

ATPDraw-Based Methodology for the Pre-Configuration and Experimental Validation of Lightning Impulse Tests in Power Transformers

Metodología basada en ATPDraw para la preconfiguración y validación experimental de ensayos de impulso tipo rayo en transformadores de potencia

J.H. Calle¹  0000-0002-5964-8608 W. Guamán²  0000-0001-8933-3685
M.F. Velasco³  0000-0001-6676-591X E.J. Cajas¹  0000-0003-0656-7334

¹Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Ecuador

E-mail: jcalles@tecnologicosucre.edu.ec, ecajas@tecnologicosucre.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

wilian.guaman@epoch.edu.ec

E-mail: ³illariGrid S.A.S, Riobamba, Ecuador

illari.consultoria@outlook.com

Abstract

This work presents an ATPDraw-based methodology for simulating full lightning impulse tests on power transformers. The transformer under test was represented by lumped capacitive and inductive parameters, while the impulse generator and the measuring system were adjusted according to the laboratory configuration. Five independent case studies were analyzed by comparing simulated and measured waveforms in terms of peak voltage (V_p), front time (T_1), and tail time (T_2). The comparison shows a close agreement for peak voltage and front time, with global errors below 3.5 % and 10 %, respectively, while the tail time exhibited higher sensitivity to the simplified representation of the test object. All simulated waveforms satisfied the tolerances established for the standard 1.2/50 μ s lightning impulse. The proposed methodology supports the pre-adjustment of impulse-generator parameters and reduces trial-and-error procedures during high-voltage laboratory tests.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología basada en ATPDraw para simular ensayos de impulso tipo rayo completo en transformadores de potencia. El transformador bajo ensayo se representó mediante parámetros capacitivos e inductivos concentrados equivalentes, mientras que el generador de impulsos y el sistema de medición se ajustaron de acuerdo con la configuración experimental empleada en laboratorio. Se analizaron cinco casos de estudio independientes, comparando las formas de onda simuladas y medidas en términos de tensión pico (V_p), tiempo de frente (T_1) y tiempo de cola (T_2). La comparación evidencia una aproximación adecuada para la tensión pico y el tiempo de frente, con errores globales inferiores al 3,5 % y al 10 %, respectivamente, mientras que el tiempo de cola presentó mayor sensibilidad frente a la representación simplificada del objeto de ensayo. Todas las ondas simuladas cumplieron las tolerancias establecidas para el impulso tipo rayo normalizado 1,2/50 μ s. La metodología propuesta apoya el ajuste previo del generador de impulsos y contribuye a reducir procedimientos de prueba y error durante los ensayos de alta tensión en laboratorio.

Index terms— lightning impulse test, impulse voltage generator, ATPDraw, high-voltage test, transformer.

Palabras clave— Impulso tipo rayo, generador de impulsos, ATPDraw, prueba de alta tensión, transformador.

Recibido: 30-04-2026, Aprobado tras revisión: 16-07-2026

Forma sugerida de citación: Calle, J.; Guamán, W.; Velasco, F.; Cajas, J. (2026). "Metodología basada en ATPDraw para la preconfiguración y validación experimental de ensayos de impulso tipo rayo en transformadores de potencia". Revista Técnica "energía". No. 23, Issue I, Pp. 55-64

ISSN Online: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v23.n1.2026.763>

© 2026 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

Las perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia son inherentes a su operación y pueden generar sobretensiones transitorias de origen interno y externo, cuyas amplitudes pueden superar ampliamente los valores pico de la tensión nominal de la red y provocar descargas disruptivas [1]. En el marco de la coordinación de aislamiento, IEC 60071-1 clasifica los equipos en función de la tensión más elevada del equipo U_m y del tipo de sobretensión predominante [2]:

- **Rango 1** ($U_m < 245 \text{ kV}$): las perturbaciones externas, principalmente las descargas atmosféricas, presentan mayor exigencia dieléctrica.
- **Rango 2** ($U_m > 245 \text{ kV}$): las sobretensiones de origen interno o de conmutación adquieren un rol crítico.

Esta clasificación permite determinar las tensiones soportadas normalizadas de corta duración ante impulsos tipo rayo y maniobra según el rango correspondiente. En consecuencia, constituye la base para definir y ejecutar ensayos dieléctricos en laboratorio [3].

Aunque la forma de onda de las sobretensiones transitorias reales puede variar considerablemente, los ensayos de alta tensión emplean impulsos normalizados de polaridad unidireccional para reproducir condiciones representativas de sollicitación dieléctrica. En el ensayo de impulso tipo rayo normalizado, la forma de onda se caracteriza por la tensión pico aplicada (V_p), el tiempo de frente (T_1) y el tiempo al valor medio o tiempo de cola (T_2), asociados a la onda 1,2/50 μs definida en IEC 60060-1 [6].

Para este propósito, los laboratorios de alta tensión emplean Generadores de Impulso de Tensión (GIT), que permiten ajustar la amplitud y los parámetros temporales de la onda aplicada. Aunque históricamente estos ensayos han tenido un carácter destructivo para determinar el límite de ruptura dieléctrica, la ingeniería moderna se orienta hacia metodologías de modelación previa que optimizan la configuración del circuito de ensayo [7]. De este modo, se busca mitigar riesgos de fallas imprevistas durante la prueba y preservar la integridad del aislamiento del objeto bajo ensayo.

En este marco, el presente trabajo propone una metodología sistemática para modelar en ATPDraw los elementos que intervienen en este ensayo permitiendo la preconfiguración y validación experimental de ensayos de impulso tipo rayo de onda completa en transformadores de potencia. La propuesta integra principalmente el modelo

detallado por etapas del GIT, la representación del objeto de ensayo mediante sus parámetros capacitivos e inductivos concentrados equivalentes y el sistema de medición. Con ello, se busca reproducir las condiciones principales del ensayo antes de su aplicación experimental, facilitando el ajuste previo del GIT y reduciendo procedimientos de prueba y error en laboratorio.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se detallan los principales parámetros seleccionados para el modelado del GIT, el modelo del objeto de ensayo y el fundamento metodológico normalizado para la determinación de los parámetros de la onda resultante; la Sección 3 se analizan los resultados obtenidos y se realiza la comparación entre simulación y ensayo experimental; finalmente en la Sección 4 se resumen las principales conclusiones del trabajo.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se presentan el modelado matemático y la caracterización experimental de los elementos que conforman el circuito generador de impulsos. Se describen los parámetros eléctricos y constructivos relevantes de cada componente. Posteriormente, los modelos se integran en ATPDraw. Por último, se indican los métodos empleados para su parametrización y validación mediante la comparación entre los parámetros del impulso simulado y las mediciones de *laboratorio*.

2.1 Circuito Generador de Impulsos

Para la generación de impulsos tipo rayo y tipo maniobra, el circuito de Marx convencional multietapa constituye una solución ampliamente utilizada por su escalabilidad y flexibilidad de ajuste. El circuito consta de n etapas; durante el proceso de carga, los condensadores C_G se conectan en paralelo a través de resistencias de carga R_{ch} . Al alcanzar la tensión de ruptura, los explosores de esferas (gaps) se ceban y los condensadores se conectan en serie, multiplicando la tensión de carga V_0 en función del número de etapas para obtener la tensión pico de salida V_p [10].

La onda normalizada se obtiene mediante la configuración de las resistencias del generador: R_f controla principalmente el tiempo de frente, mientras que R_t controla el tiempo de cola. La descarga se aplica sobre la capacitancia equivalente del objeto de ensayo C_{TO} , descrita en la Sección 2.2. La Fig. 1 muestra un circuito de tres etapas con sus componentes fundamentales [9].

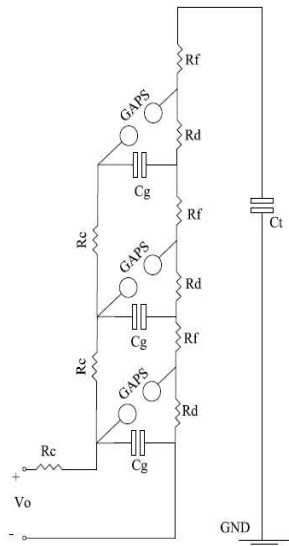


Figura 1: Circuito generador de impulso multietapa de Marx [9]

Sin embargo, cuando el objeto de ensayo presenta comportamiento predominantemente inductivo, como ocurre en transformadores y reactores, el circuito de Marx convencional puede presentar limitaciones para reproducir adecuadamente el tiempo de cola T_2 . Para considerar esta interacción, se emplea la variante Marx-Glaninger, donde el objeto de ensayo se representa mediante una capacitancia C_{TO} en paralelo con una inductancia equivalente L_{TO} . El circuito resultante se muestra en la Fig. 2 [17].

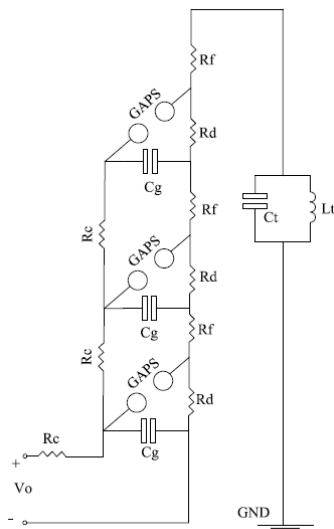


Figura 2: Circuito generador de impulso multietapa de Marx-Glaninger [17]

A partir del análisis clásico descrito por Kuffel y Kuffel [7], la tensión transitoria de salida en el dominio del tiempo puede expresarse mediante la ecuación (1):

$$v_{\text{salida}}(t) = V_0[Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t}\sin(\omega t + \theta)] \quad (1)$$

Donde:

V_0 : tensión de carga inicial.

A y B : coeficientes de amplitud adimensionales determinados por las condiciones iniciales del circuito.

α : factor de amortiguamiento.

β : factor de atenuación.

ω : frecuencia angular de oscilación transitoria.

θ : ángulo de desfase.

La ecuación (1) permite interpretar la forma de onda transitoria resultante y la influencia de los elementos capacitivos e inductivos del circuito. No obstante, en un sistema multietapa real intervienen inductancias, capacitancias parásitas y elementos de conmutación que dificultan el ajuste analítico exacto. Por esta razón, en este trabajo se adopta un modelo de simulación por etapas, siguiendo el enfoque de análisis de cargas inductivas propuesto en [17]. El generador implementado se parametrizó a partir de las especificaciones físicas de un equipo Huazheng HZCJ-1400 kV/140 kJ [16].

2.2 Modelo del Objeto de Ensayo

IEC 60076-4 proporciona directrices para los ensayos de impulso en transformadores y reactores [18]. En este trabajo, el objeto de ensayo se representa mediante dos parámetros concentrados dominantes: la capacitancia equivalente C_{TO} y la inductancia equivalente L_{TO} . Esta representación se adopta como una aproximación de primer orden, válida para reproducir la interacción principal entre el generador y el transformador durante el impulso tipo rayo.

La componente capacitiva se determinó mediante ensayos de factor de potencia y capacitancia. Aunque este ensayo se utiliza principalmente para evaluar el estado del aislamiento y las pérdidas dieléctricas, también proporciona información sobre el acoplamiento capacitivo entre devanados y tierra. Para ello, se empleó el sistema DELTA 4000 de Megger bajo el método *Grounded Specimen Test* (GST). En esta configuración, mostrada en la Fig. 3, los terminales de alta tensión (H), baja tensión (L)

y tierra (G) se conectan de manera que se obtengan las capacitancias principales del sistema de aislamiento: C_{HG} , C_{LG} y C_{HL} [13].

En particular, la capacitancia entre el devanado de alta tensión y tierra C_{HG} se adopta como parámetro de referencia para modelar impulsos aplicados al devanado de alta tensión. Esta simplificación concentra el sistema capacitivo distribuido del transformador en una carga equivalente C_{TO} , por lo que debe interpretarse como una aproximación útil para la preconfiguración del ensayo, no como un modelo interno completo del devanado.

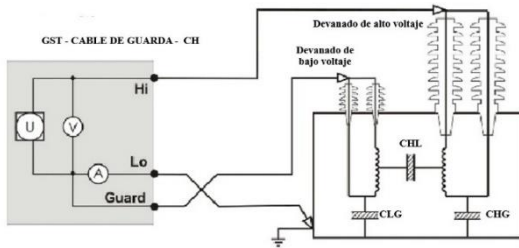


Figura 3: Diagrama de conexión para ensayo de factor de potencia con método GST [13]

Respecto a la componente inductiva, se empleó el criterio de cálculo usado para cargas inductivas en ensayos de impulso [17]. La inductancia puede determinarse experimentalmente mediante el ensayo de cortocircuito o derivarse de la impedancia porcentual $Z_{cc}(\%)$ especificada en la placa de características del transformador. IEC 60076-4 advierte que el valor efectivo durante el ensayo depende de la conexión de los bornes que no están bajo prueba; en esta investigación se consideró la condición con neutro y devanados secundarios conectados a tierra [18].

A partir de esta selección, la inductancia equivalente L_{TO} se incorporó al modelo de simulación. La componente resistiva del devanado se consideró despreciable frente a la reactancia, por lo que su influencia sobre la amortiguación del impulso se asumió secundaria para el nivel de aproximación buscado. La ecuación (2) permite estimar L_{TO} en valores reales [14].

$$L_{TO} = \frac{Z_{cc}(\%)}{100} \cdot \frac{V_b^2}{2\pi f S_b} \quad (2)$$

Donde:

L_{TO} : inductancia equivalente del objeto de ensayo.

$Z_{cc}(\%)$: impedancia de cortocircuito porcentual.

V_b : tensión base.

S_b : potencia base.

f : frecuencia.

Las componentes C_{TO} y L_{TO} representan una simplificación concentrada del comportamiento transitorio del transformador. En un equipo real, la respuesta ante impulso depende de una red distribuida de capacitancias e inductancias; por ello, esta aproximación es adecuada para preconfigurar el circuito de ensayo, aunque no reemplaza un modelo interno detallado del devanado [15].

2.3 Desarrollo del GIV en ATPDraw

El desarrollo del circuito se llevó a cabo utilizando el software Alternative Transient Program (ATPDraw), una herramienta especializada en el análisis de fenómenos transitorios. Su implementación en ATPDraw versión 7.2p10 permite realizar estudios de barrido paramétrico, variando uno o más elementos del circuito para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas.

La Fig. 4 muestra el diagrama de representación de este generador de impulsos dividido en tres secciones:

a) **Generador de impulsos:** consta de siete etapas. Inicialmente se modela una fuente de tensión DC1PHUG y posteriormente se incorporan los capacitores de etapa $C_G = 1 \mu F$ y las resistencias de carga $R_{ch} = 10 k\Omega$. Para la conmutación se utilizaron interruptores dependientes de voltaje SWITCHVC, que representan el cebado simultáneo de los gaps cuando los capacitores principales alcanzan la tensión máxima de carga.

b) **Objeto de ensayo:** se modeló mediante una inductancia equivalente L_{TO} y una capacitancia equivalente C_{TO} . En ATPDraw, estos elementos fueron declarados mediante componentes lineales de la librería del programa (IND_LINE y CAP_LINE).

c) **Sistema de medición:** consta de un divisor capacitivo con relación 1690:1, compuesto por un capacitor primario de $0,004 \mu F$ y un capacitor secundario de $0,6 \mu F$. Además, se incluyó la representación de la línea de transmisión de datos mediante cable coaxial de radiofrecuencia con impedancia característica adaptada, de acuerdo con el sistema de medición considerado [8]. Para la ganancia de los instrumentos de registro se utilizaron herramientas TACS de ATPDraw, y los parámetros principales se contrastaron con la información técnica del fabricante [16].

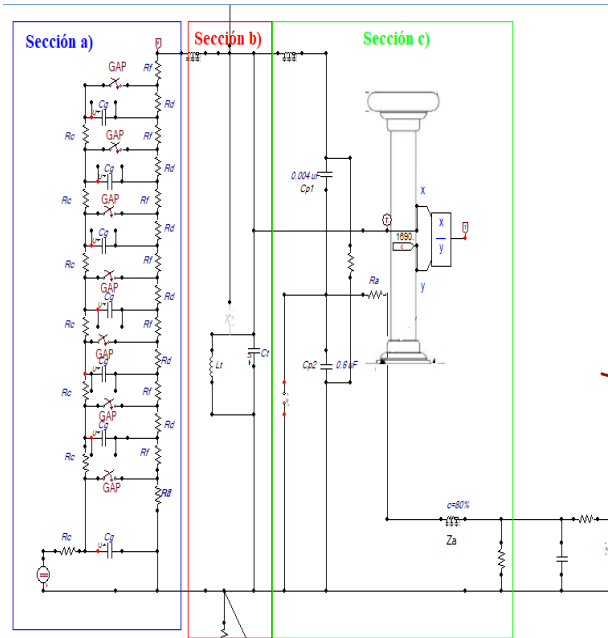


Figura 4: Diagrama de generador de impulso de siete etapas modelado en ATPDraw

Para garantizar la convergencia numérica y la estabilidad del algoritmo de integración, el paso de integración Δt se estableció en 1×10^{-8} s. Con esta configuración temporal, el tiempo promedio de respuesta computacional por corrida de simulación fue de 1,675 s. Para pasos menores, el tiempo de procesamiento aumenta considerablemente y pueden presentarse limitaciones de memoria sin mejoras significativas en la resolución de la respuesta transitoria.

2.4 Metodología para Evaluación de resultados de simulación

Para verificar la validez del impulso tipo rayo como ensayo, se consideró una forma de onda con polaridad negativa, condición representativa para la evaluación del aislamiento externo. El análisis de la onda resultante se realizó de acuerdo con IEC 60060-1 [6]. El primer parámetro evaluado fue que la tensión pico aplicada en onda completa se mantenga dentro de la tolerancia de ± 3 % respecto a la tensión de soportabilidad ante impulso tipo rayo (BIL).

La evaluación del tiempo de frente requiere una definición matemática específica, especialmente cuando existen perturbaciones superpuestas en la porción ascendente de la onda. Para ello, IEC 60060-1 define el tiempo de frente virtual T_1 a partir de los puntos

correspondientes al 30 % y 90 % de la tensión pico, como se expresa en la ecuación (3).

$$T_1 = 1.67(t_{90} - t_{30}) \quad (3)$$

Donde:

T_1 : tiempo de frente virtual.

t_{90} : instante en el que la onda alcanza el 90 % de la tensión pico durante el frente.

t_{30} : instante en el que la onda alcanza el 30 % de la tensión pico durante el frente.

La Fig. 5 muestra los puntos determinantes en el frente de onda para el cálculo de T_1 . Para caracterizar la porción descendente, el tiempo de cola T_2 se define como el intervalo requerido para que la tensión disminuya hasta el 50 % de la tensión pico V_p , según el criterio ilustrado en la Fig. 6 [6].

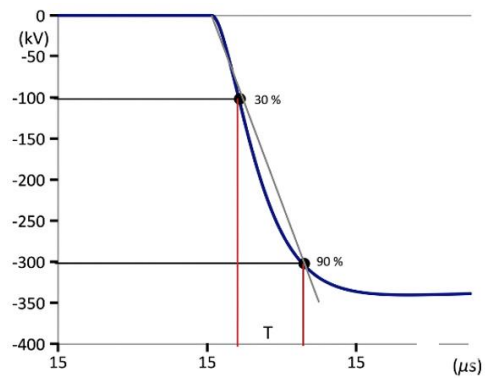


Figura 5: Puntos determinantes en el frente de onda ajustado

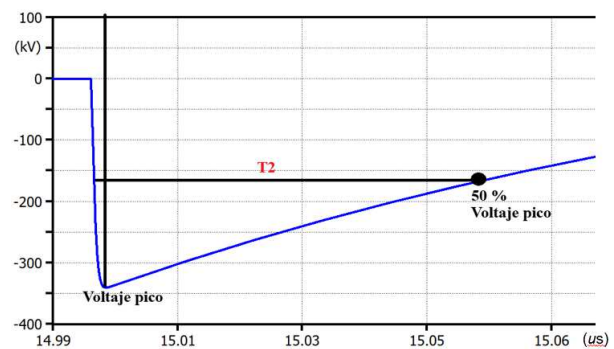


Figura 6: Puntos de medición en el descenso de la onda

2.5 Criterios estadísticos para la comparación de resultados experimentales y simulados

Finalmente, una vez obtenidos los parámetros de la onda de tensión: tensión pico V_p , tiempo de frente T_1 y tiempo de cola T_2 , se cuantificó la exactitud del modelo mediante la comparación entre los valores medidos en laboratorio y los valores obtenidos en simulación. El error relativo porcentual para cada caso se definió mediante la ecuación (4):

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{Y_i^{\text{lab}} - Y_i^{\text{sim}}}{Y_i^{\text{lab}}} \cdot 100 \quad (4)$$

Asimismo, para evaluar el comportamiento global del modelo en las cinco unidades independientes ensayadas, se aplicó el Error Medio Cuadrático Porcentual (EMCP), expresado en la ecuación (5):

$$\text{EMCP}(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i^{\text{lab}} - Y_i^{\text{sim}}}{Y_i^{\text{lab}}} \right)^2} \cdot 100 \quad (5)$$

Donde:

n : número total de casos de estudio.

i : índice de sumatoria.

Y_i^{lab} : valor de referencia medido en laboratorio; Y_i^{sim} : valor estimado mediante simulación.

La combinación de estas métricas permite evaluar el modelo de forma puntual y global. El error relativo identifica la desviación específica en cada transformador, mientras que el EMCP resume el ajuste general del modelo frente a los registros experimentales.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Esta sección presenta un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta y los datos experimentales de laboratorio. Para la validación se ensayaron cinco transformadores de potencia con grupo de conexión Dyn1, aplicando impulsos tipo rayo de polaridad negativa y evaluando V_p , T_1 y T_2 . El análisis se fundamenta en IEC 60060-1 [6]. Las características de las unidades bajo ensayo se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de casos de estudio

Casos	Potencia (MVA)	Tensión nominal (kV)	C_{TO} (nF)	L_{TO} (mH)	Z (%)	BIL (kV)
1	5	69/13.8	1.483	192.00	7.60	350/95
2	7.5	69/13.8	2.456	121.23	7.20	350/95
3	10	69/13.8	1.811	112.00	8.90	350/95
4	6	69/13.8	1.830	109.45	5.20	350/95
5	7.5	69/34.5	2.857	104.39	6.20	350/150

3.1 Análisis de Voltaje Máximo de Salida

Los valores máximos de tensión alcanzados para cada uno de los cinco casos de estudio se comparan en la Fig. 7, contrastando los registros experimentales de laboratorio con las respuestas obtenidas mediante simulación. El caso 2 presenta la mayor discrepancia cuantitativa, con una diferencia absoluta de 24,12 kV, equivalente a un error relativo porcentual de 7,09 %. En contraste, los casos 1, 3, 4 y 5 exhiben desviaciones de 1,71 %, 3,25 %, 0,91 % y 1,43 %, respectivamente, consolidando un error medio cuadrático inferior al 3,5 %.

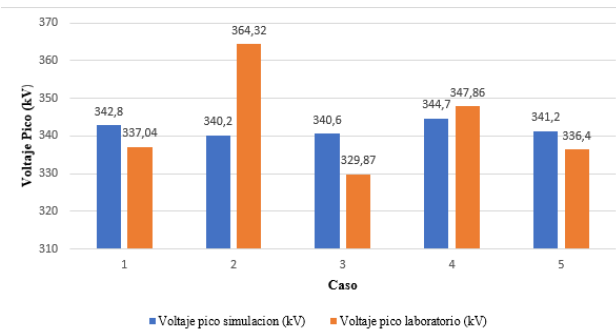


Figura 7: Comparación de la tensión pico entre simulación y laboratorio

Es fundamental distinguir entre el cumplimiento normativo y la exactitud predictiva del modelo. Con respecto al BIL, IEC 60060-1 establece una tolerancia de $\pm 3\%$ para la tensión pico de onda completa. La simulación cumple este criterio en todos los casos; sin embargo, la discrepancia observada en el caso 2 evidencia que el cumplimiento normativo no implica, por sí solo, una reproducción exacta del registro experimental.

3.2 Análisis de Tiempos de Frente T1

La Fig. 8 muestra las curvas de impulso tipo rayo obtenidas en ATPDraw para cada uno de los cinco casos evaluados, lo que permite una validación cualitativa del comportamiento del modelo en el dominio del tiempo. En la gráfica se aprecia que las curvas se superponen

parcialmente durante la fase inicial del transitorio, evidenciando la dinámica rápida del frente de onda.

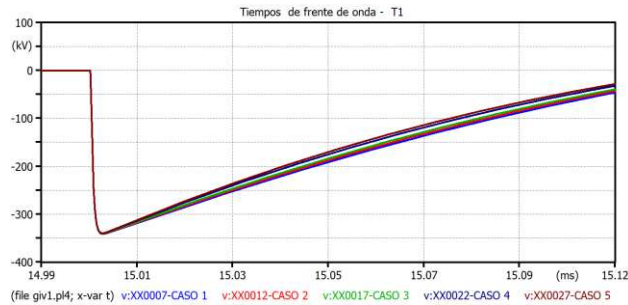


Figura 8: Onda de impulso simulada para cada caso

La Fig. 9 ilustra la comparación cuantitativa de los tiempos de frente T_1 entre los impulsos simulados y los ensayos experimentales. Al evaluar la exactitud predictiva mediante la ecuación (4), la mayor discrepancia se presenta en el caso 4, con una diferencia de 0,23 μ s, equivalente al 19,66 %. En contraste, los casos 1, 3 y 5 presentan desviaciones de 0,85 %, 0,88 % y 2,44 %, respectivamente, consolidando un EMCP inferior al 10 % para T_1 .

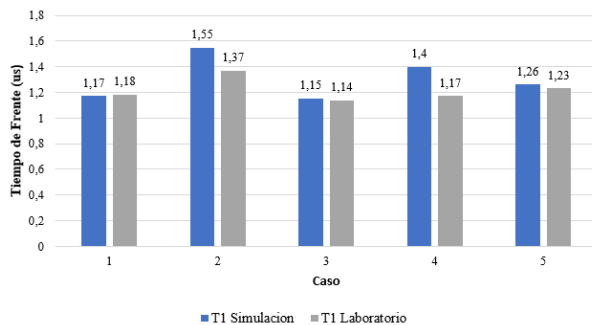


Figura 9: Comparación de tiempo de frente T_1

El análisis de las resistencias de frente R_f , mostrado en la Tabla 2, evidencia una alta similitud entre los valores de laboratorio y simulación, con diferencias absolutas comprendidas entre 2 Ω y 30 Ω . En general, los resultados confirman que R_f es uno de los parámetros más relevantes en la calibración del generador de impulsos, ya que influye directamente en el tiempo de frente y en la forma inicial de la señal aplicada.

Tabla 2: Comparación del valor de la resistencia R_f

Caso	Laboratorio (Ω)	Simulación (Ω)	Diferencia (Ω)
1	280	310	30
2	255	257	2
3	210	240	30
4	280	290	10
5	145	150	5

3.3 Tiempos de cola T_2 .

La Fig. 10 muestra el perfil temporal de las curvas simuladas en el instante en que la señal de tensión se encuentra al 50 % en el descenso de la onda. Las curvas presentan pendientes concordantes, lo que indica un comportamiento consistente en el grupo de transformadores evaluado.

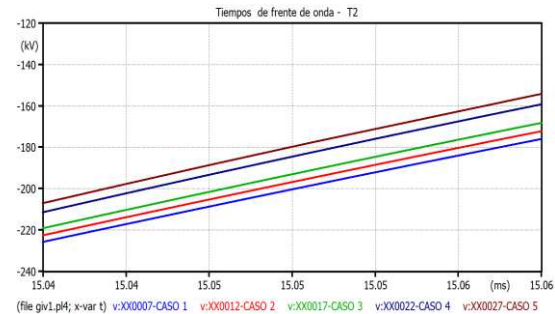


Figura 10: Punto de onda descendente al 50 % del voltaje pico

La Fig. 11 muestra el análisis comparativo cuantitativo del tiempo T_2 entre la simulación y los registros de laboratorio. En la mayoría de los casos la simulación presenta valores ligeramente superiores a los medidos. El caso 3 muestra la mayor discrepancia, con una diferencia temporal de 12,17 μ s y un error relativo de 28,9 %, mientras que el EMCP total para T_2 es 14,12 %.

Al evaluar los resultados frente a los límites normativos, tanto las ondas simuladas como las medidas se mantuvieron dentro del intervalo admisible para el tiempo de cola del impulso normalizado. No obstante, este cumplimiento debe interpretarse de forma separada de la exactitud del modelo, ya que estar dentro del rango normativo no garantiza una coincidencia directa entre simulación y laboratorio.

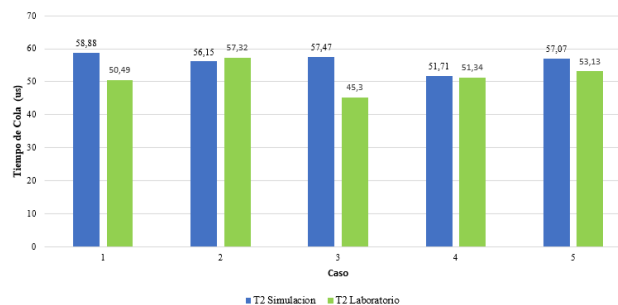


Figura 11: Comparación del tiempo de cola T_2 entre simulación y laboratorio

La resistencia de cola R_t fue comparada entre laboratorio y simulación debido a su influencia directa sobre el tiempo de cola T_2 . A diferencia de R_f , que modifica

principalmente la pendiente inicial de la onda, R_t interviene en el proceso de descarga y en el tiempo requerido para que la señal alcance el 50 % de la tensión pico.

Tabla 3: Comparación del valor de la resistencia R_t .

Caso	Laboratorio (Ω)	Simulación (Ω)	Diferencia (Ω)
1	770	772	2
2	805	808	3
3	770	775	5
4	880	883	3
5	790	792	2

Se evidencia que los valores de R_t presentan diferencias reducidas entre laboratorio y simulación, con variaciones absolutas entre 2 Ω y 5 Ω . Sin embargo, las diferencias observadas en T_2 son mayores que las diferencias propias de R_t , por lo que el tiempo de cola no depende únicamente de esta resistencia. Su comportamiento también está asociado con la interacción entre C_{TO} , L_{TO} y los elementos parásitos presentes en el montaje experimental.

3.4 Discusión General de Resultados

El análisis consolidado demuestra que el modelo computacional implementado en ATPDraw reproduce de forma adecuada los parámetros principales de la onda de impulso tipo rayo en los cinco transformadores evaluados. En lo referente a la tensión pico V_p , el modelo presenta errores relativos por debajo de 7,1 % y una desviación promedio de 3,76 %.

En el caso del tiempo de frente T_1 , las diferencias porcentuales varían entre 0,85 % y 13,1 %, con una desviación promedio aproximada de 6,0 %. Las diferencias en los ajustes de R_f se asocian a resistencias de conexión, inductancias parásitas y capacitancias distribuidas del montaje físico, elementos que no siempre pueden representarse con exactitud mediante un modelo concentrado.

El tiempo de cola T_2 presenta la mayor sensibilidad frente a la representación del objeto de ensayo. Los errores relativos alcanzan un máximo de 28,9 % y una desviación promedio de 10,8 %. Esto confirma que el modelo es útil para la preconfiguración del ensayo, aunque la predicción precisa de T_2 requiere incorporar con mayor detalle los elementos parásitos del montaje y la naturaleza distribuida del transformador.

Más allá de la exactitud predictiva del ajuste numérico, el cumplimiento normativo fue satisfactorio para los

parámetros evaluados en la simulación. Sin embargo, la validación metodológica debe distinguir entre dos criterios: por un lado, que la onda cumpla las tolerancias normalizadas; por otro, que el modelo reproduzca con precisión los registros experimentales. Esta distinción es especialmente relevante para interpretar las diferencias observadas en T_2 .

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología basada en ATPDraw para la preconfiguración y validación experimental de ensayos de impulso tipo rayo completo en transformadores de potencia. La propuesta integra el modelado del generador de impulsos, el sistema de medición y la caracterización capacitiva e inductiva del objeto de ensayo, permitiendo reproducir en simulación las condiciones principales observadas en laboratorio.

Los resultados muestran una buena correspondencia entre simulación y ensayo experimental. La tensión pico presentó la mejor aproximación, con una desviación promedio cercana al 3,76 %, mientras que los parámetros temporales alcanzaron desviaciones promedio aproximadas de 6,0 % para T_1 y 10,8 % para T_2 . En todos los casos evaluados, las ondas simuladas se mantuvieron dentro de las tolerancias establecidas para el impulso de tensión tipo rayo normalizado de onda completa 1,2/50 μ s.

La metodología propuesta permite apoyar el ajuste previo del generador de impulsos y mejorar la trazabilidad entre la simulación y la prueba experimental. En un trabajo futuro se pretende incorporar con mayor detalle los elementos parásitos del montaje, los cables de conexión, los gaps y las pérdidas asociadas al transformador bajo ensayo para mejorar la predicción de los tiempos de frente y cola.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Martínez, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. 2007.
- [2] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-1:2019, Insulation co-ordination — Part 1: Definitions, principles and rules. Geneva, Switzerland: IEC, 2019.
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-2:2023, Insulation co-ordination — Part 2: Application guidelines. Geneva, Switzerland: IEC, 2023.

- [4] IEEE, IEEE Std C57.98-2011, IEEE Guide for Transformer Impulse Tests. New York, NY, USA: IEEE, 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6168181.
- [5] H. M. Wickert and T. B. Marchesan, "A method for representing non-standard waveform in factory tests using impulse waveforms," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 37, no. 5, pp. 3491–3500, Oct. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3129603.
- [6] International Electrotechnical Commission, IEC 60060-1:2025, High-voltage test techniques — Part 1: General terminology and test requirements. Geneva, Switzerland: IEC, 2025.
- [7] J. Kuffel and P. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals, 2nd ed. Oxford, U.K.: Newnes, 2000.
- [8] International Electrotechnical Commission, IEC 60060-2:2025, High-voltage test techniques — Part 2: Measuring systems. Geneva, Switzerland: IEC, 2025.
- [9] C. L. Wadhwa, High Voltage Engineering, 3rd ed. New Delhi, India: New Age International Publishers, 2012.
- [10] P. Ghosh, B. Chakraborty, S. Dalai, and S. Chatterjee, "Simulation and real-time generation of non-standard lightning impulse voltage waveforms," in Proc. IEEE Int. Conf. Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE), 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICDCECE53908.2022.9792719.
- [11] C. H. Hsu, "Experimental results of electromechanical structure properties of noise and vibration on power transformers after lightning impulse test," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 134, p. 107458, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107458.
- [12] IEEE, IEEE Std C57.12.00-2021, IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York, NY, USA: IEEE, 2022.
- [13] Megger Sweden AB, DELTA4000 12 kV Insulation Diagnostic System: Reference Manual — Applications Guide, ZM-AH02E. Danderyd, Sweden: Megger, 2010.
- [14] J. Fraile Mora, Máquinas eléctricas, 6th ed. Madrid, Spain: McGraw-Hill Interamericana de España, 2008.
- [15] F. Carmona, J. E. Jiménez Hornero, and F. Vázquez, "Modelado y simulación del circuito generador de impulsos para el ensayo de transformadores," in XXVI Jornadas de Automática, Alicante, Spain, 2005, pp. 781–786.
- [16] Huazheng Electric Manufacturing (Baoding) Co., Ltd., "HZCJ series impulse voltage generator," Product Information, Baoding, China. [Online]. Available: https://huazhengelectric.com/products_41/impulse-voltage-generator.html
- [17] P. Yuthagowith, P. Kitcharoen, and A. Kunakorn, "Systematic design and circuit analysis of lightning impulse voltage generation on low-inductance loads," Energies, vol. 14, no. 23, Art. no. 8010, 2021, doi: 10.3390/en14238010.
- [18] International Electrotechnical Commission, IEC 60076-4:2002, Power transformers — Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing — Power transformers and reactors. Geneva, Switzerland: IEC, 2002.



John H. Calle. - Nació en Ambato, Ecuador en 1998. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Universidad de Técnica de Cotopaxi en 2022. Ha desempeñado cargos como laboratorista de alto voltaje y supervisor operativos de proyectos integrales en media y baja tensión, actualmente se desempeña como docente de la carrera de electricidad en el Instituto Superior Universitario SUCRE. Sus campos de investigación están relacionados con el diseño en alto voltaje y estudios de sistemas eléctricos de potencia.



Wilian Guamán. - nació en Riobamba, Ecuador en 1989. Profesional especializado en la coordinación, ejecución y fiscalización de proyectos energéticos, específicamente en la construcción de facilidades de superficie y la puesta en marcha de plantas de generación de electricidad. Recibió su título de Ingeniero en Electromecánica por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y de máster en Ingeniería de la Energía por la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 2018, se desempeña como docente universitario. Actualmente, es candidato a doctor en ingeniería eléctrica en la Escuela Superior Politécnica del Litoral y sus campos de investigación están relacionados con la planificación óptima de los sistemas eléctricos de potencia.



María Fernanda Velasco. - María Fernanda Velasco Cayo nació en Latacunga, Ecuador, en 1996. Profesional especializada en diseño y construcción de redes de distribución eléctrica y gestión de proyectos del sector energético. Recibió su título de Ingeniera Eléctrica y de magíster en Electricidad con mención en Sistemas Eléctricos de Potencia. Actualmente, se desempeña como consultora independiente. Sus campos de interés profesional e investigación están relacionados con la integración de energías renovables a las redes eléctricas.



Edgar Javier Cajas Oña. - Nació en Saquisilí en 1987. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Latacunga en 2015; Master en Docencia Universitaria de la Universidad Internacional Iberoamericana, México 2023; Maestría en Electricidad mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas, Ecuador 2025. Actualmente trabajo en el Instituto Superior Universitario SUCRE como Docente y el campo de investigación se encuentra relacionado con la Automatización e Instrumentación.