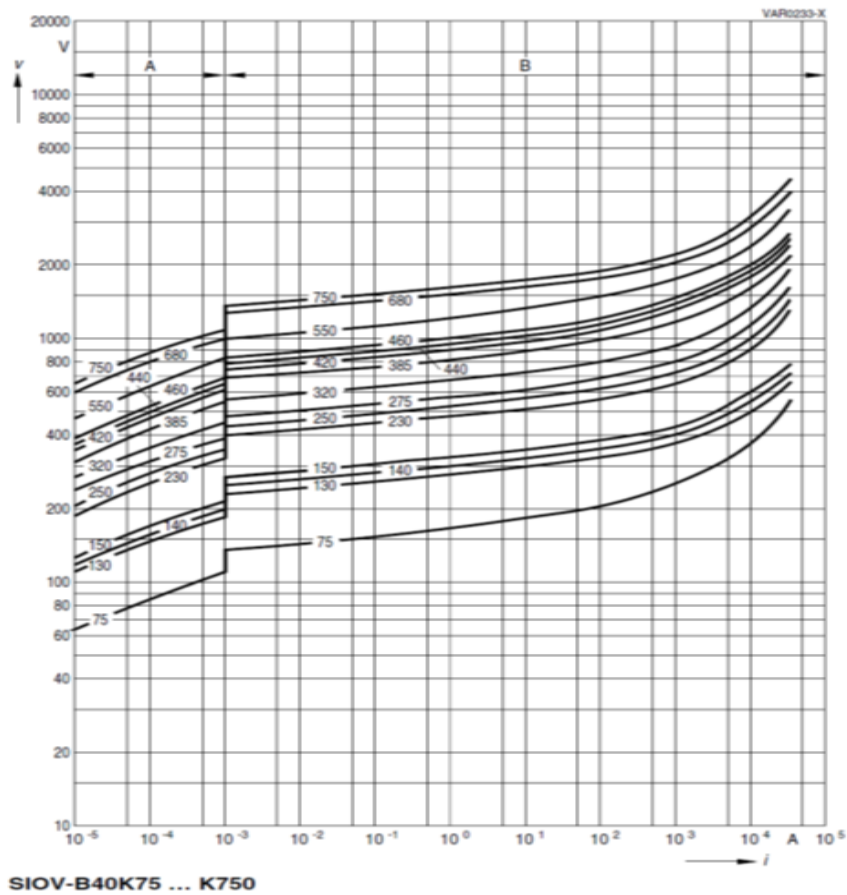
σ : conductividad eléctrica [S/m].

B. Anexo: Ficha técnica del varistor de ZnO comercial, de uso en baja tensión, seleccionado para el caso de estudio

Dimensiones
SIOV-B32/-B40



Diametro nominal [mm]	Tensión nominal [V]	Peso [g]
30	130 ... 750	45
40	75 ... 750	50
60	130 ... 1100	250
80	130 ... 1100	650

Figura B.1.2 Curva característica V versus I (para transitorios de frente rápido).

A: zona de corriente de fuga.

B: zona de protección.

C. Anexo: Diseño de experimento

C. 1 Resultados experimentales de los valores máximos de tensión residual los cinco varistores

N° de réplicas	Tensión residual varistor 1 [V]	Tensión residual varistor 2 [V]	Tensión residual varistor 3 [V]	Tensión residual varistor 4 [V]	Tensión residual varistor 5 [V]
1	11362,50	18046,88	15515,63	14925,00	15984,38
2	13162,50	18150,00	14850,00	16012,50	15993,75
3	12368,75	17771,88	15218,75	15112,50	15643,75
4	13468,75	14303,13	14878,13	15171,88	15653,13
5	13784,38	15096,88	14540,63	15828,13	15878,13
6	14640,63	16412,50	14531,25	16984,38	15384,38
7	15371,88	14068,75	14893,75	15284,38	14990,63
8	13662,50	14250,00	15196,88	15984,38	15193,75
9	14353,13	12340,63	14900,00	15993,75	15443,75
10	13256,25	14121,88	15121,88	15643,75	16984,38
11	12096,88	15721,88	14975,00	15653,13	15284,38
12	13837,50	14075,00	14750,00	15878,13	15231,25
13	13865,63	16821,88	14912,50	15384,38	15653,13
14	13725,00	12865,63	14115,63	14990,63	15518,75
15	13843,75	14259,38	15918,75	16193,75	16893,75
16	15678,13	16868,75	15212,50	15943,75	14925,00
17	12893,75	13437,50	14753,13	15231,25	16012,50

18	13346,88	13800,00	14543,75	15653,13	15112,50
19	11031,25	14353,13	15221,88	15518,75	15171,88
20	14362,50	15971,88	14712,50	16893,75	15828,13

C. 2 Resultados experimentales de los valores máximos de la corriente de descarga de los cinco varistores.

N° de réplicas	Corriente de descarga del varistor 1 [A]	Corriente de descarga del varistor 2 [A]	Corriente de descarga del varistor 3 [A]	Corriente de descarga del varistor 4 [A]	Corriente de descarga del varistor 5 [A]
1	5467,19	6715,63	6575,00	5996,88	5999,65
2	5332,81	6821,88	6762,50	6000,00	6462,50
3	5539,06	6623,44	6132,81	6056,25	5984,38
4	5703,13	6607,81	5942,19	6092,19	5914,00
5	5859,38	6459,38	5932,81	6765,63	6353,12
6	5887,50	6059,38	5760,94	7470,31	5960,93
7	5531,25	6310,94	5884,38	6557,81	5978,13
8	6251,56	5871,70	6473,44	5929,69	6154,69
9	5914,06	5796,88	6604,69	6462,50	6183,10
10	5534,38	6032,81	6331,25	5984,38	6216,62
11	5718,75	6126,56	6012,50	5914,06	6557,81
12	5803,13	6404,69	5982,81	6828,13	6204,69
13	5223,44	6190,63	6092,19	5760,94	6200,00
14	5831,25	5962,50	5892,19	5878,13	6484,50
15	5421,88	5992,19	6146,88	6754,69	6443,75
16	5689,06	6360,94	6326,56	7262,50	6000,20
17	5968,75	6260,94	6362,50	6204,69	6123,00
18	5625,00	6570,31	5434,38	6300,00	6183,10

19	5428,13	6059,38	6204,69	6682,81	6092,19
20	5896,88	6068,75	5771,88	6443,75	6165,63

C. 3 Análisis de Varianza (ANOVA. Análisis of Variante)

La técnica Análisis de Varianza es una herramienta estadística básica que permite establecer la existencia, o no, de diferencias significativas en un grupo de datos. En muchos casos el error en la medición o en la ejecución de las pruebas hace difícil evidenciar estas diferencias, especialmente cuando el orden de la variación es pequeño.

Compara la variabilidad de las medias muestrales (a través de la varianza muestral) con la variabilidad de los elementos dentro de la muestra.

C. 3.1 Modelo del Análisis de Varianza

Se desea comparar las respuestas de n muestras, cada una de ellas es una variable aleatoria y los datos aparecen como se muestra en la **tabla C.3**, la entrada y_{ij} representa la observación tomada para la muestra i .

Tabla C-3: Tabla de datos del ANOVA [42]

Tratamiento	Observaciones	Totales	Promedio
1	$y_{11} y_{12} y_{13} \dots y_{1n}$	Y_1	\hat{Y}_1
2	$y_{21} y_{22} y_{23} \dots y_{2n}$	Y_2	\hat{Y}_2
-----
A	$Y_{a1} y_{a2} y_{a3} \dots y_{an}$	y_a	\hat{Y}_a
		$y_{..}$	\hat{Y}

Cualquiera de las observaciones se puede describir por la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (C.1)$$

Donde:

Y_{ij} : variable aleatoria relacionada con la observación.

μ : media global.

τ_i : efecto del tratamiento o factor.

ε_{ij} : componente del error aleatorio.

Tanto τ_i como ε_{ij} son variables aleatorias con unas distribuciones normales de media cero y σ^2 .

$$\text{Varianza } (Y_{ij}) = \sigma_{\text{efecto del tratamiento}}^2 + \sigma_{\text{error aleatorio}}^2 \quad (\text{C.2})$$

Para verificar la varianza generada por el efecto del tratamiento se suponen dos hipótesis:

- Hipótesis nula: $H_0: \mu_1=\mu_2=\mu_3=\mu_4=\mu_i$, es decir, las medias de los niveles del factor son iguales.
- Hipótesis alternativa: H_1 : al menos alguna de las medias es diferente.

Si la hipótesis nula es verdadera cada observación se compone solo de la media global μ más el efecto del componente de error aleatorio. Si la hipótesis nula se rechaza quiere decir que hay efecto del factor sobre la varianza del resultado [51].

El proceso de aceptación o rechazo de la hipótesis lleva implícito un riesgo que se cuantifica con el valor de la "p", que es la probabilidad de aceptar la hipótesis alternativa como cierta, cuando la cierta podría ser la hipótesis nula; "p" indica si la asociación es estadísticamente significativa, su valor ha sido arbitrariamente seleccionado y fijado en 0.05 o 0.01, donde una seguridad del 95% lleva implícita una $p <$ de 0.05 y una seguridad del 99% lleva implícita una $p <$ de 0.01.

El ANOVA se basa en la descomposición de la variación total de los datos con respecto a la media global o suma de cuadrados totales (SCT) que, bajo el supuesto de que H_0 es cierta, es una estimación obtenida a partir de toda la información muestral, en dos partes:

$$SCT = SCD + SCE \quad (\text{C.3})$$

Donde:

SCT: suma de cuadrados totales.

SCD: suma de cuadrados intergrupos, cuantifica la dispersión de los valores de cada muestra con respecto a la media total de todas las observaciones o media global [9].

SCE: suma de cuadrados intergrupos o del error, cuantifica la dispersión de cada observación respecto a la media de su grupo.

Las expresiones que se utilizan para construir el análisis ANOVA son las siguientes:

$$SCT = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad (C.4)$$

$$SCD = \sum_{i=1}^K n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \quad (C.5)$$

$$SCE = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (C.6)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}}{N} \quad (C.7)$$

$$N = \sum_{i=1}^K n_i \quad (C.8)$$

Donde:

x_{ij} : es la j -ésima observación de la variable en la categoría i .

\bar{X} : media global.

K : el número de los niveles.

n_i : la cantidad de observaciones de la categoría i .

\bar{X}_i : media de las observaciones de la categoría i .

N : tamaño total de la muestra.

Las sumas de cuadrados intergrupos e intragrupo se deben dividir por sus correspondientes grados de libertad para obtener las varianzas correspondientes.

El cociente de las varianzas tiene una distribución F con $K - 1$ grados de libertad en el numerador y $N - K$ grados de libertad en el denominador, siendo K el número de niveles

del factor y N el número total de repeticiones, por lo tanto, si H_0 es cierta es de esperar que el cociente entre ambas estimaciones sea pequeño, de forma que, si dicho cociente sobrepasa cierto valor crítico, podremos afirmar que no todos los grupos estudiados tienen la misma media. El valor que se utiliza como crítico es $f_{\alpha, K-1, N-K}$.

La prueba de hipótesis tiene un Valor-P asociado que se calcula como:

$$\text{Valor - P} = P(F_{K-1, N-K} > F_0)$$

Y se puede concluir que:

- Si el valor de Valor $p \leq \alpha$: los datos no siguen una distribución normal, por consiguiente, se rechaza H_0 .
- Si el valor $p > \alpha$: los datos siguen una distribución normal y no se rechaza la hipótesis nula.

Antes de aplicar el ANOVA a un conjunto de resultados se deben de validar los requisitos de parametricidad:

- **Normalidad:** los resultados del experimento deben considerarse normales. Para esto se deben de realizar pruebas de bondad de ajuste, donde se describa qué tan adaptadas se encuentran las observaciones y cómo discrepan de los valores esperados.
- **Homocedasticidad:** la varianza de los errores de las variables explicativas es constante a lo largo de todas las observaciones.
- **Errores:** los errores que se presenten deben de ser independientes. Esto solo sucede cuando los datos son asignados de forma aleatoria y se distribuyen de forma normal dentro del grupo.

El Análisis de Varianza se puede resumir en una tabla conocida como la tabla ANOVA (**Tabla 4.2**).

Tabla C-4: Tabla de resultados arrojados por el Análisis de Varianza para el modelo de un solo factor.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrática	Estadístico F	Valor P
Entre niveles	K-1	SCD	$MSD = \frac{SCD}{K-1}$	$F_o = \frac{MSD}{MSE}$	$P(F_{k-1, N-K} > F_o)$
Dentro de los niveles	N-K	SCE	$MSE = \frac{SCE}{N-K}$		
Totales	N-1				

D. Anexo: Verificación de los requisitos de parametricidad de los varistores de ZnO dos, tres, cuatro y cinco

Figura D-1: Verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor de ZnO dos.

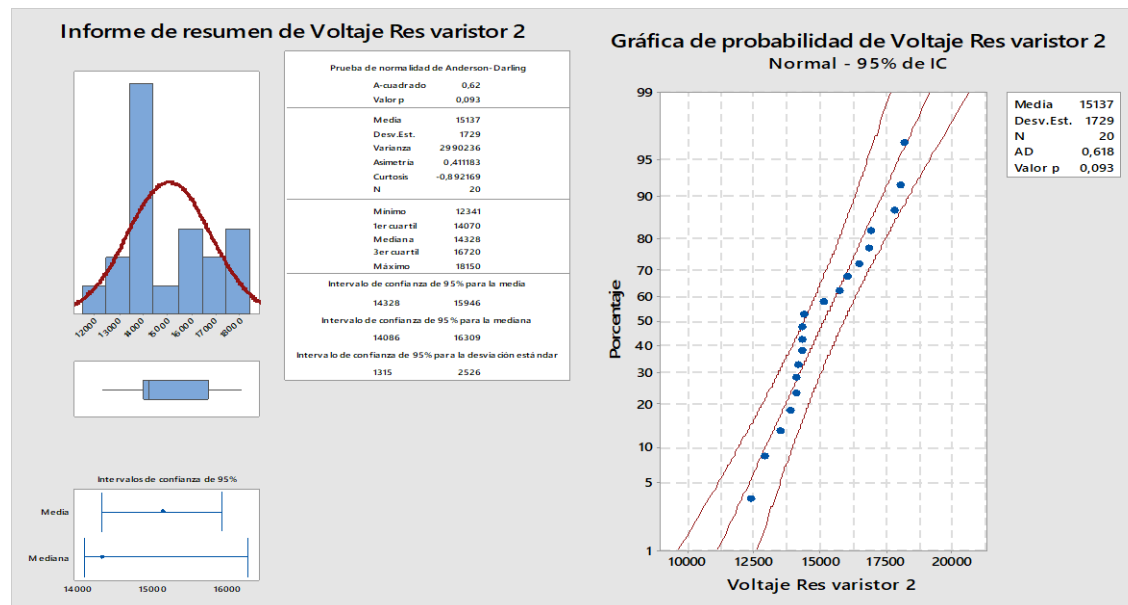


Figura D-2: Verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor de ZnO tres.

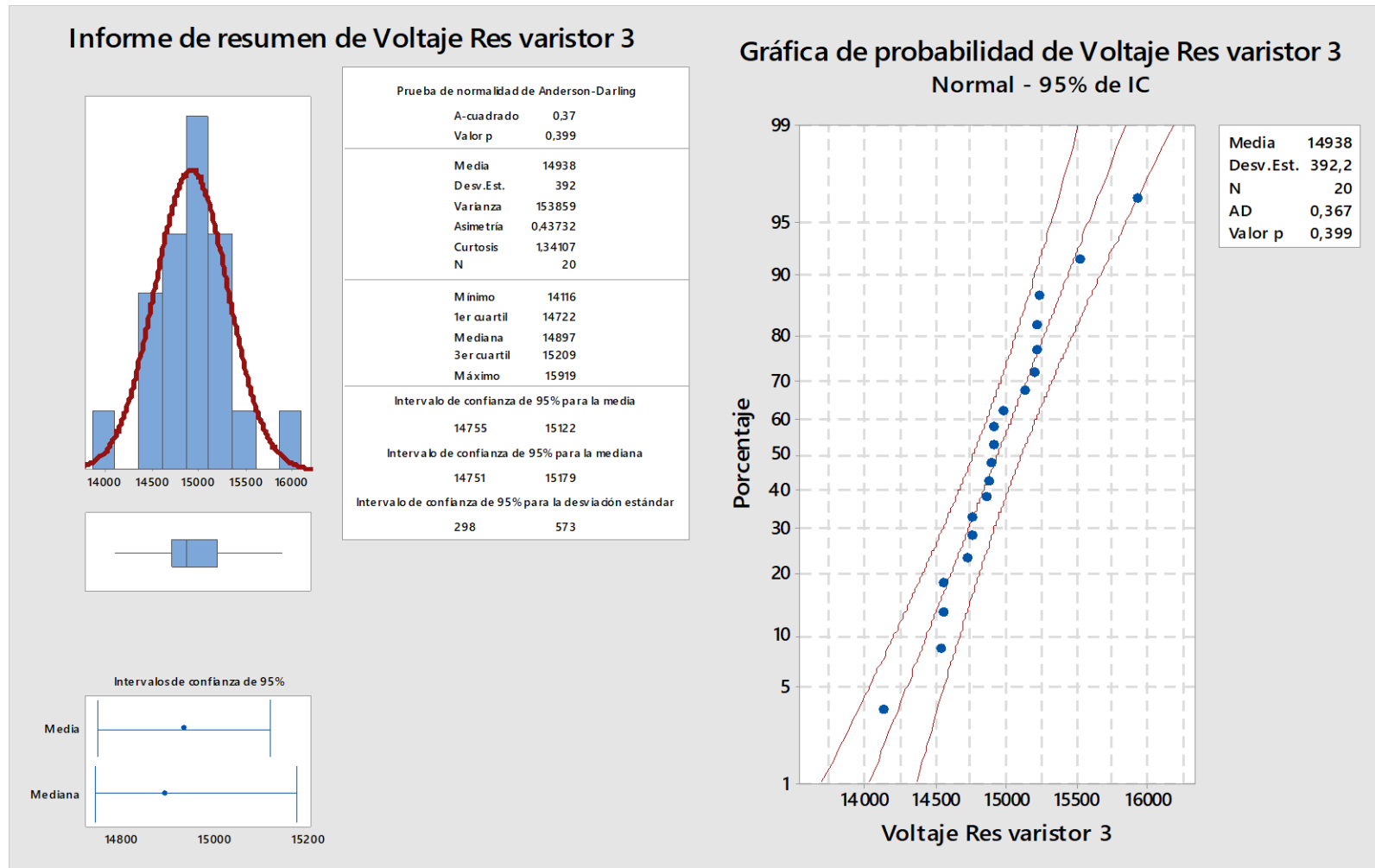


Figura D-3: verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor de ZnO cuatro.

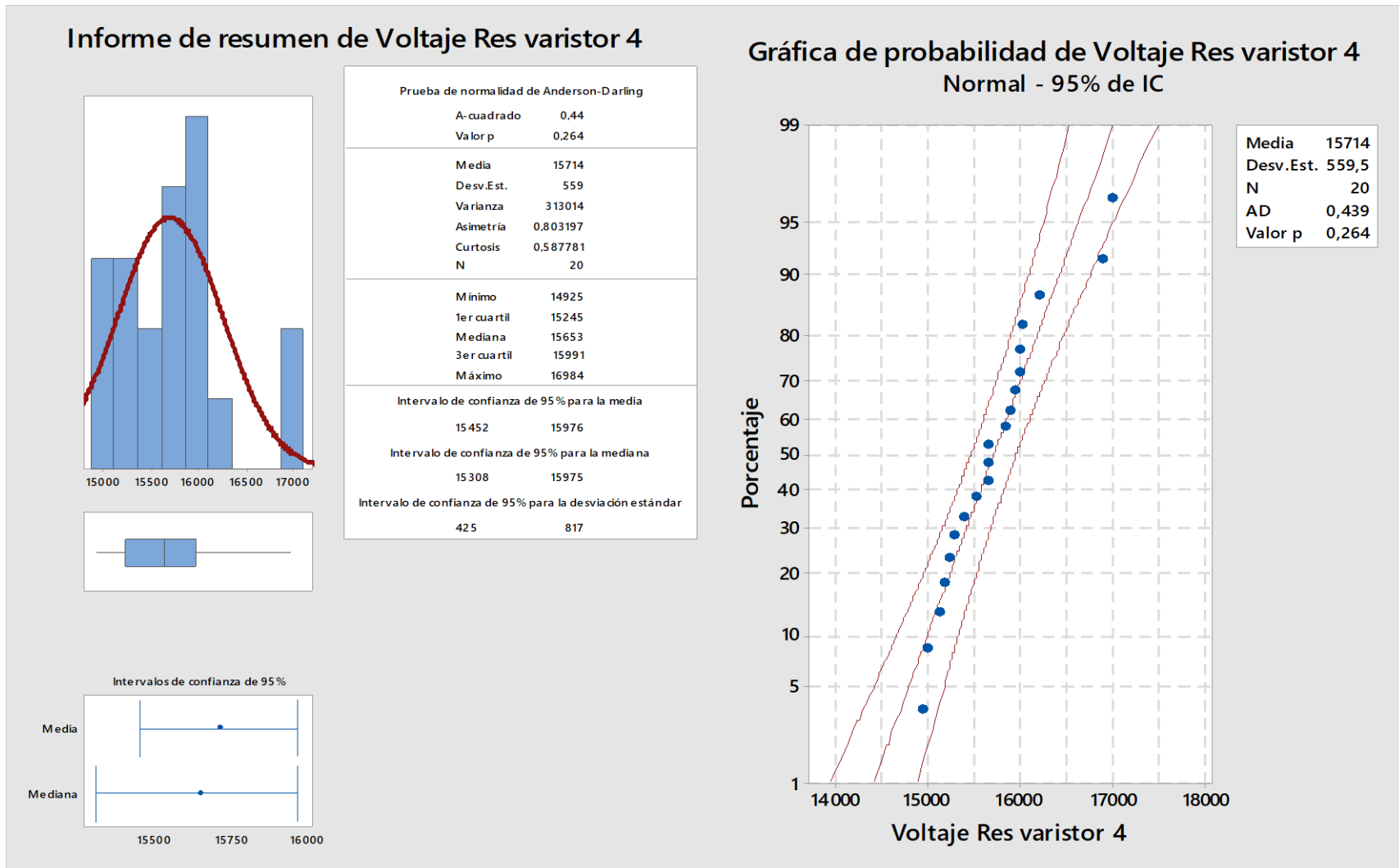


Figura D-4: Verificación del comportamiento normal de los datos de tensión residual del varistor de ZnO cinco.

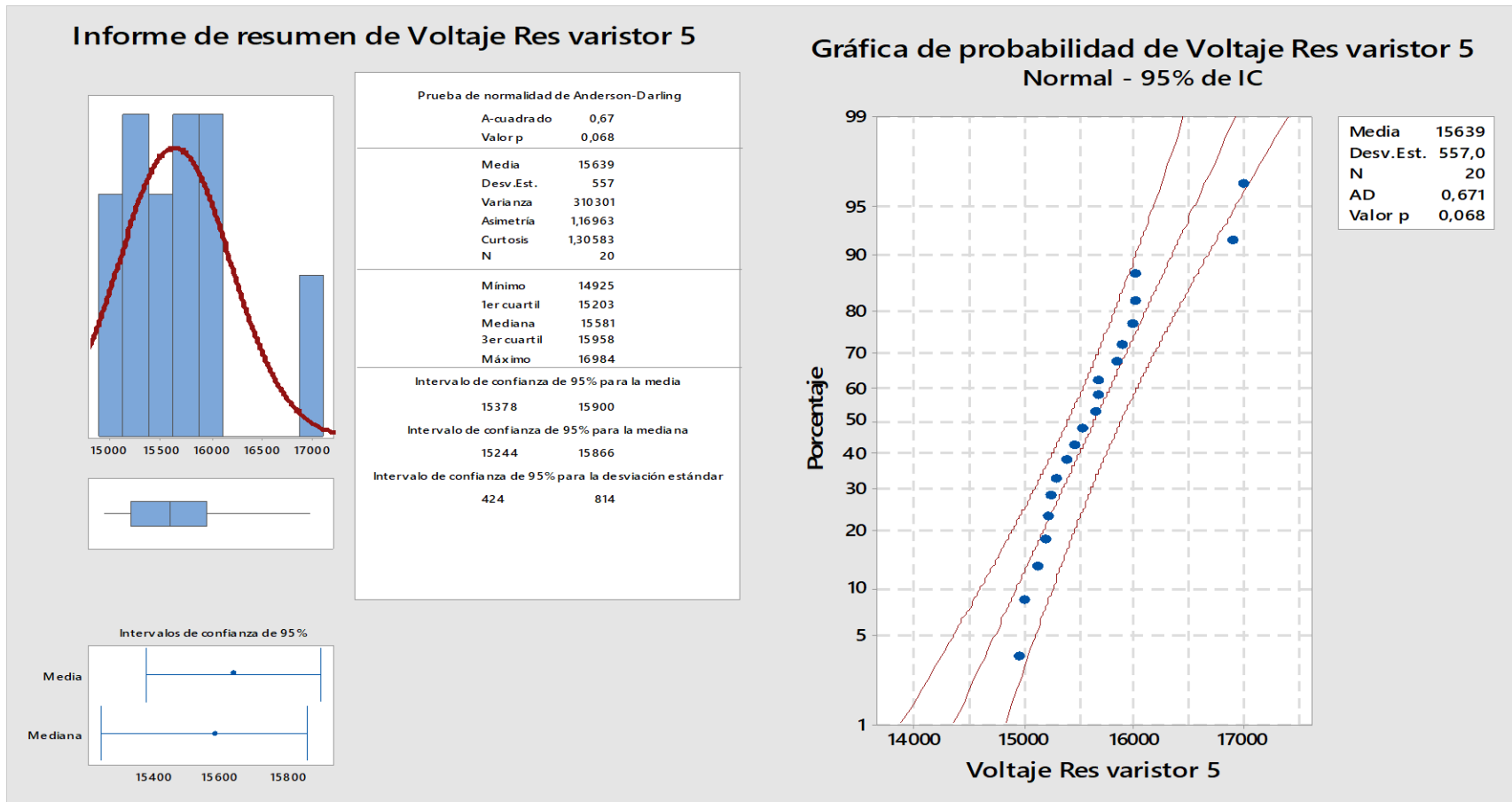


Tabla D-1: Datos experimentales del varistor número cuatro con relación a la tensión residual y la corriente de descarga.

AAAA	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

BBB	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

CCC	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

DDD	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

EEE	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

FFF	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
Voltaje	18.72680	18.67610	13.65580	16.00100	9.60067
Corriente	7.48400	8.26633	6.62857	4.52229	5.46069
DATA 005					
Voltaje	18.67830	18.67830	12.80420	15.88100	10.23430
Corriente	7.81119	8.32517	6.78322	4.65385	5.46154
DATA 006					
Voltaje	18.30830	17.20860	11.45680	15.43230	9.59586
Corriente	7.31203	7.73496	5.28195	4.01316	5.62030
DATA 007					
Voltaje	17.50870	18.44290	12.29240	15.32870	9.10035
Corriente	7.07612	7.15398	6.45329	4.27336	4.81834
DATA 008					
Voltaje	18.96640	17.37630	12.44700	16.10420	9.50530
Corriente	7.27915	6.72261	4.25795	3.86402	4.49647
DATA 026					
Voltaje	19.14450	20.62790	15.39700	16.95850	13.75750
Corriente	8.37043	9.93189	7.43355	5.40365	5.87209
DATA 027					
Voltaje	16.88040	17.73920	11.80560	14.61630	14.06980
Corriente	6.26246	7.82392	5.95017	4.46678	4.70100
DATA 028					
Voltaje	17.19270	18.60470	11.29570	13.53820	11.46180
Corriente	6.47841	8.30565	4.98339	3.57143	4.06977
DATA 029					
Voltaje	18.51060	19.62770	14.34040	16.27660	13.07450
Corriente	7.26596	9.20213	6.89362	3.98936	5.62766
DATA 030					
Voltaje	18.41800	20.17580	13.67190	15.25390	15.25390
Corriente	7.69531	10.15630	6.99219	4.00391	4.88281
DATA 031					
Voltaje	17.63990	18.86330	14.11330	15.25260	12.05840
Corriente	7.00446	7.81866	6.17806	4.04771	4.61719
DATA 032					
Voltaje	18.63880	19.83990	13.75440	15.03560	13.03380
Corriente	6.54804	8.46975	5.82740	3.82562	4.38612
DATA 033					
Voltaje	18.44500	19.34550	13.61820	15.58180	12.71820
Corriente	6.99091	8.05455	5.84545	3.55455	4.37273
DATA 034					
Voltaje	18.54320	19.35250	14.09170	15.79140	12.71580
Corriente	7.45504	8.50719	7.45504	4.29856	5.51259

Bibliografía

- [1] E. Kazuo, "Zinc Oxide Varistors," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 5, no. 6, pp. 28–30, 1989.
- [2] D. B. Pawelek *et al.*, "Design of compact transmission line transformer for high voltage nanosecond pulses," *Conf. Rec. Int. Power Modul. Symp. High Volt. Work.*, pp. 522–525, 2006.
- [3] H. Zhou, *Advanced Topics in Science and Technology in China Ultra-high Voltage AC / DC Power Transmission*. .
- [4] V. Vita, A. D. Mitropoulou, L. Ekonomou, S. Panetsos, and I. A. Stathopoulos, "Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on high-voltage transmission lines of the Hellenic network," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 7, p. 846, 2010.
- [5] G. R. S. Lira, L. A. M. M. Nobrega, L. V Gomes, and E. G. Costa, "Performance Evaluation of Mosa Models Against Lightning Discharges," pp. 154–159, 2011.
- [6] G. D. Peppas, I. A. Naxakis, C. T. Vitsas, and E. C. Pyrgioti, "Surge arresters models for fast transients," *2012 31st Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2012*, no. 2, 2012.
- [7] M. Karbalaye Zadeh, H. Abniki, and A. A. Shayegani Akmal, "The modeling of metal-oxide surge arrester applied to improve surge protection," *PEITS 2009 - 2009 2nd Conf. Power Electron. Intell. Transp. Syst.*, vol. 1, pp. 238–243, 2009.
- [8] M. C. Magro, M. Giannettoni, and P. Pinceti, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1692–1695, 2004.
- [9] M. Matsuoka, "Related content Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics," *Jpn.*

- J. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 6, 1971.
- [10] M. Reza, "Metal Oxide ZnO-Based Varistor Ceramics," *Intech open*, vol. 2, p. 64, 2018.
- [11] J. He, *Metal oxide varistors_ from microstructure to macro-characteristics*. Chennai, India: Wiley-VCH, 2019.
- [12] M. R. Meshkatoddini, "Metal Oxide ZnO-Based Varistor Ceramics," *Adv. Ceram. - Electr. Magn. Ceram. Bioceram. Ceram. Environ.*, pp. 329–356, 2011.
- [13] S. C. Pillai, J. M. Kelly, R. Ramesh, and D. E. McCormack, "Advances in the synthesis of ZnO nanomaterials for varistor devices," *J. Mater. Chem. C*, vol. 1, no. 20, pp. 3268–3281, 2013.
- [14] G. E. Pike and C. H. Seager, "The dc voltage dependence of semiconductor grain-boundary resistance," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 5, pp. 3414–3422, 1979.
- [15] V. S. Brito, G. R. S. Lira, E. G. Costa, and M. J. A. Maia, "A Wide-Range Model for Metal-Oxide Surge Arrester," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 1, pp. 102–109, 2018.
- [16] F. Fernández and R. Díaz, "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations," pp. 0–4, 2001.
- [17] X. Lin, J. Wang, and J. Xu, "High frequency model of metal-oxide surge arrester for researching on VFTO," *2011 1st Int. Conf. Electr. Power Equip. - Switch. Technol. ICEPE2011 - Proc.*, no. 201102169, pp. 577–581, 2011.
- [18] K. Raju and V. Prasad, "Modelling and validation of metal oxide surge arrester for very fast transients," vol. 3, pp. 147–153, 2018.
- [19] D. Povh *et al.*, "Modeling and analysis guidelines for very fast transients," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 16, no. 10, p. 71, 1996.
- [20] J. R. A. Hileman, "Metal oxide surge arrester in ac systems -part v: proteccion performance of metal oxide surge arrester," *Electra*, vol. 133, pp. 132–143, 1990.
- [21] S. Tominaga, K. Azumi, T. Nagai, M. Imataki, and H. Kuwahara, "Reliability and

- Application of Metal Oxide Surge Arresters for Power Systems,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 805–816, 2007.
- [22] EMTP Newsletter, “The Choice of EMTP Surge Arrester Models,” in *EMTP Newsletter*, 1987.
- [23] R. A. Jones *et al.*, “Modeling of Metal Oxide Surge Arresters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, pp. 302–309, 1992.
- [24] M. Giannettoni and P. Pinceti, “A simplified model for zinc oxide surge arresters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 393–398, 1999.
- [25] I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, and M. Kobayashi, “Study of ZnO arrester model for steep front wave,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 2, pp. 834–839, 1996.
- [26] R. Kannadasan, P. Valsalal, and R. Jayavel, “Performance improvement of metal-oxide arrester for VFTs,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 438–444, 2017.
- [27] K. Raju and V. Prasad, “Modelling and validation of metal oxide surge arrester for very fast transients,” *High Volt.*, vol. 3, no. 2, pp. 147–153, 2018.
- [28] K. Aodsup and T. Kulworawanichpong, “Numerical modeling and very-fast transient simulation of MOV surge arresters,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1000–1003, 2012.
- [29] Donald. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices*, vol. 9, no. 5. 2006.
- [30] R. B. Adler, A. C. Smith, and R. L. Longini, *Introduccion a la fisica de los semiconductores*, 1st ed. Barcelona: Editorial Reverté S.A., 1981.
- [31] J. Woodworth, “Understanding Arrester Voltage-Current Characteristic Curves,” no. March, pp. 1–6, 2017.
- [32] Q. He, Z. Hao, and J. Guo, “Research of VFTO in 110kV minimized GIS,” *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. DRPT 2015*, pp. 1786–1789, 2016.

-
- [33] W. Yiru, C. Guang, and Z. Hao, "Study on VFTO in UHV GIS substation," *DRPT 2011 - 2011 4th Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol.*, pp. 1756–1759, 2011.
- [34] L. Zhao, L. Ye, S. Wang, Y. Yang, P. Jiang, and X. Zou, "Research on Very Fast Transient Overvoltage during Switching of Disconnecter in 550kV GIS," *2018 IEEE 3rd Int. Conf. Integr. Circuits Microsystems, ICICM 2018*, pp. 114–118, 2018.
- [35] M. Stosur, M. Szewczyk, W. Piasecki, M. Florkowski, and M. Fulczyk, "GIS disconnecter switching operation VFTO study," *Proc. - Int. Symp. Mod. Electr. Power Syst. MEPS'10*, pp. 1–5, 2010.
- [36] S. Rahmani and A. A. Razi-Kazemi, "Investigation of very fast transient over voltages in gas insulated substations," *Conf. Proc. 2015 2nd Int. Conf. Knowledge-Based Eng. Innov. KBEI 2015*, pp. 428–435, 2016.
- [37] IEC, "International standar IEC 71-1," in *Part 1: Definitions, principles and rules*, 2006.
- [38] J. Wada, G. Ueta, and S. Okabe, "Evaluation of breakdown characteristics of CO₂ gas for non-standard lightning impulse waveforms - Breakdown characteristics in the presence of bias voltages under non-uniform electric field," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 1, pp. 112–121, 2013.
- [39] Y. Li, Y. Shang, L. Zhang, R. Shi, and W. Shi, "Analysis of very fast transient overvoltages (VFTO) from onsite measurements on 800 kV GIS," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 2102–2110, 2012.
- [40] J. Lin, J. Zhang, and J. Yang, "HIGH-VOLTAGE PULSE GENERATOR BASED ON MAGNETIC PULSE COMPRESSION AND TRANSMISSION LINE TRANSFORMER," pp. 3–6, 2013.
- [41] R. A. Almenweer, S. Yixin, and W. Xixiu, "Research on the fitting method to describe the mathematical expression of VFTO in GIS," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 2053–2057, 2019.
- [42] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. 2004.

- [43] O. Tumova, L. Kupka, and P. Netolicky, "Design of Experiments approach and its application in the evaluation of experiments," *2018 Int. Conf. Diagnostics Electr. Eng. Diagnostika 2018*, pp. 1–4, 2018.
- [44] E. Ag, "SIOV metal oxide varistors Calculation examples," *Energy*, no. December 2007, 2008.
- [45] M. Fors, "Análisis de varianza," *Rev. Chil. Anest.*, vol. 43, no. 4, pp. 306–310, 2014.
- [46] J. y J. Bakieva, M., González Such, "Las medias poblacionales son iguales," 2015.
- [47] M. A. Abd-Allah, A. Said, and E. A. Badran, "New techniques for disconnector switching VFT mitigation in GIS," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 179–192, 2014.
- [48] K. Usha and M. Z. Ameena, "Suppression of VFTO and VFTC in GIS using Ferrite Rings," vol. 4, no. 8, pp. 853–864, 2011.