

Recibido 31 de julio de 2023. Aceptado 25 de abril de 2024. Publicado 31 de mayo de 2024.

ISSN: 2448-7775

Combinación de materiales en núcleos de transformadores – Revisión Bibliográfica

DAVID GONZÁLEZ SILVERIO, JUAN CARLOS OLIVARES GALVÁN*, VÍCTOR MANUEL JIMÉNEZ MONDRAGÓN, DAVID ANTONIO ARAGÓN VERDUZCO

Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

*Autor de Correspondencia: jolivares@azc.uam.mx

RESUMEN. El crecimiento continuo de la red eléctrica ha generado una creciente necesidad de mejorar la eficiencia de sus componentes fundamentales, como los transformadores. Este artículo ofrece una revisión exhaustiva sobre la combinación de los materiales utilizados en los núcleos de transformadores, buscando reducir las pérdidas energéticas sin incurrir en costos de producción excesivos. Se destacan aspectos clave, como el empleo de métodos numéricos o experimentales, así como la diversidad de materiales examinados en cada estudio. La investigación realizada revela que esta área se mantiene muy activa, impulsado por el progreso de los métodos numéricos que facilitan análisis más detallados. Se destaca la posibilidad de disminuir las pérdidas en los transformadores mediante la combinación de distintos materiales magnéticos, si bien se subraya que esto no siempre resulta económicamente viable. En resumen, el estudio enfatiza la viabilidad técnica de mejorar la eficiencia de los transformadores mediante la combinación de materiales, aunque la viabilidad económica pueda ser un factor limitante.

PALABRAS CLAVE— Eficiencia, transformadores, combinación de materiales, materiales magnéticos, métodos numéricos, métodos experimentales, revisión bibliográfica.

I. INTRODUCCIÓN

Dado el continuo incremento del consumo global de energía eléctrica, la reducción de las pérdidas en todos los equipos relacionados con la generación, transmisión, distribución y consumo de esta energía es un tema crucial [1]. No están exentos de esta necesidad los transformadores, estos cumplen una función directa en las pérdidas en las líneas de transmisión y distribución al utilizarse para disminuir la corriente que circula por ellas y así disminuir las pérdidas por efecto Joule en las mismas, en otras ocasiones, como es el caso de los transformadores de corriente y potencial, son piezas fundamentales en el funcionamiento estable y seguro de la red eléctrica.

En el año 2019 las pérdidas técnicas de energía en México fueron de 17260 GWh de las cuales 2331 GWh corresponden a las líneas de distribución, 3559 GWh a las pérdidas en transformadores tanto de subestaciones como de sistemas de baja tensión y las restantes, a las líneas de media y baja tensión y los medidores y acometidas [2].

Considerando la relevancia de los transformadores en el sistema de potencia, es crucial resaltar la necesidad imperante de incrementar su eficiencia. En este contexto, es pertinente identificar las principales pérdidas que ocurren en estos dispositivos. Estas pérdidas se pueden separar en dos grupos, las pérdidas eléctricas y las pérdidas magnéticas. Las eléctricas son aquellas que ocurren debido al circuito

eléctrico, dentro de las cuales, el protagonismo lo tienen las pérdidas de cobre, asociadas a las pérdidas en forma de calor por el efecto Joule en los devanados de la máquina al circular por ellos corriente, estas dependen de la carga. En las magnéticas o también llamadas pérdidas en el hierro, se encuentran las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de remolino, también conocidas como corrientes de Foucault o corrientes parásitas. Las pérdidas de hierro son independientes de la carga.

Las pérdidas magnéticas guardan una relación directa con los materiales utilizados en la fabricación de los núcleos y los procesos de manufactura asociados. Los factores que inciden directamente en estas pérdidas incluyen la calidad del aislamiento entre láminas, el porcentaje de silicio en la aleación, impurezas químicas, el tamaño del grano, el control de la orientación de los cristales y el espesor de las láminas de los materiales utilizados en la fabricación del núcleo [3].

El mejoramiento constante de los materiales magnéticos es un área crucial. Desde la década de los años 60 del siglo pasado ya se utilizaban aleaciones de hierro para disminuir las pérdidas en los núcleos de máquinas eléctricas [4], un hito en la evolución de los núcleos de transformadores fue la invención del acero al silicio laminado en frío, con el cual se disminuían las dimensiones y se aumentaba la exactitud en los transformadores de corriente [5]. En los años siguientes, surgieron nuevos materiales (o mejoras de los ya existentes) como los mu-metales, los aceros amorfos y los

nanocristalinos, cada uno con características y métodos de fabricación particulares. Las láminas de acero amorfo poseen una densidad de flujo magnético de saturación del orden de los 1.5 T y aproximadamente el doble de la resistividad eléctrica (1.0 a 1.3 $\mu\Omega\text{m}$) de los aceros convencionales, lo que contribuye a la disminución de las pérdidas por corrientes de remolino [6].

Los núcleos toroidales fabricados de acero nanocristalino (Fe-Si-Cu-Nb-B) son usados en transformadores, presentando valores de permeabilidad magnética del orden de $\mu_{\text{máx}} = 300000 - 500000$ y una alta estabilidad a temperaturas incluso superiores a los 200 °C, además de presentar muy bajas pérdidas de núcleo. No obstante, sus bajos niveles de densidad de flujo magnético de saturación (1.15 - 1.2 T) alcanzables para valores bajos de intensidad de campo magnético limitan su explotación en la fabricación de núcleos [7].

El principal desafío asociado con los μ -metales, los aceros amorfos y los nanocristalinos radica en su alto costo en comparación con los aceros convencionales, por lo que tampoco son una vía factible para la producción de núcleos de transformadores. Ante esta realidad, surge la necesidad de aprovechar sus características y combinarlas con el relativamente bajo costo de los aceros convencionales, con el objetivo de reducir las pérdidas en los transformadores sin incurrir en costos de producción prohibitivos.

Este artículo constituye una revisión de diversos estudios enfocados en la combinación de materiales en los núcleos de transformadores, con el objetivo de disminuir las pérdidas y potenciar su eficiencia. La investigación aborda distintos aspectos vinculados a estos estudios, tales como el tipo de transformador que se estudia, los materiales empleados en la investigación, la geometría y distribución de dichos materiales en el núcleo, que tipo de núcleo se analiza y mediante que método se realiza el estudio (numérico o experimental).

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma. En la sección II se detalla el método de búsqueda utilizado y los resultados obtenidos, en la sección III se describen los trabajos relacionados con las combinaciones de materiales en los núcleos de transformadores, en la sección IV se muestran las conclusiones alcanzadas y por último en la sección V a modo de apéndice se presenta una tabla con la recopilación de aspectos de importancia de cada uno de los estudios sobre combinación de materiales plasmado en este artículo.

II. MÉTODO DE BÚSQUEDA

Para la recopilación de los artículos estudiados se elaboró una búsqueda extensiva en el sitio oficial de Elsevier, IEE, Scopus y en Google Scholar utilizando los términos **transformer core**, **mixed core**, **composite core**, **combined core** y **transformer Steel**, **electrical Steel**, **Steel alloy**. Para los términos **transformer core**, **mixed core**, **transformer**

Steel, **electrical Steel** y **Steel alloy** los resultados arrojados por los buscadores respectivos eran muy distantes del tipo de estudios que se deseaba encontrar. La mayoría de los artículos referenciados en este estudio fueron encontrados mediante los términos **composite core** y **combined core**. Es importante señalar que la cantidad de investigaciones documentadas sobre el tema es escasa con relación al tiempo que ha transcurrido desde el inicio del estudio de este fenómeno. Esta realidad se puede apreciar directamente en el reducido número de referencias plasmadas en el presente trabajo a pesar de la extensa búsqueda realizada sobre el tema.

III. COMBINACIÓN DE MATERIALES EN NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES

El concepto de núcleos magnéticos compuestos de diferentes materiales fue presentado en 1929 por Johannesen en [8], donde patentó la creación de un núcleo acorazado, formado por dos mitades simétricas. Estas mitades están compuestas por una parte en forma de U con una columna uniendo ambos extremos de dicha U como se muestra en la Fig. 1. La columna central (parte que une los extremos de la U) se elabora de una aleación de hierro y níquel y las otras dos columnas y el yugo (la forma en U), de acero al silicio. La columna central tiene el doble del área transversal de las demás partes del núcleo, con el fin de obtener una densidad de flujo magnético uniforme a lo largo de todo el núcleo (despreciando los flujos dispersos), aunque se resalta el hecho de que, por ser de un material con una mayor permeabilidad, su área transversal puede ser menor que el área transversal combinada de las partes restantes de menor permeabilidad.

Para 1980 Lin et al. [9] patentaron dos tipos de núcleos para transformadores de distribución y potencia, compuestos por dos circuitos magnéticos paralelos de longitudes diferentes. La parte central del núcleo (la de menor longitud central) se construye con acero de grano orientado de alta permeabilidad, con bajas pérdidas, pero alto costo y, la parte externa del núcleo con acero de grano orientado convencional, el cual posee mayor nivel de pérdidas, pero es más barato. Se patentó un núcleo toroidal para un transformador monofásico como se muestra en la Fig. 2 y otro tipo acorazado de 5 columnas para transformadores trifásicos como se muestra en la Fig. 3 siguiendo el mismo concepto de que el material de mejores prestaciones se utiliza en la parte central del núcleo y en el caso del transformador trifásico en las 3 columnas centrales que llevan los devanados.

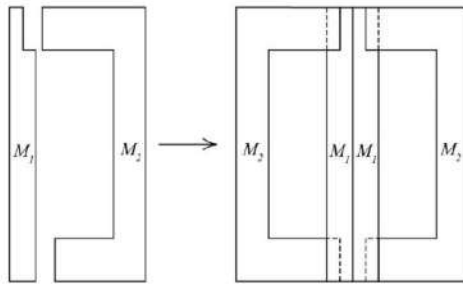


Fig. 1. Núcleo tipo acorazado compuesto, M_1 y M_2 diferentes materiales. Parcialmente modificada de [8].

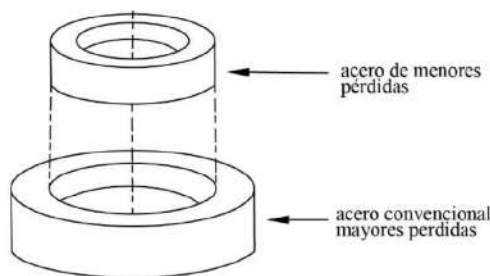


Fig. 2. Núcleo toroidal. Dos núcleos toroidales de diferentes materiales uno acoplado dentro del otro. Parcialmente modificada de [9].

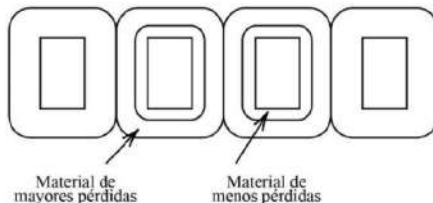


Fig. 3. Núcleo trifásico de 5 columnas compuesto por dos materiales. Parcialmente modificada de [9].

En el año 1988, Moses y Hamadeh en [10], realizaron estudios a núcleos de 3 columnas para transformadores trifásicos. Fueron elaborados 18 núcleos diferentes mediante la combinación de 3 tipos de aceros de la Nippon Steel Corporation (acero al silicio al 3% convencional de grano orientado (CGO), acero al silicio de alta permeabilidad (HiB) y acero de alta permeabilidad tratado con láser (ZDKH)). Reportaron los resultados de 6 de los 18 núcleos estudiados y concluyeron que las pérdidas de un núcleo tipo columna, de acero de grano orientado de alta permeabilidad pueden ser mejoradas al reemplazar la columna central del núcleo por acero de grano orientado convencional, sin embargo, al realizar el mismo procedimiento con un núcleo de acero tratado con láser no disminuyen. En el estudio no se realizó ningún núcleo real, solo muestras con un espesor de núcleo de aproximadamente 18 mm mientras los originales deberían ser de 100 mm.

En 1990 P. Sankaran y colaboradores presentaron en [11] un programa destinado a estimar los errores de transformación y fase en transformadores de corriente, utilizando núcleos de un solo material y núcleos con combinación de diferentes materiales. Para la validación del programa elaborado, diseñó un transformador de corriente de 250/5 A, 5 VA con la mezcla de 50% de TRAFOPERM N2 (acero de grano orientado) y 50% de PERMAX (Ni-Fe) producidos por Vacuumschmelze GmbH, West Germany. Compararon los errores hallados mediante el programa presentado con los errores medidos experimentalmente a dicho prototipo, mostrando resultados muy cercanos entre ambos.

En el año 2003, D. Snell y A. Coombs [12], evaluaron mediante un sistema de pruebas basado en computadora, el comportamiento de núcleos de transformadores trifásicos de 50 y 100 kVA a 50 Hz. Elaboraron varios prototipos utilizando diferentes grados de acero al silicio (27MOH, 27M4, 30M5, 35M6), además, evaluaron los efectos que tiene la mezcla de acero tratado con esfera prensada y acero no tratado con esfera prensada en dichos núcleos. Concluyeron que se pueden mezclar dichos materiales sin incurrir en deficiencias en el comportamiento del núcleo a diferencia de cuando se utiliza acero tratado con láser lo cual degrada el factor de construcción del núcleo.

En el 2008 Jaroslaw et al. en [13] realizaron una comparación entre las propiedades de transformadores de corriente de medio voltaje, a través de pruebas experimentales de acuerdo con la norma internacional EN60404-6 [14]. Esta comparación fue llevada a cabo entre núcleos elaborados de tres materiales diferentes (SiFe de grano orientado, láminas policristalinas de NiFe y láminas de acero nanocristalino). Además, expandieron dicha comparación a núcleos elaborados con la combinación de dos de estos materiales (SiFe + NiFe) y (SiFe + material nanocristalino). En el estudio presentaron el contenido de distorsión armónica para una corriente de magnetización determinado para varios núcleos toroidales de los materiales antes mencionados. Concluyeron que, las mejores características magnéticas, en cuanto a la curva de permeabilidad relativa y magnetización, distorsión armónica y viabilidad para la elaboración de transformadores de corriente fue la de la combinación SiFe de grano orientado + material nanocristalino.

En el 2009 T. D. Kefalas en [15] realizó una revisión bibliográfica sobre las patentes existentes desde 1929 [8] sobre la combinación de materiales en núcleos de transformadores. En el artículo, además, presentó una técnica de cálculo generalizada para la determinación de las variables de diseño óptimas para un núcleo tipo enrollado para transformadores de distribución. Se comprobaron los resultados obtenidos mediante la técnica de cálculo comparando estos con los obtenidos por simulaciones con el método de elementos finitos y pruebas experimentales

realizadas a 3 núcleos, uno elaborado con acero de grano orientado convencional (M4 de 0.27mm), otro de acero de grano orientado de alta permeabilidad (M-OH de 0.27mm) y el último, con la combinación de estos dos materiales. La técnica mostrada permite controlar las pérdidas con y sin carga del transformador, además del costo de los materiales a utilizar tanto en el devanado como en el núcleo.

En el año 2010 R. Pytlech en [16] mostró un núcleo tipo D con entrehierros distribuidos para transformadores de potencial como se puede ver en la Fig. 4, compuesto de acero de grano orientado y acero de grano no orientado. Se elaboró una comparación entre el tipo de núcleo presentado y un núcleo comercial tipo C de acero de grano orientado, mostrando que, el núcleo propuesto mejoró la característica de magnetización y se obtuvo una mayor permeabilidad magnética. Además, se mostraron resultados experimentales del mismo tipo de núcleo propuesto elaborado con materiales de diferentes grados.

También en el año 2010, E. Elzbieta y R. Rajcher en [7], reportaron resultados de la influencia de combinar dos materiales (acero al silicio convencional y acero nanocristalino) en la construcción de un núcleo toroidal para un transformador de corriente de 200-5 A, 7.5 VA y factor de potencia de 0.8. El análisis lo realizaron tomando en cuenta el error de transformación del transformador. Realizaron estudios de la distribución del campo electromagnético para diferentes casos de transformadores de corriente. El estudio se llevó a cabo mediante el método de elementos finitos y fue comparado con resultados experimentales de prototipos elaborados. Concluyeron que el núcleo elaborado con material nanocristalino tiene el menor error de transformación, a costa de un aumento significativo del costo total del transformador.

En el 2012 E. Elzbieta y R. Rajcher en [17] continuaron el estudio [7], esta vez, analizaron también los núcleos toroidales conformados por dos subnúcleos toroidales de diferente material acoplados de manera radial, similar a lo presentado en [9] en el caso de la Fig. 2. Obtuvieron como resultados que el comportamiento del núcleo no se afectó por la forma de ensamblar los materiales (teniendo en cuenta igual área transversal para cada material en las diferentes configuraciones), sin embargo, sí por la proporción de cada material, siendo mejoradas las características magnéticas a medida que más material nanocristalino era utilizado, conduciendo a un costo elevado.

En el 2012 también, Kefalas y Kladas [18], propusieron un nuevo proceso de manufactura de núcleos para transformadores de distribución combinando dos aceros de grano orientado con diferente grado de magnetización, de manera que se coloca el acero convencional en los extremos del núcleo y, el de alta magnetización en el centro, tal como se muestra en la Fig. 5. Esta distribución específica está basada en el resultado de estudios elaborados previamente

por los autores donde concluían que la densidad de flujo magnético en dichos núcleos es mayor en el centro y menor en los extremos. Presentaron un método híbrido de elementos finitos-elementos de frontera para el análisis de las características magnéticas del núcleo y la optimización económica del mismo, haciendo énfasis en la reducción del costo total del transformador.

En otro artículo de los autores anteriores [19], propusieron un transformador trifásico de 5 columnas conformado por 4 núcleos tipo enrollado (dos de Si-Fe de alta permeabilidad (M-OH 0.27 mm) y los otros dos Si-Fe convencional (M4 0.27 mm)) de la manera que se muestra en la Fig. 6. Fabricaron dos de estos transformadores trifásicos, uno combinando ambos materiales y otro completamente con acero de alta permeabilidad. Ambos transformadores fueron analizados experimentalmente para obtener los valores de pérdidas, las formas de onda del flujo magnético y el contenido armónico. Concluyeron que las pérdidas se comportan de manera exponencial con respecto al nivel de inducción, alcanzando niveles porcentuales inaceptables para más de 1.6 T por lo cual es necesario tener en cuenta el nivel de corriente para el diseño óptimo del equipo. Además, dada la diferencia de precio del acero convencional con respecto al de alta permeabilidad, es viable económicamente utilizar los núcleos combinados.

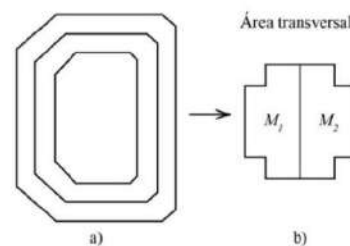


Fig. 4. a) Núcleo tipo D compuesto b) Área transversal del núcleo, M_1 y M_2 son diferentes materiales. Parcialmente modificada de [16].

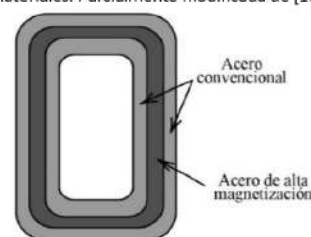


Fig. 5. Núcleo elaborado con dos materiales diferentes. Parcialmente modificada de [18].

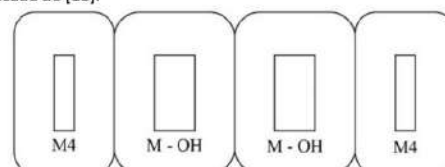


Fig. 6. Núcleo trifásico compuesto por 2 núcleos de acero de alta permeabilidad (M-OH) y 2 de acero convencional (M4). Parcialmente modificada de [19].

En el 2016 Magdaleno Adame et al. en [20], presentaron un estudio a un núcleo de un transformador de potencia combinando dos materiales, para diferentes porcentajes de estos materiales. En dicho trabajo se analizaron combinaciones de aceros convencionales de diferentes grados y de aceros convencionales con aceros tratados con láser. En ambos casos, los autores recomiendan que el material de mejores propiedades debe estar en el interior del núcleo para evitar aumentos en las pérdidas y la temperatura. Se llevó a cabo un estudio experimental a dos de los núcleos sin combinación de materiales para validar el método numérico con los resultados experimentales, sin embargo, no se elaboró estudio experimental de ninguno de los núcleos combinados.

En 2017 Freitag y Leibfried en [21], estudiaron mediante el método de elementos finitos y un algoritmo de post-procesamiento (elaborado por los mismos autores), las pérdidas en el núcleo de un transformador de potencia monofásico de 200 kVA de 10/0.5 kV a 50 Hz elaborado con acero de grano orientado (C 165-35) (Fabricante: ThyssenKrupp, 1.65 W/kg a 1.7 T y 50 Hz y 35 μ m es el espesor de la lámina). Los núcleos estudiados fueron creados por la combinación de 13 aceros de cualidades diferentes dando un total de 286 combinaciones, de las cuales se escogieron 8, de acuerdo con los valores de pérdidas calculados en ellas. Concluyeron que es posible disminuir las pérdidas de núcleo hasta en un 6.25% sin aumentar los costos de manufactura del núcleo y que el costo de producción del núcleo se eleva, pero el costo relativo sobre la vida útil del transformador disminuye. No se reportaron pruebas experimentales a ninguno de los transformadores calculados con el método, solo al original.

También en el año 2017, Adame et al. en [22] y [23], presentaron un análisis mediante el método de elementos finitos del núcleo de un transformador de distribución monofásico de 6.3 MVA. Se determinó la distribución de flujo magnético y las pérdidas en el núcleo para la combinación de dos aceros, acero de grano orientado convencional (M-5) y acero tratado con láser (23ZDKH90) y un núcleo elaborado sin combinación de aceros. Este último fue sometido a pruebas en laboratorio para comparar los resultados experimentales con los del método numérico. Se concluyó que las pérdidas del núcleo con la combinación son un 5% menores que en el núcleo convencional pero el costo material del mismo aumentaba en un 36% sin aumentos en el costo de manufactura.

En el año 2018, Kefalas y Adame en [24], presentaron una evaluación comparativa entre núcleos enrollados convencionales y compuestos para transformadores trifásicos de distribución de 100 kVA. Fueron estudiados dos transformadores trifásicos de 5 columnas, cada uno conformado por 4 núcleos enrollados, los dos interiores de mayor tamaño que los exteriores de manera similar a como se muestra en la Fig. 6, uno de los transformadores se realizó

completamente de acero de alta permeabilidad y el otro con los dos núcleos interiores de dicho material y los exteriores de acero convencional. La comparación fue fundamentada en la disminución del costo total evaluado (TOC por sus siglas en inglés). El análisis se realizó mediante una formulación analítica con una optimización de los parámetros fundamentales que influyen en el costo y mantenimiento futuro de la máquina y fueron comprobados sus resultados de manera experimental. Concluyeron que el núcleo combinado presenta mejor rendimiento en cuanto a disminución de pérdidas y mejor razón de transformación, pero depende del fabricante y los costos asociados a variables como el costo de cada material para que estas ventajas sean definitivas.

En el año 2021 Cinar en [25] planteó un método de diseño analítico para un transformador de distribución de 400 kVA, 34.5/0.4 kV a 50 Hz, utilizando diferentes combinaciones entre 11 aceros diferentes (M2, M3, M4, M5, M6, H0, H1, H2, H0-DR, H1-DR, H2-DR). Se basó en el estudio técnico y económico para cada clase de pérdidas establecida por la normativa EN50588-1 [26]. Estas pérdidas fueron halladas utilizando el método de elementos finitos y luego fueron comprobadas mediante pruebas experimentales a prototipos.

En el año 2021, Batrashov y Stepankaya en [27], presentaron un método analítico de cálculo destinado a la combinación de dos materiales en el núcleo de un transformador de corriente toroidal. En el trabajo se aplicó dicho método para dos geometrías diferentes (AMET-82B y AMET-5B), la diferencia entre estas es el lugar que ocupa cada material en la parte transversal del núcleo, siendo la primera conformada por dos núcleos toroidales independientes, uno menor que el otro e introducido dentro del otro (similar a lo mostrado en la Fig. 2), la otra geometría consiste de dos núcleos iguales en radio uno encima del otro como se muestra en la Fig. 7. No se reportaron estudios ni con MEF ni de manera experimental.

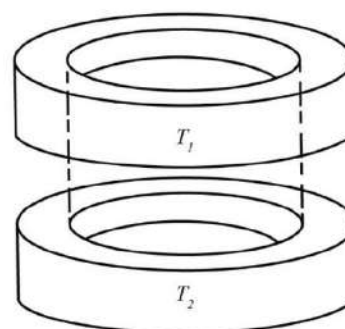


Fig. 7. Núcleo toroidal formado por dos núcleos toroidales (T_1 y T_2) de igual radio interior y exterior uno encima del otro.

En 2021, Kobayashi y colaboradores, en [28], llevaron a cabo un análisis utilizando el método de elementos finitos en un núcleo de un transformador de potencia de alto voltaje. Este núcleo fue construido combinando acero de grano orientado convencional y acero amorfo. Mediante pruebas en un prototipo real, demostraron que los valores de saturación magnética del núcleo híbrido superaban a los del núcleo fabricado únicamente con acero amorfo. Además, lograron reducir las pérdidas del núcleo en un 60% en comparación con aquellos elaborados exclusivamente con acero de grano orientado convencional.

IV. CONCLUSIONES

El estudio sobre la combinación de materiales en la fabricación de núcleos es crucial a nivel global. La adopción de métodos numéricos modernos en estos análisis es fundamental debido a su flexibilidad, permitiendo realizar pruebas y ajustes al modelo antes de producir un prototipo, lo que ahorra recursos y mano de obra de manera significativa. Es crucial destacar que queda un amplio campo de investigación en la combinación de materiales, ya que cada tipo de transformador está sujeto a normas específicas y los estudios aplicados a una geometría particular de transformador no son generalizables a otras configuraciones en la mayoría de los casos.

El diseño de transformadores de distribución, potencia, corriente o potencial requiere enfoques distintos. Sin embargo, es notable que la totalidad de los estudios concluyen que es viable emplear combinaciones de materiales en la construcción de núcleos, siempre y cuando se seleccionen cuidadosamente los materiales considerando los costos totales.

V. APÉNDICE

En la [Tabla I](#) se muestra en orden cronológico una recopilación de los principales aspectos de cada uno de los estudios que abordan combinación de materiales en núcleos de transformadores antes mencionados. Se hace énfasis en el tipo de transformador que estudiaron, los materiales utilizados en la fabricación o simulación de los núcleos, el método o métodos utilizados en cada estudio y la geometría de los núcleos.

TABLA I. CRONOLOGÍA DE ARTÍCULOS SOBRE COMBINACIONES DE MATERIALES EN NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES.

Ref. Año	Materiales	Método	Tipo	Geometría
[8] 1929	NiFe, SiFe	Patente	---	Acorazado y Columna
[9] 1980	CGO, HiB	Patente	1φ y 3φ de Pot y Dist	Toroidal y Acorazado
[10] 1988	CGO, HiB, ATL	Exp	3φ	Columna
[11] 1990	NiFe, CGO	An/Exp	TC 250/5 A	Toroidal
[12] 2003	CGO, ATEP	An/Exp	3φ	Columna
[13] 2008	SiFe, NiFe, Poli, Nano	An/Exp	TC	Toroidal
[15] 2009	CGO, HiB	MEF/Exp	1φ	Enrollado
[16] 2010	CGO, CNO	An/Exp	TP	D y C
[7] 2010	CGO, Nano	MEF/Exp	TC 200/5 A	Toroidal
[17] 2012	CGO, Nano	MEF/Exp	TC 100/5 A	Toroidal
[18] 2012	CGO, HiB	MEF	1φ y 3φ de Dist	Enrollado y Columna (4xEnrollado)
[19] 2012	CGO, HiB	Exp	3φ	Columna (4xEnrollado)
[20] 2016	4 CGO, ATL	MEF/Exp	1φ de Pot	Enrollado
[21] 2017	13 CGO	MEF/Mat lab/Exp	1φ de Pot	Enrollado
[22] 2017	CGO, ATL	MEF/Exp	1φ de Dist	Enrollado
[23] 2017	CGO, ATL	MEF/Exp	1φ de Dist	Enrollado
[24] 2018	HiB, CGO	An/Exp	3φ de Dist.	Columna (4xEnrollado)
[25] 2021	5 CGO, 3 HiB, ATL	An/MEF/Exp	3φ de Dist	Columna
[27] 2021	CGO, Nano	An/Exp	TC 400,600/5 A	Toroidal
[28] 2021	CGO, Amorfo	MEF/Exp	3φ de Pot	Exp

Nota: MEF (Método de elementos finitos), Exp (Experimental), An (Analítico), Pot (Potencia), Dist (Distribución), 1φ (Monofásico), 3φ (Trifásico), CGO (Acero al silicio de grano orientado convencional), Nano (Material nanocristalino), HiB (Acero al silicio de grano orientado de alta permeabilidad), ATL (acero tratado con láser), ATEP (Acero tratado con esfera presnada), CNO (acero al silicio de grano no orientado), TC (transformador de corriente), TP (transformador de potencial).

REFERENCIAS

- [1] V. J. Gutiérrez, "Distribution system loss reduction and management in a region of Mexico," *Identidad Energética*, vol. 6, no. 1, Abril 2023.
- [2] CFE, "Reduce la CFE en 2019 el índice de pérdidas de energía eléctrica de 11.21% en 2018 a 10.97% en 2019; la meta para el 2020 es bajar en 9.9%," Comisión Federal de Electricidad. Cuauhtémoc, Ciudad de México, 19 febrero 2020. [Online] Available: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=1356>
- [3] J. C. Olivares Galván et al., "Core lamination selection for distribution transformers based on sensitivity analysis," *Electrical Engineering*, vol. 95, pp. 33-42, 2013.
- [4] R. G. Aspdén, J. A. Berger y H. E. Trout, "New texture in iron and iron base alloys," *Journal of Applied Physics*, vol. 1195, 1996.
- [5] E. Lesniewska, "Modern methods of construction problem solving in designing various types of instrument transformers," *Energies*, vol. 15, 2022.
- [6] D. Azuma, N. Ito y M. Ohta, "Recent progress in Fe-based amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 501, 2020.
- [7] E. Lesniewska y R. Rajchert, "Application of the field-circuit method for the computation of measurement properties of current transformers with cores consisting of different magnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 10, pp. 3778-3782, 2010.
- [8] Electrical induction apparatus, por S. E. Johannesen. (1929, enero 8). 1698634 [Online]. Available: Official Gazette October 1, 1929.
- [9] Transformer with parallel magnetic circuits of unequal mean lengths and loss characteristics, por Lin et al. (1980, mayo 27). 4205288 [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4205288A/en>
- [10] A. J. Moses y S. Hamadeh, "Effects of mixing materials on losses and cost of operation of three-phase transformer cores," *Journal of Applied Physics*, vol. 64, pp. 5379-5381, 1988.
- [11] P. Sankaran, V. Jagadeesh Kumar y V. Jayashankar, "Error estimation of current transformers using single or composite cores of ferromagnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no. 6, 1990.
- [12] D. Snell y A. Coombs, "The influence of core materials and mix on the performance of a 100 kVA three phase transformer core," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 349-351, 2003.
- [13] C. Jaroslaw et al., "Harmonic distortion of magnetizing current in combined wound toroidal cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, 2008.
- [14] Method of measurement of the properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens, EN60404-6, European Committee for Standardization, Bruselas, Alemania, 2003.
- [15] T. D. Kefalas, "Transformers made of composite magnetic cores: an innovative design approach," *Recent Patents on Electrical Engineering*, vol. 2, pp. 1-12, 2009.
- [16] R. Pytlech, "Mixed D-core with a distributed air gap as an alternative for medium voltage instrument transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 10, 2010.
- [17] E. E. Lesniewska y R. Rajchert, "3D field-circuit analysis of measurement properties of current transformers with axially and radially connected cores made of different magnetic materials," *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 28, pp. 1-13, 2013.
- [18] T. D. Kefalas y A. G. Kladas, "Development of distribution transformers assembled of composite wound cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, 2012.
- [19] T. D. Kefalas y A. G. Kladas, "Mixed Si-Fe wound cores five legged transformer: losses and flux distribution analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, 2012.
- [20] Magdaleno Adame et al., "Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, pp. 1737-1751, 2016.
- [21] C. Freitag y T. Leibfried, "Mixed core design for power transformers to reduce core losses," en Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017, pp. 152-158, 2017.
- [22] Magdaleno Adame et al., "Electromagnetic finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers," en IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2017), 2017.
- [23] S. Magdaleno Adame, S. P. Kumar Mokkalay y T. D. Kefalas, "Magnetic flux and core loss finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers," en Materials Science, 2017.
- [24] Themistoklis D. Kefalas y S. Magdaleno Adame, "Techno-economic comparative evaluation of mixed and conventional magnetic wound cores for three-phase distribution transformers," *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 331-339, 2018.
- [25] M. A. Çınar, "Evaluation of the technical and economic feasibility of mixed grade cores in transformer design according to 50588-1," en Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, 2021.
- [26] Medium power transformers 50 Hz, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 1: General requirements, EN50588-1, International Standard, 2017.
- [27] A. Batrashov y O. Stepankaya, "The calculate of current transformers with combined magnetic cores," *E3S Web of Conferences*, vol. 296, no. 02004, 2021.
- [28] Kobayashi et al., "Demonstration of loss reduction effect of 66 kV-classed 30 MVA three phase hybrid core transformer by trial manufacture," *IEEE Transactions on Power and Energy (Denki Gakkai Ronbunshi B)*, vol. 140, no. 4, 2021.

BIOGRAFÍAS



DAVID GONZÁLEZ SILVERIO Ingeniero Eléctrico graduado de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Villa Clara, Cuba. Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electromagnética de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México.



JUAN CARLOS OLIVARES GALVÁN Obtuvo el doctorado en el CINVESTAV, campus Guadalajara en el 2003. Fue estudiante visitante en Virginia Tech, Blacksburg, Estados Unidos en 1999 (12 meses) y profesor visitante en la University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canadá en 2014 (12 meses). Trabajó durante ocho años en la fabricación de transformadores de distribución como ingeniero de diseño. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en la UAM-Azcapotzalco y Senior Member del IEEE. Sus intereses principales de investigación están relacionados con métodos numéricos y experimentales en dispositivos electromagnéticos para mejorar su diseño, fabricación, mantenimiento y diagnóstico.



VÍCTOR MANUEL JIMÉNEZ MONDRAGÓN Nació en Atizapán de Zaragoza, Estado de México, México 1986. Se graduó como Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en 2009 y de la Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México en 2013 y 2017 respectivamente. Realizó una estancia de doctorado de agosto a diciembre de 2016 en la Universidad de Lorraine, en Francia. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Energía de la UAM, Unidad Azcapotzalco. Sus áreas de investigación son electromagnetismo computacional y el análisis, control y simulación de dispositivos electromagnéticos de baja frecuencia.



DAVID ANTONIO ARAGÓN VERDUZCO En 2008, recibió el grado de Licenciado en Ingeniería Eléctrica por la UAM-AZC. En 2016 y 2020 obtuvo el grado en Maestro y Doctor en Ingeniería eléctrica por la UNAM, respectivamente. Cuenta con más de 8 años de experiencia en el sector industrial en áreas de R&D en diferentes empresas fabricantes de motores y transformadores, en media y alta tensión. Actualmente trabaja como Profesor-Investigador en el departamento de energía de la UAM-AZC. Es miembro de la IEEE.