

# Modelo para simular el efecto de la distorsión armónica en las pérdidas de transformadores monofásicos

## *Model for the simulation of the effect of harmonic distortion on single-phase transformers*

Frank–Grau Merconchini<sup>I</sup>; Orestes–Hernández Areu<sup>II</sup>\*, Frank–López Padrón<sup>I</sup>; Eduardo–Sierra Gil<sup>III</sup>; Juan Carlos–Olivares Galván<sup>IV</sup>

<sup>I</sup>Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

<sup>II</sup>Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría La Habana, Cuba

<sup>III</sup>Universidad Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba

<sup>IV</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapótzalco, México

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

Recibido: 2 de mayo del 2023

Aprobado: 30 de junio del 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



### RESUMEN/ABSTRACT

En este trabajo se propone un método para simular transformadores monofásicos empleando el software Simulink/Matlab. El modelo está basado en los parámetros del circuito equivalente del transformador y el diseño de una carga no lineal, que provoca una distorsión armónica elevada de las corrientes, permitiendo evaluar su influencia en las pérdidas de la máquina. A través de las señales de tensión y corrientes en los devanados del transformador, su procesamiento y el empleo de la Norma ANSI/IEEE Std. C57.110, es posible determinar las pérdidas en el transformador considerando la influencia de la distorsión armónica. El modelo se construye a partir del espectro de las señales de corriente de la carga no lineal y de los parámetros del circuito equivalente del transformador. Los resultados de las simulaciones permiten estimar las pérdidas debido a la influencia de los armónicos, así como su influencia en la eficiencia y la cargabilidad del transformador.

**Palabras clave:** Transformador monofásico; distribución; pérdidas; distorsión armónica.

*In this work, a method for simulation of single-phase transformers using the Simulink/Matlab software is proposed. The model is based on the parameters of the equivalent circuit of the transformer and the design of a non-linear load, which causes a high harmonic distortion of the currents, allowing to evaluate the influence of this phenomenon on the losses of the machine. From the voltage and current signals in the transformer windings, their processing and the use of the ANSI/IEEE Std. C57.110 Standard, it is possible to determine the losses in the transformer considering the influence of the harmonic distortion of the current. The model is built from the spectrum of the current signals of the non-linear load and the parameters of the equivalent circuit of the transformer. The results of the simulations allow estimating the losses due to the influence of harmonics, as well as their influence on the efficiency and capability of the transformer.*

**Key words:** single-phase transformer; distribution networks; losses; harmonic distortion.

### INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia puede ser separada en dos grupos. En un primer grupo se encuentra la calidad del servicio técnico, que abarca los tiempos de interrupción y de la energía dejada de servir, así como las pérdidas de energía de acuerdo al tipo de sistema y el nivel de tensión en el que operan [1, 2]. En el segundo está la calidad del producto técnico, este grupo considera la distorsión de la forma de onda, la presencia de armónicos de tensión y de corriente, las fluctuaciones de la tensión, las desviaciones de la tensión, la desviación de la frecuencia, el desbalance y la asimetría en las tensiones y las corrientes [1, 2].

Cómo citar este artículo:

Frank Grau Merconchini, *et al.* Modelo para la simulación digital del efecto de la distorsión armónica de las corrientes en las pérdidas de los transformadores de distribución monofásicos. Ingeniería Energética. 2023. 44 (2), mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

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

Algunos indicadores de la calidad del producto técnico, tales como el desbalance y la distorsión armónica de tensiones y corrientes, influyen en las pérdidas del sistema, disminuyendo la vida útil de los elementos que lo componen y elevando los costos de explotación del mismo [2]. El incremento acelerado de las cargas no lineales en las redes de distribución secundaria (RDS) han agravado los indicadores de calidad, específicamente los relacionados con la distorsión armónica de las corrientes, caracterizados por la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total (THD) [1,2].

Entre las consecuencias de la presencia de armónicos en RDS se pueden citar las siguientes: [3, 4]

- Deterioro de la calidad de la onda de tensión.
- Fenómenos de resonancia.
- Empeoramiento de factor de potencia.
- Sobrecarga de conductores y alimentadores.
- Sobrecarga de transformadores.
- Disparo intempestivo de protecciones.

Los circuitos de distribución secundaria pueden ser clasificados en residenciales, mixtos o de servicios, en dependencia del perfil de carga que posean. Estos circuitos son redes radiales, monofásicas de dos o tres hilos o trifásicas de cuatro hilos, con tensiones de 120V hasta 240V, con una longitud no mayor de 150 metros hasta el punto más alejado del transformador [3, 4]. De aquí que en los circuitos de distribución existan tres elementos fundamentales y que resultan los más importantes: los conductores, las cargas y los transformadores. En las RDS, la energía asociada a las pérdidas de transformación puede llegar a alcanzar valores significativos y en muchos casos no es posible determinar estas pérdidas con exactitud [3 - 5], por lo que se requieren métodos analíticos para su cálculo basados en mediciones de campo y estudios energéticos que se realicen en el circuito. La diferencia entre las potencias de entrada y salida del transformador son las pérdidas totales ( $p_T$ ). Estas pérdidas pueden dividirse en pérdidas con carga ( $p_{LL}$ ) y pérdidas de vacío o de núcleo ( $p_{NLL}$ ) [5 - 9], como se expresa en la ecuación (1).

$$p_T = p_{NLL} + p_{LL} \quad (1)$$

Mientras las pérdidas de vacío permanecen constantes en tanto no se experimenten valores de distorsión armónica total en las tensiones (THDv) superiores al 8% [10 - 12], las pérdidas con carga si se elevan como resultado de la distorsión armónica de las corrientes [5, 6, 12-14]. El valor de las pérdidas de vacío de cada transformador puede ser determinada mediante el ensayo de vacío en el laboratorio. Las pérdidas con carga pueden dividirse en pérdidas eléctricas ( $p_{ELEC}$ ) y pérdidas adicionales totales ( $p_{ADT}$ ). Las pérdidas con carga nominales pueden ser obtenidas de manera práctica, a partir del ensayo de la máquina en cortocircuito. Esta puede expresarse de la siguiente manera. Vea ecuación (2).

$$p_{LL} = p_{ELEC} + p_{ADT} \quad (2)$$

Como se establece en la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6], las pérdidas eléctricas son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por los mismos, por tanto, son proporcionales al cuadrado de las distorsiones individuales del espectro armónico de estas corrientes, como se expresa en la siguiente ecuación (3).

$$p_{ELEC} = p_{ELECn} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_n^2} \quad (3)$$

Donde:

$p_{ELECn}$  son las pérdidas eléctricas nominales.

$I_h$  es el valor eficaz de la corriente del armónico individual de orden "h" obtenido a partir de su espectro.

$I_n$  es el valor eficaz de la corriente nominal del transformador.

Las pérdidas adicionales totales están compuestas por las pérdidas de Eddy o por corrientes parásitas, debido al flujo electromagnético extraviado en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas adicionales del devanado incluyen pérdidas aisladas de corrientes de Eddy en los conductores del devanado y otras pérdidas adicionales debido a la circulación de corrientes entre devanados paralelos o aislados. Estas pérdidas aumentarán en proporción al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, en cambio, no existe manera práctica de medir las mismas, por tanto, su cálculo debe realizarse mediante el método analítico que proporciona la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6].

La misma publicación establece que el valor nominal de las pérdidas adicionales en el núcleo, abrazaderas, tanque y otras partes del transformador ( $p_{ADn}$ ), es de un 67 % de las pérdidas adicionales totales ( $p_{ADT}$ ) para transformadores en aceite y de un 33 % para transformadores de núcleo seco. Atendiendo a este criterio se plantea que estas pérdidas adicionales se determinarán como: Vea ecuación (4).

$$p_{AD} = p_{ADn} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_n}\right)^2 h^{0,8} \quad (4)$$

Las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados del transformador serán: Vea ecuación (5).

$$p_{ED} = p_{EDn} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_n}\right)^2 h^2 \quad (5)$$

Donde  $p_{EDn}$  son las pérdidas nominales por corrientes parásitas.

EL método analítico que proporciona la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6], permite entonces determinar las pérdidas del transformador cuando opera con cargas no lineales que demandan altos contenidos de distorsión armónica. Para aplicar este método se hace necesario entonces realizar mediciones en el secundario del transformador empleando un instrumento registrador (analizador de redes) y obtener el espectro de distorsión armónica individual de las corrientes en el circuito de distribución.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo básico para determinar las pérdidas con carga en el transformador mediante la simulación se basa en el esquema de la figura 1. El sistema parte del modelo del transformador y sus parámetros, los cuales se corresponden con los datos del circuito equivalente del mismo que se obtiene a partir de las pruebas de la máquina [13, 14]. El transformador suministra energía a una carga no lineal, la cual es diseñada a partir de los valores de los armónicos individuales de la corriente. La simulación permite obtener los valores discretos de las tensiones y corrientes en dos puntos del sistema, en específico, las tensiones y corrientes en los devanados del transformador ( $v_w$  e  $i_w$ ) y las tensiones y corrientes en la línea ( $v_L$  e  $i_L$ ).

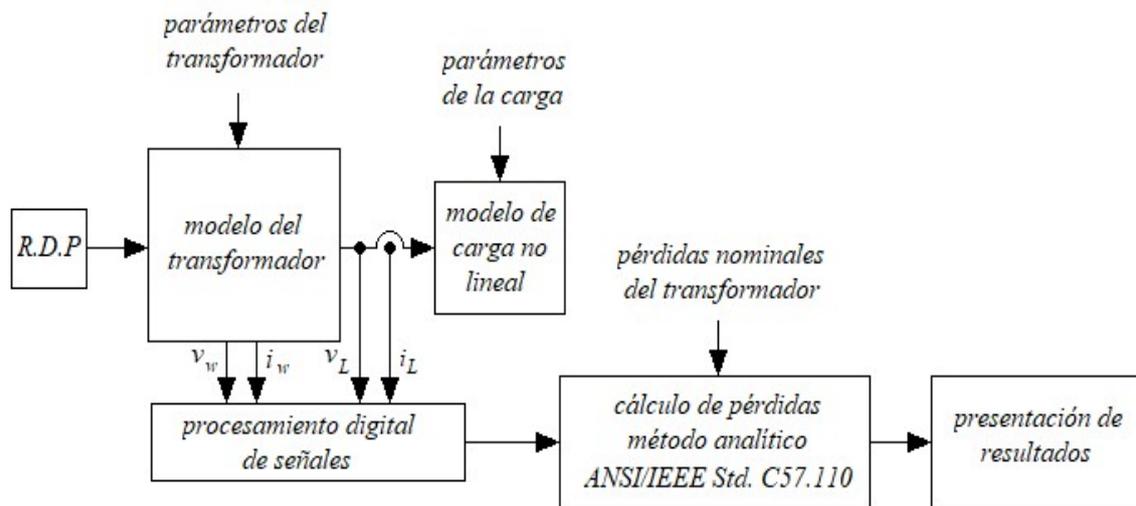


Fig. 1. Modelo para la simulación y el ajuste del cálculo de las pérdidas

El procesamiento digital de las señales permitirá obtener el espectro armónico de las corrientes en los devanados del transformador, el valor del THD, así como calcular las pérdidas eléctricas y determinar las potencias activas, reactivas, de distorsión y aparentes para cada uno de los devanados del transformador. El procesamiento de las señales de línea permitirá determinar el espectro armónico de las corrientes para futuras relaciones con las pérdidas en la máquina. Por último, se emplean los datos nominales de la máquina y el espectro armónico de las corrientes en los devanados para determinar las pérdidas con carga mediante el método analítico de la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6].

Ventajas del modelo:

1. El modelo está diseñado para adecuar la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6], en el transformador, a partir del procesamiento de las corrientes en los devanados de las máquinas y no a partir de las corrientes de línea del sistema, por tanto, es aplicable tanto a transformadores monofásicos como a bancos trifásicos de transformadores monofásicos, en cualquier esquema de conexión.
2. Es de fácil implementación y no requiere de datos adicionales a los que forman parte de los diagnósticos de calidad en redes de distribución o sistemas industriales.

Desventajas y restricciones del modelo:

1. Alto nivel de carga computacional por el procesamiento digital de las señales.
2. Solo permite el análisis para una condición determinada de la distorsión armónica individual de la carga en un instante de tiempo determinado, lo cual es también una restricción del modelo analítico que provee la norma de la ANSI/IEEE Std. C57.110 [6].

### Modelo del transformador

Charles P. Steinmetz desarrolló el modelo de circuito que es universalmente usado para el análisis de los transformadores con núcleo de hierro que trabajan con la permeancia de los circuitos de potencia [15]. Este modelo tiene muchas ventajas al aplicársele íntegramente la teoría de circuitos lineales, primeramente, porque el núcleo de hierro posee saturación e histéresis y está definido como no lineal; por lo tanto, esta es una manera de considerar el transformador desde el punto de vista de la teoría básica del circuito lineal. La linealidad del modelo de Steinmetz implica que las inductancias y la resistencia en el modelo del circuito son parámetros constantes, por tanto, sus valores son independientes de las tensiones aplicadas o de las corrientes que circulan por él. En la figura 2, se muestra el modelo de circuito equivalente.

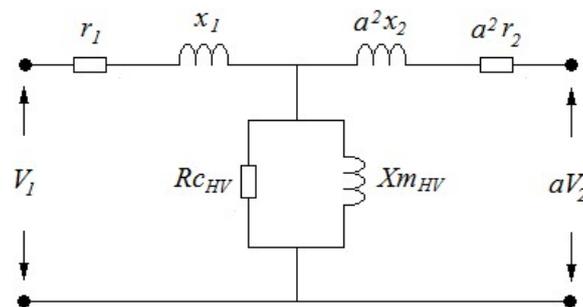


Fig. 2. Circuito equivalente exacto referido al devanado primario.

Donde:

$V_1$  es la tensión en el primario.

$V_2$  es la tensión en el secundario del transformador.

$a$  es la relación de transformación.

$r_1$  y  $x_1$  son los valores de resistencia y reactancia del primario.

$r_2$  y  $x_2$  son los valores de resistencia y reactancia del secundario referidos al lado de alta tensión.

$R_{cHV}$  y  $X_{mHV}$  son los valores de la resistencia y la reactancia de magnetización.

Para obtener los parámetros del modelo de Steinmetz, es necesario calcular los parámetros del circuito equivalente referidos al primario. Con este propósito, se parte de los datos de las pruebas de vacío y cortocircuito del transformador.

### Modelo de la carga no lineal

El modelo de la carga no lineal se basa íntegramente en el análisis teórico de las señales periódicas no sinusoidales mediante su desarrollo en series de Fourier trigonométricas [16]. De acuerdo a esta teoría una señal de corriente puede ser descrita como: Vea ecuación (6).

$$i(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad (6)$$

Donde  $c_0$  es el coeficiente constante o la componente de directa en la señal,  $a_n$  es el coeficiente  $n$ -ésimo cosenoidal y  $b_n$  el coeficiente  $n$ -ésimo senoidal.

Dado que la serie de Fourier trigonométrica está compuesta por una suma infinita de señales sinusoidales de frecuencias que son múltiplos de la fundamental, la respuesta general del sistema ante una señal periódica no sinusoidal será igual a la sumatoria de las respuestas individuales del sistema ante las cada uno de los armónicos que la componen en su estado estacionario. La serie de Fourier trigonométrica de senos y cosenos puede ser reducida a una serie de cosenos de la manera: Vea ecuación (7) y (8).

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (7)$$

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left( \frac{b_h}{a_h} \right) \quad (8)$$

Donde  $A_h$  es la amplitud del armónico de orden  $h$  de la señal y  $\phi_h$  es el desplazamiento de fase del armónico de orden  $h$  de la señal. La señal de corriente puede ser escrita entonces como: Vea ecuación (9).

$$i(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega t + \phi_h)] \quad (9)$$

A partir de los valores medidos en el diagnóstico energético del sistema, es posible reconstruir la señal de corriente como una sumatoria fuentes de corriente de amplitud  $A_h$  con un ángulo de defasaje  $\phi_h$  de la forma en que se representa en la figura 3.

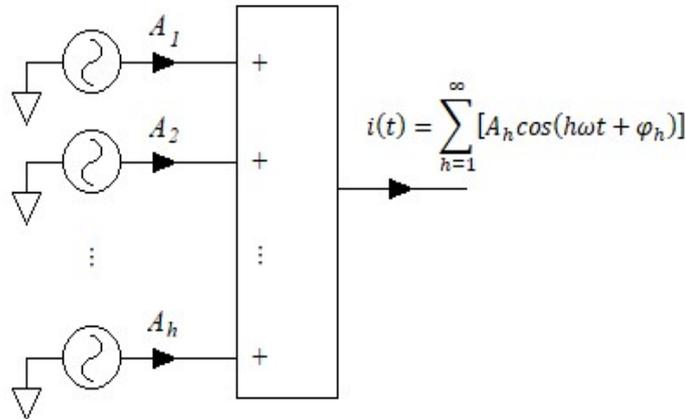


Fig. 3. Modelo de carga no lineal partiendo de los armónicos individuales de las corrientes.

### Implementación del modelo en Simulink/Matlab para un transformador monofásico

Para la simulación del transformador se empleará el transformador lineal de tres devanados, cuyos datos provienen del modelo de Steinmetzobenido a partir de los valores nominales del transformador y parámetros de su circuito equivalente determinados a partir de los ensayos. El objetivo de este elemento del modelo es obtener las tensiones y corrientes en los devanados de la máquina. La carga no lineal es diseñada de acuerdo a los valores de distorsión armónica individual de las corrientes medidas a través de estudios con un instrumento registrador (analizador de redes) en el punto común de conexión del sistema de distribución. Para facilitar la programación se ha elaborado una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permita definir el valor de los armónicos individuales del espectro y realizar estudios a partir de dos condiciones básicas en la operación:

1. Variar el valor del THDi manteniendo constante el valor eficaz de la corriente.
2. Variar el valor del THDi manteniendo constante el valor del armónico fundamental de la corriente.

El diseño de la carga está basado en que, el valor eficaz real (True RMS) de una señal periódica no sinusoidal está dado por la ecuación (10):

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2} = \sqrt{(I_1)^2 + \sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} \quad (10)$$

Donde:

$I_{RMS}$  es el valor eficaz real de la corriente.

$I_h$  es el valor eficaz del armónico de la corriente de orden  $h$ .

$I_1$  es el valor eficaz del armónico fundamental de la corriente.

Teniendo en cuenta la expresión anterior, el valor eficaz real de la corriente en la carga puede escribirse como. Vea ecuación (11):

$$(I_{RMS})^2 = k_1 \cdot (I_1)^2 + k_2 \cdot \sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2 \quad (11)$$

Donde:

$k_1$  es un valor real, positivo tal que  $0 < k_1 \leq 1$ , que determina la amplitud del armónico fundamental.

$k_2$  es un valor real, positivo tal que  $0 < k_2 \leq 1$ , que determina la amplitud de los armónicos de distorsión.

Esta expresión permite fijar infinitos valores de  $k_1$  y  $k_2$  de manera tal que satisfagan la ecuación (11), manteniendo así el valor eficaz de la corriente constante con diferentes niveles de distorsión armónica total, lo cual permitiría realizar el estudio de las pérdidas en el transformador con variación del THDi pero manteniendo el mismo estado de carga. De igual manera, es posible mantener constante la amplitud del armónico fundamental a partir de definir un valor para  $k_1$  y variar  $k_2$  para modificar la amplitud de los armónicos de distorsión, variando así el valor del THDi, lo cual garantizaría la segunda condición de operación. La implementación del diseño de la carga empleando Matlab se muestra en la figura 4:

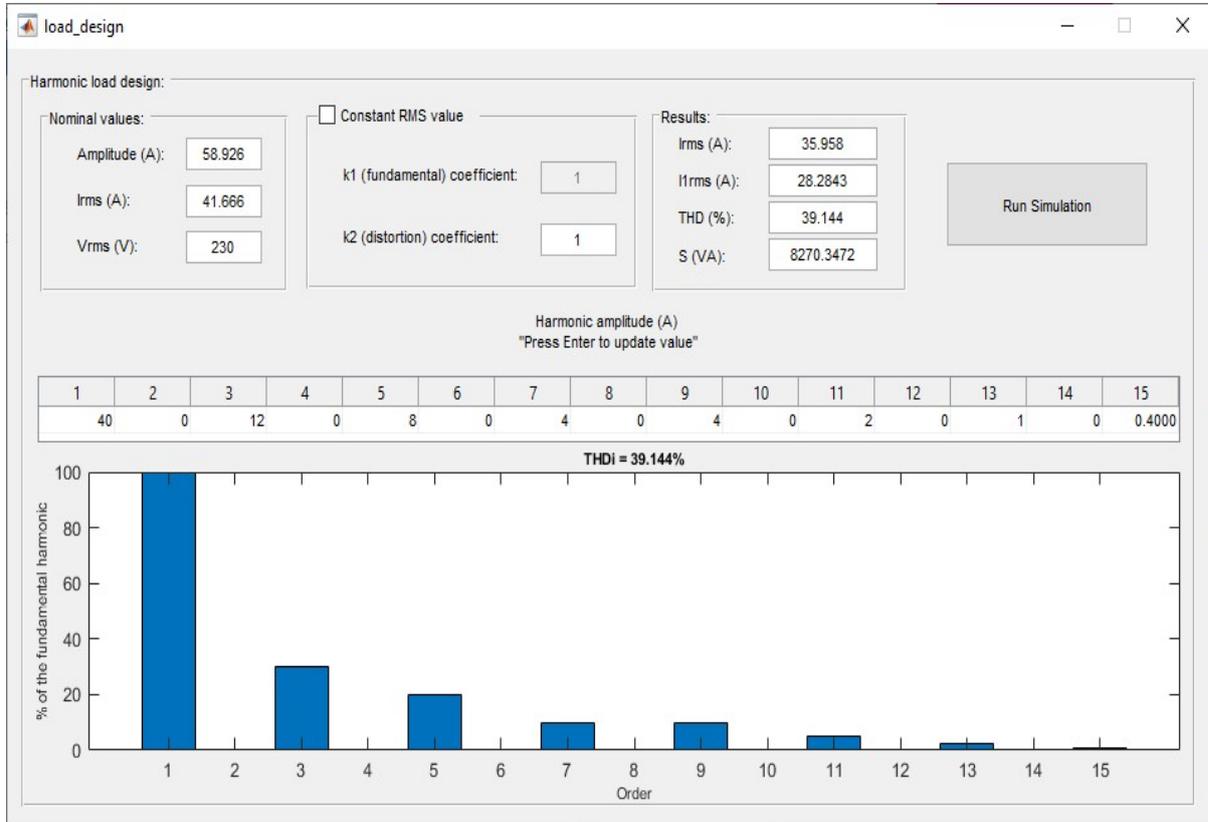


Fig. 4. Interfaz gráfica de usuario para el diseño de la carga no lineal en Matlab.

El procesamiento de los resultados de la simulación se realiza de manera automática al concluir la simulación. Los resultados de las tensiones y corrientes en los devanados del transformador y en las cargas son procesados en un script de Matlab para determinar todas las magnitudes y realizar el cálculo de las pérdidas.

A continuación, se ilustra el funcionamiento del modelo con un transformador monofásico de 10 kVA, cuyos datos aparecen reflejados en la tabla 1:

Tabla 1. Datos del transformador monofásico

$S_n$ (kVA)	10
$V_1$ (kV)	7,698
$V_2$ (kV)	0,24
$r_1$ ( $\Omega$ )	61,67
$r_2$ ( $\Omega$ )	0,028
$x_1$ ( $\Omega$ )	76,09
$x_2$ ( $\Omega$ )	0,0345
$R_{cHV}$ ( $\Omega$ )	1007509,35
$X_{mHV}$ ( $\Omega$ )	340441,115

La corriente de la carga tiene un valor eficaz de 35,958 A y un THDi de un 39,14 %. El modelo en Simulink del transformador monofásico se muestra en la figura 5.

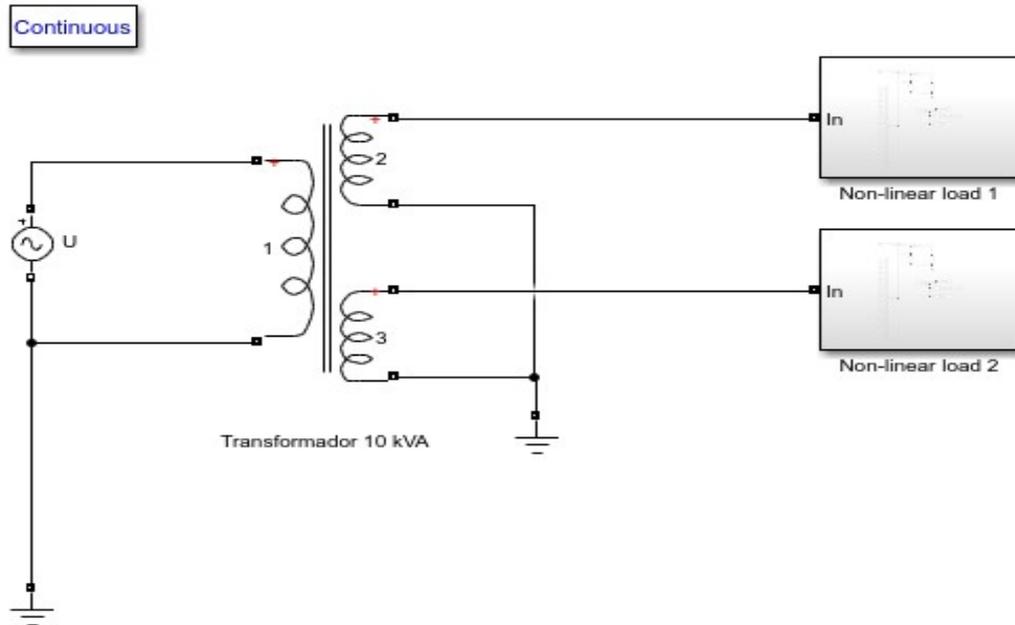


Fig. 5. Modelo en Simulink/Matlab del transformador monofásico con carga no lineal

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la simulación digital es posible obtener las señales de tensiones y corrientes en cada uno de los devanados del transformador (figura 6.a). El procesamiento de estas señales permite determinar las potencias en los devanados, el factor de potencia, las pérdidas eléctricas en los mismos y el espectro de distorsión armónica individual de las corrientes (figura 6.b).

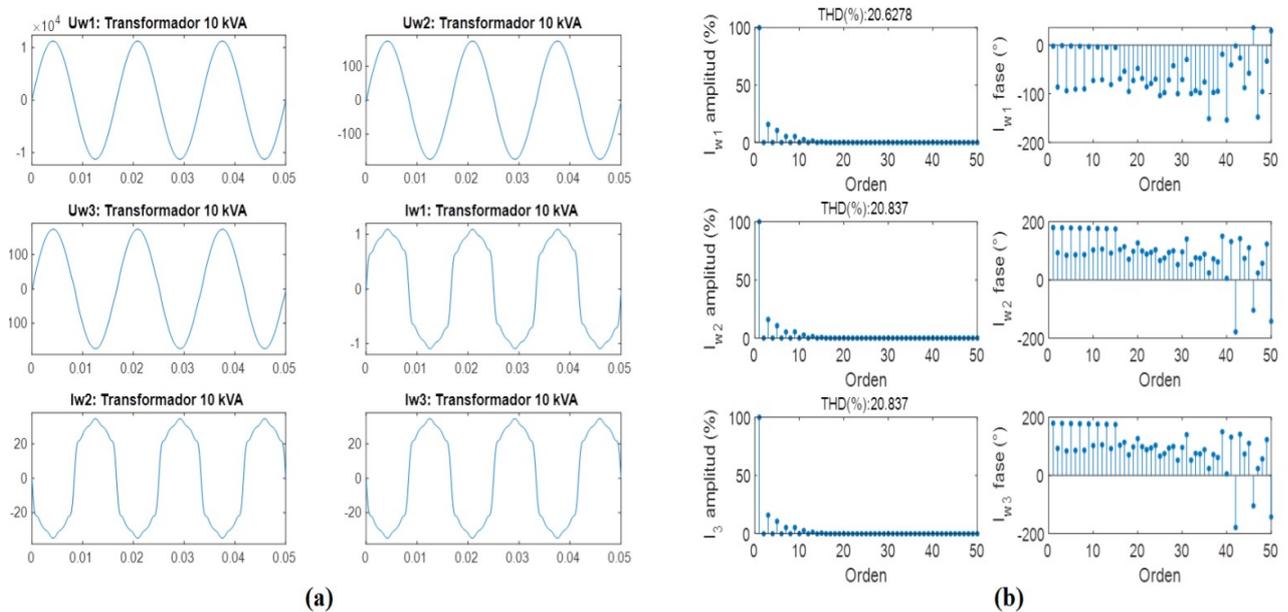
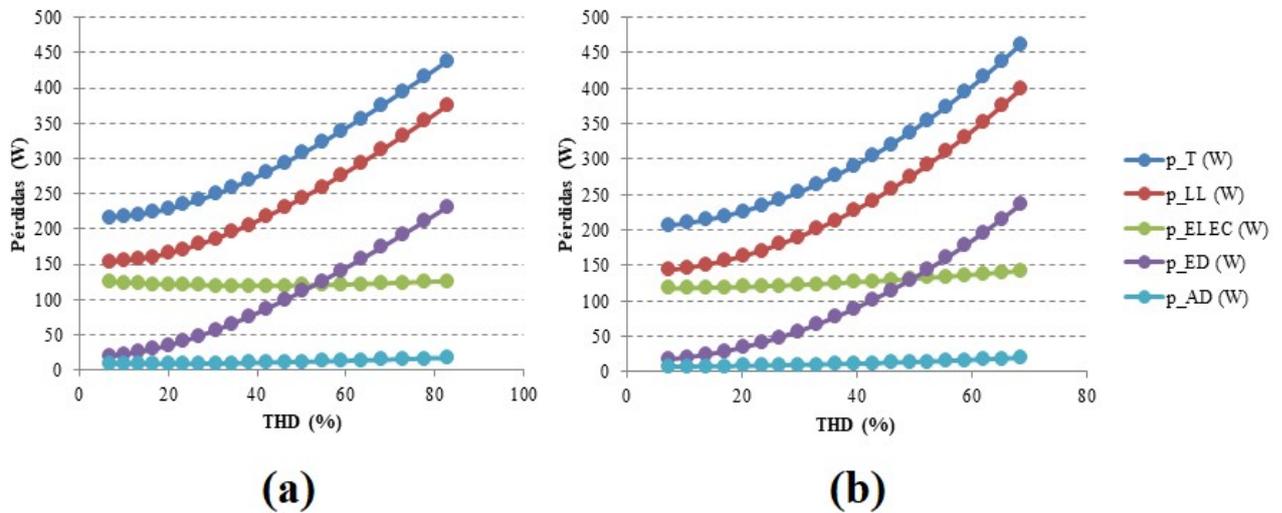


Fig. 6. (a) Tensiones y corrientes en los devanados del transformador monofásico, con corriente de carga no lineal  
(b) Espectro de las corrientes en los devanados del transformador monofásico de 10 kVA, con carga no lineal

## Cálculo de las pérdidas con carga del transformador monofásico con cargas no lineales

Para evidenciar el efecto de la distorsión armónica se realizaron 20 simulaciones para ambas condiciones de operación.

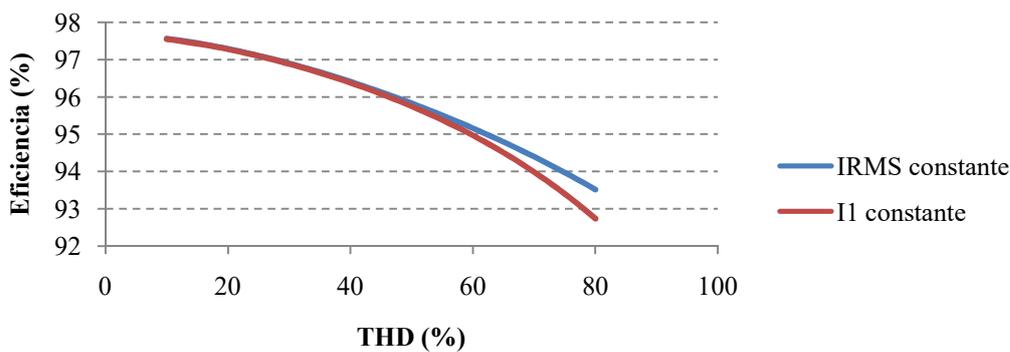
- Condición 1: Manteniendo constante el valor eficaz de la corriente en la carga (figura 7.a).
- Condición 2: Manteniendo constante el valor del armónico fundamental de la corriente (figura 7.b).



**Fig. 7. (a)** Comportamiento de las pérdidas en el transformador monofásico de 10 kVA, con carga no lineal, manteniendo el valor IRMS constante **(b)** Comportamiento de las pérdidas en el transformador monofásico de 10 kVA, con carga no lineal, manteniendo el constante el valor el armónico fundamental

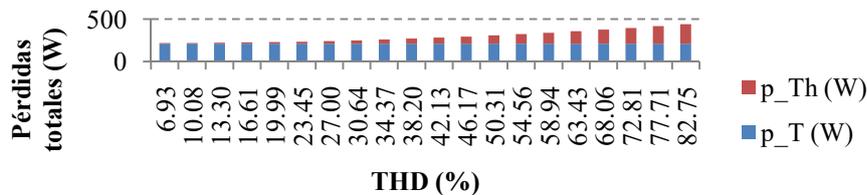
En ambos casos se evidencia un incremento exponencial de las pérdidas adicionales, siendo más significativo en el caso de las pérdidas por corrientes parásitas en el transformado ( $p_{ED}$ ), llegando a superar a las pérdidas eléctricas cuando la distorsión armónica total de la corriente alcanza valores cercanos al 50%, lo que está en correspondencia con los valores límites fijados por las normas IEC 61000-2-2 [17] e IEC 61000-2-3 [18] para sistemas de suministro de alimentación de baja tensión y la Norma IEC 61000-2-4 [19] para instalaciones industriales de BT y MT, donde se establece que para valores del THDi mayores e iguales del 50 %, el sistema presenta una elevada polución armónica, con influencia en la operación, por lo que se requiere que se tomen medidas técnicas para la atenuación de la distorsión.

Para valores del THDi inferiores al 50%, el comportamiento de la eficiencia en ambos estudios resulta prácticamente idéntico, lo cual puede observarse en la figura 8. A partir de un valor de THDi cercano al 50%, el comportamiento de la eficiencia comienza a diferenciarse entre ambos casos, esta diferencia está relacionada con el incremento de las pérdidas eléctricas dada por el correspondiente incremento del valor eficaz de la corriente al mantener la componente fundamental constante y aumentar el valor de los armónicos de distorsión.



**Fig. 8.** Comportamiento de la eficiencia en el transformador monofásico de 10 kVA, con carga no lineal para ambas condiciones de análisis

Para valores de THDi cercanos al 10%, el incremento de las pérdidas totales producto de los armónicos ( $p_{Th}$ ) representa tan solo el 3% de las pérdidas totales ( $p_T$ ) del transformador cuando alimenta una carga lineal que demanda el mismo valor eficaz de corriente. En cambio, a partir del 10% de distorsión armónica total estas pérdidas se incrementan, llegando a alcanzar un valor superior al 45% de las  $p_T$  con carga lineal cuando el THDi es de un 50% (ver figura 9). Como queda evidenciado en la figura 7, este incremento en las pérdidas no está dado por el incremento en las pérdidas eléctricas, sino por el efecto de la distorsión armónica en las pérdidas adicionales y por corrientes parásitas.



**Fig. 9.** Gráfico de pérdidas totales ( $p_T$ ) del transformador monofásico, con una carga lineal y corriente de 33,48A (azul) y el incremento de las pérdidas totales debido a la polución armónica ( $p_{Th}$ ) manteniendo la corriente constante, con valor medio de 33,26 A (rojo)

## CONCLUSIONES

Las pérdidas totales calculadas, empleando en la simulación digital mediante el modelo propuesto, y las pérdidas totales obtenidas de la simulación empleando el modelo lineal aproximado del circuito de Steinmetz, son considerablemente distintas. Esta diferencia se incrementa, conforme crece el valor del THDi, por tanto, el efecto de la distorsión armónica de las corrientes en las pérdidas con carga del transformador. Esto evidencia que la simulación digital del transformador empleando cargas no lineales, a partir del modelo de Steinmetz, requiere del ajuste que permita considerar el fenómeno de incremento de pérdidas adicionales por corrientes parásitas y el efecto de la distorsión en el incremento de las pérdidas eléctricas.

La simulación digital del modelo propuesto, permite determinar las corrientes y las tensiones de fase en la carga y en los devanados del transformador. A partir de estas señales y empleando el método analítico de la ANSI/IEEE Std. C57.110, es posible determinar las pérdidas con carga del transformador monofásico. Dado que el modelo opera a partir de las tensiones y corrientes en los devanados, puede ser aplicado tanto en transformadores monofásicos, como en bancos trifásicos de transformadores monofásicos, para cualquier esquema de conexión. Para valores de THDi cercanos al 10%, el incremento de las pérdidas totales producto de los armónicos ( $p_{Th}$ ) es poco representativo en comparación con las pérdidas totales ( $p_T$ ) del transformador cuando alimenta una carga lineal. En cambio, a partir del 10% de distorsión armónica total estas pérdidas se incrementan gradualmente, llegando a alcanzar un valor superior al 45% de las  $p_T$  con carga lineal, cuando el THDi alcanza valores cercanos al 50%.

## REFERENCIAS

- [1] Elizabeth Cherian, *et al.* "Pollution impact of residential loads on distribution system and prospects of DC distribution". Engineering Science and Technology, an International Journal, (2016). vol. 19, n. 4, December 2016, p. 1655-1660. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616305572>
- [2] Reza Arghandeh, *et al.* "Harmonic interactions of multiple distributed energy resources in power distribution networks", Electric Power Systems Research, vol. 105, December 2013, vol. 105, p. 124-133. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779613001995>
- [3] Gómez Sarduy, Julio, *et al.* "Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central". El Hombre y la Máquina, n. 45, julio-diciembre, 2014, p. 33-43, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. ISSN: 0121-0777. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47838946005.pdf>
- [4] Ruggero Ríos, Bruno. "Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución". Revista Científica de la UCSA, vol.1 n. 1, Diciembre 2014, p.33-51, Asunción, Paraguay. Disponible en: <http://scielo.iics.una.py/pdf/ucsa/v1n1/v1n1a05.pdf>
- [5] Carrión González, Jorge Enrique, "Efectos de los armónicos de corriente en las pérdidas de transformadores de distribución monofásicos". Ingeniería Energética, vol. 40, n. 2, p. 112-127. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012019000200112&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012019000200112&lng=es&tlng=es)
- [6] ANSI/IEEE Std. C57.110-1998. IEEE. "Recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal load currents", IEEE Standards.(1998). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/754767>
- [7] S. B., Yousefi, H., Darvishi, B. & Tahani, A. "Comparison of Distribution Transformer Losses and Capacity under Linear and Harmonic Loads". In 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08). December 1-3, 2008. Johor Baharu, Malaysia. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4762661>
- [8] Yazdani-Asrami, M., Mirzaie, M. & Akmal, S. "Calculation of Transformer Losses under Non-sinusoidal Currents Using: Two Analytic Methods and Finite Element Analysis". World Applied Sciences Journal,(2010), vol. 9, n. 8, p.889 - 897. Disponible en: [https://www.idosi.org/wasj/wasj9\(8\)/7.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj9(8)/7.pdf)
- [9] Dejan Pejovski, Krste Najdenkoski, Mihail Dugalovski. "Impact of different harmonic loads on distribution transformers", Procedia Engineering, vol. 202, 2017, p. 76-87. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817342352>

- [10] Jayanth R. Ramamurthy, *et al.* "Influence of voltage harmonics on transformer no-load loss measurements and calculation of magnetization curves". *Electric Power Systems Research*, vol. 146, May 2017, p. 43-50. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779617300317>
- [11] Mohammad Yazdani-Asrami, *et al.* "No-load loss calculation of distribution transformers supplied by nonsinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis". *Energy*, vol 50, 1 February 2013, p. 205-219. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544212007293>
- [12] Merritt, S. Y. & Chaitkin, S. D. "Transformer Losses Part of the Purchasing Decision". *IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference*, p. 175 - 180. Ontario, Canada. (2002). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1015149>
- [13] Gupta, A. & Singh, R. "Evaluation of Distribution Transformer Losses Under Harmonic Loads Using Analytical and Simulation Methods". *International Journal on Emerging Technologies*, (2011), vol. 2, n. 2, p. 90 - 95. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-Distribution-Transformer-Losses-Under-Gupta-Singh/1d5d413f6ec785330bcf6a2536cadf564be32446>
- [14] Makarov, S. N. & Enmanuel, A. E. "Corrected Harmonic Loss Factor For Transformers supplying Non-sinusoidal Load current Analysis of High Voltage Harmonic Distortion Measurements". In *Proceedings of IEEE 9th International Conference on Harmonics and Power Quality*, (2000). Vol. 1, p. 87 - 90. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/3883266\\_Corrected\\_harmonic\\_loss\\_factor\\_for\\_transformers\\_supplying\\_nonsinusoidal\\_load\\_currents](https://www.researchgate.net/publication/3883266_Corrected_harmonic_loss_factor_for_transformers_supplying_nonsinusoidal_load_currents)
- [15] Aponte, G., Cadavid, H., Burgos, J. & Gómez-Luna, E. "A methodology for obtaining by measurements the transformer physical-circuitual model parameters". *Electrical and Review Poland*, (2012), vol. 9a, p. 12-15. Disponible en: <http://pe.org.pl/articles/2012/9a/3.pdf>
- [16] Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, N. Khan. "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, October 2017, p. 1152-1187. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117306226>
- [17] IEC 61000-2-2. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/63116>
- [18] IEC 61000-2-3 (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment Section 3: Description of the environment - Radiated and non-network-frequency-related conducted phenomena*. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/4134>
- [19] Norma IEC 61000-2-4. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/4135>

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

**Frank Grau Merconchni:** <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

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

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo y la redacción del manuscrito. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

**Frank López Padrón:** <https://orcid.org/0009-0004-4763-2328>

Participó en el diseño de la investigación, pruebas a transformadores, diagnósticos energéticos, la simulación y el procesamiento de los datos. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

**Eduardo Sierra Gil:** <http://orcid.org/0000-0001-5216-2771>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo y la redacción del manuscrito. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

**Juan Carlos Olivares Galván:** <https://orcid.org/0000-0002-1935-2669>

Participó en el análisis de los resultados, la revisión crítica del artículo y en la aprobación final del mismo.