

Evaluación del desempeño de un transformador monofásico mediante software

Hiram Alberto Canseco García

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa, Tamaulipas,
C.P. 02200, México, D.F., Teléfono: (55) 53189584
hiramcanseco@gmail.com

José Jiménez González

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa, Tamaulipas,
C.P. 02200, México, D.F., Teléfono: (55) 53189584
joseph31.ja@gmail.com

Eduardo Campero Littlewood

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa, Tamaulipas,
C.P. 02200, México, D.F., Teléfono: (55) 53189584
ecl@correo.azc.uam.mx

Irvin López García

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa, Tamaulipas,
C.P. 02200, México, D.F., Teléfono: (55) 53189584
ilg@correo.azc.uam..mx

Juan Carlos Olivares Galván

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa, Tamaulipas,
C.P. 02200, México, D.F., Teléfono: (55) 53189584
jolivare_1999@yahoo.com

Resumen

En este trabajo se presenta un programa interactivo (software) elaborado en MATLAB® para analizar el desempeño de un transformador monofásico. La operación del transformador se evalúa a partir de la obtención de las curvas de eficiencia y regulación

de voltaje a diferentes porcentajes de carga y distintos factores de potencia. La representación del transformador se hace mediante el circuito equivalente, cuyos parámetros se determinan mediante pruebas de circuito abierto y cortocircuito y considerando el criterio de diseño óptimo. El transformador representado es monofásico de 120 VA, 120/24 V. Las mediciones de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito se hicieron utilizando un Medidor de Variables Eléctricas desarrollado en el laboratorio LAPLACE de la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana. La plataforma interactiva se programó para que únicamente sea necesario tomar las lecturas del Medidor y que al ejecutarla, simule el comportamiento ante cambios de carga y factor de potencia y permita evaluar el desempeño del transformador de manera sistematizada.

Palabra(s) Clave(s): desempeño de un transformador, eficiencia de transformador, prueba de circuito abierto, prueba de cortocircuito, regulación de voltaje en transformado.

1. Introducción

Los transformadores eléctricos son un elemento muy importante dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) y son determinantes en su operación eficiente. Los transformadores de potencia elevan el voltaje de transmisión para disminuir la corriente que circula en los conductores y así lograr que sus secciones sean pequeñas y que las pérdidas por efecto *Joule* también lo sean [1-3]. La confiabilidad de los SEP depende, entre muchas otras cosas, de la confiabilidad de los transformadores. En la actualidad, uno de los grandes objetivos de los sistemas eléctricos de potencia es incrementar su eficiencia y rentabilidad. El análisis del desempeño de los transformadores permite determinar las condiciones de operación más adecuadas [3,4]. La condición cambiante de la demanda de energía en los SEP hace que los transformadores operen bajo condiciones variables. Por ello, se considera importante analizar su desempeño en diferentes condiciones de operación antes de que sean instalados en un SEP.

La evaluación de la operación de los transformadores está normalmente enfocada a su eficiencia y su regulación de voltaje. La representación del transformador se hace

mediante su circuito equivalente en estado estable, que está compuesto por parámetros que representan las pérdidas magnéticas y eléctricas del transformador. Los parámetros se obtienen mediante pruebas de circuito abierto y cortocircuito [5-8]. Es importante reconocer que los valores de los parámetros del transformador obtenidos con estas pruebas nos permiten realizar el análisis del desempeño del transformador en estado estable para una condición de operación específica [9]. El objetivo principal de este trabajo es presentar un programa interactivo elaborado en MATLAB® que permita simular el circuito equivalente y evaluar de una manera sistemática el desempeño del transformador bajo distintas condiciones de operación.

La evaluación del desempeño del transformador se hace mediante el cálculo de la eficiencia y la regulación de voltaje para distintas cargas. Lo que se busca es detectar qué condiciones de operación son deficientes y así tratar, en la medida de lo posible, evitarlas.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el transformador utilizado para las pruebas y se presenta la metodología desarrollada, incluyendo un diagrama de flujo del programa desarrollado. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos, la sección 4 se analizan estos resultados y por último, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Pruebas de laboratorio y simulación

El transformador en el que se hicieron las pruebas se utiliza en las prácticas del laboratorio LAPLACE de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México, D.F.

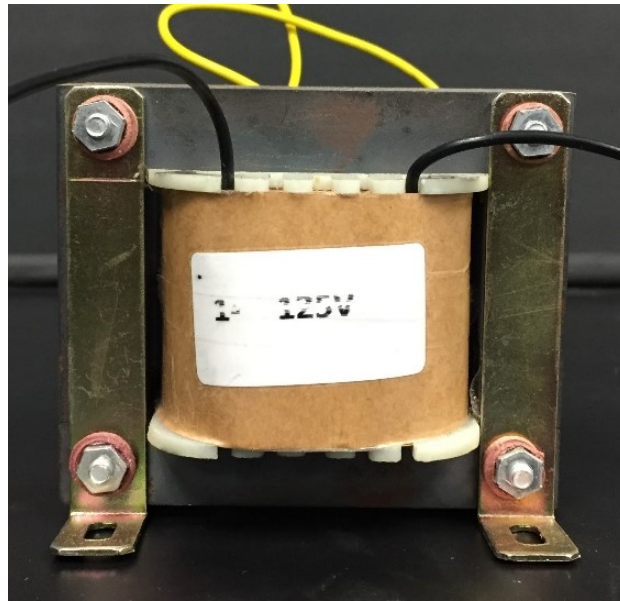


Fig. 1. Vista frontal del transformador bajo estudio.

Variable	Valores nominales rms
Potencia aparente [VA]	120
Voltaje en el lado de alta [V]	125
Voltaje en el lado de baja [V]	24
Corriente en el lado de alta [A]	0.96
Corriente en el lado de baja [A]	5

Tabla 1. Características eléctricas del transformador bajo estudio.

En la Fig. 1 se muestra el transformador bajo estudio y sus características eléctricas aparecen en la Tabla 1. La determinación de los parámetros de su circuito equivalente se hizo con las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito. Para ello, las mediciones de cada prueba, que se almacenan en un archivo de texto, son leídas por el programa elaborado en MATLAB® a partir del diagrama de flujo mostrada en la Fig. 2. El programa, en primera instancia calcula los parámetros del circuito equivalente exacto mostrado en la Fig. 3 [5,6], para posteriormente llevar a cabo la simulación y evaluación del desempeño del transformador.

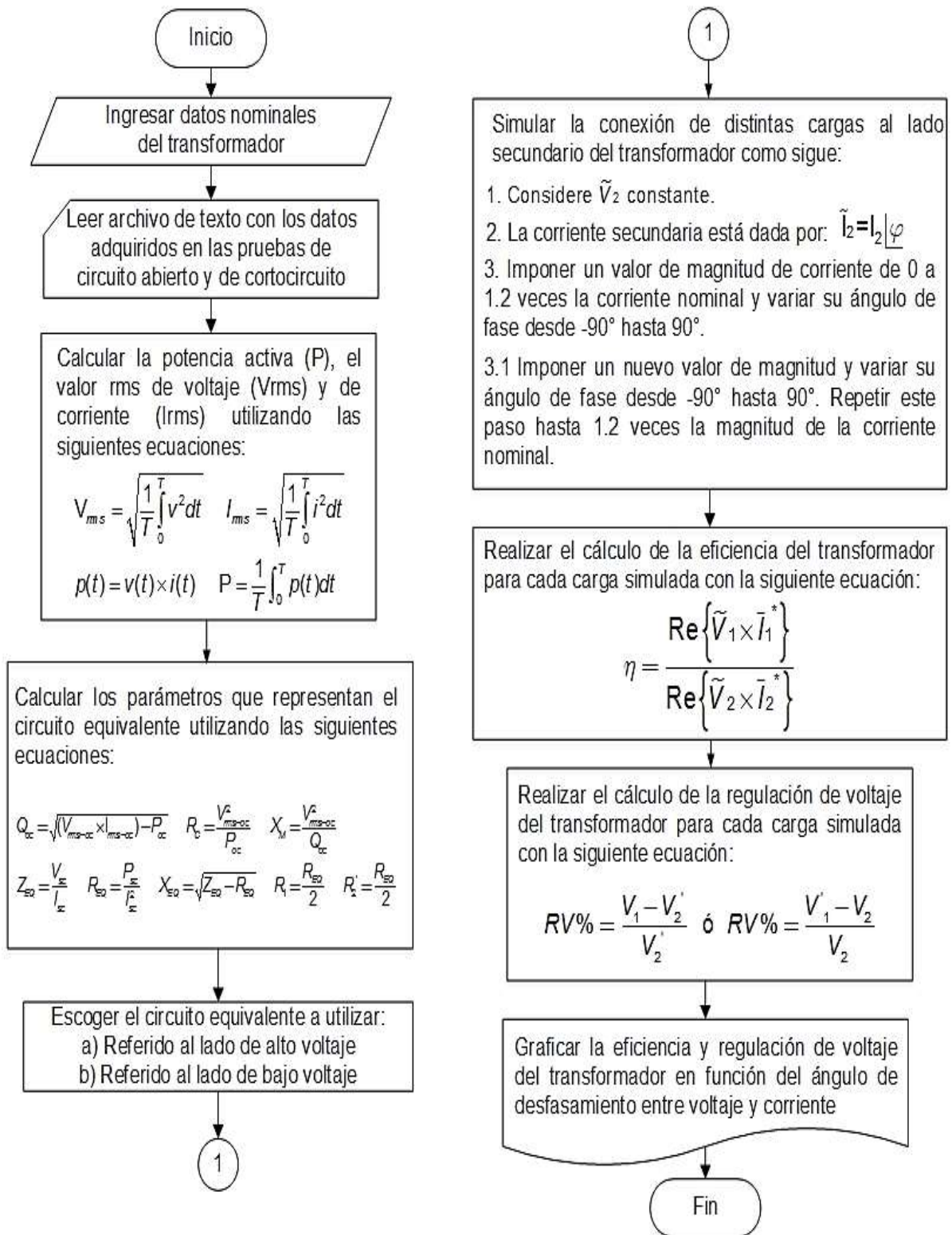


Fig. 2. Diagrama de flujo del programa computacional.

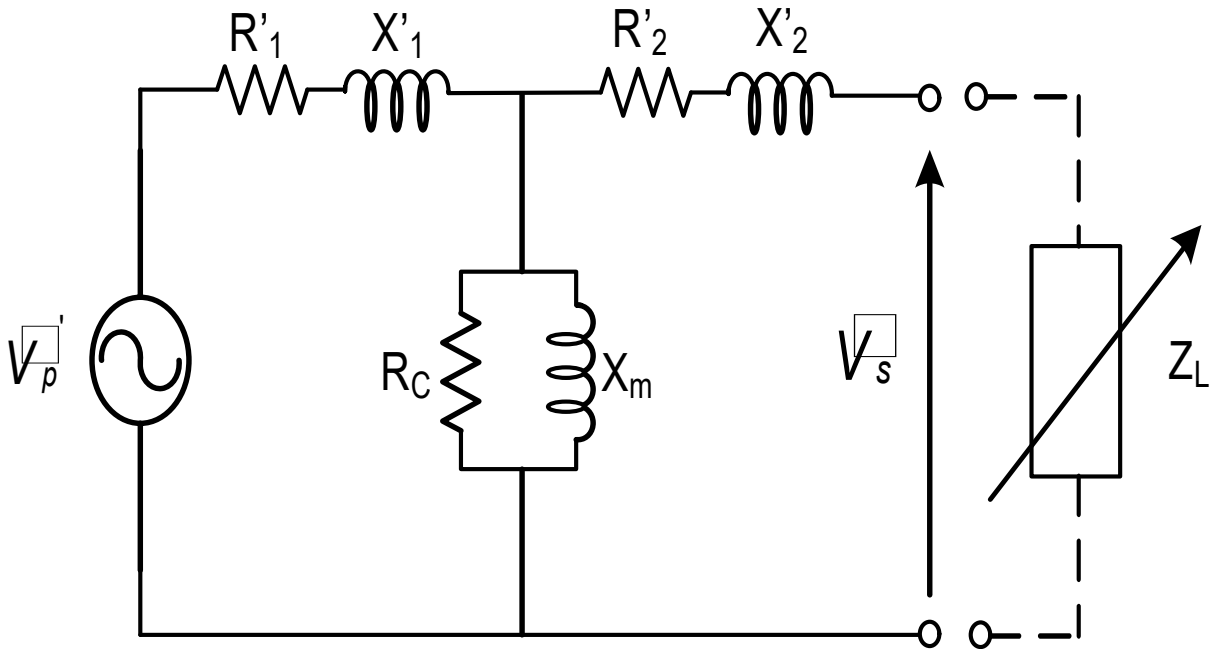


Fig. 3. Circuito equivalente del transformador referido al lado de bajo voltaje.

Las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito se realizaron como se muestra en los esquemas de conexión de la Fig. 4.

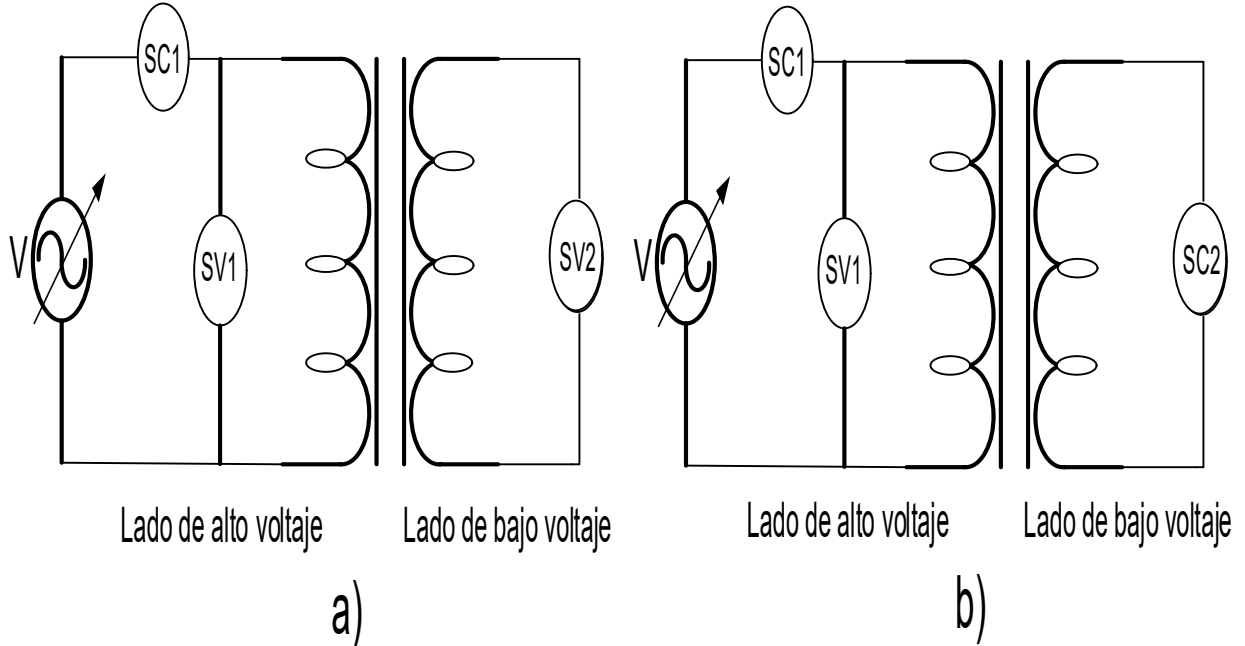


Fig. 4. Pruebas realizadas al transformador: a) circuito abierto, b) cortocircuito.

Las mediciones de voltaje y corriente del transformador para estas pruebas se realizaron con un Medidor de Variables Eléctricas (MVE) [10, 11]. Este dispositivo está diseñado para la adquisición de datos en tiempo real, realizando la conversión analógica-digital con una tarjeta PCI-622 de National Instruments®. En la Fig. 4 se muestra la ubicación de los sensores de voltaje (SV1 y SV2) y de corriente (SC1 y SC2) del MVE y en la Fig. 5 se muestra el arreglo realizado en el laboratorio para estas pruebas.

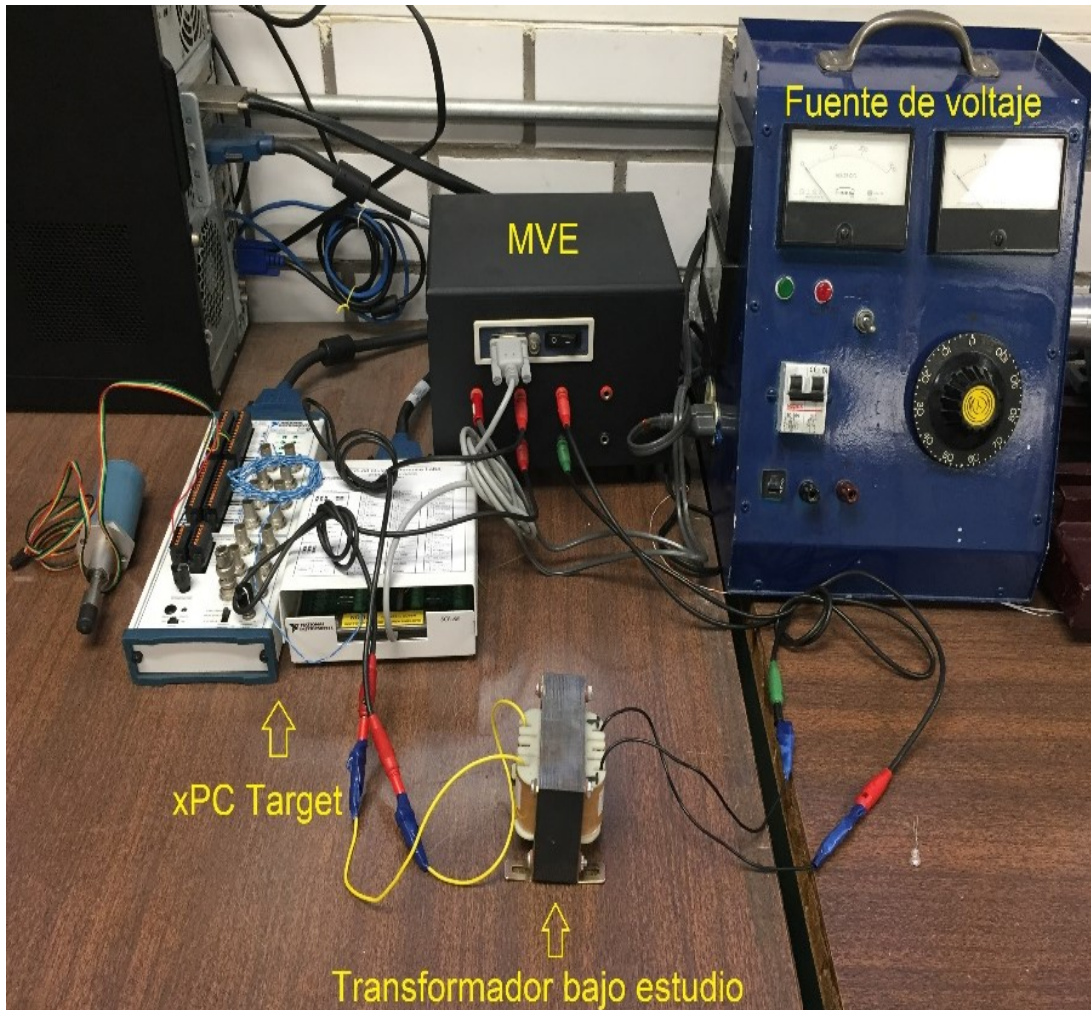


Fig. 5. Arreglo del laboratorio para las pruebas.

3. Resultados

A continuación se muestran las mediciones de las pruebas y los resultados del cálculo de los parámetros del circuito equivalente y del desempeño del transformador. En la Fig. 6 y 7 se muestran las mediciones de voltaje y corriente realizadas con el MVE en las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito. El período de tiempo que aparece en la parte inferior de las Figs. 6 y 7 es de 0.1s, que permite apreciar mejor los cambios que se presentan en ambas variables.

Los parámetros calculados del circuito equivalente mostrado en la Fig. 4 (ohms [Ω]) son los siguientes:

Resultados circuito abierto (referidos al lado de alto voltaje):

Resistencia de pérdidas en el núcleo (R_c): 1.4331e+03

Reactancia de magnetización (X_m): 1.0748e+03

Resultados cortocircuito:

Resistencia del devanado de alto voltaje (R_1): 8.2779

Resistencia del devanado de bajo voltaje (R_2): 0.3311

Reactancia de dispersión del devanado de alto voltaje (X_1): 5.1302

Reactancia de dispersión del devanado de bajo voltaje (X_2): 0.2052

Las resistencias y reactancias equivalentes del lado primario (R_1 , X_1) y del lado secundario (R_2 , X_2), se obtuvieron dividiendo en partes iguales las equivalentes referidas a un mismo lado (alto o bajo voltaje). Esto se hizo considerando el criterio de diseño óptimo, el cual señala que en transformadores de alta eficiencia, las pérdidas en el lado de alto voltaje son las mismas que en el lado de bajo voltaje [6].

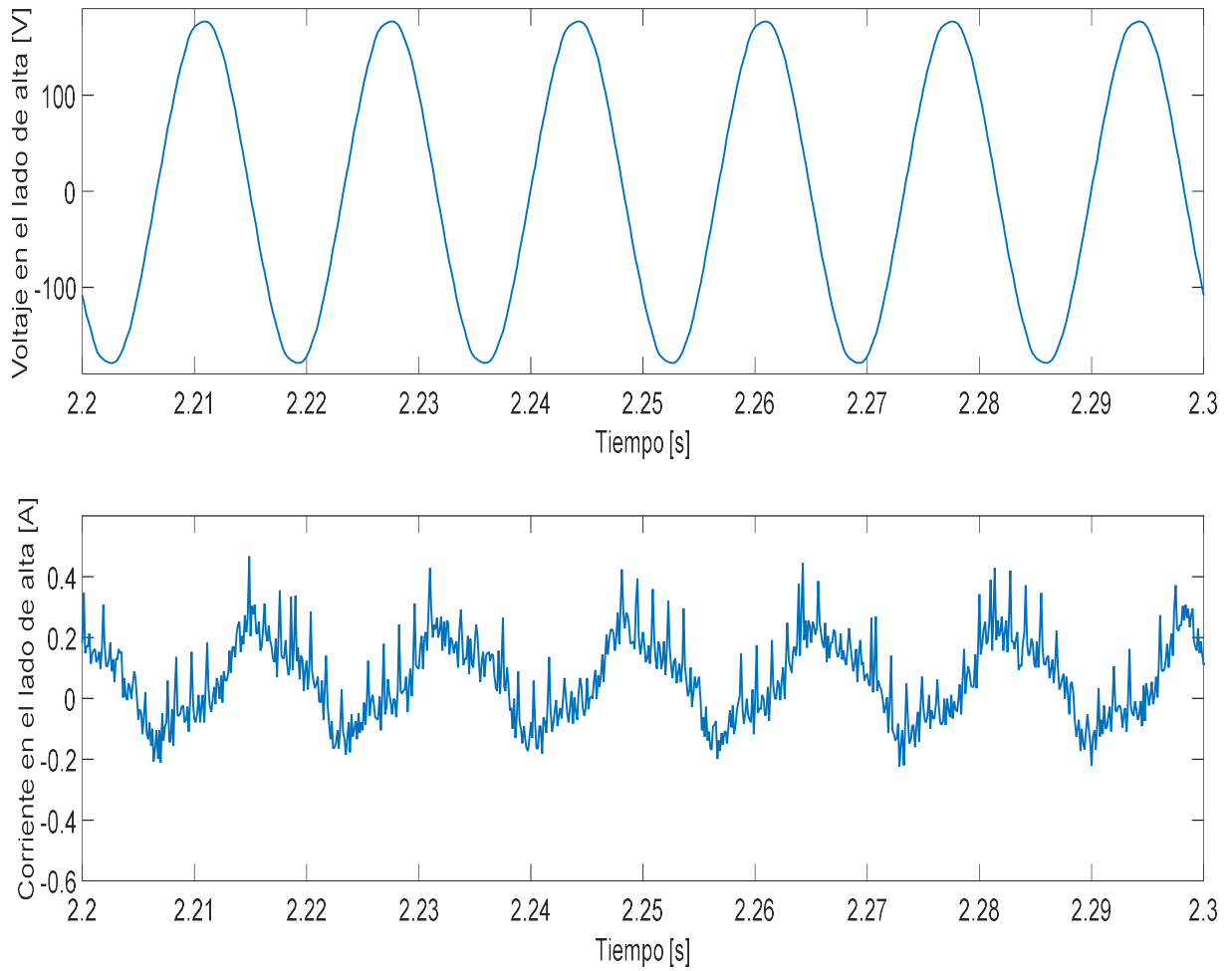


Fig. 6. Mediciones realizadas con el MVE en la prueba de circuito abierto.

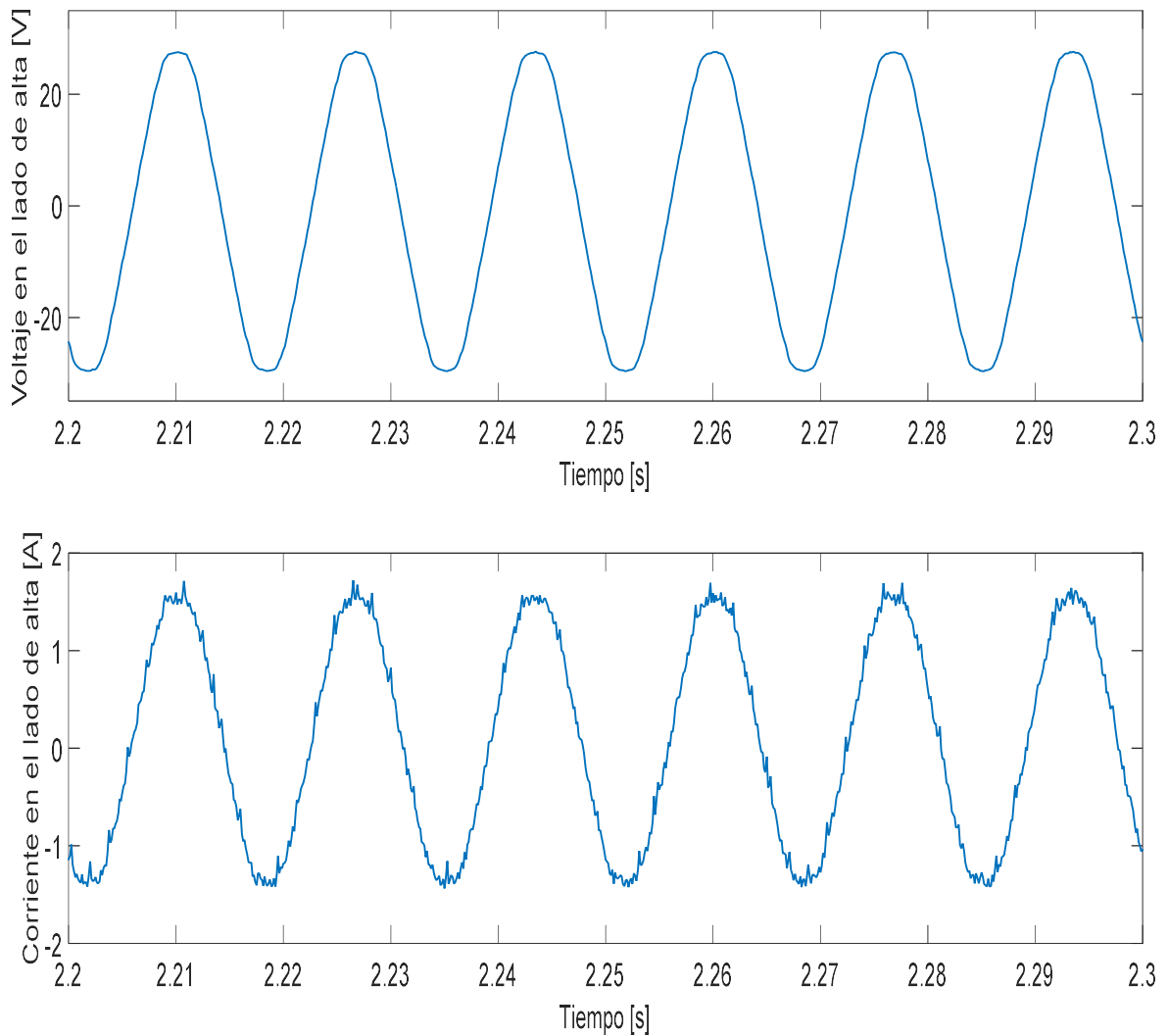


Fig. 7. Mediciones realizadas con el MVE en la prueba de cortocircuito.

Las gráficas de eficiencia y regulación de voltaje del transformador muestran la simulación que se realizó para 7 niveles de carga entre 0 y 120% de la carga nominal y para factores de potencia de 0 a 1 en adelante y en atraso. El factor de potencia está representado por el ángulo de desfase entre voltaje y corriente, por lo que en el eje horizontal de las Figs. 8 y 9, aparece la leyenda “Ángulo de desfase entre voltaje y corriente”.

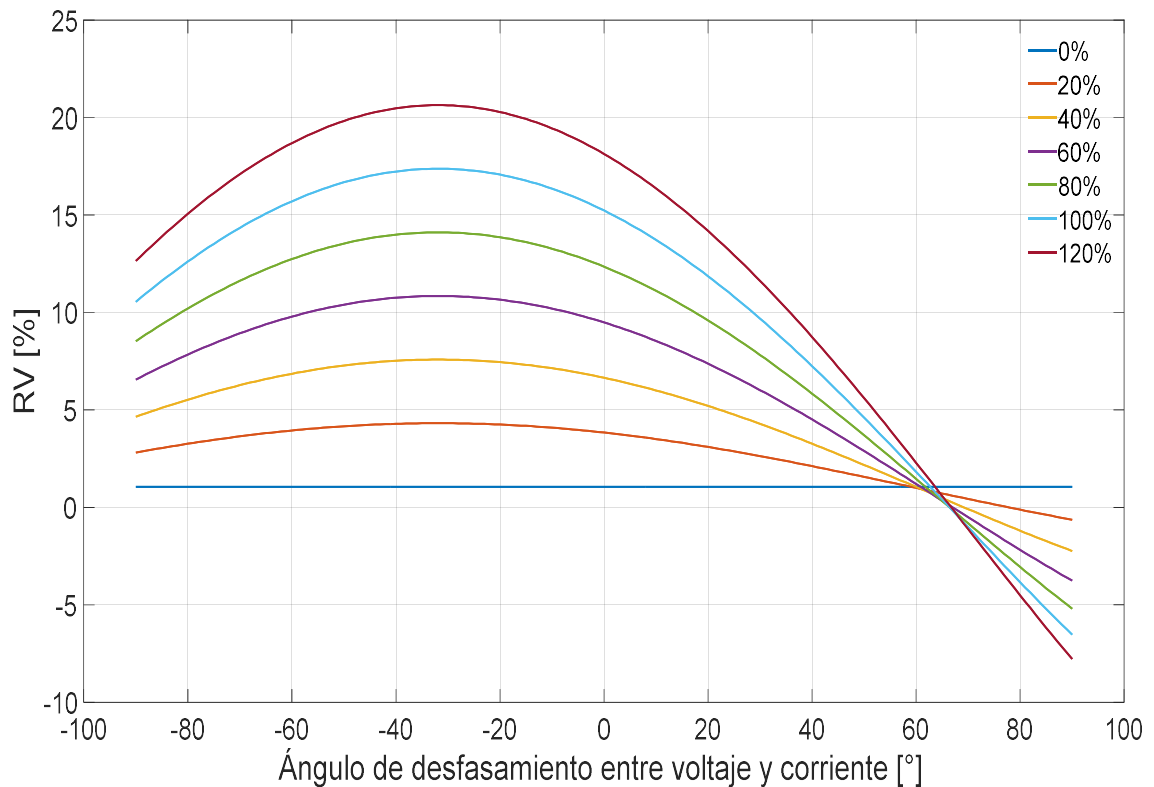


Fig. 8. Regulación de voltaje del transformador a diferente carga y factor de potencia.

4. Discusión

En la Fig. 8 se muestra la regulación de voltaje del transformador para diferentes valores de carga y distintos ángulos de desfase (factores de potencia). Se observa que la carga de 0% tiene la mejor regulación de voltaje, lo cual es previsible debido a que la única caída de tensión que existe es por la circulación de la corriente de excitación por R_1 y X_1 (devanado primario), el valor de la regulación corresponde a la caída de tensión en esa rama, que además permanece constante. Se puede observar que los incrementos del porcentaje de carga producen un mayor porcentaje de regulación de voltaje. Para todos los casos de carga, exceptuando el de 0%, el valor máximo de regulación de voltaje se alcanza aproximadamente para un ángulo de desfase de -30° (factor de potencia de 0.86 en atraso). En la Fig. 8 se puede observar que, después de un ángulo de desfase de aproximadamente 60° (factor de potencia de 0.5 en adelante), la regulación de voltaje empieza a hacerse negativa.

Esto significa que en las terminales del transformador, se tiene una magnitud de voltaje mayor a la magnitud de voltaje de la fuente.

Un transformador diseñado adecuadamente deberá tener como máximo una regulación de voltaje del 3% [9]. Para el transformador bajo estudio puede observarse que para valores de carga arriba del 20% del valor nominal, la regulación de voltaje es mayor al 3%, lo cual significa que no está bien diseñado.

Por su parte, la Fig. 9 muestra la eficiencia del transformador a diferentes cargas para diferentes factores de potencia. Se puede observar que la eficiencia se incrementa conforme se incrementa el factor de potencia de 0 a 1, alcanzando un valor máximo cuando se trabaja a un factor de potencia de 1. Se puede ver que para este caso la eficiencia no mejora significativamente al tener un factor de potencia en adelanto, incluso, poco después del factor de potencia de 1, la eficiencia empieza a disminuir. En la Fig. 9, se muestran 7 curvas de eficiencia. También se puede observar que para las curvas que están entre 60 y 120% de la carga nominal, el transformador tiene prácticamente la misma eficiencia.

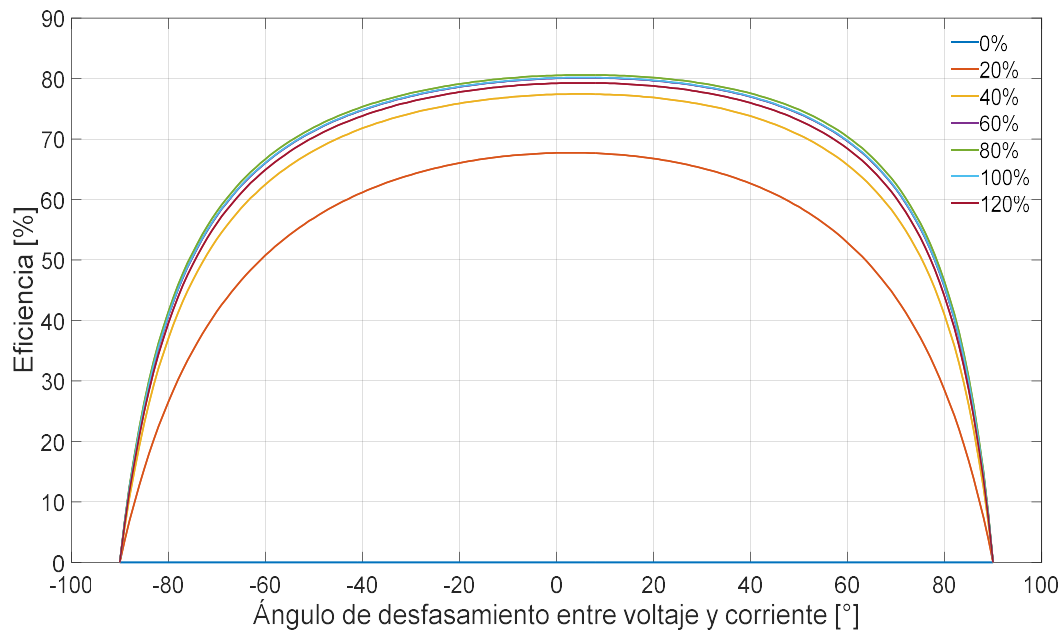


Fig. 9. Eficiencia del transformador a diferente carga y factor de potencia.

La eficiencia máxima del transformador analizado es del orden de 81% para un ángulo de desfasamiento de 0° (factor de potencia unitario). Esto nos permite afirmar que hay posibilidades de mejorar su desempeño. Los transformadores de potencia llegan a tener eficiencias cercanas al 98% [9] y aunque el transformador en estudio no es un transformador de potencia el análisis de su operación muestra potencial de mejoría. Por otra parte, el desempeño mostrado ante cambios de 60 a 120% de su carga nominal es bastante aceptable.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un programa interactivo y amigable elaborado en MATLAB® que simula y evalúa el desempeño de un transformador monofásico bajo diferentes condiciones de operación. Para lograr esto se calcularon los parámetros del circuito equivalente, se realizó el análisis del desempeño del transformador monofásico de 120 VA, 125/ 24 V y se obtuvieron las curvas de eficiencia y de regulación de voltaje, en las cuales se pudo observar que el transformador bajo estudio tiene un mejor desempeño cuando opera al 60% de su carga y a un factor de potencia de 1. También, para este transformador en particular, se observó que cuando opera en condiciones nominales no tiene su mejor desempeño. Esto puede obedecer a cuestiones de fabricación, ya que el transformador utilizado fue adquirido en un taller eléctrico donde los transformadores son fabricados para suministrar voltaje a elementos de control donde la eficiencia del transformador no es considerada un factor importante.

La obtención de los parámetros del circuito equivalente, la simulación y análisis del desempeño del transformador, se realizó de manera rápida y correcta, por lo que, el programa presentado resultó ser una buena herramienta para la predicción del comportamiento del transformador bajo estudio. El procedimiento propuesto es también válido para analizar la operación de transformadores de potencia.

6. Referencias

- [1] Martin J. Heathcote, J and P Transformer Book - A Practical Technology of the Power Transformer. 13° Edición. 2007. Elsevier. 969 pp.
- [2] Wang Xuelel, Li Qingmin, Li Chengrong, Yang Rui, Su Qi, "Reliability Assessment of the Fault Diagnosis Methodologies for Transformers and a New Diagnostic Scheme Based on Fault Info Integration". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 20. No. 6. Diciembre 2013. 2292-2298 pp.
- [3] N. Maheswara Rao, R. Narayanan, B. R. Vasudevamurthy, Swaraj Kumar Das, "Performance Requirements of Present-Day Distribution Transformers for Smart Grid". IEEE ISGT. Asia. No. 1569815481. 2013.
- [4] J. J. Grainger, W. D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia. 1999. McGraw-Hill. 740 pp.
- [5] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., S. D. Umans, Máquinas Eléctricas. 6° Edición. McGraw Hill. 698 pp.
- [6] Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu, Máquinas Eléctricas y Transformadores. 3° Edición. 2003. Oxford University Press. 699 pp.
- [7] Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas. 5° Edición. 2012. McGraw-Hill. 502 pp.
- [8] Jesús Fraile Mora, Máquinas Eléctricas. 5° Edición. 2003. McGraw-Hill. 734 pp.
- [9] Jimmie J. Cathey, Máquinas eléctricas: análisis y diseño con Matlab. 2002. McGraw-Hill/Interamericana. 530 pp.
- [10] Felipe de Jesús González Montañez, Víctor Manuel Jiménez Mondragón, Irvin López García, José Luis Hernández Ávila, "Memoria de diseño: medidor de variables eléctricas utilizando MATLAB y xPC Target". Agosto, 2013, México, D.F.

- [11] Isaac Izquierdo Ayala, Proyecto de integración: “Construcción de una plataforma experimental utilizando Matlab xPC-Target”. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México, D.F.

7. Autores

Hiram Alberto Canseco García (Ixtotec, Oaxaca). En 2011 obtuvo el grado de Técnico en Electricidad en el Centro de Bachillerato Tecnológico, Industrial y de Servicios No 91. Actualmente se encuentra estudiando el último trimestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como ayudante académico en el departamento de Energía. Está interesado en las máquinas eléctricas, las energías alternativas y en el uso de software computacional para optimizar procesos.

José Jiménez González (México, D.F.). Auxiliar de Investigación y estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

I. López García (Ixtaltepec, Oaxaca). Doctor en Ingeniería, con especialidad en control por la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por el **Instituto Politécnico Nacional (IPN)** e Ingeniero Electricista con especialidad en Máquinas Eléctricas por la **Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A)**. Se incorporó a la **Universidad Autónoma Metropolitana** en 2006, donde ha impartido diversas asignaturas a nivel licenciatura y asesorado distintos Proyectos de Integración. Cuenta con el reconocimiento de perfil *PRODEP* y es candidato al **Sistema Nacional de Investigadores (SNI)**. Sus áreas de interés en investigación son análisis, diseño y control de máquinas eléctricas aplicadas a fuentes alternativas en la generación de energía eléctrica.

E. Campero-Littlewood (México D.F.). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista otorgado por la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (con especialidad en máquinas eléctricas y sistemas de potencia), por el **Imperial College of Science and Technology**, de la Universidad de Londres, Inglaterra, en enero de 1977. Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) en enero de 1977, donde es Profesor Titular “C” de tiempo completo. Ha ocupado diversos cargos dentro de la institución de los cuales destacan Jefe de departamento de Energía en el periodo 1980-1984 y Director de División de Ciencias Básicas e Ingeniería en el periodo

2000-2004. Ha impulsado diversos programas de impacto en el ahorro de la energía eléctrica dentro de la misma universidad. Sus áreas de interés en investigación son análisis y diseño de máquinas eléctricas, el ahorro y aprovechamiento de la energía.

Juan C. Olivares Galván (Zamora, Michoacán). En 2003 obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV unidad Guadalajara. Es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) y actualmente se encuentra en periodo sabático en la Universidad de Alberta, Edmonton, Canadá.