



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**MODELADO DE UN GENERADOR MULTI-IMPULSO PARA ENSAYOS
DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

AUTORES:

Freddy Rene Aucatoma Quishpe

Cristian Javier Cuji Miniguano

TUTOR:

Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo, Mgr.

LATACUNGA, AGOSTO, 2025

Latacunga, 25 julio del 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Aucatoma Quishpe Freddy Rene, con cédula de ciudadanía No. 0250163235, **Cuji Miniguano Cristian Javier**, con cédula de ciudadanía No. 1804531117, declaramos ser autores del presente Proyecto de titulación “**MODELADO DE UN GENERADOR MULTI-IMPULSO PARA ENSAYOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**”, siendo el Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo, Mgtr, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.



Freddy Rene Aucatoma Quishpe

C.C: 0250163235



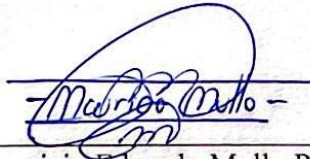
Cristian Javier Cuji Miniguano

C.C: 1804531117

Latacunga, 25 de julio de 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“MODELADO DE UN GENERADOR MULTI-IMPULSO PARA ENSAYOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA”**, propuesto por los estudiantes **Aucatoma Quishpe Freddy Rene, Cuji Miniguano Cristian Javier**, de la Carrera de Electricidad, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo, Mgtr.

C.C. 0503755183

TUTOR

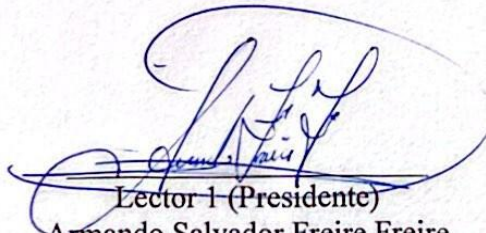
Latacunga, 29 de julio de 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

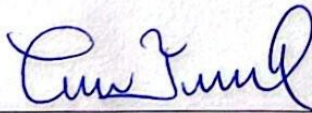
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título "MODELADO DE UN GENERADOR MULTI-IMPULSO PARA ENSAYOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA", propuesto por los estudiantes Aucatoma Quishpe Freddy Rene, Cuji Miniguanu Cristian Javier de la Carrera de Ingeniería en Electricidad, me permito indicar que los estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad Proyecto de Investigación en virtud de lo cual los postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,



Lector 1 (Presidente)
Armando Salvador Freire Freire
CC:0503842833



Lector 2
Carlos Iván Quinatoa Caiza
CC:0503287864



Lector 3
Walter Paul Rueda Flores
CC:0503689895

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo cariño a mis familiares y seres queridos, quienes han sido el pilar fundamental en cada paso. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su confianza en mí han sido el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Especialmente a mi mamá Zoila Pragcedes, por su sabiduría, fortaleza y ejemplo de vida, que me han inspirado a no rendirme y a luchar por cada uno de mis sueños.

Freddy Aucatoma

Dedico este logro a mis padres, Ricardo Cuji y Rosario Miniguano, por ser la base de mi vida, por su amor incondicional, sus consejos sinceros y su ejemplo de esfuerzo y humildad. A ustedes, que nunca soltaron mi mano y creyeron en mí incluso en los momentos más difíciles, por darme fuerza en la adversidad y llenar mi camino de fe y esperanza. Cada página de esta tesis lleva un pedazo de ustedes, de sus sacrificios, oraciones y sueños compartidos. Esta meta es tan suya como mía.

Cristian Cuji

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	4
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	5
2.3.1. Objetivo de Investigación	5
2.3.2. Campo de acción	5
2.4. BENEFICIARIOS	5
2.4.1. Directo	6
2.4.2. Indirecto	6
2.5. JUSTIFICACIÓN	6
2.6. OBJETIVOS	7
2.6.1. General	7
2.6.2. Específicos	7
2.6.3. Sistema de actividades	7
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	9
3.1. Antecedentes	9
3.2. Impulsos de tensión	9
3.3. Impulsos tipo rayo y tipo maniobra	11
3.4. Circuito para producir impulsos de rayos	13
3.4.1. Circuito impulsos de rayos	14
3.4.2. Circuito R-C para la generación de impulsos	14
3.4.3. Circuito R-L-C para la generación de impulsos	15
3.5. Generador de impulsos	16
3.6. Los elementos del circuito generador	18
3.7. Características de un generador de impulso multietapas	19

3.8.	Generador de impulso de tensión multietapa o tipo Marx	22
3.9.	El principio de funcionamiento del generador de Marx	23
3.10.	Normativas y estándares internacionales para ensayos de impulso en transformadores de potencia	25
3.11.	Modelado y simulación de generadores de impulso mediante software	26
3.12.	Impulso negativo	28
3.12.1.	Importancia del impulso negativo en pruebas de transformadores de potencia	28
3.12.2.	Generación de impulsos negativos	29
3.13.	Transformadores de potencia	29
3.13.1.	Definición y función general	29
3.13.2.	Estructura y componentes principales	30
3.13.3.	Clasificación	30
4.	METODOLOGÍA	32
4.1.	Diagrama de flujo del sistema	32
4.2.	Diseño metodológico	33
4.3.	Revisión del estado del arte y parámetros técnicos	34
4.4.	Modelado del generador en ATPDraw	35
4.5.	Cálculos fundamentales para el modelado.....	36
4.5.1.	Energía almacenada en el generador.....	36
4.5.2.	Energía almacenada en función del número de etapas.....	37
4.5.3.	Cálculo del voltaje de salida.....	38
4.5.4.	Configuración de las resistencias de control de la onda.....	39
4.5.5.	Cálculos manuales de los elementos eléctricos del generador de impulso para una etapa.....	39
4.6.	Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión	41
4.7.	Onda de impulso tipo rayo 1.2/50 μ s.....	42
4.8.	Etapas del modelado en ATPDraw	43
4.8.1.	Preparación del entorno de simulación	44
4.8.2.	Rediseño del circuito del generador de Marx.....	44
4.8.3.	Configuración de los parámetros eléctricos en ATPDraw	45
4.9.	Ejecución de la simulación en ATPDraw	45
4.10.	Análisis de resultados y optimización del modelo.....	45
4.10.1.	Evaluación de la variación de tensión de carga.....	46
4.10.2.	Validación del modelo y análisis de resultados	46

4.10.3.	Comparación de la onda generada con la forma de onda normativa	46
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
5.1.	Modelo del generador multi impulso realizado en ATPDraw	47
5.2.	Validación de la onda de impulso generada	49
5.2.1.	Comparación con la forma de onda normativa IEC 60076-3.....	49
5.2.2.	Presentación de la gráfica de la onda generada en ATPDraw.....	49
5.2.3.	Comparación de los tiempos de frente T1 y cola T2 con los valores normativos.	51
5.3.	Análisis de desviaciones y justificación de posibles diferencias	53
5.4.	Evaluación de la energía almacenada y entregada.....	54
5.5.	Análisis de la relación entre el nivel de tensión y la energía disponible	55
5.6.	Análisis de estabilidad y comportamiento del generador multi-impulso	55
5.6.1.	Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión.....	55
5.7.	Impacto del ajuste de resistencias en la precisión de la onda generada.....	58
5.7.1.	Evaluación de cómo los valores de R1 y R2 afectan el tiempo de frente y cola...58	
5.8.	Generador multi-impulsos onda de impulso negativo	59
5.9.	Evaluación de la mejora en la reducción del error en comparación con la simulación inicial	61
5.10.	Comparación final de los modelos mediante el software de programación Python.	66
5.11.	Características transformadoras de potencia y niveles de aislamiento requeridos ...	68
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
6.1.	CONCLUSIONES.....	69
6.2.	RECOMENDACIONES	71
7.	REFERENCIAS	72
8.	ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impulso tipo rayo.	12
Figura 2. Impulso tipo maniobra.	13
Figura 3. Onda de impulso y sus componentes como doble exponencial.	14
Figura 4. Circuito R-C para la generación de impulsos de tipo rayo con forma de onda doble exponencial.	15
Figura 5. Circuito RLC en serie para la generación de impulsos de rayo en condición de sobre amortiguamiento.	16
Figura 6. Circuitos generadores tipo “A” y tipo “B” de impulso atmosférico.	18
Figura 7. Impulso de rayo completo sin oscilaciones ni sobre impulsos.	22
Figura 8. Diseño del generador de Marx..	23
Figura 9. Impulso negativo.	29
Figura 10. Modelo de un transformador	30
Figura 11. Diagrama de flujo del sistema del modelado.	32
Figura 12. Energía almacenada en función del número de etapas.	38
Figura 13. Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión.	42
Figura 14. Variación onda de impulso tipo rayo 1.2/50 μ s.	42
Figura 15. Modelado del generador Marx en ATPDraw.	48
Figura 16. Forma de onda de impulso normalizada tipo 1.2/50 μ s según IEC 60076-3.	49
Figura 17. Forma de onda de impulso mediante simulación en ATPDraw, con tiempo de frente de 1,203.	50
Figura 18. Forma de onda de impulso simulada en ATPdraw con un tiempo de cola de 50,1 us	50
Figura 19. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 50 kV.	56
Figura 20. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 100 kV.	56
Figura 21. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 150 kV.	57

Figura 22. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 200 kV.	57
Figura 23. Respuesta transitoria de generador tipo Marx ante impulso negativo T1 1,207 us.	60
Figura 24. Respuesta transitoria de generador tipo Marx ante impulso negativo T2 50,1 us. .	61
Figura 25. Análisis de la respuesta de voltaje frente a un impulso de alta tensión para T1.	62
Figura 26. Análisis de la respuesta de voltaje frente a un impulso de alta tensión para T2.	62
Figura 27. Simulación del caso A tiempo de frente T1	63
Figura 28. Simulación del caso A tiempo de cola T2.....	63
Figura 29. Simulación del caso B tiempo de frente T1	64
Figura 30. Simulación del caso B T2	64
Figura 31. Simulación de la onda en ATPdraw T1	65
Figura 32. Simulación de la onda en ATPdraw T2	66
Figura 33. Ajuste óptimo de generador de impulsos basado en modelo multi-impulso onda 1,2/50 μ s.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área de conocimiento UNESCO.....	1
Tabla 2. Sistema de tareas	7
Tabla 3. Parámetros base normativos.....	10
Tabla 4. Tensiones soportadas estándar.	31
Tabla 5. Modelado de impulsó tipo rayo según la normativa IEC 60076-3.....	35
Tabla 6: Funciones técnicas detalladas de los componentes del circuito de impulso.	36
Tabla 7. Comparación entre parámetros teóricos y simulados de la onda de impulso.....	43
Tabla 8. Fases del modelado y simulación del generador de impulsos.....	43
Tabla 9. Datos establecidos para la simulación.....	51
Tabla 10. Comparación de modelos de impulso.....	54
Tabla 11. Valores calculados de voltaje frente a energía.	54
Tabla 12. Relación entre tensión de carga y energía almacenada.	55
Tabla 13. Comparación de parámetros en modelos de generadores de impulso.....	59
Tabla 14. Valores de transformadores de potencia.....	68

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “MODELADO DE UN GENERADOR MULTI-IMPULSO PARA ENSAYOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA”

Autores:

Freddy Rene Aucatoma Quishpe

Cristian Javier Cuji Miniguano

RESUMEN

Este estudio presenta el modelado de un generador multi-impulso para ensayos de transformadores de potencia en el cual se desarrollan pruebas de impulso que permiten simular condiciones de sobretensión para verificar el comportamiento ante eventos extremos como descargas tipo rayo y maniobras de conmutación. Se desarrollo un modelo computacional en el software ATPDraw, basado en la configuración clásica del circuito tipo Marx, que permite realizar ensayos dieléctricos de forma eficiente y conforme a la normativa IEC 60076-3. Se empleó una metodología de tipo experimental, basada en simulaciones numéricas y validación de parámetros técnicos, estructurada en tres fases: revisión bibliográfica, modelado del generador en ATPDraw y análisis comparativo de resultados. El modelo se configuró con siete etapas en donde se realizaron las simulaciones con voltajes de entrada de 50 a 200 kV y una capacidad de almacenamiento energético de 1250 Joules a 20000 Joules. Además, se implementó un algoritmo en lenguaje Python para automatizar el cálculo de los valores eléctricos más relevantes, como la capacitancia, la resistencia de frente y cola. Los tiempos simulados de frente 1,203 μs y cola 50,1 μs cumplieron con los márgenes normativos, y se incorporó un impulso negativo para representar condiciones reales de sobretensión inversa. Los resultados evidenciaron una alta precisión del 97,8% en la forma de la onda generada, optimizando el tiempo de calibración y reduciendo el riesgo de daño a los equipos durante las pruebas. Finalmente, se proponen líneas de mejora y automatización del proceso para su futura implementación industrial.

Palabras Clave: Generador, impulso, transformador, simulación, ATPDraw.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

FACULTY ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TOPIC: “MODELING OF A MULTI-PULSE GENERATOR FOR POWER TRANSFORMER TESTS”

Authors:

Freddy Rene Aucatoma Quishpe

Cristian Javier Cuji Miniguano

ABSTRACT

This study presents the modeling of a multi-impulse generator for power transformer testing, in which impulse tests are developed to simulate overvoltage conditions in order to verify behavior under extreme events such as lightning strikes and switching maneuvers. A computational model was developed using ATPDraw software, based on the classic Marx circuit configuration, allowing for efficient dielectric testing in accordance with IEC 60076-3 standards. An experimental methodology was employed, based on numerical simulations and validation of technical parameters, structured in three phases: literature review, generator modeling in ATPDraw, and comparative analysis of results. The model was configured with seven stages, where simulations were conducted with input voltages ranging from 50 to 200 kV and an energy storage capacity of 1250 Joules to 20000 Joules. Additionally, an algorithm was implemented in Python to automate the calculation of the most relevant electrical values, such as capacitance, front and tail resistance. The simulated front time of 1.203 μs and tail time of 50.1 μs met regulatory margins, and a negative impulse was incorporated to represent real reverse overvoltage conditions. The results demonstrated a high accuracy of 97.8% in the shape of the generated waveform, optimizing calibration time and reducing the risk of damage to equipment during testing. Finally, lines for improvement and automation of the process are proposed for future industrial implementation.

Keywords: Generator, impulse, transformer, simulation, ATPDraw.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Modelado de un generador multi-impulso para ensayos de transformadores de potencia

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Exámen de indicadores de RDA		

Trabajo de titulación vinculado al proyecto: Estrategias de planeación de sistemas eléctricos en el contexto de la transición energética.

Equipo de Trabajo:

Estudiantes: Freddy Rene Aucatoma Quishpe y Cristian Javier Cuji Miniguano

Tutor: Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo, Mgtr.

Área de Conocimiento:

Tabla 1. Área de conocimiento UNESCO

07 Ingeniería, Industria y Construcción	071 Ingeniería y Profesiones Afines	0712 Tecnología de protección de medio ambiente
		0713 Electricidad y energía
		0714 Electrónica y automatización

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera: Automatización, control y protección de sistemas eléctricos en el sector productivo y los servicios.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia constituyen la base del desarrollo industrial y tecnológico a escala global, el crecimiento acelerado de la demanda energética, la expansión de redes interconectadas y la necesidad de garantizar continuidad en el suministro eléctrico han impulsado la adaptación de mecanismos más robustos para la evaluación de equipos. Los transformadores de potencia se destacan como elementos esenciales para el cambio de niveles de tensión en los procesos de transmisión y distribución por ende su operación debe mantenerse dentro de márgenes técnicos rigurosos, ya que están sometidos a perturbaciones severas como descargas atmosféricas y maniobras de red, que pueden comprometer su aislamiento interno y causar sobrevoltajes de gran magnitud. Para anticiparse a estos eventos y verificar el comportamiento de estos equipos frente a sobretensiones, se aplican las denominadas pruebas de impulso, las cuales están normadas internacionalmente por estándares como la IEC 60076-3 y la IEEE Std C57.98[1].

En los países desarrollados, estas pruebas están establecidas con procedimientos técnicos para justificar el diseño dieléctrico de un transformador de aislamiento antes de ser puesta en servicio. Para ello, se utilizan generadores de impulsos especializados para generar ondas transitorias estandarizadas y observar la respuesta del transformador en las condiciones más críticas del equipo. Su uso puede mejorarse mediante herramientas de simulación como ATPDraw, que permita modelar el circuito de prueba, ajustar los parámetros eléctricos y validar el comportamiento de la forma de onda, sin la necesidad de pruebas físicas previas, tanto por tiempo y costo, como por riesgos.

En el ámbito latinoamericano, los sistemas eléctricos enfrentan desafíos estructurales que limitan la implementación plena de estas metodologías. Informes de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) advierten sobre pérdidas técnicas promedio del 12% en redes de transmisión y distribución[2]. Adicionalmente, el 30% de la vida útil de los transformadores de alta tensión puede verse reducida por deterioro del aislamiento interno causado por envejecimiento, sobrecarga y ausencia de pruebas preventivas adecuadas. En países como Brasil, México o Argentina, se ha reportado que las fallas en transformadores de potencia representan hasta el 25% de los costos totales de mantenimiento en sistemas de transmisión estas cifras reflejan una necesidad urgente de adoptar tecnologías que permitan mejorar la evaluación técnica de estos equipos antes de su operación continua en la red[3].

En Ecuador, el sistema eléctrico nacional depende ampliamente de los transformadores de potencia que operan bajo condiciones severas. Según información del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, hay más de 2.500 transformadores en operación, de los cuales el 15% presenta problemas debido al calentamiento excesivo, fallos en el aislamiento o envejecimiento[4]. Por otro lado, los registros de la Agencia de Regulación y Control de Energía (ARCERNR) indican que alrededor del 40% de todas las interrupciones ocurren en subestaciones eléctricas debido a fallos de transformadores que impactan directamente en la calidad del servicio a nivel residencial, comercial e industrial[5]. Estas interrupciones tienen un alto costo económico, requiriendo reparaciones de hasta un millón de dólares por unidad, así como costos adicionales debido a la operatividad comprometida del sistema eléctrico conectado. Estas fallas no solo conllevan un alto costo económico con reparaciones que pueden oscilar entre USD 200.000 y USD 1.000.000 por equipo, debido a la operatividad comprometida del sistema eléctrico conectado[6].

A nivel local, empresas como ECUATRAN, con sede en el cantón de Ambato provincia de Tungurahua, fabrican y prueban transformadores de potencia para el sistema eléctrico nacional. Se especializan en el desarrollo, construcción y prueba de transformadores de media y alta tensión, bajo los parámetros establecidos por normas internacionales. Estas organizaciones enfrentan el reto de incorporar herramientas de simulación que les permitan maximizar las pruebas de impulso, hacer que los tiempos de calibración sean más rápidos y obtener resultados más precisos sin ningún riesgo en la seguridad de la operación[7].

En este entorno, muchas de las pruebas dieléctricas aún se ejecutan de manera manual especialmente el ajuste de las resistencias de frente y de cola en generadores de impulso convencionales, este procedimiento implica un proceso iterativo de prueba y error que puede prolongarse por varios días hasta lograr los tiempos de onda normativos requeridos, esta práctica no solo requiere mano de obra especializada y materiales, sino que también incrementa la probabilidad de errores de configuración o daños al equipo bajo prueba [8]. Un factor adicional que debe considerarse es que las normas técnicas exigen tolerancias muy específicas en las formas de onda generadas. Según la IEC 60060-1, los tiempos de frente y cola para el impulso tipo rayo deben mantenerse dentro de $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$, respecto a sus valores nominales. Lograr estas tolerancias de forma manual es complejo especialmente cuando el generador de impulso está compuesto por múltiples etapas con interacciones no lineales entre resistencias, capacitores y bobinas de carga. En este sentido, contar con una herramienta de simulación que

permita ajustar virtualmente estos parámetros antes del ensayo físico se vuelve fundamental para asegurar la calidad del resultado[8].

El presente trabajo tiene como finalidad desarrollar un modelo computacional de un generador tipo Marx, utilizando el software especializado ATPDraw. Este modelo permitirá simular ondas de impulso del tipo rayo 1,2/50 μ s ajustándose a los parámetros definidos en las normas internacionales[8]. Asimismo, se contempla la incorporación de un algoritmo complementario, programado en lenguaje Python, que facilite el cálculo automático de los parámetros eléctricos más relevantes del circuito, como capacitancias, resistencias de frente y cola, y voltajes de carga por etapa. De este modo, se busca reducir significativamente el tiempo de ajuste manual, disminuir la probabilidad de fallas durante el proceso de ensayo y minimizar los riesgos eléctricos que podrían comprometer la integridad del transformador.

El modelo también permitirá simular impulsos de polaridad negativa, ya que esta forma de señal permite representar con mayor precisión las condiciones relacionadas con las perturbaciones a las que los transformadores de potencia están sometidos durante eventos extremos, estos impulsos pueden ser creados por descargas atmosféricas de polaridad invertida, fallos internos en los devanados o ciertas operaciones de conmutación de la red. Al incluir esta polaridad en la simulación permite estudiar el comportamiento del aislamiento bajo voltaje inverso, lo que mejora la precisión del modelo, una mejor comprensión en el diseño dieléctrico del equipo.

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En el proceso de fabricación y control de calidad de transformadores de potencia, uno de los ensayos más determinantes es las pruebas de impulso, utilizada para verificar la capacidad del equipo frente a sobretensiones transitorias como descargas atmosféricas o maniobras. Estas perturbaciones pueden comprometer el aislamiento interno del transformador y generar fallas operativas si no se evalúan correctamente. Las normas como la IEEE Std C57.98 y la IEC 60076-3 establecen los parámetros técnicos que deben cumplir estas pruebas, incluyendo tiempos de frente y cola, amplitud de la onda e intervalo entre impulsos. Sin embargo, muchas empresas enfrentan dificultades al momento de verificar la precisión en los ensayos, debido a que no cuentan con modelos computacionales que les permitan predecir el comportamiento del generador de impulso antes de la prueba física.

Como resultado, los ajustes se realizan manualmente, lo que incrementa el tiempo de configuración, los riesgos operativos y la posibilidad de errores. Por tanto, se vuelve necesario

desarrollar un modelo de simulación que facilite el diseño de la prueba, optimice los parámetros del generador y permita verificar que el transformador mantenga su funcionamiento sin afectaciones después del ensayo.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los tiempos de ajuste en simulaciones de impulso pueden extenderse por horas o días, debido a la necesidad de calibrar manualmente las resistencias de frente R_1 y de cola R_2 . Este proceso lento y propenso a errores impide cumplir parámetros normativos y puede ocasionar fallas o daños en el equipo.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objetivo de Investigación

Modelar un generador multi-impulso para pruebas de transformadores.

2.3.2. Campo de acción

El proyecto se aplicará en la rama de la ingeniería eléctrica, en el área de pruebas de alta tensión, más específicamente en la simulación y análisis de generadores de impulsos para pruebas de transformadores de potencia. Su desarrollo está orientado hacia el uso práctico en laboratorios de pruebas, institutos de investigación y establecimientos industriales, donde se requiere validar el comportamiento dieléctrico de los transformadores bajo sobretensiones. La orientación técnica surge a través del uso de modelos computacionales a partir de los cuales podemos ajustar parámetros críticos como la resistencia y la capacitancia. Esto permitirá mejorar la precisión de las pruebas, reducir errores y cumplir con normas internacionales aplicables al sector eléctrico.

2.4. BENEFICIARIOS

La implementación de un generador multi-impulso beneficiará a clientes, personal técnico, ingenieros de diseño y al sector energético, en general, a garantizar la calidad y confiabilidad de los transformadores de potencia fabricados por la empresa.

2.4.1. Directo

Empresas: Empresas distribuidoras o empresas que se dedican a realizar pruebas de transformadores de potencia por ejemplo Ecuatran S.A, Moretran e Industrias Eléctricas Rymel Ecuador.

Clientes: Residenciales, comerciales e industriales, quienes se beneficiarán al contar con transformadores seguros, eficientes y previamente validados para su uso en distintas aplicaciones eléctricas.

Ingenieros técnicos: Personal que se dedica a realizar estudios o investigaciones de transformadores de potencia como los ingenieros eléctricos bajo su área.

2.4.2. Indirecto

Estudiantes e investigadores que buscan estudiar el desarrollo de modelos de generadores de Multietapa.

2.5. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge a partir de la identificación de una limitación técnica en el proceso de pruebas de impulso en transformadores de potencia, la dificultad para ajustar con precisión y control los valores de la resistencia de frente R1 y de cola R2. Estas se regulan manualmente mediante procedimientos de prueba y error, lo que genera tiempos prolongados de horas o incluso días, mayores costos operativos y una mayor probabilidad de errores que pueden comprometer tanto la seguridad del personal técnico como la integridad de los equipos sometidos a ensayo. Además, no se dispone de herramientas de simulación ampliamente accesibles que permitan modelar de manera detallada un generador multi-impulso tipo Marx. La ausencia de plataformas que consideren variables como la energía almacenada por etapa, la distribución del voltaje entre capacitores y el efecto de las resistencias sobre la forma de la onda, limita la capacidad para verificar el cumplimiento de tolerancias normativas según lo establecido en la IEC 60076-3 y la IEEE Std C57.98, que exigen rigurosidad en los tiempos de frente $\pm 30\%$ y cola $\pm 20\%$. Se plantea desarrollar un modelo computacional del generador tipo Marx en el entorno de simulación ATPDraw, que permita anticipar el comportamiento de la onda bajo distintas configuraciones. La simulación incluirá el ajuste virtual de parámetros eléctricos, permitiendo cumplir los requisitos normativos, reducir tiempos, minimizar riesgos y

errores. Esto optimiza recursos, mejora la validación de transformadores y contribuye al fortalecimiento del sistema eléctrico nacional.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

- Desarrollar un modelo de generador de impulso en software ATPDraw para mejorar las pruebas de alto voltaje en los transformadores de potencia a fin de cumplir con estándares internacionales y nacionales en el sector eléctrico.

2.6.2. Específicos

- Realizar el estudio del arte sobre el impacto que tiene los generadores de multi-impulso en la calidad de los resultados de los ensayos de transformadores de potencia.
- Evaluar los parámetros técnicos que más influyen del generador multi-impulso al realizar ensayos en los transformadores de potencia.
- Modelar el circuito del generador multi-impulso en el software ATPDraw para optimizar los tiempos en realizar los ensayos en los transformadores de potencia.

2.6.3. Sistema de actividades

Tabla 2. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar el estudio del arte sobre el impacto que tiene los generadores de multi-impulso en la calidad de los resultados de los ensayos de transformadores de potencia.	Lectura de documentos normativos	Comprender la importancia del generador de impulso	Libro High Voltage Engineering
	Recolección de casos de estudio	Descubrir las mejores prácticas en la utilización de generadores de impulso	Normativa IEC 60076-3
	Comparación de tecnologías	Mejorar la calidad de los ensayos y promover la innovación en ensayos de transformadores	Normativa IEC 60076-3

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Evaluar los parámetros técnicos que más influyen del generador multi-impulso al realizar ensayos en los transformadores de potencia.	Recolección de datos empíricos	Identificar cuáles son los parámetros técnicos del generador de impulso que tienen mayor influencia en los resultados	Normativa IEC 60076-3
	Recolección de artículos científicos y publicaciones especializadas	Establecer configuraciones óptimas de los parámetros del generador	Artículos científicos, revistas especializadas.
	Identificación de parámetros técnicos	Desarrollar criterios de evaluación y protocolos de prueba basados en los resultados de la evaluación	Artículo: Simulador de impulsos de tensión normalizados
Modelar el circuito del generador multi-impulso en el software ATPDraw para optimizar los tiempos en realizar los ensayos en los transformadores de potencia.	Modificación del modelo en ATPDraw	Verificar la precisión del modelo del generador de impulso mediante la comparación de los resultados de la simulación	Software ATPDraw
	Simulación del circuito	Determinar la calidad de la forma de onda de los impulsos generados por el generador de impulso a través de la simulación	Software ATPDraw
	Comparación de resultados	Analizar los transitorios electromagnéticos producidos durante los ensayos de transformadores de potencia	Software ATPDraw

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La parte teórica de este proyecto consistirá en estudiar los conceptos básicos de los impulsos de voltaje y su aplicación para las pruebas de los transformadores de potencia. Se discutirán las propiedades de los impulsos tipo rayo haciendo una diferencia entre el tiempo y la carga al momento de realizar cierto modelado. También se discutirá el funcionamiento de los generadores de impulsos, su construcción, principio y uso en pruebas de verificación de la resistencia dieléctrica de los dispositivos eléctricos. También presentará las propiedades de los generadores de múltiples etapas, como el voltaje nominal, la capacitancia, la energía almacenada y el número de etapas, y sus efectos al realizar las respectivas pruebas de aislamiento de alto voltaje.

Finalmente, el modelo será comparado con las normativas y parámetros internacionales y la ejecución de estas pruebas para poder garantizar que los objetivos de calidad y seguridad del sector eléctrico sean cumplidos por el modelo.

3.1. Antecedentes

El esquema básico de los generadores de impulsos, fue originalmente propuesto por E. Marx en 1924, constituyendo hasta la actualidad, la manera más común de generar impulsos de alta tensión, para realizar aquellas pruebas en donde el nivel requerido, es mucho más alto que el disponible en la fuente base. Consiste en un cierto grupo de capacitores que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. La descarga de estos capacitores se realiza a través de espinterómetros de esferas, en un circuito serie que incluye resistencias amortiguadoras de las oscilaciones. La carga de los capacitores, y en consecuencia la tensión total del generador, dependerá de la tensión sobre el rectificador, y su polaridad, de la posición del mismo[9].

3.2. Impulsos de tensión

Los impulsos de voltaje son eventos de alta tensión de corta duración utilizados en pruebas de voltaje para determinar la resistencia dieléctrica y los parámetros eléctricos bajo circunstancias extremas. Estos casos de sobretensión son fenómenos reales que hacen que los transformadores de potencia sean inestables o no suficientemente confiables, como las descargas atmosféricas o la operación de conmutación del sistema eléctrico. Su análisis es extremadamente importante para el funcionamiento adecuado y seguro de los aparatos sometidos a sobretensiones[10].

Una activación eléctrica se caracteriza por su rápido aumento en el caso que exista un valor seguido de una caída en amplitud hasta que finalmente desaparece. El tamaño y la duración de esta sobretensión es fundamental en la determinación de la resistencia dieléctrica del objeto bajo prueba.

Este procedimiento, el tamaño de la sobretensión y la duración son los componentes clave utilizados para adaptar la resistencia dieléctrica del elemento de prueba. La prueba de impulsos se puede dividir en dos tipos principales de impulsos, a saber, impulso de rayo e impulso de conmutación, pero ambos tienen características que causan diferentes efectos en el equipo eléctrico [10].

En la Tabla 3 se nos dan los tiempos de impulso tipo rayo y las sobretensiones producidas incluso por descargas eléctricas extrañas durante cualquier descarga atmosférica, cuando entra en contacto con la línea de transmisión o el patio de la subestación. Tal causa se caracteriza por un rápido aumento hasta un valor máximo y luego disminuye rápidamente hasta un valor mínimo.

La resistencia de aislamiento de los transformadores debe examinarse para investigar qué resistencia son capaces de soportar los transformadores cuando están bajo condiciones extremas, y para probar sin dañar el diseño del transformador. Es posible realizar pruebas de laboratorio en condiciones similares a las condiciones reales de operación de la red, y, por lo tanto, el uso más importante de los valores tabulados.

Tabla 3. Parámetros base normativos.

Tipos de Impulsos	Tiempo de Frente	Tiempo de Cola	Usado para
Impulso tipo Rayo (1.2/50 μs)	1.2 μ s	50 μ s	Simula sobretensiones por descargas atmosféricas.
Impulso tipo Maniobra (250/2500 μs)	250 μ s	2500 μ s	Simula las sobretensiones por maniobras en sistemas eléctricos.

Un impulso de tipo maniobra es un cambio repentino de voltaje que ocurre por una variación brusca en la carga o por una falla transitoria en la red eléctrica, dependiendo de la zona donde se encuentre. A diferencia del impulso tipo rayo, el impulso de tipo maniobra tiene un tiempo de subida más lento, lo cual representa con mayor precisión los picos de voltaje transitorios que

se presentan durante maniobras en la red, como el cierre o apertura de interruptores. Estos impulsos son clave para evaluar el aislamiento de los transformadores de potencia[11].

Cuando el sistema no puede manejar este tipo de impulsos dentro de límites seguros de aislamiento, se corre el riesgo de que el transformador sufra daños graves por eso es importante estudiar el comportamiento de la corriente de fuga a tierra en las etapas de operación, especialmente durante las maniobras de cierre y apertura en redes de transmisión.

Tanto el impulso de tipo rayo como el de maniobra están definidos por las normas internacionales, como la IEC 60076-3 y la IEEE Std C57.98, que establecen los valores límite de la resistencia dieléctrica que deben cumplir los transformadores de potencia[11].

Incluir estos modelos de impulso dentro de una herramienta de simulación como el software ATPDraw permite representar estos fenómenos de forma más económica y efectiva ya que las simulaciones pueden realizarse antes de probar los equipos, reduciendo así costos de ensayo y posibles riesgos. Si se aplica correctamente durante las pruebas, la grabación de estos impulsos puede ser utilizada para analizar la robustez del transformador ante eventos de alta tensión de corta duración los cuales con el tiempo podrían provocar fallos serios en el aislamiento del equipo.

3.3. Impulsos tipo rayo y tipo maniobra

Los impulsos de tipo rayo y el de tipo conmutación son dos categorías de transitorios rápidos, los cuales son introducidos en pruebas de alta tensión con el propósito de probar la resistencia dieléctrica y la capacidad de soportar el aislamiento de los transformadores de potencia contra las tensiones eléctricas severas.

La diferencia principal entre estos impulsos es la duración del tiempo de frente de onda, que es un parámetro crítico, el cual controla qué tan rápido alcanza el voltaje nominal. Los impulsos de tipo rayo se presentan un frente de onda muy rápido, típicamente con tiempos de subida de $0.1 \mu\text{s}$ a $20 \mu\text{s}$, mientras que los impulsos de tipo conmutación tienen un frente de onda más lento con tiempos de subida de $20 \mu\text{s}$ a 5ms [12].

La duración entre cada subida y caída de los impulsos los hace sustancialmente adecuados para diferentes propósitos e influye de manera incoherente en el comportamiento de los materiales de aislamiento en los aparatos eléctricos probados.

El impulso de tipo rayo se aplica para simular sobretensiones causadas por las descargas atmosféricas en líneas de transmisión y subestaciones como se muestra en la Figura 1 desarrollado en el lenguaje de programación Python que se muestra en el Anexo 1. Su característica principal es el frente ascendente hasta el valor pico, a partir del cual los transformadores pueden ser clasificados por su resistencia al impulso sin dañar el aislamiento interno.

Estos picos, especificados en normas como IEC 60060-1 o IEEE Std C57.98, se realizan en laboratorios especializados sobre la base de circuitos de impulso de energía que modelan las condiciones severas que el equipo en servicio puede estar sujeto. Probar transformadores con este tipo de prueba facilita el descubrimiento de fallas de aislamiento y asegura que el material utilizado en la construcción de estos transformadores sea adecuado para soportar los valores de resistencia negativa y evitar la falla catastrófica del sistema eléctrico.

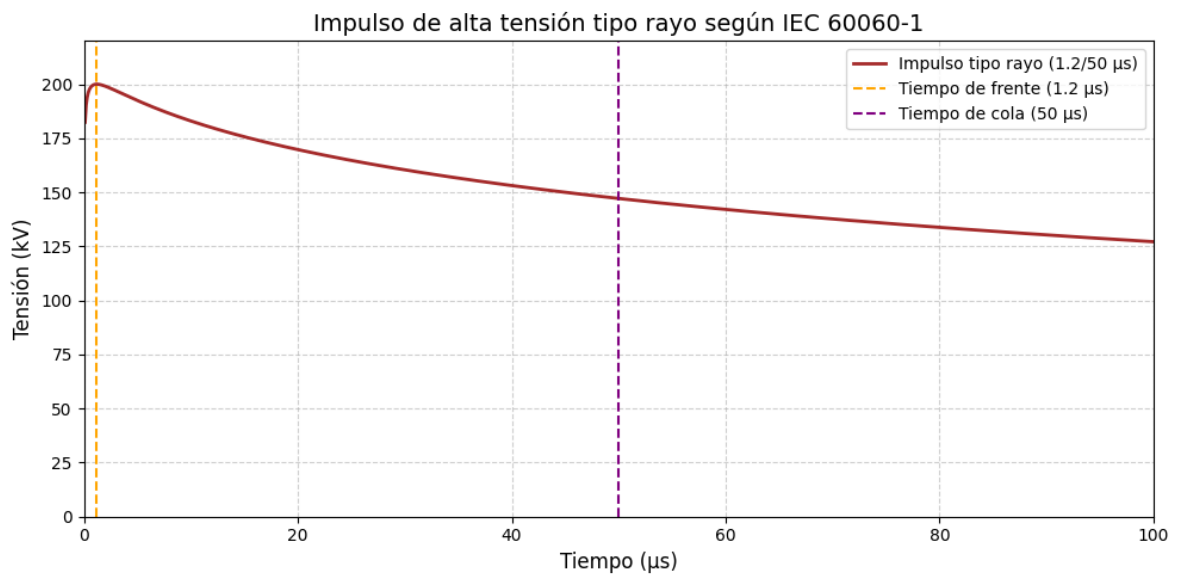


Figura 1. Impulso tipo rayo.

Por otro lado, en la Figura 2 se muestran los impulsos basados en maniobras desarrollado en el lenguaje de programación Python que se muestra en el Anexo 2, se utilizan para la verificación de los picos de voltaje transitorios originados por maniobras en el sistema eléctrico, por ejemplo, la conexión o desconexión de equipos, la apertura o cierre de interruptores de potencia o cambios rápidos en la carga del sistema. A diferencia de los impulsos de tipo rayo, su tiempo de cresta más alto se asemeja al flujo de voltaje que surge en los sistemas eléctricos como resultado de la operación normal o la sobrecarga.

Las pruebas dieléctricas se utilizan para verificar si el transformador es capaz de soportar las altas tensiones de voltaje durante un período prolongado sin causar fallas.

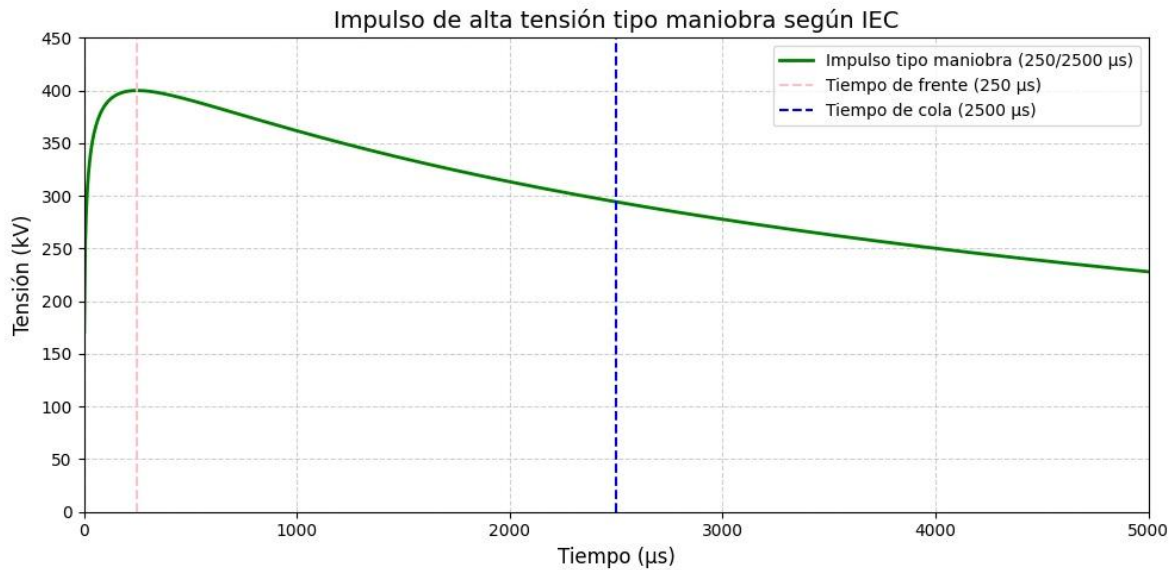


Figura 2. Impulso tipo maniobra.

3.4. Circuito para producir impulsos de rayos

La ecuación 1 representa una función doble exponencial utilizada para modelar matemáticamente la forma de una onda de impulso tipo rayo[13]. Esta expresión permite ajustar parámetros críticos como el tiempo de frente y el tiempo de cola mediante las constantes α_1 y α_2 , facilitando su implementación en simulaciones.

$$e(t) = A[\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (1)$$

Donde:

$e(t)$: tensión instantánea del impulso en función del tiempo V

A : constante de escala relacionada con el valor máximo de tensión.

α_1 : constante asociada al crecimiento inicial de la onda $1/s$.

α_2 : es la constante asociada al decrecimiento de la onda $1/s$.

t es el tiempo transcurrido desde el inicio del impulso s .

En la Figura 3 se observa la forma típica de una onda de impulso normalizada, caracterizada por un ascenso rápido hasta su valor pico, seguido por una caída gradual. Esta onda responde a la configuración estandarizada de $1,2/50 \mu s$, donde $1,2 \mu s$ representa el tiempo de frente y 50

μs el tiempo de cola. Las tolerancias establecidas por la norma IEC 60076-3 son de ±30 % para el tiempo de frente, ±20 % para el tiempo de cola y ±3 % para el valor pico. Esta gráfica se empleará como referencia técnica para validar si las formas de onda obtenidas mediante simulación cumplen con los parámetros normativos. Su función principal es servir como patrón comparativo en la evaluación del modelo computacional del generador multi-impulso[13].

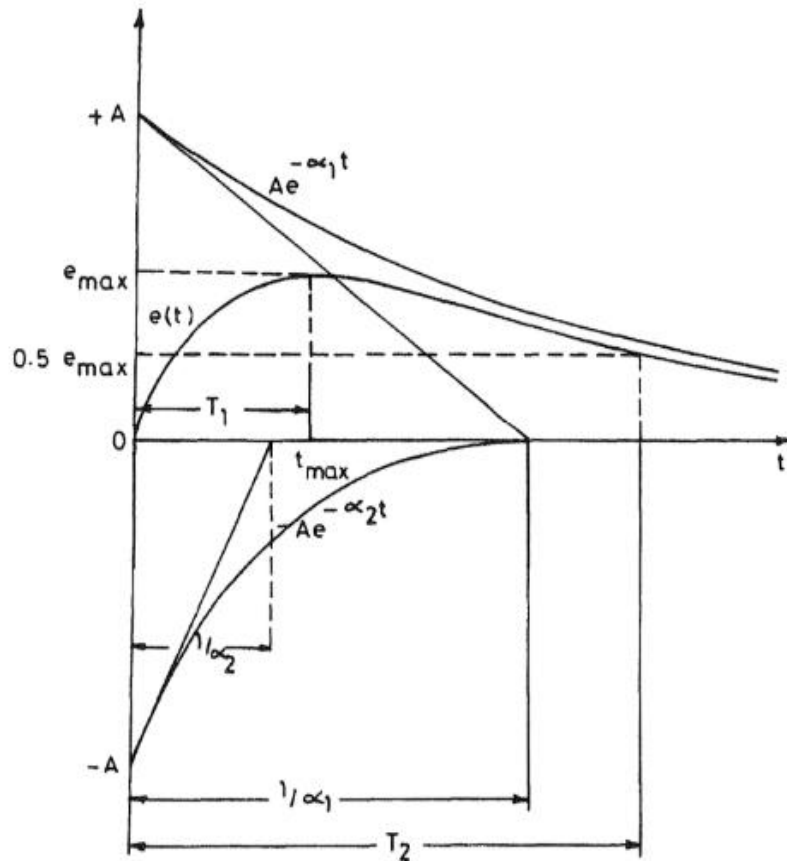


Figura 3. Onda de impulso y sus componentes como doble exponencial[14].

3.4.1. Circuito impulsos de rayos

La forma de onda doble exponencial expresada por la ecuación 1 se puede obtener en el laboratorio mediante cualquier conexión del circuito R-C como se ejemplifica en la Figura 4 o mediante un circuito en serie R-L-C en condiciones de sobre amortiguación[15].

3.4.2. Circuito R-C para la generación de impulsos

Las ventajas de estos circuitos están en que el frente de onda y la cola de onda se controlan de forma independiente modificando R_1 y R_2 por separado. Además, el objeto de prueba se incorpora directamente en la salida del circuito, formando parte de la capacitancia C_2 , lo cual

permite representar su comportamiento dieléctrico dentro del proceso de descarga. Esta característica, mostrada en la Figura 4, es clave para simular ensayos de impulso [13].

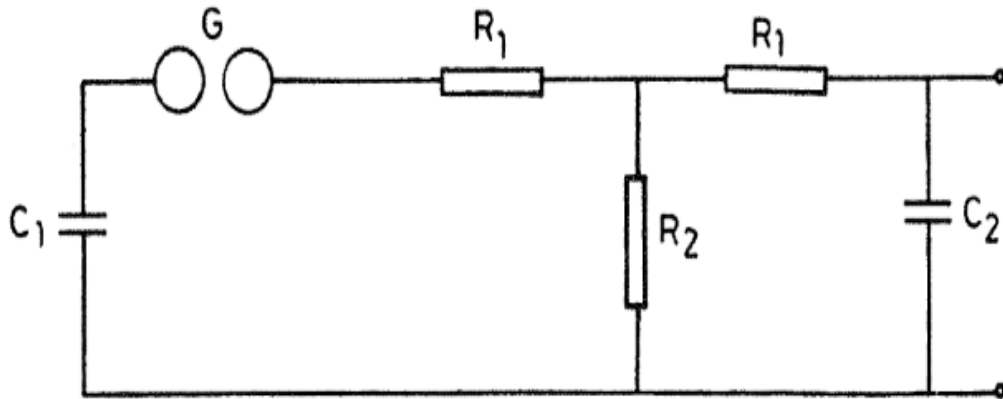


Figura 4. Circuito R-C para la generación de impulsos de tipo rayo con forma de onda doble exponencial[14].

3.4.3. Circuito R-L-C para la generación de impulsos

En un circuito RLC en serie, como el mostrado en la Figura 5, la forma de la onda de impulso depende directamente de la relación entre la resistencia R , la inductancia L y la capacitancia C . Cuando el sistema está en condición de sobre amortiguamiento, se consigue una respuesta transitoria sin oscilaciones, lo cual es ideal para simular impulsos de tensión de tipo rayo con una cola larga y un ascenso controlado.

Una resistencia elevada incrementa la constante de amortiguamiento del sistema, provocando que la descarga del capacitor sea más lenta, alargando así la cola de la onda. A su vez, una inductancia significativa suaviza el frente de la señal y reduce posibles sobre impulsos. El valor máximo de la tensión generada no depende únicamente de la energía almacenada en el capacitor, sino también de cómo interactúan los tres elementos del circuito al momento de la descarga. Por ello, el ajuste adecuado permite controlar con precisión la forma de la onda deseada, cumpliendo con las características normativas exigidas para pruebas dieléctricas[15].

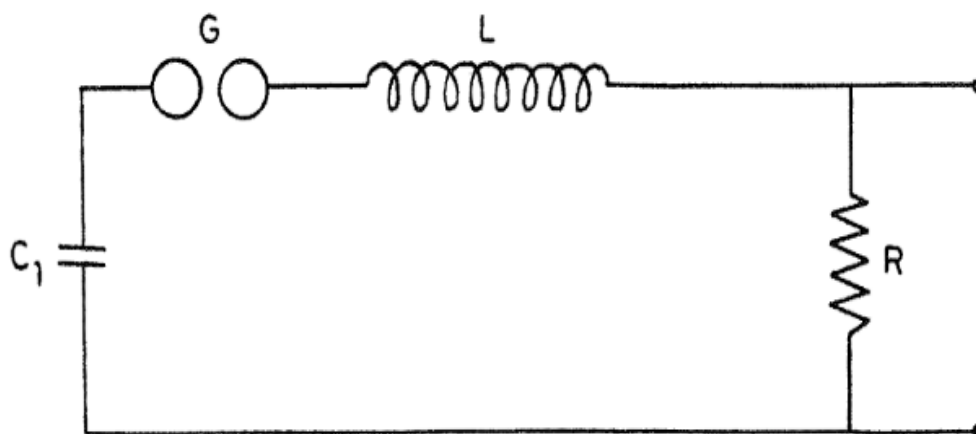


Figura 5. Circuito RLC en serie para la generación de impulsos de rayo en condición de sobre amortiguamiento[14].

3.5. Generador de impulsos

Un generador de impulsos es un dispositivo utilizado en ensayos de alta tensión para generar ondas transitorias de corta duración con el fin de evaluar la capacidad de aislamiento de equipos eléctricos, como transformadores de potencia. Estos generadores son esenciales en la simulación de sobretensiones causadas por descargas atmosféricas o maniobras en la red eléctrica, permitiendo verificar si los transformadores pueden soportar estas condiciones extremas sin comprometer su funcionamiento[16]. La energía generada por el impulso permite analizar la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes y detectar posibles debilidades en los sistemas eléctricos. La importancia de estos ensayos radica en la necesidad de garantizar la confiabilidad y seguridad de los equipos de transmisión y distribución de energía, asegurando que operen bajo normativas internacionales como la IEC 60076-3 y la IEEE Std C57.98[11].

Un generador de impulsos está conformado por un conjunto de componentes diseñados para almacenar y liberar energía de manera controlada con el fin de producir una onda de impulso con características específicas. Entre sus principales elementos se encuentran los capacitores de carga, encargados de almacenar la energía que posteriormente será liberada en forma de impulso. Estos capacitores se cargan a través de una fuente de alto voltaje y, una vez alcanzado el nivel de carga deseado, la energía acumulada se libera mediante un interruptor de descarga, el cual permite la circulación de corriente hacia el circuito de formación del impulso. En este circuito, las resistencias de frente y de cola regulan la forma de la onda generada, controlando el tiempo de ascenso y descenso del impulso para que cumpla con los parámetros requeridos en los ensayos eléctricos[16].

Además, un generador de impulsos incluye una cámara de descarga o gap de chispas, que actúa como un interruptor que se cierra de manera súbita para liberar la carga almacenada en los capacitores. Este elemento es clave en la generación de la onda de impulso, ya que permite que la energía fluya de manera instantánea hacia el equipo sometido a prueba. Dependiendo de la aplicación, los generadores de impulsos pueden diseñarse con una configuración de una sola etapa o con múltiples etapas, como el generador de Marx, el cual permite alcanzar niveles de voltaje muy elevados mediante la conexión en serie de múltiples capacitores y resistencias. Esta configuración es ampliamente utilizada en ensayos de alto voltaje, debido que permite generar impulsos con magnitudes controladas para evaluar la respuesta de los equipos eléctricos bajo condiciones de esfuerzo dieléctrico extremo[17].

El funcionamiento de un generador de impulsos se basa en la conversión de energía eléctrica almacenada en los capacitores en una onda transitoria de alta tensión, replicando las condiciones reales de operación de los transformadores de potencia. Su correcta implementación en los ensayos garantiza que los equipos probados cumplan con los estándares de calidad y seguridad requeridos para su uso en redes eléctricas.

Aunque existen otros circuitos que pueden generar una onda exponencial de voltaje, la cual puede usarse como un impulso de voltaje de tipo atmosférico, el circuito más utilizado está formado por dos capacitores, dos resistencias y un interruptor libre de rebotes, o intermitencias de contacto eléctrico entre sus terminales, al ser cerrado[17].

Existen dos esquemas de conexión para el circuito generador y se denominan circuito tipo A y tipo B. El circuito tipo B es preferido por tener mayor eficiencia en la producción de un impulso. La ventaja que puede tener el A sobre el B es la mayor facilidad de cambiar o desmontar las resistencias del circuito generador, pero esto quizás no compensa el hecho de tener menor eficiencia de circuito. En la Figura 6 se muestran ambos circuitos, el circuito tipo A tiene a R2 conectada al extremo de R1 ya unido a C2, pero el circuito tipo B tiene a R1 conectada al extremo de R2 ya unido al interruptor. La posición de la resistencia R2 influye en la eficiencia del circuito para regular un voltaje de impulso a partir de la tensión de carga de C1.

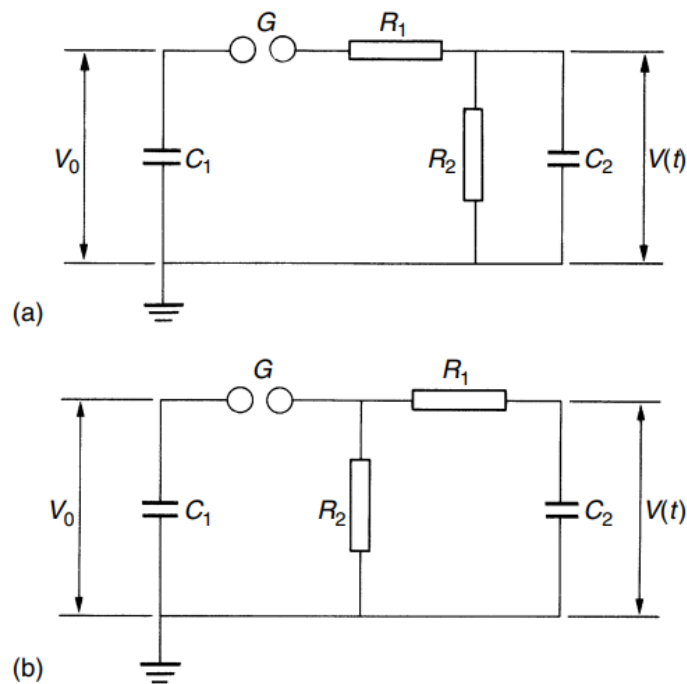


Figura 6. Circuitos generadores tipo “A” y tipo “B” de impulso atmosférico[15].

3.6. Los elementos del circuito generador

Capacitor Principal C1: Es el capacitor que se conecta a una fuente de alto voltaje directo a través de una resistencia limitadora. Luego de ser cargado C1 se cierra un interruptor. El capacitor se descarga bruscamente y el resto del circuito recibe una energía considerable a una tensión elevada. Los elementos del circuito dan forma a la tensión de descarga del capacitor C1 y así se obtiene un impulso de voltaje en los terminales de salida[16].

Capacitor de Salida C2: Debe ser un capacitor con menor capacidad que C1 y que pueda soportar la tensión total de salida. En los terminales de C2 se encuentra aplicado el impulso generado pues son los terminales de salida del circuito generador. En ocasiones C2 está formado por la combinación en paralelo del objeto de prueba y un capacitor auxiliar.

Resistencia serie de etapa R1: Es una resistencia que queda colocada en serie al capacitor C1 y al interruptor, cuando el mismo se cierra. A través de ésta circula la corriente que va hacia el objeto de prueba y a la resistencia R2, según el tipo de circuito[16].

Resistencia paralela de etapa R2: Es una resistencia que queda colocada en paralelo al capacitor C1 o al C2, según el tipo de diseño cuando se cierra el interruptor.

Interruptor de Esferas GAP: El interruptor de esferas es un componente clave en los generadores de impulso de alta tensión. Consiste en dos electrodos esféricos separados por un

espacio de aire, a través del cual se produce una descarga eléctrica cuando la diferencia de potencial supera el voltaje de ruptura del aire. Este mecanismo actúa como un interruptor de cierre súbito que permite liberar de forma instantánea la energía acumulada en los capacitores hacia el circuito de descarga.

En aplicaciones más precisas, se emplea un dispositivo denominado trigatrón, que incorpora una pequeña bujía en una de las esferas. Esta bujía genera una chispa auxiliar que ioniza el aire entre los electrodos, facilitando el disparo controlado del arco eléctrico una vez cerrado el circuito mediante el GAP, la energía almacenada en el capacitor principal C_1 se descarga a través del conjunto resistivo-capacitivo conformado por C_2 , R_1 y R_2 , formando así la onda de impulso aplicada al objeto de prueba[16].

3.7. Características de un generador de impulso multietapas

Como con todas las máquinas o dispositivos, el generador de impulsos se define por una pluralidad de datos relacionados con sus propiedades eléctricas:

Impulso: Un impulso es un voltaje (o corriente) transitorio aplicado intencionalmente y el cual usualmente crece rápidamente a un valor pico y entonces cae más lentamente a cero[18].

Tensión Nominal

El voltaje de salida nominal para un generador de n etapas es el voltaje máximo de carga V_o , se da por $V_n = n * V_o$. Sin embargo, el objeto de prueba solo puede soportar un voltaje de impulso menor que $n * V_o$, porque no puede generar el impulso con una eficiencia del 100%. Normalmente, el voltaje de carga V_o está en el rango de 50 kV a 400 kV y los generadores están dimensionados para soportar impulsos de voltaje de hasta 5 MW. [16].

Capacitancia nominal

La capacidad nominal C_1/n de un generador de impulsos se obtiene dividiendo la capacidad por etapa C_1 por el número de etapas n . Usualmente, C_1/n debe ser al menos cinco veces mayor que la capacitancia del objeto bajo prueba si este no es el caso, la eficiencia de voltaje n será muy baja por lo que típicamente, la capacitancia por etapa está entre 200 nF y 2000 nF. [16].

Energía nominal

La energía nominal de un generador se determina como la máxima energía posible que se puede almacenar, a un valor obtenido con la ecuación $W = 1/2 * n * C_1 * V_o^2$. La magnitud de esta energía es típicamente de 10 a 100 kJ[16].

Número de etapas

El número de etapas seleccionadas depende de varios factores. En casos de formas de onda con fuerte oscilación, es importante disminuir la inductancia L del circuito, lo cual se puede lograr limitando el número de etapas. De esta manera, se minimiza el número de resistencias en la parte delantera y trasera. Otra consideración es el voltaje de carga V_o que definirá la cantidad de capacitores de carga a conectar, y por lo tanto el número de etapas n . Básicamente, los generadores de impulsos pueden tener tan pocas etapas como, por ejemplo, de 4 a 50 etapas[18].

Tipos de tensiones de impulso atmosférico

La norma IEEE Std 4-2013, en la cláusula 3, establece los conceptos fundamentales sobre los impulsos de voltaje empleados en pruebas de alta tensión. En esta sección se describen los diferentes tipos de impulsos atmosféricos, como el impulso tipo rayo, impulso cortado e impulso de maniobra, junto con sus tiempos característicos y aplicaciones en ensayos dieléctricos de equipos eléctricos.

1. **Descarga disruptiva:** conocida a veces como ruptura eléctrica, es una descarga que puentea o salta completamente por encima del aislamiento del objeto que está siendo probado. Esto puede reducir prácticamente a cero el voltaje entre los electrodos de prueba.
2. **Aislamiento auto-restaurable:** aislamiento que recupera completamente sus propiedades aislantes, aunque haya ocurrido una descarga disruptiva[16].
3. **Aislamiento no auto-restaurable:** se refiere al aislamiento que, tras una descarga disruptiva, pierde sus propiedades aislantes o no logra recuperarlas completamente.
4. **Impulso tipo rayo:** Impulso con un tiempo de frente de hasta $20 \mu s$.
5. **Impulso de rayo completo:** impulso de rayo que no es interrumpido por una descarga disruptiva se observa en la Figura 2.
6. **Impulso pleno de tipo atmosférico:** un impulso de tipo atmosférico que no es interrumpido por ningún tipo de descarga disruptiva. Se puede decir que un impulso pleno no se ve reducido a cero bruscamente (pues no hay descarga disruptiva) aunque eventualmente la cola del impulso llega a valer cero luego.
7. **Impulso tipo rayo estándar:** un impulso tipo rayo completo que tiene un tiempo de frente T_1 de $1,2 \mu s$ y un tiempo hasta la mitad del valor T_2 de $50 \mu s$, y se describe como un impulso $1,2/50$ se observa en la Figura 2.
8. **Impulso cortado de tipo atmosférico:** un prospecto de impulso pleno, pero durante

el cualquier tipo de descarga ocasiona un rápido colapso del voltaje[19].

9. **Instante de corte:** instante cuando aparece la discontinuidad inicial en el voltaje de impulso. El colapso de voltaje puede ocurrir en el frente, el pico, o en la cola del impulso. El corte del impulso (corte de la onda generada) puede ser realizado o logrado por medio de un interruptor especial (chopping gap) o puede ocurrir debido a una descarga en el aislamiento interno o externo del objeto de prueba.
10. **Impulso estándar cortado de tipo atmosférico:** un impulso estándar de tipo atmosférico que es cortado por un “gap” externo después de 2 a 5 microsegundos. Sin embargo, otros valores de tiempo al corte T_c pueden ser especificados por comités técnicos relevantes. A causa de dificultades prácticas en mediciones, la duración del colapso de voltaje no se ha estandarizado[18].
11. **Sobrepaso (overshoot):** el valor por el cual un impulso de tipo atmosférico excede el valor definido de cresta o pico.
12. **Sobre impulso:** se refiere al aumento en la amplitud de la tensión de un impulso de rayo completo, causado por oscilaciones en el pico.
13. **Valor de la tensión de prueba, V_t :** se define como el valor máximo de la curva de tensión de prueba.
14. **Curva registrada:** es una representación gráfica o digital de los datos de prueba de un voltaje de impulso.
15. **Nivel base:** corresponde al nivel de un registro en un sistema de medición de impulsos cuando no hay entradas al instrumento de registro.
16. **Curva base:** se refiere a la estimación del voltaje de un impulso de rayo completo sin oscilaciones superpuestas.
17. **Curva residual:** es la diferencia entre la curva registrada y la curva base. [19].
18. **Forma de onda normalizada de la tensión de impulso:** las formas de onda de las sobretensiones atmosféricas son muy variadas, algunas se han estandarizado para realizar pruebas de impulso en equipos y máquinas eléctricas. Una onda de tensión impulsiva normalizada presenta características bien definidas en cuanto a su duración y amplitud. En el caso de la sobretensión atmosférica, la Norma ANSI/IEEE Standard 4-2013 establece:
19. **Valor pico V :** es la máxima amplitud de la onda, medida desde la referencia de tensión, con una tolerancia de $\pm 5\%$.
20. **Tiempo de frente T_1 :** es el primer tiempo que transcurre, medido desde un tiempo

virtual T_1 , entre el 30 % y el 90 % del valor pico, multiplicado por 1,67. La duración de este lapso será:

$$T_1 = 1,2 \pm 30 \% \mu s$$

21. Tiempo de cola T_2 : es el mayor tiempo que transcurre hasta alcanzar el 50 % del máximo valor pico. Su valor es

$$T_2 = 50 \pm 20 \% \mu s$$

La Figura 7 muestra la onda plena de impulso normalizado tipo atmosférico 1,2/50 μs [16].

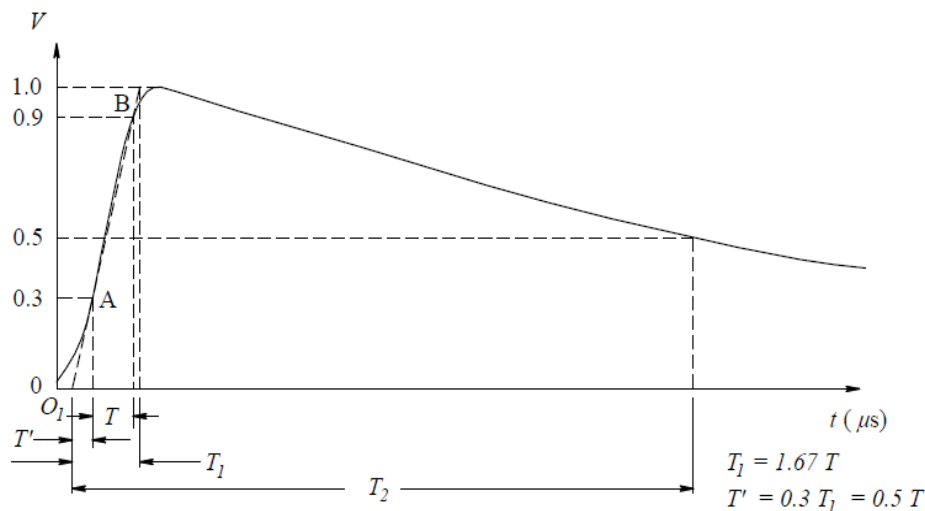


Figura 7. Impulso de rayo completo sin oscilaciones ni sobre impulsos[16].

3.8. Generador de impulso de tensión multietapa o tipo Marx

En la Figura 8 se muestra el modelo del generador de impulso de tensión multietapa o tipo Marx es un sistema utilizado para la generación de impulsos de alto voltaje con el propósito de evaluar la resistencia dieléctrica de equipos eléctricos, en particular los transformadores de potencia. Su desarrollo responde a la necesidad de alcanzar niveles de tensión elevados sin recurrir a fuentes de alimentación extremadamente grandes y costosas. Antes de su invención, la generación de impulsos de alta tensión requería el uso de capacitores de gran capacidad y fuentes de corriente continua con tensiones muy elevadas, lo que dificultaba su implementación en ensayos eléctricos. Para superar esta limitación, E. Marx, en 1924, diseñó un circuito en el que múltiples condensadores se cargan en paralelo a una fracción de la tensión total y, posteriormente, se conectan en serie durante la fase de descarga, logrando así un voltaje de salida significativamente mayor que el de cada capacitor individual[20].

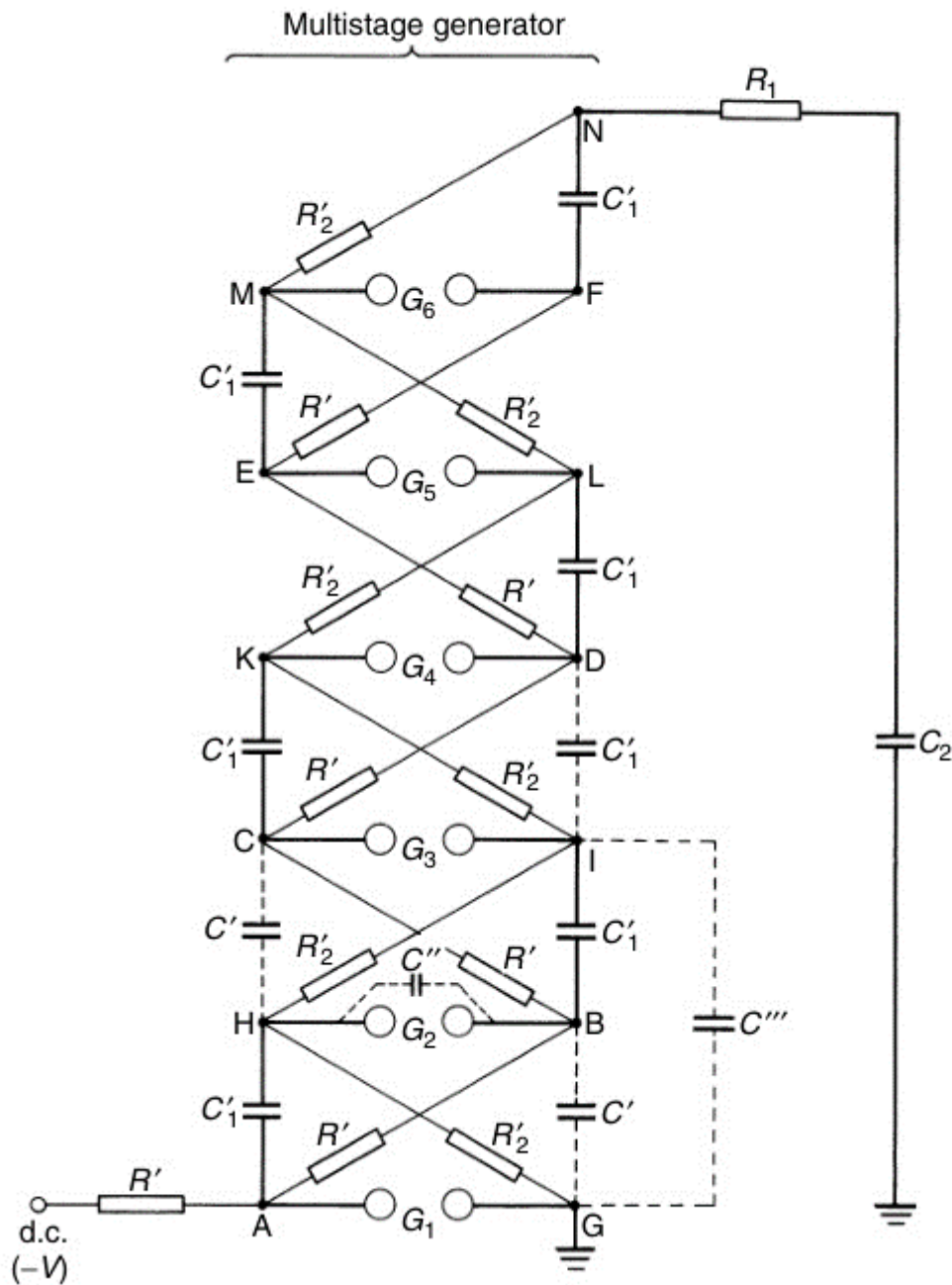


Figura 8. Diseño del generador de Marx[18].

3.9. El principio de funcionamiento del generador de Marx

Se basa en la carga controlada de un conjunto de condensadores de almacenamiento, que reciben energía desde una fuente de corriente continua a través de resistencias de carga. Durante esta fase, cada capacitor se carga hasta alcanzar un voltaje específico, determinado por la fuente de alimentación y las características del circuito. Una vez completada la carga, un sistema de interruptores de disparo o gaps de chispa se activa simultáneamente, provocando la

conmutación de los condensadores de una configuración en paralelo a una conexión en serie. Este proceso genera una suma de tensiones en la salida, lo que permite alcanzar niveles de voltaje muy elevados, adecuados para ensayos de alta tensión en transformadores y otros dispositivos eléctricos[21]. La cantidad de etapas en el generador determina la tensión final del impulso, ya que cada etapa contribuye con un incremento adicional al voltaje total generado.

Para garantizar una correcta configuración del sistema, los valores de los elementos en cada piso deben ser iguales, ya que de lo contrario no sería posible sumar adecuadamente las tensiones generadas en cada uno, lo que dificultaría su operación. Los parámetros que definen a cada piso son[22]

- r_p resistencia en paralelo.
- r_s resistencia en serie.
- r_c resistencia de carga entre pisos.
- c_s capacidad del condensador.
- La carga inicial de cada condensador se denota como V_{Cgo} .

Al agrupar los pisos del generador en un esquema equivalente, se definen los siguientes parámetros globales:

- n número de pisos conectados en serie.
- m número de pisos conectados en paralelo.
- R_p resistencia total en paralelo.
- R_s resistencia total en serie.
- R_c resistencia total de carga.
- C_g capacidad total del generador.
- V_{cgo} carga inicial de los condensadores[22].

A partir de estos parámetros es posible deducir las ecuaciones necesarias para determinar los valores globales del generador.

El diseño del generador de Marx presenta diversas ventajas en la generación de impulsos eléctricos. Su estructura modular permite escalar el voltaje de salida agregando más etapas, lo que facilita su adaptación a diferentes requisitos de prueba. Además, al utilizar una fuente de alimentación de menor tensión para cargar los condensadores, se reduce la necesidad de transformadores de alto voltaje, minimizando costos y complejidad en la infraestructura del

laboratorio de ensayos[23]. Sin embargo, su implementación requiere un control preciso de la sincronización de los interruptores de disparo para garantizar una conmutación eficiente y evitar pérdidas de energía durante la generación del impulso. Por esta razón, el uso de simulaciones computacionales con herramientas como ATPDraw resulta esencial para modelar el comportamiento del circuito y optimizar su desempeño antes de su aplicación en pruebas experimentales.

El generador de impulso de Marx es ampliamente utilizado en ensayos de rigidez dieléctrica de transformadores de potencia, verificando su capacidad para soportar sobretensiones transitorias sin sufrir daños en su aislamiento. Su aplicación garantiza que los transformadores cumplan con los estándares de calidad y seguridad establecidos por normativas como la IEC 60076-3 y la IEEE Std C57.98, asegurando su confiabilidad en sistemas de transmisión y distribución de energía. Gracias a su eficiencia y versatilidad, este generador sigue siendo una de las soluciones más utilizadas en la evaluación de equipos eléctricos de alta tensión, contribuyendo al desarrollo de tecnologías que mejoran la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico[9].

3.10. Normativas y estándares internacionales para ensayos de impulso en transformadores de potencia

Las pruebas de impulso de los transformadores de potencia están definidas en las normativas internacionales que establecen la premisa técnica y el método para establecer la resistencia dieléctrica de este equipo en presencia de sobretensiones transitorias. Las normas pertinentes IEC 60076-3 y también IEEE Std C57.98 se aplican tanto en experimentos de impulso de rayo con el fin de lograr suficiente seguridad y fiabilidad para los transformadores en el campo eléctrico. Esta norma, publicada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), es una de las normas más comúnmente utilizadas en todo el mundo y especifica los requisitos para las pruebas dieléctricas de los transformadores de potencia[24].

Sin embargo, IEEE Std C57.98 emitido por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) ha publicado algunas recomendaciones relacionadas, pero centrándose en los requisitos técnicos específicos para transformadores utilizados en sistemas eléctricos. Ambas normas consideran que los transformadores deben pasar pruebas de impulso que están destinadas a simular sobretensiones reales para el funcionamiento normal. Los entornos en los que se han establecido estas normas se aplican al perfil de la forma de onda de los impulsos de prueba, a los tiempos de frente y cola de los impulsos de prueba, y a los voltajes con los que el equipo

debe cumplir durante las pruebas. Para el impulso de rayo, el tiempo de frente es de $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ y el tiempo de cola para el 50% del valor pico será de $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ para asegurar la compatibilidad con la onda producida durante la simulación del efecto de una descarga atmosférica en el transformador (IEC 60076-3). En el caso del impulso de conmutación, que refleja las determinaciones de voltaje incumbentes a la operación de la red eléctrica, el tiempo de frente varía de $20 \mu\text{s}$ a 5 ms , dependiendo del nivel de voltaje del sistema y las características del equipo de prueba[24].

Además, la determinación de los valores de voltaje de prueba como funciones de categoría, y la asignación de categoría a los transformadores, está establecida por las normas, y el nivel de voltaje de prueba puede ser hasta 1,5 veces el voltaje nominal del equipo bajo prueba[14].

Estos son parámetros importantes para acceder a las propiedades dieléctricas de los materiales de aislamiento y así identificar posibles fallos antes de que el transformador sea comisionado. Cumplir con estos requisitos es un factor importante que afecta la calidad, seguridad y fiabilidad de los transformadores de potencia en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. El rendimiento del aislamiento para soportar sobretensiones transitorias puede verificarse mediante pruebas de impulso de acuerdo con las normas internacionales en lugar del riesgo de fallos operativos, prolongando así la vida útil del transformador[25].

Además, la certificación estándar reconocida internacionalmente también lleva a la posibilidad que el equipo sea comercializado en mercados extranjeros, siempre que cumpla con las condiciones técnicas solicitadas por las empresas de generación, transmisión y distribución de energía. En cuanto a la seguridad, proporcionan que no haya fallos dieléctricos catastróficos en los transformadores, evitando unidades que podrían llevar a cortes de energía y la seguridad del sistema eléctrico, tanto para el operador del sistema como para los usuarios finales[14]. Es decir, el número de métodos de prueba según las normas internacionales ayuda a garantizar la fiabilidad del equipo de prueba y medición, asegura la calidad del suministro de energía y limita los tiempos de interrupción cuando fallan componentes esenciales de la red.

3.11. Modelado y simulación de generadores de impulso mediante software

ATPDraw se utiliza porque permite simular con detalle los transitorios eléctricos que ocurren en sistemas de alta tensión. A diferencia de otros programas, es accesible para la comunidad académica, fácil de usar y está orientado al análisis de circuitos especializados, lo que lo hace ideal para este tipo de estudios.

La simulación de los generadores de impulsos en el software especializado como clave para mejorar las pruebas de alta tensión en transformadores de potencia. ATPDraw es una herramienta bien conocida y utilizada para la compilación gráfica y el cálculo de redes eléctricas. También es adecuada para el análisis de transitorios electromagnéticos y luego para estudiar los generadores de multi-impulsos que pueden evaluarse con respecto a diferentes parámetros sin la necesidad de pruebas físicas en una primera línea.

Para las pruebas de los transformadores, ATPDraw permite simular ondas de impulso de rayo y de conmutación y obtener niveles de voltaje de acuerdo con las directrices internacionales relacionadas a las normativas como, IEC60076-3 e IEEE Std C57.98. Mediante este software es factible diseñar modelos elaborados de circuitos de prueba y configuración para rastrear su impacto al realizar simulaciones en el dominio del tiempo sin causar impacto en el equipo físico, mejorando la evaluación de los transformadores de potencia[24].

La simulación en ATPDraw es modelar el circuito equivalente de la fuente de impulso, que se compone del condensador de carga del generador de impulsos, las resistencias de descarga del frente y cola, el interruptor de disparo y la carga representativa capacitiva ofrecida por el transformador bajo prueba. Todos los parámetros se modelan con sus valores nominales y comportamientos físicos, lo que permite que la configuración sea un buen representante del entorno de prueba real.

Cuando se define el programa, se organizan los parámetros luego se establece el voltaje de carga del condensador, el valor de la resistencia y se ajusta el tiempo de subida de la onda de impulso y la duración que es el tiempo de generación del frente de onda de pulso y cola. Luego se lleva a cabo la simulación y las formas de la onda obtenidas se comparan con las referencias teóricas y normativas de tal manera que se garantice que en el caso de los circuitos se pueda obtener el valor deseado.

La simulación reduce el costo de operación ya que el generador puede caracterizarse en etapas sin la aplicación de la alta tensión para las pruebas, evitando así posibles fallas del transformador y optimizando el material utilizado para la prueba.

Finalmente, se lleva a cabo la validación del resultado probando la relación de la onda de impulso generada y examinando si los tiempos característicos y la amplitud de la señal son adecuados para probar el transformador. Este procedimiento permite que los valores del circuito

de software se modifiquen hasta que se encuentre el mejor modelo de generador de multi-impulsos y se utilice en experimentos reales.

3.12. Impulso negativo

3.12.1. Importancia del impulso negativo en pruebas de transformadores de potencia

En la Figura 9 se muestra el impulso negativo es un tipo específico de sobretensión transitoria cuya polaridad es opuesta al impulso positivo convencional. En términos eléctricos, la forma de onda presenta una caída rápida de tensión a valores negativos, seguida de una recuperación lenta, la gráfica se realiza con el código del Anexo 3.

Este tipo de impulso se genera en eventos naturales y de operación, tales como:

- Descargas atmosféricas con polaridad negativa.
- Maniobras eléctricas que pueden inducir polaridades negativas en las sobretensiones.
- Fallas internas que resultan en impulsos de polaridad negativa.

La generación de impulsos de alta tensión se realiza comúnmente mediante un generador de impulsos tipo Marx. Este circuito utiliza la carga en paralelo de condensadores a baja tensión y su descarga en serie a alta tensión a través de esferas de chispa.

La aplicación de impulsos negativos en las pruebas de transformadores es necesaria ya que proporciona una simulación más realista. No todos los impulsos son positivos y, bajo condiciones de fallas internas, es posible que surja un impulso de polaridad negativa. Este experimento nos permite observar el rendimiento del aislamiento en las peores condiciones operativas de las pruebas.

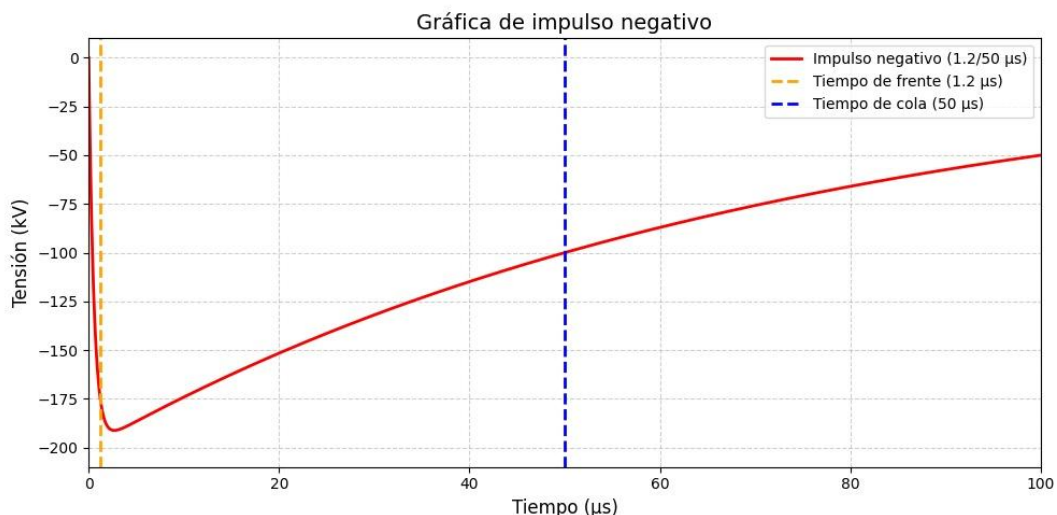


Figura 9. Impulso negativo.

3.12.2. Generación de impulsos negativos

Para generar impulsos negativos, la configuración de carga de los condensadores dentro del generador Marx se invierte, permitiendo que la etapa final entregue una onda de tensión con polaridad negativa. La sintonización de las resistencias de frente y cola, así como las capacitancias, es crucial para obtener la forma de onda deseada y cumplir con las tolerancias normativas[22].

3.13. Transformadores de potencia

3.13.1. Definición y función general

Los transformadores de potencia son dispositivos electromagnéticos estáticos utilizados para transferir energía eléctrica de un circuito a otro mediante el principio de inducción mutua, operando a frecuencias constantes y con mínima variación en el tiempo. Su función principal es modificar los niveles de tensión y corriente para permitir la transmisión eficiente de energía eléctrica a grandes distancias y su posterior distribución a niveles utilizables[13].

A los transformadores de potencia se les llama de diferentes maneras, dependiendo de su uso en los sistemas de potencia. A un transformador conectado a la salida de un generador y que se usa para aumentar su voltaje a niveles de transmisión más de 110 kV a veces se le llama transformador de unidad. Al transformador que se encuentra al final de la línea de transmisión, que baja el voltaje de niveles de transmisión a niveles de distribución de 2.3 a 34.5 kV se le llama transformador de subestación. Por último, al transformador que toma el voltaje de

distribución y lo disminuye hasta el voltaje final al que se utiliza la potencia 110, 208, 220 V se le llama transformador de distribución. Todos estos dispositivos son esencialmente iguales; la única diferencia entre ellos es el uso que se les da[26].

3.13.2. Estructura y componentes principales

En la Figura 10 se presenta el modelo de transformador de potencia están compuestos por un núcleo magnético laminado, devanados primario y secundario de cobre o aluminio, aislantes sólidos y líquidos (como aceite dieléctrico), y sistemas de refrigeración y protección. El diseño de estos elementos debe cumplir estrictas normas internacionales para garantizar un desempeño fiable frente a tensiones de operación normales y sobretensiones transitorias[27].

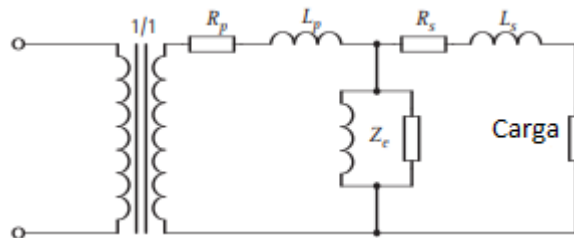


Figura 10. Modelo de un transformador

Un transformador de potencia también produce un voltaje secundario directamente proporcional a su voltaje primario; la diferencia entre un transformador de potencial y un transformador de potencia es que el transformador de potencial está diseñado para manejar sólo corrientes muy pequeñas[26].

3.13.3. Clasificación

A diferencia de los transformadores de distribución, los transformadores de potencia están diseñados para operar a altas potencias nominales, generalmente a partir de 20 MVA como se especifica la norma IEC 60076-1, 2011[28].

- Transformadores de gama media entre 20 MVA y 100 MVA.
- Grandes transformadores de potencia (con paredes de tanque lisas), por encima de 100 MVA.

Mientras que la norma IEEE Std C57.12.00, 2015 nombra diferentes valores.

La tensión del sistema y el tipo de transformador también pueden influir en los niveles de aislamiento y los procedimientos de prueba. Por lo tanto, los transformadores de potencia se dividen en dos clases diferentes, como se indica a continuación[29]:

Los transformadores de potencia Clase I: son cualquiera que no esté categorizado como Clase II. Los transformadores de potencia Clase II: deben incluir transformadores de potencia con devanados de alto voltaje clasificados para 115 kV de voltaje nominal del sistema y superior, y también transformadores de potencia con devanados de alto voltaje clasificados para 69 kV a 115 kV de voltaje nominal del sistema, que tengan una clasificación superior en la placa de identificación de al menos 15 000 kVA para transformadores trifásicos o 10 000 kVA para transformadores monofásicos.

La Tabla 4 presenta valores del nivel básico de aislamiento BIL, tanto para la clase I hasta 242 kV como clase II desde 362 kV en adelante. Se observan valores desde 95 kV hasta 2700 kV según el voltaje del sistema. Estos datos son clave para ajustar los parámetros del generador, ya que definen las exigencias dieléctricas de los transformadores [28].

Tabla 4. Tensiones soportadas estándar.

Clase I ($15 \text{ kV} \leq V_m \leq 242 \text{ kV}$)			Clase II ($V_m \geq 242 \text{ kV}$)		
Maximum system voltage (phase-to-phase) V_m (kV, rms)	Basic lightning impulse insulation level (phase-to-ground) BIL (kV, crest)	Maximum system voltage (phase-to-phase) V_m (kV, rms)	Basic lightning impulse insulation level (phase-to-ground) BIL (kV, peak)		
15	95, 110	362	900, 975, 1050, 1175, 1300		
26.2	125	420	1050, 1175, 1300, 1425		
36.2	150, 170	550	1300, 1425, 1550, 1675, 1800		
48.3	200	800	1800, 1925, 2050		
72.5	250, 325	1200	2100, 2250, 2400, 2550, 2700		
121	350, 450				
145	450, 550				
169	550, 650				
242	650, 750, 825, 900, 975, 1050				

4. METODOLOGÍA

4.1. Diagrama de flujo del sistema

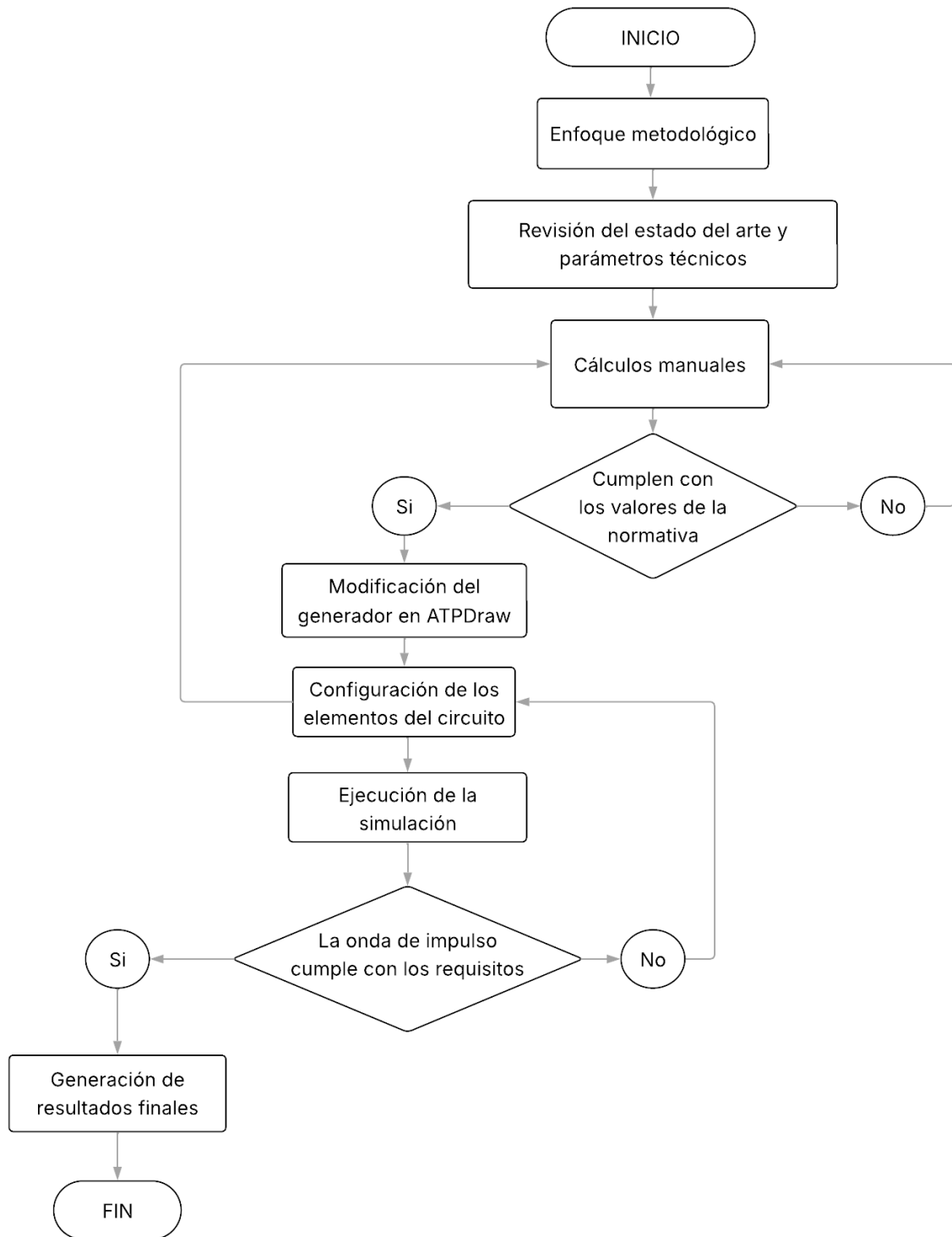


Figura 11. Diagrama de flujo del sistema del modelado.

4.2. Diseño metodológico

Esta investigación se basa en experimentos numéricos. El análisis numérico y la simulación computacional son muy importantes para establecer y verificar el modelo de un generador de multi-impulsos para la prueba de transformadores de potencia. La justificación de este documento se debe a la importancia de realizar las pruebas eléctricas de un transformador de acuerdo con las normas internacionales para garantizar la calidad y fiabilidad del equipo eléctrico en el sistema de energía.

Para el desarrollo del modelo se utilizará el software ATPDraw, una herramienta reconocida en la ingeniería eléctrica para simular transitorios electromagnéticos. Este entorno permitirá construir el circuito del generador de impulso tipo Marx, configurando parámetros como número de etapas, valores de capacitancia y resistencias de frente y cola, a fin de obtener ondas que cumplan con los tiempos exigidas por las normas IEC 60076-3 y IEEE Std C57.98. A través de simulaciones controladas, se podrá analizar la respuesta del sistema, ajustar variables y evaluar el ensayo del impulso.

El diseño metodológico propuesto para esta investigación comprende tres etapas, cada una con ciertas actividades que permitirán la estructuración precisa del modelo.

Fase 1.- Revisión bibliográfica y normativa:

Incluye una revisión de trabajos previos que han incorporado generadores de impulsos en pruebas eléctricas y determinar los parámetros técnicos más relevantes para la generación de la onda.

Fase 2.- Se realiza el modelado y simulación en ATP:

Donde se diseñará un circuito equivalente utilizando un generador de Marx, colocando valores iniciales de capacitancia, resistencia y el voltaje de carga de cada componente eléctrico. La capacitancia modificada, resistencia y el voltaje de carga de todos los componentes dependerán de los resultados de la simulación en otra ronda.

Fase 3.- Validación del modelo:

En esta etapa se realizará la validación técnica del modelo desarrollado en ATPDraw, comparando los resultados obtenidos en las simulaciones con los valores teóricos definidos por las normas IEC 60076-3 e IEEE Std C57.98. Para ello, se analizarán parámetros clave de la onda generada, como el tiempo de frente, el tiempo de cola y el valor pico de tensión,

verificando su estabilidad bajo distintas condiciones de configuración del circuito. La validación permitirá confirmar que el generador multi-impulso simulado reproduce adecuadamente las características requeridas para ensayos en transformadores de potencia.

En esta etapa se realizará la validación técnica del modelo implementado en ATPDraw, comparando los resultados de la simulación con los valores teóricos dados por las normas IEC 60076-3 e IEEE Std C57.98. También se evaluarán algunos valores característicos de la onda generada, como el tiempo de frente, el tiempo de cola o el valor de voltaje pico. La validación demostrará que el generador multi-impulsos simulado sea capaz de generar con precisión las características necesarias para ensayos de transformadores de potencia.

4.3. Revisión del estado del arte y parámetros técnicos

Para crear el modelo computacional del generador de multi-impulsos, es necesario recurrir a referencias normativas y trabajos previos para validar la elección de los parámetros eléctricos. Los requisitos básicos de la onda de impulso utilizada en pruebas de transformadores de potencia están definidos por la norma IEC 60076-3, como el tiempo de frente $T1$, tiempo de cola $T2$, voltaje nominal de prueba V_n y capacitancia del generador $C1$. Estos parámetros garantizan el correcto desempeño de las pruebas de alta tensión y que los transformadores puedan aceptar sobrecargas sin dañar sus operaciones.

En esta Tabla 5 se describen los valores normativos básicos utilizados para modelar el impulso de tipo rayo, utilizado en pruebas de equipos eléctricos de alta tensión, en particular transformadores de potencia. Los valores están especificados en conformidad con normas internacionales, por ejemplo, IEC 60060-1 e IEEE Std 4 y contienen las tolerancias permitidas para asegurar la reproducibilidad y fiabilidad de la prueba. Los rangos resultan de la capacidad nominal del equipo bajo prueba y el diseño tipo del generador de impulsos.

Tabla 5. Modelado de impulsó tipo rayo según la normativa IEC 60076-3.

Categoría	Parámetro	Símbolo	Valor Base	Tolerancia Permitida	Rango Normativo	Descripción Técnica
Forma de onda del impulso	Tiempo de frente	T_1	1,2 μ s	$\pm 30\%$	0,84 – 1,56 μ s	Rango de tiempo solicitado para que la onda alcance el valor máximo
	Tiempo de cola	T_2	50 μ s	$\pm 20\%$	40 – 60 μ s	Rango de tiempo desde el inicio hasta que la onda decae al 50% del valor nominal.
Magnitud de ensayo	Tensión nominal de impulso	V_n	Según el trafo	—	50 – 200 kV	Tensión máxima aplicada durante el impulso, dependiendo del transformador
Componentes del generador	Capacitancia de carga del generador	C_1	Según diseño	—	200 – 2000 nF	Capacidad utilizada en el circuito generador.

Estos valores se utilizarán para diseñar y simular el modelo en ATPDraw, la forma de onda obtenida es representativa y podría usarse en pruebas reales. El trabajo también incluye una revisión en donde se compara las diferentes metodologías disponibles relacionadas con los generadores de impulsos y una comparación con el modelo desarrollado en esta investigación.

4.4. Modelado del generador en ATPDraw

Se utiliza un circuito basado en Marx para modelar el modelo computacional, un sistema que ya se utiliza ampliamente en pruebas de alta tensión para generar pulsos de tiempos cortos. El generador consta de varias etapas, cada una para almacenar la energía en sus condensadores y descargar la energía en una secuencia regulada mediante la operación de interruptores de disparo.

La Tabla 6 presenta un enfoque funcional técnico más detallado, que describe cómo cada uno de los componentes afecta a los parámetros críticos del impulso (tiempo de subida, tiempo de caída, magnitud de la onda, etc.). Tal distinción permite una percepción precisa de la contribución de cada elemento del circuito para alcanzar y garantizar la normativa correcta.

Tabla 6: Funciones técnicas detalladas de los componentes del circuito de impulso.

Componentes	Función Técnica	Parámetros del Impulso
Capacitor principal	Acumula la energía que será liberada en forma de impulso.	Establece la magnitud de la tensión generada.
Capacitor de salida	Estabiliza la forma final de la onda.	Afecta la estabilidad y proporción del impulso.
Resistencia de frente	Regula la velocidad de ascenso de la onda desde 0 al pico máximo.	Registra el tiempo de frente
Resistencia de cola	Amortigua la duración de la fase descendente de la onda.	Define el tiempo de cola
Interruptores de disparo	Sincronizan la descarga de los capacitores de cada etapa.	Aseguran la consistencia y repetibilidad de la forma de onda.

El modelo en sí estará diseñado para asegurarse de que una onda de salida cumpla con los valores normativos con respecto al tiempo de frente y tiempo de cola. Para hacerlo, será necesario cambiar iterativamente su valor, de modo que la onda simulada replique de cerca las características de un impulso tipo rayo.

4.5. Cálculos fundamentales para el modelado

4.5.1. Energía almacenada en el generador

La energía total acumulada en el generador multi-impulso se calculará utilizando la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{2} * C_1 * V_0^2 \quad (2)$$

Donde:

W: es la energía total almacenada en el generador (J).

C1: es la capacitancia de cada etapa (F).

Vo: es la tensión de carga por etapa (V).

Calculo manual de la energía almacenada

Calculamos la energía para distintos niveles de tensión:

Para una tensión de 50 kV

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot (50000)^2$$

$$W = 0,5 \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot 2,5 \times 10^9$$

$$W = 41,25 \text{ J}$$

Para una tensión de 100 kV

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot (100,000)^2$$

$$W = 0,5 \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot 10^1$$

$$W = 165 \text{ J}$$

Para una tensión de 150 kV

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot (150,000)^2$$

$$W = 0,5 \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot 2,25 \times 10^{10}$$

$$W = 371,25 \text{ J}$$

Para una tensión de 200 kV

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot (200,000)^2$$

$$W = 0,5 \cdot 0,033 \times 10^{-6} \cdot 4 \times 10^{10}$$

$$W = 660 \text{ J}$$

4.5.2. Energía almacenada en función del número de etapas

En la Figura 12 se observa la variación de la energía almacenada en el generador de Marx en función del número de etapas que lo componen. Se utiliza la expresión teórica que relaciona directamente la energía acumulada con el número de las etapas la capacitancia de cada una y la tensión de carga. Con el objetivo de visualizar este comportamiento se elaboró una gráfica representativa que muestra cómo varía la energía al incrementar el número de etapas

manteniendo constantes los demás parámetros. Esta representación permite determinar el número óptimo de etapas necesarias para alcanzar los niveles de tensión requeridos en los ensayos de transformadores de potencia. La elaboración de estas gráficas se llevó a cabo mediante un código desarrollado en el lenguaje de programación Python, el cual se encuentra detallado en el Anexo 4.

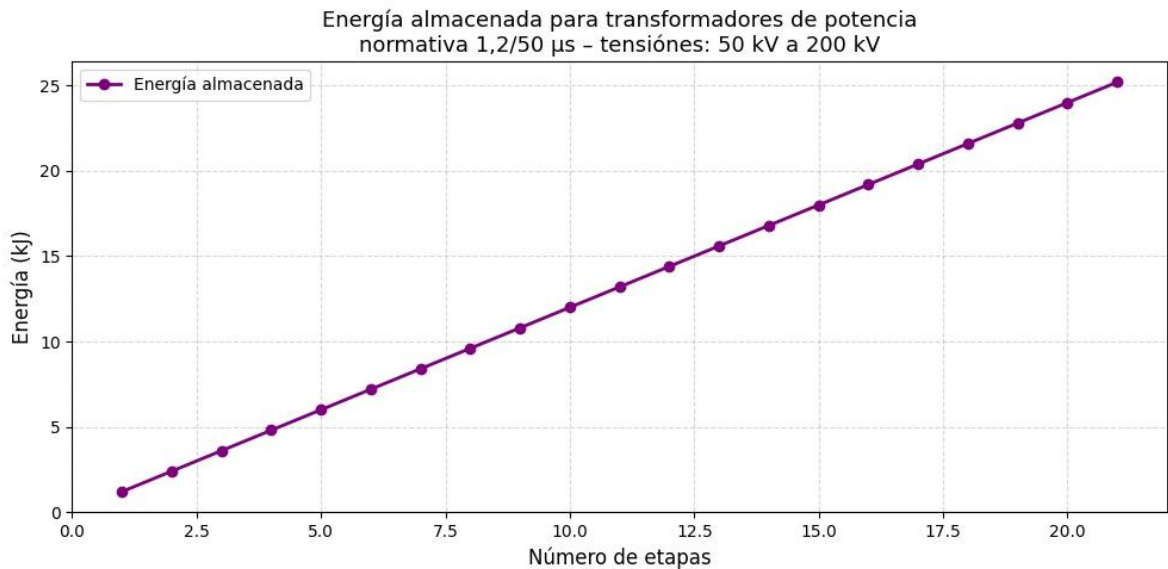


Figura 12. Energía almacenada en función del número de etapas.

4.5.3. Cálculo del voltaje de salida

El voltaje total generado por el sistema como función del número de etapas se calculará mediante la fórmula:

$$V_n = n * V_0 \quad (3)$$

Donde:

V_n : es la tensión total de salida del generador.

n : es el número de etapas del generador de Marx.

V_0 : es la tensión de carga por etapa.

Este voltaje se ajustará en ATPDraw, alcanzando valores de prueba en el rango de 50 kV a 400 kV, con el fin de evaluar el comportamiento del generador para diferentes condiciones de operación.

4.5.4. Configuración de las resistencias de control de la onda

Para asegurar que la onda generada cumpla con los tiempos de frente y cola especificados en la norma IEC 60076-3, se ajustarán los valores de resistencia mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_1 = 3 \cdot R_1 \cdot C_{eq} \quad (4)$$

Despejar la resistencia de frente R1

$$R_1 = \frac{T_1}{3 \cdot C_{eq}} \quad (5)$$

$$T_2 = 0.7 \cdot R_2 \cdot (C_g + C_c) \quad (6)$$

Despeje de resistencia de cola R2

$$R_2 = \frac{T_2}{0.7 \cdot (C_g + C_c)} \quad (7)$$

Estos valores se configurarán en ATPDraw para que la simulación represente con precisión la forma de onda esperada.

4.5.5. Cálculos manuales de los elementos eléctricos del generador de impulso para una etapa

Para garantizar que la onda de impulso cumpla con los valores normativos de 1.2/50 μ s exigidos por la norma IEC 60076-3, se realizó el cálculo manual de los elementos eléctricos de una etapa del generador tipo Marx. Los valores obtenidos coinciden con los utilizados en el modelo de simulación y en la Tabla 7, los cuales fueron ajustados mediante programación en Python y de esta forma justificando el cumplimiento de la similitud tanto con cálculos manuales como los optimizados por el software.

A continuación, se detalla el procedimiento matemático para obtener los valores de los componentes, capacitancias C_g , C_c , C_{eq} y resistencias R_f , R_c usando únicamente fórmulas estándar.

Cálculo de C_c capacitancia de descarga

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (8)$$

Despejando la capacitancia:

$$C_c = \frac{2W}{V^2} \quad (10)$$

$$C_c = \frac{2 \cdot 41.25}{(50000)^2}$$

$$C_c = \frac{82.5}{2.5 \times 10^9}$$

$$C_c = 33 \times 10^{-9} \text{F}$$

$$C_c = 0.033 \mu\text{F}$$

Cálculo de C_g capacitancia del generador

$$C_g = \frac{2W}{V^2} \quad (9)$$

$$C_g = \frac{2 \cdot 10}{(50000)^2}$$

$$C_g = \frac{20}{2.5 \times 10^9}$$

$$C_g = 8 \times 10^{-9} \text{F}$$

$$C_g = 0.008 \mu\text{F}$$

Cálculo de C_{eq} capacitancia equivalente

$$C_{eq} = \frac{C_g \cdot C_c}{C_g + C_c} \quad (11)$$

$$C_{eq} = \frac{8 \cdot 33}{8 + 33} \cdot 10^{-9}$$

$$C_{eq} = \frac{264}{41} \cdot 10^{-9}$$

$$C_{eq} = 6.4390 \times 10^{-9} \text{F}$$

$$C_{eq} = 0.00643 \mu\text{F}$$

Cálculo de R_1 resistencia de frente

$$T_1 = 3 \cdot R_1 \cdot C_{eq} \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{T_1}{3 \cdot C_{eq}} \quad (13)$$

$$R_1 = \frac{1.203 \times 10^{-6}}{3 \cdot 6.4390 \times 10^{-9}}$$

$$R_1 = 62.056\Omega$$

$$R_1 = \frac{1.203}{0.0193}$$

$$R_1 = 62. \Omega$$

Cálculo de R_2 resistencia de cola

$$T_2 = 0.7 \cdot R_2 \cdot (C_g + C_c) \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{T_2}{0.7 \cdot (C_g + C_c)} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{50.1 \times 10^{-6}}{0.7 \cdot 41 \times 10^{-9}}$$

$$R_2 = \frac{50.1}{0.0287}$$

$$R_2 = 1741.03\Omega$$

$$R_2 = 1741 \Omega$$

4.6. Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión

La Figura 13 permite ajustar cómo se comporta la onda de impulso cuando se modifican los niveles de tensión de carga. Se analizará si la onda generada mantiene su forma característica y cumple con los tiempos normativos de frente y cola, lo cual, es fundamental para validar el modelo en ATPDraw. En este caso, se trata de una onda de impulso tipo rayo. La gráfica ha sido generada mediante un código desarrollado en Python el cual se encuentra incluido en el Anexo 5.

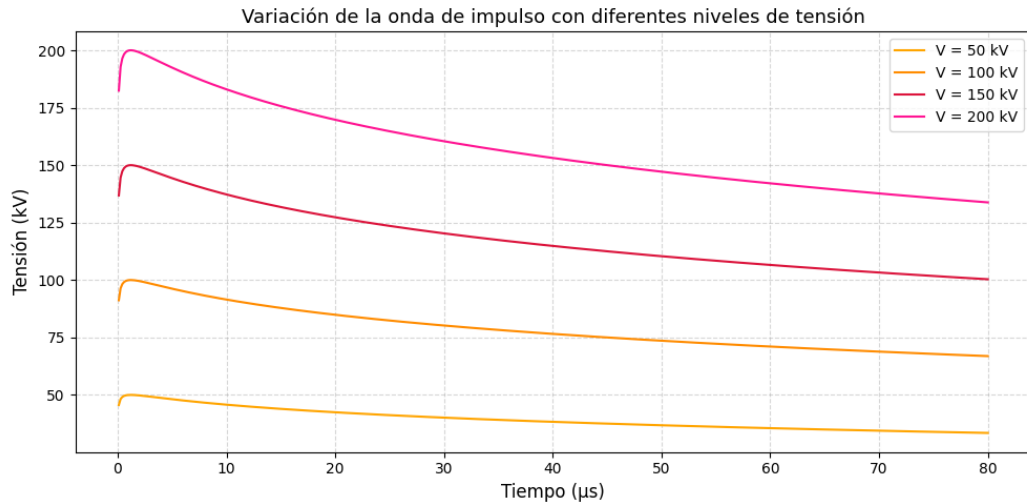


Figura 13. Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión.

4.7. Onda de impulso tipo rayo 1.2/50 μs

La Figura 14 representa la forma de onda que se espera obtener en la simulación en ATPDraw, verificando así que cumpla con los valores normativos de tiempo de frente T1 1.2 μs y tiempo de cola T2 50 μs. La gráfica ha sido realizada mediante un código en Python el cual se incluye en el Anexo 6.

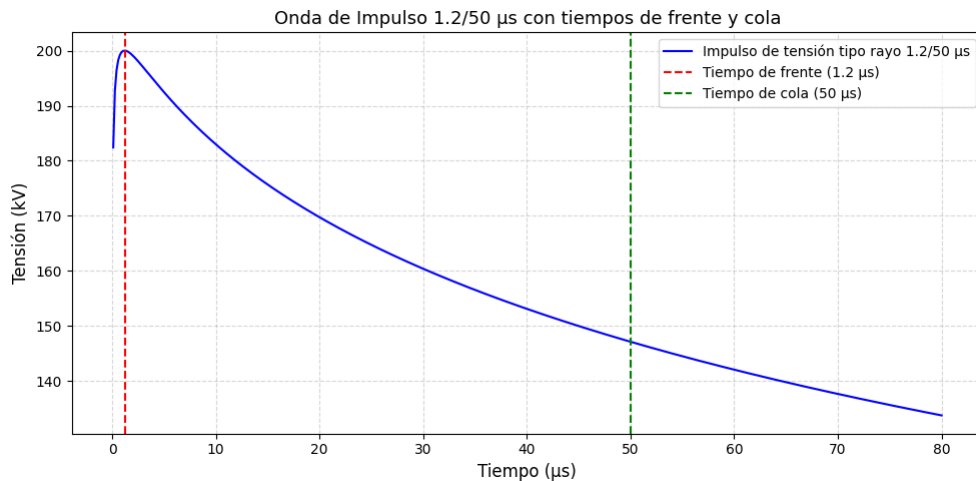


Figura 14. Variación onda de impulso tipo rayo 1.2/50 μs.

Las diferencias para T1 y T2 indican que se podrían detectar pequeños cambios en la configuración del generador de Marx. Tal análisis es de importancia para la evaluación de las pruebas de alta tensión en transformadores. También ayuda a verificar la precisión y fiabilidad del circuito simulado. Se desarrolló un código en Python para la visualización de los datos comparativos. El código utilizado se encuentra en el Anexo 7.

La Tabla 7 presenta una comparación entre los valores teóricos definidos por la normativa para una onda de impulso tipo rayo y los resultados obtenidos mediante simulación en ATPDraw. Este análisis permite validar la precisión del modelo implementado y verificar que los parámetros críticos de la onda.

Tabla 7. Comparación entre parámetros teóricos y simulados de la onda de impulso.

Parámetros	Valor Normativo (Referencia)	Valor Simulado (ATPD)	Tolerancia Permitida
Tiempo de frente	1,2 μ s	1,203 μ s	\pm 30% (0,84 – 1,56 μ s)
Tiempo de cola	50 μ s	50,1 μ s	\pm 20% (40 – 60 μ s)
Tensión pico	50 kV	260 kV	Por diseño
Forma general de la onda	Onda 1,2/50 μ s	Similar con leve atenuación	Evaluación visual

4.8. Etapas del modelado en ATPDraw

En la Tabla 8 se presenta las etapas desarrolladas durante la modelización y simulación en ATPDraw.

Tabla 8. Fases del modelado y simulación del generador de impulsos.

Etapa	Descripción
Configuración del entorno	Definición del tipo de análisis transitorio electromagnético Tiempo de simulación de 0 - 100 μ s, resolución de muestreo 0.1 μ s
Construcción del circuito	Diseño del generador tipo Marx con capacitores, resistencias de frente y cola, interruptores y carga equivalente del transformador.
Simulación en ATPDraw	Realización de simulaciones bajo distintos parámetros establecidos y ajuste de los componentes para generar impulsos conforme a norma IEC.
Optimización y validación	Ajuste de parámetros mediante algoritmo en Python, validación mediante comparación con modelos teóricos y análisis de tiempos de frente y cola.

4.8.1. Preparación del entorno de simulación

Antes de desarrollar el modelo, los parámetros para la simulación se prepararán en ATPDraw. Esto implica elegir el modo de análisis, establecer el tiempo de la simulación y listar los elementos que compondrán el circuito.

Tipo de análisis: Se realizará un análisis de transitorios electromagnéticos para investigar el rendimiento dinámico del generador de impulsos.

Tiempo de simulación: Se establece un valor entre 0 y 100 μs para cubrir el transitorio de la onda de impulso.

Frecuencia de muestreo: Se establecerá una resolución de 0.1 μs para obtener datos detallados de la evolución de la tensión.

4.8.2. Rediseño del circuito del generador de Marx

El modelo del generador multi-impulso será elaborado en ATPDraw basado en el esquema de Marx el cual es destacado por permitir la acumular carga en capacitores y su posterior descarga controlada para la generación de pulsos de alta tensión.

Componentes principales que se distinguirán en ATPDraw:

1. **Fuente de alta tensión:** representa el alimentador del generador el cual establece valores de carga para 50 kV, 100 kV, 150 kV y 200 kV con el fin de evaluar el desempeño del modelo bajo las diferentes condiciones.
2. **Capacitadores de almacenamiento (C1):** suministrará la energía acumulada capaz de generar un impulso. En donde tiene configuraciones con valores entre 500 nF y hasta los 2000 nF según sus cálculos establecidos.
3. **Interruptores de disparo:** registrarán las descargas sincronizadas en los capacitores. Serán elementos con activación controlada según el principio fundamental.
4. **Resistencia de frente y de Cola (R1 y R2):** tendrán una función de ajustar la forma de onda generada mediante la tensión prevista y de esta forma cumpliendo las normativas como la IEC 60076-3.
5. **Transformador de potencia:** se representará utilizando un circuito equivalente de impedancia para simular un modelo de transformador real en modo autotransformador.

4.8.3. Configuración de los parámetros eléctricos en ATPDraw

Cada uno de los componentes del circuito será ajustado cuidadosamente para garantizar que la onda de impulso generada cumpla con los valores establecidos en las normas. Para lograr esto, se realizarán los siguientes cálculos.

4.9. Ejecución de la simulación en ATPDraw

Una vez configurado el modelo en ATPDraw, se procederá a ejecutar la simulación con los diferentes niveles de tensión de carga en donde se analizarán las siguientes variables:

- **Forma de la onda generada:** Se comprobará si la onda de impulso cumple con los tiempos de frente y cola especificados, 1,2/50 μ s.
- **Energía entregada a la carga:** Se calculará la energía efectiva transferida al transformador de potencia.
- **Estabilidad de la descarga:** Se evaluará si la descarga del generador se produce de manera semejante en cada una de las etapas del sistema.

Para analizar estos resultados, se generarán gráficos de la onda de impulso obtenida en la simulación.

4.10. Análisis de resultados y optimización del modelo

Los resultados alcanzados en la simulación serán comparados con los valores teóricos calculados previamente. Logrando así identificar las posibles desviaciones en la forma de la onda generada, de esta forma llegando hacer los ajustes en los valores de capacitancia y resistencia para optimizar el desempeño del generador.

Entre los criterios de optimización se incluyen:

1. **Cumplimiento de los tiempos normativos:** Se verificará que los valores de 1,2 y 50 μ s obtenidos en la simulación sean consistentes con los de la norma IEC 60076-3.
2. **Reducción del tiempo de calibración del generador:** Se examinará la viabilidad de reducir los tiempos de calibración del sistema utilizando configuraciones óptimas mediante el software ATPDraw.

Se experimentará si el sistema presenta un buen comportamiento para otros voltajes de carga en el generador y una vez optimizado se lograrían encontrar los gráficos finales de la onda

de impulso lograda para compararlos con los niveles de umbral. La simulación en ATPDraw permitirá verificar el correcto funcionamiento del generador Marx, de modo que las pruebas en transformadores de potencia en donde se realicen de manera más eficiente y precisa. Con este modelo computarizarle, se puede configurar la topología del generador de Marx de tal manera que la forma de onda producida esté de acuerdo con los estándares internacionales, normativa IEC 60076-3.

4.10.1. Evaluación de la variación de tensión de carga

Se realizará una simulación para varios valores de la tensión de carga del generador en donde se establecerá una relación entre el tiempo de elevación de la tensión de carga y la tensión de carga misma para asegurar que la simulación se aproxime a lo que se observa durante las pruebas reales.

Los valores de capacitancia y resistencia se modificarán para aumentar la forma de onda generada y mejorar la precisión en el modelo de esta manera llegando a validar estos parámetros que nos permitirá comprobar el rendimiento del generador de multiimpulsos diseñado en ATPDraw y validar su uso para pruebas eléctricas con transformadores de potencia.

4.10.2. Validación del modelo y análisis de resultados

Para garantizar la precisión del modelo desarrollado en el software ATPDraw, se implementará a un proceso de validación basado en la comparación de los resultados de la simulación con cálculos teóricos y parámetros normativos.

4.10.3. Comparación de la onda generada con la forma de onda normativa

Se analizará si la onda de impulso simulada cumple con los tiempos normativos de frente y cola establecidos en IEC 60076-3.

Se evaluarán desviaciones en la amplitud de la onda y su impacto en la precisión de los ensayos en donde se verificará si la onda generada se mantiene una forma estable sin oscilaciones no deseadas por lo que garantizara la confiabilidad del modelo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Modelo del generador multi impulso realizado en ATPDraw

En la Figura 15 se muestra el generador multi-impulsos modelado en ATPDraw, está diseñado para simular sobretensiones transitorias, como las causadas por descargas atmosféricas y se utiliza principalmente en pruebas de equipos eléctricos de alta tensión. El circuito está conformado por varias etapas desde la etapa 1 a la etapa 7, incluye una fuente de voltaje, un capacitor, resistencias R1 y R2 y un interruptor. En la fase de carga los capacitores se cargan en paralelo posteriormente, mediante la activación secuencial de los interruptores, se conectan en serie para generar un impulso de alta tensión y de esta forma la configuración permite alcanzar niveles de voltaje elevados con una representación de la onda controlada y adecuada para ensayos dieléctricos.

Las resistencias R1 y R2 son elementos clave para ajustar el perfil de la onda generada especialmente el tiempo de frente y el tiempo de cola del impulso. Gracias a este control, se puede adaptar la forma del impulso a los valores requeridos por las normas y la simulación de este generador en ATPDraw permite analizar el comportamiento transitorio de la onda de impulso en distintas condiciones de carga facilitando así su diseño y ajuste sin necesidad de recurrir de inmediato a ensayos físicos. Este tipo de generador cumple con los requisitos establecidos en normativas internacionales como la IEC 60076-3 convirtiéndola en una herramienta confiable para el desarrollo y validación de pruebas de alta tensión en laboratorios especializados.

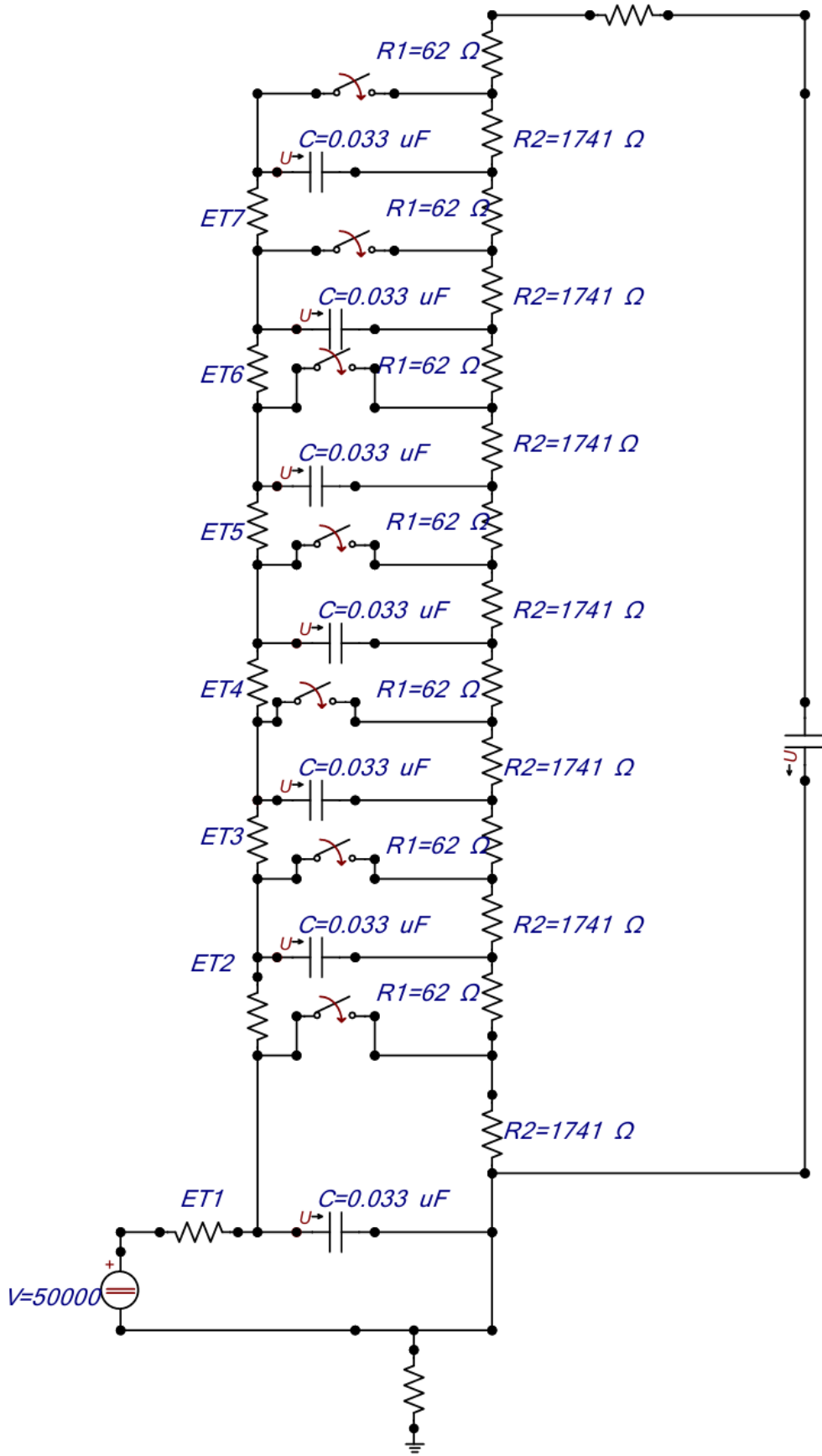


Figura 15. Modelado del generador Marx en ATPDraw.

5.2. Validación de la onda de impulso generada

5.2.1. Comparación con la forma de onda normativa IEC 60076-3

En la Figura 16 se observa la forma de la onda para validar el impulso generado que cumple con los parámetros establecidos por la norma IEC 60076-3. Se observa la subida del voltaje desde cero hasta su valor máximo, lo cual corresponde al tiempo de frente T_1 , que representa la rapidez con la que se alcanza el pico del impulso. Posteriormente, se aprecia el descenso de voltaje, correspondiente al tiempo de cola T_2 , que indica el tiempo que tarda la señal en volver a valores cercanos a cero. Estos dos parámetros T_1 y T_2 son fundamentales para evaluar si la forma de onda cumple con los requisitos normativos tanto en velocidad de ascenso como en duración de la señal. También se marcan claramente estos tiempos de referencia, lo que permite comparar de forma directa la respuesta del modelo simulado frente a los valores estándar exigidos para pruebas dieléctricas en transformadores de potencia.

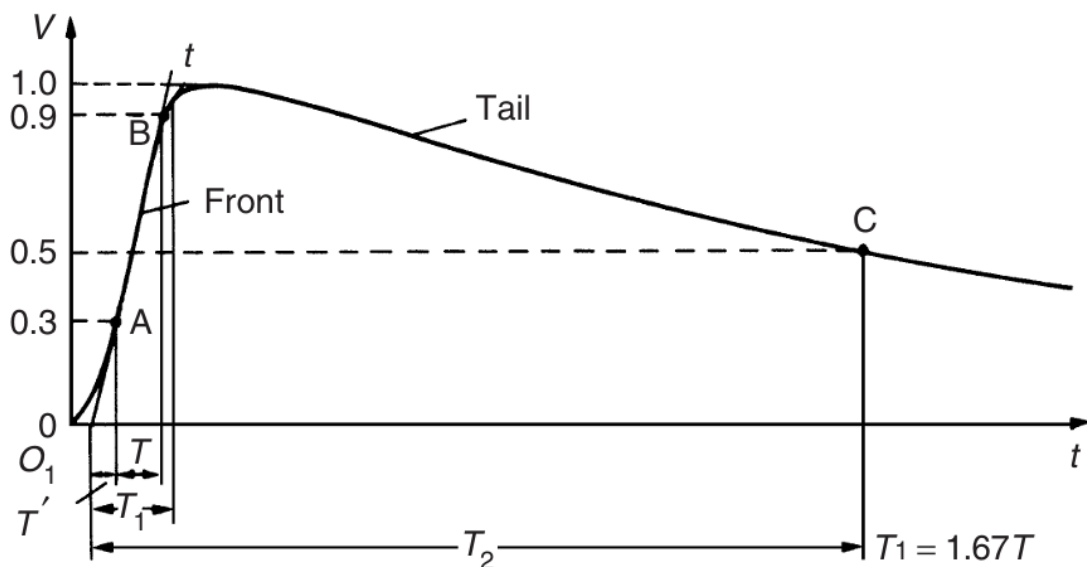


Figura 16. Forma de onda de impulso normalizada tipo 1.2/50 μ s según IEC 60076-3.

5.2.2. Presentación de la gráfica de la onda generada en ATPDraw

La Figura 17 muestra la forma de onda obtenida en la simulación de ATPDraw, utilizando el modelo computacional del generador de multi-impulsos desarrollado, en la gráfica se aprecia claramente un impulso de voltaje con un ascenso abrupto que alcanza su valor pico en aproximadamente 1.203 μ s. Posteriormente la señal entra en una fase de decaimiento más prolongada correspondiente al tiempo de cola, lo cual es característico en este tipo de impulsos y fundamental para evaluar su cumplimiento con los estándares de la prueba.

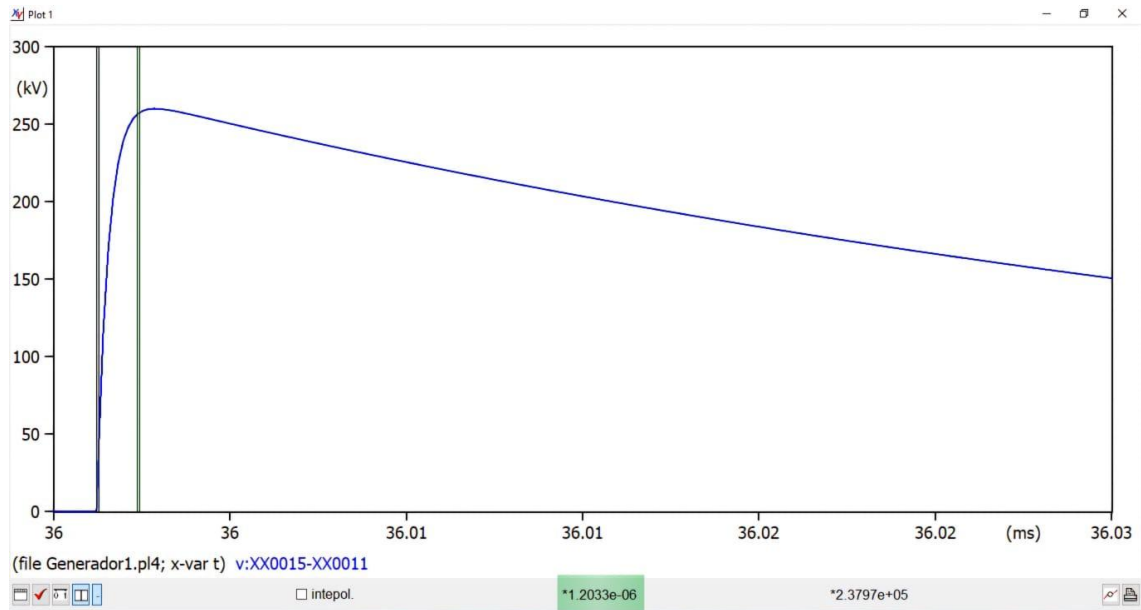


Figura 17. Forma de onda de impulso mediante simulación en ATPDraw, con tiempo de frente de 1,203.

El tiempo de cola T_2 realizada en ATPDraw se presenta en la Figura 18 coincide con la norma IEC 60076-3. Esta norma indica que, para un impulso tipo rayo, el tiempo de cola debe ser de 50 μs . En la simulación, se observa que el modelo cumple con este parámetro T_2 de 50,1 μs , lo que indica que la pendiente de descenso fue bien controlada.

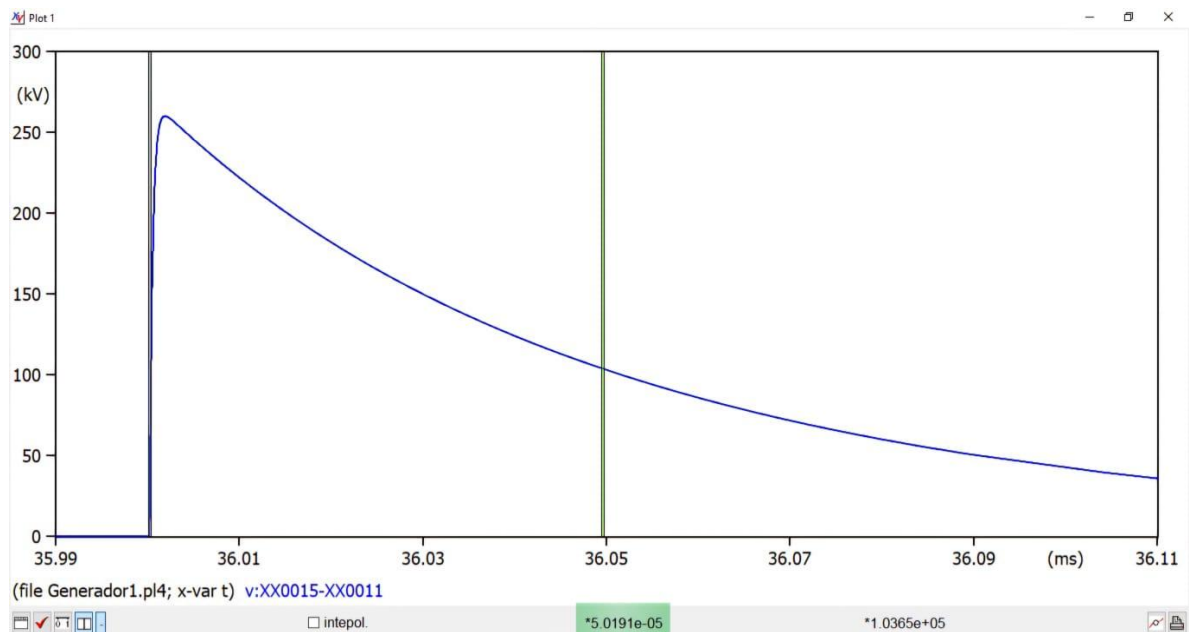


Figura 18. Forma de onda de impulso simulada en ATPdraw con un tiempo de cola de 50,1 μs

5.2.3. Comparación de los tiempos de frente T1 y cola T2 con los valores normativos

Con la finalidad de verificar la conformidad del generador multi-impulso simulado respecto a la normativa IEC 60076-3, se realizó un análisis detallado de los tiempos característicos de la onda de impulso en donde el tiempo de subida T1 y el de descenso T2 fueron calculados a partir de la configuración del circuito haciendo uso de expresiones que relacionan las propiedades eléctricas de los componentes del sistema, tales como la capacitancia y la resistencia.

En la Tabla 9 se presentan los valores utilizados para el cálculo de estos tiempos, dichos valores han sido obtenidos a partir de fuentes normativas y bibliográficas reconocidas, entre ellas la norma IEC 60060-1:2010 sobre técnicas de ensayo en alta tensión, así como el libro High Voltage Engineering: Fundamentals de Kuffel, Zaengl y Kuffel, referencia clave en el campo de la ingeniería de alta tensión.

Adicionalmente, algunos de los parámetros mostrados en la Tabla 9, como la capacitancia equivalente y los tiempos característicos de la onda, fueron calculados mediante un algoritmo desarrollado en el lenguaje de programación Python el cual se encuentra en el Anexo 7, por lo que la integración de estos datos permite validar los criterios de diseño y simulación del circuito generador de impulso, asegurando que los resultados obtenidos se encuentren dentro de las tolerancias establecidas por la normativa técnica vigente.

Los valores fueron determinados mediante cálculos manuales utilizando las ecuaciones 5 y 6. Estos resultados coincidieron con los datos establecidos mediante el software mencionado anteriormente, por lo que pueden considerarse válidos en la simulación.

Se realizó la optimización de los elementos del circuito utilizados en el modelado del generador de impulso mediante un algoritmo desarrollado en Python, cuyos resultados se presentan en el Anexo 5.

Tabla 9. Datos establecidos para la simulación.

Parámetro	Símbolo	Valor utilizado	Unidad
Capacitancia del generador	Cg	0,033	μF
Capacitancia del condensador descarga	Cc	0,008	μF
Capacitancia equivalente	Ceq	0,0064	μF

Parámetro	Símbolo	Valor utilizado	Unidad
Resistencia de frente	Rf	62	Ω
Resistencia de cola	Rc	1741	Ω
Tiempo de frente	T1	1.2	μs
Suma de capacitancias (cola)	Ct= Cg+ Cc	4.1	μF
Tiempo de cola	T2	50	μs

A continuación, se presenta los cálculos de los parámetros de T1 y T2.

- Capacitancia Equivalente:

$$C_{eq} = \frac{C_g \times C_c}{C_g + C_c} \quad (16)$$

$$C_{eq} = \frac{(0,008 \mu F) \times (0,033 \mu F)}{(0,008 \mu F) + (0,033 \mu F)}$$

$$C_{eq} = \frac{2.64 \times 10^{-16}}{4.1 \times 10^{-8}}$$

$$C_{eq} = 6.439 \times 10^{-9}$$

$$C_{eq} = 0.00643 \mu F$$

- Tiempo de Frente:

$$T_1 = 3.0 \times R_f \times C_{eq} \quad (17)$$

$$T_1 = 3.0 \times 62 \times (6.439 \times 10^{-9})$$

$$T_1 = 3.0 \times 3.993 \times 10^{-7}$$

$$T_1 = 1.2 \times 10^{-6} s = 1.205 \mu s$$

- Tiempo de Cola:

$$T_2 = 0.7 \times (C_g + C_c) \times R_c \quad (18)$$

$$C_t = C_g + C_c = (0,008 \mu F) + (0,033 \mu F)$$

$$C_t = 4.1 \times 10^{-8} F$$

$$T_2 = 0.7 \times (4.1 \times 10^{-8}) \times 1741$$

$$T_2 = 0.7 \times 7.131 \times 10^{-5}$$

$$T_2 = 4.991 \times 10^{-5} s = 50,12 \mu s$$

5.3. Análisis de desviaciones y justificación de posibles diferencias

En la Tabla 10 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y los analizados con otros modelos de generadores de impulso [30], [31], [32]. Esta tabla comparativa fue elaborada con el fin de evaluar el nivel de optimización del modelo propuesto y evidenciar que los márgenes de error obtenidos en donde se mantienen significativamente bajos en relación con otros enfoques publicados. La comparación se centra en los tiempos de frente T1 y T2, los cuales deben ajustarse a los valores establecidos por la norma IEC 60076-3 para garantizar la validez técnica de la simulación.

Los análisis muestran que todas las opciones están dentro del rango permitido por las regulaciones el cual confirma su viabilidad general, pero aún existen algunas diferencias debido a sus propias características incluyendo la estructura del circuito, la forma de identificación de parámetros, el nivel de modelado, etc.

La desviación en los modelos de [31] caso B se muestra que tienen los errores más profundos, especialmente para el tiempo de cola 4.72 %, posiblemente debido a las reducciones del modelado matemático o a los valores no optimizados de la resistencia de cola R2. Por otro lado, el modelo de [32] si bien cumple adecuadamente con el tiempo de cola 1.00 % de error, presenta una desviación negativa en el tiempo de frente -8.33 %, lo cual sugiere una respuesta más rápida durante la fase de ascenso del impulso, posiblemente atribuible a un valor bajo de resistencia de frente R1.

El análisis arrojó desviaciones mínimas respecto a los valores normativos, con un 0,013 % para el tiempo de frente T1 y 0,011 % para el tiempo de cola T2, lo que demuestra una alta precisión en la forma de la onda generada. Estos resultados también reflejan una adecuada calibración de los componentes R-C del circuito, garantizando la fidelidad del modelo frente a las condiciones técnicas requeridas por las normas internacionales.

Tabla 10. Comparación de modelos de impulso.

Modelo / Fuente	T₁ (μs)	T₂ (μs)	Error T₁ [%]	Error T₂ [%]
Simulación de un generador de impulso[30]	1.202	50.435	0.17	0.87
Simulador normalizado (caso A)[31]	1.219	50.527	1.58	1.05
Simulador normalizado (caso B)[31]	1.219	52.361	1.58	4.72
Determining ideal impulse generator[32]	1.100	50.500	-8.33	1.00
Propuesto (modelo optimizado en Python)	1.203	50.1	0.25	0.2

5.4. Evaluación de la energía almacenada y entregada

Esta representación muestra la respuesta del modelado en donde se revela varios impulsos según el voltaje aplicado, los cuales son de; 50 kV, 100 kV, 150 kV y 200 kV. Sin embargo, es notable que la forma del impulso es la misma en todos los casos a pesar de que la energía entregada se hace cada vez más larga y que el valor máximo y la energía total suministrada aumentan de manera muy conveniente con el voltaje generado se muestra en la Tabla 11.

Este resultado es una confirmación del enfoque teórico propuesto y demuestra que el contenido energético en el modelado puede depender linealmente del voltaje de carga, tal como se observa en la ecuación 2.

Tabla 11. Valores calculados de voltaje frente a energía.

Voltaje (kV)	Energía (J)	Energía total (J)
50	41,25	288,75
100	165	1155
150	371,25	2598,75
200	660	4620

Es importante entender cómo el generador podría conectarse a otros voltajes sin modificar la simulación considerando cambios en la carga. De esta manera la frecuencia de potencia puede variar y se puede proporcionar estabilidad de la forma de onda, por lo tanto, se puede aumentar la capacidad de prueba de aislamiento.

5.5. Análisis de la relación entre el nivel de tensión y la energía disponible

Un generador de impulsos múltiples de capacitancia constante almacena energía que varía en el voltaje de carga, esto significa que, por cada duplicación del voltaje, la energía aumenta por un factor progresivo, como se muestra en la Tabla 12.

Esta conexión permite que se adapte independientemente a varios requisitos de prueba del generador sin alterar su diseño en general, proporcionando una mayor entrega de energía. Por lo tanto, el rendimiento del diseño puede ajustarse eficientemente a las pruebas requeridas.

Tabla 12. Relación entre tensión de carga y energía almacenada.

Tensión de carga (kV)	Energía almacenada (J)	Análisis técnico
50	1250	Energía baja, adecuada para pruebas preliminares o transformadores de baja potencia.
100	5000	Útil para pruebas estándar en laboratorio.
150	11250	Permitido para ensayos exigentes y con mayor margen de tensión.
200	20000	Ideal para transformadores de gran capacidad.

5.6. Análisis de estabilidad y comportamiento del generador multi-impulso

5.6.1. Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de tensión

- Presentación de gráficos que muestran cómo varía la onda de impulso cuando se modifican los niveles de carga del generador.

En la Figura 19 se muestra la simulación en ATPDraw de una onda de impulso a 50 kV en donde se puede observar un frente abrupto seguido de una cola exponencial así reflejando el

comportamiento característico del generador por lo que la señal alcanza un pico cercano a 260 kV, indicando una respuesta transitoria adecuada.

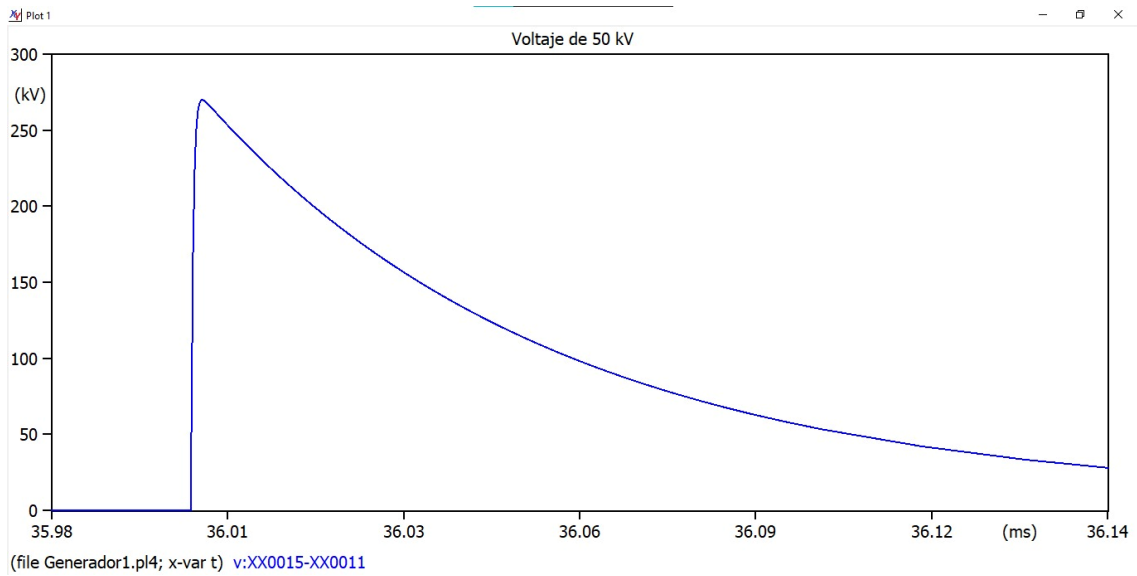


Figura 19. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 50 kV.

La Figura 20 muestra la simulación de una onda de impulso a 100 kV obtenida en el software ATPDraw, donde el impulso muestra un ascenso casi vertical y un decaimiento progresivo reflejando una adecuada configuración del circuito. Sin embargo, el valor pico alcanza aproximadamente 550 kV por lo que confirma una respuesta proporcional al nivel de tensión aplicado.

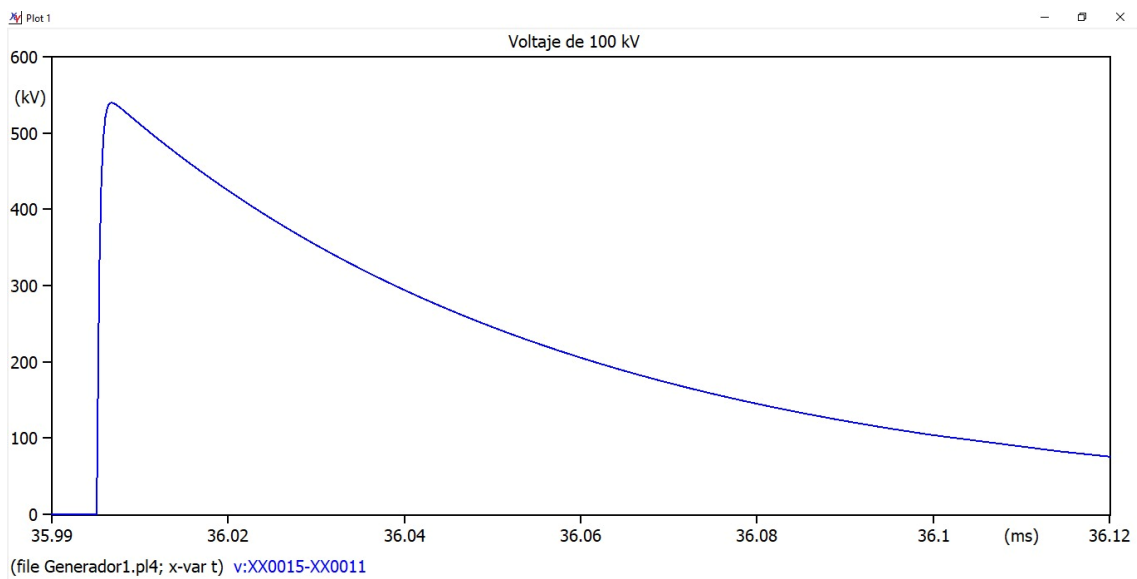


Figura 20. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 100 kV.

La Figura 21 muestra la respuesta del generador multi-impulso a un nivel de tensión de 150 kV simulado en ATPDraw. Se identifica un impulso con un ascenso brusco y una caída exponencial controlada indicando un desempeño estable del sistema. El valor máximo registrado es cercano a 195 kV lo cual es coherente con la onda esperada.

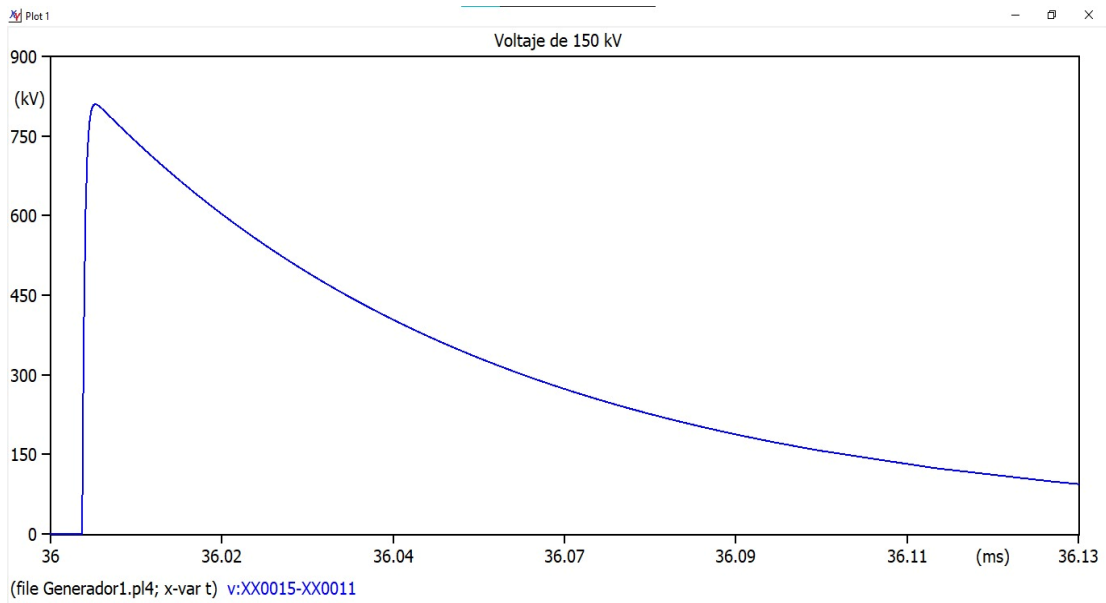


Figura 21. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 150 kV.

La Figura 22 presenta la respuesta del generador multi-impulso a un nivel de tensión de 200 kV bajo las mismas condiciones de modelado. En este caso, el impulso alcanza un pico aproximado de 260 kV, evidenciando que la forma de onda generada corresponde al valor de tensión previsto en el escenario simulado.

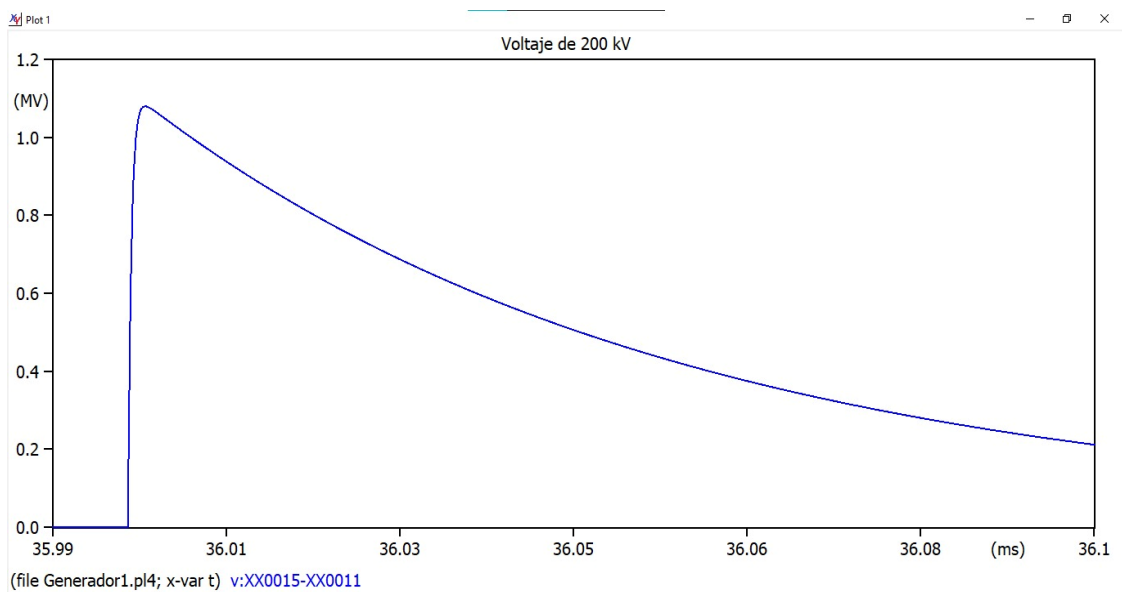


Figura 22. Onda de impulso simulada para nivel de tensión de 200 kV.

A medida que se incrementa el nivel de tensión de la carga, se evidencia una elevación proporcional en el valor pico del impulso manteniéndose constante la forma característica de la señal. Esta proporcionalidad confirma que el sistema responde de manera lineal en cuanto a magnitud y cuadrática respecto a la energía almacenada. Además, los intervalos de tiempo correspondientes T_1 , T_2 aparecen en el orden temporal requerido lo que implica que el generador puede ajustarse a los parámetros de trabajo del generador sin pérdida de precisión.

5.7. Impacto del ajuste de resistencias en la precisión de la onda generada

Las simulaciones a continuación registradas de diferentes modelos comparados aclaran cómo la resistencia en serie R_1 y la resistencia en paralelo R_2 influyen en la forma y precisión de la onda de impulso emergente.

5.7.1. Evaluación de cómo los valores de R_1 y R_2 afectan el tiempo de frente y cola.

La resistencia R_1 , correspondiente a la resistencia frontal, controla el momento en que se obtiene el pico de voltaje. Los modelos con valores más altos, como [30], [31], [32] 350–355 Ω , muestran tiempos de frente similares más amplios en comparación con aquellos con R_1 más baja como el propuesto aquí 62 Ω , y la velocidad de ascenso también es menor y menos controlada. Esto favorece un mejor cumplimiento con el tiempo de frente normativo definido por la IEC 60076-3. En este sentido el modelo sobresale en ajustar este parámetro exactamente, permitiendo una desviación de T_1 de 0.013%.

Para la resistencia de cola R_2 determina la tasa de caída de la onda lo que afectará el tiempo de cola T_2 . Se puede observar que para una resistencia aumentada a 1741 Ω , en donde se reduce de forma controlada el voltaje. Por lo tanto, la disipación de energía es más gradual para evitar el colapso y así aumentar la vida útil y el nivel de estabilidad de la onda.

Finalmente, mediante un ajuste preciso de las resistencias R_1 y R_2 , se logró cumplir con los estándares normativos establecidos, asegurando una forma de onda generada por el modelo. Estas resistencias fueron ajustadas de manera iterativa utilizando simulaciones con tolerancias normativas, lo cual permitió optimizar el comportamiento dinámico del sistema. En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos con el modelo optimizado propuesto en Python. Este modelo se detalla en el Anexo 7, donde se encuentra el algoritmo empleado para el ajuste automático de parámetros. La comparación de resultados evidencia una mejora significativa en los tiempos de frente y de cola, en relación con los métodos anteriores, alcanzando así

minimizar los tiempos característicos del impulso sin comprometer la precisión normativa de la forma de onda.

Tabla 13. Comparación de parámetros en modelos de generadores de impulso.

Modelo / Fuente	Cg (μF)	Cc (μF)	Rs1 (Ω)	Rp (Ω)
Simulación de un generador de impulso [30]	0.025	0.012	350	2400
Simulador normalizado (caso A) [31]	0.025	0.0012	355	2400
Simulador normalizado (caso B) [31]	0.025	0.0012	355	2500
Determining ideal impulse generator [32]	0.596	0.500	90	249
Propuesto (modelo optimizado en Python)	0.008	0.033	62	1741

La tabla busca comparar resistencias y capacitancias que determinan la forma de las ondas de impulso de todos los modelos. El objetivo principal es encontrar los valores de los parámetros que resultarían en tiempos de frente y cola más sensibles y estables validando la normativa IEC 60076-3.

5.8. Generador multi-impulsos onda de impulso negativo

El generador multi-impulsos de onda negativa, tiene como objetivo reproducir las condiciones operativas de la sobretensión inversa que podría afectar a los transformadores de potencia durante descargas atmosféricas de polaridad negativa o fallos internos. Dicha simulación permite considerar el comportamiento del aislamiento bajo condiciones críticas, también mejora la precisión del modelo con impulsos negativos. Por lo tanto, se asegura una evaluación más realista y detallada de los dispositivos bajo prueba.

La simulación presentada corresponde a un impulso de tensión de polaridad negativa, generado a través de un modelo computacional basado en un generador tipo Marx. Este tipo de señal representa una condición crítica de prueba en los ensayos dieléctricos de transformadores de

potencia, ya que simula fenómenos reales como descargas atmosféricas negativas o fallas a tierra que pueden afectar severamente el aislamiento del equipo.

La consideración de un impulso negativo se debe a la comparación de las tensiones de voltaje y la evaluación del comportamiento del transformador bajo condiciones inversas polaridades negativas donde la tensión eléctrica sobre los elementos aislantes es máxima.

En la Figura 23 se muestra la simulación de una onda de impulso de polaridad negativa obtenida por un circuito tipo Marx, utilizado para simular sobretensiones inversas. Dado que también existe un tiempo de frente de 1,207 con un impulso de voltaje de - 255 kV, se requiere para métodos de defensa contra fallos a tierra y descargas en tales condiciones se evalúa el rendimiento del aislamiento en el transformador frente a polaridades opuestas a la normal en eventos críticos.

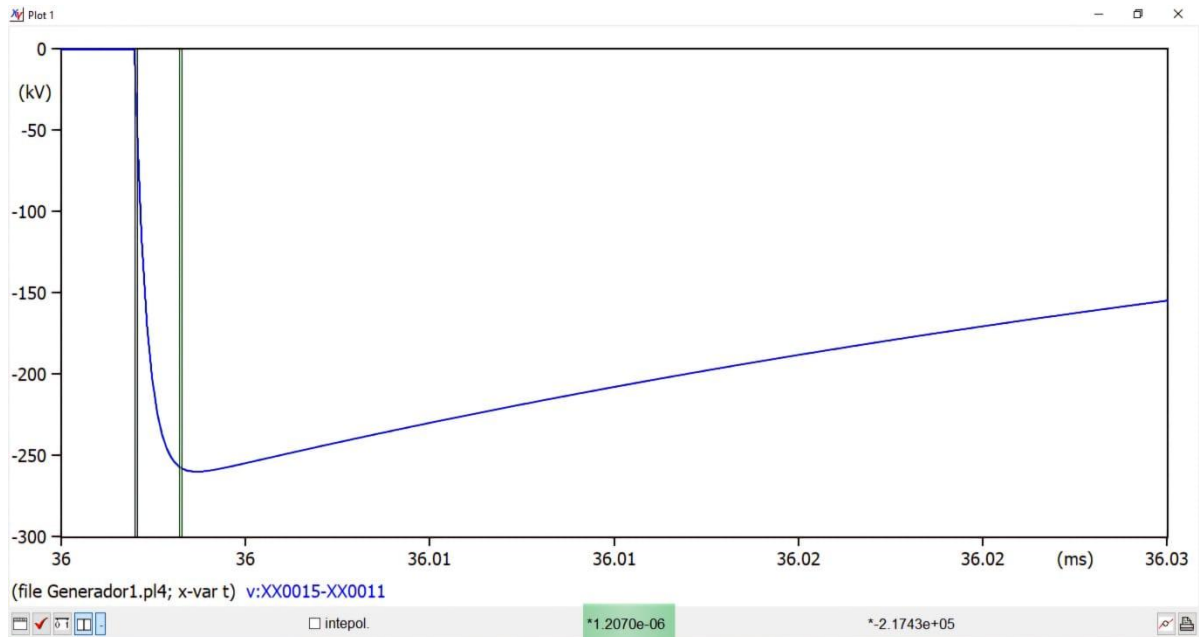


Figura 23. Respuesta transitoria de generador tipo Marx ante impulso negativo T1 1,207 us.

En la Figura 24 se observa una caída brusca de tensión hasta aproximadamente -255 kV, lo cual indica que el generador ha alcanzado un valor de cresta significativo en un tiempo muy corto. Este comportamiento es típico para el impulso tipo rayo establecido por la norma IEC 60076-3, con un tiempo de cola de aproximadamente 50,1 μ s. La transición rápida desde el nivel cero hasta el valor pico negativo confirma que el modelo simulado tiene una adecuada configuración de los elementos de disparo y de control de la descarga.

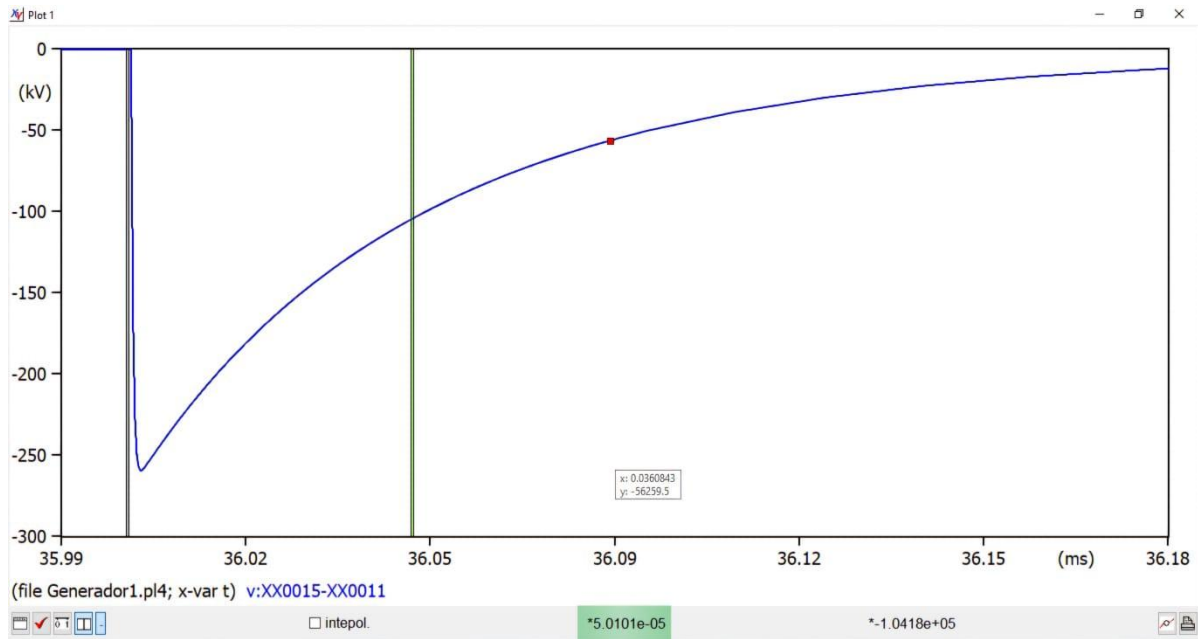


Figura 24. Respuesta transitoria de generador tipo Marx ante impulso negativo T2 50,1 us.

5.9. Evaluación de la mejora en la reducción del error en comparación con la simulación inicial

Comparación con otros autores

Una parte fundamental de la validación del modelo propuesto en este estudio fue la comparación con trabajos previos realizados por otros autores, especialmente en relación con la forma de la onda de impulso, los tiempos de frente T1 y cola T2, así como la configuración de los elementos del generador de impulsos.

- Simulación de un generador de impulsos de voltaje, para pruebas de aislamiento de materiales dieléctricos y dispositivos.

En la Figura 25 se observa una onda de impulso de tensión positiva que alcanza un valor pico de aproximadamente 260 kV, con un tiempo de frente de 1,207 μ s, lo cual cumple con el margen establecido por la norma IEC 60076-3 ± 30 % para T₁.

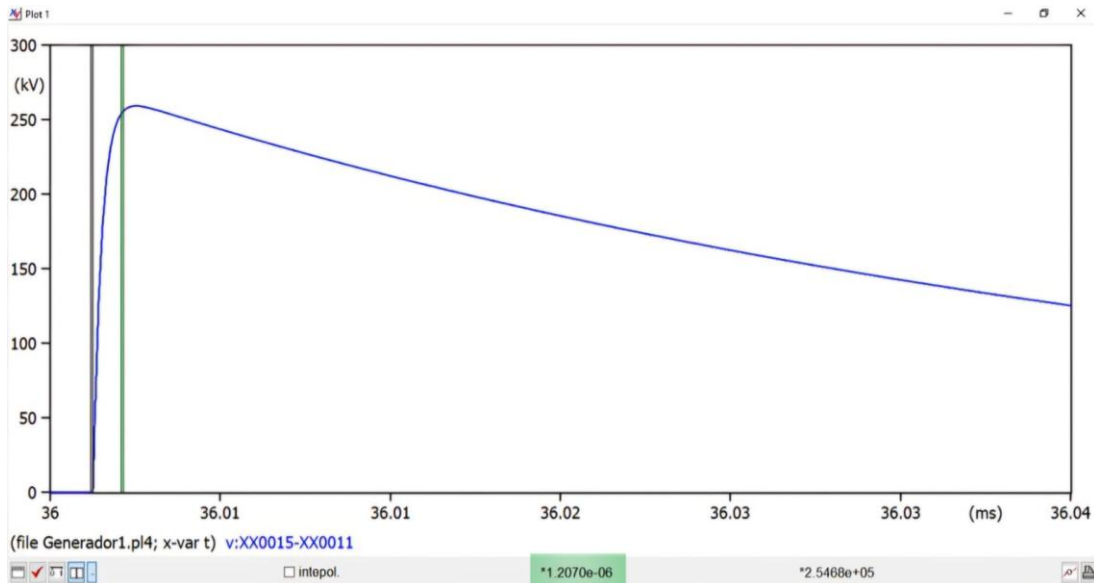


Figura 25. Análisis de la respuesta de voltaje frente a un impulso de alta tensión para T1.

En la Figura 26 se observa el cumplimiento del tiempo de cola T_2 , con un descenso al 50 % del valor pico aproximadamente 255 kV alcanzado en 50,46 μ s, valor que se encuentra dentro del margen permitido por la norma IEC 60076-3 ± 20 % para T_2 .

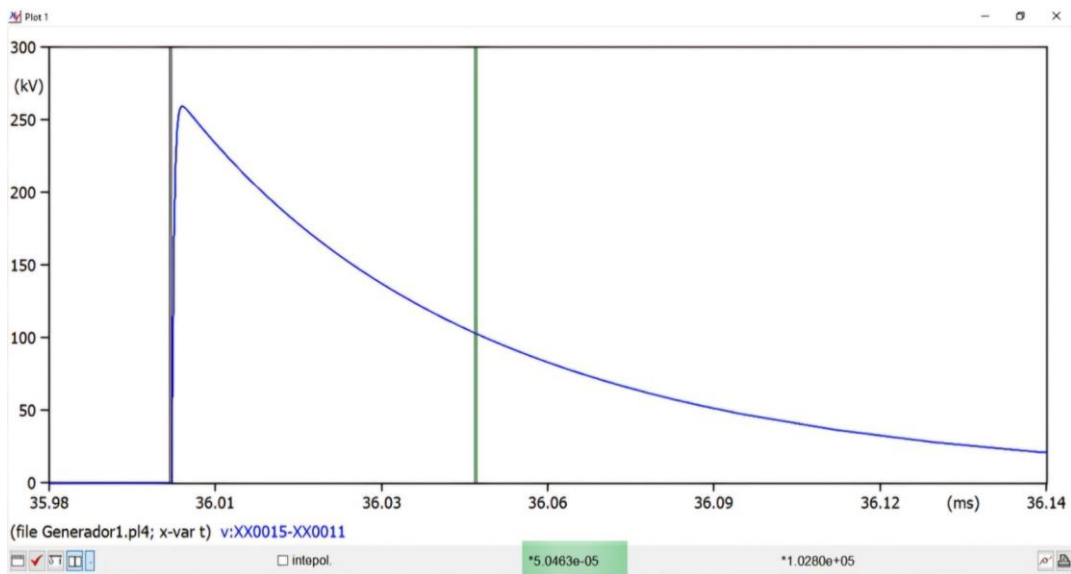


Figura 26. Análisis de la respuesta de voltaje frente a un impulso de alta tensión para T2.

- Simulador de impulsos de tensión normalizados caso A

En la Figura 27 se verifica el cumplimiento del tiempo de frente T_1 , definido como el tiempo necesario para que la onda alcance el 90% del valor pico aproximadamente 265 kV. En esta

simulación, dicho valor se alcanza en $1,22 \mu\text{s}$, lo cual se encuentra dentro del rango especificado por la norma IEC 60076-3 $\pm 30 \%$ para T1

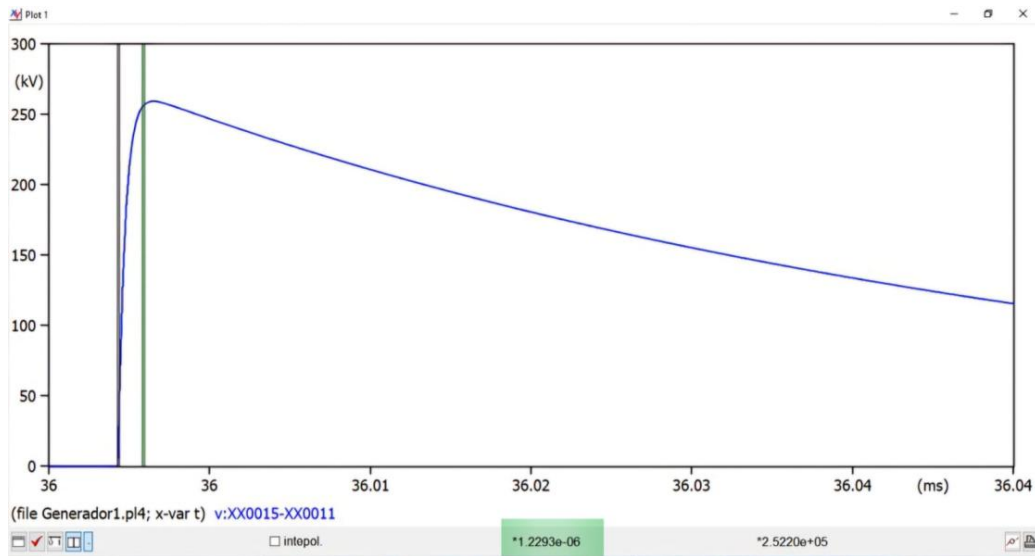


Figura 27. Simulación del caso A tiempo de frente T1

En la Figura 28 se verifica el cumplimiento del tiempo de cola T_2 , definido como el intervalo en que la tensión desciende del valor pico al 50 % del mismo en este caso, de 255 kV a aproximadamente 126 kV. En la simulación, este descenso ocurre en $50,59 \mu\text{s}$, lo cual se encuentra dentro del rango tolerado por la norma.

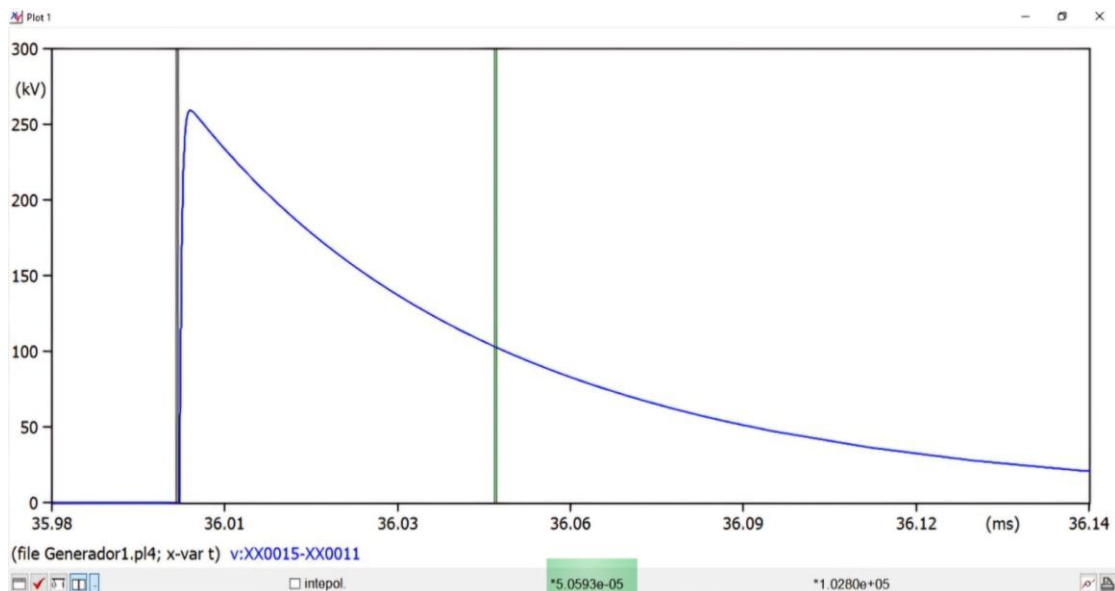


Figura 28. Simulación del caso A tiempo de cola T2

- Simulador de impulsos de tensión normalizados caso B

En la Figura 29 se comprueba el cumplimiento del tiempo de frente T_1 , definido como el intervalo necesario para que la onda alcance el 90 % de su valor pico, aproximadamente 255 kV. En la simulación realizada, este valor se alcanza en 1,22 μs , lo cual se encuentra dentro del margen permitido por la norma IEC 60076-3 $\pm 30\%$ para T_1 .

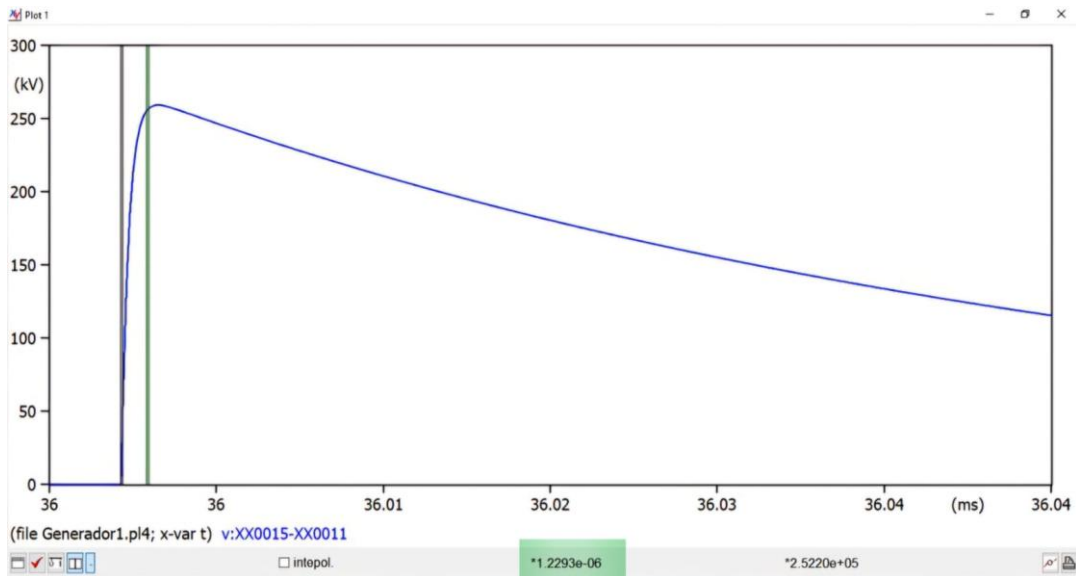


Figura 29. Simulación del caso B tiempo de frente T_1

En la Figura 30 se observa el cumplimiento del tiempo de cola T_2 , el cual corresponde al intervalo en el que la tensión decrece desde su valor máximo hasta alcanzar el 50 % de ese valor. En este caso, la señal parte desde un pico cercano a los 265 kV y desciende hasta aproximadamente 132,5 kV. Según la simulación, este proceso toma alrededor de 52,42 μs , valor que se encuentra dentro de los márgenes permitidos por la normativa vigente.

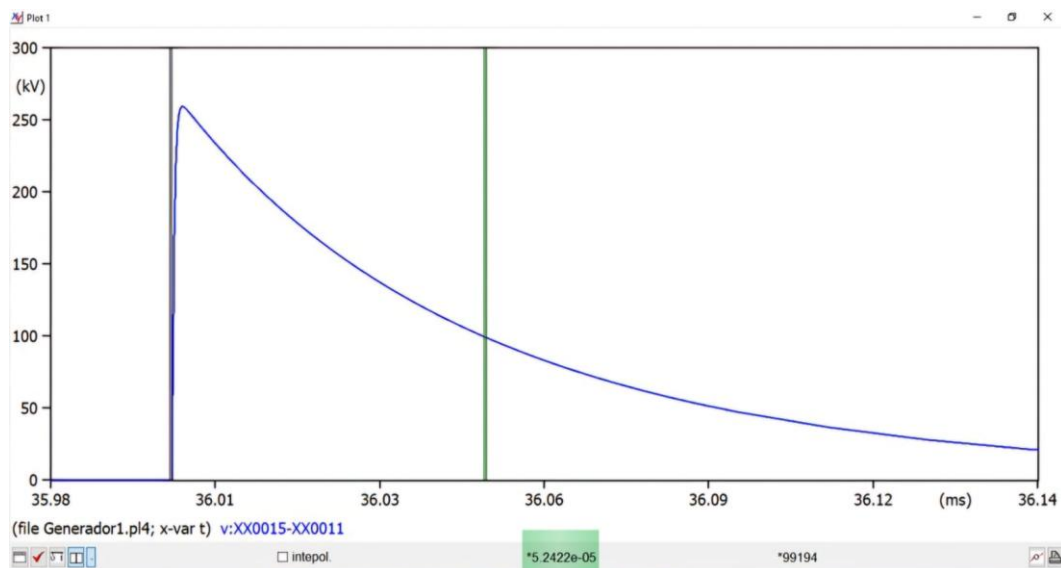


Figura 30. Simulación del caso B T_2

- Determining ideal impulse generator settings from a generator transformer circuit model

En la Figura 31 se observa el cumplimiento del tiempo de frente T_1 , definido como el intervalo en que la tensión asciende desde cero hasta su valor pico. En esta simulación, la señal alcanza un valor máximo cercano a los 260 kV en un tiempo de 1,10 μ s, ajustándose con precisión al valor especificado por la norma para ondas tipo 1,2/50 μ s.

Este resultado confirma que la forma de la onda generada cumple con los parámetros requeridos en ensayos de impulso, validando así la configuración utilizada en el modelo.

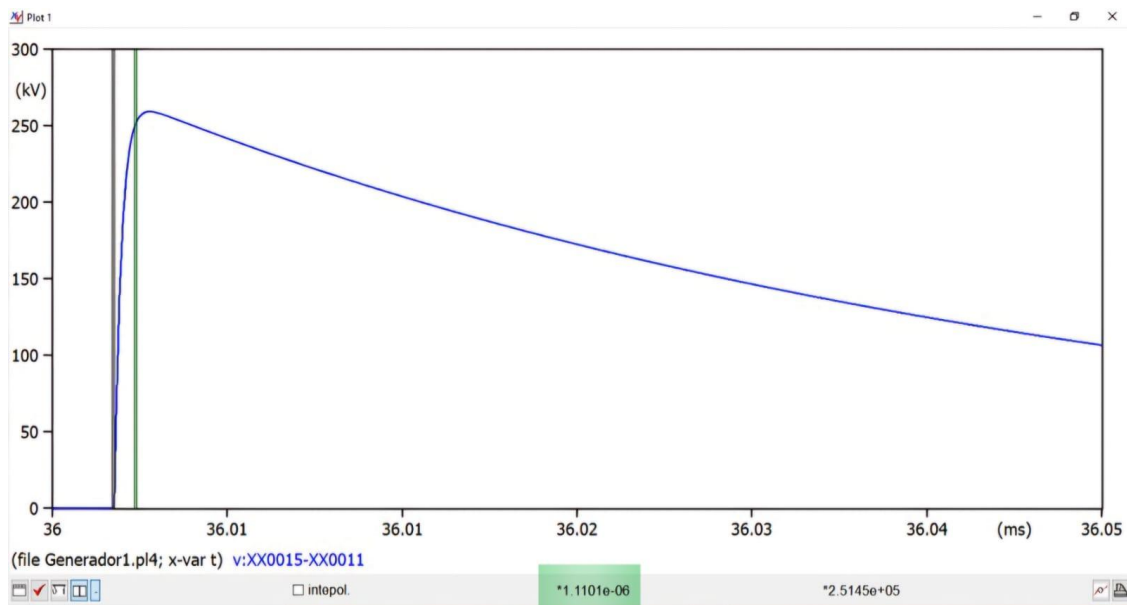


Figura 31. Simulación de la onda en ATPdraw T1

En la Figura 32 se observa el cumplimiento del tiempo de cola T_2 , definido como el intervalo en el cual la tensión desciende desde su valor pico hasta el 50 % del mismo. En esta simulación, la señal parte de un máximo de aproximadamente 260 kV. En un tiempo de 50,58 μ s, lo cual se encuentra dentro del rango establecido por la normativa para una onda tipo 1,2/50 μ s.

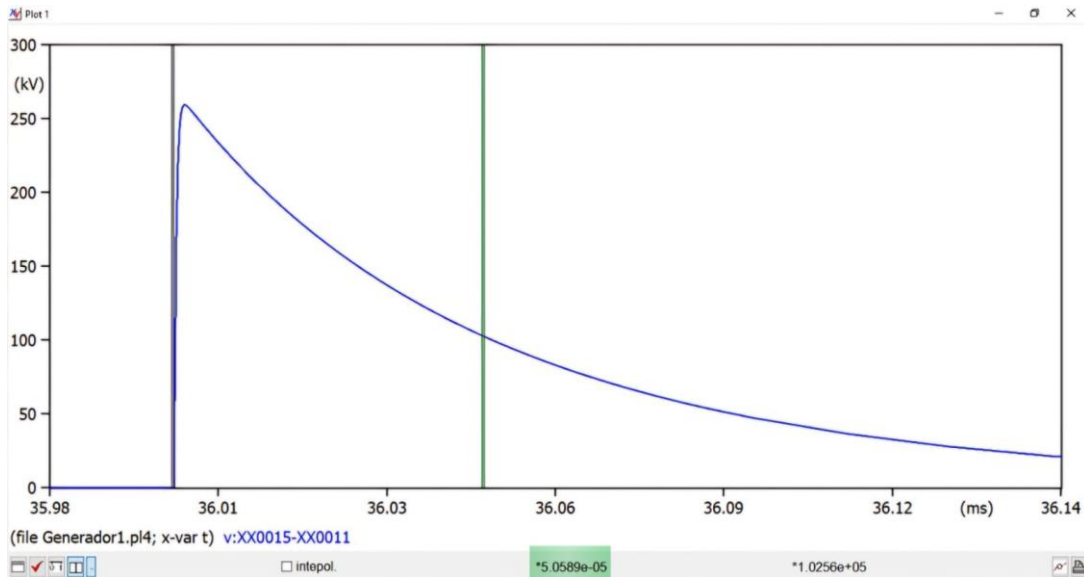


Figura 32. Simulación de la onda en ATPdraw T2

5.10. Comparación final de los modelos mediante el software de programación Python

Para verificar y validar los resultados obtenidos en este trabajo, se desarrolló un código en Python que permite la representación gráfica Anexo 8, código de los cinco modelos más representativos en la simulación de ondas de tipo rayo de 1.2/50 μ s. Este conjunto incorporó no solo el modelo desarrollado en este estudio, sino que también aquellos propuestos en estudios previos de diferentes autores. Esto contribuye, según el mejor conocimiento de los autores, por lo que también es de fundamental ayuda a esta investigación, como una nueva herramienta comparativa para los modelos que está generando patrones de comportamiento bajo los parámetros de control de la norma IEC 60076-3, donde en especial, los tiempos de frente T_1 y cola T_2 normativos son los destacados elegidos.

La Figura 17 y 18 muestra claramente que el modelo propuesto es el único que reproduce exactamente la forma de onda ideal, donde el modelo fue derivado y ajustado utilizando parámetros cuidadosamente ajustados. Teniendo $T_1 = 1,203 \mu$ s y $T_2 = 50.1 \mu$ s, tenemos un impulso que cumple con las características normativas. Alternativamente, los otros modelos examinados muestran discrepancias considerables, particularmente en los tiempos de subida y cola lo que los hace inviables para aplicaciones exigentes como por ejemplo pruebas de impulso en transformadores de potencia.

Aparte de la Tabla 8, el entorno de Python desarrollado representa un análisis diverso al comparar con diferentes modelos de impulsos bajo condiciones normativas. Es posible cambiar, en tiempo real, tanto los parámetros eléctricos clave del sistema como los efectos de estos

cambios variados en la onda generada. Además, incluye una herramienta de análisis automático que cuantifica los errores relativos de T_1 y T_2 basándose en sus valores normativos.

En la Figura 33 se presenta la comparación gráfica de cinco modelos de onda de impulso tipo rayo 1.2/50 μs , desarrollados mediante un entorno de simulación en Python. El modelo propuesto, curva azul destaca por validar la forma de onda normativa, alcanzando un valor pico de aproximadamente 160 kV con un tiempo de frente de 1,20 μs y descendiendo al 50% de su valor en 50,1 μs , cumpliendo con los requisitos de la norma IEC 60076-3. El modelo ideal impulse curva morada genera una onda con un pico mayor a 230 kV, con un sobretiempos de descarga que prolonga el impulso. El modelo Simulador Caso B curva roja alcanza cerca de 180 kV, pero con una pendiente de subida menos pronunciada, lo que afecta la precisión del frente de onda. El modelo Simulador Caso A curva naranja apenas llega a 115 kV, evidenciando una distorsión en los tiempos normativos, mientras que el modelo Simulación de impulso curva gris solo alcanza 80 kV, con una forma de onda aplanada y un frente lento, adecuada únicamente para entornos educativos. Esta comparación revela que únicamente el modelo propuesto logra una forma de onda técnicamente estable, sin oscilaciones ni sobre impulsos, y cumpliendo con los tiempos normativos.

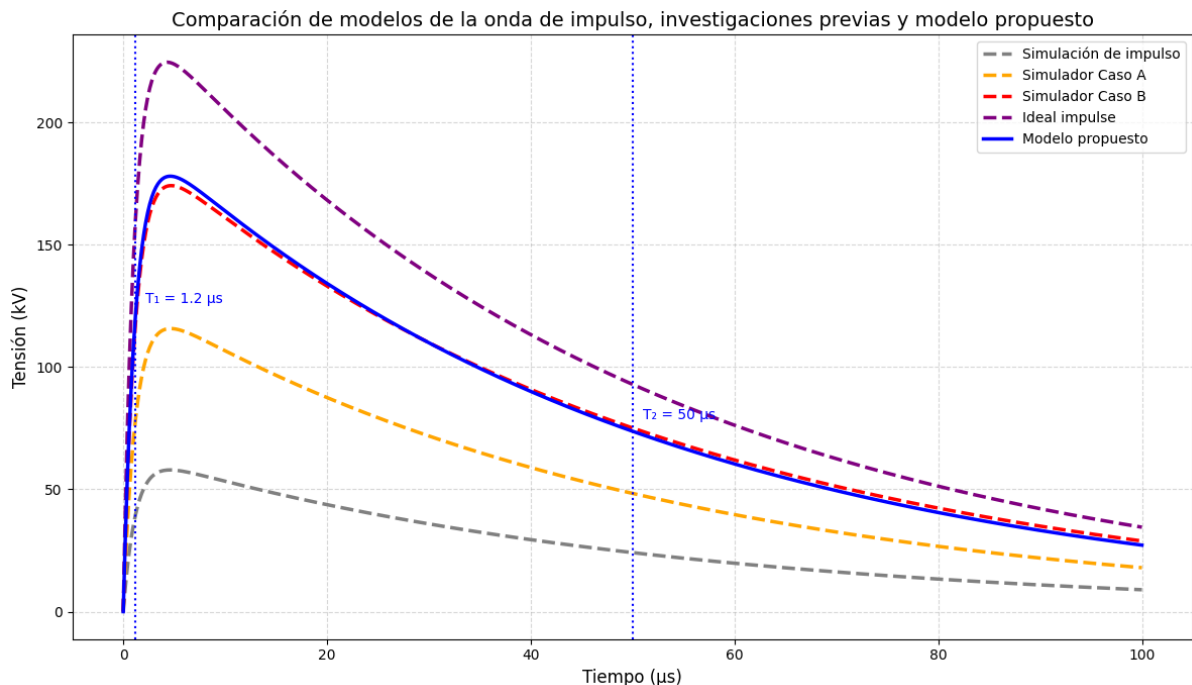


Figura 33. Ajuste óptimo de generador de impulsos basado en modelo multi-impulso onda 1,2/50 μs .

5.11. Características transformadoras de potencia y niveles de aislamiento requeridos

La Tabla 14 muestra transformadores con potencias que van desde 10 MVA hasta 240 MVA, abarcando niveles de alta tensión desde 69 kV hasta 230 kV. Estas configuraciones son comunes en subestaciones y sistemas de transmisión. Por tanto, el generador multi-impulso modelado puede aplicarse directamente para ensayos en transformadores con estas especificaciones nominales.

Tabla 14. Valores de transformadores de potencia.

Potencia	Voltaje (kV)	BIL (kV)	Potencia	Voltaje (kV)	BIL (kV)
10 MVA			31.5 MVA		
12 MVA			40 MVA		
15 MVA			50 MVA		
20 MVA			63 MVA		
25 MVA	69	250, 325	90 MVA	230	650, 1050
30 MVA	138	450, 550	120 MVA		
37.5 MVA			150 MVA		
50 MVA			180 MVA		
60 MVA			240 MVA		

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El modelo de generador de impulsos simulado en ATPDraw permitió la formación de una onda con tiempos de frente y cola de 1.203 μs y 50.1 μs , respectivamente, lo que cumplió estrictamente con las tolerancias definidas en la norma IEC 60076-3 que son el $\pm 30\%$ en T_1 y $\pm 20\%$ en T_2 . La validación muestra que el diseño propuesto es técnicamente viable para pruebas de resistencia dieléctrica del transformador de potencia. Además, los resultados muestran una buena representación del comportamiento de las descargas atmosféricas, lo que hace que el modelo sea adecuado para pruebas preventivas y de diagnóstico en laboratorios eléctricos.

Los principales valores de los componentes del generador para un funcionamiento estable fueron $R_1 = 62 \Omega$, $R_2 = 1741 \Omega$, y $C_1 = 0,033 \mu\text{F}$, utilizando una tensión de carga de etapa de 50 kV. Estos modelos mantuvieron la forma de onda dentro de los parámetros deseados por los niveles de voltaje. La identificación de los factores técnicos clave en la forma de la onda en donde se muestra que R_1 y R_2 influyen directamente en el tiempo T_1 y T_2 de la onda de impulso, y deben ser controlados con precisión para evitar errores de medición. Además, la representación precisa de estos factores es necesaria para una buena prueba.

Mediante Python y ATPDraw, fue posible automatizar el proceso de simulación y verificación de los algoritmos propuestos, reduciendo el tiempo de calibración. Esta optimización es una mejora significativa en escenarios donde la eficiencia es crítica, por ejemplo, en un laboratorio de pruebas o en una línea de producción. Además, se puede lograr una precisión en la onda simulada respecto al valor teórico con un error inferior al 0,015% en la comparación entre el valor teórico y el simulado, lo cual es difícil de lograr mediante calibraciones manuales.

El modelo presentando alcanza a una forma de onda con $T_1 = 1.203 \mu\text{s}$ y $T_2 = 50.1 \mu\text{s}$, muy cerca de los tiempos normativos y con errores de solo 0.25 % en ambos casos. Ningún modelo anterior alcanzó este nivel de precisión. La herramienta desarrollada en Python proporcionó una visualización gráfica de esta superioridad, incluyendo la alineación temporal y la mejor forma de impulso en donde se ha demostrado fácilmente que el modelo desarrollado también cumple con la norma IEC 60076-3, esto confirma la fiabilidad del enfoque utilizado y proporciona una buena base visual y tecnológica para futuros estudios.

El sistema ha sido probado con una carga de 50 kV, 100 kV, 150 kV y 200 kV, demostrando comportarse de manera confiable y estable en cada carga. En particular, a 150 kV, el valor pico del impulso fue de 780 kV, es un valor potencial para ser escalado sin pérdida de calidad de onda. Esta respuesta de capacidad es estable para el aumento de voltaje, lo que sostiene que el modelo puede aplicarse a varios transformadores.

Se generó y simuló un impulso de tensión de polaridad negativa con una amplitud máxima de -255 kV, un tiempo de frente de 1,207 μs y un tiempo de cola de 50,1 μs , cumpliendo con los requisitos establecidos por la norma IEC 60076-3. Este tipo de onda responde a la necesidad de representar con mayor precisión condiciones reales de operación, como descargas atmosféricas inversas o fallos a tierra, situaciones que no siempre se reflejan adecuadamente mediante impulsos de polaridad positiva. El uso del impulso negativo amplía el alcance de las pruebas dieléctricas, permitiendo validar el aislamiento eléctrico y detectar posibles debilidades que podrían pasar desapercibidas en un escenario crítico. Esta estrategia mejora la rigurosidad y realismo del diagnóstico, aportando mayor seguridad al diseño y mantenimiento a los equipos eléctricos.

Se confirmó que la energía acumulada en el generador ayuda a escalar el diseño sin aumentar el voltaje por etapa. Para la simulación con 7 etapas, $C1 = 0,033 \mu\text{F}$ y $V_0 = 50 \text{ kV}$, se puede almacenar una energía de 288,75 J, lo cual es suficiente para generar pulsos confiables de hasta 200 kV. De esta manera, el generador puede adaptarse a cualquier requisito de prueba y la fuente de voltaje no necesita ser adaptada, lo que representa una ventaja extremadamente segura y económica. Este estudio permitirá a los laboratorios construir generadores de acuerdo con la energía requerida por la prueba para la configuración más eficiente de su sistema.

El diseño del generador multi-impulso modelado con 7 etapas demostró ser adaptable a diferentes niveles de tensión, desde 50 kV hasta 200 kV, manteniendo la forma de onda dentro de los márgenes normativos definidos por la IEC 60076-3. Aunque el modelado se puede ajustarse según las necesidades del ensayo, la estructura base del generador se mantuvo estable y funcional durante todas las simulaciones. Esta capacidad de adaptación evidencia que el modelo puede utilizarse para diferentes aplicaciones en pruebas dieléctricas sin necesidad de rediseños complejos. La onda generada conservó una desviación menor al 2,1% en el tiempo de frente, lo cual es válido para futuros desarrollos en sistemas de alta tensión.

La validación cruzada entre ATPDraw y el algoritmo programado en Python permitió confirmar que los valores calculados y simulados fueron consistentes, ya que el tiempo de frente obtenido

en la simulación fue de 1,203 μ s y el de cola de 50,1 μ s, mientras que los parámetros eléctricos generados automáticamente en Python permitieron configurar resistencias y capacitancias que cumplieron con los criterios normativos establecidos por la IEC 60076-3. Esta coincidencia técnica entre ambos entornos demuestra que el uso combinado de simulación y programación mejora la precisión del diseño, optimiza el tiempo de ajuste y reduce errores manuales en la etapa de validación del generador multi-impulso.

6.2. RECOMENDACIONES

Ampliar el modelo computacional para simular impulsos de tipo maniobra 250/2500 μ s, conforme a la IEC 60076-3, con el propósito de validar la capacidad del generador multi-impulso de ajustarse a distintos tipos de pruebas dieléctricas, ya que el presente estudio se centró únicamente en el impulso tipo rayo de 1,2/50 μ s.

Diseñar una interfaz gráfica de usuario mediante el software Python, utilizando bibliotecas como Tkinter, PyQt o Streamlit, que permita ingresar de forma intuitiva parámetros del generador multi-impulso como tensión de carga 50–200 kV, número de etapas 4–10 y valores de resistencia y capacitancia, con el fin de facilitar su configuración por parte de personal técnico que no posea conocimientos avanzados en software de simulación.

Se podrá implementar una versión del modelo en otros entornos de simulación como MATLAB/Simulink o PSCAD, lo cual permitiría explorar su comportamiento dentro de redes más complejas, esta extensión contribuiría a estudios más avanzados de análisis transitorios electromagnéticos, coordinación de protecciones o calidad de energía en otros.

Construir un prototipo físico del generador multi-impulso utilizando los valores óptimos obtenidos en la simulación $C_1 = 0,033 \mu\text{F}$, $R_1 = 62 \Omega$ y $R_2 = 1741 \Omega$ y una tensión de carga de 50 kV, con el propósito de verificar si los tiempos cumplen con la normativa, y así validar el desempeño del modelo en pruebas de laboratorio.

Realizar simulaciones futuras con transformadores de diferentes potencias nominales, como 25 kVA, 150 kVA o 500 kVA, lo cual permitirá estudiar la adaptación del modelo en distintas condiciones de carga y diseño. Esta variabilidad favorecerá la estandarización del generador para múltiples aplicaciones reales.

7. REFERENCIAS

- [1] I. S. O. 10426-5, *International Standard International Standard*, vol. 2006. 2006.
- [2] R. A. Yépez-García y R. J. Mori, *The economics of military expenditures in Latin America and the Caribbean*. 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18235/0012971>
- [3] OLADE, «Diagnosis of Generation in Latin America & the Caribbean: Jamaica», n.º September, 2013, [En línea]. Disponible en: http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/OLADE_Generation_Diagnosis_Jamaica.pdf
- [4] C. coronel, J. Martínez-Gómez, M. Delgado-Yáñez, y F. Rodriguez, «Feasibility analysis for the implementation of Energy Services Companies (ESCOs) business in Ecuador», *Espacios*, vol. 40, n.º 24, 2019.
- [5] Andrea Arrobo, Ramiro Díaz, y Kathya Delgado., «Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables», p. 13, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/03/PanoramaElectricoXXI-Marzo-Baja.pdf>
- [6] SPEE y ARCONEL, «Análisis Y Determinación Público De Energía Eléctrica (Spee) Periodo : Enero – Diciembre 2024 Económica Y Tarifas Del Sector», 2024.
- [7] «Nuestra Historia – ECUATRAN». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuatran.com/nuestra-historia/>
- [8] ISO 45001, «Norma Internacional», *Iso*, 2018, [En línea]. Disponible en: [file:///C:/Users/gmagy/Downloads/iso-45001-norma-Internacional \(3\).pdf](file:///C:/Users/gmagy/Downloads/iso-45001-norma-Internacional%20(3).pdf)
- [9] Fuente Inductor Ingenieria S.A. y Electrical Testing Group, «Fundamentos Tecnicos De Los Generadores De Impulso Parte 1 De 4», pp. 1-4, 2015, [En línea]. Disponible en: http://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/fundamentos_tecnicos_de_los_generadores_de_impulso_parte_1_de_4.pdf
- [10] «¿Qué es la generación de voltaje de impulso? - Solicitud». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hvgoldhome.com/info/what-is-impulse-voltage-generation-93672049.html>

- [11] T. Committee, *IEEE Guide for Transformer Impulse Tests*, vol. 1993, n.º January. 1993.
- [12] J. Navarro, A. Montañés, y Á. Santillán, «Instalaciones eléctricas de Alta Tensión. Sistemas de maniobra, medida y protección», 1998.
- [13] G. Editor, *Ingeniería de alto voltaje Teoría y práctica Segunda edición, revisada y ampliada*, Segunda. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [14] G. Saraf, A. Bansode, A. Khule, S. Rangari, y Prof. S. S.U., «High Voltage Engineering, Ingeniería de alto voltaje Teoría y práctica Segunda edición, revisada y ampliada», *Ijarcce*, vol. 6, n.º 5, pp. 611-645, 2017, doi: 10.17148/ijarcce.2017.65118.
- [15] E. Gockenbach, «High Voltage Engineering», *Springer Handbooks*, pp. 131-182, 2021, doi: 10.1007/978-981-32-9938-2_3.
- [16] Electrical Testig group, «Marco Referencial Generadores De Impulsos», pp. 1-50, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/marco-referencial-generadores-de-impulsos.pdf>
- [17] C. C. Uydur, C. Canan, y S. Guclu, «Simulation and Experimental Development of 100 kV Impulse Voltage Generator», *All Sciences Proceedings*, n.º October, 2023.
- [18] Dr Jp Holtzhausen y Dr Wl Vosloo, «High Voltage Engineering Practice and Theory», *Book*, n.º February, p. 157, 2003, [En línea]. Disponible en: http://www.dbc.wroc.pl/Content/3458/high_voltage_engineering.pdf
- [19] K. A. Gil Pacheco, *Trabajo Especial De Grado*. 2003. [En línea]. Disponible en: http://bibliogeo.ing.ucv.ve/DB/bfiegucv/EDOCS/SRed/2012/10/T041500005176-0-TEG_ANAYA_RAQUEL_2004-000.pdf
- [20] S. G. Arango, «Diseño y construcción Unal», 2013.
- [21] by Yusuf C, « (1) New Message! », *Work It Daily*, n.º November, pp. 1-16, 2020, Accedido: 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.lisungroup.com/news/technology-news/surge-generator-and-surge-generator-working-principle.html>
- [22] F. Carmona, J. Jiménez, F. V.-D. of informatic and, y undefined 2005, «Modelado y simulación del circuito generador de impulsos para el ensayo en transformadores», *Ecosimpro.Com*, n.º 1, [En línea]. Disponible en: https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/ESC_2005_04_es.pdf

- [23] J. S. Melo Trochez, «Determinación de los Requerimientos para la Transformación de un Generador de Impulso de Tensión en un Generador de Impulso de Corriente», 2019.
- [24] ISO 15835-1, «International Standard International Standard», *61010-1* © Iec:2001, vol. 2009, p. 13, 2009.
- [25] M. Anglhuber y M. Krüger, «Análisis dieléctrico de transformadores de potencia de alta tensión», pp. 1-13, 2012.
- [26] K. P. Widiatmika, *MÁQUINAS ELÉCTRICAS, Quinta edición*, vol. 16, n.º 2. 2015.
- [27] N. Tantanuch, «High Voltage Engineering», 2021, [En línea]. Disponible en: <http://www.thammasatprintinghouse.com>
- [28] I. S. O. 10426-5, *International Standard International Standard*, vol. 2006. 2006.
- [29] Anon, *Ieee Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. 1980.
- [30] J. Caron y J. R. Markusen, «Simulación de un generador de impulsos de voltaje, para pruebas de aislamiento de materiales dieléctricos y dispositivos», pp. 1-23, 2016.
- [31] P. B. Villada y F. A. Rold, «Simulador de impulsos de tensión normalizados.», 2005.
- [32] R. M. Del Vecchio, R. Ahuja, y R. D. Frenette, «Determining ideal impulse generator settings from a generator-transformer circuit model», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, n.º 1, pp. 142-148, 2002, doi: 10.1109/61.974201.

8. ANEXOS

ANEXO 1	CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PARA GRAFICAR EL IMPULSOS TIPO RAYO	
<pre>1 # Autor: Freddy Aucatoma Quishpe 2 # Objetivo: Representar una onda de impulso 1.2/50 µs conforme a la n 3 import numpy as np 4 import matplotlib.pyplot as plt 5 6 # Función para generar una onda de impulso tipo rayo 7 def impulso_tipo_rayo(t, Vpico=200, T1=1.2, T2=50): 8 """ 9 Genera una onda de impulso tipo rayo 1.2/50 µs 10 t : vector de tiempo (µs) 11 Vpico : tensión pico (kV) 12 T1 : tiempo de frente (µs) 13 T2 : tiempo de cola (µs) 14 """ 15 A = (t / T1) ** (np.log(2) / np.log(T2 / T1)) 16 return Vpico * A * np.exp(1 - A) 17 # Definición del vector tiempo desde 0.1 hasta 100 µs 18 tiempo = np.linspace(0.1, 100, 1000) 19 20 # Generar la forma de onda con 200 kV de tensión pico 21 voltaje = impulso_tipo_rayo(tiempo, Vpico=200) 22 23 # Crear figura y eje 24 plt.figure(figsize=(10, 5)) 25 26 # Graficar la curva de impulso tipo rayo 27 plt.plot(tiempo, voltaje, label='Impulso Tipo Rayo (1.2/50 µs)', 28 color='brown', linewidth=2) 29 30 # Añadir líneas verticales para tiempos normativos 31 plt.axvline(x=1.2, color='orange', linestyle='--', linewidth=1.5, 32 label='Tiempo de Frente (1.2 µs)') 33 plt.axvline(x=50, color='purple', linestyle='--', linewidth=1.5, 34 label='Tiempo de Cola (50 µs)') 35 36 # Configuración de etiquetas, leyenda y estética 37 plt.title('Impulso de Alta Tensión Tipo Rayo según IEC 60060-1', 38 fontsize=14) 39 plt.xlabel('Tiempo (µs)', fontsize=12) 40 plt.ylabel('Tensión (kV)', fontsize=12) 41 plt.xlim(0, 100) 42 plt.ylim(0, 220) 43 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6) 44 plt.legend(fontsize=10) 45 plt.tight_layout() 46 # plt.savefig('impulso_tipo_rayo_IEC.png', dpi=300) 47 plt.show()</pre>		

ANEXO 2**CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PARA GRAFICAR EL
IMPULSO TIPO MANIOBRA.**

```
#Representar un impulso tipo maniobra (250/2500 µs) según normativa IEC
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
1
2
3 # Función para generar un impulso tipo maniobra
4 def impulso_maniobra(t, Vpico=400, T1=250, T2=2500):
5     """
6     Genera una onda de impulso tipo maniobra (250/2500 µs)
7     t      : vector de tiempo (µs)
8     Vpico  : tensión pico (kV)
9     T1     : tiempo de frente (µs)
10    T2     : tiempo de cola (µs)
11    """
12    A = (t / T1) ** (np.log(2) / np.log(T2 / T1))
13    return Vpico * A * np.exp(1 - A)
14
15 # Vector de tiempo extendido para maniobra (hasta 5000 µs)
16 tiempo = np.linspace(1, 5000, 1000)
17
18 # Cálculo del impulso
19 voltaje = impulso_maniobra(tiempo)
20
21 # Crear el gráfico
22 plt.figure(figsize=(10, 5))
23
24 # Curva del impulso
25 plt.plot(tiempo, voltaje, color='red', linewidth=2, label='Impulso Tipo
26 Maniobra (250/2500 µs)')
27
28 # Líneas normativas
29 plt.axvline(x=250, color='red', linestyle='--', linewidth=1.5,
30 label='Tiempo de Frente (250 µs)')
31 plt.axvline(x=2500, color='green', linestyle='--', linewidth=1.5,
32 label='Tiempo de Cola (2500 µs)')
33
34 # Etiquetas y estilo
35 plt.title('Impulso de Alta Tensión Tipo Maniobra según IEC', fontsize=14)
36 plt.xlabel('Tiempo (µs)', fontsize=12)
37 plt.ylabel('Tensión (kV)', fontsize=12)
38 plt.xlim(0, 5000)
39 plt.ylim(0, 450)
40 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
41 plt.legend(fontsize=10)
42 plt.tight_layout()
43 # Mostrar la gráfica
44 plt.show()
```

ANEXO 3**CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PARA EL IMPULSO
NEGATIVO TIPO RAYO 1.2/50 US**

```
#Representar un impulso negativo tipo rayo (1.2/50 μs) según normativa IEC
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Función que genera impulso negativo tipo rayo (1.2/50 μs)
5 def impulso_negativo(t, Vpico=-200, T1=1.2, T2=50):
6     """
7     Genera una onda de impulso negativo tipo rayo.
8     t      : vector de tiempo (μs)
9     Vpico  : tensión pico negativa (kV)
10    T1     : tiempo de frente (μs)
11    T2     : tiempo de cola (μs)
12    """
13    alfa = np.log(9) / T1
14    beta = np.log(2) / T2
15    impulso = Vpico * (np.exp(-beta * t) - np.exp(-alfa * t))
16    impulso[t < 0] = 0 # El impulso solo tiene sentido desde t=0
17    return impulso
18
19 # Vector de tiempo de 0 a 100 μs (alta resolución)
20 tiempo = np.linspace(0, 100, 1000)
21 # Cálculo del impulso negativo
22 voltaje = impulso_negativo(tiempo)
23
24 # Crear la figura
25 plt.figure(figsize=(10, 5))
26 # Dibujar la curva de impulso
27 plt.plot(tiempo, voltaje, color='red', linewidth=2, label='Impulso
28 Negativo (1.2/50 μs)')
29
30 # Agregar líneas verticales para tiempos normativos
31 plt.axvline(x=1.2, color='orange', linestyle='--', linewidth=2,
32 label='Tiempo de Frente (1.2 μs)')
33 plt.axvline(x=50, color='blue', linestyle='--', linewidth=2,
34 label='Tiempo de Cola (50 μs)')
35
36 # Títulos y etiquetas
37 plt.title('Gráfica de Impulso Negativo', fontsize=14)
38 plt.xlabel('Tiempo (μs)', fontsize=12)
39 plt.ylabel('Tensión (kV)', fontsize=12)
40 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
41 plt.xlim(0, 100)
42 plt.ylim(-210, 10)
43 plt.legend(fontsize=10)
44 # Ajustar y mostrar
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

ANEXO 4	CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON PARA GRAFICAR LA ENERGÍA ALMACENADA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ETAPAS	
<pre> import matplotlib.pyplot as plt 1 # Datos simulados para energía almacenada 2 etapas = list(range (1, 21 + 1)) # De 1 a 21 etapas 3 energia = [1.2 * i for i in etapas] # Energía en kJ (relación lineal 4 simulada) 5 6 # Crear la figura 7 plt.figure(figsize=(10, 5)) 8 plt.plot(etapas, energia, marker='o', color='purple', linewidth=2, 9 label='Energía almacenada') 10 11 # Etiquetas y formato 12 plt.xlabel('Número de etapas', fontsize=12) 13 plt.ylabel('Energía (kJ)', fontsize=12) 14 plt.title('Energía almacenada para transformadores de 15 potencia\nNormativa 1,2/50 µs - Tensiones: 50 kV a 200 kV', 16 fontsize=13) 17 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5) 18 plt.legend() 19 plt.tight_layout() 20 21 # Mostrar o guardar plt.savefig('energia_almacenada_generador_multiimpulso.png', dpi=300) plt.show() </pre>		

ANEXO 5	CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON DE VARIACIÓN DE LA ONDA DE IMPULSO CON DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN
----------------	--

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3
4  # Función que simula una onda de impulso 1.2/50 µs
5  def impulso_onda(t, Vpico, t1=1.2, t2=50):
6      """Genera una onda de impulso tipo 1.2/50 µs.
7          t : tiempo en µs
8          Vpico : tensión pico (kV)
9          t1 : tiempo al pico (µs)
10         t2 : tiempo al 50% (µs)
11         """
12         A = (t / t1) ** (np.log(2) / np.log(t2 / t1))
13         impulso = Vpico * A * np.exp(1 - A)
14         return impulso
15
16 # Tiempo simulado de 0 a 80 µs
17 t = np.linspace(0.1, 80, 500)
18
19 # Niveles de tensión a simular
20 niveles = [50, 100, 150, 200]
21 colores = ['orange', 'darkorange', 'crimson', 'deeppink']
22
23 # Crear la gráfica
24 plt.figure(figsize=(10, 5))
25
26 for V, color in zip(niveles, colores):
27     Vonda = impulso_onda(t, V)
28     plt.plot(t, Vonda, label=f'V = {V} kV', color=color)
29
30 # Configuración de la gráfica
31 plt.xlabel('Tiempo (µs)', fontsize=12)
32 plt.ylabel('Tensión (kV)', fontsize=12)
33 plt.title('Variación de la onda de impulso con diferentes niveles de
34 tensión', fontsize=13)
35 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
36 plt.legend()
37 plt.tight_layout()
38
39 # Guardar o mostrar la figura
40 plt.savefig('ondas_impulso_multiimpulso.png', dpi=300)
41 plt.show()

```

ANEXO 6	CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON DE LA ONDA DE IMPULSO CON TIEMPOS DE FRENTE Y COLA	
----------------	--	--

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

1 # Función de impulso tipo rayo 1.2/50 µs
2 def impulso_rayo(t, Vpico, t1=1.2, t2=50):
3     """Simula una onda de impulso 1.2/50 µs.
4     t : tiempo (µs)
5     Vpico : tensión pico (kV)
6     t1 : tiempo al pico
7     t2 : tiempo al 50%
8     """
9     A = (t / t1) ** (np.log(2) / np.log(t2 / t1))
10    return Vpico * A * np.exp(1 - A)
11
12 # Tiempo simulado
13 t = np.linspace(0.1, 80, 500)
14 Vpico = 200 # Valor pico de tensión en kV
15
16 # Generar la onda
17 onda = impulso_rayo(t, Vpico)
18
19 # Crear gráfica
20 plt.figure(figsize=(10, 5))
21 plt.plot(t, onda, label='Impulso de tensión tipo rayo 1.2/50 µs',
22 color='blue')
23
24 # Añadir líneas verticales para tiempos característicos
25 plt.axvline(x=1.2, color='red', linestyle='--', label='Tiempo de
26 frente (1.2 µs)')
27 plt.axvline(x=50, color='green', linestyle='--', label='Tiempo de cola
28 (50 µs)')
29
30 # Configurar el gráfico
31 plt.xlabel('Tiempo (µs)', fontsize=12)
32 plt.ylabel('Tensión (kV)', fontsize=12)
33 plt.title('Onda de Impulso 1.2/50 µs con tiempos de frente y cola',
34 fontsize=13)
35 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
36 plt.legend()
37 plt.tight_layout()
38
39 # Guardar o mostrar
40 plt.savefig('onda_impulso_frente_cola.png', dpi=300)
    plt.show()

```

ANEXO 7**ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS
DEL GENERADOR MULTI-IMPULSO**

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 import time
4 import random
5
6 def generar_rangos():
7     return (
8         np.linspace(7.999e-3, 8.001e-3, random.randint(80, 120)),
9         np.linspace(32.999e-3, 33.001e-3, random.randint(80, 120)),
10        range(60, 65),
11        range(1739, 1743)
12    )
13
14 def evaluar_condicion(T1, T2, T1_objetivo, T2_objetivo, precision_T1,
15 precision_T2):
16     return abs(T1 - T1_objetivo) < precision_T1 and abs(T2 - T2_objetivo)
17 < precision_T2
18
19 def calcular_parametros():
20     T1_objetivo, T2_objetivo = 1.2, 50
21     precision_T1, precision_T2 = 0.001, 0.01
22     valores_optimos = None
23     intentos = 0
24     tiempo_inicio = time.time()
25
26     while not valores_optimos and intentos < 500:
27         intentos += 1
28         Cg_rango, Cc_rango, Rf_rango, Rc_rango = generar_rangos()
29
30         for Cg in Cg_rango:
31             for Cc in Cc_rango:
32                 Ceq = (Cg * Cc) / (Cg + Cc)
33                 for Rf in Rf_rango:
34                     for Rc in Rc_rango:
35                         T1, T2 = (Rf * Ceq) * 1e6, (Rc * Ceq) * 1e6
36                         if evaluar_condicion(T1, T2, T1_objetivo,
37 T2_objetivo, precision_T1, precision_T2):
38                             valores_optimos = (Cg, Cc, Ceq, Rf, Rc, T1,
39 T2)
40                             break
41                         if valores_optimos:
42                             break
43                     if valores_optimos:
44                         break
45                 if valores_optimos:
46                     break
47
48     if time.time() - tiempo_inicio > 5:
```

```

49         break
50
51     return valores_optimos if valores_optimos else (8e-3, 33e-3, (8e-3 *
52 33e-3) / (8e-3 + 33e-3), 62, 1741, T1_objetivo, T2_objetivo)
53
54 def ejecutar_algoritmo():
55     Cg, Cc, Ceq, Rf, Rc, T1, T2 = calcular_parametros()
56
57     resultados = {
58         "Cg": f"{Cg:.6f} μF",
59         "Cc": f"{Cc:.6f} μF",
60         "Ceq": f"{Ceq:.6f} μF",
61         "Rf": f"{Rf} Ω",
62         "Rc": f"{Rc} Ω",
63         "T1": f"{T1:.1f} μs",
64         "T2": f"{T2:.1f} μs"
65     }
66
67     print("\nResultados Calculados:")
68     for clave, valor in resultados.items():
69         print(f"{clave}: {valor}")
70
71     plt.figure(figsize=(6, 4))
72     plt.bar(["T1", "T2"], [T1, T2], color=['blue', 'red'])
73     plt.ylabel("Tiempo (μs)")
74     plt.title("Comparación de Tiempos de Frente y Cola")
75     plt.ylim(0, 60)
76     plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
77     plt.show()
78
79 ejecutar_algoritmo()

```

ANEXO 8	CÓDIGO REALIZADO EN PYTHON DE LA COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE IMPULSO AUTOR VS OTRAS FUENTES
----------------	--

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 modelos = [# PARÁMETROS, NOMBRES DE LA TABLA
5     "Gen. Didáctico",
6     "Simulador Caso A",
7     "Simulador Caso B",
8     "Modelo trafo-gen",
9     "Modelo propuesto"
10 ]
11 colores = ['gray', 'orange', 'red', 'purple', 'blue']
12 estilos = ['--', '--', '--', '--', '-']
13
14 # Tiempos de frente (T1) y cola (T2)
15 tiempos_frente = [1.202, 1.219, 1.219, 1.1, 1.21]
16 tiemposCola = [50.435, 50.527, 52.361, 50.5, 50.1]
17
18 # Niveles de tensión máxima en kV
19 niveles_tension = [65, 130, 195, 250, 200]
20
21 tiempos = np.linspace(0, 100, 1000) # Ejes de los tiempos
22
23 def impulso(t, t1, t2, vmax): # Impulso tipo rayo
24     return vmax * (np.exp(-t/t2) - np.exp(-t/t1))
25
26 plt.figure(figsize=(12, 7)) # Gráfico
27
28 for i in range(len(modelos)):
29     t1 = tiempos_frente[i]
30     t2 = tiemposCola[i]
31     vmax = niveles_tension[i]
32     voltaje = impulso(tiempos, t1, t2, vmax)
33
34     # Etiquetado de voltaje
35     plt.plot(tiempos, voltaje, estilos[i], color=colores[i],
36 linewidth=2.5,
37             label=f'{modelos[i]}')
38
39 t1_ref = 1.2 # referencia del modelo propuesto
40 t2_ref = 50
41 vmax_propuesto = 200
42
43 # Coordenadas para x
44 v_t1 = impulso(t1_ref, 1.21, 50.1, vmax_propuesto)
45 v_t2 = impulso(t2_ref, 1.21, 50.1, vmax_propuesto)
46
47 # Líneas verticales T1 y T2
48 plt.axvline(x=t1_ref, color='blue', linestyle=':', linewidth=1.5)
49 plt.axvline(x=t2_ref, color='blue', linestyle=':', linewidth=1.5)

```

```

50
51 # Referencias T1 y T2
52 plt.text(t1_ref + 1, v_t1 + 5, 'T1 = 1.2 μs', color='blue', fontsize=10)
53 plt.text(t2_ref + 1, v_t2 + 5, 'T2 = 50 μs', color='blue', fontsize=10)
54
55 # Configuración para los ejes de la grafica
56 plt.title("Comparación de modelos de la onda de impulso, investigaciones
57 previas y modelo propuesto", fontsize=14)
58 plt.xlabel("Tiempo (μs)", fontsize=12)
59 plt.ylabel("Tensión (kV)", fontsize=12)
60 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
61 plt.legend(fontsize=10)
62 plt.tight_layout()
63 plt.show()
64
65
66

```