


Evaluación de la construcción de transformadores de distribución tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante, y conductores de aleación bimetálica en sus devanados, mediante elementos finitos

Evaluation of the construction of pole-mounted distribution transformer using sulfur hexafluoride as a dielectric-coolant and bimetallic alloy conductor in their windings, using the finite element method.


Ángel E. Machuca-Hernández

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0005-9328-9708> | Correo electrónico: angel.30200791@uru.edu

José R. Espina-Alvarado

Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0004-8301-7592> | Correo electrónico: jose.espina.80401@uru.edu

Guillermo D. Cano-Valles

Ingeniería, Construcción, Inspección y Suministros, C. A. (ICIS). Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0001-7227-0999> | Correo electrónico: gcanovalles@gmail.com

Recibido: 27-06-2025 Admitido: 04-11-2025 Aprobado: 18-11-2025

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20085324>

Resumen

El aumento en los robos de transformadores y los riesgos del aceite mineral, como la inflamabilidad y su degradación, motivaron esta investigación para evaluar materiales alternativos en transformadores de distribución tipo poste. En particular, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar la construcción de transformadores de distribución tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante y conductores de aleación bimetálica en sus devanados. Para ello, se identificaron las características constructivas y operativas de los transformadores establecidos en normativas reconocidas, se analizaron las propiedades del Conduground y del gas SF₆, y se modeló un transformador tipo poste de 25 kVA para realizar estudios térmicos bajo distintas condiciones operativas y constructivas. Con respecto al Conduground, la carencia de información adecuada limitó la capacidad para formular una conclusión concisa sobre su viabilidad como conductor. En contraste, el gas SF₆, aunque inicialmente superaba las temperaturas permitidas por la normativa, logró ajustarse a ellas al aumentar la presión (100%) o el tamaño de la cuba (30%), evidenciando su potencial como alternativa al aceite.

Palabras clave: Transformadores de distribución, Hexafluoruro de azufre, Modelado multifísico, Análisis térmico, Aislamiento eléctrico.

Abstract

The increase in transformer thefts and the risks associated with mineral oil, such as flammability and the degradation of its properties, motivated this research to evaluate alternative materials in pole-mounted distribution transformers. The primary objective was to assess the construction of pole mounted distribution transformers using sulfurhexafluoride as a dielectric-coolant and bimetallic alloy conductors in their windings. To achieve this, the constructive and operational characteristics of transformers established in recognized standards were identified, the properties of Conduground and SF₆ gas were analyzed, and a 25 kVA pole-mounted transformer was modeled to conduct thermal studies under various operational and constructive conditions. Regarding Conduground, the lack of adequate information limited the ability to formulate a concise conclusion on its feasibility as a conductor. In contrast, SF₆ gas, while initially

exceeding the regulatory temperature thresholds, met the required limits by increasing the pressure (100%) or the enclosure size (30%), demonstrating its potential as an alternative to oil.

Keywords: *Distribution transformers, Sulfur hexafluoride, Multiphysics modeling, Thermal analysis, Electrical insulation.*

Introducción

La energía eléctrica es un recurso indispensable para el desarrollo industrial, científico y social de cualquier país. En este contexto, los transformadores de distribución desempeñan un rol fundamental, al ser el enlace entre los circuitos primarios y secundarios de las redes de distribución eléctrica. Tradicionalmente, estos equipos se construyen con devanados primarios hechos con pletina cobre y los secundarios elaborados con láminas de aluminio, utilizando como medio aislante y refrigerante el aceite mineral. Sin embargo, estos materiales presentan desafíos significativos: el cobre, por su alto valor comercial, es un blanco frecuente de hurto; por otro lado, el aceite mineral, además de su inflamabilidad, sufre de un proceso de degradación que disminuye sus capacidades dieléctricas y de disipación térmica, comprometiendo, en última instancia, el rendimiento y vida útil del transformador.

En respuesta a estos problemas, materiales alternativos como el *Conduground* y el hexafluoruro de azufre (SF_6) han surgido como soluciones potenciales. El *Conduground*, un conductor en forma de tira compuesto de una aleación de zinc, cobre y estaño, destaca por su resistencia a la corrosión y su nulo valor en el mercado negro; mientras que el SF_6 , un gas inerte no inflamable, posee propiedades dieléctricas excepcionales y una capacidad regenerativa que permite la reducción de los mantenimientos requeridos al equipo. Aunque ambos materiales han sido estudiados individualmente en aplicaciones específicas, no existen investigaciones que evalúen su desempeño conjunto en transformadores de distribución.

Ante esta carencia, la presente investigación, desarrollada con el apoyo de la empresa ICIS C.A. y la Universidad Rafael Urdaneta, se propone evaluar la construcción de transformadores tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante y conductores de aleación bimetálica en sus devanados mediante el método de elementos finitos.

Metodología

La presente investigación posee un carácter explicativo y proyectivo, con diseño mixto documental y experimental, maneja como unidades de análisis el *Conduground*, el gas SF_6 y el comportamiento térmico del gas SF_6 en transformadores de distribución tipo poste.

La población está integrada por los transformadores de distribución tipo poste que operan con tensiones primarias que oscilan entre 4,8 y 34,5 kV y tensiones secundarias entre 120/240 y 7970 V, con potencias nominales en el rango de 10 a 500 kVA. Utilizando un muestreo no probabilístico de tipo intencional, se seleccionó como muestra un transformador de distribución tipo poste convencional con especificaciones de 13,8 kV-240/120 V, ONAN y una potencia nominal de 25 kVA.

El desarrollo de la investigación se estructuró en tres fases. La fase I, denominada “Criterios de diseño y operativos del transformador de distribución”, consistió en una revisión bibliográfica de normativas y literatura especializada para identificar los parámetros constructivos necesarios para modelar un transformador de distribución tipo poste en COMSOL Multiphysics, así como recopilar los criterios operativos estipulados en la normativa que aseguran su correcto funcionamiento.

En la fase II, “Estudio de las propiedades del *Conduground* y gas SF_6 ”, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las características fisicoquímicas y eléctricas de estos materiales, fundamentado en una revisión sistemática de la literatura. Este análisis permitió identificar las propiedades clave que influyen significativamente en el comportamiento electrofísico de los transformadores de distribución.

Finalmente, en la fase III, “Simulación del comportamiento” se desarrolló un modelo tridimensional del transformador de distribución tipo poste en COMSOL Multiphysics, integrando criterios constructivos previamente recopilados junto con las propiedades del gas SF_6 . Finalmente, los resultados fueron analizados

a través de gráficos, tablas y mapas de colores, lo que permitió una evaluación detallada del comportamiento electrofísico del transformador bajo diversos escenarios.

Resultados

Normativa aplicable y literatura reconocida

Los transformadores de distribución están regulados por un marco normativo internacional y regional que asegura su correcto funcionamiento. En esta investigación, se consultaron diversos estándares con el propósito de establecer las características operativas específicas del transformador de distribución tipo poste objeto de estudio, cuyos valores se encuentran referenciados a 85 °C y sintetizados en la Tabla 1.

Asimismo, se ha recurrido a una selección de literatura reconocida y especializada con el objetivo de establecer los criterios de diseño y construcción que garanticen que el modelo diseñado se alinee con las prácticas y exigencias del sector, entre los cuales destaca Avelino [1].

Tabla 1. Características operativas requeridas para transformadores de distribución

Parámetro	Valor	Referencia
Impedancia equivalente (%)	2,50	Covenin 536 [2]
Pérdidas en el cobre (W)	430	Covenin 536 [2]
Pérdidas en vacío (W)	115	Covenin 536 [2]
Corriente de excitación (%)	1,2	Covenin 536 [2]
Elevación promedio de temperatura (°C)	65	IEEE Std 57.12.00 [3]
Máxima elevación de temperatura (°C)	80	IEEE Std 57.12.00 [3]
BIL	125	IEEE Std 57.12.00 [3]
Capacidad de cortocircuito (kA)	40	Covenin 536/IEC 60076-5 [2], [4]
Polaridad	Sustractiva	IEEE Std 57.12.00 [3]

Análisis de las propiedades del Conduground

El *Conduground* es un conductor fabricado a partir de una aleación de cobre, estaño y una aleación de zinc (CZ9) que se presenta comercialmente en tiras rectangulares de 0,060” de espesor y anchos variables (7/16” a 1 1/2”), con una densidad de 2,229 g/cm³, siendo cuatro veces más ligero que el cobre [5].

Al ser una aleación, la conductividad eléctrica del *Conduground* es inferior a la del cobre puro, siendo 9,26 veces menor, mientras que su coeficiente térmico es 2,6 veces mayor que el del cobre. Si bien se desconoce su conductividad térmica, se estima inferior a la del cobre y el aluminio debido a su composición a base de estaño y zinc; no obstante, su mayor capacidad térmica volumétrica y su elevada temperatura de fusión, confiere resistencia a las altas temperaturas durante periodos prolongados. El resumen de sus propiedades se presenta en la Tabla 2.

La simulación del *Conduground* en COMSOL Multiphysics se ve limitada debido a la falta de datos y discrepancias en sus propiedades. Bajo esta premisa, resulta inviable alcanzar conclusiones definitivas y, por lo tanto, es esencial que futuras investigaciones se centren en la recopilación de información más completa que permita el avance de la comprensión del comportamiento del material.

Tabla 2. Parámetros físicos del Conduground en comparación con el cobre [5]

Parámetro	Conduground	Cobre
Conductividad (%)	10,8	100
Resistividad ($\Omega.m$)	$3,5 \times 10^{-8}$	$1,72 \times 10^{-8}$
Coefficiente térmico (1/K)	605	234
Capacidad térmica volumétrica ($J/cm^3.K$)	3,931	3,45
Temperatura de fusión ($^{\circ}C$)	1510	1085

Discriminación de las propiedades del gas SF₆

El hexafluoruro de azufre (SF₆) es un gas sintético cuya estructura molecular octaédrica consiste en un átomo central de azufre cuyos seis vértices están ocupados por átomos de flúor. Esta configuración le confiere una alta estabilidad química y térmica, así como una excepcional resistencia dieléctrica, cualidades que han consolidado su uso en aplicaciones de alta y media tensión, como los interruptores eléctricos y subestaciones encapsuladas (GIS) [6].

Propiedades físicas

Debido a su temperatura crítica de 43,6 °C, el hexafluoruro de azufre está sujeto a un proceso de licuefacción si, en condiciones de operación, se exceden ciertos límites de presión, lo que reduce su densidad, resistencia dieléctrica y capacidad de disipación térmica. En consecuencia, es fundamental mantener la presión del SF₆ en niveles inferiores a 15,2 bar para evitar este fenómeno. No obstante, esta limitación no representa un problema en términos de rendimiento debido a que las presiones operativas típicas para aplicaciones de alta tensión, según lo establecido por Xiao [6], oscilan entre 3,4 y 5 bar.

Propiedades térmicas

En lo que respecta a las propiedades térmicas, el SF₆ presenta una conductividad térmica diez veces menor que la del aceite mineral y 1,85 veces menor que la del aire. Aunque su coeficiente de transferencia de calor por convección supera al del aire, sigue siendo limitado en comparación con el aceite. Este comportamiento se debe a su alta densidad (6,139 kg/m³) y elevado calor específico (663 J/mol·K), que contribuyen a un coeficiente de transferencia de calor relativamente alto en comparación con el del aire.

Tanto la viscosidad como el calor específico del SF₆ dependen de la temperatura, aunque en diferente medida. La viscosidad es considerablemente baja con una variación del 32 % entre 0 y 100 °C. Por otro lado, el calor específico exhibe una variación más compleja con la temperatura; a bajas temperaturas (200 K - 1300 K), la relación con la temperatura es no lineal con un comportamiento monótonamente ascendente; sin embargo, entre 1300 K y 10000 K, su comportamiento se vuelve notablemente errático, como lo demuestra Yokomizu [7]. No obstante, el rango de temperatura en las cuales debe operar el transformador, conforme a lo especificado con anterioridad, recae en el rango de bajas temperaturas, donde estas propiedades térmicas son consistentes y estables.

Propiedades dieléctricas

El SF₆ destaca por su alta electronegatividad, es decir, su capacidad para capturar electrones libres y formar iones negativos. Otro aspecto crucial que influye en las propiedades dieléctricas del gas es la uniformidad del campo pues, en campos eléctricos uniformes, la tensión disruptiva del gas obedece la ley de Paschen en un amplio rango de presiones; no obstante, a medida que el campo eléctrico pierde su uniformidad, la influencia de la presión sobre la tensión disruptiva se ve significativamente reducida, exhibiendo un comportamiento de saturación.

Consideraciones ambientales

Pese a que el SF₆ sea uno de los gases regulados por el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París debido a su elevado potencial de calentamiento global (23500 veces superior al del CO₂), su uso en sistemas eléctricos cerrados, sumado a los rigurosos protocolos de recuperación y reciclaje conforme a normativas internacionales [8], contribuye a que las emisiones de SF₆ referentes al sector eléctrico representen solo el 0,1% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, equivalentes a 125 millones de toneladas de CO₂ al año, en comparación con los 21 billones de toneladas de CO₂ emitidas anualmente, según datos recopilados por Xiao [6].

Diseño de transformador de distribución tipo poste para el estudio.

El diseño del transformador se basó en criterios constructivos descritos en la literatura, así como los criterios operativos detallados en la Tabla 1, cuyas dimensiones geométricas y parámetros eléctricos se detallan en la Tabla 3.

Definición del modelo

El modelo geométrico empleado en esta investigación fue simplificado para optimizar los tiempos de cómputo sin comprometer la precisión de los resultados, este consta de los elementos fundamentales para los estudios realizados, como el núcleo, la cuba, los devanados y el aislamiento entre devanado de baja tensión y núcleo. Elementos como los collarines y los canales de refrigeración fueron excluidos debido a su baja influencia en los fenómenos físicos analizados.

Tabla 3. Síntesis de datos del transformador diseñado.

Núcleo		
Altura de la ventana (cm)	27,826	
Dimensiones de la sección transversal (cm)	8,184 x 20,461	
Ventana (cm)	5,586	
Devanado		
	A.T	B.T
Calibre del conductor (mm)	0,912	9,266
Nº de vueltas	2126	37
Altura efectiva (cm)	21,434	23,240
Devanado-núcleo (mm)	x	3,175
Aislamiento A.T-B.T (cm)	13	
Espesor de la bobina (mm)	14,840	18,846
Cuba		
Diámetro (mm)	440	
Altura (mm)	660	
Parámetros eléctricos		
Pérdidas en vacío (W)	110,987	
Corriente de excitación (%)	0,514	
Pérdidas en los devanados (W)	329	
Reactancia de dispersión (Ω)	161,317	
Impedancia equivalente (%)	2,5	

Posteriormente, se le asignaron materiales a cada elemento para definir sus propiedades físicas, utilizando la biblioteca predeterminada de COMSOL Multiphysics 6.2 y materiales personalizados, para el caso del cartón prensado y el acero al silicio TRAN-COR H-1. En la Tabla 4, se detalla la asignación de materiales en el modelo.

Para analizar los fenómenos electromagnéticos y térmicos en el transformador de distribución tipo poste, se emplearon cuatro interfaces físicas: campo magnético (mf), circuito eléctrico (cir), transferencia de calor en sólidos y fluidos (ht) y flujo laminar (spf). Asimismo, se incorporó la multifísica de “flujo no isotérmico”, que acopla las físicas de transferencia de calor y flujo laminar, necesaria para modelar la convección natural del gas, en la cual la temperatura, la velocidad y la presión se deben determinar de manera simultánea.

Tabla 4. Materiales de los diferentes elementos del transformador.

Componente	Material
Devanado de baja tensión	Aluminio
Devanado de alta tensión	Cobre
Núcleo	TRAN-COR H-1
Cuba (superficie)	Acero
Cuba (volumen interno)	Gas SF ₆
Aislamiento	Cartón prensado

La física de campo magnético (mf) permitió determinar la distribución del flujo en el núcleo y los devanados, así como la corriente inducida en estos últimos, empleando el nodo de Ley de Ampère en sólidos para representar el comportamiento no lineal del acero mediante una curva B–H efectiva. Para optimizar recursos computacionales se estableció una condición de simetría magnética, así como un contorno de impedancia en los límites externos de la cuba, que confina el campo magnético dentro de la misma. Por otro lado, la física de circuito eléctrico (cir) se utilizó únicamente para imponer la excitación del devanado primario y las condiciones de carga en el secundario.

La física de transferencia de calor en sólidos y fluidos (ht) se empleó para modelar el comportamiento térmico del transformador, definiendo los dominios del sistema de aislamiento, del núcleo y los devanados como sólidos. Estos dos últimos, a su vez, se definieron como fuentes de calor basadas en las pérdidas eléctricas obtenidas del modelo electromagnético. El volumen interno de la cuba se modeló como fluido, mientras que su superficie se trató mediante un nodo de capa fina térmicamente delgada, adecuado para la elevada conductividad del acero frente al fluido circundante.

Por último, para las condiciones de frontera térmica se asignó el nodo de radiación superficie-ambiente a la superficie del cilindro y el nodo de flujo de calor para representar la convección natural externa, en el cual, conforme a las recomendaciones del manual de COMSOL [9], se aplicaron correlaciones específicas según la orientación de cada superficie: la de pared vertical en las superficies laterales y las de placa horizontal superior e inferior en los discos extremos.

La física de flujo laminar (spf) se utilizó para resolver el campo de velocidades y presión del SF₆ en el interior de la cuba. Dado que la densidad del fluido depende de la temperatura y la presión, el flujo se configuró como compresible y se habilitó la acción de la gravedad, ajustando su dirección al eje correspondiente. Se aplicó la condición de “no deslizamiento” en todas las superficies que delimitan el fluido, con el fin de representar los efectos de la fricción en el movimiento de este, y se incorporó un punto de restricción de presión ubicado en la misma posición de referencia del término hidrostático, a fin de garantizar la convergencia del modelo.

Validación del modelo

Con el objetivo de validar el modelo implementado en COMSOL Multiphysics, se realizaron simulaciones en el dominio de la frecuencia de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto para obtener los parámetros equivalentes del transformador y compararlos con los valores presentados en la Tabla 3.

Prueba de cortocircuito

La prueba de cortocircuito se simuló utilizando una fuente de corriente con un valor igual a la corriente nominal pico del transformador, mientras que la salida del devanado secundario se configuró con una resistencia prácticamente nula. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, junto con los valores presentados en la Tabla 3 y el error relativo correspondiente.

Tabla 5. Parámetros calculados y obtenidos de la simulación de la prueba de cortocircuito del transformador.

Parámetro	Valor calculado	Valor obtenido	Error relativo porcentual
Reactancia de dispersión (Ω)	161,317	162,92	1%
Pérdidas en el devanado primario (W)	154,724	154,718	0,003%
Pérdidas en el devanado secundario (W)	108,063	105,63	2,25%

La Figura 1 ilustra el comportamiento del transformador durante la prueba de cortocircuito. Los resultados evidencian bajas densidades de flujo magnético en el núcleo, comportamiento característico de este tipo de pruebas debido a la baja tensión aplicada. Asimismo, es importante destacar que el espaciamento entre los devanados presenta un flujo magnético elevado en comparación con otras partes del transformador, producto del flujo de dispersión generado en esa región, claramente representado en las líneas de flujo en la Figura 1.

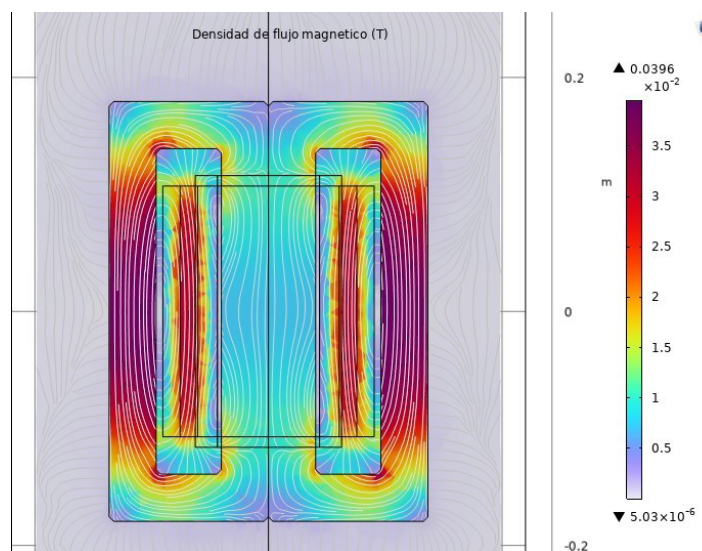


Figura 1. Densidad de flujo magnético en la prueba de cortocircuito

Prueba de circuito abierto

Debido a las simplificaciones realizadas en el modelo, los valores obtenidos para la corriente de excitación no reflejan fielmente el comportamiento real del transformador. Sin embargo, para los fines de la presente investigación, es suficiente modelar de manera precisa las pérdidas en el núcleo, ya que estas constituyen una fuente significativa de generación de calor en los estudios térmicos.

Cabe destacar que las dimensiones de la sección transversal del núcleo, así como su ancho y el espesor utilizados para la simulación, obedecen a los presentados en la Tabla 6 debido a que el modelo implementado no incluye material aislante, eliminando la necesidad de aplicar el factor de apilamiento. Asimismo, dado que en un entorno de simulación no es necesario aplicar un factor de desperdicio a las pérdidas, y considerando las dimensiones utilizadas; las nuevas pérdidas en vacío se presentan en la Tabla 6. Finalmente, en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, junto con los valores calculados presentados en la Tabla 6 y el error relativo asociado.

La Figura 2 ilustra el comportamiento del transformador durante la prueba de circuito abierto. Se observa que la densidad de flujo magnético en las columnas alcanza 1,5 T, mientras que, en las esquinas externas del núcleo, la densidad disminuye progresivamente hasta alcanzar valores de 0,2 T. En contraste, las esquinas de la ventana presentan densidades significativamente mayores, alcanzando 2,5 T, debido a su proximidad a las trayectorias del flujo magnético.

Tabla 6. Nuevos parámetros eléctricos y geométricos asociados al núcleo.

Parámetro	Valor
Área de la sección transversal (cm ²)	162,439
Dimensiones de la sección transversal (cm)	8,062 x 20,152
Pérdidas en vacío (W)	96,385

Tabla 7. Parámetros calculados y obtenidos de la simulación de la prueba de circuito abierto del transformador.

Parámetro	Valor calculado	Valor obtenido	Error relativo porcentual
Pérdidas en el núcleo (W)	96,385	94,593	1,86%

El error relativo máximo registrado fue de 2,25 %; mientras que, los demás se mantuvieron por debajo del 2 %. Estos valores se consideran aceptables según los criterios de validación establecidos de ± 5 %, lo que confirma la precisión del modelo implementado y garantiza que los resultados obtenidos en los estudios son representativos de los transformadores de distribución tipo poste.

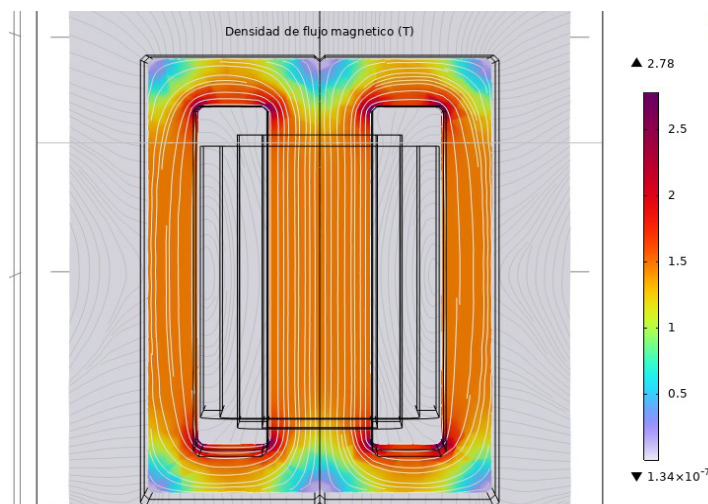


Figura 2. Densidad de flujo magnético en la prueba de circuito abierto.

Análisis de los resultados

Caso 1: Temperatura ambiente máxima con carga nominal

La condición de mayor estrés térmico para un transformador está determinada por la temperatura ambiente máxima (40 °C) y su nivel de carga nominal. Aunque esta no representa una condición típica de operación para un transformador de distribución, su análisis permite evaluar si, bajo las condiciones nominales más demandantes, el gas SF₆ es capaz de mantener las temperaturas dentro de los límites especificados en la Tabla 1.

En la siguiente figura se muestra la distribución de temperatura en el transformador refrigerado en gas SF₆. Los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, se resumen en la Tabla 8.

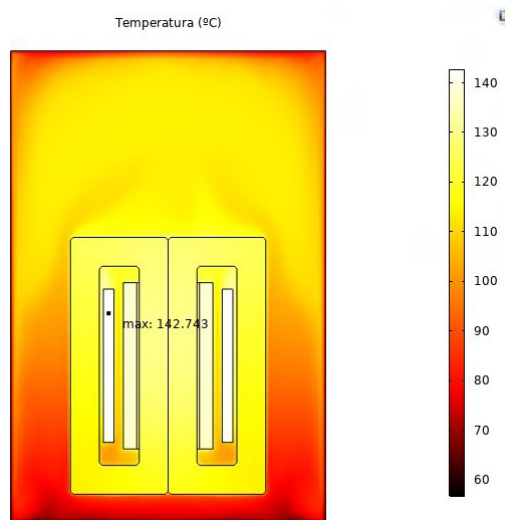


Figura 3. Distribución de temperatura en el transformador (SF₆).

La Figura 4 presenta la distribución de densidad y el campo de velocidades del gas en el transformador. Se observa que las regiones de menor densidad, como la parte superior, presentan velocidades más altas debido a la fuerza de flotación generada por la variación de densidad y la acción de la gravedad, formando celdas de convección. Asimismo, se aprecia como cerca de las paredes de la cuba, la velocidad del fluido disminuye progresivamente de 0,3 m/s a 0,08 m/s, lo que se atribuye a la transferencia de calor hacia las paredes metálicas, que enfría el gas, aumentando su densidad y provocando su descenso, completando así el ciclo de convección natural.

Tabla 8. Temperatura registrada en el transformador (SF₆) y comparaciones con los límites normativos

Ubicación	Temperatura registrada (°C)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (°C)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
Punto más caliente (devanado de alta tensión)	142,743	102,743	+22,743
Sección superior del transformador	114	74	+9

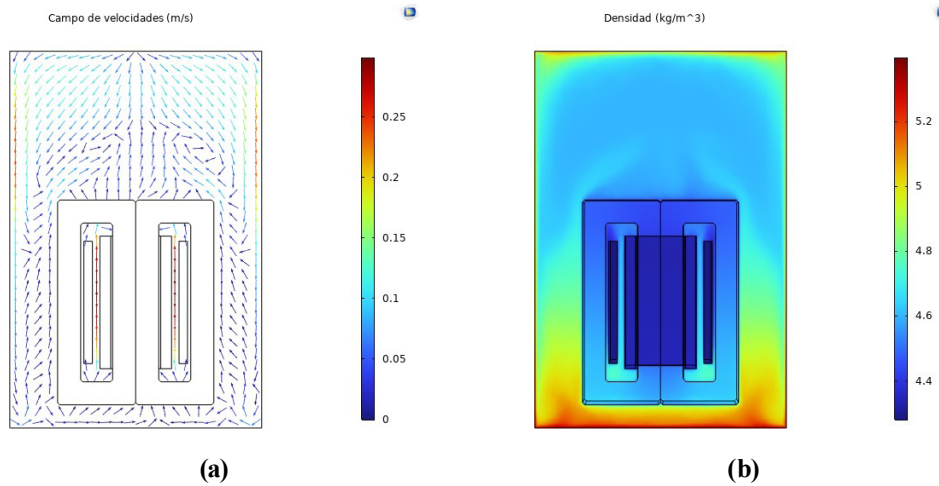


Figura 4. (a) Campo de velocidades en el transformador (SF₆). (b) Densidad del gas en el transformador (SF₆).

Con el fin de realizar una comparación exhaustiva de los resultados de la simulación, se llevó a cabo un análisis equivalente utilizando aceite mineral como medio refrigerante. En la Figura 5 se ilustra tanto la distribución de temperatura en el transformador refrigerado con aceite, como la diferencia en la distribución de temperaturas entre el aceite mineral y el gas SF₆. Las variaciones de temperatura entre ambos medios en puntos claves del transformador se resumen en la Tabla 9.

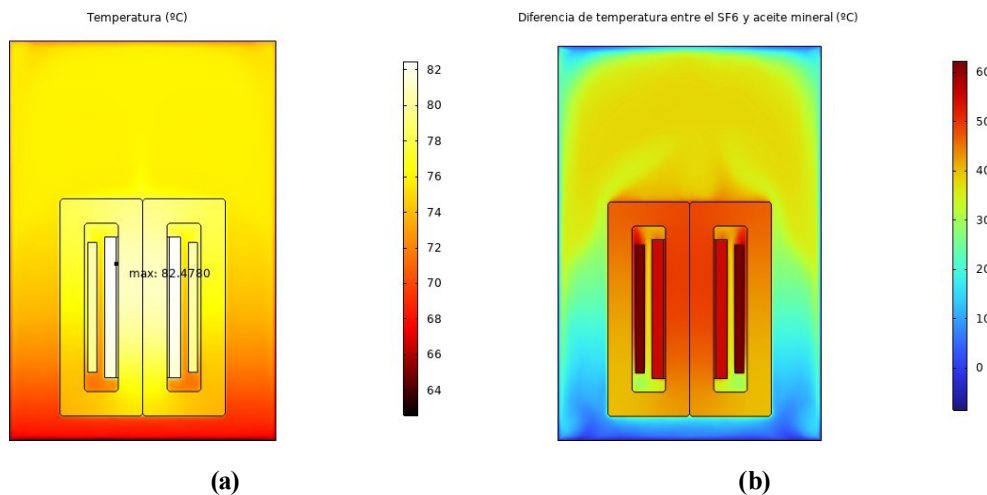


Figura 5. (a) Distribución de temperatura en el transformador (Aceite). (b) Diferencia entre la distribución de temperatura en el transformador del gas SF₆ y el aceite mineral.

Estos resultados indican que, bajo las mismas condiciones de operación, la temperatura máxima alcanzada en el gas SF₆ es 73,07% mayor que la obtenida en el aceite, mientras que la temperatura en la sección superior del gas SF₆ es 50,19% mayor que la sección superior del aceite.

Tabla 9. Diferencia de temperatura entre el aceite mineral y gas SF₆

Ubicación	Diferencia de temperatura (°C)
Devanado de alta tensión	62
Devanado de baja tensión	55
Sección superior del yugo	48
Sección inferior del transformador	4
Sección superior del transformador	38

Caso 2: Variación de cargas en el transformador

Aunque la normativa establece la evaluación del aumento máximo de temperatura bajo condiciones de carga nominal, los transformadores de distribución operan en condiciones de carga variables. Debido a las altas exigencias computacionales que implicaría la simulación de un perfil de demanda diario, se optó por analizar el aumento de temperatura considerando cargas de 0,5, 0,7 y 1 p.u. a una temperatura ambiente típica (25 °C). Los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, de los distintos niveles de cargas estudiados se resumen en la Tabla 10.

Los resultados arrojados indican que, para cargas menores a 0,7 p.u a una temperatura ambiente típica de 25 °C, el transformador refrigerado por SF₆ alcanza una temperatura máxima 11,54% superior a la obtenida con aceite mineral en el caso 1. Aun así, el incremento de temperatura experimentado por el gas se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa.

Caso 3: Variación de temperatura ambiente

Los transformadores de distribución operan bajo condiciones ambientales variables que afectan su comportamiento térmico. Por ello, resulta esencial evaluar cómo las fluctuaciones en la temperatura ambiente, en un rango de 20 °C a 40 °C, impactan las características térmicas de los transformadores refrigerados con gas SF₆. La Figura 6 ilustra la relación entre la temperatura máxima interna del transformador y la temperatura ambiente.

Tabla 10. Temperatura en el transformador a distintos niveles de carga.

Carga (p.u)	Ubicación	Temperatura registrada (°C)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (°C)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
1	Punto más caliente (devanado de alta tensión)	129	104	+24
	Sección superior del transformador	100	75	+10
0,7	Punto más caliente (devanado de baja tensión)	92,074	67,074	-12,926
	Sección superior del transformador	76,4	51,4	-13,6
0,5	Punto más caliente (núcleo)	75,936	50,936	-29,064
	Sección superior del transformador	65	37	-28

De esta figura se puede concluir que la relación entre la temperatura máxima y la temperatura ambiente es lineal, con una tasa de cambio de 0,929 °C por grado de temperatura ambiente. Esto indica que el aumento de temperatura en cada uno de los casos sigue un patrón aproximadamente constante; por lo tanto, incluso a temperaturas bajas, el SF₆ presenta aumentos de temperatura que sobrepasan los límites establecidos en la normativa.

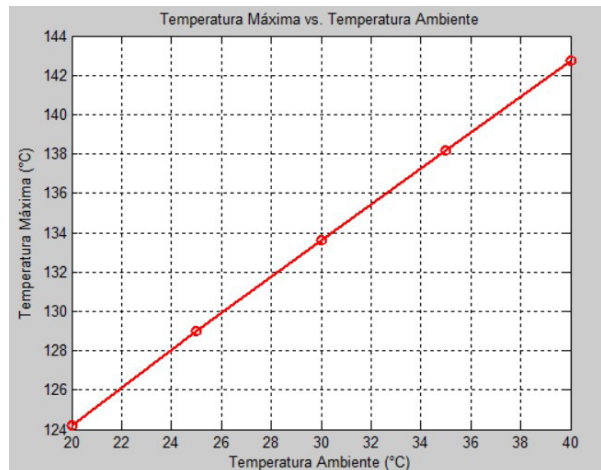


Figura 6. Temperatura máxima en función de la temperatura ambiente.

Caso 4: Variación en las medidas de la cuba

Los resultados indican que, bajo condiciones nominales y a diversas temperaturas ambiente, el gas SF₆ no cumple con los límites establecidos por la normativa. Sin embargo, hasta ahora, el análisis se ha centrado en parámetros operativos del transformador, sin considerar aspectos constructivos que podrían influir en su comportamiento térmico, como las dimensiones de la cuba.

Para evaluar el efecto del tamaño de la cuba en el comportamiento térmico del transformador, se realizó un estudio paramétrico aumentando las dimensiones de la cuba (diámetro y altura) entre un 10 % y un 40 %, manteniendo las condiciones operativas establecidas en el caso 1. La Figura 7 presenta las distribuciones de temperatura para los incrementos del 0 % y 40 %, mientras que los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, de los distintos aumentos de la cuba estudiados se resumen en la Tabla 11.

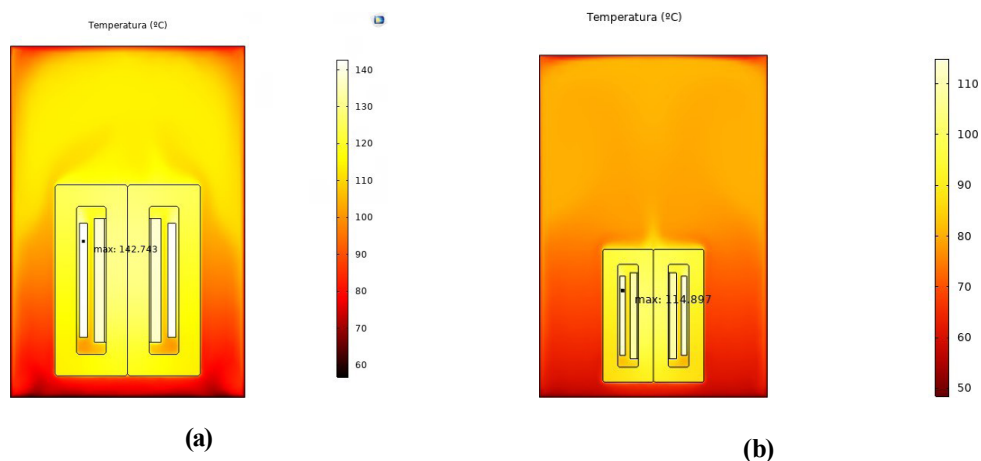


Figura 7. Distribución de temperatura con un aumento de las dimensiones del (a) 0% (b) 40%.

En la Tabla 11 se observa cómo, pese a que inicialmente las disminuciones de temperatura son significativas, estas se vuelven progresivamente menores, evidenciando un comportamiento de saturación. Asimismo, de los valores obtenidos con anterioridad se afirma que un transformador aislado en gas debe ser, como mínimo, 1,3 veces más grande que un transformador aislado en aceite para obtener temperaturas que no sobrepasen los límites estipulados. Esto quiere decir que un transformador refrigerado en gas SF₆ será, pese a su gran volumen, tres veces más liviano que un transformador refrigerado con aceite.

Tabla 11. Temperatura en el transformador a distintos tamaños de cuba

Aumento del tamaño de la cuba (%)	Ubicación	Temperatura registrada (°C)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (°C)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
10	Punto más caliente	131,693	91,693	+11,693
	Sección superior del transformador	102,234	62,234	-2,766
20	Punto más caliente	124,754	84,754	+4,754
	Sección superior del transformador	92,947	52,947	-12,053
30	Punto más caliente	119,593	79,593	-0,407
	Sección superior del transformador	87,775	47,775	-17,225
40	Punto más caliente	114,897	74,897	-5,103
	Sección superior del transformador	80,872	40,872	-24,128

Caso 5: Variación en la presión del gas

Si bien las propiedades térmicas del SF₆ son prácticamente independientes de la presión, su influencia sobre la densidad impacta determinadamente la convección natural. Para analizar dicho impacto, se realizó un análisis paramétrico variando la presión entre 1 y 4 atm, manteniendo las condiciones operativas del caso 1. La Figura 8 muestra la distribución de temperatura para las presiones extremas del rango, mientras que la Tabla 12 resume los resultados clave para las distintas presiones a las cuales se verá sometido el transformador.

De los datos obtenidos se puede concluir que, similar al caso anterior, la disminución de temperatura con respecto al aumento de presión presenta un comportamiento de saturación. Asimismo, se concluye que, para mantener las temperaturas dentro de los límites normativos, se requiere operar a una presión de 2 atm como mínimo, lo que implica un incremento, teórico, del 100 % en el peso del gas respecto a 1 atm, sin considerar el refuerzo estructural necesario de la cuba para soportar dicha presión.

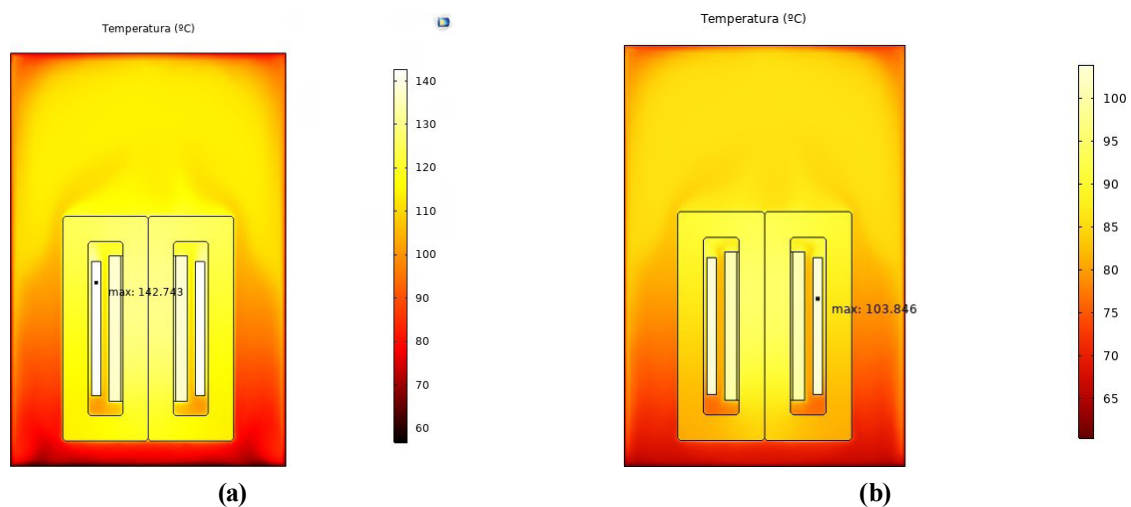


Figura 8. Distribución de temperatura en el transformador con un aumento de presión de (a) 1 atm (b) 4 atm.

Tabla 12. Temperatura en el transformador a distintas presiones

Presión (atm)	Ubicación	Temperatura registrada (°C)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (°C)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
2	Punto más caliente	119,306	79,306	-0,694
	Sección superior del transformador	96,8	56,8	-8,2
3	Punto más caliente	109,502	69,502	-10,498
	Sección superior del transformador	89,8	49,8	-15,2
4	Punto más caliente	103,846	63,846	-16,154
	Sección superior del transformador	85,9	45,9	-19,1

Análisis de viabilidad

Los resultados obtenidos muestran que el SF₆ no puede competir térmicamente con el aceite mineral en configuraciones convencionales, debido a su baja conductividad y a su limitado coeficiente de transferencia de calor por convección. No obstante, las simulaciones evidenciaron que su comportamiento mejora de manera significativa cuando se incrementan las dimensiones de la cuba o se opera a presiones de, al menos, 2 atm, permitiendo cumplir los límites normativos de temperatura estipulados en la Tabla 1.

Si bien estas modificaciones permiten optimizar el desempeño térmico del gas, también introducen exigencias constructivas adicionales. El aumento del volumen de la cuba requiere una estructura de mayor tamaño, lo que puede complicar su instalación en postes estándares; mientras que, operar a altas presiones de manera sostenida implica el uso de cubas reforzadas capaces de soportar esfuerzos internos superiores, lo que introduce mayores exigencias mecánicas. En conjunto, estas adaptaciones derivan, finalmente, en un incremento significativo de los costos de construcción frente a un transformador convencional refrigerado en aceite mineral.

Por otro lado, desde la perspectiva operativa, la aplicación del SF₆ en transformadores de distribución introduce desafíos significativos. La incorporación de sistemas de monitoreo y detección de fugas, indispensables para cumplir con los estrictos requisitos de operación, manipulación y disposición final establecidos en normativas internacionales como la IEEE Std 37.122.3 [9], demanda una infraestructura adicional que contrasta con la simplicidad operativa propia de los transformadores de distribución tipo poste, diseñados para operar con mínima aparatenta y esquemas de mantenimiento predominantemente correctivo; en consecuencia, la implementación del SF₆ en este nivel de la red no resulta compatible con la filosofía operativa de estos equipos. En conclusión, el SF₆ constituye una alternativa viable únicamente si se adoptan diseños optimizados que mitiguen sus desventajas térmicas y en contextos donde la seguridad intrínseca y la reducción de mantenimiento puedan justificar los costos adicionales asociados a su construcción e implementación.

Conclusiones

El diseño de transformadores de distribución tipo poste debe cumplir con normativas nacionales e internacionales que definen parámetros críticos para garantizar una operación segura y eficiente. La viabilidad del uso de gas SF₆ y *Conduground* fue evaluada bajo este marco normativo, permitiendo cuantificar su desempeño frente a los estándares para los diseños convencionales.

La evaluación del *Conduground* en transformadores de distribución tipo poste enfrenta limitaciones debido a la falta e inconsistencias en datos fundamentales, como su conductividad térmica, resistividad y

conductividad eléctrica. Esta carencia impide realizar simulaciones precisas y extraer conclusiones definitivas sobre su viabilidad en estas aplicaciones.

Pese a la existencia de múltiples softwares especializados en análisis mediante el método de los elementos finitos, COMSOL Multiphysics destacó por su capacidad para modelar fenómenos multifísicos, como la transferencia de calor por convección, funcionalidad que fue clave para obtener resultados realistas del comportamiento térmico del SF₆.

Bajo condiciones de máximo estrés térmico, un transformador refrigerado con SF₆ alcanza temperaturas un 73,07 % superiores a las obtenidas con aceite mineral, excediendo los límites normativos en 22,743 °C; sin embargo, el aumento del 30 % en las dimensiones de la cuba reduce la temperatura del punto más caliente en un 16,22 %, mientras que operar a una presión de 2 atm permite disminuirla adicionalmente en un 16,42 %.

Los resultados presentados demostraron que el gas SF₆ es una alternativa viable al aceite mineral como refrigerante en transformadores de distribución tipo poste, siempre que se implementen ajustes sustanciales en su diseño para garantizar el cumplimiento de los límites normativos de temperatura.

Agradecimientos

En especial a la empresa ICIS, C.A por su apoyo técnico para el desarrollo de esta investigación, a la Universidad Rafael Urdaneta y a la profesora Nancy Mora de Morillo por su apoyo metodológico.

Referencias bibliográficas

- [1] P. Avelino, *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas*, 3ra ed. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A., 2008.
- [2] *Transformadores de potencia. Generalidades*, Norma COVENIN 536, Fondonorma, Caracas, Venezuela, 2021.
- [3] *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Std C57.12.00, Nueva York, EE. UU., 2021.
- [4] *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*, Norma IEC 60076-5, Comisión Electrotécnica Internacional, Londres, Reino Unido, 2011.
- [5] D. Brosolo y G. Máttar, “Evaluación de *Conduground* como material conductor alternativo al cobre para sistemas de puesta a tierra”, Trabajo Especial de Grado, Fac. Ingeniería, Univ. Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2018.
- [6] D. Xiao, *Gas Discharge and Gas Insulation*. Berlín, Alemania: Springer, 2016.
- [7] Y. Yokomizu, T. Kobayashi, y T. Matsumura, “Particle Composition and Heat Capacity of High-Temperature SF₆ Present at Constant Volume: Discussion on Formula Expressing Relationship between Constant-Pressure and Constant-Volume Heat Capacities,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 10, pp. 683–688, 2015, doi: 10.1002/tee.22147.
- [8] *IEEE Guide for Sulphur Hexafluoride (SF₆) Gas Handling for High-Voltage (over 1000 Vac) Equipment*, IEEE Std C37.122.3, Nueva York, EE. UU., 2024.
- [9] *Heat Transfer Module User's Guide*, COMSOL Multiphysics, Estocolmo, Suecia, 2024.