



TENDENCIAS EN LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES

Ángel G. Estrada Chablé¹, Juan C. Olivares Galván², Eduardo Campero Littlewood²,
Salvador Magdaleno Adame³, Irvin López García², Rafael Escarela Pérez²

¹ Comisión Federal de Electricidad, Av. Prolongación Aarón Merino Fernández S/N, esquina Tabí, Colonia Kilometro 5, 77082, Chetumal, Quintana Roo, México, Tel. (+52) (983) 8351140, (+52) (983) 8351131.

² Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco, 02200, México, D.F., Tel. (+52) (55) 5318-9584, México, D.F.

³ Desempleado, Cipress No. 88, Col. Las Arboledas, 59386, La Piedad, Michoacán, México, Tel. (+52) (352) 5262164.

RESUMEN. En este artículo se presenta una revisión de metodologías de diseño de transformadores que se han publicado en los últimos 50 años, y a partir de ésta se establecen la situación actual y las tendencias que se perfilan para la investigación futura. Se entiende por métodos de diseño de transformadores aquellos que proporcionan la información necesaria para su fabricación a partir de los datos de entrada (capacidad, frecuencia, nivel de voltaje y tipo de conexión de los devanados de alta y baja tensión y número de fases, etc). El objetivo de este artículo, además de estimular la investigación en el tema, es realizar un análisis de la evolución de los métodos de diseño de transformadores, desde aquellos diseños donde los cálculos se realizaban manualmente, hasta aquellos diseños donde se involucra un modelo matemático que es procesado en computadora. El abundante número de publicaciones en la optimización del diseño de transformadores revela que es un tema de investigación importante. Este trabajo ha sido realizado tomando como referencia 49 publicaciones.

Palabras Claves- Algoritmos genéticos, Diseño de transformadores, Inteligencia Artificial, Método de horneado simulado, Método de Monte Carlo.

ABSTRACT. This paper presents a revision on research related with transformer design methodologies published in the past 50 years, and analyses the current situation and future research tendencies. By transformer design methods are those that provide the information necessary for their manufacture taking into account the input data (transformer rating, frequency, voltage level, type of connection of the high and low voltage windings, number of phases, etc). The objective of this paper is to stimulate research in this area and to analyze the evolution of transformer design methods, from those that were manually performed to those using mathematical models and computers. This study shows that optimization is the most important subject for research in this field. This work has been done based on 49 publications.

Key Words— Artificial Intelligence, Genetic Algorithms, Monte Carlo Method, Simulated Annealing Method, Transformer Design.

I. INTRODUCCIÓN

El diseñar transformadores es resultado de un proceso empírico y cuyas características hacen que se reconozca como un arte. El diseño de transformadores involucra cumplir con las especificaciones del cliente, dentro de un marco de restricciones técnicas impuestas por las normas, los procesos de manufactura, las características y los costos de los materiales y costos de operación. Los procedimientos clásicos empiezan con

el diseño del circuito magnético, luego del circuito eléctrico y por último del diseño mecánico. En este artículo se analizan 49 referencias de las cuales 75% son publicaciones en revistas y el resto son libros, memorias en conferencias y páginas de internet. En la presentación de estas referencias se les caracteriza por su antigüedad, por su uso en la formación de recursos humanos, por su impacto en la optimización y por el tipo de método: a) Manuales, b) Monte Carlo, c)

Algoritmos genéticos, d) Programación geométrica, e) Inteligencia artificial, f) Horneado simulado y se hacen señalamientos en relación con las ventajas y desventajas de cada método.

El primer método de diseño de transformadores por computadora fue implementado en 1953 [1]. En [2]-[6] se reportan más investigaciones sobre diseño de transformadores que utilizan computadora. Muchos procedimientos de diseño para transformadores de baja y alta frecuencia aparecieron en la literatura después de 1970 [7]-[8].

En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un método de diseño para transformadores de distribución monofásicos tipo acorazado, donde la solución obtenida es la óptima global. La metodología de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** requiere sólo seis datos: capacidad del transformador, voltaje en alta y baja tensión, tipo de conexión de la bobina de baja y de la de alta y la frecuencia.

Rubaai [10] describe un software de diseño de transformadores monofásicos de núcleo tipo acorazado, utilizado para la enseñanza del diseño en la universidad. La optimización del diseño se logra mediante un análisis de sensibilidad, el resultado del software especifica solamente la parte activa del transformador. El software tiene 21 entradas, en donde las variables independientes se eligen por los usuarios. Jewel [11] realizó una propuesta funcional a sus alumnos de ingeniería eléctrica, en donde ellos tendrían que diseñar, construir, modelar y analizar un transformador de 10VA con núcleo de hierro de forma toroidal. En [12] Grady presenta el diseño de transformadores trifásicos y monofásicos tipo seco en computadora basado en prueba y error. El programa es aplicable tanto en el salón de clases como en la industria, y es funcional para transformadores monofásicos en el rango de 1 a 1000kVA, de tipo acorazados, y trifásicos de tipo núcleo, ambos a frecuencias de 20 a 500Hz.

La referencia [13] presenta una relación entre peso y volumen con la frecuencia, en transformadores de alta frecuencia. Poloujadoff y Findlay [14] estudian la variación en el precio del transformador, como función del número de vueltas del devanado primario, la cual es aproximadamente una función hiperbólica. Los autores presentan curvas del costo del transformador contra la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente.

Andersen [15] presenta una rutina de optimización llamada Monica basada en el método de Monte Carlo. J.G. Breslin [16] plantea un sistema en una página web donde los usuarios pueden crear nuevos diseños y colaborar en diseños previos.

En [17] se propone la técnica de horneado simulado para obtener el diseño óptimo de un transformador de potencia trifásico. Otros investigadores consideraron el

uso de la técnica del algoritmo genético en el diseño de transformadores [18]-[19]. Singh y Saxena, presentaron un diseño optimizado de un transformador de distribución, utilizando aluminio como material conductor [20]. La optimización se logró mediante el método de Rosenbrock de búsqueda directa junto con la técnica libre secuencial de minimización.

Rabih [21] muestra que el problema de optimización de diseño se puede formular mediante el formato de programación geométrica. Este método garantiza que la solución obtenida es el óptimo global. C. Hernández et al. [22] presentan un asistente inteligente de diseño de transformadores de distribución por computadora, consistente en un sistema basado en el conocimiento teórico y práctico. Ellos validaron su asistente inteligente, diseñando un transformador de distribución de 1500kVA, 13.2/0.22kV.

En [23] Kowalski y Pylak describen el diseño óptimo de un transformador inmerso en aceite, tipo núcleo. El problema de optimización se redujo a buscar el mínimo de la modificación de las funciones de escala, en un espacio de seis dimensiones delimitado por 18 o 19 operaciones, y las desigualdades en las restricciones de diseño, basadas en la teoría de Kuhlman [24]. En [25] se presentan y se evalúan diversos aspectos técnicos y económicos, que se suscitan al utilizar metales amorfos como material para núcleos de transformadores de potencia.

Diversas compañías han implementado software de diseño de transformadores:

- **MBG Ingenieros.** Ofrece software para diseño de transformadores trifásicos y monofásicos TRAMOT [26].
- **RALE engineering.** Vende software de diseño de transformadores de potencia e inductores [27].
- **Optimized Program Service, Inc.** Compañía de Estados Unidos que ofrece el software TOPT: programa de optimización no lineal y el software TRANS, programa completo de diseño utilizado para diseñar una amplia gama de transformadores. Los resultados de TOPT se pueden importar a TRANS para producir un diseño práctico [28].
- **Softbit Technologies Pvt. Ltd.** Compañía de la India que ofrece software para diseño de transformadores tipo seco o inmerso en aceite. Rangos de diseño: 50/60Hz, 5kVA a 100MVA, 132/66/33/11/6.6/3.3/0.433/0.250kV [29].
- **PExprt™.** Programa de diseño para transformadores e inductores (www.ansoft.com).
- **IVD_DISK.** Programa de diseño para transformadores, Optimization LTD.
- **Tra1.** Diseño y análisis de transformadores tipo columna. Desarrollado por O.W. Andersen.

II. MÉTODOS DE DISEÑO ANTES DEL USO DE LA COMPUTADORA

Debido a que los métodos manuales de cálculo son logrados mediante prueba y error, los ingenieros de diseño experimentados desarrollaron herramientas de ayuda para el diseño en forma de tablas, curvas, constantes empíricas y fórmulas especializadas, con el objetivo de disminuir el tiempo de cálculo [22]. Antes de la aparición de las calculadoras electrónicas, los diseñadores utilizaban la regla de cálculo surgida en 1851 debido a las contribuciones de Mannheim [30]. La regla de cálculo cayó en desuso con la aparición de la calculadora electrónica HP-35 de Hewlett-Packard en 1972.

III. PRIMEROS MÉTODOS DE DISEÑOS DE TRANSFORMADORES CON COMPUTADORA

El primer diseño de un transformador que fue creado en una computadora digital, surgió en abril de 1953 con la aparición de una tarjeta de cálculo programable de IBM [6]-[7]. En 1954 apareció una segunda versión de dicha tarjeta. Sin embargo, aún se requería de mucho trabajo de supervisión del ingeniero encargado de llevar a cabo el diseño [31]. En 1955, IBM desarrolló la computadora IBM 705 con la que el costo por cálculo era de aproximadamente 60 veces menor que a mano [32]. Esta computadora tardaba de 5 a 10 minutos para realizar un diseño completo [31].

En 1970 H. Henry y R. Adams [33] desarrollaron un programa donde interactuaba el operador para llegar al diseño final. Los datos de entrada de este software eran en forma del circuito equivalente del transformador, o las especificaciones del cliente.

En Junio de 1974 la compañía Sterling Transformer Corporation en Brooklyn, Nueva York [34] desarrolló un programa que trabajaba con transformadores tipo seco de pequeña potencia, monofásicos y trifásicos a 50, 60 y 400Hz, desde 1 a 5000W, y utilizaba 13 tipos diferentes de acero magnético. El software podía realizar el análisis de costo de materiales y fabricación del transformador. El lenguaje utilizado en este programa era conocido como APL y fue operable en las computadoras IBM 360 o 370 [34].

En 1977 F. Judd y R. Kressler crearon una técnica basada en un problema de optimización, cuya solución era un conjunto de parámetros para lograr un diseño con la máxima potencia en VA de salida, para una determinada forma geométrica del núcleo [35].

La solución al problema fue presentada en forma de curvas, que mostraban la máxima capacidad de potencia a la frecuencia de operación, para un conjunto de estructuras magnéticas dadas (ver Figura 1).

IV. DISEÑOS BASADOS EN EL MÉTODO DE MONTE CARLO

En [36] Saravolac, describe la técnica de diseño de transformadores basada en el método Monte Carlo, en donde la función objetivo es:

$$Y = CM + CP + Penalización \quad (1)$$

Donde CM y CP son los costos de materiales y pérdidas respectivamente, y la penalización es por no cumplir los requerimientos de rendimiento, la cual es un valor proporcional a la diferencia de la restricción y el valor obtenido más un porcentaje fijo del costo total. En [36] se menciona que el método es factible para diseñar transformadores de distribución estandarizados de pequeña potencia, y basados en las características construccionales conocidas.

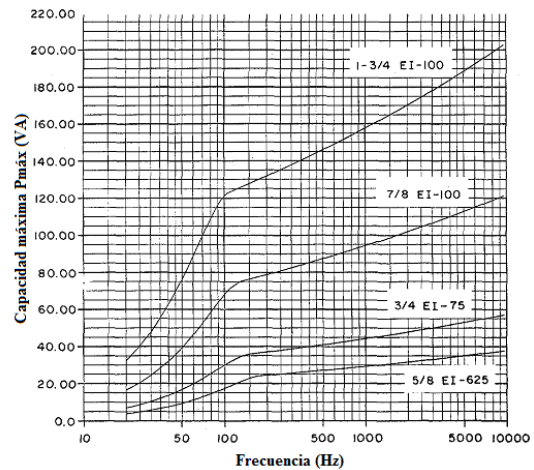


Figura 1. Capacidad máxima en VA para núcleos fabricados con acero al silicio de grano orientado, grado M6. (Derechos de autor © 1977 [35], reimpressa con permiso).

En 1967 [37], Andersen presentó un método unificado para diseñar máquinas eléctricas. El diseño óptimo se realizó mediante la rutina llamada Monica. En su trabajo, describe el diseño de un transformador trifásico de dos devanados. El programa fue escrito en lenguaje Algol para las computadoras Univac 1107.

En [38] se presentó el mismo método de diseño (Monte Carlo) para diseñar transformadores por computadora utilizado desde 1965 [37]. La diferencia es que, en [37] se diseña un transformador trifásico de dos devanados, y en [38], se diseñan transformadores de distribución monofásicos con dos capas de alambre conductor como devanado.

Además en [38] se utilizaron 3 variables, y en [37] fueron 7. Los programas mencionados en [38], en esa fecha se pusieron a disposición para su uso en las computadoras IBM. En una PC de 20 MHz más de 1000 diseños alternativos pueden ser evaluados en menos de 1 minuto, antes que el diseño óptimo se encuentre. La mayoría del lenguaje utilizado en el

programa descrito en [38] fue el lenguaje FORTRAN. Los programas también son capaces de diseñar transformadores de potencia y producen archivos de entrada para su subsecuente análisis mediante el elemento finito.

Andersen, utiliza números aleatorios para generar un amplio conjunto de diseños factibles, donde el diseño con el costo más bajo se elige. Saravolac [36] también inició con un amplio conjunto de diseños factibles, pero en este caso, para generar una superficie de respuesta correspondiente a la función objetivo. El óptimo se derivó desde la superficie de respuesta utilizando la teoría clásica de la optimización de variables continuas [39].

V. ALGORITMOS GENÉTICOS PARA DISEÑAR TRANSFORMADORES

El método de los AGs fue desarrollado por Holland en 1975 [40] y popularizado por Goldberg en 1989 [41]. Fan Shuwei et al. [42] aplicó el método del algoritmo genético en su forma básica, en el diseño optimizado de transformadores de potencia. En [18] L. Hui et al, desarrollaron un Algoritmo Genético Mejorado (AGM) para obtener la solución óptima global para el diseño de transformadores de potencia. Dicho algoritmo se logró al modificar el esquema de codificación, los operadores de cruzamiento y mutación y otras mejoras mencionadas en [18]. Los resultados obtenidos se comparan mediante la función matemática denominada *Camel* descrita en [42]. El AGM fue puesto a prueba en el diseño de un transformador de potencia S9-1000/10kV. Los resultados se comparan contra los obtenidos por el programa de diseño original, los costos están dados en Yuans (ver Tabla I). En [18] se demuestra que el AGM es más eficiente que el AG simple, y es capaz de encontrar el óptimo global para problemas simples o multiobjetivos.

TABLA I. RESULTADOS PARA EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA S9-1000/10KV (DERECHOS DE AUTOR© 2001 [18], REIMPRESA CON PERMISO).

| Transformador de potencia S9-1000/10 kV | Esquema de diseño original | Esquemas de diseño óptimo | | |
|-----------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | Función objetivo | | |
| | | COSTO DE MATERIA PRIMA | COSTO DE TRANSFORMACIÓN | COSTO DE MATERIAL Y OPERACIÓN |
| Costo de materiales | 32935 | 31377 | 34300 | 32785 |
| Costo de producción en 10 años | 110002 | 104796 | 114560 | 109498 |
| Indicadores económicos principales | | | | |
| Costo de operación en 10 años | 4712862 | 4539228 | 3736898 | 3930878 |
| Costos de transformación en 10 años | 4822864 | 4644024 | 3851458 | 4040376 |

En 1996 J. W. Nims et al. [19] aplicó el algoritmo genético en el diseño de un transformador trifásico de 60Hz, con dos devanados concéntricos y capacidad

nominal de 7.5MVA, 13.8/4.16/2.4kV. Para optimizar el diseño del transformador, la función objetivo fue (1). Se realizaron dos corridas para averiguar si el incremento en la población, producía una mejora en los diseños, en la primera, el AG fue en base a una generación de 100, con una población de 200. El resultado se logró en un tiempo de calculo de 77.58 segundos. La segunda corrida, fue en base a una población de 600, e involucró un tiempo de 184.23 segundos.

En las Tablas II y III, se observa que el incremento en la población no tuvo un efecto significativo en los resultados, y de hecho, el costo de los materiales fue el mismo. Los diseños fueron realizados en una computadora 386DX-25 a 25MHz. El diseño de este transformador mediante el AG fue mejor que el diseño estándar con el que se contaba.

VI. ALGORITMOS BASADOS EN LA PROGRAMACIÓN GEOMÉTRICA (PG)

En [43] se presenta el diseño de un transformador de potencia trifásico tipo columna con dos devanados concéntricos mediante PG, donde se tomo como función objetivo el costo global de la parte activa del transformador y los costos de las pérdidas totales. Se impusieron 12 restricciones, se determinaron 11 variables y la función objetivo quedo bajo la forma de un posinomio de 28 términos. El programa se validó utilizando dos ejemplos dados en [44] y [45].

La fábrica de transformadores Peebles [36] desarrolló su propio algoritmo de optimización derivado del modelo de PG cuya función objetivo es el costo. Mediante el algoritmo utilizado por dicha fábrica el proceso del diseño eléctrico fue completamente automatizado, capaz de producir el diseño optimizado completamente, verificado y fabricable, dentro de un tiempo de ejecución promedio, del orden de varios minutos en una plataforma Pentium a 100 MHz [36].

TABLA II. PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR DISEÑADO POR EL MÉTODO DEL AG CON UNA POBLACIÓN DE 200 (DERECHOS DE AUTOR © 1996 [19], REIMPRESA CON PERMISO).

| Devanado de alta | Vueltas | Secciones | Hebras | Conductor | Incremento de temp. (°F) | Peso (lbs) |
|-----------------------------|---------|-----------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| | 394 | 48 | 2 | .600 x 0.130 | 11.95 | 4332 |
| Devanado de baja | Vueltas | Hebras | | Conductor | Incremento de temp. (°F) | Peso (lbs) |
| | 65 | 22 | | 460 x .085 | 10.95 | 2886 |
| Ventana del núcleo (in) | | | | Area del núcleo (in ²) | Den. de Flujo (kl/in ²) | Peso (lbs) |
| 46.3 x 13.7 | | | | 134.2 | 102.0 | 10227 |
| Impedancia | | | Pérdidas en vacío | | Pérdidas en el cobre | |
| Calc. | Guar. | | Calc. | Guar. | Calc. | Guar. |
| 7.75 | 8.00 | | 4269 | 4300 | 33942 | 33900 |
| Costo de Materiales = 20002 | | | | | | |

En noviembre de 2005, Rabih [39], presenta la aplicación de la PG en el diseño de transformadores, en donde se muestra que la PG es capaz de optimizar al

mismo tiempo, los parámetros geométricos, magnéticos y eléctricos del transformador, mientras se cumplen las restricciones impuestas. El software MOSEK fue utilizado para resolver los programas geométricos de diseño propuestos.

En [39] se realizó el diseño mediante la PG de un transformador de alta frecuencia a 100kHz, monofásico tipo acorazado, que ya había sido diseñado mediante otro método en [46], de donde se obtuvieron los datos de entrada. El diseño del transformador mencionado les tomo 29 iteraciones y 0.67 segundos, en una Pentium IV a 1.86GHz con 256 de RAM. En [39] se muestra también, el diseño para el transformador de baja frecuencia. La solución encontrada, fue la máxima global.

VII. TÉCNICA DE HORNEADO SIMULADO

En [17] se propone el diseño de transformadores trifásicos de potencia, mediante la técnica de horneado simulado, en donde el costo de materiales del transformador, es elegido como función objetivo. El método es aplicado para el diseño de dos transformadores de prueba. Los resultados, se comparan con valores obtenidos en el diseño de los transformadores, por el método convencional. En [17] se muestra el diseño de un transformador tipo núcleo de 100kVA, 11000/433V, 3Φ, 50Hz, Δ-Y, y se tuvo que en cuanto al resultado del porcentaje de eficiencia a plena carga se obtiene un 0.7% más a favor del método del horneado simulado y en cuanto al incremento de temperatura en los devanados se obtiene una diferencia de 4° a favor del método del horneado simulado. Al comparar tiempos e iteraciones, se tiene que con el método convencional se necesitaron 10 iteraciones y 30 segundos, mientras que con el método del horneado simulado se necesitaron 57 iteraciones y 8 segundos para obtener el diseño óptimo.

TABLA III. PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR DISEÑADO POR EL MÉTODO AG CON UNA POBLACIÓN DE 600 (DERECHOS DE AUTOR © 1996 [19], REIMPRESA CON PERMISO).

| Devanado de alta | Vueltas | Secciones | Hebras | Conductor | Incremento de temp. (°F) | Peso (lbs) |
|-----------------------------|---------|-----------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| | 386 | 48 | 2 | .590 x 0.135 | 11.77 | 4351 |
| Devanado de baja | Vueltas | Hebras | | Conductor | Incremento de temp. (°F) | Peso (lbs) |
| | 64 | 22 | | 460 x .085 | 10.94 | 2841 |
| Ventana del núcleo (in) | | | | Area del núcleo (in ²) | Den. de Flujo (kl/in ²) | Peso (lbs) |
| 45.8 x 13.9 | | | | 134.2 | 104.2 | 10201 |
| Impedancia | | | Pérdidas en vacío | | Pérdidas en el cobre | |
| Calc. | Guar. | | Calc. | Guar. | Calc. | Guar. |
| 7.73 | 8.00 | | 4478 | 4300 | 33354 | 33900 |
| Costo de Materiales = 20002 | | | | | | |

Para el segundo transformador tipo núcleo comparado (2MVA, 66/11kV, 3Φ, 50Hz, Δ-Δ, se obtuvo un costo de materiales 11% menor a favor del algoritmo propuesto. El costo inicial del transformador fue

reducido 3 y 12% (transformadores de 0.10 y 2MVA respectivamente) a favor de la propuesta. El algoritmo propuesto en [17] es capaz de encontrar el óptimo global aunque no parta de un diseño preliminar cerca del óptimo.

VIII. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una reseña sobre la evolución de los métodos de diseño y optimización de transformadores. Se concluyó que la programación geométrica desde su aparición en el diseño de transformadores, es el método de optimización del diseño más eficaz y robusto, cuando los modelos matemáticos son adecuados para la búsqueda del diseño óptimo. Desde luego debe promoverse más investigación y evaluación de diseño con algoritmos genéticos y la programación geométrica ya que incluyendo métodos no descritos como las redes neuronales y los arboles de decisión son las opciones donde se pueden obtener los parámetros más exactos de los diseños óptimos. Este trabajo revela que los métodos de diseño permanecen como un área activa de investigación. Aunque algunos métodos de diseño se han estudiado por varios investigadores, los autores proponen el siguiente trabajo futuro: a) Explorar todos los métodos en su conjunto para determinar las ventajas y desventajas en un mismo diseño, en una misma computadora, bajo la misma norma y con los mismos costos de materiales, b) explorar nuevos métodos de diseño, y c) explorar los métodos de diseño conocidos utilizando supercomputadoras.

REFERENCIAS

[1]. S. B. Williams, P. A. Abetti, E. F. Magnusson, "How digital computers aid transformer designer," *General Electric Review*, Vol. 58, pp. 24-25, 1955.

[2]. S. B. Williams, P. A. Abetti, and E. F. Magnusson, "Application of digital computers to transformer design," *AIEE Transactions*, Part III, Vol. 75, pp. 728-735, 1956.

[3]. W. Sharpley, and J. V. Oldfield, "The digital computer applied to the design of large power transformers," *Proc. IEE*, Part A, Vol. 105, pp. 112-125, 1958.

[4]. S. B. Williams, P. A. Abetti and H. J. Mason. "Complete design of power transformers with a large size digital computer," *AIEE Transactions*, Part III, Vol. 77, pp. 1282-1291, 1959.

[5]. H. H. Wu, and R. Adams, "Transformer design using time-sharing computer," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 6, No. 1, p. 67, 1970.

[6]. O. W. Andersen, "Optimum design of electrical machines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 86, No. 6, pp. 707-711, 1967.

[7]. P. H. Odessey, "Transformer Design by Computer," *IEEE Transactions on Manufacturing Technology*, MFT-3:1-17, 1974.

[8]. F. F. Judd, D.R. Kressler "Design Optimization of Small Low-Frequency Power Transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-13:1058-1069, 1977.

[9]. **Juan C. Olivares-Galván**, Pavlos S. Georgilakis, Rafael Escarela-Pérez, E. Campero Littlewood, "Optimal Design of Single-Phase Shell-Type Distribution Transformers based on a Multiple Design Method Validated by Measurements,"

Electrical engineering, 6 June 2011, doi:10.1007/s00202-011-0211-9, pp. 1-10.

[10]. A. Rubaai, "Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class," *IEEE Transactions on Power Systems*, 9, 1994, 1174-1181.

[11]. W. T. Jewell, "Transformer design in the undergraduate power engineering laboratory," *IEEE Transactions on Power Systems*, 5, 1990, 499-505.

[12]. W.M. Grady, R. Chan, M.J. Samotyj, R.J. Ferrano, J. L. Bierschenk, "A PC-based program for teaching the design and analysis of dry-type transformers," *IEEE Transactions on Power Systems*, 7, 1992, 709-717.

[13]. W.J. Gu, R. Liu, "A study of volume and weight vs. frequency for high-frequency transformers," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1993, 1123-1129.

[14]. M. Poloujadoff, R. D. Findlay, "A procedure for illustrating the effect variations of parameters on optimal transformers design," *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-1, 1986, 202-206.

[15]. Andersen, O. W., "Optimized design of electric power equipment," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-15, 1991.

[16]. J.G. Breslin, W.G. Hurley "A Web-Based System for Transformer Design," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, KES 2003, LNAI 2773, 2003, 715-721.

[17]. S. Padma, R. Bhuvaneshwari, S. Subramanian, "Optimal Design of Power Transformer using Simulated Annealing technique," *IEEE Trans. on Magnetics*, 41(11):4296, 2006.

[18]. L. Hui, H., Li, H., Bei, and Y., Shunchang, "Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers," in *Proc. International Conference on Electrical Machines and Systems*, Vol. 1, pp. 242-245, 2001.

[19]. J. W. Nims, R. E. Smith, and A. A. El-Keib, "Application of a genetic algorithm to power transformer design," *Electric Power Components and Systems*, 24:6, 1996, 669 - 680.

[20]. B. Singh, and R. B. Saxena, "Optimum design of small distribution transformer using aluminium conductors," *Electric Power Components and Systems*, 12:4, 1987, 271 - 280.

[21]. A.J. Rabih, "Application of Geometric Programming to Transformer Design," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 41, No. 11, pp. 4261, November 2005.

[22]. C. Hernandez, M. A. Arjona, "An intelligent assistant for designing distribution transformer," *ScienceDirect, Expert Systems with Applications*, vol. 34, p. 1932.

[23]. J. Kowalski, and K. Pylak, "Polyoptimization problem in power core type transformer design," *Electric Power Components and Systems*, 21:4, p. 493 - 506, 1993.

[24]. J. H. Kuhlman *Design of electrical apparatus*. New York: Wiley, 1983.

[25]. M. M. Saied, "Feasibility of using magnetic amorphous metals as core materials in power transformer," *Electric Power Components and Systems*, 12:4, 1987, 325 - 341.

[26]. MBG Ingenieros.com, Programas de diseño de transformadores TRAMOT. Disponible en: <http://www.mbgingenieros.com/index.php?mod=Software>

[27]. RALE engineering since 1978. Disponible en: <http://www.rale.ch/>

[28]. Optimized Program Service, LLC. Disponible en: <http://www.opsprograms.com/design-programs/transformer>

[29]. Oil Filled & Dry HT Transformer Design Software. Disponible en: <http://www.softbitonline.com/transformerContents.html>

[30]. La Regla de Cálculo, Disponible en: <http://www.sapiensman.com/matematicas/matematicas20.htm>

[31]. S. B. Williams, P. A. Abetti, H. J. Mason, "Complete Design of Power Transformers with a Large-Size Digital Computer," *AIEE Power Industry Computer Application Conference, 1959*, pp. 1282 - 1291.

[32]. P. A. Abetti, S. B. Williams, "The practice and the economics of Applying Digital Computers to Engineering problems," *Ibid.*, pp. 331-42.

[33]. H. Henry, R. Adams, "Transformer Design Using Time - Sharing Computer," *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. Mag-6, No 1, pp. 67, 1970.

[34]. P. H. Odessey, "Transformer Design by Computer," *IEEE Trans. On Manufacturing Technology*, vol. MPT-3, No. 1, June 1974.

[35]. F. F. Judd, D. R. Kressler, "Design Optimization of Small Low-Frequency Power Transformers," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-3, No. 4, 1977.

[36]. M. P. Saravolac, "Use of advanced software techniques in transformer design," *IEE Colloq. Design Technology of T&D Plant*, Junio, 17, 1998, Dig. 1998/287, pp. 9/1-9/11.

[37]. O. W. Andersen, "Optimum Design of Electrical Machines," *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, 1967, pp. 708,

[38]. O. W. Andersen, "Optimized Design of Electric Power Equipment," *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 11-15, Jan. 1991.

[39]. R.A. Jabr, "Application of geometric programming to transformer design," *IEEE Trans. On Magnetics*, 41(11):4269

[40]. J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, First Edition, USA: University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, 1975.

[41]. D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison Wesley, Reading, MA., 1989.

[42]. F. Shuwei, W. Guoliang, X. Wei, "Genetic Algorithm and its Application in Power Transformer Optimization Design," *Proceedings of the CSEE*, vol. 16, No. 5, pp. 346-348, sep. 1996.

[43]. C. Candela, "Dimensionamiento óptimo de transformadores de potencia usando técnicas de programación geométrica," *Información Tecnológica*, vol. 9, No. 6, pp. 232, 1998.

[44]. Corrales J., "Cálculo Óptimo de Transformadores", Boixareu Editores, Barcelona, 1978.

[45]. Poloujadoff M., Findlay R., "A Procedure for Illustrating the Effect of Variation of the Parameters on Optimal Transformer Design", *IEEE-PWRS*, pp. 202-206, Noviembre, 1986.

[46]. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Application and Design*, 3rd ed. New York: Wiley, 2003.

[47]. P.S. Georgilakis, *Spotlight on Modern Transformer Design*, vol. I. New York: Springer, 2009, p. 244.

[48]. A. G. Estrada, J. C. Olivares, M. A. Venegas, R. Escarela, "Impacto del Costo Cobre/Aluminio en el Diseño de Transformadores con Bobina Alta-Baja," presentado en la XI ROPEC, Morelia, 2009.

[49]. E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, "The state of the art in engineering methods for transformer design and optimization: a survey," *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 10(5):1149-1158.

AUTORES

Angel G. Estrada-Chablé. Técnico en Lengua Inglesa (2006) en el Colegio de Bachilleres 2, en

Chetumal, Quintana Roo, México. Obtuvo su título de Ingeniero Eléctrico el 9 de Febrero de 2011 en el Instituto Tecnológico de Chetumal. Participó en el Verano de la Investigación Científica en el 2009 y en el 2010, haciendo estancia en la UAM. Actualmente trabaja en la empresa de suministro energético en México denominada Comisión Federal de Electricidad.

Juan Carlos Olivares Galván. Ingeniero Electricista (1993) y Maestro en Ciencias (1997) por el Instituto Tecnológico de Morelia. Doctor (2004) en el CINVESTAV, unidad Guadalajara. Trabajó por ocho años en la industria como diseñador de transformadores de distribución. En 2004 ingresó como profesor en el Instituto Tecnológico de Zapopan y desde el 2007 es profesor de tiempo completo de la UAM. Es miembro del SNI (Nivel I) y Senior Member del IEEE.

Eduardo Campero Littlewood (México D.F., 1947). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Trabajó en la industria hasta 1975, año en el que inició sus estudios de maestría en el Imperial College de la Universidad de Londres. En 1977 ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, donde es profesor Titular C desde 1991. Sus áreas de interés en investigación son máquinas eléctricas y uso eficiente de la energía. Actualmente realiza estudios de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Salvador Magdaleno Adame. Nació en la Piedad Michoacán, México en el año de 1983. En 2008 obtuvo su Licenciatura en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, México. Del 2003 al 2008 trabajo en investigación relacionada a campos electromagnéticos

en transformadores toroidales y convencionales, incluyendo la aplicación de entrehierros virtuales a núcleos toroidales. De Septiembre de 2008 a Diciembre de 2010 trabajó como Ingeniero en Investigación y Desarrollo (R&D) en el Departamento de Tecnología de Transformadores y Reactores de Potencia en Industrias IEM S.A. de C.V. Sus áreas de investigación incluyen cálculo de campos electromagnéticos usando el método de elemento finito y modelado de transformadores y reactores usando el principio de dualidad. En este momento se encuentra en el proceso de selección para ingresar a la Maestría en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Su dirección electrónica de contacto es smagdalenoa@hotmail.com.

Irvin López García. Trabajó en la industria eléctrica desde 1999 hasta 2001. En 2005 obtuvo su grado de Maestría en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, unidad Zacatenco. Actualmente estudia el doctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM en el área de control. Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas. Es miembro del IEEE.

Rafael Escarela Pérez. En 1992 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 1993 comenzó sus estudios de postgrado en el Imperial Collage de la Universidad de Londres donde obtuvo el grado de doctor en 1996. En 1996 ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel II) y Senior Member del IEEE.