**Universidad
Autónoma
Metropolitana**

Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

Análisis térmico de los elementos de sujeción del núcleo de un reactor trifásico

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTROMAGNÉTICA

Elizabeth Cortina González
10/11/2021

Director de tesis:
Dr. Rafael Escarela Pérez
Departamento de Energía, UAM-A

Co-Director de tesis:
Dr. Juan Carlos Olivares Galván
Departamento de Energía, UAM-A

Declaratoria

- Yo, Rafael Escarela Pérez, declaro que aprobé el contenido del presente reporte de la Idónea Comunicación de Resultados y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Firma _____

- Yo, Juan Carlos Olivares Galván, declaro que aprobé el contenido del presente reporte de la Idónea Comunicación de Resultados y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Firma _____

- Yo, Elizabeth Cortina González, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Firma _____

Jurado Asignado:

Presidente: MTRO. RODRIGO OCON VALDEZ

Secretario: Dr. JESUS ULICES LICEAGA CASTRO

Vocal 1: Dr. JUAN CARLOS OLIVARES GALVAN

Vocal 2: MTRO. EDUARDO CAMPERO LITTLEWOOD

Ciudad de México, México.

Ing. Elizabeth Cortina González

Nombre y firma del Alumno

Dr. Rafael Escarela Pérez

Departamento de Energía, UAM-A

Nombre y firma del Director de la idónea
comunicación de resultados

Dr. Juan Carlos Olivares Galván

Departamento de Energía, UAM-A

Nombre y firma del Co-director de la
idónea comunicación de resultados

Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00007

Matrícula: 2192800198

Análisis térmico de los
elementos de sujeción del
núcleo de un reactor
trifásico

ELIZABETH CORTINA GONZALEZ
ALUMNA

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

En la Ciudad de México, se presentaron virtualmente a las
20:30 horas del día 11 del mes de noviembre del año 2021,
los suscritos miembros del jurado:

MTRO. RODRIGO OCON VALDEZ
MTRO. EDUARDO CAMPERO LITTLEWOOD
DR. JUAN CARLOS OLIVARES GALVAN
DR. JESUS ULISES LICEAGA CASTRO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de
Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen
de Grado cuya denominación aparece al margen, para la
obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTROMAGNETICA

DE: ELIZABETH CORTINA GONZALEZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del
Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad
Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado
resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la
interesada el resultado de la evaluación y, en caso
aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTORA DE LA DIVISION DE CBI

DRA. TERESA MERCHAND HERNANDEZ

PRESIDENTE

MTRO. RODRIGO OCON VALDEZ

VOCAL

MTRO. EDUARDO CAMPERO LITTLEWOOD

VOCAL

DR. JUAN CARLOS OLIVARES GALVAN

SECRETARIO

DR. JESUS ULISES LICEAGA CASTRO

A toda mi familia, es un logro para todos nosotros estar hoy entregando este documento maestro. Trae consigo mucho sacrificio y muchísimo trabajo. A la comunidad científica, espero les sirva a muchos de referencia.

Agradecimientos

- Le agradezco a mis padres por formar la persona que soy hoy. Por dejar de darse gustos y de vivir su propia vida para que yo pudiera vivir la mía.
- A mi hermano por estar siempre ahí y por ser mi guía. Somos un gran equipo tu y yo.
- A mi esposo porque en las buenas y malas, en las muy buenas y en las muy malas sigue aquí conmigo. Apoyándome, queriéndome y cuidándome. TSMQCC (2013-2021)
- A mis asesores Rafael Escarela Pérez y Juan Carlos Olivares Galván por darme la oportunidad de trabajar con ellos, por confiar en mí y por dejarme ser parte de esta maestría en primer lugar. Son grandes personas y ha sido un orgullo trabajar con ustedes.
- A Salvador Magdaleno Adame porque tu apoyo fue más que necesario para mi avance en este trabajo. Fueron madrugadas trabajando juntos y aprecio mucho que me las dedicaras.
- A Rodrigo Ocon Valdez por siempre estar dispuesto a responder mis preguntas y por ayudarme tanto a desarrollar esta investigación.
- A Yaima por convertirse en una gran amiga y una gran compañera.
- A Victor Jara y Alejandro Castillo por ayudarme en todo.
- A mis compañeros de la maestría (todas las generaciones), porque somos un equipo de estudiantes de calidad. Somos privilegiados de estar aquí y de ser electromagnéticos. Y porque si no es juntos no hay quien apruebe las materias jajaja.
- A todos los profesores porque independientemente de ser grandes profesionales, se convirtieron en nuestros amigos y nos dejaron formar parte de sus familias. Nos hicieron sentir que no estamos solos en México. Gracias a todos por enseñarnos tan bien.
- A todos gracias, fue lindo y doloroso el proceso pero valió mucho la pena.

Resumen

En el presente trabajo se obtiene la distribución de la temperatura en uno de los pernos de sujeción del núcleo de un reactor en derivación trifásico de 5 MVA, 115 kV, 60 Hz, tipo núcleo de 5 columnas aplicando el método del elemento finito, utilizando el software comercial ANSYS Maxwell. Esto debido a que el reactor realmente falló mientras estaba en funcionamiento, la falla ocurrió progresivamente dado que el aislamiento del tornillo estaba dañado y provocó un aumento de temperatura no deseado. Se realiza un análisis magneto estático en el dominio de la frecuencia y se obtienen las distribuciones de campo magnético y pérdidas en los pernos de sujeción. Se construye un modelo en 3D y se resuelven las ecuaciones de Maxwell mediante el uso de potenciales magnéticos vectoriales y escalares. Se valida el modelo electromagnético del reactor en 3 dimensiones, mediante la técnica del almacenamiento de energía magnética para calcular la inductancia por fase y compararlo con el valor de inductancia por fase medida en laboratorio, también se realiza el análisis de pérdidas en el núcleo y se compara con el valor medido en laboratorio. Este trabajo es de gran ayuda para los fabricantes de transformadores dado que contarán con un modelo que les permitirá tanto analizar diferentes condiciones de operación así como optimizar el diseño del reactor.

Abstract

In this thesis work the temperature distribution in the frame bolts of a 5 MVA, 115 kV, 60 Hz, three-phase five-limbs shunt reactor is obtained utilizing the finite element method (FEM) and the commercial ANSYS Maxwell software. This because the reactor actually failed while it was running, the failure occurred progressively as the screw insulation was damaged and caused an unwanted temperature rise. A time-harmonic analysis is performed to compute the magnetic field distribution in the reactor and the power losses in the frame bolts. A three-dimensional (3-D) shunt reactor model is utilized, and Maxwell's equations are solved utilizing scalar and vectorial magnetic potentials. The 3-D electromagnetic shunt reactor model is validated by comparing the value of inductance measured in the laboratory with the value of inductance computed in the 3-D FE simulation. In addition, the core losses computed in the FE simulation are compared with the core losses measured in the laboratory.

This thesis work is important for transformer manufacturers which requires an adequate shunt reactor model to analyze it under different operation conditions and to optimize the actual design.

Contenido

Declaratoria	I
Resumen	V
Abstract	VI
Contenido	VII
Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	IX
Nomenclatura	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación del trabajo	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Hipótesis	4
1.5. Contribuciones de la tesis	4
1.6. Organización de la Idónea Comunicación de Resultados	6
2. Marco Teórico	7
2.1. Introducción	7
2.2. Clasificación de los reactores	8
2.2.1. Por el tipo de núcleo	8
2.2.2. Por el tipo de aplicación	8
2.3. Reactor en derivación	11
2.4. Principio de operación de los reactores	11
2.4.1. Instalación de los reactores en derivación	12
2.4.2. Construcción física	12
2.5. Vibraciones en los reactores	15
2.6. Pérdidas y análisis de temperatura en los reactores en derivación	16
2.7. Materiales utilizados en el modelo del reactor	20
2.7.1. Acero al carbón A-36	20
2.7.2. Acero eléctrico de grano orientado	20
2.7.3. Cobre	22
2.7.4. Acero inoxidable	22

3. Método de los Elementos Finitos	23
3.1. Introducción	23
3.2. Método de los Elementos Finitos	23
3.3. Ecuaciones fundamentales del electromagnetismo	26
3.4. Formulaciones de potenciales para reactores	28
3.4.1. Región conductora de corrientes de remolino en partes estructurales	28
3.4.2. Región no conductora: núcleo	29
3.4.3. Región de Aire donde se encuentran los devanados	30
3.5. Condiciones de frontera	30
4. Modelado del reactor en derivación trifásico	32
4.1. Introducción	32
4.2. Software Maxwell	32
4.3. Hipótesis del modelo del reactor trifásico en derivación.	32
4.4. Descripción del modelado del reactor en derivación trifásico	34
4.4.1. Especificaciones eléctricas	34
4.4.2. Especificaciones geométricas y propiedades físicas	34
4.4.3. Condiciones de frontera del modelo	36
4.4.4. Mallado de la geometría	38
4.4.5. Condiciones de operación	39
5. Simulación en 3D del reactor trifásico en derivación	40
5.1. Introducción	40
5.2. Validación del modelo en 3D	40
5.3. Análisis de pérdidas en el núcleo del reactor en derivación trifásico	43
5.3.1. Modelo isotrópico	44
5.3.2. Modelo anisotrópico	44
5.3.3. Resultados	46
5.4. Análisis térmico	46
5.4.1. Simulación en condiciones de operación normal del sistema	48
5.4.2. Simulación en condiciones de falla del sistema de sujeción del reactor	49
5.4.3. Análisis de pérdidas y distribución de temperatura	51
6. Conclusiones	56
7. Referencias	58
A. Características térmicas del aceite de transformador	62

Índice de Tablas

2.1. Propiedades físicas del acero al carbón [1]	22
2.2. Propiedades físicas del cobre [2]	22
4.1. Placa de datos del reactor en derivación bajo estudio.	35
5.1. Coeficientes de pérdidas para el acero eléctrico de grano orientado M3 a 60 Hz.	45
5.2. Comparación entre las pérdidas medidas y las pérdidas simuladas del reactor.	46

5.3. Propiedades térmicas del aceite mineral a 65°C [3]	47
5.4. Tabla de pérdidas calculadas en el tornillo variando el material y la densidad de campo magnético en el modelo del reactor trifásico	55
5.5. Tabla de temperaturas calculadas en el tornillo variando el material y la densidad de campo magnético en el modelo del reactor trifásico	55
A.1. Características térmicas del aceite de transformador [3]	62

Índice de Figuras

1.1. Perno de sujeción del reactor en derivación dañado debido al aumento de la temperatura [4].	5
2.1. Diferentes tipos de reactores en un sistema de potencia común [5].	7
2.2. Clasificación de los reactores según el tipo de núcleo. a) Tipo columna, b) tipo acorazado	8
2.3. Conexión directa del reactor en derivación al Sistema Eléctrico de Potencia.	12
2.4. Partes principales de un reactor.	13
2.5. Mediciones de gases disueltos en el reactor bajo estudio.	19
2.6. Generación de gases combustibles vs. temperatura de descomposición del aceite [6].	21
3.1. Elementos de mallado más utilizados.	24
3.2. Variación angular de la intensidad de campo magnético $\mathbf{H}$ al pasar de un medio a otro con permeabilidades diferentes	27
4.1. Diagrama de flujo para el análisis de dispositivos electromagnéticos en el software ANSYS Maxwell	33
4.2. Fotografía del reactor en derivación trifásico de la empresa IEM	34
4.3. Dimensiones del núcleo del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista frontal).	35
4.4. Dimensiones del núcleo y bobinas del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista aérea y frontal).	36
4.5. Dimensiones de las soleras de sujeción del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista frontal y aérea).	36
4.6. Dimensiones de los tornillos y las tuercas del reactor en derivación trifásico (vista lateral, frontal y del largo de los tornillos)	37
4.7. Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 [4]	37
4.8. Condición de frontera Dirichlet del modelo	38
5.1. Distribución de la densidad de campo magnético en el núcleo del reactor en derivación trifásico en condición de operación nominal.	40
5.2. Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 0^\circ$)	41
5.3. Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 120^\circ$)	41
5.4. Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 240^\circ$)	42
5.5. Modelo del reactor en derivación trifásico.	44

5.6. Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 [4].	45
5.7. Curva de pérdidas a 60 Hz del acero eléctrico M3 [4].	45
5.8. Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 en la dirección de rolado [4].	46
5.9. Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 en la dirección transversal [4].	47
5.10. Distribución del campo magnético en el núcleo del reactor trifásico cuando no ocurre falla.	48
5.11. Distribución de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo cuando no ocurre falla.	49
5.12. Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo cuando no ocurre falla.	49
5.13. Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista frontal) cuando no ocurre falla.	50
5.14. Distribución vectorial de la densidad de corriente en soleras de sujeción del núcleo (vista lateral) cuando no ocurre falla.	50
5.15. Distribución vectorial de la densidad de corriente en soleras de sujeción del núcleo (vista superior) cuando no ocurre falla.	51
5.16. Distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo cuando no ocurre falla.	51
5.17. Distribución del campo magnético en el núcleo del reactor trifásico cuando ocu- rre la falla.	52
5.18. Distribución de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo cuando ocurre la falla.	52
5.19. Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.	53
5.20. Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo (acercamiento) cuando ocurre la falla.	53
5.21. Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista lateral) cuando ocurre la falla.	53
5.22. Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista superior) cuando ocurre la falla.	54
5.23. Distribución vectorial de la densidad de corriente en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.	54
5.24. Distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.	54

Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Descripción
B	[T]	Densidad de flujo magnético
H	[A m ⁻¹]	Intensidad de campo magnético
E	[V m ⁻¹]	Intensidad de campo eléctrico
D	[A s m ⁻²]	Densidad de flujo eléctrico
J	[A m ⁻²]	Densidad de corriente
A	[Wb m ⁻¹]	Potencial magnético vectorial
$\tilde{B}$	[T]	Densidad de flujo magnético en el dominio de la frecuencia
$\tilde{H}$	[A m ⁻¹]	Intensidad de campo magnético en el dominio de la frecuencia
$\tilde{E}$	[V m ⁻¹]	Intensidad de campo eléctrico en el dominio de la frecuencia
$\tilde{D}$	[A s m ⁻²]	Densidad de flujo eléctrico en el dominio de la frecuencia
$\tilde{J}$	[A m ⁻²]	Densidad de corriente en el dominio de la frecuencia
$\tilde{A}$	[Wb m ⁻¹]	Potencial magnético vectorial en el dominio de la frecuencia
<i>f</i>	[Hz]	Frecuencia del sistema
ω	[rad s ⁻¹]	Frecuencia angular
<i>M</i>	[A m ⁻¹]	Magnetización del material
<i>Z</i>	[Ω/m ²]	Impedancia superficial

Símbolo	Unidades	Descripción
χ_m	Adimensional	Susceptibilidad magnética del medio
δ	[m]	Profundidad de penetración
ε	[F m ⁻¹]	Permitividad del material
μ_0	[H m ⁻¹]	Permeabilidad magnética el vacío
μ	[H m ⁻¹]	Permeabilidad magnética del material
μ_r	Adimensional	Permeabilidad magnética relativa
ρ	[C m ⁻³]	Densidad de carga volumétrica
σ	[S m ⁻¹]	Conductividad
∇		Operador ($\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{k}$)
W_m	[J]	Energía magnética almacenada
ψ	[A]	Potencial magnético escalar
ϕ	[A]	Potencial magnético escalar reducido
V	[V]	Potencial eléctrico escalar
q	[J/s]	Tasa de transferencia de calor por convección

1. Introducción

En esta sección se muestra el estado del arte relativo al análisis magnético-térmico de reactores en derivación. También se plantean los objetivos de la idónea comunicación de resultados y la motivación de la investigación. Finalmente se realiza una breve explicación de cómo se encuentra estructurado el trabajo.

1.1. Antecedentes

Los reactores en derivación se utilizan para compensar la potencia reactiva capacitiva generada durante los períodos de carga baja y de operaciones de conmutación en redes de transmisión de alto voltaje. El análisis magnético-térmico resulta de gran interés debido a la aplicación de este tipo de reactores en la industria eléctrica. El MEF se reconoce como una de las herramientas computacionales más eficientes, capaces de realizar este análisis y esto se debe a la posibilidad que brinda de representar con precisión la geometría del reactor en dos y tres dimensiones y la capacidad de modelar la no linealidad de los materiales.

Para modelar el comportamiento electromagnético del reactor en derivación se utilizan las ecuaciones de Maxwell. El MEF se encarga de resolver estas ecuaciones que se plantean en problemas que son muy complejos o imposibles de solucionar de forma analítica. El MEF es una herramienta con la que se obtiene la distribución de flujo magnético, la intensidad de campo magnético, la densidad de corriente y las corrientes de remolino en todas las partes del reactor, incluyendo los elementos estructurales.

A continuación se muestra una serie de investigaciones relevantes relacionadas con el tema a tratar en este trabajo. Donde se puede apreciar la gran importancia que han adquirido estos estudios en el diseño, análisis y solución de este tipo de dispositivos.

T. Gunes [7], hace un estudio sobre el diseño de los núcleos de los transformadores, mediante el uso de erosión por chispa para perforar y formar círculos de varios diámetros en las láminas. Esto lo hace para comparar los efectos de las perforaciones circulares sobre las propiedades magnéticas de los núcleos utilizando curvas de histéresis, imágenes de Kerr magneto-ópticas y el método de los elementos finitos, haciendo uso del *software* **ANSYS®**. Realiza un análisis magnético estático en 2D para estudiar las distribuciones de líneas de flujo, densidades de flujo y fuerzas magnéticas. El autor concluye que mientras aumenta el diámetro de las perforaciones del núcleo se deteriora la densidad de flujo, disminuye drásticamente la inducción de saturación (B_{max}), la permeabilidad máxima y también la coercitividad, mientras que aumentan las pérdidas de potencia y la fuerza magnética. Un análisis en 3D hubiera permitido observar con mayor precisión el comportamiento del campo magnético en las láminas que conforman el núcleo.

E. Akpinar et al. [8], realizan un análisis magnetostáticos y transitorios en un reactor en derivación trifásico de tres piernas utilizando el programa **ANSYS®** para estimar el valor de secuencia cero de la inductancia. El encadenamiento de flujo obtenido en la columna central es menor a los correspondientes con las columnas laterales, lo que se debe a que el área de la sección transversal de la columna central es diferente al área de la sección transversal de las columnas laterales. Concluyen que la inductancia de secuencia cero es la misma que la inductancia de fuga dado que no se muestra el efecto mutuo entre las bobinas cuando estas

están excitadas con corriente directa a su valor nominal. Calculan la inductancia basándose en los métodos de encadenamientos de flujo y almacenamiento de energía.

S. Magdaleno-Adame et al. [9], realizan pruebas experimentales a un reactor en derivación monofásico utilizando sensores de fibra óptica, un acondicionador de señal comercial multicanal y un termómetro de temperatura para medir directamente la temperatura del aceite. Realizan simulaciones en 3D de elementos finitos para calcular las pérdidas debido al efecto de abombamiento en los pernos de sujeción y utilizar este dato en el análisis térmico como fuente de calor para analizar los puntos de mayor temperatura. Se realiza un análisis térmico en estado estacionario considerando una frontera uniforme de convección. Los autores consideran que la diferencia entre las temperaturas medidas y calculadas es aceptable. Se proponen cambios en el diseño de los reactores tales como: aumentar el diámetro de las pastillas del núcleo central y variar el número y la longitud de los espacios de aire principales. Se simula nuevamente el reactor monofásico y los resultados son positivos puesto que a medida que aumentaban el diámetro de las pastillas y el número de espacios de aire, disminuía la temperatura en los pernos de sujeción.

S. Magdaleno-Adame et al. [10], presentan el cálculo de pérdidas y distribución de campo magnético en el núcleo de un reactor de potencia monofásico de 33 MVA. El núcleo fue modelado, considerando sus propiedades anisotrópicas, en 3 dimensiones a tensión nominal utilizando el método de elementos finitos. Se realiza un análisis armónico utilizando el software ANSYS Maxwell. Se proponen permeabilidades relativas constantes isotrópicas para cada dirección con el objetivo de disminuir el tiempo de cómputo. Para calcular las pérdidas el programa necesita el valor de los coeficientes de pérdidas por histéresis, por corrientes de remolino y por pérdidas excedentes, por tanto, los autores introdujeron la curva de pérdidas en la dirección de rolado y con base en esta curva y aplicando un algoritmo de regresión el programa calcula estos coeficientes. Comparan los valores de pérdidas obtenidos en las simulaciones y los estimados, obtienen un error de un 4.67 %. Los autores consideran que este análisis se debe incluir en los programas y algoritmos de diseño de reactores de potencia.

A. Alabakhshizadeh et al. [11], presentan un análisis de elementos finitos en 2 dimensiones en el software ANSYS Maxwell, para evaluar los cambios de rendimiento de un inductor de alta frecuencia utilizado en un inversor solar mediante un nuevo esquema de disposición de las ubicaciones de los entrehierros. Se realiza el estudio a través de dos solucionadores para determinar pérdidas: el solucionador de transitorios y el solucionador de corrientes parásitas. Construyen cuatro nuevos diseños para analizar posibles mejoras mediante la misma estructura de bobinado. Se muestra cómo se obtiene una mejora en las distribuciones de pérdidas en las bobinas a medida que varían la disposición de los entrehierros. Un análisis similar pero de un modelo en 3 dimensiones pudiera arrojar resultados más cercanos a la realidad dado que se pueden ver las corrientes inducidas en todas las direcciones.

López-Fernández et al. [12], presentan la metodología en 3D para evaluar los daños que puede provocar un sobrecalentamiento en el tanque de los transformadores basada en formulación analítica de electromagnetismo vinculada al método térmico de elementos finitos. Los resultados se validan experimental y numéricamente mediante la comparación de modelos simétricos en 2 dimensiones y 3 dimensiones con resultados experimentales y se ubican los puntos calientes. Este trabajo incluye un proceso de calibración con el objetivo de identificar y ajustar la entrada de parámetros, de modo que los resultados obtenidos coincidan con los valores de temperatura tomados como referencia.

Olivares-Galvan et al. [13], presentan un análisis práctico del sobrecalentamiento en los pernos que unen el tanque y la tapa, que están cerca de las boquillas de baja tensión. El análisis lo realizan a un transformador de 420 MVA de núcleo tipo acorazado trifásico. Los autores

especulan que las vibraciones y las temperaturas normales del transformador durante su operación inicial, llevaron a que se aflojaran los pernos y se concentraran las pérdidas en esa zona y se crearan puntos calientes. Realizan un análisis armónico lineal a 60 Hz con impedancia de frontera en el tanque para calcular las pérdidas por corrientes parásitas y luego realizan un análisis térmico tridimensional en estado estacionario para calcular la distribución de la temperatura en la región de los pernos. Las pérdidas que obtuvieron en el análisis electromagnético fueron transferidas al análisis térmico como fuentes de calor. Validan el modelo comparando los resultados obtenidos con mediciones. Obtienen menos de 0.7 % de error entre el valor de temperatura calculado y el medido. Los autores analizan tres casos: el primer caso corresponde a la situación cuando existe buen contacto entre los pernos y la superficie del tanque, el segundo caso corresponde a la situación cuando existe mal contacto entre los pernos y la superficie del tanque y el tercer caso simula la situación cuando existe mal contacto entre los pernos y la superficie del tanque y la parte superior de los pernos se conecta con la parte inferior mediante un enlace de cobre para asegurar buen contacto entre el tanque y su tapa. La solución que proponen los autores dió muy buenos resultados ya que lograron eliminar los problemas de puntos calientes existentes.

1.2. Justificación del trabajo

Cuando una red eléctrica de alta tensión funciona con una carga muy baja, crece la presencia de la potencia reactiva capacitiva en la red y esto provoca un aumento de la tensión en las líneas de transmisión y distribución [14]. Para el buen funcionamiento del sistema eléctrico resulta importante que las variaciones de voltaje con respecto a su valor nominal sean inferiores al 5 % [15]. Los reactores en derivación se utilizan para el control de estas variaciones. Sin embargo, la intensidad de vibración de un reactor en derivación suele ser más severa que la de un transformador [16], debido a las fuerzas entre dos secciones magnéticas separadas por un espacio no magnético muy pequeño. El campo magnético crea fuerzas pulsantes a través de estos espacios de aire, por lo tanto, los núcleos del reactor están diseñados como estructuras muy rígidas para eliminar las vibraciones excesivas. Existen diseños donde la sujeción mecánica es externa pero esta no es tan eficiente como el uso de tornillos o pernos a través del núcleo. En este caso de estudio, se analiza el comportamiento electromagnético y térmico de los elementos de sujeción del núcleo de un reactor trifásico en derivación. Existen varios trabajos donde se han modelado los reactores en derivación aplicando la técnica de los elementos finitos para realizar un análisis térmico. Sin embargo, estos trabajos se han concentrado en aspectos particulares y arrojan resultados incompletos. En este caso de estudio se analiza un reactor en derivación trifásico de 5 columnas de núcleo radial. Por lo que se considera que el análisis del comportamiento del flujo magnético y de los puntos de calor será un aporte novedoso. Además el hecho de que el fabricante cuente con un modelo que le permita predecir el comportamiento de los equipos en condiciones de operación normales y anormales; así como comprender los efectos de una condición de falla en el equipo, les permite tanto a los fabricantes como a los usuarios mejorar el proceso de gestión y diagnóstico durante su vida útil.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es analizar, en el dominio de la frecuencia, el comportamiento térmico de los tornillos que sujetan el núcleo de un reactor trifásico de potencia de 5 MVA, 115 KV, 25.1 A de corriente nominal a 60 Hz utilizando el método de elementos

finitos y ofrecer recomendaciones al fabricante para disminuir los efectos negativos de los puntos calientes.

Los objetivos específicos son:

- Armar un modelo magnético-térmico en 3D utilizando el método de los elementos finitos dentro del software **ANSYS MAXWELL®** de un reactor magnético trifásico.
- Establecer la distribución de flujo magnético y las fuentes de calor en el núcleo magnético, particularmente en los tornillos de sujeción.
- Determinar la distribución de temperaturas en los tornillos de sujeción del núcleo debidas a la presencia de fuentes de calor inducidas magnéticamente.
- Ofrecer recomendaciones al fabricante para disminuir los efectos negativos de los puntos calientes en los pernos del núcleo del reactor.

1.4. Hipótesis

En el modelo del reactor en derivación trifásico se realizaron las siguientes hipótesis:

- La conductividad eléctrica de los materiales es constante.
- La corriente de desplazamiento es despreciable.
- Los materiales magnéticos son isotrópicos y el material del núcleo se considera no lineal.
- La densidad de corriente en conductores filamentosos es uniforme.

1.5. Contribuciones de la tesis

Un problema identificado por la empresa IEM en estos reactores en derivación es que pueden alcanzar temperaturas altas, específicamente en las regiones cercanas a los pernos de sujeción cuando operan en condiciones anormales de operación, como las fallas. La figura 1.1 muestra el efecto que causó en un perno de sujeción un aumento considerable de temperatura. Para analizar las temperaturas presentes en el reactor es necesario establecer un procedimiento magnético-térmico que permita observar el comportamiento de la distribución del flujo magnético, de su densidad, de las pérdidas por corrientes inducidas y de las diferentes temperaturas presentes en el interior del reactor.

Las altas temperaturas pueden dañar elementos del reactor en derivación: la pintura, el sistema de sellado, el aceite del transformador, etc. Lo que abre la posibilidad de que se presenten fallas. En la actualidad la empresa IEM se encuentra desarrollando estrategias y herramientas que permitan analizar y optimizar la operación de estos dispositivos, por lo que solicitó el apoyo para definir un procedimiento que permita obtener estos parámetros de una forma más eficiente y precisa. Por tanto se plantea simular el modelo del reactor trifásico en derivación en 3D aplicando el método de elementos finitos, y así poder realizar el análisis magnético-térmico, obtener los parámetros de interés y ofrecer recomendaciones al fabricante.

(a) Vista frontal del tornillo dañado con tuerca (b) Vista frontal del tornillo dañado sin la tuerca

(c) Vista lateral del tornillo dañado extraído del reactor

Figura 1.1: Perno de sujeción del reactor en derivación dañado debido al aumento de la temperatura [4].

1.6. Organización de la Idónea Comunicación de Resultados

En el Capítulo 1 se abordaron trabajos que anteceden sobre temas relacionados con el análisis que se realiza en este trabajo, se presenta la Idónea Comunicación de Resultados, se desarrollan las contribuciones de esta ICR (tesis) y se plantean los objetivos generales y específicos.

En el Capítulo 2 se describen los reactores en general haciendo énfasis en los reactores en derivación, se argumenta sobre su principio de funcionamiento así como su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia y su construcción física. Además se presenta un breve desarrollo de las pérdidas que ocurren dentro de estos reactores así como los materiales con los cuales son fabricados usualmente.

En el Capítulo 3 se realiza una introducción al Método de Elementos Finitos, la historia detrás de este método y como ayuda en la solución a problemas electromagnéticos. Se analiza la aplicación de este método en reactores en derivación, haciendo uso de potenciales magnéticos vectoriales y escalares, a partir de las ecuaciones de Maxwell.

En el Capítulo 4 se muestran las propiedades eléctricas, físicas y geométricas necesarias para la construcción del modelo en 3D del reactor en derivación. Se presentan las condiciones de frontera implementadas en el análisis, así como las características del mallado y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo.

En el Capítulo 5 se presentan las simulaciones realizadas. Primeramente se muestran las vías mediante las cuales se validó el modelo, luego se presentan las distribuciones de campo magnético, de densidades de corriente y temperaturas para los casos cuando el reactor opera en condiciones normales y cuando opera bajo condiciones de falla.

En el Capítulo 6 se discuten y presentan las conclusiones de este trabajo y luego se muestran las perspectivas para trabajos futuros.

2. Marco Teórico

2.1. Introducción

En 1820 el físico danés Hans Chistian Oersted demostró que una corriente eléctrica que fluía a través de un material conductor creaba un campo magnético alrededor del conductor, esto se consideró notable en aquellos tiempos ya que relacionó la electricidad y el magnetismo. Una vez demostrado que la corriente eléctrica podía generar un campo magnético, entonces era muy probable que un campo magnético pudiera dar a lugar a una corriente eléctrica. Faraday se inspiró en esto y en 1831 demostró que para que un campo magnético hiciera circular una corriente eléctrica por un conductor debía ser variante en el tiempo [17].

El trabajo de Faraday demostró que al enrollar dos bobinas, una sobre otra, y hacer circular

Figura 2.1: Diferentes tipos de reactores en un sistema de potencia común [5].

una corriente variable mediante la apertura y cierre del circuito primario, se generaba un flujo magnético variante en el tiempo, que enlazaba a la segunda bobina e inducía una corriente eléctrica en la misma. Precisamente a esto se le conoce como transformador eléctrico y su creación se le atribuye a Faraday. Fue en 1884, más de 50 años después, que los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri crearon el modelo del transformador de corriente alterna [17]. A los reactores también se les conoce como transformadores sin secundario. Los reactores son dispositivos esenciales en la integración de los sistemas de transmisión de energía eléctrica, ya que pueden funcionar como parte de un esquema limitador de corriente, o para filtrar las señales de los sistemas o para compensar las cargas [18]. La figura 2.1 muestra un diagrama

unifilar de un sistema eléctrico típico [5].

2.2. Clasificación de los reactores

Con el paso de los años se han logrado desarrollar diferentes tecnologías para mejorar el diseño y la construcción de los reactores en función de su aplicación [18]. Los reactores pueden clasificarse en cuanto al tipo de enfriamiento que utilizan, generalmente se suministran con radiadores que disipan el calor por convección natural o por convección forzada (utilizando ventiladores). En cuanto al número de fases, pueden fabricarse reactores monofásicos o trifásicos. También se pueden clasificar dependiendo de su aplicación, capacidad, disposición de los devanados y de acuerdo con el tipo de núcleo [19]. Se han diseñado reactores tipo seco o inmersos en aceite, de núcleo de aire con o sin blindaje magnético en paredes y/o tapa y base, con núcleo de hierro con entrehierros en sus columnas y con núcleo de tipo multi-entrehierro [18].

2.2.1. Por el tipo de núcleo

Según el tipo de núcleo los reactores se pueden clasificar de dos formas:

1. Tipo acorazado

Esta construcción se identifica debido a que el núcleo magnético rodea a las bobinas, como se muestra en la figura 2.2 b). La sección transversal del núcleo es de forma rectangular. Las bobinas tienen forma de disco. Las ventajas de este diseño son su alta resistencia mecánica, comportamiento más lineal con respecto al reactor tipo columna y la posibilidad de construirlos con baja impedancia de dispersión. Por las extremidades laterales circula la mitad del flujo magnético.

Figura 2.2: Clasificación de los reactores según el tipo de núcleo. a) Tipo columna, b) tipo acorazado

2. Tipo columna

Esta construcción puede ser de núcleo cruciforme o radial. Se identifica porque el devanado rodea al núcleo magnético como lo muestra la figura 2.2 a). Las bobinas pueden tener forma cilíndrica o concéntrica. El flujo que atraviesa las extremidades regresa por los yugos. Este tipo de diseño tiene diversas ventajas como: poca inversión y bajo costo de mantenimiento; y desventaja como: baja resistencia mecánica.

2.2.2. Por el tipo de aplicación

Se pueden clasificar como se muestra a continuación [18]:

1. Reactores limitadores de corriente

Son utilizados para controlar los niveles de cortocircuito en los sistemas de potencia que abarcan desde grandes complejos industriales de potencia hasta redes de distribución de servicios públicos y sistemas de transmisión de alta y extra alta tensión. Estos reactores se conectan principalmente para reducir la corriente de cortocircuito a niveles consistentes con el nivel de resistencia térmica y electromecánica de los componentes de la red donde están conectados y para reducir la caída de voltaje de cortocircuito en las secciones del bus a niveles que sean consistentes con la práctica de coordinación de aislamiento. Las altas corrientes de falla en los sistemas eléctricos de potencia pueden causar grandes daños si no son controladas [18]. Los reactores limitadores de corriente se instalan en diferentes puntos de la red eléctrica y su nombre indica su ubicación o aplicación.

2. Reactores de fase

Los reactores de fase se instalan en serie con líneas o alimentadores de un sistema de distribución. La principal ventaja de esta configuración es que reduce los niveles de corriente de cortocircuito de línea a línea y de fase a tierra al nivel deseado [18]. En resumen, los reactores de fase son una aplicación de los reactores conectados en serie y pueden ser instalados en un alimentador de un sistema de distribución para proteger un circuito o en la salida de un generador para limitar la contribución de fallas a toda la red, y también pueden ubicarse en algún punto intermedio.

3. Reactores de enlace de bus

Los reactores de enlace de bus se utilizan cuando dos o más alimentadores o fuentes de energía se encuentran conectados mediante un mismo bus y se desea seccionar el bus debido a los altos niveles de fallas, sin perder la flexibilidad operativa del sistema. El principal beneficio de esta configuración es que si la carga en ambos lados del reactor está balanceada en condiciones normales de operación, el reactor tendrá un efecto insignificante sobre la regulación de voltaje o las pérdidas del sistema [18].

4. Reactores de puesta a tierra neutrales

Los reactores de puesta a tierra neutrales se aplican para limitar solo fallas de línea a tierra individuales. Principalmente se instalan en niveles de voltaje de transmisión cuando se emplean autotransformadores con terciario en delta. Aunque no influyen sobre las fallas entre líneas, son de gran beneficio para el sistema eléctrico de potencia ya que la mayoría de las fallas surgen de línea a tierra y si estas no se interrumpen a tiempo y la energía del lado de la falla es alta se puede convertir en una falla de línea a línea. Por tanto, estos transformadores pueden contribuir indirectamente a reducir el número de fallas de línea a línea al reducir la energía disponible cercana a la falla de línea a tierra [18].

5. Reactores de puesta a tierra del neutro del generador

Las reactancias de secuencia positiva, negativa y cero de un generador no son iguales y, como resultado, cuando el neutro está sólidamente aterrizado, la corriente de cortocircuito de línea a tierra puede exceder la corriente de cortocircuito trifásico. Generalmente los generadores están diseñados para soportar la corriente de cortocircuito trifásica y se debe emplear un reactor de puesta a tierra o una resistencia para disminuir el nivel de cortocircuito de línea a tierra [18].

6. Reactores de supresión de arco

Una bobina de supresión de arco es un reactor de núcleo de hierro sumergido en aceite,

monofásico, de inductancia variable, que se conecta entre el neutro de un transformador y la tierra con el fin de lograr una tierra neutra resonante. La impedancia de secuencia cero del transformador se toma en consideración al clasificar la inductancia de la bobina de supresión de arco. Los reactores de supresión de arco se utilizan típicamente en sistemas de distribución con líneas aéreas, para reducir las fallas intermitentes de línea a tierra del tipo de arco, que de otra manera pueden ocurrir en sistemas sin conexión a tierra [18].

7. Reactores Dúplex

Los reactores Dúplex generalmente son instalados donde se divide una fuente de potencia en dos buses simultáneamente e igualmente cargados. Se diseñan para proporcionar reactancia nominal baja cuando el sistema está funcionando bajo condiciones normales de operación y reactancia nominal superior en condiciones de falla. Los reactores Dúplex están compuesto por dos bobinas acopladas magnéticamente por fase, la cual determina sus propiedades en condiciones de operación en estado estacionario y en corto circuito [18].

8. Reactores tipo capacitores

El uso de capacitores de potencia en sistemas eléctricos de transmisión y distribución ha sido durante muchos años una solución viable y práctica para corregir el voltaje, los VAR y el factor de potencia y problemas de calidad de energía. La aplicación de capacitores en sistemas eléctricos de potencia puede crear condiciones anormales transitorias y de estado estable como: la corriente de conmutación puede dañar el dispositivo de conmutación del capacitor, la corriente de salida puede dañar otros dispositivos de conmutación del sistema, sobretensiones transitorias en el transformador de corriente del banco de capacitores y creación de una ruta de baja impedancia para armónicos de orden alto en el sistema. Los reactores tipo capacitores son uno de los dispositivos disponibles en la red eléctrica capaces de abordar todos los problemas anteriormente mencionados [18].

9. Reactores limitadores de corriente de descarga

Los reactores limitadores de corriente de descarga deben estar diseñados para soportar la corriente de descarga de alta frecuencia superpuesta a la corriente de frecuencia de potencia del sistema. La característica de amortiguación de estos reactores es un parámetro crítico del circuito de descarga. Se puede proporcionar una amortiguación suficiente como un componente integral del diseño de estos reactores [18].

10. Reactores de control de flujo de potencia

Una aplicación más reciente de los reactores en serie en los sistemas de transmisión es el control del flujo de potencia o su variante, la mitigación de sobrecargas. Los reactores de control de flujo de potencia se utilizan para optimizar el flujo de potencia en las líneas de transmisión mediante una modificación de la impedancia de transferencia. La ubicación estratégica de los reactores de flujo de potencia puede servir para aumentar la transferencia de potencia máxima, reducir las pérdidas de transferencia de potencia y mejorar la confiabilidad del sistema [18].

11. Reactor en derivación

Este tipo de reactores son construidos comúnmente por los fabricantes de transformadores de potencia debido a que las tecnologías de fabricación son muy semejantes. A continuación se describe este tipo de reactores, ya que estos modelos son el interés de estudio de este trabajo.

2.3. Reactor en derivación

El reactor en derivación se utiliza en las subestaciones eléctricas o líneas de transmisión para cumplir variadas funciones, por ejemplo: para compensar la potencia reactiva en líneas de transmisión, para disminuir el efecto Ferranti en condiciones de demanda mínima (este efecto ocurre cuando la tensión en el extremo receptor de la línea de transmisión es mayor que el voltaje de entrada), para limitar el voltaje debido a sobretensiones originadas por maniobras de apertura y cierre de interruptores o descargas atmosféricas.

En los sistemas de potencia, los reactores tienen dos funciones principales: se pueden utilizar para proveer reactancia al sistema lo que limita el flujo de corriente y así reduce los niveles de cortocircuito del sistema, o pueden ser usados para absorber los VAR para asistir en el control del flujo y el voltaje de carga del sistema.

Las líneas de alta tensión que transmiten a larga distancia generan una cantidad sustancial de potencia reactiva cuando se encuentran subcargadas y cuando se encuentran muy cargadas absorben gran cantidad de potencia reactiva rezagada. Esto provoca que sea imposible mantener el balance de voltaje del sistema bajo condiciones de operación nominal a menos que se opere el sistema con un balance de potencia reactiva [18]. Este problema se resuelve normalmente con el uso de reactores en derivación. La corriente reactiva retrasada consumida por un reactor en derivación reduce la corriente de carga capacitiva principal de la línea y, por lo tanto, reduce el aumento de voltaje [18].

Los reactores se construyen tipo seco o sumergidos en aceite. En la actualidad los reactores fabricados tipo seco con núcleo de aire son utilizados en sistemas de distribución y transmisión de alta tensión mientras que los reactores sumergidos en aceite se fabrican con núcleo de hierro y con entrehierro, o con núcleo de aire y son utilizados preferentemente en alta y extra alta tensión. Los reactores en derivación sumergidos en aceite tienen dos configuraciones de diseño: sin núcleo y con núcleo de hierro. En el caso de los reactores en derivación sumergidos en aceite sin núcleo, se utiliza un circuito magnético que rodea la bobina para contener el flujo dentro del tanque. Para el caso de los reactores en derivación con núcleo de hierro, el circuito magnético es muy parecido al de los transformadores con la particularidad de que se adicionan espacios de aire no magnéticos para garantizar la linealidad de la inductancia [18].

2.4. Principio de operación de los reactores

Al circular corriente por el devanado del reactor se crea un campo magnético variante en el tiempo y se induce un voltaje. Cuando ocurre un aumento de corriente, el reactor almacena la energía en el campo magnético y cuando la corriente comienza a disminuir, esta energía regresa al sistema para lograr un balance. La función del núcleo magnético es proporcionar un camino de baja reluctancia para que fluya el flujo creado por el devanado. Si aumenta mucho la corriente el núcleo tiende a la saturación, lo que provoca que disminuya la permeabilidad del material. Esto hace que el flujo deje de circular solamente por la sección transversal del núcleo y se cree lo que se conoce como flujo disperso. Por eso, se recomienda diseñar reactores que tengan un balance entre la corriente, el flujo y la sección transversal del núcleo magnético [19]. Cuando se extrae una corriente de magnetización de un suministro de alta tensión y se establece un flujo magnético de magnitud comparable al del núcleo de un transformador, no circularía ninguna corriente excepto esa corriente de magnetización y el reactor no cumpliría su función de compensar la potencia reactiva del sistema. Para evitar esto se debe incrementar la reluctancia del circuito y esto se logra aumentando el número de espacios de aire [20].

2.4.1. Instalación de los reactores en derivación

Los reactores diseñados para altas tensiones se instalan como se muestra en la figura 2.3 y estos pueden estar conectados de forma permanente o ser de tipo conmutado. En condiciones normales de funcionamiento pueden presentarse niveles bajos de voltaje y mayores pérdidas, por esta razón, en su mayoría, se instalan en conexión conmutada para actuar en el sistema solo cuando se requiere controlar voltaje.

Figura 2.3: Conexión directa del reactor en derivación al Sistema Eléctrico de Potencia.

Existen diseños de transformadores con devanados terciarios que pueden ser útiles para suministrar cualquier carga auxiliar de una subestación, prescindiendo de la necesidad de un transformador auxiliar separado. El devanado terciario conectado en delta proporciona un camino para disminuir el impacto de las corrientes del tercer armónico [21]. La conexión de un reactor en derivación al terciario de un transformador puede reducir el voltaje a valores por debajo de aquellos que pueden provocar la saturación del núcleo del transformador y también proporcionar una inductancia baja no saturable en paralelo con la impedancia del transformador [18]. En el caso de autotransformadores de grandes capacidades, que necesariamente deben estar conectados en estrella/estrella, el devanado terciario se utiliza también para la conexión de equipos de compensación del sistema [20].

2.4.2. Construcción física

Los reactores sumergidos en aceite y con núcleo magnético están integrados por: un devanado, boquillas, tanque y accesorios (ver figura 2.4).

Núcleo

El núcleo magnético está construido con laminaciones de acero eléctrico de grano orientado en una configuración radial. El flujo es adyacente a las secciones de las pastillas magnéticas que conforman las columnas centrales, esto disminuye considerablemente las corrientes parásitas en la superficie. Un dispositivo axial ejerce una fuerza constante para mantener unidos el yugo y las laminaciones. Las columnas centrales están sujetas mediante barras de sujeción que atraviesan las mismas. En la configuración tipo columnas, los entrehierros son diseñados

Figura 2.4: Partes principales de un reactor.

para almacenar más del 80 % de la energía magnética, de tal manera que la inducción en el núcleo alcance valores cercanos a los niveles de saturación del material magnético. El control de la densidad de flujo magnético es posible gracias a la correcta selección del tamaño de estos entrehierros y dimensiones del núcleo magnético [5]. El entrehierro cumple además la función de hacer que la inductancia del mismo tenga un comportamiento lineal en un cierto rango de operación.

En un reactor de este tipo la selección del número y tamaño de los entrehierros definen la inductancia y tienen un impacto directo en la pérdidas, vibración, costo, factibilidad de fabricación, etc.

No existen normativas sobre las dimensiones que deben tener los entrehierros, esto depende completamente de las características del equipo (capacidad, voltaje nominal, nivel de pérdidas, nivel de ruido, entre otras) y cada fabricante diseña sus equipos con base en su propia tecnología para cumplir con las especificaciones del reactor. Es natural que muchas veces las tecnologías sean muy similares pues parten de la misma base teórica, pero siempre tienen sus aspectos muy particulares. Normalmente los fabricantes estandarizan sus diseños a ciertos tamaños específicos ya que esto da la ventaja de no tener altos inventarios.

En el caso del tamaño del entrehierro también se generan ciertas reglas, como por ejemplo: no hacerlos muy grandes para no tener un valor alto de flujo por abombamiento. Si el entrehierro es muy grande, el flujo magnético produce más pérdidas y puede provocar puntos calientes

y más vibración. Por ejemplo, si se calcula en un diseño que se requiere un entrehierro de 5 pulgadas, se tiene que decidir si se puede hacer un solo entrehierro de este tamaño (caso menos eficiente) ó 2 de 2.5 pulgadas ó 5 de 1 pulgada, etc. Al final esta decisión impactará en el diseño porque no es lo mismo fabricar un núcleo con solo un entrehierro que un núcleo conformado por 5 entrehierros. Esto se debe revisar en función del comportamiento magnético que se obtenga.

Devanado

Las bobinas de los reactores con núcleo y entrehierro son geoméricamente similares, el tipo de devanado y las técnicas de diseño que se aplican son parecidas a las utilizadas en los transformadores de potencia. De acuerdo con la especificación CFE Y1000 – 03, los devanados deben estar diseñados para operar de acuerdo con la clasificación de las zonas climáticas. En una zona normal, los devanados deben operar en forma continua, con una elevación máxima de temperatura de 55 °C y en una zona cálida, los devanados deben operar en forma continua con una elevación máxima de temperatura de 65 °C. La inductancia de la bobina depende del tamaño del entrehierro, del número de vueltas y de las dimensiones físicas de la misma.

Boquillas

Las boquillas son dispositivos que protegen el conductor que va del devanado a la línea de transmisión y permiten la interconexión eléctrica de los componentes internos y externos. Las boquillas están compuestas de: conductor central, aislamiento principal y brida de montaje principalmente.

Tanque

Los tanques están diseñados para soportar el estrés mecánico al que son sometidos durante su transporte, manejo y operación. Tienen que estar sellados totalmente para evitar la entrada de humedad y contaminantes. Se construyen de un material resistente a la corrosión.

Accesorios

Los equipos auxiliares y accesorios utilizados en un reactor de potencia sumergido en aceite son:

- Tanque conservador
- Indicador magnético de nivel de aceite
- Relevador Buchholz
- Válvula de sobre presión
- Válvula de alivio
- Relevador de presión súbita
- Indicador de temperatura del aceite
- Indicador de temperatura del devanado

- Indicadores y/o registradores remotos de temperatura
- Gabinete de control
- Transformadores de corriente
- Boquillas
- Relevador de flujo
- Sistema de conservación de aceite
- Radiadores
- Válvulas de radiadores
- Ventiladores
- Empaques

2.5. Vibraciones en los reactores

Los reactores experimentan vibraciones, mucho más pronunciadas que los transformadores, debido a que el núcleo del reactor no es de una pieza continua como en los transformadores. Los fabricantes de reactores en derivación generalmente emplean, pernos de acero inoxidable no magnético para la sujeción del núcleo, ya que posee excelentes propiedades eléctricas y mecánicas que mantienen el núcleo de material ferromagnético compacto y disminuyen la vibración [22], [23].

Existen, principalmente dos razones que provocan vibración en un reactor [14]: La magnetostricción es la propiedad de los materiales magnéticos que hace que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Este cambio de dimensión, muy pequeño, ocurre 120 veces por segundo [24]; el núcleo provoca la generación de un campo alterno que se traduce en vibraciones que a su vez se transmiten, después de cierta atenuación, a través de la estructura del tanque y el aceite al aire circundante. Esto finalmente resulta en un ruido característico. El sonido que proviene de las subestaciones es principalmente debido a los transformadores y al reactor en funcionamiento. Normalmente los niveles de ruido en diferentes zonas están entre 50 – 80 dB. En zonas industriales el nivel de ruido es de < 75dB, en zonas comerciales de < 65 dB y en zonas residenciales de < 55 dB. Los reactores en derivación de altas capacidades pueden alcanzar niveles de ruido de 70 – 80 dB. La frecuencia de magnetostricción es hasta dos veces mayor que la del campo alterno existente, es decir, cuando se magnetiza una lámina eléctrica con 50 Hz, la frecuencia fundamental de la magnetostricción puede ser de 100 Hz. El proceso de cambio de longitud del material en función de la inducción no es lineal, de modo que la magnetostricción de un campo alterno proporciona frecuencias fundamentales y armónicas [21]. El fenómeno de magnetostricción se caracteriza por el coeficiente de magnetostricción ε , el cual depende del valor instantáneo de la densidad de flujo [25] como sigue

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{u=1}^n K_u B^{(2u)} \quad (2.1)$$

donde B es el valor instantáneo de la densidad de flujo y K_u es el coeficiente que depende del nivel de magnetización, tipo de material de laminación y su tratamiento. La fuerza de

magnetostricción está dada por

$$F_m = \varepsilon_{(t)}EA \quad (2.2)$$

donde E es el módulo de elasticidad en la dirección de la fuerza y A es el área de sección transversal de una laminación.

La fuerza magnética que aparece entre los núcleos debido a espacios no magnéticos en las esquinas de las extremidades y en los yugos que se atraen, y considerando que la fuerza magnética es proporcional al cuadrado de la densidad del flujo magnético, se supone que la frecuencia de vibración es el doble de la frecuencia fundamental. Entonces la fuerza por unidad de área de sección transversal se puede plantear como [5]

$$F = \frac{B_m^2}{2\mu_0} = \frac{B_{mp}^2}{4\mu_0}(1 + \cos(2\omega t)) \quad (2.3)$$

donde B_{mp} es el valor máximo de la densidad de flujo en el entrehierro entre las laminaciones correspondientes del yugo y la extremidad, μ_0 es la permeabilidad relativa del espacio libre y ω es la frecuencia angular fundamental.

Las estructuras de sujeción se incluyen en los transformadores para evitar cualquier movimiento de los devanados debido a las fuerzas producidas por un cortocircuito. Por lo tanto, éstas se diseñan de tal manera que los devanados estén permanentemente bajo una presión deseada. En el caso de los reactores el diseño de la estructura mecánica es mucho más robusta que en el caso de los transformadores, principalmente debido a que deben controlarse adecuadamente los niveles de vibración y ruido de acuerdo con las especificaciones nacionales e internacionales.

2.6. Pérdidas y análisis de temperatura en los reactores en derivación

Durante su funcionamiento, el reactor es una fuente de pérdidas de energía, la mayoría de las cuales se encuentran en dos partes principales: el núcleo y los devanados. También se generan pérdidas en las conexiones, cambiadores de tomas y boquillas, de la misma manera hay pérdidas en algunos materiales de buena conductividad eléctrica. Hay dos componentes de las pérdidas magnéticas: pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis. Las pérdidas por corrientes parásitas en los elementos estructurales del reactor significan una gran parte de las pérdidas totales, estas pueden llegar a ser mayores al 20 % de las pérdidas de carga si no se tratan con la importancia que se merecen. El cambio en las pérdidas por corrientes parásitas, debido a que la resistividad del acero varía con la temperatura, parece ser un factor que contribuye al efecto de temperatura por las pérdidas en el núcleo, estas pérdidas se pueden controlar reduciendo el espesor de la laminación de acero o aplicando revestimiento aislante delgado. Las variaciones de temperatura pueden disminuir considerablemente el tiempo de vida útil del reactor y afectar directamente el costo del mismo [26]. Las pérdidas por histéresis son provocadas por la inversión cíclica del flujo en el circuito magnético debido a que la corriente en los devanados del reactor es alterna; las moléculas del material tienen que invertir también su sentido de la orientación y para esto requieren energía, esta se absorbe de la fuente que abastece la alimentación y esto representa una pérdida de potencia [18]. Otra fuente de pérdidas es el fenómeno de abombamiento, el cual está estrechamente relacionado con las dimensiones del entrehierro, mientras mayor sea, mayor será el flujo de bordes a su alrededor el cual va a regresar al núcleo en una dirección que provoca grandes pérdidas [27].

Las pérdidas que se encuentran en los elementos estructurales de los reactores dependen de la capacidad del mismo, de la frecuencia de operación del sistema y de las características eléctricas del material con los cuales son creados. El flujo disperso que incide sobre las partes estructurales es el que provoca las pérdidas por corrientes parásitas y hace que circulen corrientes de remolino que son las que producen el calentamiento de esas zonas [26].

Las pérdidas causan el calentamiento de las partes correspondientes del reactor, por lo que resulta conveniente introducir alguna forma de enfriamiento. Las temperaturas de operación varían dependiendo de las partes del reactor, es decir hay diferentes temperaturas en el aceite, núcleo, bobinas y en los componentes estructurales. El trabajo nominal de un reactor está estrechamente relacionado con su calentamiento debido a las restricciones impuestas por los materiales aislantes utilizados, y en menor grado por el aumento de las pérdidas con la temperatura. La temperatura promedio de los devanados se puede determinar mediante la medición de la variación de la resistencia eléctrica. El calentamiento de las otras partes se puede medir con un termómetro, principalmente el aceite, y con sensores de temperatura de fibra óptica [28]. Sin embargo, las temperaturas más calientes en componentes estructurales (tornillos por ejemplo) no pueden superar los 120 °C [4], ya que arriba de esto producen descomposición de aceite y comienza la generación de gases. Como referencia la empresa IEM estima que las temperaturas en los núcleos deben estar entre 85 y 110 °C.

Las pérdidas que se producen en los devanados por efecto Joule y en el núcleo debidas a la histéresis y corrientes parásitas hacen que se genere calor y éste es transmitido al medio aislante y refrigerante (el aceite); esto hace que el aceite capture el calor y ayude a enfriar el equipo al circular por los radiadores. En el punto de estabilización termodinámica el aceite alcanzará una cierta temperatura, la cual será su temperatura de operación; por ejemplo 75 °C. El núcleo al estar sumergido en el aceite alcanzará naturalmente esta temperatura, pero al disipar energía debido a las pérdidas estará por arriba de la misma; es decir tendrá una temperatura mayor, por ejemplo 95 °C. Esto significa que la diferencia de temperatura entre el aceite y el núcleo ($95 - 75 = 20$ °C) es el gradiente de incremento respecto a la temperatura del aceite. Lo mismo pasa en los tornillos, de entrada, si el tornillo no disipara energía, tendría la misma temperatura del aceite al estar sumergido en el mismo (75 °C); pero como está expuesto a un campo magnético variable en el tiempo (el campo que circula por el núcleo del reactor) entonces (por la ley de Faraday) se inducen corrientes circulantes que provocan pérdidas y por ende calentamiento en los mismos. Esto hace que el tornillo alcance una mayor temperatura (un gradiente respecto al aceite) y si es muy alta puede provocar problemas en el equipo. De entrada la magnitud de corrientes inducidas (parásitas) en los tornillos depende de la intensidad de campo magnético a la que se someta, de la forma, tamaño y propiedades del material con el que estén contruidos (no es lo mismo tornillos de bronce, acero al carbón ó acero inoxidable). Estas pérdidas en los tornillos generan calor que incrementan su temperatura; y el valor que alcance depende en gran medida de la cantidad de energía que disipe.

El MEF también se puede aplicar para evaluar los estudios de transferencia de calor que están enfocados en el comportamiento de la energía térmica en un sistema, especialmente en lo que se transfiere debido a las diferencias espaciales de temperatura. Esto ocurre según tres métodos de transferencia de calor, cada uno descrito por una ecuación: conducción, que caracteriza flujos térmicos a través de la materia (Ley de Fourier), convección, asociada con el movimiento de fluidos debido a los efectos gravitacionales o flujo (Ley de Enfriamiento de Newton) y radiación, con transferencia de energía térmica a través de ondas electromagnéticas (Ley de Stefan-Boltzmann).

Conducción

La conducción es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos sin intercambio de materia, porque el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero. El flujo de calor se describe por la ley de Fourier como [29]

$$q = h_0 A \frac{d\tau}{dx} = \frac{h_0 A}{\Delta x} (\tau_1 - \tau_2) \quad (2.4)$$

donde q es la tasa de tiempo de cambio de calor, h_0 es la conductividad térmica del material, τ es la temperatura, A es el área de la sección transversal desde la cual el calor será conducido y x es la longitud a lo largo del camino de la conducción. La derivada $\frac{d\tau}{dx}$ es el gradiente de temperatura normal al área de la sección transversal.

Radiación

La transferencia de calor por radiación se describe por la ley de Stefan Boltzmann como [29]

$$q = \epsilon k A T^4 \quad (2.5)$$

donde ϵ es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad con valores en el rango $0 \leq \epsilon \leq 1$, k es la constante de Stefan Boltzmann con un valor de $5.670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, A es el área de la superficie de radiación y T es la temperatura absoluta.

Convección

La convección es un proceso complejo que involucra la conducción del fluido de convección, cambios en la densidad del fluido con la temperatura, la viscosidad del fluido y el movimiento del fluido. Esta se describe como [29]

$$q = h_c A (\tau_1 - \tau_2) \quad (2.6)$$

donde q es la tasa de transferencia de calor por convección, h_c es el coeficiente de convección de transferencia de calor, τ_1 es la temperatura superficial del cuerpo desde el cual el calor será transmitido, τ_2 es la temperatura del fluido del ambiente y A es el área de la superficie desde la cual el calor será transmitido.

El desarrollo del análisis de transferencia de calor utiliza conceptos y metodologías de análisis estáticos y dinámicos, tales como la representación de cada elemento a través de funciones de forma. Las mallas numéricas cuentan con un solo grado de libertad, la temperatura, de modo que disminuye la cantidad de ecuaciones a resolver. Además, estas pueden ser menos densas gracias al comportamiento lineal de la conducción y el hecho de que los elementos no se deforman en un análisis puramente térmico. Por lo tanto, las simulaciones de transferencia de calor presentan una solución rápida y requieren poco esfuerzo computacional. Los límites de temperatura en las partes de los reactores inmersos en aceite son [28]:

- Para los devanados, la elevación de temperatura sobre la temperatura ambiente es limitada en la mayoría de las normativas a 65 °C. Por ejemplo, si la temperatura ambiente

es de 30 °C, y la elevación de temperatura promedio del devanado se especifica como 65 °C, entonces la elevación promedio del devanado será de 95 °C. El punto más caliente del devanado es mayor y normalmente se limita a 120 °C para equipos sumergidos en aceite con aislamientos base celulosa tipo termo-estabilizados. Los devanados tienen un sistema de enfriamiento natural o por ventilación forzada.

- Para el núcleo las normativas limitan la temperatura absoluta hasta 130 °C típicamente [18].

La temperatura no debe, bajo ninguna circunstancia, exceder los 120 °C en el punto más caliente, ni alcanzar un valor que pueda dañar el material magnético o las partes adyacentes [18]. Para completar el análisis térmico, en un reactor, debe examinarse la variación de la temperatura en la dirección del flujo del fluido. Esto es complejo porque:

- el devanado no tiene curvas de temperatura idénticas.
- el aceite que está en contacto con las vueltas del devanado puede estar más caliente o más frío que el aceite que cubre la superficie externa del devanado, donde la temperatura es promedio.
- el gradiente de temperatura de la superficie varía a lo largo de un conducto vertical donde el flujo ascendente es primero laminar y luego rápidamente se vuelve turbulento.

Para simplificar, se supone que hay una variación lineal de temperatura a lo largo de las superficies de intercambio y características térmicas idénticas para todos los devanados, y el fabricante trata de lograr esto para obtener un dimensionamiento óptimo [28].

En la mayoría de los dispositivos las fallas, debido al estrés térmico que provoca la destrucción del aislamiento o quemadura de los conductores, son: sobrecargas a corto o largo plazo, pérdidas de enfriamiento, problemas de diseño, entre otras. Al mismo tiempo que se rompe el material aislamiento debido al estrés que está sometido, se desprenden gases que se disuelven con el aceite del reactor. Los niveles y las combinaciones de estos gases sirven para identificar el nivel y la ubicación de las fallas. Los gases se originan en muchos lugares como: en el aceite mineral aislante, en el aislamiento de papel conductor, barreras de cartón prensado y otros materiales. Estos gases son síntoma de: mal diseño, demasiado estrés térmico, demasiado estrés eléctrico, muchos corto circuitos o estado general deficiente. En general este análisis permite detectar puntos calientes y descargas parciales.

Los gases disueltos en el aceite generalmente son el resultado de la descomposición de mate-

	H2 (ppm)	CO (ppm)	CH4 (ppm)	C2H2 (ppm)	C2H4 (ppm)	C2H6 (ppm)	CO2 (ppm)	O2 (ppm)	N2 (ppm)	SF6 (ppm)
01/12/2014 02:14	4.5	70	1.2	< LDL	0.8	16.2	235	2600	18000	
01/12/2014 05:14	4.5	70	1.2	< LDL	0.8	16.4	235	2600	18000	
10/12/2014 23:01	80.5	80	123	1.8	181	43.2	320	3100	18000	
12/12/2014 23:02	186	90	317	2.4	437	93.8	430	2100	19000	
31/12/2014 23:13	760	130	1650	2	1800	508	610	< LDL	19000	
31/01/2015 23:30	3110	160	7220	9.4	7120	2420	860	< LDL	19000	
28/02/2015 23:45	8500	175	19300	34.2	25900	5840	1070	< LDL	18000	
31/03/2015 21:08	10100	195	45500	163	51600	11000	1400	< LDL	16000	
30/04/2015 21:32	12700	210	64600	153	70500	17200	1680	< LDL	16000	
31/05/2015 21:48	12300	215	73100	262	78500	19100	1790	< LDL	16000	

Figura 2.5: Mediciones de gases disueltos en el reactor bajo estudio.

riales eléctricos aislantes. El aceite es una molécula de hidrocarbano, es decir, contiene átomos de hidrógeno y carbono unidos por enlaces químicos. Pero sucede que cuando estos enlaces se rompen se pueden formar nuevos enlaces que se recombinan y terminan formando los gases de falla que se encuentran en el aceite: dihidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2). También sucede que el papel (celulosa) contiene átomos de oxígeno y su descomposición produce dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), y agua (H_2O) entre otros. Algunos de estos gases se forman en pequeñas y grandes cantidades y eso depende de la energía contenida en la falla. Las fallas de alta temperatura necesariamente forman grandes cantidades de etileno (C_2H_4), mientras que las fallas de alta energía como los arcos eléctricos forman grandes cantidades de acetileno (C_2H_2). La figura 2.5 muestra las mediciones de gases que se realizaron durante el funcionamiento del reactor. La figura 2.6 muestra el gráfico de generación de gases vs. la temperatura de descomposición del aceite. Con estos datos se puede ver que a partir del 12 de diciembre de 2014 se comenzaron a generar gases y según el gráfico esto ocurre a partir de 150 °C y las cantidades de etileno, acetileno y etano indican que la falla ocurrida excede los 800 °C.

2.7. Materiales utilizados en el modelo del reactor

En el contexto de los dispositivos de conversión de energía electromecánica, son muy importantes los materiales electromagnéticos. Mediante el uso de éstos es posible obtener altos niveles de densidades de flujo magnético con baja fuerza magnetizante. Dado que las fuerzas magnéticas y la densidad de energía aumentan al aumentar la densidad de flujo, este efecto juega un rol importante en la correcta operación de los dispositivos de conversión de energía [30].

Los materiales ferromagnéticos, normalmente se componen de hierro y aleaciones de hierro con cobalto, níquel, aluminio y otros metales, son comunmente los materiales magnéticos más utilizados y son caracterizados por una amplia gama de propiedades como la magnetización de saturación o la inducción, histéresis, y una temperatura de Curie por encima de la cual dejan de ser ferromagnético [31].

2.7.1. Acero al carbón A-36

La composición del acero A-36 es de 98 % de hierro, 0.25 % de carbón, 0.2 % de cobre, 1.03 % de manganeso, 0.28 % de silicona, 0.04 % de fósforo y 0.05 % de impurezas de azufre [1]. Tiene una fuerza de tensión de 400 a 550 MPa y una densidad de 7860 kg/m³ [1]. El término de acero al carbón se define para materiales que contienen carbón en cantidades menores al 2 %. ASTM (Sociedad Americana para pruebas y Materiales) A36 es el acero suave y laminado en caliente más utilizado. La tabla 2.1 muestra las propiedades físicas más comunes del acero al carbón.

2.7.2. Acero eléctrico de grano orientado

El acero eléctrico, también llamado acero magnético, acero al silicio, o acero para transformadores y reactores, es un acero especial fabricado para poseer determinadas propiedades magnéticas, tales como una zona de histéresis pequeña (poca disipación de energía por ciclo), que equivale a bajas pérdidas en el núcleo y una alta permeabilidad magnética. Los núcleos hechos de acero al silicio (Si) ($\sim 3\%$ Silicio) se construyen utilizando múltiples capas del material en forma de hoja. El material se fabrica en laminadores a partir de losas o lingotes calientes en láminas delgadas de 0.18 a 0.3 mm de espesor. El acero al silicio tiene sus mejores propiedades magnéticas a lo largo de la dirección de laminación y un núcleo bien construido

Figura 2.6: Generación de gases combustibles vs. temperatura de descomposición del aceite [6].

se beneficiará de esto [31].

Propiedades	Valor
Densidad	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Coeficiente de Poisson	0.26
Módulo de elasticidad	200 GPa
Punto de fusión	1425 °C
Resistividad eléctrica	1.219 μ
Módulo de volumen	140 GPa
Módulo de corte	79.3 GPa
Calor específico	442 J/kg/°K a 23 °C
Conductividad térmica	36.3 W/m°C[20 °C]

Tabla 2.1: Propiedades físicas del acero al carbón [1]

2.7.3. Cobre

El cobre es un material no precioso con mejor conductividad eléctrica. Es el material más empleado para fabricar cables eléctricos debido a su ductibilidad y resistencia mecánica. La tabla [2.2] muestra algunas de las propiedades del cobre. Este material, en forma de alambre, se emplea en la producción de bobinas. Debe ser lo suficientemente rígido como para que no se rompa al ser enrollado y por otra parte ser flexible para conseguir bobinas compactas. La formación y el enrollado implica que sean dúctiles y fuertes para sobrellevar las tensiones electromecánicas producidas por los cortocircuitos. Las bobinas deben ser resistentes a las vibraciones y a las fuerzas centrífugas.

Propiedades	Valor
Resistividad	$0.016642 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Densidad de masa	8.89 kg/dm^3
Coeficiente de expansión	$16.7 \text{ } \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$
Conductividad térmica	$398 \text{ W}/(\text{mK})$
Punto de fusión	1084.88 °C
Calor específico	$384.6 \text{ J}/(\text{kgK})$

Tabla 2.2: Propiedades físicas del cobre [2]

2.7.4. Acero inoxidable

El acero inoxidable A316 es un acero inoxidable de cromo níquel austenítico que contiene molibdeno, lo que aumenta la resistencia a la corrosión, mejora la resistencia a picaduras de soluciones de iones de cloruro y proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas. La designación 316 es la que define AISI (Instituto de Hierro y acero Americano) y es el número UNS (Sistema de numeración unificado).

3. Método de los Elementos Finitos

3.1. Introducción

En ingeniería es muy común encontrarse con problemas en los cuáles es casi imposible obtener una solución analítica debido a la complejidad de la geometría de los dispositivos y la no linealidad de los materiales. El método de los elementos finitos (MEF) es un procedimiento numérico capaz de resolver estos problemas a partir de la discretización. Este método tiene dos subdivisiones principales, la primera utiliza elementos discretos para obtener los desplazamientos y fuerzas de un marco estructural y la segunda utiliza elementos continuos para obtener soluciones aproximadas de transferencia de calor, fluidos, electromagnetismo y problemas mecánicos sólidos. Esta segunda aproximación es lo que se conoce como el verdadero método de los elementos finitos.

Este método, tal y como se conoce hasta el momento, es el resultado de más de 150 años de investigación. Múltiples publicaciones se realizaron a lo largo de los años 50 y fue hasta 1960 que se logró colocar sobre una base matemática firme [32].

El MEF es una herramienta numérica que se aplica a objetos que tienen forma irregular, compuestos de diferentes materiales y con variadas condiciones de fronteras. Se pueden obtener soluciones en estado estacionario o variantes en el tiempo así como problemas que involucren materiales con propiedades no lineales y también permite resolver problemas tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia.

El MEF consiste en discretizar el dominio en elementos donde el punto que une un elemento con otro se conoce como nodo y la unión de todos los elementos se llama malla [33]. Para trabajar con este método es necesario que el usuario tenga dominio de los principios básicos y del problema a resolver. El análisis de dispositivos electromagnéticos necesita tener un conocimiento previo de los fenómenos electromagnéticos que ocurren en los dispositivos.

El número de ecuaciones que se solucionan cuando se aplica el MEF es muy grande, pudiendo exceder las 20000, por esta razón se necesita de herramientas computacionales capaces de soportar este esfuerzo. Para reducir la demanda de recursos computacionales y disminuir el tiempo de cómputo que requiere este método para resolver el problema de campo electromagnético de un reactor, se han estado combinando los métodos analíticos y numéricos ya que si se decide resolver el problema utilizando únicamente el MEF la cantidad de elementos que se necesitan aumentaría la demanda de recursos computacionales. Por esta razón las pérdidas por corrientes de remolino en los elementos estructurales se obtienen aplicando la impedancia superficial como una condición de frontera. Esto permite reducir el número de elementos finitos ya que al utilizar esta condición de frontera se está asumiendo que las pérdidas tienen mayor influencia en la longitud de la profundidad de penetración [34], [35].

Los fenómenos eléctricos y térmicos de los dispositivos se describen mediante: las ecuaciones de Maxwell, la ecuación del calor y las relaciones constitutivas materiales.

3.2. Método de los Elementos Finitos

El MEF tiene dos características fundamentales que lo distingue de otros métodos:

1. El método utiliza una formulación integral para generar un sistema de ecuaciones algebraicas.
2. El método utiliza funciones suaves continuas por partes para aproximar la cantidad o cantidades desconocidas.

Figura 3.1: Elementos de mallado más utilizados.

La precisión de los resultados depende del mallado que se realice. En la región de análisis es necesario disminuir la longitud y aumentar el número de elementos, es decir aumentar la densidad de la malla en esta región. En aplicaciones electromagnéticas los elementos finitos más utilizados se muestran en la figura 3.1, estos elementos se aplican en problemas de una dimensión, dos dimensiones y tres dimensiones.

Para el análisis de sistemas electromagnéticos se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Geometría del sistema.
- Condiciones de frontera.
- Excitación.
- Incógnitas: son las variables que se calculan una vez que se define todo lo anterior, por ejemplo: campo magnético, temperatura, etc.

Generalmente, en electromagnetismo, el MEF es asociado a métodos variacionales o métodos de residuales ponderados. En el primer caso, el procedimiento numérico se establece utilizando una funcional que debe ser minimizada. Para cada problema se define una funcional en particular, pero no se trabaja directamente con las ecuaciones físicas que describen el problema, a diferencia de los métodos de residuales ponderados que los procedimientos numéricos operan directamente con la ecuación física que describe el comportamiento del sistema analizado. Esta es una gran desventaja para los métodos variacionales y ha llevado a que la gran parte de los

trabajos se resuelvan aplicando métodos de residuales ponderados [36].

Existen diversos métodos de residuales ponderados:

- Método de colocación: Este método utiliza una función impulso como función de ponderación $W_i(x) = \delta(x - X_i)$. Al utilizar esta función de ponderación se necesita que el residuo desaparezca en puntos específicos, el número de puntos es igual al número de coeficientes indeterminados en la solución aproximada.
- Método de subdominio: este método establece que cada función de ponderación será igual a la unidad ($W_i(x) = 1$) sobre una región específica. cuando se utiliza esta función de ponderación se requiere que la integral del residuo desaparezca en puntos específicos, el número de intervalos de integración es igual al número de coeficientes indeterminados en la solución aproximada.
- Método de Galerking : Este método se explica a continuación.

El método de Galerkin es una forma particular de los métodos de residuales ponderados y es ampliamente utilizado en electromagnetismo. Comprende una formulación simple, implementación práctica y proporciona resultados precisos. Se aplica para minimizar el residual de una ecuación en derivadas parciales. La función de ponderación puede ser arbitraria, pero en este método, las funciones de ponderación se seleccionan de tal manera que sean las mismas que las funciones utilizadas para la expansión de la solución aproximada [36].

Este método comienza formando un residual directamente a partir de la ecuación diferencial parcial que se asocia con el problema. En pocas palabras, este método no requiere el uso de un funcional. El residual se forma transfiriendo todos los términos de la ecuación diferencial parcial en un lado. Este residuo luego se multiplica por una función de ponderación integrada sobre el dominio de un solo elemento. Esta es la razón por la que el método se denomina método de residuales ponderados [37].

El método de residuales ponderados se explica a continuación. Sea la ecuación:

$$D \frac{d^2 y}{dx} + Q = 0 \quad (3.1)$$

definida en una región Ω donde D y Q son parámetros de la ecuación diferencial que se resuelve, y es la variable de interés y con condiciones de frontera

$$y(0) = y_0 \quad y \quad y(H) = y_H \quad (3.2)$$

Si se supone que $y = h(x)$ es una solución aproximada y se sustituye en (3.1) se obtiene

$$D \frac{d^2 h(x)}{dx} + Q = R(x) \neq 0 \quad (3.3)$$

Como la solución aproximada no satisface la ecuación entonces se obtiene un residual $R(x)$. Este método requiere que

$$\int_0^H W_i(x) R(x) dx = 0 \quad (3.4)$$

El residual $R(x)$ se multiplica por la función de ponderación $W_i(x)$ y la integral de este producto debe ser igual a cero. El número de funciones de ponderación es igual al número de coeficientes desconocidos en la solución aproximada.

En un dominio ya discretizado la ecuación (3.4) se puede escribir como:

$$\sum_{k=1}^K \int_{\omega_k} W_k R_k d\Psi = 0 \quad (3.5)$$

donde:

W_k es la función de ponderación para el nodo k .

K es el número de nodos en el dominio.

k es la porción del dominio en el cual el nodo k está insertado.

La ecuación (3.5) implica que existen K ecuaciones, para K valores de potenciales desconocidos en K nodo presente en la solución del problema.

3.3. Ecuaciones fundamentales del electromagnetismo

La teoría electromagnética se rige a partir de las cuatro ecuaciones de Maxwell, válidas para campos estáticos y variantes en el tiempo y también válidas para el espacio libre y los cuerpos materiales. Las ecuaciones están expresadas en función de los campos eléctricos y magnéticos, así como de sus respectivas inducciones, eléctrica $\mathbf{E}$ y magnética $\mathbf{B}$, y se definen en forma diferencial como:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.9)$$

Donde $\mathbf{H}$ es la intensidad del campo magnético en ampere por cada metro (A/m), $\mathbf{B}$ es la densidad del campo magnético en Weber por cada metro cuadrado (Wb/m²), $\mathbf{E}$ es la fuerza del campo eléctrico en volt por cada metro (V/m), $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente de conducción en ampere por cada metro cuadrado (A/m²), $\mathbf{D}$ es la densidad de campo eléctrico en coulomb por cada metro cuadrado (C/m²) y ρ es la densidad volumétrica de carga eléctrica en Coulomb por cada metro cúbico (C/m³).

La relación entre la densidad de corriente de conducción y la densidad de corriente de desplazamiento dada por la derivada parcial de $\mathbf{D}$ con respecto del tiempo está dada por $\sigma/j\omega\epsilon$, la cual resulta alta incluso para un material poco conductor a altas frecuencias. En este análisis se trabaja a baja frecuencia por tanto se puede despreciar el efecto de la corriente de desplazamiento y de las cargas de espacio libres, por tanto las ecuaciones se reducen a:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.12)$$

Las ecuaciones de Maxwell se completan con las relaciones constitutivas, que describen las relaciones entre variables de campo basado en las propiedades eléctricas y magnéticas de los

materiales [36]: la presencia de no linealidades, inducciones remanentes, el comportamiento de los campos en la frontera entre un medio y otro, etc. Se puede decir que un medio es lineal si σ , ϵ y μ son independientes de $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$. Es homogéneo si σ , ϵ y μ no son funciones de variables espaciales. Es isotrópico si σ , ϵ y μ son independientes de una dirección (son escalares) [38]. Las relaciones constitutivas son entonces:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.14)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.15)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío en (H/m), σ es la conductividad eléctrica del material en (S/m), $\mathbf{M}$ es la magnetización del material ($\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$, donde χ_m es la susceptibilidad magnética del medio) y ϵ es la permitividad del material en (F/m). Debido que en este trabajo se consideran medios isotrópicos, entonces:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \chi_m \mathbf{H}) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3.17)$$

donde $\mu_r = 1 + \chi_m$ y se define como la permeabilidad relativa. Luego se define $\mu = \mu_0 \mu_r$ como la permeabilidad y esto permite escribir una relación sencilla entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ como:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.18)$$

El campo magnético cuando pasa de un medio a otro, es decir, de un valor de permeabilidad a otro, sufre una alteración en su dirección como se muestra en la figura 3.2.

Las condiciones de contorno para los campos vectoriales en las interfaces de materiales se

Figura 3.2: Variación angular de la intensidad de campo magnético $\mathbf{H}$ al pasar de un medio a otro con permeabilidades diferentes

pueden expresar como:

$$\mathbf{a}_{N21} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \quad (3.19a)$$

$$\mathbf{a}_{N21} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}, \quad (3.19b)$$

$$\mathbf{a}_{N21} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0, \quad (3.19c)$$

donde $\mathbf{a}_{N21}$ es un vector unitario normal a la frontera entre un material y otro y el subíndice N indica la dirección normal de los campos. Las ecuaciones (3.19a) y (3.19c) establecen que las componentes tangenciales de $\mathbf{E}$ y las componentes normales de $\mathbf{B}$ son continuas a través de la frontera y la ecuación (3.19b) establece que la componente tangencial de $\mathbf{H}$ es discontinua por la densidad de corriente superficial $\mathbf{K}$ en la interfaz [38].

En términos del potencial magnético vectorial $\mathbf{A}$, (3.19a) y (3.19b) se pueden expresar como:

$$\mathbf{a}_{N21} \cdot \nabla \times (\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1) = 0 \quad (3.20a)$$

$$\mathbf{a}_{N21} \times \left(\frac{1}{\mu_2} \nabla \times \mathbf{A}_2 - \frac{1}{\mu_1} \nabla \times \mathbf{A}_1 \right) = \mathbf{K} \quad (3.20b)$$

En este trabajo se realiza el análisis en el dominio de la frecuencia por lo tanto la $\partial/\partial t$ se sustituye por $j\omega$ donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular y f la frecuencia en hertz (Hz). Además, se utiliza una tilde sobre las magnitudes vectoriales para indicar que se trata de variables complejas. Teniendo esto en cuenta las ecuaciones ahora se ven de la siguiente forma:

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -j\omega \tilde{\mathbf{B}} \quad (3.21)$$

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{B}} = 0 \quad (3.22)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{J}} \quad (3.23)$$

3.4. Formulaciones de potenciales para reactores

La solución mediante el método de los elementos finitos se ha basado principalmente en formulaciones de potenciales: potencial magnético vectorial, potencial magnético escalar, potencial eléctrico escalar y potencial eléctrico vectorial; y se han publicado muchas investigaciones al respecto [39], [40]. No se puede afirmar que algún método sea el mejor; en realidad, un método óptimo para una clase de problemas puede ser inadecuado para otra. La formulación $\mathbf{A} - V$ del potencial magnético vectorial $\mathbf{A}$ y el potencial eléctrico escalar V , es la aceptada para abordar los problemas en $2D$. En este trabajo se analizarán las formulaciones de los potenciales magnético vectoriales ($\mathbf{A}$), el potencial magnético escalar (ψ) y el potencial magnético escalar reducido (ϕ) en las diferentes regiones del reactor.

El modelo del reactor comprende tres regiones principalmente, la región conductora de corrientes de remolino que comprende las partes estructurales del reactor (pernos de sujeción, tuercas, soleras de sujeción y el tanque), la región no conductora que comprende la región del núcleo y la región de aire donde se localizan las bobinas del reactor.

3.4.1. Región conductora de corrientes de remolino en partes estructurales

Para la región conductora que comprende las partes estructurales del reactor (pernos de sujeción, tuercas, soleras de sujeción y el tanque) se considera el potencial magnético vectorial $\mathbf{A}$.

Debido a la propiedad solenoidal de la densidad de flujo magnético $\mathbf{B}$, ésta se puede expresar en función de $\mathbf{A}$ como:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.24)$$

Dado que la operación rotacional implica la derivación con respecto a una longitud, las unidades de $\mathbf{A}$ son Weber por cada metro Wb/m [41]. La ecuación (3.24) cumple con la ecuación (3.11)

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (3.25)$$

Sustituyendo (3.24) en la ecuación (3.10) se obtiene

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.26)$$

y desde que el rotacional de un gradiente es igual a cero, se puede definir un potencial escalar eléctrico V como:

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (3.27)$$

Luego haciendo uso de la ecuación (3.13) se puede plantear

$$\mathbf{J} = \sigma \left[-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \right] \quad (3.28)$$

Si se sustituyen (3.18), (3.24) y (3.28) en (3.12), entonces la ecuación que se resuelve para esta región en el dominio de la frecuencia es [42]

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma j \omega \mathbf{A} = -\sigma \nabla V \quad (3.29)$$

Como no existe una fuente externa conectada a los componentes estructurales del reactor, el potencial eléctrico vectorial es cero, por tanto

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma j \omega \mathbf{A} = 0 \quad (3.30)$$

3.4.2. Región no conductora: núcleo

Para la región no conductora de corrientes de remolino (libre de fuentes de corriente, es decir, $\nabla \times \mathbf{H} = 0$), se considera el potencial magnético escalar (ψ), sus unidades son Ampere (A). Al utilizar este tipo de potencial se reduce considerablemente el número de incógnitas. Así se puede obtener la intensidad de campo magnético en función del potencial

$$\mathbf{H} = -\nabla \psi \quad (3.31)$$

Entonces si se toma la divergencia de la intensidad de campo magnético, se obtiene la ecuación que gobierna esta región,

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \psi) = 0 \quad (3.32)$$

3.4.3. Región de Aire donde se encuentran los devanados

Para la región definida por los devanados, se considera que la densidad de corriente es uniforme sobre la sección transversal del conductor conocida como región de conductores filamentosos y se supone que los efectos de las corrientes de remolino sobre la sección transversal de estos es despreciable. Por tanto, la intensidad del campo magnético debido a conductores filamentosos se puede calcular utilizando la ley de Biot-Savart. La ley de Biot Savart establece que es posible calcular la magnitud de $\mathbf{H}$ producido por un conductor filamento a cualquier distancia de éste, y que esa intensidad de campo magnético es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo que se forma entre el conductor y el punto en el que se quiere calcular la magnitud de $\mathbf{H}$ y a su vez la intensidad del campo magnético es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre el elemento diferencial y el punto de interés [41]. La expresión de la ley de Biot Savart en su forma integral se muestra a continuación:

$$\mathbf{H}_s = \oint \frac{\mathbf{I}_s d\mathbf{L} \times \mathbf{a}_r}{4\pi r^2} \quad (3.33)$$

donde r es la distancia entre el conductor filamento y el punto en el que se quiere calcular la intensidad de campo magnético e $\mathbf{I}_s$ es la corriente debida a la fuente.

La ley de Biot Savart se utiliza en los reactores trifásicos y en transformadores para fuentes distribuidas, por tanto, la ecuación (3.33) se utiliza en función de la densidad de corriente:

$$H_s = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \mathbf{J}_s \times \nabla \left(\frac{1}{R} \right) d\Omega \quad (3.34)$$

donde Ω denota el volumen encerrado por los devanados, R es la distancia entre un punto particular de la fuente de corriente y un punto campo, $\mathbf{H}_s$ es la intensidad de campo magnético producido en un punto del espacio debido a la fuente de corriente y $\mathbf{J}_s$ es la densidad de corriente de la fuente de la bobina y su distribución se asume perfectamente conocida.

Las bobinas del reactor se localizan inmersas en la región de aire y en toda la región la intensidad del campo magnético se puede obtener tomando como variable el potencial magnético escalar reducido (ϕ). Para calcular la intensidad de campo magnético en las bobinas del reactor se necesita sumar el campo magnético definido en la ecuación (3.34) y el gradiente del potencial magnético escalar reducido, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$(3.35)$$

$$H = H_s - \nabla \phi \quad (3.36)$$

Se puede considerar $\mathbf{H}_s$ como el campo magnético que existiría debido a las fuentes de corriente en una región de sin fronteras y sin materiales magnéticos. Como resultado, no es necesario mallar los devanados dentro del modelo de elementos finitos, pero deben residir dentro de una región de potencial escalar reducido. El potencial escalar reducido solo está definido en el aire [42]. Las regiones escalares no deben contener partes por donde circule corriente debido a que el potencial magnético escalar no es una función univalente de la posición. Esta restricción se elimina con el uso de cortes magnéticos, esto es, definir una frontera y no elegir una trayectoria que cruce esa frontera, así se tiene un potencial univalente.

3.5. Condiciones de frontera

Para resolver las ecuaciones para cada región antes mencionada, se necesita definir condiciones de frontera; estas pueden ser de dos tipos:

1. Condición de **Dirichlet**: Esta condición permite definir el valor del potencial magnético vectorial en un punto. Se utiliza comunmente para delimitar el dominio. Todos los sistemas están delimitados por una superficie que se encuentra relativamente lejos de las corrientes que se encuentran en el dominio, que se puede asumir que a esa distancia no se puede ver ningún efecto del campo eléctrico o magnético [37], [43]. Esta superficie se encuentra a potencial constante $\mathbf{A} = 0$. Esto permite que una superficie que estaba en el infinito se convierta a una distancia finita.
2. Condición de **Neumann**: Esta condición no permite conocer el valor del potencial magnético vectorial, pero si su derivada normal a la superficie, normalmente igual a cero.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (3.37)$$

4. Modelado del reactor en derivación trifásico

4.1. Introducción

Este capítulo presenta los pasos que permitieron obtener el modelo de elementos finitos del reactor en derivación trifásico. Fue posible obtener el modelo en 3D ya que se contaban con las dimensiones del reactor, las características eléctricas y magnéticas de los materiales involucrados y los valores nominales del dispositivo.

4.2. Software Maxwell

En este trabajo se utiliza el software comercial ANSYS Maxwell, este programa permite realizar análisis de dispositivos electromagnéticos y resolver problemas de valor de frontera tanto en 2D como en 3D.

El esquema de la figura 4.1 muestra los pasos a seguir en el software ANSYS Maxwell para realizar la construcción de la geometría y el análisis de dispositivos electromagnéticos, estos son:

- **Construcción de la geometría:** Se construye la geometría del dispositivo utilizando las herramientas con las que cuenta el software.
- **Generación de la malla:** El programa cuenta con los algoritmos correspondientes que le permiten la generación del mallado y refinarla en zonas de mayor error, además le permite al usuario proponer valor de elementos en las regiones de mayor interés.
- **Propiedades físicas:** Se introducen las propiedades físicas de los diferentes materiales que conforman el dispositivo y estos se asignan.
- **Excitación:** Se asigna la excitación correspondiente al análisis que se realiza y se asignan las condiciones de fronteras.
- **Proceso de solución:** Se realiza el proceso iterativo para llegar a la solución del problema.
- **Análisis de resultados:** una vez finaliza la solución de campo se realiza el análisis de los resultados de las simulaciones utilizando las diferentes herramientas brindadas por el software.

4.3. Hipótesis del modelo del reactor trifásico en derivación.

En el caso del reactor en derivación trifásico que funciona a baja frecuencia, el comportamiento electromagnético se describe con la solución de las ecuaciones de Maxwell. Para aprovechar las capacidades computacionales se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

1. Se asume un modelo en 3D del sistema electromagnético, se explica porque no es factible un modelo en 2D.

Figura 4.1: Diagrama de flujo para el análisis de dispositivos electromagnéticos en el software ANSYS Maxwell

2. Se desprecia la corriente de desplazamiento ya que esta es mucho menos que la corriente de conducción. Es decir, se puede omitir la corriente de desplazamiento cuando se opera a baja frecuencia [36].

$$\left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \ll \mathbf{J}\right) \therefore \nabla \times \mathbf{H} \simeq \mathbf{J} \quad (4.1)$$

3. En el modelo en 3D los medios son isotrópicos, no lineales, pudiendo sufrir el fenómeno de saturación.
4. Los medios dieléctricos y conductores son lineales, lo que indica que la permitividad ϵ y la conductividad σ son constantes.

4.4. Descripción del modelado del reactor en derivación trifásico

Las características eléctricas y magnéticas son de gran importancia para crear un modelo que sea lo más cercano a la realidad posible y que permita predecir con gran exactitud el comportamiento del dispositivo que se está analizando.

4.4.1. Especificaciones eléctricas

El reactor en derivación que se analiza en este trabajo de tesis es un reactor construido por la empresa IEM [4], ver la figura 4.2. Es un reactor en derivación trifásico de cinco columnas con núcleo tipo radial. Los datos de placa del reactor en derivación se muestran en la tabla 4.1

Figura 4.2: Fotografía del reactor en derivación trifásico de la empresa IEM

4.4.2. Especificaciones geométricas y propiedades físicas

Las simulaciones en 3D de elementos finitos se realizaron haciendo uso del software comercial *Maxwell*[®]. El modelo del reactor está compuesto por el núcleo, los devanados, los tornillos y las soleras de sujeción. Las figuras 4.3 a 4.6, muestran las dimensiones del núcleo, de las bobinas, de los tornillos y tuercas y de los marcos. Las dimensiones y los parámetros de diseño fueron tomados de los datos de diseño de la empresa fabricante IEM [4], las dimensiones se especifican con mayor detalle a continuación:

Tabla 4.1: Placa de datos del reactor en derivación bajo estudio.

Características	Designación	Valor	Unidades
Número de fases		3	
Frecuencia nominal	f	60	Hz
Tensión	V_{LL}	115000	V
Conexión		Y	
Corriente nominal	I_n	25.1	A(rms)
Capacidad		5000	KVAr
Resistencia por fase	R_l	8.57	Ω
Reactancia a tensión nominal	X_l	2686.4	Ω
Pérdidas totales del núcleo	P_c	2800	W

- El núcleo tiene 106.75 pulgadas de largo, 51.93 pulgadas de altura y 13 pulgadas de grosor.
- Las distancias entre los tornillos se especifican en la figura 4.3.
- El diámetro externo de las pastillas centrales es de 12.5 pulgadas.
- Los tornillos tienen un diámetro de 0.5 pulgadas (ver figura 4.6).
- El ancho de las soleras de sujeción es de 0.625 pulgadas.
- Las dimensiones de las tuercas son de 0.75×0.625 (ver figura 4.6).

Figura 4.3: Dimensiones del núcleo del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista frontal).

La figura 4.3 muestra una vista frontal del modelo en 3D donde se señalan las dimensiones del núcleo y las dimensiones entre los tornillos. La figura 4.4 muestra las dimensiones de las bobinas

Figura 4.4: Dimensiones del núcleo y bobinas del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista aérea y frontal).

Figura 4.5: Dimensiones de las soleras de sujeción del reactor en derivación trifásico bajo estudio (vista frontal y aérea).

y la profundidad y el ancho del núcleo mediante una vista aérea y frontal del modelo en 3D. Cada bobina cuenta con 3026 vueltas en serie, están hechas de cobre electrolítico C11000 [2], cartón y papel dieléctrico. El núcleo de hierro se modeló como un material isotrópico no conductor de acero eléctrico de grano orientado de silicio de 23JGSD085, teniendo en cuenta sus características no lineales por lo que se tuvo en cuenta la curva de magnetización B-H [4]. La figura 4.7 muestra la curva utilizada.

La figura 4.5 muestra las dimensiones de las soleras de sujeción, estas están hechas de un material isotrópico (acero al carbón A36), se modeló con permeabilidad relativa $\mu_r = 400$. La figura 4.6 muestra las dimensiones de los tornillos y las tuercas, estos están hechos de material isotrópico (acero inoxidable A316), su permeabilidad relativa es $\mu_r = 1$ y prácticamente constante por lo que no hay necesidad de usar curvas $B(H)$.

4.4.3. Condiciones de frontera del modelo

La evaluación del campo electromagnético considera en todas las simulaciones realizadas en **EF** el potencial magnético vectorial **A** en todo el dominio de solución. Para obtener resultados con mayor precisión es necesario evaluar todo el dominio de estudio, de hecho teóricamente es lo que está establecido, pero con fines más prácticos, es decir, para disminuir el tiempo de cómputo y despreciar las regiones donde es posible despreciar el campo y puede no tenerse en cuenta en el modelo del reactor utilizando el **MEF**, se delimita el dominio del problema. La figura 4.8 muestra la condición de frontera utilizada en este trabajo. Es un espacio de aire que delimita el dominio. El modelo del reactor considera la condición de frontera conocida como

Figura 4.6: Dimensiones de los tornillos y las tuercas del reactor en derivación trifásico (vista lateral, frontal y del largo de los tornillos)

Figura 4.7: Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 [4]

Dirichlet para indicar que en las caras del cubo la intensidad de campo es cero porque está lo

suficientemente lejos de la fuente y su efecto es imperceptible a esta distancia lo que comprueba la propiedad del campo que a medida que aumenta el radio la intensidad disminuye.

Para un análisis electromagnético detallado se necesitan una gran cantidad de elementos finitos, esto se traduce en una malla muy densa. Las dimensiones de cada elemento de la malla en la región de la solera de sujeción y los tornillos específicamente son muy pequeñas, esto puede provocar que el software no pueda resolver el problema. Debido a todo esto se introduce lo que se conoce como impedancia de superficie, lo que disminuye considerablemente el número de elementos finitos y permite calcular las pérdidas en el frame y los tornillos. un análisis más detallado sobre este tema se realizó en el epígrafe 1.6.

Figura 4.8: Condición de frontera Dirichlet del modelo

4.4.4. Mallado de la geometría

El proceso de generación de la malla es muy importante en el proceso de simulación. Se deben tener en cuenta las características físicas del problema que se está analizando. Al construir un mallado no se debe descuidar el tamaño de los elementos ya que esto influye mucho en el resultado y el tiempo de cómputo.

Una malla densa, es decir, de elementos pequeños, puede brindar resultados precisos pero podría afectar en gran medida el tiempo de cálculo. De otro modo, si creamos una malla de elementos grandes, se podría reducir el tiempo de cálculo pero no se obtendrían buenos resultados. Por lo que una medida de la calidad de la malla lo da el tiempo de cómputo y los resultados que se obtienen.

Para producir la malla óptima, Maxwell utiliza un proceso iterativo, llamado análisis adaptativo, en el que la malla se refina automáticamente en regiones críticas. Primero, genera una solución basada en una malla inicial gruesa, luego refina la malla en áreas de alta densidad de errores y genera una nueva solución. Cuando los parámetros seleccionados convergen dentro de un límite deseado, Maxwell se sale del ciclo. Proporcionar la máxima longitud de los elementos y la cantidad de elementos antes de comenzar el proceso de análisis adaptativo puede reducir el número de pasos necesarios para converger en una solución de campo.

El mallado creado en este análisis tiene 177,270 elementos y tuvo en cuentas las siguientes especificaciones:

- La densidad de la malla en las regiones de mayor interés debe ser alta (tornillos, pastillas y marco).
- La variación de tamaño entre elementos adyacentes debe ser progresiva.
- Si existen elementos triangulares, se debe evitar la existencia de ángulos obtusos (elementos de mala calidad) dado que esto conlleva a reducir la exactitud y desestabilizar la solución.

4.4.5. Condiciones de operación

La determinación de las pérdidas en los elementos estructurales del reactor en derivación se realizó utilizando el software **Maxwell** 3D mediante el método de los elementos finitos como fue descrito en el capítulo anterior. Se realizaron dos análisis, magnetostático y armónico, para ambos análisis se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones de operación:

- El análisis magnetostático se realizó en el instante donde $I_a = 107413.197$ A en dirección positiva y $I_b = I_c = 53706.598$ A en dirección negativa.
- Las fases para las corrientes trifásicas en el análisis armónico son: $\angle I_a = 0^\circ$, $\angle I_b = -120^\circ$ y $\angle I_c = 120^\circ$.
- Los cálculos realizados en ambos análisis tienen en cuenta la condición de frontera Dirichlet, es decir que el flujo magnético que fluye a través de esta frontera se considera igual a cero.
- En el análisis armónico se tiene en cuenta el efecto de las corrientes parásitas en el los pernos de sujeción del núcleo, esto permite observar la concentración de corrientes parásitas en las tuercas y los pernos cuando ocurre una falla y determinar los puntos calientes.

5. Simulación en 3D del reactor trifásico en derivación

5.1. Introducción

El modelo en 2D en principio sirve para visualizar el fenómeno electromagnético y simplificar el cálculo, y en muchas situaciones, cuando la geometría lo permite (basado en la simetría), es preciso y suficiente para el análisis.

En el caso particular de este problema, un modelo en 2D permite visualizar las distribuciones de campo general en el núcleo y la distorsión que se genera debido a los pernos. Con un modelo de este tipo se puede estimar la condición de operación general del núcleo (inducción nominal), pero el comportamiento a detalle de las corrientes circulantes en la zona de los tornillos (cuando existe una falla), en la estructura y el propio núcleo solo se podrá visualizar con un modelo en 3D y con mayor razón si se desea realizar un estudio de pérdidas en componentes estructurales.

5.2. Validación del modelo en 3D

Para validar el modelo en 3D se tuvieron en cuenta: el valor máximo de la distribución de campo magnético para el cual crean los núcleos en la empresa IEM y el valor de la reactancia a tensión nominal medida; datos que fueron proporcionados por la propia empresa [4].

La empresa crea estos núcleos para que tengan una densidad de flujo magnético máxima

Figura 5.1: Distribución de la densidad de campo magnético en el núcleo del reactor en derivación trifásico en condición de operación nominal.

de 1.4 T aproximadamente. La figura [5.1] muestra la distribución de la densidad de flujo magnético en el núcleo del reactor en derivación trifásico en condiciones de operación nominal, es decir, con corriente nominal. Se puede ver que existe una densidad de flujo máxima de 1.4 T

aproximadamente en las pastillas que conforman la columna correspondiente a la fase A. Esto se debe a que se está graficando el instante de tiempo cuando la fase A está en su máximo valor. Este valor aprueba el modelo ya que cumple con las especificaciones de construcción de la empresa.

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se observan las líneas de flujo magnético en el núcleo del reactor

Figura 5.2: Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 0^0$)

Figura 5.3: Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 120^0$)

trifásico en derivación. Se puede ver como el flujo circula principalmente por el núcleo del reactor, existiendo muy poco flujo disperso lo que disminuye las pérdidas debidas al mismo. Para validar el modelo mediante el valor de la reactancia por fase, se utiliza el método de

Figura 5.4: Líneas de flujo magnético del reactor trifásico en derivación durante la operación normal del sistema de potencia ($\omega t = 240^\circ$)

almacenamiento de la energía magnética [5], [44], [30]. Este método es preciso y proporciona un cálculo sencillo. El valor obtenido se compara con el valor de la reactancia por fase que se encuentra en la tabla 4.1, si el valor es aproximadamente igual se valida el modelo.

Para un circuito magnético conformado de un material magnético de permeabilidad magnética constante o donde dominan los entrehierros, la relación entre los encadenamientos de flujo (λ) y la corriente (i) se puede asumir lineal para fines prácticos, entonces se puede definir la inductancia (L) como

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (5.1)$$

La inductancia se mide en Henry H o en Weber vueltas por cada ampere Wb – vueltas/A. El concepto de inductancia requiere que la relación entre el flujo y la fuerza magnetomotriz sea lineal. Es decir, no se puede aplicar cuando las características no lineales de los materiales dominan el sistema magnético. En muchos análisis de interés práctico, la reluctancia del sistema está dominada por los entrehierros y el efecto de la no linealidad de los materiales magnéticos se puede despreciar [30]. Como $\lambda = N\varphi$, donde φ es el valor instantáneo del flujo variante en el tiempo, se puede expresar L en función del flujo como

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (5.2)$$

donde $\Phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}}$, siendo $\mathfrak{R}$ la reluctancia total del sistema.

Siendo $e = \frac{d}{dt}(Li)$ el voltage y la potencia igual al producto del voltage por la corriente

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad (5.3)$$

entonces el cambio de energía magnética almacenada en el circuito magnético en un intervalo de tiempo t_1 a t_2 se puede expresar como

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda \quad (5.4)$$

La energía magnética almacenada se mide en Joules J.
Si se sustituye la ecuación 5.1 en la ecuación 5.4 se tiene

$$\Delta W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \quad (5.5)$$

Por tanto, la energía magnética almacenada para cualquier valor de λ se puede encontrar si se hace $\lambda_1 = 0$, entonces

$$W = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{L}{2} i^2 \quad (5.6)$$

Haciendo uso de la definición de inductancia (L) desde el punto de vista energético y despejando L de la ecuación anterior se tiene que

$$L = \frac{2W}{i^2} \quad (5.7)$$

donde W es la energía almacenada en el campo magnético producida por una corriente i dividida entre el número de fases.

El valor de la energía total almacenada en el circuito magnético lo proporciona el propio programa una vez realizado el análisis de campo, este es de 6926.9 J, se divide entre la cantidad de fases (3) y se calcula la inductancia. La inductancia da un valor de 7.32 H, entonces mediante la ecuación $X_l = 2\pi f L$ se obtiene un valor de reactancia por fase de 2763.32 Ω , que difiere un 2 % en comparación con los datos de placa del reactor en derivación. Este valor obtenido valida el modelo.

5.3. Análisis de pérdidas en el núcleo del reactor en derivación trifásico

Para realizar el análisis de pérdidas en el núcleo del reactor en derivación trifásico se utilizó el programa ANSYS Maxwell. Este programa utiliza el método de elipse equivalente para calcular las pérdidas por histéresis en núcleos modelados en forma isotrópica y anisotrópica [45], [46]. Mediante este método, el programa simula la curva de histéresis usando una elipse y calcula las pérdidas por corrientes de remolino y las pérdidas excedentes. Para calcular estas pérdidas el programa necesita los valores de los coeficientes de pérdidas por histéresis, por corrientes de remolino y por pérdidas excedentes. Utilizando la curva de pérdidas en la dirección de rolado y aplicando un algoritmo de regresión, se obtienen los coeficientes de pérdidas por histéresis k_h y de pérdidas excedentes k_e [47]. El coeficiente k_h lo necesita el programa para calcular las pérdidas por histéresis mediante el método de la elipse. El coeficiente k_e lo utiliza el programa para calcular las pérdidas excedentes en el núcleo. El coeficiente de pérdidas por corrientes de remolino k_c se calcula automáticamente usando la ecuación siguiente [10]:

$$k_c = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} \quad (5.8)$$

donde σ es la conductividad de las láminas cuyas unidades son siemen por cada metro (S/m) y d es el espesor de las laminaciones en metro (m). Haciendo uso de este coeficiente, el programa calcula las pérdidas por corrientes de remolino en el núcleo del reactor.

Para realizar el análisis de pérdidas del reactor en derivación trifásico se tuvo en cuenta la geometría que se muestra en la figura 5.5. Las bobinas del reactor tienen $N = 3026$ vueltas

efectivas. Las bobinas están hechas de cobre con permeabilidad relativa (μ_r) de uno y una conductividad (σ) de 5.8×10^7 S/m. El núcleo está hecho de láminas de acero al silicio de grano orientado M3 con espesor de 0.23 mm, una densidad de 7650 kg/m³ y una conductividad de 2.08×10^6 S/m.

Se realizaron dos modelos: un modelo considerando propiedades isotrópicas y un segundo

Figura 5.5: Modelo del reactor en derivación trifásico.

modelo considerando propiedades anisotrópicas. El objetivo de este análisis es obtener las pérdidas del núcleo y comparar los resultados con los obtenidos en el laboratorio.

5.3.1. Modelo isotrópico

La figura 5.6 muestra la curva de magnetización y la figura 5.7 muestra la curva de pérdidas a 60 Hz del acero M3.

5.3.2. Modelo anisotrópico

El núcleo se modeló teniendo en cuenta la no linealidad del material, mientras que las pastillas que conforman las columnas del núcleo se modelaron teniendo en cuenta las propiedades anisotrópicas, esto hace que se modele con mayor exactitud al reactor real y se obtengan resultados más precisos.

Las pastillas que conforman las columnas del núcleo tienen láminas colocadas en forma radial, por lo que se utilizaron coordenadas cilíndricas al definir las direcciones del flujo. Las curvas de permeabilidades relativas utilizadas en las direcciones de rolado y transversal se muestran en la figura 5.8 y 5.9 respectivamente.

En la dirección normal se introdujo un valor constante de permeabilidad relativa igual a 25. El propio programa calcula los coeficientes k_h , k_c y k_e para el acero M3. Los coeficientes k_h y k_e se obtuvieron de la curva de pérdidas en dirección de rolado a 60 Hz mostrada en la figura 5.4 usando un algoritmo de regresión. El coeficiente k_c fue calculado por el programa usando la ecuación 5.8 para una conductividad (σ) de 2.08×10^6 S/m, una densidad de 7650 kg/m³ y un espesor de las láminas d de 0.23 mm los coeficientes obtenidos por el programa se muestran

Figura 5.6: Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 [4].

Figura 5.7: Curva de pérdidas a 60 Hz del acero eléctrico M3 [4].

en la tabla 5.1

Coefficiente	Valor(W/m³)
Pérdidas por histéresis (K_h)	68.6968383343797
Pérdidas por corrientes parásitas (K_c)	0.180995385243444

Tabla 5.1: Coeficientes de pérdidas para el acero eléctrico de grano orientado M3 a 60 Hz.

Las bobinas se alimentaron con corriente nominal 25.1 A (rms). El modelo fue encerrado dentro de un rectángulo de aire con permeabilidad relativa $\mu_r = 1$, considerando una frontera Dirichlet en las caras del mismo. El mallado cuenta con un total de 158259 elementos finitos; para modelos en tres dimensiones el programa utiliza elementos finitos en forma de tetraedros solamente, los cuales tienen un total de 10 nodos. El programa resuelve para todos los nodos

Figura 5.8: Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 en la dirección de rolado [4].

principales y para los nodos intermedios.

5.3.3. Resultados

Los resultados de ambas simulaciones se muestran en la tabla 5.2.

Se puede observar que el modelo isotrópico dió como resultado: 2618.8 W, lo que indica un

Pérdidas de núcleo medidas (W)	2800
Pérdidas de núcleo simuladas (isotrópico)	2618.8
% de error	6.47
Pérdidas de núcleo simuladas (anisotrópico)	2710
% de error	3.21

Tabla 5.2: Comparación entre las pérdidas medidas y las pérdidas simuladas del reactor.

6.47 % del valor medido en el laboratorio. Este valor se encuentra por debajo del 10 % lo que hace válido el modelo, pero cuando se realiza el modelo anisotrópico se obtienen valores mucho más cercanos a los que se obtuvieron en las mediciones de laboratorio. Como se puede observar en la tabla 5.7 las pérdidas en el modelo anisotrópico tuvieron un valor de 2710 W, lo que significa un 3.21 % del valor medido. Este modelo claramente se acerca mucho más al modelo real y por tanto queda validado de ambas formas el modelo en 3D del reactor en derivación trifásico con el cual se está trabajando.

5.4. Análisis térmico

Para realizar el análisis térmico se utilizaron varios software como: ANSYS Maxwell, Workbench y Mechanical Steady-state thermal. El vínculo entre estos tres softwares consiste en utilizar ANSYS Maxwell para realizar el análisis electromagnético y obtener las pérdidas en los elementos estructurales del reactor trifásico en derivación y a través de Workbench realizar un acople con Mechanical (software que realiza el análisis térmico) de modo que las pérdidas

Figura 5.9: Curva de magnetización del acero eléctrico de grano orientado M3 en la dirección transversal [4].

calculadas se transfieran al análisis térmico como fuentes de calor. Luego que se plantea la geometría en 3D en el software ANSYS Maxwell y se realiza el análisis electromagnético, se procede a realizar el acople, primero se carga el software Workbench, luego se carga dentro de este software el modelo electromagnético y se comienza acoplando la geometría, después las propiedades de los materiales a las cuales se le incluyen las propiedades térmicas, finalmente se carga la solución y se abre el modelo térmico. Dentro del software ANSYS Mechanical se carga el mallado y se asigna un límite de convección uniforme en las caras externas del tornillo, para simular la convección libre laminar del transformador en el perno de sujeción. Esta frontera necesita coeficiente de convección de transferencia de calor (h), éste depende de las propiedades del aceite a una temperatura de operación característica. El coeficiente de convección para el análisis de temperatura del tornillo de sujeción mecánica que se tuvo en cuenta tiene un valor de 10, este valor se obtuvo de [9], teniendo en cuenta que el aceite no circula tan rápido por las paredes del tornillo, y se soluciona el modelo el cual da como resultado la distribución de la temperatura en el tornillo.

Se considera que la temperatura máxima del aceite es de 75 °C, las propiedades del aceite para esa temperatura se obtuvieron de la tabla A.1.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad (ρ)	844.165	kg/m ³
Calor específico (C_p)	2220	W s/(kg °C)
Conductividad térmica (K)	0.1140	W/(m °C)
Coeficiente de expansión térmica cúbica (β)	8.6×10^{-4}	1/°C
Viscosidad (ν)	53×10^{-4}	kg/(m s)

Tabla 5.3: Propiedades térmicas del aceite mineral a 65°C [3]

5.4.1. Simulación en condiciones de operación normal del sistema

Se realizan las simulaciones correspondientes al caso donde el sistema está operando en condiciones normales, es decir cuando opera a corriente nominal y no se tiene en cuenta ninguna falla.

La figura 5.10 muestra la distribución del campo magnético en el núcleo del reactor trifásico. Se puede ver como la distribución corresponde al instante de tiempo en el que la corriente máxima está circulando por la fase C con un valor promedio de 1.4 T, por lo que no ocurre saturación en el núcleo.

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la distribución de la densidad de corriente en la solera de

Figura 5.10: Distribución del campo magnético en el núcleo del reactor trifásico cuando no ocurre falla.

sujeción y uno de los tornillos que sujeta el núcleo respectivamente. Donde se puede ver como tiene un comportamiento normal dado que no existe una gran concentración de corriente en ninguna de las zonas visibles. En la zona donde existe mayor concentración de corriente lo que está ocurriendo es que el tornillo está debidamente aislado y esto provoca que la corriente se distorciona en ese punto pero no ocurre una gran concentración de corriente por tanto no hay un exceso de pérdidas en esa región. Lo mismo ocurre en el tornillo donde prácticamente no existe circulación de corriente dado que se encuentra aterrizado de un solo lado y esto hace que funcione como un circuito abierto por tanto no debe circular corriente alguna por el mismo.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se muestra la distribución vectorial de la densidad de corriente. Las figuras permiten ver como la corriente circula de una solera de sujeción a otra a través del soporte superior que sujeta las soleras. Se puede ver como la corriente se distorciona al atravesar la región del tornillo debido al cambio de material y a que el tornillo está completamente aislado de las soleras por un lado y por el otro está aterrizado pero al ser un circuito abierto no circula corriente por él. Esto se puede ver con más detalle en la figura 5.15 donde no se observan flechas atravesando el tornillo.

La figura 5.16 muestra la distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo. Se puede ver como en este caso la escala de colores prácticamente no es necesaria dado que la elevación de temperatura es casi nula. Esto quiere decir que no hay casi pérdidas para este caso de análisis y que la temperatura se está transmitiendo desde el punto de aterramiento hasta el punto donde existe un correcto aislamiento del tornillo sin alcanzar valores elevados.

Figura 5.11: Distribución de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo cuando no ocurre falla.

Figura 5.12: Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo cuando no ocurre falla.

Esto representa una condición de operación satisfactoria para el equipo.

5.4.2. Simulación en condiciones de falla del sistema de sujeción del reactor

En este caso se está analizando el reactor trifásico asumiendo que ha ocurrido una falla y se mantiene alimentando el reactor con corriente nominal. Esta falla consiste en hacer que el aislamiento de uno de los tornillos que sujetan el núcleo se dañe. Para simular esto se realizó un pequeño contacto entre el tornillo y la solera de sujeción lo que está indicando que solo una pequeña parte de ese aislamiento fue la que se dañó.

En la figura [5.17](#) se muestra la distribución del campo magnético cuando el tornillo está en contacto por ambos lados de las soleras de sujeción. Se puede ver como existe la saturación del núcleo en la zona donde se encuentra el tornillo debido al flujo disperso generado por la circulación alta de corriente en el tornillo.

En las figuras [5.18](#), [5.19](#) y [5.20](#) se muestra la distribución de la densidad de corriente en las soleras de sujeción y el tornillo que sujeta el núcleo. Se puede ver como existe una gran concentración de la corriente en la zona donde el tornillo hace el contacto no deseado y esto

Figura 5.13: Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista frontal) cuando no ocurre falla.

Figura 5.14: Distribución vectorial de la densidad de corriente en soleras de sujeción del núcleo (vista lateral) cuando no ocurre falla.

se debe a que una gran cantidad de corriente está circulando por un área mucho menor y esto hace que se eleve considerablemente las pérdidas en esa zona. Como se puede ver en las imágenes, la corriente esta vez si circula por el tornillo a diferencia del caso donde no existe falla, sin embargo no ocurre una elevación a lo largo del tornillo sino en la zona donde se encuentra el pequeño contacto.

En las figuras [5.21](#), [5.22](#) y [5.23](#) se muestra la distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción y el tornillo que sujeta el núcleo. Esta vez las imágenes muestran como la corriente circula a través del tornillo. Con respecto al caso sin falla, se puede ver como las flechas tienen un color rojo en la zona donde el tornillo hace el contacto no deseado con la solera de sujeción, lo que indica según la escala de colores que en esa zona la concentración de corriente puede provocar grandes pérdidas lo que se traduce en un valor alto de temperatura.

En la figura [5.24](#) se muestra la distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo, en esta imagen se puede ver como según la escala de colores la temperatura alcanzó valores de 2685 °C lo cual provocó la fundición del tornillo y la tuerca en esa zona. Esto demuestra la falla que ocurrió en la vida real y demuestra también que al hacer contacto el

Figura 5.15: Distribución vectorial de la densidad de corriente en soleras de sujeción del núcleo (vista superior) cuando no ocurre falla.

Figura 5.16: Distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo cuando no ocurre falla.

tornillo en ambos lados del núcleo cierra el circuito y comienza a circular corriente a travez del mismo, pero al disminuir considerablemente el área de contacto se elevan las pérdidas y aumenta los valores de temperatura.

5.4.3. Análisis de pérdidas y distribución de temperatura

Se realizó un análisis donde se variaba el tipo de material del tornillo ubicado en la izquierda superior de la bobina central del reactor y la densidad de campo magnético con el fin de observar los valores de pérdidas y temperaturas que se obtenían solamente para el caso donde el reactor está operando correctamente.

En las tablas 5.4 y 5.5 es interesante notar que las pérdidas y por ende el calentamiento del tornillo son prácticamente independiente de la densidad de flujo magnético que se tenga en el núcleo y depende principalmente del tipo de material con el que esté fabricado el tornillo; siendo mejor el uso de materiales no magnéticos como el acero inoxidable y el bronce siliconado.

Las tablas 5.4 y 5.5 resumen el comportamiento electromagnético de los tornillos de sujeción del núcleo (considerando diferentes materiales en su fabricación); esto durante la operación normal del equipo. Para esta aplicación, la correcta selección de los tornillos no solo depende de

Figura 5.17: Distribución del campo magnético en el núcleo del reactor trifásico cuando ocurre la falla.

Figura 5.18: Distribución de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo cuando ocurre la falla.

sus propiedades mecánicas, sino también del comportamiento electromagnético de los mismos; estos parámetros en conjunto con el costo, definirán el tipo de material a utilizar en estos diseños. Los estudios y las tablas sirven como referencia para que los fabricantes optimicen los diseños y al mismo tiempo minimicen los problemas potenciales de operación en estos equipos de amplia aplicación en los sistemas eléctricos de potencia modernos.

Figura 5.19: Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.

Figura 5.20: Distribución de la densidad de campo magnético en el tornillo que sujeta el núcleo (acercamiento) cuando ocurre la falla.

Figura 5.21: Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista lateral) cuando ocurre la falla.

Figura 5.22: Distribución vectorial de la densidad de corriente en las soleras de sujeción del núcleo (vista superior) cuando ocurre la falla.

Figura 5.23: Distribución vectorial de la densidad de corriente en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.

Figura 5.24: Distribución de la temperatura en el tornillo que sujeta el núcleo cuando ocurre la falla.

Tabla 5.4: Tabla de pérdidas calculadas en el tornillo variando el material y la densidad de campo magnético en el modelo del reactor trifásico

Pérdidas calculadas en el tornillo W								
Densidad de campo magnético (T)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Pérdidas del tornillo de acero inoxidable (W)	0.0043	0.0042	0.0041	0.004	0.0039	0.00398	0.00391	0.00385
Pérdidas del tornillo de acero al carbón (W)	0.514	0.5067	0.4912	0.483	0.476	0.4761	0.468	0.461
Pérdidas del tornillo de bronce siliconado (W)	0.002	0.002	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018

Tabla 5.5: Tabla de temperaturas calculadas en el tornillo variando el material y la densidad de campo magnético en el modelo del reactor trifásico

Temperaturas calculadas en el tornillo °C								
Densidad de campo magnético (T)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Temperatura de tornillo de acero inoxidable (°C)	75.148	75.146	75.142	75.137	75.139	75.136	75.133	75.131
Temperatura de tornillo de acero al carbón (°C)	83.925	83.789	83.516	83.384	83.252	83.25	83.117	82.984
Temperatura de tornillo de bronce siliconado (°C)	75.037	75.036	75.035	75.034	75.034	75.033	75.033	75.033

6. Conclusiones

En este trabajo se plantea un modelo en 3D de un reactor trifásico en derivación de 5MVA, en el dominio de la frecuencia, utilizando los softwares ANSYS Maxwell y ANSYS Mechanical. A continuación, se plantean los elementos que fueron considerados en el desarrollo de las simulaciones y las decisiones que se tomaron en función de los resultados que se iban obteniendo, así mismo se incluyen las ventajas que tuvo la aplicación del MEF y las recomendaciones que se hacen al fabricante de los reactores:

- Para este tipo de análisis un modelo en 2D no es una opción viable, esto se debe a la necesidad de mostrar el comportamiento de la corriente en sus tres direcciones. Un análisis en 2D en un principio funcionaría para mostrar el comportamiento del campo magnético y de la corriente a lo largo del plano x-y, pero cuando se necesita mostrar la distribución de temperatura y por ende de las pérdidas en uno de los tornillos que sujetan el núcleo el análisis en 2D es insuficiente.
- Para el análisis que se desarrolló, se demostró que el uso de la impedancia superficial no era una opción. Se conoce que el uso de impedancias superficiales disminuye considerablemente el tiempo de cómputo pero el uso de la misma no permitía que se viera lo que pasaba dentro de los elementos de sujeción del núcleo y por tanto no permitía observar el fenómeno.
- El material del núcleo se tiene que trabajar teniendo en cuenta su propiedad no lineal dado que se intentó simular como un material lineal con fines de disminuir el tiempo de cómputo y no arrojaba resultados por lo que se llegó a la conclusión de que este tipo de análisis no puede hacer esa consideración. El fenómeno observado tiene que ver con el efecto de saturación en el material magnético del núcleo y un modelo lineal no permite observar este efecto.
- Cuando falla el aislamiento del tornillo y este hace contacto en ambos lados de las soleras de sujeción, se presenta una trayectoria cerrada y el tornillo experimenta temperaturas elevadas que lo pueden llevar a fundirse.
- Los tornillos de sujeción deben encontrarse perfectamente aislados de las soleras de sujeción y el núcleo.
- Se descubrió la causa por la que el tornillo del núcleo del reactor se fundió (contribución más importante).
- El método de elementos finitos aplicado en este trabajo le permite a los ingenieros de diseño de reactores conocer el comportamiento de las diferentes partes del reactor antes de que estos sean fabricados. Por ejemplo, un estudio de diferentes materiales aplicados a los tornillos que sujetan el núcleo nos ayuda a comprender qué materiales son los que provocan mayores pérdidas. Se demostró que el comportamiento de las pérdidas y por ende el calentamiento del tornillo es prácticamente independiente de la densidad de flujo magnético que se tenga en el núcleo y depende principalmente del tipo de material

con el que este fabricado el tornillo ; siendo mejor el uso de materiales no magnéticos como el acero inoxidable y el bronce siliconado. Por tanto, estos modelos de elementos finitos además de reducir el costo y tiempo de diseño de los reactores también permite optimizar los modelos antes de ser construidos y realizarle mejoras como por ejemplo qué materiales utilizar o qué dimensiones deben llevar sus partes.

- Las recomendaciones que se le hacen al fabricante son:
 1. Se recomienda utilizar tornillos de materiales no magnéticos en concordancia con los resultados obtenidos en las tablas de pérdidas y temperatura variando el tipo de material y la densidad de campo magnético.
 2. Se recomienda aumentar la frecuencia con la cual se realizan las pruebas de gases disueltos a los reactores y esto con el objetivo de detectar una falla a tiempo en caso de que existiera.
 3. Se recomienda utilizar el modelo obtenido en este trabajo para simular otro tipo de fallas que se pudieran presentar y así prevenir posibles problemas potenciales ó incluso desarrollar técnicas de diagnóstico para estos equipos.

A continuación se plantean propuestas de trabajos futuros:

- Modelar el reactor por medio del método de elementos finitos donde se consideren todos los elementos, incluyendo el tanque.
- Realizar el análisis de temperatura variando las dimensiones del contacto entre el tronillo y la solera de sujeción.
- Realizar análisis de temperatura a las diferentes partes del reactor.
- Realizar el mismo análisis asumiendo diferentes fallas que puedan ocurrir.
- Realizar este tipo de análisis a reactores de diferentes capacidades.

7. Referencias

- [1] D. Aragon-Verduzco, J. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, E. Campero-Littlewood, R. Ocon-Valdez, and S. Magdaleno-Adame, “Experimental procedure to obtain electro-magnetic properties of a-36 low carbon steel plates utilized in transformers,” in *2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [2] J. Olivares-Galvan, F. De León, P. Georgilakis, and R. Escarela-Perez, “Selection of copper against aluminium windings for distribution transformers,” *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 6, pp. 474–485, 2010.
- [3] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, “Dynamic thermal modelling of power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, 2005.
- [4] IEM., *La marca comercial IEM perteneciente al Sector de Energía de ConduMex del Grupo Carso. Empresa dedicada a la fabricación de transformadores, creación de soluciones en iluminación y sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica y el calentamiento de agua*. <http://www.iem.com.mx>, 2019.
- [5] S. V. Kulkarni and S. Khaparde, *Transformer engineering: design and practice*. CRC press, 2004, vol. 25.
- [6] W. Sprong, “Reliability-centred maintenance: electrical engineering,” *IMIESA*, vol. 34, no. 7, pp. 66–77, 2009.
- [7] T. Gunes, “Numerical and experimental analyses of the deterioration in magnetic flux density distribution on perforated transformer core steels,” *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 31, no. 5, p. e2452, 2018.
- [8] E. Akpinar and D. Selici, “Calculation of zero sequence inductance of a three-phase reactor,” in *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE, pp. 111–115.
- [9] S. Magdaleno-Adame, R. Escarela-Perez, J. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, and R. Ocon-Valdez, “Temperature reduction in the clamping bolt zone of shunt reactors: Design enhancements,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2648–2655, 2014.
- [10] S. Magdaleno-Adame, E. Melgoza-Vazquez, J. Olivares-Galván, R. Ocón-Valdez, and E. Campero-Littlewood, “Cálculo de pérdidas y distribución de campo en el núcleo de un reactor de potencia,” *ROPEC INTERNACIONAL*, pp. 68–72, 2012.
- [11] A. Alabakhshizadeh and O.-M. Midtgård, “Air gap fringing flux reduction in a high frequency inductor for a solar inverter,” in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2013, pp. 2849–2852.

-
- [12] X. M. Lopez-Fernandez, P. Penabad-Duran, and J. Turowski, "Three-dimensional methodology for the overheating hazard assessment on transformer covers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp. 1549–1555, 2012.
 - [13] J. C. Olivares-Galvan, S. Magdaleno-Adame, R. Escarela-Perez, R. Ocon-Valdez, P. S. Georgilakis, and G. Loizos, "Reduction of stray losses in flange–bolt regions of large power transformer tanks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 8, pp. 4455–4463, 2013.
 - [14] S. Chen, F. Wang, and L. Su, "Experimental research of vibration characteristics of shunt reactor," in *2014 IEEE PES General Meeting/ Conference & Exposition*. IEEE, 2014, pp. 1–5.
 - [15] S. Magdaleno-Adame, J. Olivares-Galvan, S. Kulkarni, and R. Escarela-Perez, "Analysis of slots in horizontal plates of t-beams in shell-form power transformers," *Electric Power Systems Research*, vol. 101, pp. 88–95, 2013.
 - [16] T. Senjyu, Y. Miyazato, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, "Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 1236–1242, 2008.
 - [17] J. W. Coltman, "The transformer [historical overview]," *IEEE industry applications magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 8–15, 2002.
 - [18] J. H. Harlow, *Electric power transformer engineering*. CRC press, 2003.
 - [19] CFE, *Manual de transformadores y Reactores de potencia*, 2007.
 - [20] M. Heathcote, *J & P transformer book*. Elsevier, 2011.
 - [21] I. Dasgupta, *Design of transformers*. Tata McGraw-Hill Education, 2002.
 - [22] S. Hagiwara, Y. Hori, Y. Suzuki, and T. Obata, "Vibration analysis of a large capacity shunt reactor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 3, pp. 737–745, 1982.
 - [23] X. Zhang and X. Yao, "Experiments and simulations on the vibration of shunt reactor and the noise control," *Journal of theoretical and applied information technology*, no. 1, pp. 52–57, 2012.
 - [24] R. L. Bean, *Transformers for the electric power industry*. McGraw-Hill, 1959.
 - [25] S. Liu, L.-f. Xu, Y.-x. Feng, L.-l. Fan, Y. La, and Z. Yao, "Research on vibration of 10kv dry-type shunt reactor with core," *Transformer.*, vol. 46, pp. 31–34, 2009.
 - [26] E. Melgoza, R. Escarela-Perez, and J. Alvarez-Ramirez, "Finite-element inductance computation in 2-d eddy-current systems using sensitivity analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 690–697, 2010.
 - [27] C. W. T. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*. CRC press, 2017.
 - [28] B. Hochart, *Power transformer handbook*. Butterworth & Co., 1987.
 - [29] W. Flanagan, *Handbook of transformer design and applications*. McGraw-Hill, Inc., 1993.
-

-
- [30] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, and B. James, *Electric machinery*. McGraw-Hill New York, 2003, vol. 5.
- [31] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, and R. Ahuja, *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2017.
- [32] L. J. Segerlind and H. Saunders, “Applied finite element analysis,” 1987.
- [33] J. C. Sabonnadiere and J. L. Coulomb, *Finite element methods in CAD: electrical and magnetic fields*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [34] S. Kulkarni and S. Khaparde, “Stray loss evaluation in power transformers-a review,” in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*, vol. 3. IEEE, 2000, pp. 2269–2274.
- [35] C. Fortescue and W. McConahey, “Stray losses on transformers,” *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 32, no. 2, pp. 307–321, 1913.
- [36] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic modeling by finite element methods*. CRC press, 2003.
- [37] A. C. Polycarpou, “Introduction to the finite element method in electromagnetics,” *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–126, 2005.
- [38] M. N. Sadiku, *Numerical techniques in electromagnetics with MATLAB*. CRC press, 2018.
- [39] Y. Hao, X. Yonghai, L. Yingying, Z. Yongqiang, and X. Xiangning, “Study of nonlinear model of shunt reactor in 1000kv ac transmission system,” in *2009 International Conference on Energy and Environment Technology*, vol. 2. IEEE, 2009, pp. 305–308.
- [40] W. H. Hayt Jr, J. A. Buck, and M. J. Akhtar, *Engineering Electromagnetics/ (SIE)*. McGraw-Hill Education, 2020.
- [41] W. H. Hayt, J. A. Buck, and C. R. C. Pedraza, *Teoría electromagnética*. McGraw-Hill, 2006.
- [42] R. Escarela-Perez, S. Kulkarni, N. Kodela, and J. C. Olivares-Galvan, “Asymmetry during load-loss measurement of three-phase three-limb transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1566–1574, 2007.
- [43] S. R. Hoole, *Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices*. Prentice Hall PTR, 1989.
- [44] S. J. Arand and K. Abbaszadeh, “The study of magnetic flux shunts effects on the leakage reactance of transformers via fem,” *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 47–52, 2010.
- [45] D. Lin, P. Zhou, W. Fu, Z. Badics, and Z. Cendes, “A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis,” *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 1318–1321, 2004.
- [46] M. A. Bahmani, “Core loss calculation in amorphous high frequency high-power transformers with different topologies,” Master’s thesis, 2011.
-

- [47] N. Ozturk and E. Celik, “Application of genetic algorithms to core loss coefficient extraction,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 19, pp. 133–146, 2011.

A. Características térmicas del aceite de transformador

Temperatura (°C)	Densidad (ρ) kg/m ³	Calor específico (C_p) W s °C/kg	Conductividad térmica (K) W °C/m	Coficiente de expansión térmica cúbica (β) 1/°C	Viscosidad (γ) kg/μs
-15	896.885	1900	0.1262	8.6×10^{-4}	0.0694
-5	890.295	1940	0.1247	8.6×10^{-4}	0.0463
5	883.705	1980	0.1232	8.6×10^{-4}	0.0318
15	877.115	2020	0.1217	8.6×10^{-4}	0.0224
25	870.525	2060	0.1201	8.6×10^{-4}	0.0162
35	863.935	2100	0.1186	8.6×10^{-4}	0.0119
45	857.345	2140	0.1171	8.6×10^{-4}	0.0089
55	850.755	2180	0.1156	8.6×10^{-4}	0.0068
65	844.165	2220	0.1140	8.6×10^{-4}	0.0053
75	837.575	2260	0.1125	8.6×10^{-4}	0.0042
85	830.985	2300	0.1110	8.6×10^{-4}	0.0033
100	821.100	2360	0.1087	8.6×10^{-4}	0.0024

Tabla A.1: Características térmicas del aceite de transformador [3]