

Tipo de artículo: Artículo original

Simulación de Sobretensiones Transitorias Rápidas en Transformador de Distribución tipo capa en MATLAB

Simulation of Fast Transient Overvoltages in Layer Type Distribution Transformer in MATLAB

Shirley Gabriela Alarcón Loza^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-7936-5410>

Karen María Mite Baidal² , <https://orcid.org/0000-0002-4416-3878>

Diana Xiomara Calderón Onofre³ , <https://orcid.org/0000-0002-1378-0419>

¹ Instituto Superior Tecnológico ARGOS; Daule – Ecuador. Correo electrónico: galarcon@tecnologicoargos.edu.ec

² Instituto Superior Tecnológico ARGOS; Daule – Ecuador. Correo electrónico: kamite@tecnologicoargos.edu.ec

³ Instituto Superior Tecnológico ARGOS; Daule – Ecuador. Correo electrónico: dcalderon@tecnologicoargos.edu.ec

* Autor para correspondencia: galarcon@tecnologicoargos.edu.ec

Resumen

El transformador constituye uno de los elementos más importantes y utilizados del sistema de distribución, por lo que puede sufrir daños debido a las sobretensiones transitorias de frecuencia rápida ocasionadas por descargas atmosféricas o por la conexión/desconexión de los sistemas de alimentación. Vinculado con lo anterior, se desconoce el comportamiento de los materiales sólidos que forman el sistema de aislamiento por lo que el objetivo del presente artículo es analizar un modelo matemático para el estudio de las sobretensiones transitorias en los devanados de un transformador de distribución monofásico con devanado tipo capa. Para tal efecto, se tomaron las medidas geométricas y constructivas de los devanados, así como las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes sólidos; se aplicó en el dominio de la frecuencia, el modelo de parámetros distribuidos basado en el método de la línea de transmisión multiconductora y, a partir del software Excel y MATLAB®, se ejecutaron los cálculos del modelo para la obtención de gráficas en el dominio del tiempo que representen la respuesta transitoria de las capas de los devanados a partir de la aplicación de una señal transitoria de voltaje. Los resultados mostraron que, al aplicar una señal transitoria impulsiva en el devanado de AT se presentó una sobretensión del 123% y 112% para la segunda y cuarta capa, respectivamente; mientras que para el devanado de BT se presentó una distribución de voltaje uniforme. De igual forma se, aplicó una señal transitoria oscilatoria (0,5us) en el devanado de AT donde se presentó una sobretensión del 138%; 125% y 111% en la segunda, cuarta y sexta capa, respectivamente, mientras que en BT se visualizó oscilaciones cercanas al valor de referencia.

Palabras clave: parámetros distribuidos; método de la línea de transmisión multiconductora; transformador tipo capa; sobretensiones transitorias rápidas; simulación MATLAB.

Abstract

The transformer is one of the most important and used elements of the distribution system, so it can be damaged due to transient high-frequency overvoltages caused by atmospheric discharges or by the connection/disconnection of power systems. Linked to the above, the behavior of the solid materials that form the insulation system is unknown, so the objective of this article is to analyze a mathematical model for the study of transient overvoltages in the windings of a single-phase distribution transformer with winding layer type. For this purpose, the geometric and constructive measurements of the windings were taken, as well as the dielectric properties of the solid transparent materials; The distributed parameter model based on the multiconductor transmission line method was applied in the frequency domain and, using Excel and MATLAB® software, the calculations of the model were executed to obtain graphs in the frequency domain time that represents the transient response of the winding layers from the application of a transient voltage signal. The results showed that, when applying an impulsive transient signal in the HV



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional**
(CC BY 4.0)

winding, an overvoltage of 123% and 112% was presented for the second and fourth layers, respectively; while for the LV winding a uniform voltage distribution was presented. Similarly, a transient oscillatory signal (0.5us) was applied to the HV winding, where an overvoltage of 138% occurred; 125% and 111% in the second, fourth and sixth layers, respectively, while in BT oscillations close to the reference value were observed.

Keywords: distributed parameters; multi-conductor transmission line method; layer type transformer; fast transient overvoltages; MATLAB simulation

Recibido: 15/11/2022
Aceptado: 25/12/2022
En línea: 01/01/2023

Introducción

Los transformadores aumentan o disminuyen los niveles de voltaje, siendo una función que permite el desarrollo de las actividades en el ámbito residencial e industrial; además, este elemento puede tener una larga vida útil si se le da el mantenimiento adecuado a tiempo. El sistema de aislamiento del transformador es de gran importancia, ya que protege los devanados y genera canales de circulación para el aceite mineral, aumentando la rigidez dieléctrica, lo cual consiste en un conjunto de materiales aislantes sólidos que al conocer sus medidas constructivas y geométricas proporcionan una serie de datos numéricos que permiten predecir el comportamiento ante sobretensiones transitorias de frecuencia rápida y muy rápida (Hosseini et al., 2008), incluso antes de la construcción del transformador.

En ese contexto, surgen los modelos matemáticos como una herramienta de análisis que se constituye en una serie de ecuaciones, funciones y fórmulas matemáticas que trabajan los datos para explicar fenómenos que, a simple vista, no se detectan; asimismo pueden solucionar problemas del mundo real obteniendo resultados útiles para la toma de decisiones.

Dentro del ámbito de los transformadores de distribución con devanado tipo capa, se encuentra información relacionada con el número de espiras, distancias, conductores y demás datos que forman parte del sistema de aislamiento sólido.

A partir de dicho fundamento, el objetivo del presente artículo es analizar un modelo matemático para el estudio de las sobretensiones transitorias en los devanados de alta y baja tensión (AT y BT) de un transformador de distribución monofásico con devanado tipo capa. Para tal efecto, se ha considerado el aislamiento entre espiras (Zhang et al., 2013), aislamiento entre devanados, aislamiento tanque-devanado, distancias transversales y longitudinales de los devanados, diámetro de los conductores, propiedades físicas de los materiales. Se empleó el software utilitario Excel para el cálculo de los parámetros eléctricos mediante la aplicación de fórmulas teóricas convencionales y el software MATLAB® para el cálculo de las ecuaciones del telegrafista en el dominio de la frecuencia, la aplicación de las equivalencias de voltaje y corriente empleando un circuito eléctrico de parámetros distribuidos basado en el método de la línea de transmisión multiconductora. Finalmente, la generación de gráficas que muestran la respuesta transitoria de las capas de los devanados en el dominio del tiempo utilizando la Transformada Numérica de Laplace (Moreno and Ramirez, 2008; R-Smith and Brancik, 2016) y así interpretar los resultados obtenidos.



La decisión de aplicar el modelo matemático tiene ventajas significativas, en torno a la predicción de posibles eventos desfavorables como el envejecimiento prematuro (Germain, 2002), degradación o carbonización del papel dieléctrico (Li et al., 2021; Noirhomme et al., 2013), cortocircuito entre espiras, fallas en los devanados, entre otros.

Los transformadores poseen un sistema de aislamiento sólido conformado por el papel dieléctrico diamantado que tiene una resistencia mecánica superior a otros tipos de papeles, cuenta con una rigidez dieléctrica del orden de 5 kV/mm que se incrementa hasta 30 kV/mm, cuando se impregna con aceite mineral (Fernández et al., 2019). Al juntar las permitividades del aislamiento líquido y sólido, una mayor parte de la tensión dieléctrica se distribuirá en el material sólido, en consecuencia, se reducirá la tensión en el fluido.

Las partes internas del transformador se diseñan y preparan para soportar eventos transitorios a lo largo de su vida, sin embargo, recibir ondas de impulso frecuentemente provoca un deterioro en el sistema de aislamiento ya que se encuentra estrechamente relacionado con las espiras del devanado, por lo tanto, reciben toda la energía del impulso.

Las sobretensiones transitorias suelen ser valores elevados (Florkowski et al., 2016) y se originan por el impacto de ondas de impulso que atraviesan las capas del devanado alterando los valores de tensión y corriente, lo cual sucede, generalmente, cuando el transformador recibe descargas atmosféricas entre sus terminales, aunque hay otros eventos que también provocan estas situaciones (De Oliveira Quevedo et al., 2017). Las ondas de impulso se clasifican en estándar o tipo rayo que son sobretensiones pronunciadas con una atenuación más rápida, mientras que las no estándar manejan valores de cresta más altos con aumentos pronunciados y se pueden clasificar en varias formas de onda (Okabe and Takami, 2008).

En la Tabla 1 se muestra una serie de modelos matemáticos que ayudan a caracterizar los transformadores, entre los cuales destacan los modelos dinámico-matemáticos que determinan las sobretensiones transitorias rápidas en un transformador (Meerschaert, 2013).

Tabla 1. Modelos de transformadores para el estudio de sobretensiones transitorias.

Tipo de parámetros	Dominio	Modelo matemático	Solución	Trabajos
Parámetros agrupados	Frecuencia	Análisis modal	Transformada numérica de Laplace	(Degeneff et al., 1982; Gómez et al., 2011)
Parámetros distribuidos	Frecuencia	Método de la línea de transmisión multiconductora	Transformada numérica de Laplace	(Hosseini et al., 2008; Liang et al., 2006; Popov, van der Sluis, Smeets and López Roldan, 2007)
Parámetros agrupados	Tiempo	Representación de estado - espacio	Integración	(Fergestad and Henriksen, 1974; Ragavan and Satish, 2005)
Parámetros distribuidos	Tiempo	Método de la línea de transmisión multiconductora	Modelo Bergeron Descomposición modal	(Villanueva-Ramírez et al., 2014)

Para este trabajo de investigación se ha empleado las ecuaciones del telegrafista que son dos derivadas que relacionan el voltaje y la corriente a lo largo de una línea de transmisión (Durlym et al., 2013). Estas ecuaciones dan las expresiones de las tensiones y corrientes a lo largo de la línea, en función del tiempo y el espacio (Khan et al., 2019). Asimismo, se ha utilizado el método de la línea de transmisión multiconductora que simula las interconexiones y los transitorios electromagnéticos en los devanados del transformador (Djordjević et al., 1987; Guardado and Cornick, 1989), en este método, cada conductor del devanado es considerado como una línea de transmisión paralela con la misma longitud, de esa forma, cada vuelta del transformador se modela como una línea de transmisión (Achankunju



et al., 2021). Todos los acoplamientos capacitivos e inductivos se toman en cuenta (Sobouti et al., 2021) y se utilizan para el análisis cuando los cables son paralelos entre sí (Zheng et al., 2020), siendo el método aceptado para la formulación analítica de un problema.

Materiales y métodos

En el marco de desarrollo del presente artículo, los datos constructivos, geométricos y las propiedades eléctricas de los materiales son una pieza clave de la cual surgen las matrices y ecuaciones del modelo matemático, que por sí solos no constituyen una fuente de información significativa para analizar la respuesta transitoria de las capas de los devanados en el dominio del tiempo. En ese sentido, se explica el origen de la información, las fórmulas empleadas, la programación y el procesamiento en el software correspondiente y la interpretación de las gráficas obtenidas.

El objetivo de estudio se basó en un transformador de distribución monofásico de 3kVA con devanado tipo capa. La bobina se forma por una base robusta de cartón presspan dieléctrico y espiras de cobre aisladas con papel crepé dieléctrico y cintas de filamento, dichas espiras están separadas por varias capas de papel dieléctrico diamantado, formando un “sánduche” de varios niveles hasta que se consigue la altura determinada previamente en el diseño dieléctrico, de esa forma, sólo se considera el aislamiento sólido para el análisis transitorio.

Parámetros Eléctricos

De manera teórica se somete un transformador de distribución a sobretensiones transitorias de frecuencia rápida, por lo que se necesita conocer parámetros eléctricos como la capacitancia, impedancia, inductancia y admitancia que se obtuvieron a partir de la aplicación de fórmulas teóricas convencionales considerando las características eléctricas y magnéticas del devanado (Venegas et al., 2009), en las cuales se requiere a detalle el espesor de la bobina, según se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Espesor de la bobina del transformador de distribución

Devanados de Alta y Baja Tensión	Constitución de la capa	Medidas en mm
Aislamiento entre núcleo-bobina tubo devanado	1 capa de cartón presspan dieléctrico (1,5 mm) + 4 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm)	2,100
Bobina de baja tensión conductor circular de cobre 11 AWG	3 capas de conductor (2,395 mm)	7,185
Aislamiento entre capas de baja tensión	3 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm) + cinta de filamento (1 mm)	1,450
Aislamiento entre bobinas AT y BT	10 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm) + ductos de cartón presspan dieléctrico (3 mm) + 10 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm)	6,000
Bobina de alta tensión conductor circular de cobre 26 AWG	16 capas de conductor (0,457 mm)	7,312
Aislamiento entre capas de alta tensión	15 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm) + cinta de filamento (1 mm)	3,250
Aislamiento tanque-bobina	6 capas de papel dieléctrico diamantado (0,15 mm)	0,900
Espesor total de la bobina		28,197



Del mismo modo se detallan las características constructivas y geométricas del devanado, en la Tabla 3, resaltando que este tipo de información se obtiene de los fabricantes.

Tabla 3. Datos constructivos y geométricos de los devanados de alta (AT) y baja (BT) tensión del transformador de distribución

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia	kVA	3
Voltaje de alta tensión	V	$\frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967$
Voltaje de baja tensión	V	120-240
Número de capas AT	capas	16
Espiras por capa AT	espiras/capa	15(233) y 1(186)
Número de espiras AT	espiras	3681
Número de capas BT	capas	3
Espiras por capa BT	espiras/capa	2(48) y 1(15)
Número de espiras BT	espiras	111
Distancia transversal interna AT	mm	39,007
Distancia transversal externa AT	mm	49,569
Distancia transversal interna BT	mm	24,372
Distancia transversal externa BT	mm	33,007
Distancia longitudinal interna AT	mm	76,735
Distancia longitudinal externa AT	mm	87,297
Distancia longitudinal interna BT	mm	62,100
Distancia longitudinal externa BT	mm	70,735
Diámetro del conductor AT	mm	0,405
Aislamiento doble del conductor AT	mm	0,052
Diámetro del conductor BT	mm	2,305
Aislamiento doble del conductor BT	mm	0,09
Distancia entre capas ($dist_{capa}$)	mm	0,150
Altura de la bobina (h)	mm	106,481
Permitividad dieléctrica papel diamantado (ϵ_r)	-	4
Permitividad dieléctrica del vacío (ϵ_0)	F/m	$8,85 \times 10^{-12}$
Conductividad del cobre (σ_{cond})	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	$5,9998 \times 10^7$
Permeabilidad magnética del cobre (μ_{cond})	Wb/(A*m)	1
Conductividad del papel dieléctrico diamantado (σ_{diel})	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-15}$

Todas las matrices que se detallan a continuación se realizaron en Excel, luego se trasladaron a MATLAB® mediante el comando *xlsread*.

Matriz de capacitancia del transformador de distribución

Para el cálculo de la matriz de capacitancia se necesita conocer la capacitancia entre espiras, la capacitancia entre capas, la capacitancia a tierra y la capacitancia entre devanados de AT y BT (Shibuya and Fujita, 2002), por lo que se empleó fórmulas que se detallan a continuación.



Para la capacitancia entre capas ($C_{HH(N)}$) se empleó la fórmula de la capacitancia cilíndrica de los conductores concéntricos que se transformó en términos de la permitividad dieléctrica del vacío (ϵ_0) y del papel dieléctrico diamantado (ϵ_r), la altura de la bobina h , así como el radio externo (r_{i+1}) e interno r_i de cada capa, ver Ecuación 1.

$$C_{HH(N)} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r h}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \quad (1)$$

Para la capacitancia a tierra (C_{HG}) se calculó el equivalente paralelo de las capacitancias entre capas, ver Ecuación 2.

$$C_{HG} = \left(\frac{1}{C_{HH1}} + \frac{1}{C_{HH2}} + \frac{1}{C_{HH3}} + \dots + \frac{1}{C_{HH(N)}} \right)^{-1} \quad (2)$$

Finalmente, se creó la matriz de capacitancia con dimensiones $N \times N$, donde N representa las capas del devanado. La unidad de medida de los componentes es en faradios [F].

$$\begin{bmatrix} C_{HH1}+C_{HG} & -C_{HH1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -C_{HH1} & C_{HH1}+C_{HH2}+C_{HG} & -C_{HH2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -C_{HH2} & C_{HH2}+C_{HH3}+C_{HG} & -C_{HH3} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -C_{HH3} & C_{HH3}+C_{HH4}+C_{HG} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -C_{HH4} & C_{HH(N-1)+} & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{HH(N)}+C_{HG} & C_{HH(N)} \\ & & & & -C_{HH(N)} & C_{HH(N)} \end{bmatrix}$$

Matriz de inductancia del transformador de distribución

La Ecuación 3 muestra las características de la matriz de inductancia \bar{L} del devanado, por ese motivo se contabilizó el número de espiras de cada capa y se calculó la matriz inversa de la capacitancia (\bar{C}^{-1}), así como la matriz \bar{l}_{turn} y la velocidad de propagación de la onda que se muestra en la Ecuación 4.

$$\bar{L} = \frac{\bar{C}^{-1}}{v_s^2} * N_{esp.capa}^2 * \bar{l}_{turn} \quad [mH] \quad (3)$$

$$v_s = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

En ese sentido, la matriz de longitudes de las capas del devanado (\bar{l}_{turn}) tiene dimensiones $N \times N$. Para los cálculos se utilizó el diámetro del conductor y el espesor del aislamiento entre capas, así como el aislamiento propio del conductor (papel crepé dieléctrico y cintas de filamento). Cada uno de los componentes de la matriz se calculó a través de la Ecuación 5.

$$l_{turn(i,j)} = \frac{long\ c/capa - h}{1000} \quad [m] \quad (5)$$



La Ecuación 6 permite el cálculo de la longitud de cada capa (**long c/capa**) del devanado en la que se empleó la distancia total (**d**) vista en la Ecuación 7, constituida por el diámetro interno (**dint**) y el diámetro externo (**dext**) de las espiras, expresados en la Ecuación 8 y 9 respectivamente.

$$\text{long c/capa} = 2(2d + 2(60 + d)) \text{ [mm]} \quad (6)$$

$$d = \frac{\text{dint} + \text{dext}}{2} \text{ [mm]} \quad (7)$$

$$\text{dint} = \text{dist}_{\text{capa}} + \text{diámetro del alambre} + \text{doble aislamiento del conductor [mm]} \quad (8)$$

$$\text{dext} = \text{diámetro del alambre} + \text{doble aislamiento del conductor [mm]} \quad (9)$$

Matriz de impedancia del transformador de distribución

La impedancia es una característica inevitable en los transformadores, traducida en las pérdidas ocasionadas por el calor que generan los conductores, tomando en cuenta que el cobre tiene cierta oposición al paso de corriente; este efecto aumenta cuando se somete el transformador a transitorios de frecuencias rápidas.

A partir de la matriz de inductancia \bar{L} es posible calcular la matriz de impedancia \bar{Z} que tiene dimensiones $N \times N$ y cada componente de la matriz es un número complejo, como se muestra en la Ecuación 10.

$$\bar{Z} = \left(j * \omega + \sqrt{\frac{2 * \omega}{\sigma_{\text{cond}} * \mu_{\text{cond}} * \text{dist}_{\text{capa}}^2}} \right) * \bar{L} \text{ [\Omega]} \quad (10)$$

Matriz de admitancia del transformador de distribución

La Ecuación 11 muestra que a partir de la matriz de capacitancia se calculó la matriz de admitancia \bar{Y} con dimensiones $N \times N$, en el que cada componente de la matriz maneja números complejos. Para los cálculos se toma en cuenta la conductividad y permitividad del papel dieléctrico diamantado, así como la frecuencia angular mostrada en la Ecuación 12.

$$\bar{Y} = (j * \omega + \omega * \tan \delta) * \bar{C} \text{ [S]} \quad (11)$$

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{\text{diel}}}{\omega * \epsilon_r} \quad (12)$$

Modelo del Transformador

Para determinar la propagación de la señal de frecuencia rápida a lo largo de los devanados del transformador monofásico se necesitó un circuito teórico equivalente en el dominio del tiempo que represente un segmento del devanado, donde Δz es un segmento diferencial. En la Figura 1 se observan las capacitancias entre espiras contiguas (Cs), las capacitancias por el contacto a tierra (Cg) y sus respectivas pérdidas (Rs y Rg). También se consideraron las pérdidas por corrientes de fuga entre espiras (R), la inductancia (L), la corriente del devanado (i) y el voltaje (v).



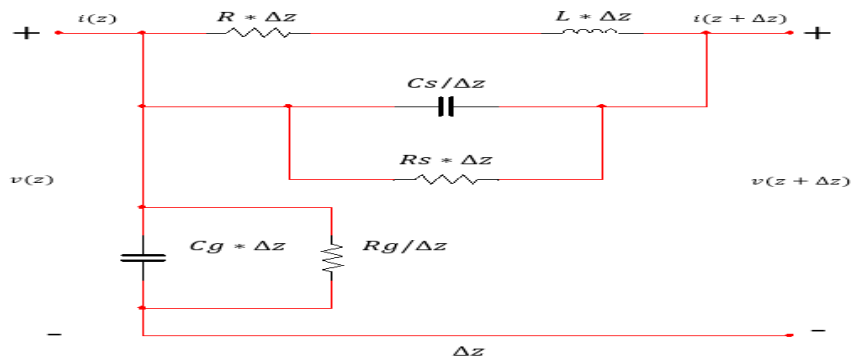


Figura 1. Representación equivalente del devanado monofásico por unidad de longitud **Fuente.** (Luna et al., 2017)

En relación con lo anterior y transformando los parámetros R, L y C al dominio de la frecuencia, se realizó una reducción del circuito en el que se resuelve el paralelo entre Cg y Rg, después se calculó el equivalente paralelo entre Cs y Rs; finalmente, se resolvió el equivalente serie entre R y L, tomando en cuenta que cada respuesta queda en términos de la admitancia (Y). En consecuencia, el circuito se redujo a tres elementos en paralelo que al operarlos entre sí genera la Ecuación 1 en términos de la conductancia (G) y la capacitancia (C), representando así el equivalente paralelo del circuito. Cabe mencionar que la Ecuación 13 es un fasor, y se representa como un número complejo donde $s = j * w$.

$$Y_o(s) = G(s) + sC \tag{13}$$

La Ecuación 14 representa el equivalente serie del circuito de la Figura 1, en términos de la resistencia (R) y la inductancia (L).

$$Z_o(s) = R + sL \tag{14}$$

A partir de la Ecuación 13 y 14 se construyó un circuito equivalente en el dominio de la frecuencia empleando los términos de impedancia (Z) y admitancia (Y), tal como se muestra en la Figura 2.

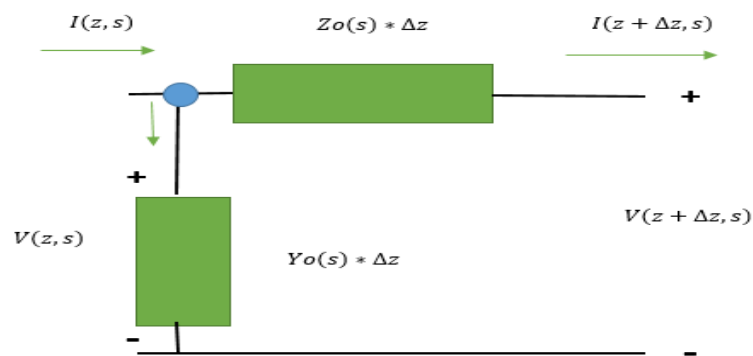


Figura 2. Circuito equivalente de impedancia y admitancia en el dominio de la frecuencia.

A partir de la Figura 2, se generó una malla que facilita el vector voltaje y un nodo que proporciona el vector corriente, del cual se obtuvieron las ecuaciones del telegrafista (García, 2019; Jaramillo et al., 2020), que representan, matemáticamente, la línea de transmisión de un hilo conductor, tal como se observa en la Ecuación 15 y 16.



$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = Z_0(s) * Y_0(s) * V(z) \tag{15}$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} = Y_0(s) * Z_0(s) * I(z) \tag{16}$$

Las ecuaciones del telegrafista resultan más útiles tratarlas en forma matricial, con la condición de que $Z_0 * Y_0 \neq Y_0 * Z_0$ (Martí and Tavighi, 2018). A continuación, se aplicó análisis modal (Guardado and Cornick, 1989; Venegas et al., 2009), del cual parte una serie de cálculos matemáticos que comprenden la matriz de eigenvalores y eigenvectores (Djordjević et al., 1987). La matriz de valores propios, entre otros que se dedujeron en MATLAB®, según Figura 3.

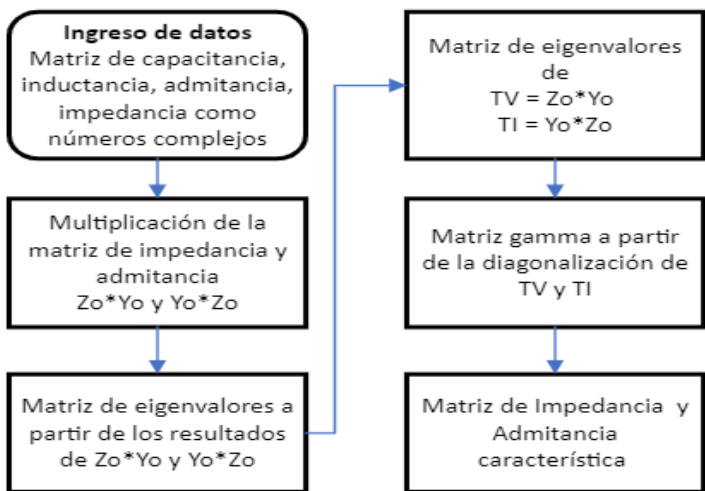


Figura 3. Análisis modal de los parámetros eléctricos del transformador

Es importante resaltar que el transformador con devanado tipo capa maneja varios hilos conductores, como se muestra en la Figura 4, por lo que se utilizó el método de la línea de transmisión multiconductora (Luna et al., 2017) para una correcta representación de las espiras de cada capa.

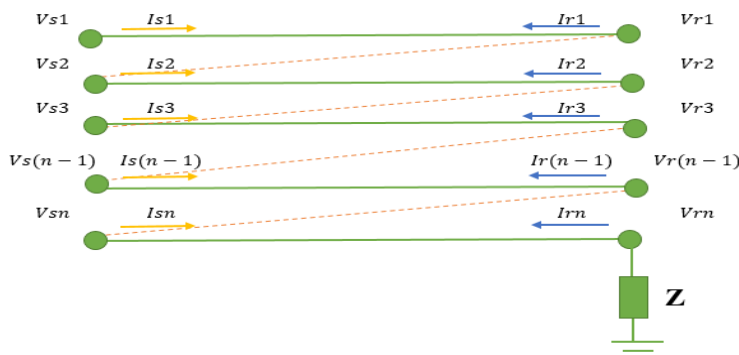


Figura 4. Método de la línea de transmisión multiconductora aplicado al devanado del transformador (Luna et al., 2017).



Ahora bien, la Figura 4 tiene una representación matricial de N elementos que se muestra en la Ecuación 17, en la cual intervienen los parámetros distribuidos representados por las admitancias $\bar{Y}_{11}, \bar{Y}_{12}, \bar{Y}_{21}, \bar{Y}_{22}$ (Aljohani et al., 2016) que dependen del número de capas que conforman el devanado.

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ \vdots \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ I_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \\ \vdots \\ V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Observando la Figura 4, se dedujo que los voltajes y las corrientes son los mismos valores en los nodos, exceptuando por V_{s1} que representa la fuente de voltaje y V_{rn} que se conecta con la impedancia (Z), como se puede observar en las equivalencias en la Ecuación 18 y 19.

$$I_{r1} = -I_{s2}; I_{r2} = -I_{s3}; I_{r3} = -I_{s4}; \dots; I_{r(n-1)} = -I_{s(n)}; I_{rn} = \frac{-V_{rn}}{Z} \quad (18)$$

$$V_{r1} = V_{s2}; V_{r2} = V_{s3}; V_{r3} = V_{s4}; \dots; V_{r(n-1)} = V_{s(n)} \quad (19)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones 18 y 19, se redujo la matriz de la Ecuación 17 aplicando métodos algebraicos en MATLAB®, ya que solo se conoce el valor de la fuente de alimentación (V_{s1}). En consecuencia, se generó una nueva matriz que representa el voltaje en cada una de las capas del devanado, tal como se muestra en la Ecuación 20.

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ V_{s2} \\ \vdots \\ V_{sn} \\ V_{rn} \end{bmatrix}_{(N+1,1)} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \\ \vdots \\ H_{n,1} \\ H_{n+1,1} \end{bmatrix}_{(N+1,1)} * [V_{s1}] \quad (20)$$

Los componentes de la matriz H (Ecuación 20) contienen los parámetros eléctricos representados en números complejos considerando las N capas de los devanados.

A modo de cierre, es necesario aplicar la Transformada Numérica de Laplace (Castañón et al., 2016; Nuricumbo-Guillen et al., 2014), a lo anterior para realizar el cambio del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y así interpretar los resultados.

Resultados y discusión

Se ejecutaron varias pruebas empleando sobretensiones transitorias de frecuencia rápida creadas teóricamente en MATLAB® para observar la respuesta transitoria en el dominio del tiempo de los devanados de AT y BT del transformador de distribución. Las señales empleadas representan un pulso de frecuencia rápida, que difieren entre ellas por el tiempo de frente de onda utilizado, la primera señal mide $1,2\mu s$ y la segunda $0,5\mu s$.

Para el devanado de AT se aplicó la señal de $1,2\mu s$ con un voltaje de 80 kV, dicho voltaje tiene relación estrecha con el nivel básico de aislamiento (IEEE Power and Energy Society, 2021), la respuesta transitoria en el dominio del tiempo indica que se presentan sobretensiones en la capa dos (2) con 98kV (123%) y la capa cuatro (4) con 89,5kV



(112%), mientras que la capa seis (6) se encuentra en el límite del valor de referencia, como se observa en la Figura 5. Las sobretensiones de voltaje en las capas presentan oscilaciones que se estabilizan rápidamente.

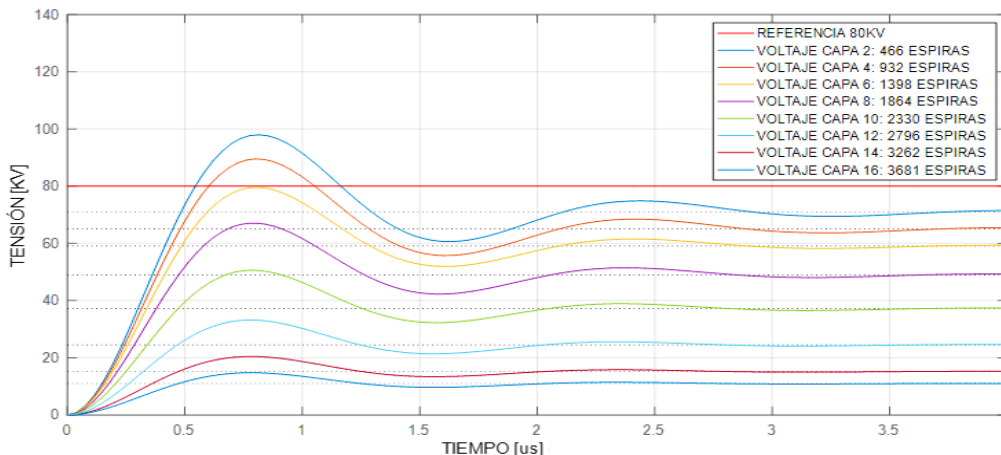


Figura 5. Respuesta transitoria del devanado AT del transformador con un transitorio de 1,2µs

En segunda instancia se aplicó la señal de 0,5µs a 80 kV, la respuesta transitoria indica que se presentan sobretensiones en la capa dos (2) con 110 kV (138%), la capa cuatro (4) con 100 kV (125%) y la capa seis (6) con 88,5 kV (111%), mientras que la capa ocho (8) se encuentra cercana al valor de referencia, como se visualiza en la Figura 6. Las sobretensiones de voltaje presentan oscilaciones pronunciadas que tardan más tiempo en estabilizarse.

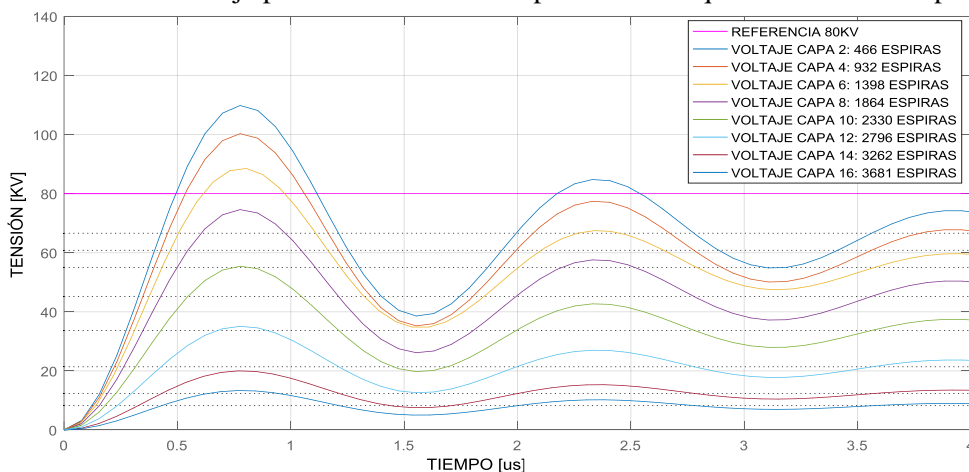


Figura 6. Respuesta transitoria del devanado AT del transformador con un transitorio de 0,5µs

Para el devanado de BT se aplicó la señal de 1,2µs a 240 V, la respuesta en el dominio del tiempo, como muestra la Figura 7 indica que la capa uno (1) se encuentra cerca del límite. Las sobretensiones de voltaje en las tres (3) capas son oscilaciones que se establecen rápidamente.



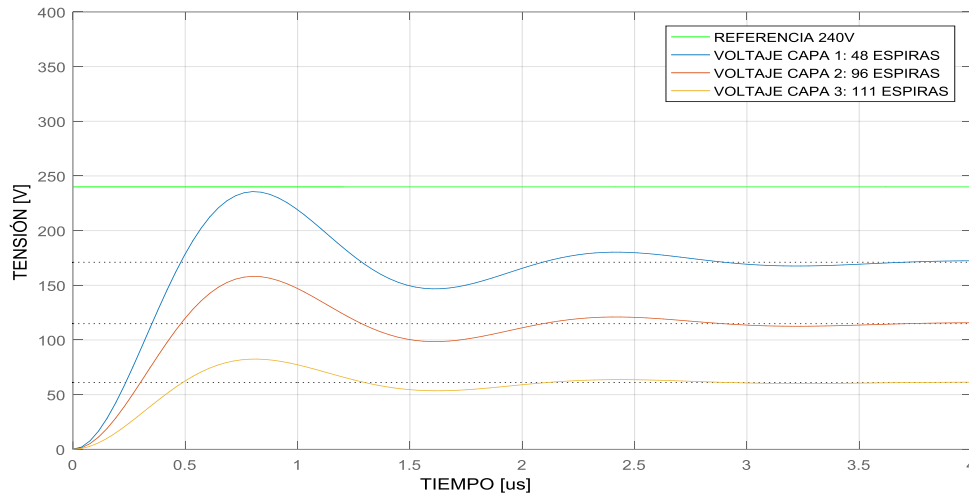


Figura 7. Respuesta transitoria del devanado BT del transformador con un transitorio de $1,2\mu s$

En segunda instancia se aplicó la señal de $0,5\mu s$ a 240 V, en la Figura 8 se observa la respuesta transitoria que indica que la capa uno (1) se encuentra muy cercana al valor de referencia, sin embargo, no supera el límite.

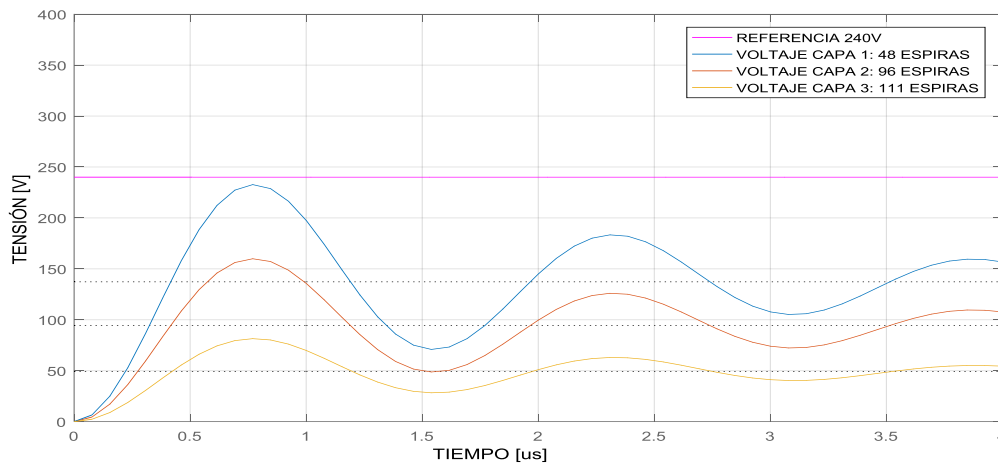


Figura 8. Respuesta transitoria del devanado BT del transformador con un transitorio de $0,5\mu s$

Los resultados obtenidos, muestran de forma teórica los voltajes en las capas de los devanados del transformador de distribución monofásico respecto de las señales transitorias aplicadas y cómo estas influyen en el sistema de aislamiento sólido. En ese sentido, cabe recordar el tiempo de frente de onda de las señales utilizadas ($1,2\mu s$ - $0,5\mu s$) y mencionar que a medida que disminuye ese tiempo, el voltaje de las primeras capas experimenta un aumento sustancial tanto en la amplitud como en el amortiguamiento, provocando que las capas subsiguientes sobrepasen el nivel de referencia a medida que aumenta la frecuencia (Adamczyk et al., 2016; Liang et al., 2006; Popov, van der Sluis, Smeets and López Roldan, 2007; Popov, van der Sluis, Smeets, Lopez-Roldan et al., 2007; Villanueva-Ramírez et al., 2014).



Otro aspecto que se evidencia en este estudio es la distribución no uniforme del voltaje induciendo un gran esfuerzo al aislamiento, resultando voltajes concentrados en algunas partes del devanado. Cabe mencionar que los materiales aislantes están diseñados para soportar estos eventos, sin embargo, la distorsión de la corriente de excitación y los armónicos (Chen et al., 2022), así como las señales transitorias de frecuencia rápida y muy rápida (Hosseini et al., 2008), debilitan la calidad del aislamiento, por ende, hay envejecimiento o ruptura.

Más allá de la evaluación de la respuesta transitoria de los devanados, se trabajó con el método de la línea de transmisión multiconductora, ya que permite realizar las simulaciones con un mayor rango de frecuencias, lo cual está relacionado con la investigación de Gunawardana et al. (2019) que ratifica el uso de este método, así como Guardado y Cornick (1989), que integran el análisis modal.

Las implicaciones de este trabajo conllevan a que los fabricantes mejoren los diseños de los transformadores, ya que, de este modo, estos elementos pueden trabajar normalmente durante un largo tiempo, aunque se vean expuestos a sobretensiones, así mismo el hecho de modelar matemáticamente el transformador permite el estudio de otros transitorios electromagnéticos para predecir situaciones no contempladas.

Es posible adaptar los modelos empleados en este artículo para simular transformadores trifásicos o de potencia en el que se maneje un devanado tipo capa o tipo disco (Ang and Salam, 2012; Luna et al., 2017); de igual manera, se pueden probar otros métodos para obtener los parámetros eléctricos como el método de elementos finitos (Gunawardana et al., 2019; Zhao et al., 2008).

Conclusiones

El método de la línea de transmisión multiconductora es un modelo muy común para analizar las sobretensiones transitorias del devanado y en conjunto con el modelo de parámetros distribuidos requiere información precisa acerca de la geometría física de un transformador.

Con respecto a los parámetros eléctricos, se evidencia que la matriz de capacitancia juega un papel importante en el cálculo de la matriz de inductancia y admitancia. Al momento de calcular la matriz de longitudes mediante fórmulas teóricas es evidente que este método considera a todas las espiras del devanado con una misma longitud.

El modelo propuesto en este trabajo permite obtener resultados en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, lo que permite un estudio profundo sobre la distribución de voltajes en las capas del devanado, además de analizar las sobretensiones con transitorios de distintos tiempos de frente de onda.

Conflictos de intereses

Los autores no poseen conflicto de intereses.

Contribución de los autores

1. Conceptualización: Shirley Alarcón, Karen Mite
2. Curación de datos: Shirley Alarcón



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

3. Análisis formal: Shirley Alarcón
4. Adquisición de fondos: no se necesitó
5. Investigación: Shirley Alarcón
6. Metodología: Shirley Alarcón
7. Administración del proyecto: Karen Mite, Diana Calderón
8. Recursos: Karen Mite y Diana Calderón
9. Software: Shirley Alarcón, Karen Mite y Diana Calderón
10. Supervisión: Karen Mite
11. Validación: Shirley Alarcón
12. Visualización: Diana Calderón
13. Redacción – borrador original: Shirley Alarcón
14. Redacción – revisión y edición: Diana Calderón

Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento.

Referencias

- ACHANKUNJU, A., JOSEPH, J., VARGHESE, A.S. y NAIR, K.R.M., 2021. Modelling of partial discharge pulse propagation in transformer windings using multi conductor transmission line modelling scheme. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1187, no. 1, pp. 012022. ISSN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899x/1187/1/012022.
- ADAMCZYK, B., FLORKOWSKI, M. y SWIATKOWSKI, M., 2016. Effect of shielding on surge overvoltages in multilayer type windings of power transformer. En: PARA LA DISCUSION, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 1627-1635. DOI 10.1109/TDEI.2016.005691.
- ALJOHANI, O., ABU-SIADA, A. y LI, S., 2016. High frequency power transformer modelling for frequency response analysis studies. 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). S.l.: s.n., pp. 291-294. DOI 10.1109/CMD.2016.7757818.
- ANG, S.P. y SALAM, M.A., 2012. Modeling of high frequency characteristic of a 6.6 kV transformer. 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). S.l.: s.n., pp. 1-6. DOI 10.1109/UPEC.2012.6398677.
- CASTAÑÓN, L.J., ZULUAGA, J.R. y NAREDO, J.L., 2016. Numerical Laplace inversion methods for electromagnetic transient simulations. NAPS 2016 - 48th North American Power Symposium, Proceedings. S.l.: s.n., ISBN 9781509032709. DOI 10.1109/NAPS.2016.7747864.



- CHEN, Z., ZHOU, Q., DU, B., ZHANG, Y. y DING, L., 2022. Electromagnetic Transient Calculation and Protective Measures of Transformers Under Lightning Overvoltage. En: PARA LA DISCUSION, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 29, no. 2, pp. 718-726. DOI 10.1109/TDEI.2022.3164746.
- DE OLIVEIRA QUEVEDO, J., CAZAKEVICIUS, F.E., BELTRAME, R.C., MARCHESAN, T.B., MICHELS, L., RECH, C. y SCHUCH, L., 2017. Analysis and design of an electronic on-load tap changer distribution transformer for automatic voltage regulation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, pp. 883-894. ISSN 02780046. DOI 10.1109/TIE.2016.2592463.
- DEGENEFF, R.C., MCNUTT, W.J., NEUGEBAUER, W., PANEK, J., MCCALLUM, M.E. y HONEY, C.C., 1982. Transformer Response to System Switching Voltages. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 6, pp. 1457-1470. DOI 10.1109/TPAS.1982.317193.
- DJORDJEVIĆ, A.R., SARKAR, T.K. y HARRINGTON, R.F., 1987. Time-Domain Response of Multiconductor Transmission Lines. Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 6, pp. 743-764. DOI 10.1109/PROC.1987.13797.
- DURLYM, R., CONTRERAS, E. y ROQUE, J., 2013. Modelación de la onda del rayo a través de las ecuaciones del telegrafista. Universidad, Ciencia y Tecnología [en línea], vol. 17, no. 67, pp. 83-91. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000200004.
- FERGESTAD, P.I. y HENRIKSEN, T., 1974. Transient Oscillations in Multiwinding Transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 2, pp. 500-509. DOI 10.1109/TPAS.1974.293997.
- FERNÁNDEZ, D., ORTIZ, A., CARRASCAL, I., FERNÁNDEZ, I., DELAGADO, F. y OLMO, C., 2019. Kraft and Diamond Dotted paper thermally aged in mineral oil and natural ester: mechanical characterisation. IEEE, no. Icdl, pp. 1-4. DOI 10.1109/ICDL.2019.8796691.
- FLORKOWSKI, M., FURGAŁ, J. y KUNIEWSKI, M., 2016. Propagation of overvoltages transferred through distribution transformers in electric networks. IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 10, no. 10, pp. 2531-2537. ISSN 17518687. DOI 10.1049/iet-gtd.2015.1500.
- GARCÍA, P.V., 2019. Estudio generalizado de análisis complejo de la teoría de líneas de transmisión y su aplicación a sistemas electromagnéticos reales [en línea]. S.l.: Universidad de Oviedo. Disponible en: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/54099/TD_PabloVidalGarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- GERMAIN, J., 2002. Sistema de ayuda al mantenimiento predictivo de grandes transformadores de potencia. Estudio del envejecimiento multifactorial del sistema de aislamiento de los transformadores bajo solicitaciones por sobretensiones de tipo impulso [en línea]. S.l.: Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=185708>.
- GÓMEZ, P., DE LEÓN, F. y HERNANDEZ, I.A., 2011. Impulse-Response Analysis of Toroidal Core Distribution Transformers for Dielectric Design. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 1231-1238. DOI 10.1109/TPWRD.2010.2087043.
- GUARDADO, J.L. y CORNICK, K.J., 1989. A computer model for calculating steep-fronted surge distribution in machine windings. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, no. 1, pp. 95-101. DOI 10.1109/60.23156.



- GUNAWARDANA, M., FATTAL, F. y KORDI, B., 2019. Very Fast Transient Analysis of Transformer Winding Using Axial Multiconductor Transmission Line Theory and Finite Element Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 5, pp. 1948-1956. DOI 10.1109/TPWRD.2019.2932669.
- HOSSEINI, S.M.H., VAKILIAN, M. y GHAREHPETIAN, G.B., 2008. Comparison of Transformer Detailed Models for Fast and Very Fast Transient Studies. En: PARA LA DISCUSION, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 733-741. DOI 10.1109/TPWRD.2008.915795.
- IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2020. IEEE Standard for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Dry-Type Power and Distribution Transformer IEEE Std C57.12.60. S.l.: s.n. ISBN 9781504464727.
- IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2021. IEEE Standard for General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers IEEE Std C57.12.00. S.l.: s.n. ISBN 9780738157641.
- JARAMILLO, A., GARCÍA-SÁNCHEZ, J., AGUILAR, O., BAÑUELOS-CABRAL, E., GUTIÉRREZ-ROBLES, J. y SOTELO-CASTAÑÓN, J., 2020. ESTUDIO DE LÍNEAS ASIMÉTRICAS A TRAVÉS DE MODELOS DE LÍNEAS. En: Habla sobre las ecuaciones del telegrafista, se c, e-Gnosis [en línea], vol. 18, pp. 1-10. [Consulta: 19 julio 2022]. Disponible en: <http://www.e-gnosis.udg.mx/index.php/eg/article/view/21/7>.
- KHAN, H., SHAH, R., KUMAM, P., BALEANU, D. y ARIF, M., 2019. An efficient analytical technique, for the solution of fractional-order telegraph equations. *Mathematics*, vol. 7, no. 5, pp. 1-19. ISSN 22277390. DOI 10.3390/math7050426.
- LI, M., LI, L., YIN, H., LU, W. y WENG, J., 2021. Carbonized surface tracking on pressboard cylinder of oil filled transformer under main insulation faults. 2021 IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). S.l.: s.n., pp. 171-174. DOI 10.1109/ICPADM49635.2021.9493925.
- LIANG, G., SUN, H., ZHANG, X. y CUI, X., 2006. Modeling of Transformer Windings Under Very Fast Transient Overvoltages. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 4, pp. 621-627. DOI 10.1109/TEMC.2006.884537.
- LUNA, Z., GÓMEZ, P., ESPINO-CORTÉS, F.P. y PEÑA-RIVERO, R., 2017. Modeling of Transformer Windings for Fast Transient Studies: Experimental Validation and Performance Comparison. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 1852-1860. ISSN 1937-4208. DOI 10.1109/TPWRD.2016.2583379.
- MARTÍ, J.R. y TAVIGHI, A., 2018. Frequency-Dependent Multiconductor Transmission Line Model With Collocated Voltage and Current Propagation. En: Aquí explica que Z^*Y NO ES LO MISMO QUE Y^*Z por que son matrices, como se menciona esto en el artículo por eso lo puse, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 1, pp. 71-81. DOI 10.1109/TPWRD.2017.2691343.
- MEERSCHAERT, M.M., 2013. *Mathematical Modeling* [en línea]. S.l.: Elsevier Science. ISBN 9780123869968. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=cI03SqP4vVgC>.
- MORENO, P. y RAMIREZ, A., 2008. Implementation of the Numerical Laplace Transform: A Review Task Force on Frequency Domain Methods for EMT Studies, Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation, General Systems Subcommittee, *IEEE Power Engineering*. En: Sirve para citar la transformada de Laplace, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2599-2609. DOI 10.1109/TPWRD.2008.923404.



- NOIRHOMME, B., JALBERT, J., LESSARD, M.-C., BROCHU, F. y HACHICHI, S., 2013. Pole mounted distribution transformers insulation condition assessment. En: Habla sobre la degradación del papel, 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). S.l.: s.n., pp. 239-243. DOI 10.1109/EIC.2013.6554241.
- NURICUMBO-GUILLEN, R., GOMEZ, P., ESPINO-CORTES, F.P. y URIBE, F.A., 2014. Accurate computation of transient profiles along multiconductor transmission systems by means of the numerical laplace transform. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp. 2385-2393. DOI 10.1109/TPWRD.2014.2313526.
- OKABE, S. y TAKAMI, J., 2008. Evaluation of breakdown characteristics of oil-immersed transformers under non-standard lightning impulse waveforms - method for converting non-standard lightning impulse waveforms into standard lightning impulse waveforms. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 5, pp. 1288-1296. DOI 10.1109/TDEI.2008.4656236.
- POPOV, M, VAN DER SLUIS, L., SMEETS, R.P.P., LOPEZ-ROLDAN, J. y TERZIJA, V. V, 2007. Modelling, simulation and measurement of fast transients in transformer windings with consideration of frequency-dependent losses. IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 1, pp. 29-35. DOI 10.1049/iet-epa:20060124.
- POPOV, Marjan, VAN DER SLUIS, L., SMEETS, R.P.P. y LÓPEZ ROLDAN, J., 2007. Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings. En: Para la discusión, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 238-247. DOI 10.1109/TPWRD.2006.881605.
- R-SMITH, N.A.-Z. y BRANCIK, L., 2016. On two-dimensional numerical inverse laplace transforms with transmission line applications. 2016 Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2016 - Proceedings. Shangai: s.n., pp. 227-231. ISBN 9781509060931. DOI 10.1109/PIERS.2016.7734298.
- RAGAVAN, K. y SATISH, L., 2005. An efficient method to compute transfer function of a transformer from its equivalent circuit. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 780-788. DOI 10.1109/TPWRD.2004.834345.
- SHIBUYA, Y. y FUJITA, S., 2002. High frequency model and transient response of transformer windings. En: Sirve para hacer la cita en la matriz de capacitancia, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. S.l.: s.n., pp. 1839-1844 vol.3. DOI 10.1109/TDC.2002.1177736.
- SOBOUTI, M.A., AZIZIAN, D., BIGDELI, M. y GHAREHPETIAN, G.B., 2021. Multi-conductor transmission line model of split-winding transformer for frequency response and disk-to-disk fault analysis. International Journal of Engineering Transactions C: Aspects, vol. 34, no. 6, pp. 1486-1494. ISSN 24237167. DOI 10.5829/ije.2021.34.06c.12.
- VENEGAS, V., GUARDADO, J.L., MAXIMOV, S.G. y MELGOZA, E., 2009. A computer model for surge distribution studies in transformer windings. IEEE EUROCON 2009. S.l.: s.n., pp. 451-457. DOI 10.1109/EURCON.2009.5167671.
- VILLANUEVA-RAMÍREZ, J.M., GÓMEZ, P., ESPINO-CORTÉS, F.P. y NÁJERA, G., 2014. Implementation of time domain transformer winding models for fast transient analysis using Simulink. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 61, pp. 118-126. DOI 10.1016/j.ijepes.2014.03.018.
- ZHANG, J., XU, W., GAO, C., WANG, S., QIU, J., ZHU, J.G. y GUO, Y., 2013. Analysis of Inter-Turn Insulation of High Voltage Electrical Machine by Using Multi-Conductor Transmission Line Model. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 1905-1908. DOI 10.1109/TMAG.2013.2245873.



ZHAO, C., RUAN, J., DU, Z., LIU, S., YU, Y. y ZHANG, Y., 2008. Calculation of parameters in transformer winding based on the model of multi-conductor transmission line. En: hacer lo mismo pero empleando el método de elementos finitos, 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. S.l.: s.n., pp. 463-467.

ZHENG, D., CHENG, Y., BI, J., CHANG, W., DING, G. y SUN, F., 2020. The Study of Two Models for Power Transformer Winding Deformation. 7th IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2020 - Proceedings, pp. 14-17. DOI 10.1109/ICHVE49031.2020.9279863.

