

INTERFAZ GRÁFICA PARA LA SELECCIÓN ECONÓMICA DEL TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN ACEITE

GRAPHICAL INTERFACE FOR THE ECONOMIC SELECTION OF THE SUBMERGED TRANSFORMER IN OIL

Ing. Fernando A. Mendoza M.¹, Dr. Mariano D. Zerquera I.², Dr. Juan J. Sánchez J.³.

fernandomendo75@hotmail.com / m_zerquera@hotmail.com / cheosj@yahoo.com

Recibido: octubre 17, 2019 / Aceptado: diciembre 15, 2019 / Publicado: febrero 10, 2020

Resumen En los últimos años, se ha observado con mayor frecuencia fallas en los transformadores, ya que en muchas ocasiones el sistema de aislamiento ha presentado un alto índice de envejecimiento. Cuando un transformador llega a presentar fallas, los costos de reparación son costosos y el tiempo de remplazo en muchas ocasiones representa pérdidas económicas ya que la continuidad de la producción se ve afectada durante el remplazo del transformador. A partir de esto hoy en día representa un tema de gran interés para el sector industrial, el desarrollo de nuevas metodologías que permitan la selección del transformador con el fin de la optimización de los recursos materiales, así como en el consumo eléctrico procurando obtener un máximo ahorro de energía. Por lo que este trabajo tiene como finalidad la elaboración de un algoritmo orientado a la selección del transformador, el cual considere las mejores características tanto técnicas como económicas. Este algoritmo se presenta a través de una interfaz gráfica que ha sido desarrollada en la plataforma Guide de Matlab esta a su vez ha sido programada en el lenguaje propio de Matlab.

Palabras clave: Transformadores, Calentamiento térmico, Envejecimiento, Modelo de Vida, Programa de computadora, MATLAB.

Abstract. In recent years, transformer failures have been observed more frequently, because in many cases the insulation system has a high rate of aging. From this events, today it is of great interest for the industrial sector in general the development of new methodologies that allow the optimization of material resources, as well as in electricity consumption, trying to obtain maximum energy savings. When a transformer fails, the repair costs are expensive and the replacement time often represents economic losses since the continuity of production is affected during the replacement. Therefore, this work has as its purpose the elaboration of an algorithm oriented to the selection of the transformer, which considers the best technical and economic characteristics. This algorithm is presented through a graphical interface that has been developed in the Matlab Guide platform, which in turn has been programmed in Matlab's own language.

Key Words: Transformers, Ageing, Life Model, Computer Program, MATLAB.

1. Introducción

Actualmente los transformadores se encuentran presentes en todas partes, desde los sistemas de potencia, las grandes industrias y en los hogares. Para el sector industrial uno de los problemas siempre presente es la optimización de los recursos materiales y el consumo eléctrico a fin de conseguir siempre un máximo ahorro de energía. A pesar de su alto rendimiento, los transformadores están expuestos a esfuerzos mecánicos, fuerzas electromagnéticas, pérdidas de energía y fuerzas térmicas (elevaciones de temperaturas) este último presentando un impacto importante en la vida útil del aislamiento [1].

Por lo que la selección del transformador no es tan trivial como parece, debido a que el funcionamiento económico de uno o varios transformadores debe ser analizado con detalle, ya que la vida económica del transformador generalmente se relaciona con los costos de inversión, operación y mantenimiento del transformador, por lo que es de gran interés lograr un punto de equilibrio tanto en la confiabilidad del equipo como en el ahorro económico durante su vida útil del mismo.

En la literatura especializada, han sido presentadas diversas metodologías para esta contrariedad. En [2] se enfocan en el desarrollo de un algoritmo para estimar el tiempo de vida de los aislamientos del transformador

llamado DAT, el cual se basa en los criterios de cálculo propuestos en las normas IEEE C57.91-1995 y la IRAM 2473 (equivalente a la ICE354-1991), a partir de este algoritmo desarrollan una interfaz para el usuario.

Los autores en [3] hacen mención de dos técnicas para el modelo térmico del transformador las cuales pueden ser clasificadas como el Modelo de analogía eléctrico-térmica y el modelo sinusoidal a pequeña escala, a partir del modelo eléctrico-térmico los autores desarrollan un algoritmo que presenta como resultado el cálculo de las distintas temperaturas, así mismo el grado de degradación del aislamiento por sobrecargas.

Los autores en [4] presentan una metodología de selección de transformadores de distribución basados en criterios técnicos-económicos, comparando los métodos tradicionales los cuales son derivados de los lineamientos a la norma NTC 2050 (Criterios técnicos).

En [5], [6], [7] se desarrollan algoritmos basados en los procesos metaheurísticos como la optimización basada en Colonia de Hormigas, este es un método que se puede aplicar para resolver una variedad de problemas conocidos de optimización combinatoria, consideran la evaluación de los costos de pérdidas y pronósticos de incremento de demanda para la elaboración de un algoritmo para la selección del tamaño del transformador en los sistemas de distribución, a fin de satisfacer la demanda año con año.

1.2 Objetivo de la investigación

El principal objetivo de esta investigación es desarrollar una interfaz gráfica que permita la selección más económica del transformador ONAN, a partir de un algoritmo que realice la evaluación de los factores térmicos y económicos, permitiendo minimizar los costos totales para el sector industrial.

2. Metodología

La metodología propuesta permite evaluar técnicamente y económicamente varios transformadores, con el fin de seleccionar el transformador que presente una relación más económica entre sus pérdidas de energía, los costos de operación e inversión y a su vez pueda satisfacer la demanda.

2.1 Modelos de relación de vida y ecuaciones de temperatura.

2.1.1 Modelos de Desgaste

Los Modelos de Arrhenius-Dakin y el de Montsinger son los más utilizados para evaluar la relación de la temperatura con respecto a la vida útil del aislamiento del transformador [8], [1]. Sin embargo, es común que el desgaste tenga dependencia temporal, debido a que la temperatura máxima en devanados tiende a variar, por lo que se utiliza un factor de desgaste equivalente $D_{equ}(SL)$ mediante integración [9].

$$D_{equ}(SL) = \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^T 2^{\frac{\theta(t,SL) - \theta_n}{6}} dt, \quad (1)$$

donde T es la duración del escalón de carga en horas, T_{ciclo} la duración del ciclo completo de carga en horas, $\theta(t, SL)$ la temperatura máxima en el devanado con dependencia temporal y θ_n la temperatura nominal.

A partir del factor de desgaste (D) y la vida nominal del aislamiento (V_n) que por lo generales es 22.5 años, es posible calcular la vida útil del transformador como:

$$V = \left(\frac{V_n}{D_{equ}(SL)} \right) \quad (2)$$

2.1.2 Ecuaciones para el cálculo del punto más caliente.

Las principales ecuaciones que modelan la temperatura de punto más caliente y los factores de aceleración de envejecimiento térmico se presentan en la norma IEEE Std. C57.91-1995 [10], todas las temperaturas se expresan en °C. La expresión siguiente representa la temperatura del punto más caliente y se asume que consiste de tres componentes:

$$\theta = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H, \quad (3)$$

donde θ_A es la temperatura ambiente, $\Delta\theta_{TO}$ el gradiente de la temperatura transitoria en los puntos más calientes y $\Delta\theta_H$ es el aumento final de temperatura del conductor sobre la parte superior del aceite.

Para el cálculo del gradiente de la temperatura transitoria $\Delta\theta_{TO}$ en un cambio de carga queda definido por:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} - \Delta\theta_{TO,i}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right] + \Delta\theta_{TO,i}, \quad (4)$$

donde $\Delta\theta_{TO,u}$ y $\Delta\theta_{TO,i}$ representan la temperatura inicial y final alcanzada por el aceite en la parte superior con respecto al ambiente durante un periodo de tiempo considerado, t es el tiempo que dura la carga en horas, τ_0 es la constante de calentamiento del aceite en horas para cualquier carga L.

La elevación de temperatura final $\Delta\theta_{TO,u}$ en la parte superior del aceite para una carga L está dada por:

$$\Delta\theta_{TO,u} = \Delta\theta_{TO,R} \left[\frac{(K^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n, \quad (5)$$

donde $\Delta\theta_{TO,R}$ indica el incremento de temperatura en la parte superior del aceite sobre la temperatura ambiente a carga nominal en °C, el factor de carga (K) es la relación que existe entre la potencia aparente del transformador y la carga, y R indica la relación de pérdida de carga con carga nominal a pérdida sin carga. En la guía de carga del IEEE n es igual a 0.8 para transformadores con convención natural y 0.9 a 1 para enfriamiento de aire forzado.

El aumento final de temperatura del conductor sobre la parte superior del aceite para una carga L está dado por

$$\Delta\theta_{H,U} = \Delta\theta_{H,R} K_U^{2m}, \quad (6)$$

donde $\Delta\theta_{H,R}$ es la elevación promedio de la temperatura del punto más caliente del devanado sobre la temperatura superior del aceite a carga nominal. La guía sugiere un valor aproximado de 15° C para 65° C de elevación de temperatura, m es la exponente de potencia de pérdida en los boninas para transformadores con convención natural (ONAN) se establece en 0.8.

2.2 Pérdidas en los transformadores

Las pérdidas eléctricas y magnéticas, son un factor importante debido a que estas influyen sobre dos magnitudes importantes como: el rendimiento y el calentamiento de una maquina eléctrica. El calentamiento representa energía disipada en forma de calor, por ende, estas representan un costo por pérdidas de energía y este costo se puede expresar como:

$$C_{PT} = (P_{mag} + P_{eleN}(K)^2) * T * C_{kWh} , \quad (7)$$

donde P_{mag} representan las pérdidas de energía en vacío o de núcleo son proporcionadas por el fabricante o por la prueba de circuito abierto expresadas en kW , donde P_{eleN} representan las pérdidas eléctricas por efecto joule proporcionadas por el fabricante o por la prueba de cortocircuito expresadas en kW , el factor de carga (K) es la relación que existe entre la potencia aparente del transformador y la carga, T es el tiempo en horas que el transformador permanece conectado durante el año y (C_{kWh}) representa el precio del kilowatt-h en el año de estudio.

2.3 Depreciación o amortización de un activo.

Este cálculo permite conocer como el valor de los bienes uno de los métodos más utilizados es el de la línea recta el cual se puede expresar de la siguiente forma: [11] [12].

$$D_A = \frac{C_i - S}{V} , \quad (8)$$

donde C_i es el costo inicial del activo, S es el salvamento el cual es el posible valor del activo al final de su vida útil, V es el número de años estimados de vida útil.

2.4 Ecuación final de costos.

La ecuación de costo final será la que se presenta a continuación, la cual será igual a la suma de los puntos antes mencionados.

$$C_{total} = \frac{C_i - S}{V_n} D_{equ}(SL) + \left(P_{mag} + P_{eleN} \left(\frac{kVA}{kVAn} \right)^2 \right) * T * C_{kWh} + C_{Mant} \quad (9)$$

En esta ecuación se considera que el valor inicial C_i está conformado por los costos de compra e instalación del transformador, además se considera que el valor del activo al final de su vida útil S es cero, por último se considera que el costo de mantenimiento es un porcentaje de entre 5 y 10 por ciento del costo de inversión. Por lo consiguiente, lo que se plantea en este trabajo es considerar los costos de pérdidas de energía, vida y mantenimiento, la utilización de la regla de amortización para determinar el costo anual que representa la selección de transformador, la selección de transformadores en paralelo, el tiempo de ciclo de trabajo variable y mayor a 24 horas.

2.5 Desarrollo de la interfaz gráfica.

En esta sección, se desarrolló una interfaz gráfica en el ambiente GUIDE que ofrece MATLAB incorporando los puntos antes mencionados. El diseño principal de la interfaz se muestra en la Figura 1 la cual se integra por 3 áreas: datos requeridos, resultados numéricos y gráficos.

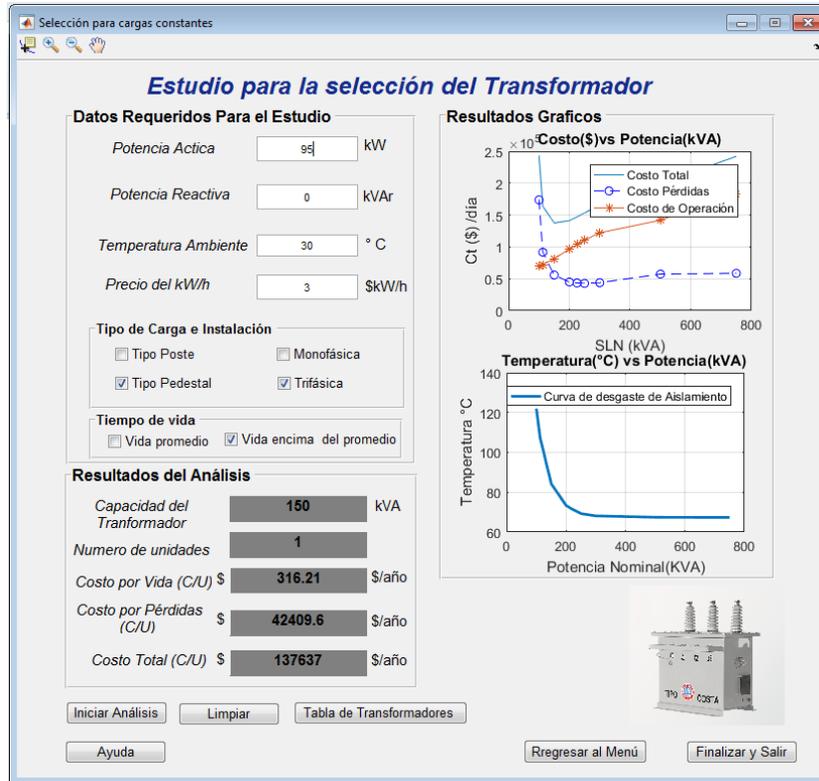
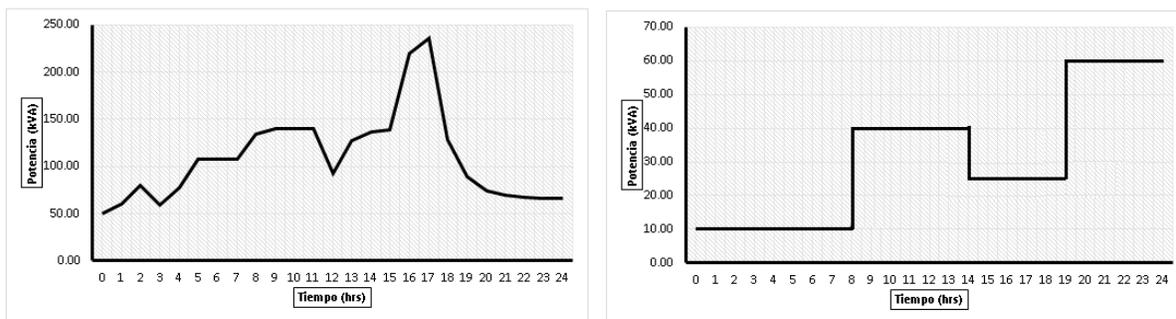


Figura 1. Diseño de la ventana de análisis para la selección del transformador.

Es común observar que los transformadores industriales operan bajo perfiles de carga variables, estos perfiles de carga se obtienen de la información del ciclo de operación del sector que alimenta el transformador. Por lo general las lecturas de las cargas son de dos tipos: continuo y escalonado [13], estas mismas pueden ser observadas en la Figura 2.



(a) Continuo

(b) Escalonado

Figura 2. (a) Perfil de carga Continuo y (b) Perfil de carga Continuo.

Considerando lo anterior se ha diseñado una ventana como la que se muestra en la Figura 3 con el fin de poder capturar los perfiles de carga, además se ha considerado poder introducir estos perfiles de carga por sectores de producción (ramales).

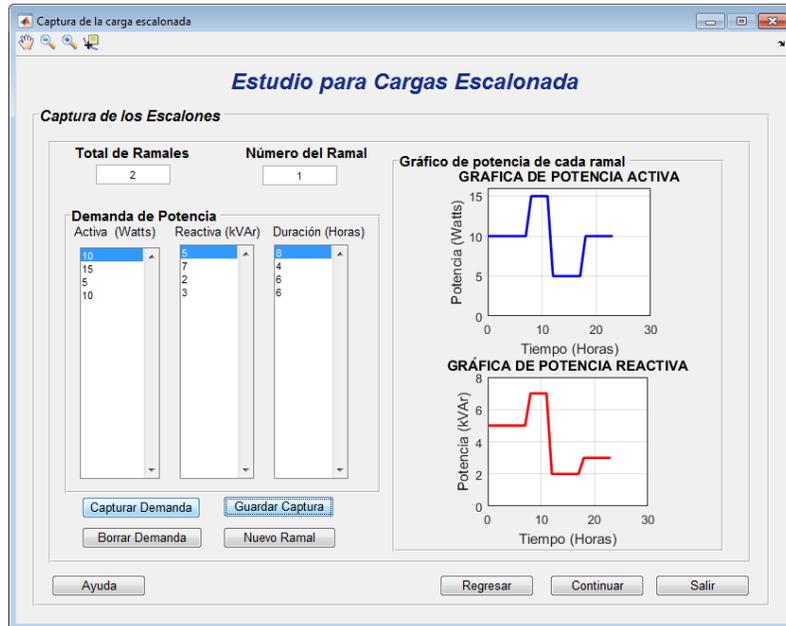
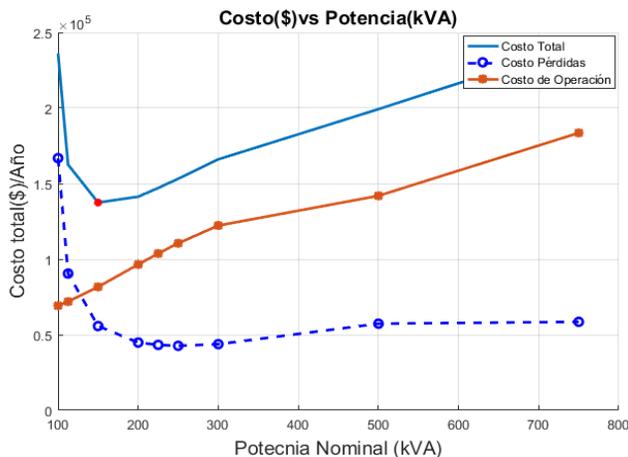


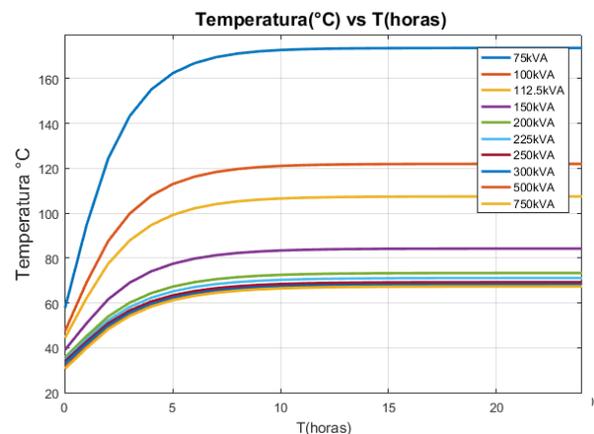
Figura 3. Diseño de la ventana para captura cargas escalonadas.

3. Resultados y Discusiones

Para la evaluación del desempeño y resultados del método propuesto se considera el caso de un solo escalón con un ciclo de carga de 95kW y 0 kVAr, la temperatura ambiente promedio de 30° C, costo del de \$3.00 kW/h, tipo de instalación pedestal trifásico y un tiempo de vida mayor a promedio.



(a)



(b)

Figura 4. (a) Representa la curva de los costos por transformador y (b) Temperaturas alcanzadas por los transformadores.

En la Figura 4-a se observa el comportamiento de los costos, al emplear diferentes potencias nominales de los transformadores, para alimentar la carga de 95 kW. En este caso se selecciona un transformador de 150 kVA el cual resulta el más económico. En la figura 4-b se presentan las curvas de temperatura alcanzadas por las diferentes potencias se observa que el transformador de 150 kVA se mantiene por debajo de los 110 °C.

A diferencia del caso presentado anteriormente, ahora se tomará en cuenta que el transformador se encuentra alimentando una carga escalonada (tres escalones) por lo que se asume el perfil de carga de la Fig. 5.

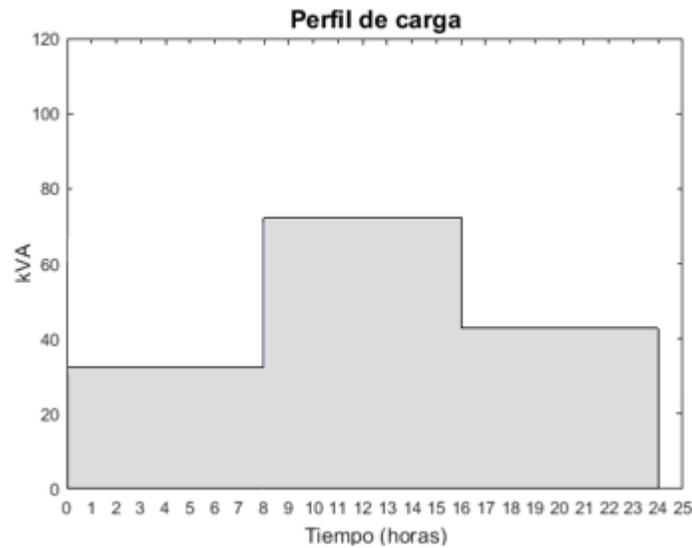


Figura 5. Perfil de carga de 3 escalones para un ciclo de trabajo de 24 horas.

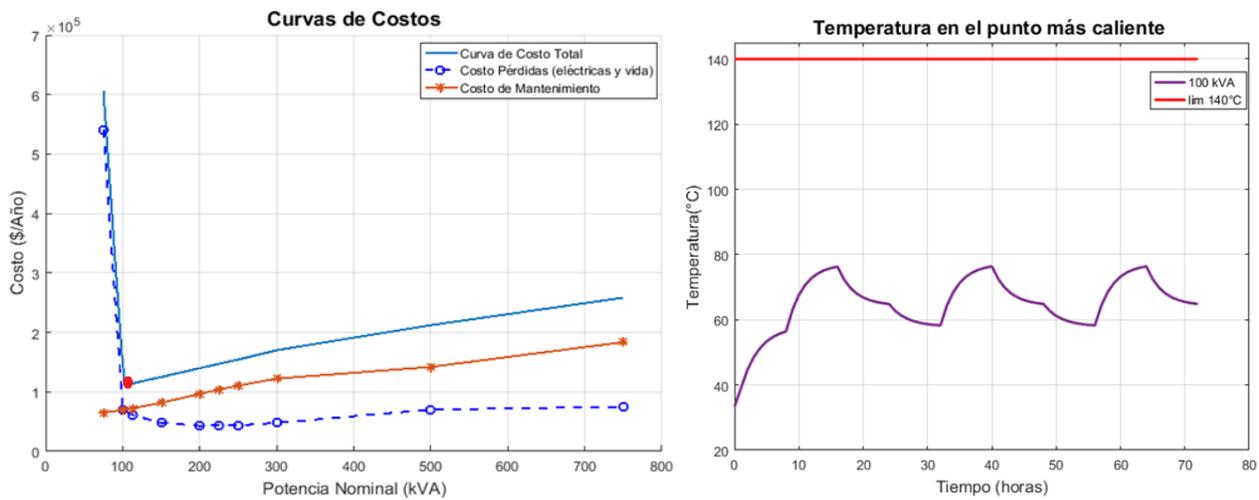


Figura 6. (a) Representa la curva de los costos por transformador y (b) Temperaturas alcanzada por el transformador.

En la figura 6-(a) Se presenta el resultado de las evaluaciones para diferentes potencias de transformadores además es posible observar el punto mínimo de selección óptimo de la interfaz gráfica donde el algoritmo ha seleccionado un transformador de 100 kVA, que representaría el transformador con un costo mínimo comparado con los demás. En la figura 6-(b) se presentan las curvas de temperatura donde se observan los incrementos y decrementos de esta por los efectos de la variación de carga. Esta última para fines más ilustrativos se graficó para 3 ciclos de 24 horas (72 horas).

4. Conclusiones

Cuando se selecciona un transformador con una potencia por debajo de la demanda la temperatura incrementa, así mismo el factor de desgaste tiende a incrementar. Al presentarse un alto factor de desgaste los costos económicos y la probabilidad de fallas en los aislamientos son elevados.

La depreciación de los equipos permite tener un mejor panorama del flujo del capital en función de la vida útil.

Con una apropiada selección es posible la reducción de los costos de energía.

El uso de una interfaz gráfica, además de facilitar el cálculo de la selección del costo mínimo del transformador, también facilita el procedimiento para el ingreso de información y la visualización de los resultados, esta interfaz tiene la finalidad de seleccionar la mejor opción de transformador considerando el costo mínimo y que este mismo pueda alimentar la carga establecida dentro de los sistemas industriales.

El comportamiento de los perfiles de carga influye en la temperatura y a su vez al factor de desgaste de estos.

5. Referencias

- [1] W. Flores, E. Mombello, R. .. G y J. A. Jardini, «Vida del transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura,» *IEEE Latin American Transactions*, vol. 5, n° 1, pp. 50-54, 2007.
- [2] U. Manassero, T. J. L., F. J. P. y S. I. B, «Desarrollo de un Algoritmo de Cálculo de Envejecimiento de la Aislación Eléctrica de Transformadores de Potencia,» de *IV Argentina Symposium on Industrial Informatics (SII)-JAllo44*, Argentina , 2015.
- [3] S. Acharya y P. C. Tapre, «Life assessment of transformer using thermal models 978-1-5386-1887-5,» de *Conferencia Internacional de Energía, Comunicación, Análisis de Datos y Soft Computing 2017 (ICECDS)*, Chennai, India, 2017.
- [4] F. García Gómez y D. R. E. Navas, «Enfoque técnico-económico para el dimensionamiento de transformadores de distribución,» *Ingeniería Y Desarrollo*, vol. 34, n° 2, p. s/n, 2016.

- [5] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis y K. A. G., «Ant colony solution to optimal transformer sizing problem,» de *9ª Conferencia internacional sobre calidad y utilización de la energía eléctrica*; ISBN: 978-84-690-9441-9, Barcelona, España, 2007.
- [6] M. Tsil y A. E.I, Ant Colony to the Optimal Transformer Sizing and Eficiency Problem in Power System, S/C: Nova Science Publishers. Inc , ISBN 978-1-61122-023-0, 2010.
- [7] O. Folorunso, P. A. Oriafio, N. S. Idiagi y E. A. Ogujor, «Application of Ant Colony Optimisation in Distribution Transformer Sizing,» *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, vol. 36, nº 4, pp. 1233-1238, 2017.
- [8] N. K., R. G. y D. V., «Thermal Aging of Distribution Transformers According to IEEE and IEC Standards,» de *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 2007.
- [9] M. Gomez Daniel, Operación economica de transformadores considerando envejecimiento., Universidad de Guadalajara, 2018.
- [10] IEEE Std C57.91-1995, «"Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers", ISBN 1-55937-569-8,» Junio 1995.
- [11] G. Ismael, L. Leovigildo y R. Elbar, Fundamentos, principios e introduccion a la contabilidad; ISBN 978.958-701-769-4, Colombia: S/E, S/A.
- [12] J. Omeñaca Garcia, Amortización del inmovilizado y de las inversiones inmobiliarias, Barcelona: Duesto, 2010.
- [13] Z. I. Mariano y B. L. J.A.J.S, «Características de las cargas eléctricas,» de *Memorias de la Decimosexta Reunion de Verano de Potencia de la IEEE*, Acapulco Guerrero, México, S/A.