



# APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

## Simulación del fenómeno de ferorresonancia en transformadores

### *Simulation of the phenomenon of ferorresonance in transformers*

Orestes Hernández Areu<sup>1,\*</sup>, Oviyanelis Pérez Pérez<sup>2</sup>, Julio Fernando Valle García<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Empresa de Construcción de la Industria Eléctrica (ECIE) en la Habana, Cuba.

<sup>3</sup>Empresa de Mantenimiento de Grupos Electrógenos Fuel oil (EMGEF) en la Habana, Cuba.

\*Autor de correspondencia: [orestesh@electronica.cujae.edu.cu](mailto:orestesh@electronica.cujae.edu.cu)

Recibido: 11 de junio de 2020

Aprobado: 30 de septiembre de 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

#### RESUMEN/ABSTRACT

La ferorresonancia es un fenómeno que somete al transformador a un estrés que es capaz de destruirlo totalmente. Este fenómeno se está verificando en Cuba con creciente frecuencia debido a que ha habido un incremento de circuitos de distribución alimentados desde líneas de subtransmisión a 34,5 kV, desde donde se reduce directamente a 240 V, mediante transformadores. En el fenómeno de ferorresonancia intervienen de manera decisiva los valores de las inductancias de magnetización de los transformadores a tensión nominal y en condiciones de saturación y las capacitancias de secuencia cero asociadas al circuito primario de estos. La formulación matemática de este fenómeno es difícil de realizar por lo que la simulación digital puede ser una alternativa. En este trabajo se presenta una herramienta para simular el fenómeno de la ferorresonancia. Se muestran ejemplos de aplicación con los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** ferorresonancia, simulación, transformadores.

*The ferorresonance is a phenomenon that submits the transformer to a stress that is able to destroy it totally. This phenomenon appears in Cuba frequently because there has been an increment of distribution circuits fed from lines of sub-transmission to 34,5 kV, from where is reduced directly to 240 V, by means of transformers. In the phenomenon of ferorresonance interfere the magnetizing inductances values of the transformers at nominal voltage and in conditions of saturation and the capacitances of zero sequence associates to the primary circuit of these. The mathematical formulation of this phenomenon is difficult to realize for what the digital simulation can be an alternative. A tool to simulate the phenomenon of the ferorresonance is presented. Examples of application with the obtained results are showed.*

**Key Words:** ferorresonance, simulation, transformers.

#### INTRODUCCION

El término de ferorresonancia caracteriza a todos los fenómenos oscilatorios que aparecen en un circuito eléctrico que tenga al menos [1-3]:

- Una inductancia no lineal (ferromagnética saturable).
- Una capacitancia de valor apreciable.
- Una fuente de energía (generalmente sinusoidal).
- Pocas pérdidas.

Cómo citar este artículo:

Orestes Hernández Areu y otros. Simulación del fenómeno de ferorresonancia en transformadores  
2020, vol. 41, n. 3, septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Las redes eléctricas son susceptibles de presentar configuraciones propicias para la ocurrencia de ferorrresonancia dado que en estas existen:

- Inductancias saturables en los transformadores de potencia, transformadores de potencial (que sean inductivos), en las reactancias “shunt” del sistema, etc.
- Capacitancias en los cables, líneas largas, transformadores de tensión o potencial (capacitivos), aisladores y sistema de aislamiento propio del transformador, condensadores de compensación serie o paralelo, condensadores de las cámaras de extinción de arcos en interruptores automáticos, etc.

La ferorrresonancia aparece después de algún fenómeno transitorio que puede ser:

- Sobretensiones externas (descargas atmosféricas).
- Conexión o desconexión de transformadores.
- Conexión o desconexión de cargas.
- Maniobra de capacitores y de líneas sin carga.
- Aparición o eliminación de fallas.
- Trabajos con líneas energizadas.

Bajo ciertas condiciones especiales de operación del sistema eléctrico, la configuración (conductor de alimentación - transformador) y por las características de los equipos instalados se pueden presentar sobretensiones como resultado de la resonancia entre la capacitancia asociada al conductor y la inductancia de magnetización del transformador.

**Ferorrresonancia**

La ferorrresonancia es un caso especial de resonancia serie o paralelo que ocurre en circuitos como el mostrado en las figuras 1 y 2, respectivamente en las cuales, si la resistencia es despreciable, cuando las magnitudes de las reactancias capacitiva e inductiva se acercan en su valor, en estos casos:

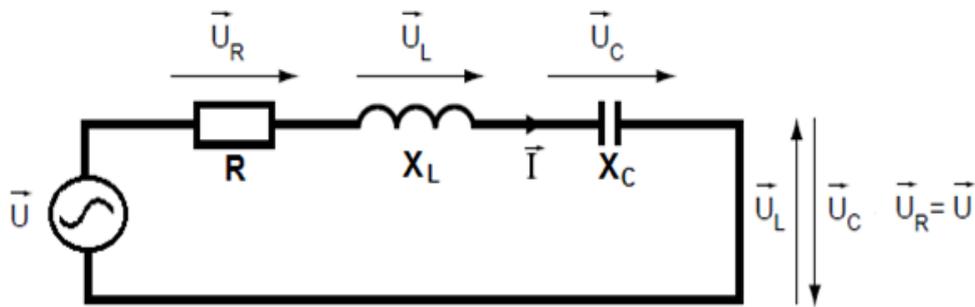


Fig. 1. Circuito resonante serie.

a) En resonancia serie la impedancia total Z vista por la fuente es: vea ecuación (1).

$$Z = R + J(X_L - X_C) \tag{1}$$

La Z se hace casi cero por lo que la corriente será elevada, lo que puede provocar la desconexión del circuito o causar tensiones elevadas tanto en X\_L como en X\_C.

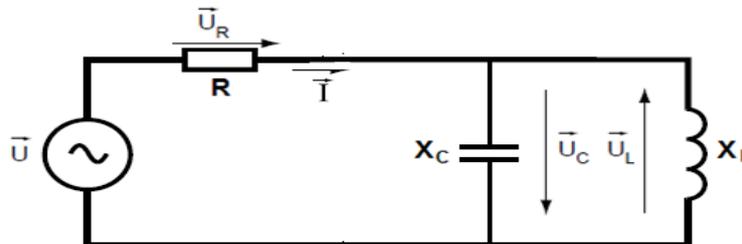


Fig. 2. Circuito resonante paralelo.

b) En resonancia paralelo la impedancia total  $Z$  vista por la fuente es: vea ecuación (2).

$$Z = R + j \left( \frac{X_C \times X_L}{X_L - X_C} \right) \quad (2)$$

La  $Z$  se hace muy grande por lo que la corriente será mínima pero la tensión muy grande tanto en  $X_L$  como en  $X_C$ . En ambos casos si  $X_L$  es la reactancia de magnetización de un transformador, su característica variable en dependencia de la magnitud de la inducción magnética, determina la diferencia entre resonancia simple y ferorrresonancia. En dependencia de la magnitud del flujo residual en el núcleo o de si el cierre del circuito se hace cercano o en el momento en que la onda de tensión pasa por cero, el núcleo puede ser llevado a saturación. En este caso un gran pico de corriente fluye en los devanados energizados, teniendo su trayectoria a tierra a través de las capacitancias a tierra de las otras líneas abiertas. En el siguiente medio ciclo, el núcleo se satura, pero en la dirección opuesta.

### Ferorrresonancia serie

Se presenta en circuitos con transformadores trifásicos o bancos de transformadores, cuando la energización o desenergización del transformador se realiza en forma secuencial, cerrando o abriendo una por una sus líneas utilizando dispositivos de interrupción monopolares o por la operación de protecciones como fusibles y preferentemente si el devanado primario no se encuentra puesto a tierra y la fuente del sistema lo está sólidamente. En estos casos, las capacitancias a tierra de las líneas abiertas quedan conectadas en serie con la reactancia inductiva de magnetización del transformador y actúan como un cortocircuito, creándose las condiciones para la ferorrresonancia [1, 4 - 7]. La figura 3, muestra uno de sus ejemplos.

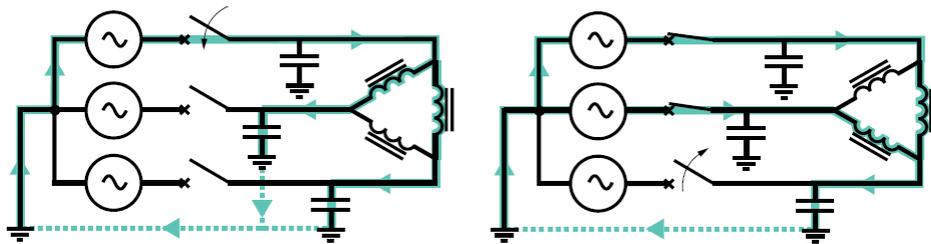


Fig. 3. Ejemplo de configuración susceptible de ferorrresonancia serie.

### MATERIALES Y METODOS

El modelo representa la fuente trifásica de alimentación, un transformador trifásico o banco de transformadores monofásicos, la línea que los une, los interruptores de operación monopolar e instrumentos de medición para conocer los parámetros de entrada y salida. La línea se representa mediante el modelo "PI equivalente", cuyos parámetros de secuencia cero se calculan a partir de sus características [8, 9]. La figura 4, muestra su representación.

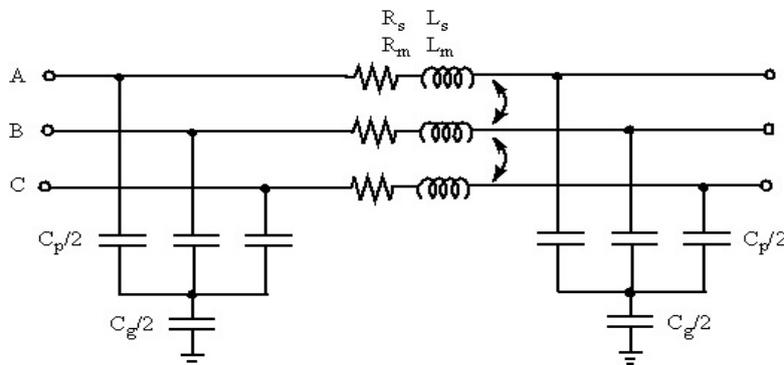


Fig. 4. Modelo PI equivalente.

Para la simulación del transformador se necesita un grupo de datos que se obtienen de sus datos nominales. El valor de reactancia de magnetización se determina, según [10, 11], por la siguiente ecuación (3):

$$X_m = \frac{V_1}{\sqrt{I_o^2 - \left(\frac{P_o}{V_1}\right)^2}} \Omega \quad (3)$$

Donde:

$V_1$ : Tensión nominal primaria; (V).

$P_o$ : Pérdidas de vacío; (W).

$I_o$ : Corriente de vacío referida al devanado primario; (A).

Las figuras 5 y 6, muestran los modelos empleados para la simulación del circuito con el transformador.

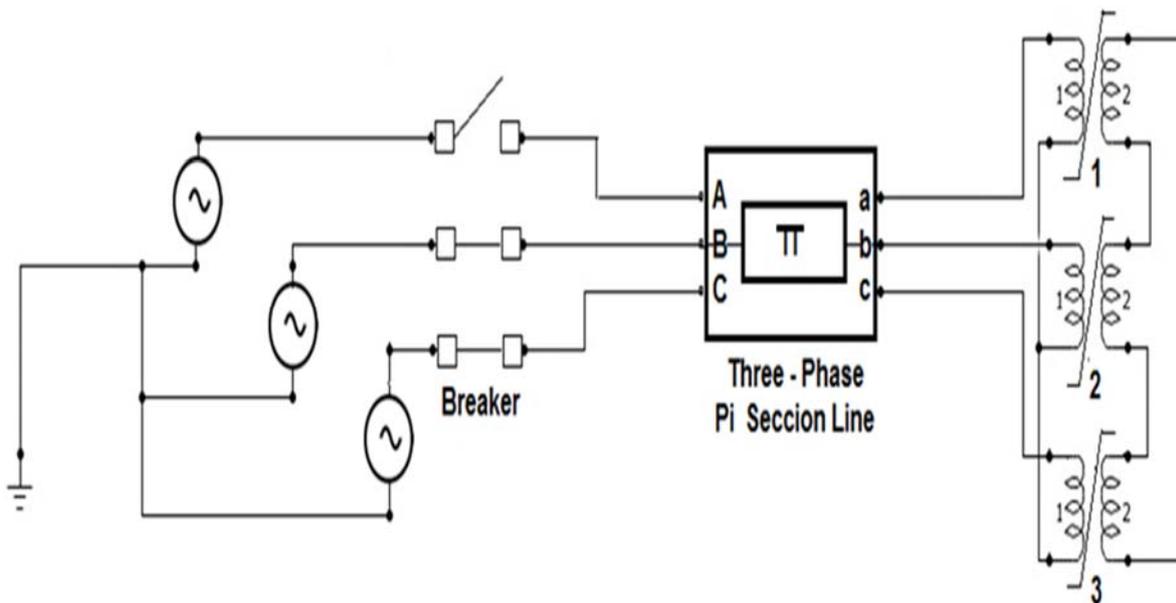


Fig. 5. Modelo empleado para la simulación del circuito con un banco de transformadores monofásicos.

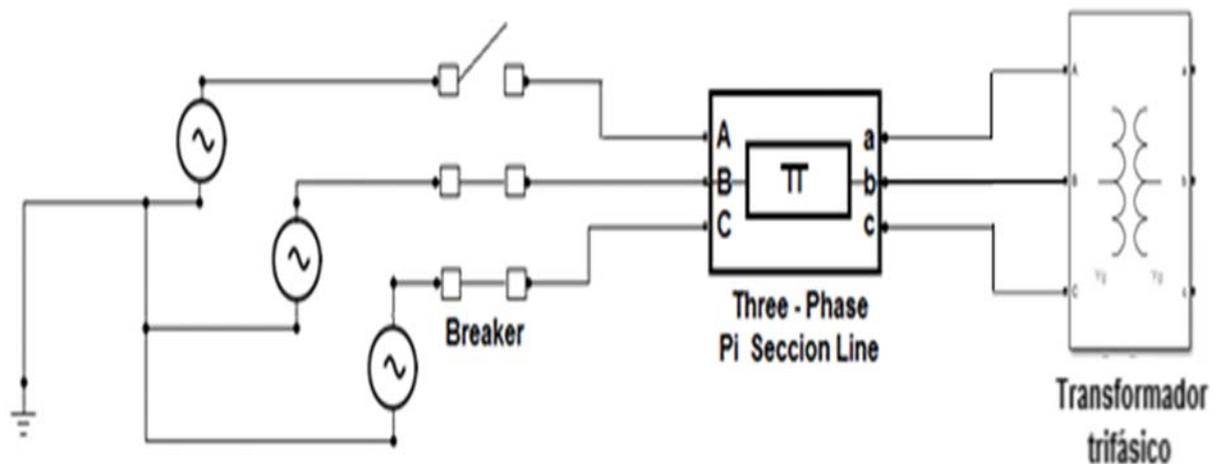


Fig. 6. Modelo empleado para la simulación del circuito con un transformador trifásico.

La interfaz que a continuación se muestra permite introducir los datos de la línea para calcular sus parámetros de secuencia cero, vea figura 7.

**Datos de la línea**

Crear nuevo conductor o CP

Conductores de fase

Tipo de conductor	Ø (mm)	R (ohm/km)	RMG (mm)
AC300/39	24	0.109	9.7399

Cables protectores

Tipo de cable protector	Ø (mm)	R (ohm/km)	RMG (mm)
3/8"10A	9.52	3.04	0.00305

Otros datos

Tipo de suelo	Resistividad del terreno(Ωm)
Pantanosos	50
Agrícolas	100
Arenosos húmedos	200
Arenosos secos	1000
Rocoso	3000
Valor promedio	100

Crear estructura

Estructura

Distancia de A a B (m)	Distancia de B a C (m)	Distancia de C a A (m)	Distancia de A al suelo (m)	Distancia de B al suelo (m)	Distancia de C al suelo (m)
0.838	1.905	2.743	8.991	8.991	8.991

Fig. 7. Datos de las líneas.

En esta segunda página de la interfaz es posible introducir o modificar los parámetros del transformador, así como de los interruptores. Vea figura 8.

**Datos del transformador**

Añadir un nuevo transformador

Sn (kVA)	V1 (kV)	V2 (kV)	Po (W)	Io (A)	F (Hz)	%Z
25	19.1	0.24	110	0.013	60	2

Simulación

Sn (kVA)	V1 (kV)	V2 (kV)	Po (W)	Io (A)	F (Hz)	%Z
25	19.1	0.24	110	0.013	60	2

Fig. 8. Datos del transformador.

## RESULTADOS

Según [1], las condiciones más severas para la ocurrencia del fenómeno de ferorrresonancia se verifican cuando el núcleo del transformador está con magnetismo remante y la conexión o desconexión de una de las fases ocurre en el instante de cruce por cero de la onda de tensión.

Teniendo en cuenta estas premisas, se presentan dos casos de simulaciones realizadas para una densidad de flujo residual del 80% de la densidad de flujo máximo a tensión nominal del transformador y realizando la operación de cierre del interruptor de una fase en el instante en que su onda de tensión, cruza por cero.

### Casos en que se verifica la ferorrresonancia

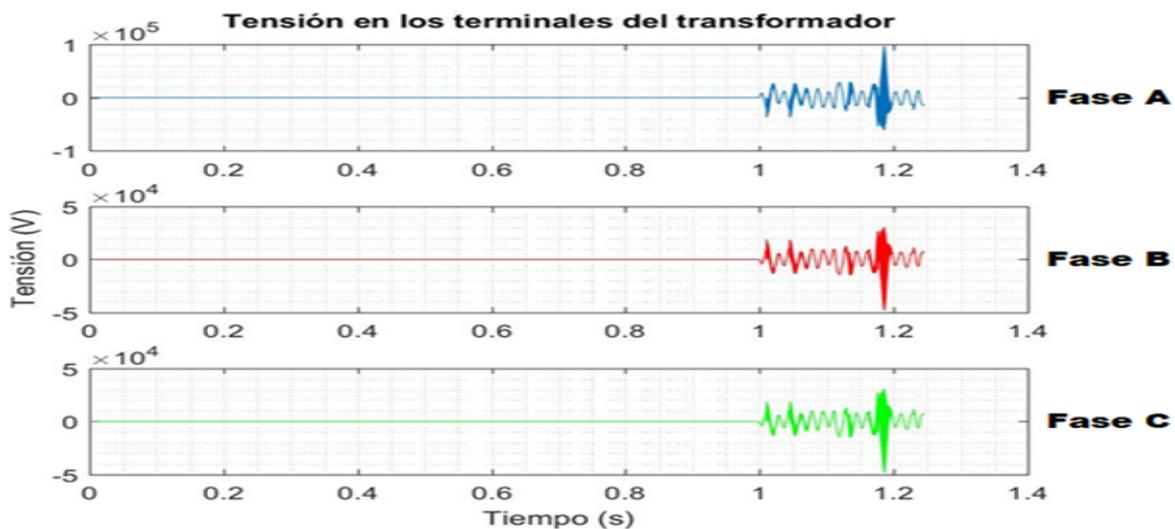
#### Caso de estudio 1

Se trata de una línea simple circuito con estructura tangencial tipo A de 300 m, con un conductor por fase y un cable protector. Alimenta a un banco de transformadores de distribución monofásicos marca Latino de 75 kVA y 25 kVA cada unidad, con tensiones nominales de 19,1/0,24 kV, conectado en Y – Δ. El conductor es AC150/19. El tiempo de simulación es de 1,4 segundos, realizándose el cierre del interruptor en el segundo 1. En la figura 9, se observa cómo antes del instante de cierre, la tensión es cero en las tres fases.

Luego de energizar la fase A (azul), se producen sobretensiones internas en los devanados del transformador que llegan a valores peligrosos por ser muy superiores a la tensión nominal, siendo la mayor de estas; 3,6 p.u. La tabla 1, muestra los valores numéricos obtenidos de la figura 9.

**Tabla 1. Valores eficaces de tensión en cada transformador del banco, para cierre de una fase.**

Tensión nominal de cada transformador; 19,1 kV				
Fase A (kV)	Fase B (kV)	Fase C (kV)	Máxima (kV)	Máxima (pu)
68,7	34,4	34,4	68,7	3,6



**Fig. 9. Tensión por fase del banco de transformadores para el cierre de la fase A en el segundo 1 de la simulación.**

#### Caso de estudio 2

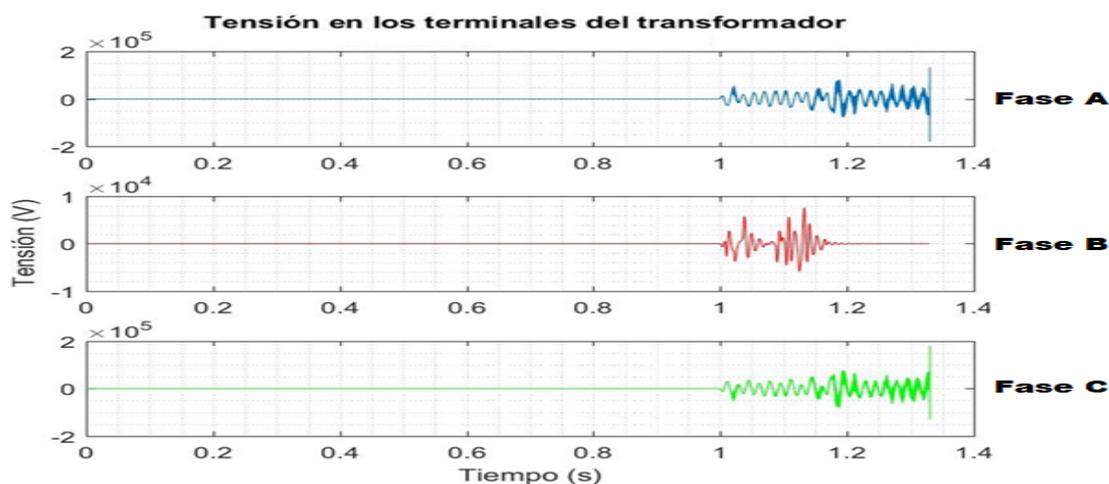
Se trata de una línea simple circuito con estructura tangencial tipo A de 500 m, con un conductor por fase y un cable protector. Alimenta a un transformador trifásico de distribución de 150 kVA, con tensión nominal de 34,5/0,24 kV, conectado en Δ - Y. El conductor es AC150/19. El tiempo de simulación es de 1, 4 segundos, realizándose el cierre del interruptor en el segundo 1.

En la figura 10, se observa cómo antes del instante de cierre, la tensión es cero en las tres fases.

Luego de energizar la fase A (azul), se producen sobretensiones internas en los devanados del transformador que llegan a valores peligrosos por ser muy superiores a la tensión nominal, siendo la mayor de estas; 3,7p.u. La tabla 2, muestra los valores numéricos obtenidos de la figura 10.

**Tabla 2. Valores eficaces de tensión en cada fase del transformador trifásico para apertura de una fase.**

Tensión nominal del transformador; 34,5 kV				
Fase A (kV)	Fase B (kV)	Fase C (kV)	Máximo (kV)	Máximo (pu)
126,9	5,4	127,0	127,0	3,7



**Fig. 10. Tensión por fase del transformador trifásico para el cierre de la fase A en el segundo 1 de la simulación.**

#### Casos en los que no se verifica la ferorrresonancia

Para contrastar los resultados obtenidos, se realizará el mismo análisis de los casos presentados, cambiando solo la longitud de la línea. La nueva condición, se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Nueva condición del análisis**

Caso	Potencia nominal (kVA)	Tensión nominal (kV)	Longitud de línea (km)	Longitud nueva (km)	Conexión
1	75	19,1	0,3	1,6	Y - $\Delta$
2	150	34,5	0,5	5,54	$\Delta$ - Y

#### Caso de estudio 1

En la figura 11, se observa cómo antes del instante de cierre, la tensión es cero en las tres fases.

Luego de energizar la fase A (azul), las tensiones que se producen en los devanados de los transformadores, no son peligrosas, ya que la tensión mayor que se verifica es 16,7 kV, es decir, 0,87p.u. La tabla 4, muestra los valores numéricos obtenidos de la figura 11.

**Tabla 4. Valores eficaces de tensión en cada transformador del banco, para cierre de una fase.**

Tensión nominal de cada transformador; 19,1 kV				
Fase A (kV)	Fase B (kV)	Fase C (kV)	Máximo (kV)	Máximo (pu)
16,7	8,3	8,3	16,7	0,87

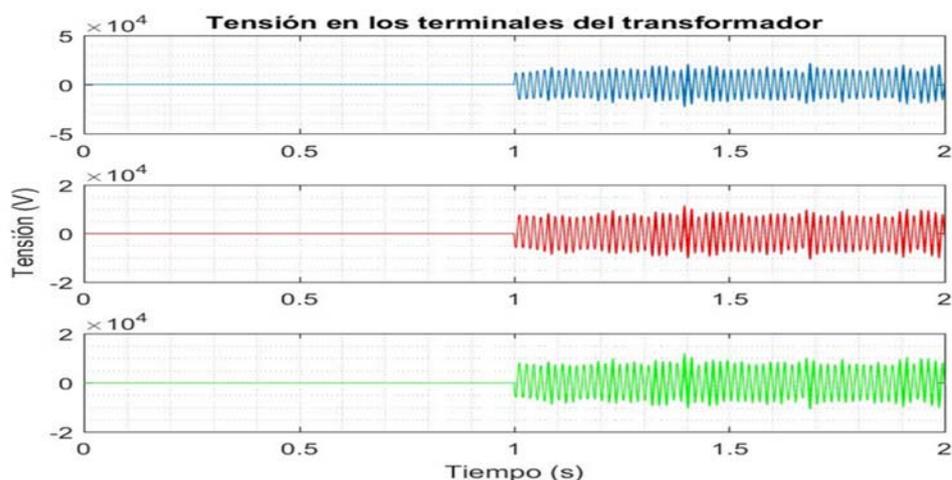


Fig. 11. Tensión por fase del banco de transformadores para el cierre de la fase A en el segundo 1 de la simulación.

### Caso de estudio 2

En la figura 12, se observa cómo antes del instante de cierre, la tensión es cero en las tres fases.

Luego de energizar la fase A (azul), las tensiones que se producen en los devanados de los transformadores, no son peligrosas, ya que la tensión mayor que se verifica es 18,5 kV, es decir, 0,54p.u. La tabla 5, muestra los valores numéricos obtenidos de la figura 12.

Tabla 5. Valores eficaces de tensión en cada fase del transformador trifásico, para cierre de una fase.

Tensión nominal de cada transformador; 34,5 kV				
Fase A (kV)	Fase B (kV)	Fase C (kV)	Máximo (kV)	Máximo (pu)
18,5	9,3	9,3	18,5	0,54

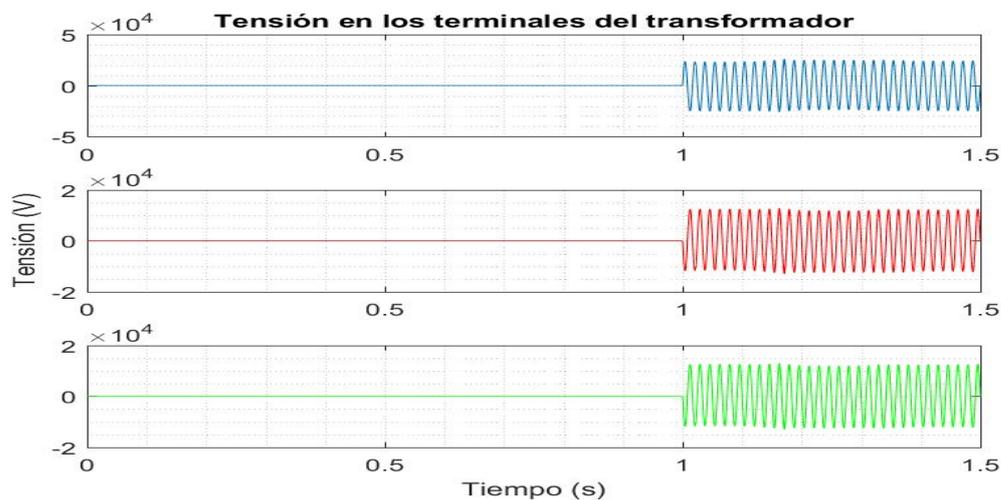


Fig. 12. Tensión por fase del transformador trifásico para el cierre de la fase A en el segundo 1 de la simulación.

### CONCLUSIONES

En las simulaciones que se realizaron, se logró visualizar la ferorrresonancia a partir de los parámetros particulares del transformador y la línea.

En los oscilogramas resultantes se observa los disturbios que causa el fenómeno, además de las distorsiones y sobretensiones que se producen.

La herramienta creada permite, con variaciones de las distancias de las líneas y los parámetros de estas o del transformador, hallar una zona segura para así evitar el fenómeno.

## REFERENCIAS

- [1]. FERRACCI, Philippe. Cuaderno Técnico No. 190 "La Ferorrresonancia". 2000. La colección de Cuadernos Técnicos forma parte de la «Biblioteca Técnica» de Schneider Electric España S.A. Versión española: octubre 2000. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/General/CT190.pdf>  
Puede accederse a estas publicaciones en Internet: <http://www.schneiderelectric.es>
- [2]. HERNÁNDEZ O., Llamó H. S., Lorenzo R. "Obtención de parámetros para el análisis de la ferorrresonancia periódica en líneas de distribución". Revista Ingeniería Energética. (2014). Scielo. vol. 35, n. 2, p. 159 – 170. ISSN 1815-5901. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v35n2/rie09214.pdf>
- [3]. DIABI, Rabah "Evaluation of the Zero Sequence Impedance of Overhead High Voltage Lines". World Academy of Science, Engineering and Technology. 2013, vol. 78, p. 1625-1631. ISNI:0000000091950263. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <https://publications.waset.org/8395/evaluation-of-the-zero-sequence-impedance-of-overhead-high-voltage-lines>
- [4]. TOLEDO Eduardo José , Mario O Oliveira, "Conferencia, Análisis de Ferorrresonancia en Transformadores de Tensión Inductivos para Uso Metroológico". September 2012. Simposio Internacional de Innovación y Tecnología, Lima, Peru. DOI: [10.13140/RG.2.1.1896.4009](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1896.4009). [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/275023937\\_Analisis\\_de\\_Ferorrresonancia\\_en\\_Transformadores\\_de\\_Tension\\_Inductivos\\_para\\_Uso\\_Metroologico](https://www.researchgate.net/publication/275023937_Analisis_de_Ferorrresonancia_en_Transformadores_de_Tension_Inductivos_para_Uso_Metroologico)
- [5]. MONTERO Jorge Celis-, Ferley Castro-Aranda, "Modelo práctico del transformador de distribución trifásico para análisis de transitorios de baja frecuencia: Identificación de parámetros". Ingeniare. Diciembre 2012, v. 20, n. 3, p. 293-303. DOI: 10.4067/S0718-33052012000300003. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/262663631\\_Modelo\\_practico\\_del\\_transformador\\_de\\_distribucion\\_trifasico\\_para\\_analisis\\_de\\_transitorios\\_de\\_baja\\_frecuencia\\_Identificacion\\_de\\_parametros](https://www.researchgate.net/publication/262663631_Modelo_practico_del_transformador_de_distribucion_trifasico_para_analisis_de_transitorios_de_baja_frecuencia_Identificacion_de_parametros)
- [6]. BOGADO Martínez César Francisco. "Análisis de Osciladores No Lineales de Segundo Orden. Caso de Estudio: Ferorrresonancia en Transformadores". UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica San Lorenzo, Paraguay 2012. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <http://www.cc.pol.una.py/~cschaer/LibroTFGCesarv1julio.pdf>
- [7]. QUISPE Palomino, Leonardo Jesús. "Análisis del fenómeno ferorrresonancia y su implicancia en los transformadores". Publicado 2009. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en : [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP\\_c28b70214fb328a67789a8670737ce76](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_c28b70214fb328a67789a8670737ce76). Acceso en línea: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3558>
- [8]. ARAGONÉZ Román Wilber . " Aplicación de la Electrónica en la mitigación de la Ferorrresonancia en Transformadores de Tensión". Revista CITE ENERGIA. LIMA / Silicon Technology. Paper Técnico 08 - 2016. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en : <http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2016/09/paper-wilber.pdf>
- [9]. GUDIEL Sandoval Marco Fabio. "Análisis de ferorrresonancia en transformadores de distribución alimentados con cable monopolar apantallado". Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2004. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en : [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0519\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0519_EA.pdf)
- [10]. QUIJIJE Sánchez Carlos. "Estudio del Fenómeno de Ferorrresonancia en Transformadores". Septiembre de 2012, Universitat Rovira I Virgili. Tesis . [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1811pub.pdf>
- [11]. Informe. Ferorrresonancia en transformadores de distribución (parte II). 6 septiembre, 2019. [Consultado en noviembre de 2019]. Disponible en: <https://megavattios.com.ar/ferorrresonancia-en-transformadores-de-distribucion-parte-ii/>

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Orestes Hernández Areu:** <https://orcid.org/0000-0002-2672-239X>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de los datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Ovianyelis Pérez Pérez:** <https://orcid.org/0000-0001-5385-7487>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de los datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Julio Fernando Valle García:** <https://orcid.org/0000-0003-3944-8091>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de los datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.