



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4.2422>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de revisión

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

Critical Review on Trends in Gas-Insulated Three-Phase Power Transformers

Revisão crítica sobre tendências em transformadores trifásicos Energia com isolamento de gás

Renán Zambrano ^I
rzambrano8856@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3180-7523>

Yolanda Llosas ^{II}
yolanda.llosas@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5713-0565>

Manuel S. Alvarez-Alvarado ^{III}
manuel.alvarez.alvarado@ieee.org
<https://orcid.org/0000-0002-0398-9235>

Correspondencia: rzambrano8856@utm.edu.ec

***Recibido:** 28 de octubre de 2021 ***Aceptado:** 18 de noviembre de 2021 *** Publicado:** 05 de diciembre de 2021

- I. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Doctor en Ciencias Técnicas, Ingeniero Electricista, Docente Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Magister en Enseñanza de la Física, Doctor of Philosophy Major in Electrical Power Systems, Doctorado en Ciencias en Física Educativa, Master Of Science In Power And Energy Systems, Ingeniero en Electricidad Especialización Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

Resumen

El presente artículo de revisión crítica tiene como objetivo realizar una búsqueda literaria referente a los transformadores aislados en gas, describiendo los elementos más importantes, así como los hallazgos y conclusiones de diferentes investigaciones relativas al tema a lo largo del tiempo. Para este propósito, se utilizaron los motores de búsqueda de revistas indexadas como Semantic Scholar, ScienceDirect, Acarindex, entre otras. La metodología empleada fue de tipo bibliográfica, la cual condujo a la selección de 25 artículos científicos, publicados entre 2017 y 2021. El análisis de las investigaciones permitió identificar los elementos más relevantes que sirvieron de base para el desarrollo del presente artículo. Esta búsqueda facilitó información para la construcción de un cuadro resumen con las evidencias encontradas, lo que orientó la discusión de resultados, resaltando el hecho que en varios países se han aplicado cambios en el diseño y construcción de transformadores con el propósito de optimizar sus niveles de factibilidad y efectividad, entre ellos la disminución en su tamaño y volumen, así como en los costos y en la posibilidad de contaminación ambiental. Algunas de las propuestas destacadas en los artículos reseñados fueron los que incorporan aislantes a base de gas, por ejemplo, el Hexafluoruro de azufre (SF₆). Algunos estudios demostraron que este gas es rentable y más ligero que el tradicional de la resina epoxi fundida, sin embargo, otros autores demuestran ciertas desventajas por lo que se sigue optimizando las investigaciones.

Palabras clave: transformador; aislante a gas; diseño; Hexafluoruro de azufre (SF₆); resina epoxi fundido.

Abstract

The objective of this critical review article is to carry out a literary search regarding gas insulated transformers, describing the most important elements, as well as the findings and conclusions of different investigations related to the subject over time. For this purpose, the search engines of indexed journals such as Semantic Scholar, ScienceDirect, Acarindex, among others, are used.

The methodology used was bibliographic, which led to the selection of 25 scientific articles, published between 2017 and 2021. The analysis of the research allowed to identify the most relevant elements that served as the basis for the development of this article. This search provided information for the construction of a summary table with the evidence found, which guided the discussion of results, highlighting the fact that in several countries changes have been applied in the design and construction of transformers in order to optimize their levels of feasibility and effectiveness, including

the decrease in size and volume, as well as in costs and the possibility of environmental contamination. Some of the proposals highlighted in the articles reviewed were those that incorporate gas-based insulators, for example, sulfur hexafluoride (SF₆). Some studies have shown that this gas is cost-effective and lighter than the traditional molten epoxy resin, however, other authors show certain disadvantages, which is why research continues to be optimized.

Keywords: transformer; gas insulator; design; sulfur hexafluoride (SF₆); cast epoxy resin.

Resumo

O objetivo deste artigo de revisão crítica é realizar uma pesquisa literária sobre transformadores isolados a gás, descrevendo os elementos mais importantes, bem como os achados e conclusões de diferentes investigações relacionadas ao assunto ao longo do tempo. Para tanto, foram utilizados os buscadores de periódicos indexados como Semantic Scholar, ScienceDirect, Acarindex, entre outros. A metodologia utilizada foi bibliográfica, o que resultou na seleção de 25 artigos científicos, publicados entre 2017 e 2021. A análise da pesquisa permitiu identificar os elementos mais relevantes que serviram de base para o desenvolvimento deste artigo. Essa busca forneceu subsídios para a construção de um quadro-resumo com as evidências encontradas, que nortearam a discussão dos resultados, destacando-se o fato de que em diversos países foram aplicadas mudanças no projeto e na construção de transformadores a fim de otimizar seus níveis de viabilidade e eficácia, incluindo a diminuição do tamanho e do volume, bem como dos custos e da possibilidade de contaminação ambiental. Algumas das propostas destacadas nos artigos revisados foram aquelas que incorporam isolantes à base de gás, por exemplo, hexafluoreto de enxofre (SF₆). Alguns estudos mostraram que esse gás é mais econômico e mais leve que a tradicional resina epóxi fundida, porém, outros autores apresentam algumas desvantagens, por isso as pesquisas continuam sendo otimizadas.

Palavras-chave: transformador; isolador de gás; Projeto; Hexafluoreto de enxofre (SF₆); resina epóxi fundida.

Introducción

El aumento de la demanda de energía eléctrica en las grandes ciudades, la falta de espacio para construir nuevas subestaciones o mejorar las existentes, las condiciones ambientales adversas a las que se enfrentan actualmente las comunidades han impulsado una tendencia en las zonas urbanas

pobladas a esconder bajo tierra las subestaciones de gran tamaño. Esto ha llevado a una creciente demanda de transformadores incombustibles y no explosivos, de gran capacidad y aislados por gas (GIT) para prevenir accidentes y asegurar la compactación de los equipos.

La motivación de la realización del tema de investigación, referido a la revisión de artículos científicos sobre transformadores con aislamiento de gas, viene dado por la inquietud de conocer las ventajas que posee el uso de gas como aislante, así como indagar los distintos gases utilizados, su compatibilidad con el entorno ambiental, el grado de combustión, tamaño, diseño y eficiencia. Asimismo, la relevancia del estudio se enfoca en el aporte teórico y metodológico que brinda a futuros investigadores sobre temas similares.

Transformadores de potencia

En este apartado se presentan diferentes investigaciones que se acercan, desde diferentes perspectivas, al problema, a fin de conducir al posicionamiento teórico y la definición de los conceptos propios del tema seleccionado

Primeramente, se reseña el artículo de Qi et al. (2017), quienes explican que el transformador de potencia eléctrico (EPT) (*Electric Power Transformer*, por sus siglas en inglés), genera preocupaciones por su notable tamaño y volumen reducido en comparación con los transformadores de frecuencia de línea tradicionales. El alto voltaje y la alta potencia hacen que el diseño de aislamiento de Transformadores de media frecuencia (MFT) (*Medium Frequency Transformers*, por sus siglas en Inglés), sea más difícil. En este artículo se analiza en detalle la influencia del tipo de alambre y la estructura del devanado entrelazado en el campo eléctrico y la distribución de MFT.

Asimismo, los autores investigan los devanados no intercalados con diferentes tipos de cables utilizando un método de elementos finitos 2-D (FEM). Además, se obtienen las máximas intensidades de campo eléctrico y comparado. Los resultados mostraron que, en este estudio de caso, en comparación con el conductor de lámina, se puede lograr la máxima intensidad de campo eléctrico utilizando un conductor Litz en el devanado secundario.

Seguidamente, se destaca el artículo científico de Özgonenel & Thomas (2017), para la Revista Turca de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación, referido a la Modelización y simulación de un transformador de 2,5 MVA con aislamiento de gas SF₆, cuyos objetivos fueron proponer un diseño de transformador con aislamiento de gas SF₆ (GIT) en modelos complejos de transformadores de

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

distribución e investigar la presión de gas óptima para maximizar el nivel de aislamiento y los límites de tensión de ruptura.

El siguiente, es otro artículo científico de Özgönenel et al (2018), quienes propusieron un diseño de transformador de distribución de 50 kVA aislado con gas SF₆, con el objetivo de diseñar la tensión de medida modular del transformador a nivel de media tensión y operarlo de forma segura dentro del cuadro de distribución. Los principios de diseño del transformador de tensión con aislamiento de gas SF₆ (optimizado) se han elaborado de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de simulaciones por ordenador. El transformador de instrumentos de voltaje o transformador de potencial (Tp) con aislamiento de gas SF₆ fue diseñado, implementado y probado electrostáticamente, el modelo consta de burbujas de aire, dentro de la resina epoxi se utiliza para pruebas simuladas. Las pruebas simuladas mostraron que el gas SF₆ aislado es rentable, más ligero que el de la resina epoxi fundida.

Asimismo, se presenta la investigación de Li et al (2018) que plantea que los problemas ambientales causados por los gases de efecto invernadero han recibido una atención sin precedentes, Hexafluoruro de azufre (SF₆), que es el gas preferido para su uso en subestación de control con aislamiento de gas (disyuntores, interruptores de desconexión, etc. para circuitos eléctricos de alta tensión), tiene un posible de calentamiento global muy alto y hay un gran esfuerzo internacional para encontrar gases alternativos, se hace cita de este tema ya que los equipos eléctricos que usan el SF₆ están buscando otras alternativa que sean más generosos con el entorno ambiental.

Por su parte, el artículo de Bolotinha (2018) pretende llamar la atención de las empresas de servicios públicos y de su personal técnico sobre las ventajas de la instalación de transformadores aislados con gas en las subestaciones, y los principales beneficios medioambientales. El artículo también presenta las más importantes características y componentes de estos transformadores, así como el ahorro en los costos de mantenimiento que puede lograrse mediante el uso de transformadores aislados con gas. Se resalta el trabajo desarrollado por Di Capua y Femia (2018), en este estudio se presenta un modelo novedoso para el diseño de transformadores de potencia. Se basa en el uso de dos factores de forma geométrica o GFF por sus siglas en inglés (*Geometric Form Factors*, a saber: KF y KC, el factor K es un indicador que permite estimar el volumen que tiene un transformador de soportar los efectos térmicos producidos por las corrientes armónicas, asociado a núcleos magnéticos forma y material. El transformador magneto-electro- no lineal se resuelve numéricamente para identificar el comercial.

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

El modelo termo-magnético núcleo cuyos GFF permiten minimizar el tamaño de un transformador personalizado, bajo determinadas especificaciones térmicas y de pérdida de potencia.

El estudio realizado por Saldívar (2018), propone una visión general de las pérdidas en vacío y con carga del transformador de distribución, el potencial de ahorro, las opciones tecnológicas para la mejora, y una comparación de algunos de los programas de eficiencia a nivel mundial. El proyecto va dirigido al personal de la industria de energía que trabaja en el desarrollo de programas de ahorro de energía en el mercado eléctrico mexicano. La investigación propone determinar el nivel óptimo de los transformadores dependiendo del perfil de carga, las pérdidas asociadas y el costo inicial de los equipos.

Por otro lado, Song et al (2018) explican que el gas SF₆ se usa ampliamente en aparatos de energía eléctrica como medio de aislamiento y extinción de arco. Sin embargo, la aplicación de gas SF₆ enfrenta dos problemas serios, incluido el fuerte efecto del calentamiento global y alta toxicidad de sus productos de descomposición. El avance de la investigación actual del principal gas alternativo ha sido resumido en este documento. Y eso se resume en detalle en términos de propiedades físicas y químicas, propiedades aislantes, características del arco, mecanismo y el alcance y limitaciones de diferentes alternativas

El estudio concluye que la mezcla de N₂ y unos pocos SF₆, se puede usar aire comprimido, como medio aislante en equipos de energía eléctrica, pero aislamiento la fuerza de esos gases es relativamente baja. Además, para mantener suficiente resistencia de aislamiento, mayor presión de gas y mayor. A su vez, se requiere volumen de equipo. Al mismo tiempo, solucionando fugas y la recarga de gases mezclados es el principal problema técnico.

En contraste, el artículo de Khan et al (2019), expone que la industria de la energía eléctrica utiliza ampliamente sistemas aislados en gas para la transmisión y distribución de energía eléctrica. En la tecnología de alto voltaje, el aislamiento de gas está dominado por hexafluoruro de azufre (SF₆) desde principios de los 60. Es un gas de efecto invernadero y tiene una larga vida atmosférica. Este documento propone un gas R410 comparativamente más respetuoso con el medio ambiente como alternativa al SF₆ para aplicaciones de alto voltaje.

El Shafei et al. (2019), realizaron un artículo que presenta el diseño de un transformador monofásico de 330kW (correspondiente a 1MW trifásico) operando a 50kHz, se investigan los posibles materiales del núcleo y sus los rendimientos de baja y alta frecuencia de conmutación. Se estudia el volumen

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

central, el área, la configuración y la disponibilidad mercado para lograr el modelo de transformador óptimo, compacto y rentable. A su vez, se analizó el tipo de devanado del transformador, tamaño, la colocación y el costo. Estos pasos resultaron en un diseño y modelado electromagnético de transformadores completos. Posteriormente, se creó y simuló un prototipo de transformador 3D utilizando una herramienta de análisis de elementos finitos (FEA). ANSYS Maxwell-3D se utilizó para simular el magnetismo, la electrostática y los transitorios del transformador diseñado.

Seguidamente se menciona el artículo científico de Guney & Ozgonenel (s. f.), que propone un diseño de transformador con aislamiento de gas (GIT) R410A en modelos de transformadores de distribución complejos e investiga la presión de gas óptima para maximizar el nivel de aislamiento y los límites de tensión de ruptura para un prototipo de transformador de distribución determinado.

Los autores concluyen que los transformadores de energía y distribución son los componentes clave de las redes eléctricas, y cualquier falla en ellos puede causar resultados catastróficos y pérdida de ganancias. Para un transformador saludable, tanto los aspectos eléctricos como mecánicos juegan un papel importante en el desempeño de la red eléctrica.

El R410A se utiliza como material aislante dentro del tanque. El análisis electrostático se realiza en modelos 3-D, mientras que el análisis de calor se logra en los modelos 2-D debido a la gran carga computacional. El método de elementos finitos con las ecuaciones dinámicas asociadas se utilizó para análisis electrostático y térmico.

Del mismo modo, el artículo científico de Bermúdez & Alcocer (2019), cuyo objetivo fue elaborar un modelo tridimensional de transformador de potencia en software ANSYS MAXWELL, basado en sus características (geometría y materiales), se halla un circuito que permita validar las condiciones nominales, especificaciones de placa. Los autores explican que, la simulación se realiza con el propósito de diseñar un transformador modelo de potencia y exponerlo a diferentes condiciones de trabajo.

Para generar aproximaciones que faciliten caracterizar las curvas de magnetización a determinadas condiciones, variando los parámetros de diseño (geometría) y los parámetros eléctricos (circuito característico). A partir del modelo circuital se logra un método al que se le ingresan datos, que simulan parámetros establecidos por los autores, consiguiendo observar el comportamiento en la simulación magnética y como se vería afectado el transformador por estos fenómenos.

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

Los autores finalizan enfatizando que es necesario considerar que el método de elementos finitos no genera una solución exacta del problema a simular. Lo que hace es formar una aproximación del comportamiento que se puede tener en realidad, ya que este modelado tiene simplificaciones. Los autores resaltan que la industria de la energía eléctrica utiliza ampliamente sistemas con aislamiento de gas para la transmisión y distribución de energía eléctrica. En la tecnología de alto voltaje, el aislamiento de gas está dominado por hexafluoruro de azufre (SF₆) desde principios del 60.

Bal et al. (2019) plantean que los transformadores de tipo aceite tienen desventajas como aislamiento, peso, tamaño, pérdidas, calentamiento y fuerzas de torsión. El diseño y el modelado de transformadores tienen gran importancia en la solución de tales problemas. En este estudio se plantea el modelado y análisis electromagnético de transitorios de un transformador de distribución de aceite trifásico con una capacidad de potencia de 25 kVA utilizando el programa de simulación ANSYS Maxwell. El modelo de transformador, las pérdidas, los voltajes, las corrientes y el flujo magnético del transformador diseñado se presentan en los resultados de la simulación.

El método de elementos finitos o FEM, por sus siglas en inglés, es un método numérico sustentado en el cálculo variacional, que se utiliza en la respuesta en los conflictos de derivadas parciales con condiciones de borde, con diferentes características del vector potencial magnético en una frontera predefinida (Bal et al., 2019).

El resultado del flujo magnético de este estudio se valida mediante la comparación de estudios similares en la literatura. Este documento proporciona una ventaja como guía para los investigadores e ingenieros que realizan el modelado y análisis de transformadores en un programa de simulación como ANSYS.

Del mismo modo, Orosz et al. (2019), realizaron un estudio científico, con el objetivo de optimizar el diseño del transformador de potencia basada en la huella de carbono para un problema realista de selección de transformadores de subestación. Se utiliza un método meta-heurístico de optimización de transformadores de dos bobinas para calcular los parámetros clave de diseño óptimos del transformador.

Los autores agregan que, el diseño de máquinas eléctricas con baja huella de carbono es un tema de actualidad en la industria. El costo general de propiedad es la metodología estandarizada para considerar los costes la vida útil de un transformador de potencia ya en la fase de diseño previa al

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

concepto. Todavía no existe un método ampliamente aceptado para calcular la huella de carbono de los transformadores de potencia (Orosz et al., 2019).

Se describe el estudio de Patel et al. (2020) quienes explican que el Transformador Sen (ST) fue introducido por el Dr. Kalyan Sen para controlar la corriente de energía en la línea de transmisión. El ST proporciona una verdadera necesidad de dominio de corriente de energía óptimo que se caracteriza por ser un dispositivo confiable, eficiente y menos costoso.

El primario de ST está conectado en derivación con la línea de transmisión, que se energiza continuamente con el núcleo del transformador. Como ST está conectado con la línea de transmisión durante 24 horas, se produce una disminución constante de energía sin carga en ST. Debido a una pérdida expresiva de energía y una influencia desafortunada de las disminuciones en el rendimiento de ST, se examina la pérdida significativa del núcleo (sin pérdida de carga) como un factor de juicio. No solo con suministro de entrada puro, sino también con armónicos en suministro e incluso en condiciones de sobreexcitación, se debe examinar el comportamiento de ST.

Del mismo modo, se presenta el trabajo de investigación de Camara (2020), el autor menciona que los microhilos amorfos fabricados a partir de aleaciones ferromagnéticas a base de hierro tienen propiedades magneto-anisotrópicas y de impedancia de alta frecuencia muy exclusivas que los hacen muy atractivos para aplicaciones de electrónica de potencia. Estos efectos se exploran para la creación de nuevos inductores y transformadores.

En este trabajo, el foco estuvo en el estudio del acoplamiento magnético por magnetización anisotrópica. Los resultados confirmaron que la magnetización depende del ángulo, en el que el eje magnético fácil en el trascurso del eje z exhibe propiedades anisotrópicas y exhibe propiedades isotrópicas en los ejes x y. Utilizando simulaciones 3D del método de elementos finitos (FEM) (*Finite Element Method* por sus siglas en inglés) esta investigación comparó el micro alambre magnético con los núcleos de ferrita y metglas (núcleo de metal amorfo) el metglas se diferencia de los metales tradicionales.

Por su parte, Taha et al (2020), exponen que la consecuencia de las actividades de descargas parciales dentro del transformador puede resultar en una falla catastrófica. La ubicación exacta de la descarga parcial se basa en el cálculo preciso de la diferencia de tiempo de llegada entre las señales en diferentes sensores acústicos, por lo tanto, la correlación cruzada generalizada El enfoque se utiliza para determinar con precisión la diferencia de tiempo de llegada entre las señales del sensor. Reducir

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

los errores de ubicación del sensor, son necesarios para identificar la ubicación exacta de la fuente de descarga parcial 87 ubicaciones de fallas de descarga parcial con 13 ubicaciones de sensores sugeridas se presentan para determinar la mejor ubicación de los sensores.

Los autores realizaron trabajos experimentales para verificar la robustez del modelo. El error máximo del modelo propuesto para determinar la ubicación exacta de la descarga parcial es 2,74 cm con un 20% de ruido de incertidumbre. Por otro lado, el error máximo de otra literatura. Los modelos miden unos 7 cms con los mismos ruidos de incertidumbre.

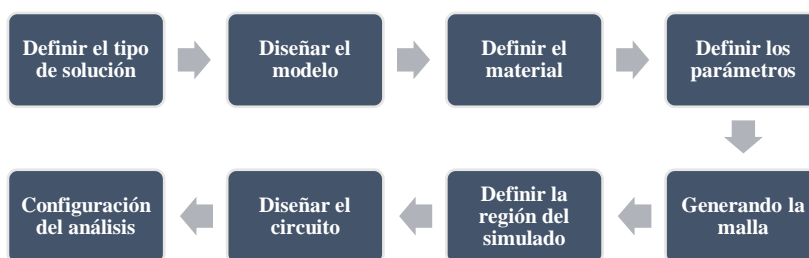
El estudio de Urooj et al (2020), expone que debido al comportamiento complaciente de los materiales del núcleo y las pérdidas que conduce a la degradación de la eficiencia del transformador. Este artículo de investigación evalúa el rendimiento óptimo del transformador con el diseño de un material de núcleo nuevo llamado Mo.Me6. Se observó una posibilidad de incremento en la eficiencia para el modelo de transformador propuesto diseñado. Asimismo, un estudio analítico comparativo basado en los diferentes diseños de transformador tipo núcleo con varios materiales del núcleo.

El diseño y la evaluación se realizó en la plataforma de escritorio electrónica Maxwell ANSYS, que proporciona un diseño optimizado de transformador para aplicaciones prácticas. Ya sea que se trate de un transformador de potencia con aplicaciones de frecuencia más baja, uso en circuitos electrónicos como circuitos rectificadores o circuitos de distribución de potencia de aplicaciones de frecuencia más alta, etc. Todos los diseños de transformadores requieren una evaluación del rendimiento en el campo de trabajo y una mejor eficiencia para optimizar el núcleo de tipo trifásico general transformador. Para un funcionamiento más eficiente y efectivo del transformador, este documento sugiere el diseño del núcleo con técnicas ANSYS para lograr la alta eficiencia mencionada con menores pérdidas.

Ariani et al (2020) realizaron un estudio con el propósito de verificar los cálculos teóricos de un transformador trifásico, analizando sus comportamientos de campo magnético y pérdidas sin carga y condiciones de trabajo de carga completa utilizando un avanzado programa de simulación que se ejecuta en base a elementos finitos método (FEM). Este documento presentó explicaciones detalladas sobre la definición de los parámetros y la obtención de los resultados, también el método de cálculo para determinar la magnitud del campo magnético y del núcleo y pérdidas óhmicas del transformador. La fiabilidad del análisis está confirmada por resultados de cálculo teórico. Los autores concluyen que, en general, el modelo FEM propuesto podría usarse para representar la respuesta de frecuencia

medida mejor que las regiones de frecuencia de modulación MTL basadas en el gráfico de frecuencia y el análisis de errores. De acuerdo con los autores, el modelado y análisis de un transformador con ANSYS Maxwell, se realizan generalmente de acuerdo con el diagrama de flujo de la Figura 1.

Figura 1 Análisis de un transformador



Fuente: basado en Ariani et al (2020).

El artículo de Srikanta et al (2020) propone un enfoque alternativo para extraer los parámetros de resistencia (R), capacitancia (C) y conductancia (G) del devanado del transformador basado en el método de elementos finitos (FEM). La capacitancia y conductancia se basan en el Método Múltiple Rápido (FMM) y el Método de Momento (MoM) mediante un enfoque cuasielectrostático. Las inductancias A y se calcularon en base a MoM mediante un enfoque cuasi-magnetostático. Las ecuaciones de Maxwell calcularon las resistencias e inductancias de CC. Con base en los parámetros calculados por FEM, la respuesta de frecuencia se obtuvo mediante la función de diagrama de Bode. Los autores concluyeron que, en general, el modelo FEM propuesto podría usarse para representar la respuesta de frecuencia medida mejor que las regiones de frecuencia de modulación MTL basadas en el gráfico de frecuencia y el análisis de errores.

El trabajo de Zhang et al. (2021) resalta que el análisis del producto de descomposición del SF₆ es uno de los métodos más convenientes y eficientes para diagnosticar las posibles fallas de SF₆ del equipo eléctrico aislado en la etapa inicial. Basado en SF₆ análisis de gas característico de descomposición, el estado de funcionamiento de SF₆. Los equipos de potencia aislados pueden juzgarse mediante el monitoreo en línea, a fin de garantizar su funcionamiento normal. La tecnología

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

de análisis de espectro Raman puede realizar la detección no destructiva de muestras de gas con un láser de longitud de onda única. Tiene una excelente aplicabilidad y alta eficacia para la detección de SF₆ componentes característicos de descomposición.

Guney & Ozgonenel (2021) plantean en su artículo que las empresas de electricidad de todo el mundo buscan constantemente formas de proporcionar electricidad de manera más segura y eficiente al tiempo que reduce la afectación del entorno natural. Los aceites minerales tienen el aislamiento de transformador más popular, con excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, pero tienen muchos problemas, como alta inflamabilidad, problemas importantes de limpieza y son tóxicos para los peces y vida salvaje. Este artículo presenta un enfoque alternativo al aceite mineral: un diseño de transformador que es limpio y ofrece un mejor rendimiento y beneficios medioambientales. A 50 kVA, 34,5 / 0,4 kV gas.

El transformador de distribución aislado fue diseñado y evaluado utilizando el sistema multifísico COMSOL ambiente. Se utilizó R410A como material aislante. R410A es una combinación casi azeotrópica de difluorometano (CH₂F₂, llamado R-32) y pentafluoroetano (C₂HF₅, denominado R-125), que se aplica como refrigerante en utilidades de aire acondicionado. Tiene excelentes propiedades incluyendo ambientalmente amigable, sin agotamiento del ozono, bajo efecto invernadero, no explosivo y no inflamable.

Los resultados de la simulación muestran que el transformador aislado R410A se compara bien con SF₆ y aceite, y tiene un gran potencial como aislante dado que es compatible con el ecosistema, barato y de bajo mantenimiento. Los autores creen que este estudio proporciona los conocimientos necesarios para diseñar y fabricar transformadores aislados en gas R410A.

Seguidamente, Kaur and Kaur (2021), realizaron un estudio donde explican que el transformador es el aparato principal del sistema de energía tanto para la transmisión como para la distribución de energía eléctrica. Es el componente importante de la ingeniería eléctrica debido a su alta eficiencia y ayuda a intensificar y reduce el voltaje, la adaptación de impedancia y el aislamiento del circuito. Equipo de diseñadores, ingenieros y edificación los propietarios lucharon por un alto rendimiento para maximizar la eficiencia del transformador. El diseño y selección del material para construir un núcleo de transformador es un proceso significativo. El estudio arrojó algo de luz sobre el uso de estos materiales para núcleo, ya que muestran pérdidas reducidas en el transformador.

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

Özüpak et al. (2021), realizaron un artículo donde plantean que los transformadores son uno de los elementos más importantes de los sistemas de transmisión y distribución de energía, se pueden producir como resultado de estudios a largo plazo y de alto costo. Es necesario conocer las propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas de un transformador en el procedimiento de fabricación. En este trabajo se utilizó el software ANSYS Maxwell 3D basado en el método de elementos finitos (FEM) y ampliamente utilizado en la simulación de transformadores. Con este software, se pretende investigar la densidad del campo magnético, la capacidad del campo magnético, las líneas de flujo magnético, los valores de densidad de corriente en la bobina y el núcleo del transformador y los efectos de estos valores en las pérdidas del transformador. Se observó que los resultados del estudio experimental y los resultados del modelo creado en el programa se confirmaron entre sí.

Finalmente, el estudio de Ching y Chien (2021), reveló que los transformadores de potencia juegan un componente indispensable en los sistemas de transmisión de CA. Si la condición de funcionamiento de un transformador de potencia se puede predecir con precisión antes de que el equipo sea operado, ayudará a los fabricantes de transformadores a diseñar transformadores de potencia optimizados. En el diseño óptimo del transformador de potencia, el valor de diseño de la densidad de flujo magnético en el núcleo es importante y afecta la eficiencia, el costo y el ciclo de vida. Por lo tanto, este artículo utilizó el software de ANSYS Maxwell para resolver la distribución instantánea de la densidad del flujo magnético, la distribución de la pérdida del núcleo y la pérdida total de hierro del núcleo de hierro basándose en el método de los elementos finitos en el dominio del tiempo.

Además, los autores proponen una nueva ecuación de excitación externa. La nueva ecuación de excitación externa puede mejorar la precisión de los resultados de la simulación y reducir el tiempo de simulación. Finalmente, se desarrolló el transformador trifásico de cinco brazos, que mide la densidad de flujo magnético local y la pérdida total del núcleo para verificar la viabilidad del método de elementos finitos propuesto de modelo y parámetros de simulación.

La presentación resumida de la revisión bibliográfica se detalla en la Tabla 1.

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

Tabla 1 Revisión bibliográfica

N°	Autor, año	Título	Elementos clave	Hallazgos
1	Qi et al. (2017)	Medición de la intensidad del campo eléctrico en aceite de transformador bajo tensión de impulso	-Transformador de potencia eléctrico -Estructura del devanado entrelazado en el campo eléctrico -Influencia del tipo de alambre utilizado (Litz) - Distribución de transformadores de media frecuencia	Mejora de la distribución del campo eléctrico en los transformadores
2	Özgönel, O., and Thomas, D. (2017).	Modelado y simulación de transformador aislado en gas SF6 de 2,5 MVA	-Modelado y simulación de un transformador -Aislamiento en gas SF6 -Maximizar el nivel de aislamiento y los límites de tensión de ruptura	Las resinas fundidas en aceite mineral presentan desventajas: punto de ignición bajo, costo de aislamiento adicional, toxicidad y riesgo de explosión
3	Özgönel et al (2018)	Diseño e implementación de instrumento de media tensión en Transformador aislado con gas SF6	-Transformador de distribución de 50 KVA aislado con gas SF6 - Tensión de medida modular - Elevar el nivel de seguridad del personal técnico - Simulación por computadora	El gas aislante SF6 es rentable, más ligero que el de la resina epoxi fundida.
4	Li et al (2018)	Gases alternativos al SF6 para aplicación en engranajes con aislamiento de gas	- Gas SF6 - Efecto invernadero - Pruebas con gases alternativos	Se presenta una discusión y perspectivas sobre la investigación actual y las direcciones de investigación futuras.
5	Bolotinha (2018)	Transformadores con aislamiento en gas	-Ventajas del uso de gas como aislante en transformadores - Subestación aislada en gas -Hexafluoruro de azufre -Enfriadores de gas	Reducción en costos de mantenimiento Ahorro en tiempo Ahorro en espacio Resistencia a riesgos adversos
6	Di Capua, G. and Femia N. (2018)	Diseño de transformadores de potencia basado en factores de forma geométrica	-Factores de forma geométrica -Estimación del volumen del transformador -Soporte de efectos térmicos	Existen limitaciones en el modelo de transformador termo-magnético propuesto: el sobrecalentamiento
7	Saldívar (2018)	Estudio de niveles de eficiencia en transformadores de distribución en función del perfil de carga	- Pérdidas en vacío -Carga del transformador -Potencial de ahorro -Opciones de mejora tecnológica	Elementos involucrados en la eficiencia del transformador: diseño, costos, materiales, volumen y peso. Se sugieren nuevos métodos para determinar la capacidad y la eficiencia requerida en los transformadores de distribución según su aplicación.
8	Song et al (2018)	Una opinión sobre las bases de sustitución de SF6 y el estado de	- Gas SF6 -Calentamiento -Toxicidad	En la búsqueda de alternativas al SF6, se analizaron las propiedades físicas, químicas y las aislantes, características del

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

		investigación de los gases de CF3		arco y las limitaciones de las alternativas
9	Khan et al (2019)	Análisis de las propiedades dieléctricas del gas R410A como alternativa al SF6 para aplicaciones de alta tensión	-Gas SF6-efecto invernadero -Gas R410A-empático con el ambiente	Se probó la rigidez dieléctrica del R410A en comparación con el SF6, revelando mayor efectividad y protección ambiental con el primero
10	El Shafei et al. (2019)	Diseño de transformador de alta frecuencia y alta potencia para aplicaciones de transformadores de estado sólido	-Transformador monofásico de 330kW -Materiales del núcleo -Rendimiento de baja y alta frecuencia -Tipo de devanado, volumen y costo	Se crea y simula un prototipo de transformador 3D utilizando el método de elementos finitos y el software ANSYS Maxwell-3D, revelando pérdidas de cobre en el núcleo
11	Guney y Ozgonenel (s. f.).	Diseño de transformador de distribución con aislamiento de gas R410A	-Transformador con aislamiento de gas (GIT) R410A -Modelos de distribución complejos -Presión de gas óptima maximizar el nivel de aislamiento y los límites de tensión de ruptura para un prototipo de transformador de distribución determinado.	Los transformadores de energía y distribución son los componentes clave de las redes eléctricas El gas aislante R410A utilizado en el simulado en 3D con el método de elementos, reveló resultados de eficiencia óptimos
12	Bermúdez y Alcocer (2019)	Co-simulación Magnética y Circuital de un Modelo de Transformador de Potencia en Software ANSYS Maxwell	-Simulado de Transformador tridimensional -Software Ansys Maxwell -Modelo circuital para detectar comportamiento	La simulación demuestra que tiene un comportamiento similar al transformador real, con mínimo porcentaje de error El gas aislante dominante es el SF6
13	Bal et al (2019)	Modelado de transformadores de distribución trifásicos y análisis de transitorios electromagnéticos con ANSYS Maxwell	-Transformadores de tipo aceite -Desventajas: aislamiento, peso, tamaño, pérdidas, calentamiento y fuerzas de torsión -Software Ansys Maxwell	El modelado del transformador con el software utilizado resultó muy similar al real Se recomienda el uso de este software para futuras investigaciones
14	Orosz et al (2019)	Optimización del diseño de transformadores de potencia para la huella de carbono	-Optimizar el diseño del transformador de potencia -Huella de carbono - Método meta-heurístico	El volumen pequeño y eficiencia regular optimizan el funcionamiento a nivel global, por el bajo costo y baja contaminación Existen dificultades para calcular la huella de carbono de los transformadores de potencia
15	Patel et al (2020)	Diseño y análisis de transformador Sen utilizando método de	- Transformador Sen - Controla la corriente	Se reveló pérdida significativa del núcleo con el uso de este transformador

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

		elementos finitos y cálculo de pérdida sin carga	- Dispositivo confiable, eficiente y menos costoso	
16	Camara (2020)	Análisis de simulación electromagnética tridimensional de microhilos ferromagnéticos amorfos	- Aleaciones ferromagnéticas a base de hierro - Acoplamiento magnético por magnetización anisotrópica	Se proporcionó información detallada sobre la configuración geométrica, las suposiciones realizadas, los resultados obtenidos por el software y las discusiones analíticas. Los materiales utilizados resultaron de alta permeabilidad, resistencia, dureza y flexibilidad
17	Taha et al (2020)	Determinación mejorada de la ubicación de descargas parciales para aceites aislantes de transformadores considerando las asignaciones e incertidumbres de las mediciones acústicas	- Descarga parcial del núcleo -Cálculo preciso del tiempo de llegada -Enfoque de correlación cruzada generalizada -Disminución de fallas	Se realizan trabajos experimentales que comprueban la disminución del ruido y otras fallas
18	Urooj et al (2020)	Diseño óptimo de transformador de potencia con material de núcleo avanzado utilizando la técnica ANSYS	- Deficiencia de los materiales del núcleo - Eficiencia del transformador	Se observa una posibilidad de incremento en la eficiencia para el modelo de transformador propuesto diseñado. El programa Maxwell ANSYS, proporciona un diseño optimizado de transformador
19	Ariani et al (2020)	Análisis de rendimiento de un transformador de distribución usando Ansys Maxwell	-Comportamientos de campo magnético -Pérdidas sin carga -Condiciones de trabajo de carga -Método de elementos finitos -Software Ansys Maxwell	Este estudio valida el transformador diseñado para comprender el comportamiento del transformador para futuros análisis, optimización y desarrollos.
20	Srikanta et al (2020)	Extracción de parámetros de devanado para transformador de 33/11 kV, 30 MVA basado en el método de elementos finitos para el modelado de respuesta de frecuencia	- Parámetros de resistencia (R), capacitancia (C) y conductancia (G) del devanado del transformador -Método de elementos finitos	Se encuentra que el modelo método de elementos finitos de frecuencia simulada está bastante cerca de la respuesta de frecuencia medida en las regiones de frecuencia baja y media en comparación con la respuesta de frecuencia
21	Zhang et al (2021)	Espectros Raman de productos característicos descompuestos SF	-Descomposición del SF6 -Funcionamiento y fallas del SF6 -Espectro Raman (láser de onda)	El espectro Raman de SF es confiable y proporciona una referencia para la detección

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

		basados en la teoría funcional de la densidad		cuantitativa de descomposición. del SF
22	Guney y Ozgonenel (2021)	Diseño de transformador con aislamiento de gas ecológico	-Equipos eléctricos ecológicos -Problemas de combustión y toxicidad	El transformador aislado R410A se compara bien con SF6 y con aceite, teniendo un gran potencial como aislante dado que es compatible con el ecosistema, barato y de bajo mantenimiento.
23	Kaur y Kaur (2021)	Diseño basado en el método de elementos finitos y simulación de un transformador práctico con núcleo nanocristalino utilizando ANSYS	-Transmisión y distribución de energía eléctrica -Selección de materiales nano cristalinos como FINEMET y VITROPERM para construir un transformado eficiente -Software Ansys Maxwell	Los resultados arrojaron pérdidas escasas en el núcleo, siendo provechoso el uso de estos materiales y el software aplicado
24	Özüpak et al (2021)	Análisis de transformador de circuito electrónico con elementos experimentales y finitos	- Propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas - Software ANSYS Maxwell 3D -Método de elementos finitos	Se observó que los resultados del estudio experimental y los resultados del modelo creado en el programa se confirmaron entre sí.
25	Ching y Chien (2021)	Un nuevo enfoque de excitación para la simulación de transformadores de potencia basado en análisis de elementos finitos	-Previsión de las pérdidas de cobre en el núcleo -Método de elementos finitos -Costo y ciclo de vida del transformador - Software de ANSYS Maxwell	Se propone una nueva ecuación de excitación externa para mejorar la precisión de los resultados de la simulación y reducir el tiempo. Se desarrolla el transformador trifásico de cinco brazos, que mide la densidad de flujo magnético local y la pérdida total del núcleo verificando la viabilidad del método de elementos finitos propuesto de modelo y parámetros de simulación

Metodología

Dentro de la metodología se plantean las siguientes interrogantes:

¿Cuál es la literatura existente referente al diseño de transformadores de potencia aislados en gas?

Partiendo de esta interrogante general, surgen las siguientes específicas:

¿Cuáles son los elementos clave de los artículos revisados?

¿Cuáles son los elementos coincidentes en los documentos consultados?

De acuerdo con Paz (2020), los artículos de revisión bibliográfica se enfocan en el seguimiento de un orden científico en la indagación de la información, compilación, procesamiento, análisis y

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

comprensión de los datos recopilados, en correlación con la problemática seleccionada. Para la presente investigación, la búsqueda bibliográfica se realizó mediante la indagación de artículos científicos con el diseño de transformadores de potencia con aislamiento en gas, utilizando como referencia las bases de datos Semantic Scholar, ScienceDirect, Acarindex, entre otras. En la Tabla 2 se reseña la lista de las bases de datos consultadas para la obtención de la información, describiendo el nombre de la revista, las palabras clave empleadas y el año de la publicación.

Tabla 2 Morfología de las Publicaciones

Base de Datos	Nombre de la revista	Palabras clave	Año de publicación
Researchgate	Turkish Journal of electrical Engineering Computer Sciences	Transformador Simulación Aislado en gas	2017
Semantic Scholar	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	Transformador Campo eléctrico	2017
Google Scholar	Tecnológico de Monterrey	Transformador Eficiencia	2018
ScienceDirect	Energy Report	Gases de aislamiento	2018
Hrcak srce hr	Transformers Magazine	Transformador Gas insulado	2018
Google Scholar	Department of Information and Electrical engineering and applied Mathematics (DIEM)	Transformador De potencia	2018
IOP Science	Journal of Physics D: Applied Physics	Transformador Gas SF6	2018
Acarindex	Turkish Journal of electrical Engineering Computer Sciences	Transformador de distribución 50 kVA Aislamiento de gas SF6	2018
Resurchify	International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)	Transformador trifásico electromagnetismo Ansys Maxwell	2019
Academia Edu	Proyecto Integrador II	Co-simulación Transformador	2019
Semantic Scholar	8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)	Transformador De alta frecuencia y alta potencia	2019
Mendeley	High Voltage	Gas R410A Propiedades dieléctricas	2019
Researchgate	Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics	Transformador de potencia Huellas de carbon	2019
Google Scholar	Library Northeastern University	Simulación en 3D	2020
Elsevier	International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJPE)	Transformador Ansys Maxwell	2020
Researchgate	Mathematical Modelling of Engineering Problems	Transformador	2020

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

	MMEP	Método de Elementos finitos	
Researchgate	Plos one	Transformador Devanados Método de Elementos finitos	2020
ScienceDirect	Alexandria Engineering Journal	Transformador Aislado en gas Mediciones acústicas	2020
Google Scholar	European Journal of Electrical Engineering y Computer Science	Transformador de potencia Ansys Maxwell	2020
Multidisciplinary Digital Publishing Institute MDPI	Applied Sciences	Transformador Simulación Método de Elementos finitos	2021
Semantic Scholar	Comsol	Transformador de distribución Aislamiento de Gas R410A	s/f
Multidisciplinary Digital Publishing Institute MDPI	Energies	Transformador Ecológico	2021
Researchgate	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Transformador Simulación Método de Elementos finitos	2021
Dergipark	International Journal of Energy Applications and Tecnologies	Transformador Circuito electrónico Método de Elementos finitos	2021
National Center for Biotechnology Information NCBI	International Journal of Molecular Science	Espectros Raman Gas SF6 Teoría funcional de la densidad	2021

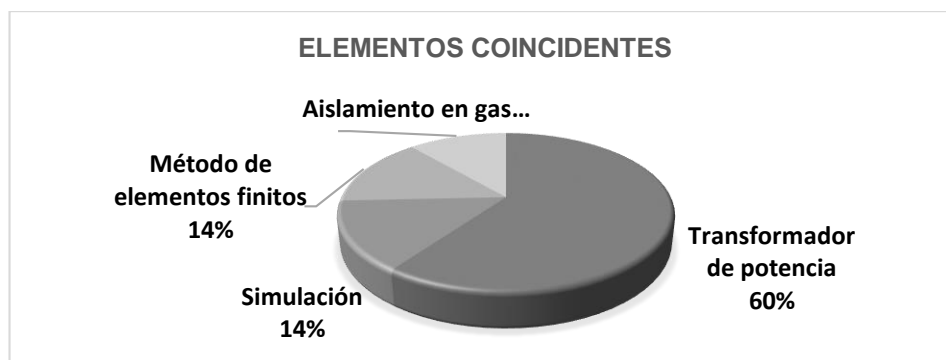
Para la selección de los artículos a reseñar se contemplaron ciertos criterios de incorporación, tales como, la fecha de publicación no debía exceder de cinco años, para ello, se revisaron documentos desde el 2017 hasta el 2021, para favorecer la innovación en estudios recientes relativos al tema; el idioma indistinto para ampliar la búsqueda a nivel internacional; las palabras claves vinculadas al tema tanto en español como en inglés: “transformadores de potencia”, “aislamiento en gas”, “método de elementos finitos”, “software Ansys Maxwell”, “simulación”, “ecológico”. Por otro lado, los criterios de eliminación excluyeron artículos publicados antes de 2017, así como tesis de pregrado, blogs, páginas webs e información no vinculante. Por último, los documentos seleccionados fueron examinados y sintetizados, lo que facilitó inducir, deducir, comparar y organizar los contenidos.

Resultados y discusión

Luego de la revisión de las investigaciones seleccionadas, se pudo identificar las coincidencias en las palabras clave, que los transformadores de alta potencia, requieren un diseño confiable y eficiente para evitar fallas e inconvenientes con las pérdidas en el núcleo, así como el efecto invernadero. El método de elementos finitos se utiliza para simular la pérdida del núcleo conocer el comportamiento de la densidad de flujo, el campo magnético. Otro aspecto coincidente fue que se consideran los efectos de la tensión en la pérdida sin carga para ambas estructuras utilizando el software Ansys Maxwell.

Desde esta perspectiva, se obtuvo suficiente información para agrupar los documentos seleccionados de acuerdo a los elementos clave coincidentes, revelando los resultados que se evidencian en el gráfico 1.

Gráfico 1 Resultados de elementos coincidentes



Partiendo de los resultados obtenidos, se puede observar que el 60% de los documentos estudiados estudian los transformadores, los cuales han despertado un gran interés ya que utilizan en gran medida por su robustez y aplicación en sistemas de potencia. Por esta razón se han realizado numerosas investigaciones y experimentos reales y en simulación, a fin de optimizar su eficacia, rendimiento y funcionalidad, evitando las pérdidas en el núcleo.

Dentro de los métodos más implementados, de acuerdo con el 14% de la literatura consultada, está el método de elementos finitos, para estimar las pérdidas en el núcleo, las pérdidas por fugas y las pérdidas por corrientes parásitas de los devanados de forma efectiva. A su vez, el 14% de los estudios

Revisión Crítica sobre Tendencias en Transformadores Trifásicos de Potencia con Aislación en Gas

revisados coinciden en que para la simulación, el software más eficiente es el Ansys Maxwell, con este programa, el diseño, modelado, análisis y evaluación del rendimiento del transformador en un entorno de simulación de alto rendimiento se puede lograr mediante un modelado estratégico eficaz. Con relación al aislamiento en gas, el 14% de los artículos revisados concuerdan con que el gas SF₆ se usa ampliamente en aparatos de energía eléctrica como medio de aislamiento y extinción de arco. Sin embargo, la aplicación de este gas enfrenta dos problemas serios, incluido el fuerte efecto del calentamiento global y la alta toxicidad de sus productos de descomposición. Por lo tanto, los académicos se comprometieron a encontrar una alternativa respetuosa con el medio ambiente al gas SF₆ y se han obtenido los resultados de investigación relevantes. Como medio aislante o extintor, los gases convencionales, las mezclas de gas SF₆ y los gases electronegativos y los gases mixtos presentan diferentes puntos fuertes y desventajas. Por ello, se siguen realizando estudios, pruebas, experimentos y simulaciones con diferentes gases alternativos para superar esta problemática.

Observaciones finales

Es interesante observar que todos los transformadores iniciales fabricados, trabajaban con aire en lugar de aceite o fluido, incluso, se puede considerar como aislados por aire. Actualmente, varios transformadores ventilados que están aislados con Nómex, fibra de vidrio, entre otros materiales, y que trabajan con aire o llenos de aire.

Se podría resaltar que en el futuro se desarrollarán gases que tendrán un potencial de calentamiento global nulo y con propiedades de aislamiento a niveles de baja presión ligeramente superiores a la atmosférica. Esto solo hará que los transformadores aislados en gas capturen el mercado completo. ¿Probablemente el nitrógeno con algunas modificaciones puede ser el futuro? Pero esto es solo una especulación.

Referencias

1. Ariani, H., Iskender, I., and Karakaya, M. (2020). Performance analysis of a distribution transformer using Ansys Maxwell. International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Iss. 45, Vol. 12, No. 4. <http://www.ijotpe.com/IJTPE/IJTPE-2020/IJTPE-Issue45-Vol12-No4-Dec2020/9-IJTPE-Issue45-Vol12-No4-Dec2020-pp57-62.pdf>

2. Bal, S., Demirdelen, T., and Tümay, M. (2019). Three-Phase Distribution Transformer Modeling and Electromagnetic Transient Analysis Using ANSYS Maxwell. 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932953>
3. Bermúdez, C., y Alcocer, D. (2019). Co-simulación Magnética y Circuitual de un Modelo de Transformador de Potencia en Software ANSYS Maxwell. 4. <https://www.academia.edu/39117081>
4. Bolotinha, M. (2018). Gas-insulated transformers. *Transformers Magazine*, 5(4), 100-102. <https://hrcak.srce.hr/214883>
5. Camara, N. (2020). The three-dimensional electromagnetic simulation analysis of amorphous ferromagnetic microwires. The Department of Electrical and Computer Engineering Northeastern University. <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:m046qg27s/fulltext.pdf>
6. Ching, W., Chien, Ch. (2021). A Novel Excitation Approach for Power Transformer Simulation Based on Finite Element Analysis. *Appl. Sci.* 11(21). <https://doi.org/10.3390/app112110334>
7. Di Capua, G. and Femia N. (2018) Geometric Form Factors-based Power Transformers Design. Department of Information and Electrical engineering and applied Mathematics (DIEM) University of Salerno. *SMACD.* 245-248. <https://doi.org/10.1109/SMACD.2018.8434889>
8. El Shafei, A., Ozdemir, S., Altin, N., Jean-Pierre, G., and Nasiri, A. (2019). A High power high frequency transformer design for solid state transformer applications. 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 904-909.
9. Guney, E., and Ozgonenel, O. (2021). An Eco-Friendly Gas Insulated Transformer Design. *Energies*, 14(12), 3698. <https://doi.org/10.3390/en14123698>
10. Guney, E., and Ozgonenel, O. (s. f.). R410A Gas Insulated Distribution Transformer Design. *Comsol* <https://www.comsol.ch/paper/download/854651/ozgonenel2.pdf>
11. Kaur, S., and Kaur, D. (2021). Finite Element Method (FEM) based Design and Simulation of Practical Transformer with Nano-Crystalline Core Using ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1033, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1033/1/012038>

12. Khan, B., Saleem, J., Khan, F., Faraz, G., Ahmad, R., Rehman, N. U., and Ahmad, Z. (2019). Analysis of the dielectric properties of R410A Gas as an alternative to SF6 for high- voltage applications. *High Voltage*, 4(1), 41-48. <https://doi.org/10.1049/hve.2018.5068>
13. Li, X., Zhao, H., & Murphy, A. B. (2018). SF6-alternative gases for application in gas-insulated switchgear. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(15), 153001.
14. Orosz, T., Poór, P., Karban, P., and Pánek, D. (2019). Power Transformer Design Optimization for Carbon Footprint. 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), 1-4. <https://doi.org/10.1109/PQ.2019.8818261>
15. Özgönel, O., and Thomas, D. (2017). Modeling and simulation of 2.5 MVA SF6-gas-insulated transformer. *Turkish Journal of electrical engineering & computer sciences*, 25(4), 3475-3485.
16. Özgönel, O., Thomas, D., and Kurt, Ü. (2018). SF6 gas-insulated 50-kVA distribution transformer design. *Turkish Journal of electrical engineering & computer sciences*, 26(4), 2140-2150.
17. Özüpak, Y., Halil, I., and Mehmet, S. (2021). Analysis of electronic circuit transformer with experimental and finite elements. *International Journal of Energy Applications and Technologies* 8(1). <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1537417>
18. Patel, D., Chowdhury, A., and Vallabhbai, S. (2020). Design and Analysis of Sen Transformer Using FEM and No Load Loss Calculation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 7. <https://doi.org/10.18280/mmep.070321>
19. Paz, M. (2020). Estudio documental sobre Innovación educativa: Nuevos retos y perspectivas. *Polo Del Conocimiento*, 5(12), 465–487. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i12.2070>
20. Qi, B., Zhao, X., Zhang, S., Huang, M., and Li, C. (2017). Measurement of the electric field strength in transformer oil under impulse voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(2), 1256-1262. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006252>
21. Saldívar, J. (2018). Estudio de niveles de eficiencia en transformadores de distribución en función del perfil de carga. [Tesis de posgrado, Tecnológico de Monterrey]. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/632565>
22. Song, X., Xiaoxing, Z., Ju, T., and Siqi, L. (2018). A review on SF6 substitute gases and research status of CF3I gases. *Energy Reports* 4. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.07.006>

23. Srikanta, M., Azis, N., Jasni, J., Othman, M., Mohd, Y., and Talib, M. (2020) Extraction of winding parameters for 33/11 kV, 30 MVA transformer based on finite element method for frequency response modelling. PLoS ONE 15(8): e0236409. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236409>
24. Taha, I, Dessouky, S., and Ghaly, R. (2020). Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. Alexandria Engineering Journal 59, 4759–4769. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.041>
25. Urooj, Sh., Singh, T., Amir, M., and Tariq, M. (2020). Optimal Design of Power Transformer with Advance Core Material using ANSYS Technique. Vol 4 No 5. <https://doi.org/10.24018/ejece.2020.4.5.249>
26. Zhang, Z.; Zhang, X.; Fu, W.; Yan, H.; Liu, F.; and Zhou, Q. (2021) Raman Spectra of SF Decomposed Characteristic Products Based on Density Functional Theory. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, Volume 16, Number 2. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asp/jno/2021/00000016/00000002/art00011?crawler=true&mimetype=application/pdf>