

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN TEÓRICA DE
ESFUERZOS DINÁMICOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA.**

ANDRÉS FELIPE ZÚÑIGA CALVACHE

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2017**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN TEÓRICA DE
ESFUERZOS DINÁMICOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA.**

ANDRÉS FELIPE ZÚÑIGA CALVACHE

**Trabajo de grado para optar al título de Maestría en ingeniería énfasis
ingeniería eléctrica**

**DIRECTOR: ING. GUILLERMO APONTE MAYOR Ph.D
CODIRECTOR: ING. GUILLERMO ANDRÉS DÍAZ Ph.D
ASESOR: ING. HÉCTOR CADAVID RAMÍREZ Ph.D**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma director programa académico

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por brindarme salud, conocimiento, fortaleza y la templanza necesaria para culminar este trabajo de investigación.

A mis padres por apoyarme en mis actividades académicas y por inculcarme valores que desde la infancia he aplicado; respeto, responsabilidad, solidaridad, amor, dedicación, son unos cuantos de muchos valores que he aprendido gracias a mi Madre Blanca Nelly Calvache y a mi Padre Ricaurte Antonio Zúñiga.

A mis familiares, tíos, primos y abuelos porque siempre me enseñaron el poder invaluable de la educación y me ayudaron desde que estaba en primaria.

A mis tutores de tesis, profesor Guillermo Aponte, profesor Guillermo Díaz, profesor Héctor Cadavid. Por permitirme trabajar con ellos. Gracias a sus enseñanzas y explicaciones pude culminar mi proyecto de investigación.

A los integrantes del Grupo de investigación en alta tensión; profesores, estudiantes, monitores. Porque siempre estuvieron prestos a colaborarme en cualquier actividad.

A mis compañeros de posgrado, profesores y todas las personas que han contribuido a mi crecimiento académico y personal, muchas gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes desde que era un chiquilín me enseñaron lo valioso que es estudiar, con amor abnegado me formaron como persona y me enseñaron valores que día a día trato de aplicar.

A mis abuelos y familiares, quienes siempre me apoyaron para que estudiara y me formara como profesional. Me enseñaron que debemos reponernos ante cualquier adversidad y siempre pensar en un mejor futuro.

A mis compañeros de estudio y amigos, quienes me han brindado consejos, explicaciones y siempre estuvieron presentes cuando lo necesité.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	3
RESUMEN	8
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
Capítulo 1 GENERALIDADES	10
1.1 EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	10
1.2 FALLAS EN TRANSFORMADORES	11
1.3 PRUEBA DE APTITUD AL CORTOCIRCUITO	11
1.4 FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES	13
1.4.1 FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS DE TRANSFORMADORES	13
1.4.2 CAMPOS MAGNÉTICOS EN TRANSFORMADORES	15
1.5 MODOS DE FALLA EN TRANSFORMADORES CON NÚCLEO TIPO COLUMNAS	17
1.6 FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES CON DEVANADOS RECTANGULARES	20
1.7 CONCLUSIONES	22
Capítulo 2 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO	24
2.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS CONVENCIONALES	24
2.1.1 Métodos aproximados	25
2.1.2 Métodos analíticos	29
2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS	33
2.3 MÉTODOS PARA MODELADO DE DEVANADOS EN CONDUCTORES LAMINADOS	37
2.4 ESTUDIOS DE FUERZAS EN TRANSFORMADORES CON BOBINAS RECTANGULARES	39
2.5 CONCLUSIONES	41
Capítulo 3 PROCEDIMIENTO TEÓRICO DE LA NORMA IEC 60076-5 DE 2006	43
3.1 NORMATIVIDAD PARA VERIFICACIÓN DE LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES	43
3.2 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LOS ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES	44
3.3 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO	49

3.4	CONCLUSIONES	56
Capítulo 4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA APLICACIÓN DE LA VALIDACIÓN TEÓRICA		57
4.1	CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	57
4.2	CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO	57
4.3	CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO	58
4.4	CONCLUSIONES	64
Capítulo 5 APLICACIÓN METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN TEÓRICA		65
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR CASO DE APLICACIÓN	65
5.2	CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	67
5.3	CÁLCULO DE LAS FUERZAS DE CORTOCIRCUITO	67
5.3.1	Cálculo de fuerzas con SOFTWARE FEMM 4.2	67
5.4	CÁLCULO DE FUERZAS POR FORMULAS	74
5.5	CÁLCULO DE FUERZAS CON EL MÉTODO DE ROTH	75
5.6	CÁLCULO DE FUERZAS CON MEF SIMPLIFICADO	75
5.7	CÁLCULO DE ESFUERZOS MECÁNICOS	76
5.8	CONCLUSIONES	79
Capítulo 6 VALIDACIÓN DEL CASO DE APLICACIÓN		81
6.1	REVISIÓN DE ESFUERZOS MECÁNICOS EN CASO DE APLICACIÓN	81
6.2	REVISIÓN DE LAS CONDICIONES PARA UTILIZAR EL TRANSFORMADOR DEL CASO DE APLICACIÓN COMO EQUIPO DE REFERENCIA	82
6.3	CONCLUSIONES	84
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		86
7.1	CONCLUSIONES	86
7.2	TRABAJOS FUTUROS	88
BIBLIOGRAFÍA		89
Anexo A FORMULACIONES CÁLCULO DE ESFUERZOS		I
Anexo B RESULTADOS MODELO EN FEMM TRANSFORMADOR BAJO ANÁLISIS		IX

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Fuerzas máximas en transformador monofásico de 25kVA.	40
Tabla 2.2. Fuerzas axiales en transformador trifásico de 75kVA.	41
Tabla 2.3. Fuerzas de cortocircuito para transformador de 50KVA núcleo tipo acorazado monofásico con devanado interno de baja tensión desplazado 5mm.	41
Tabla 3.1 Fuerzas a calcular de acuerdo al diseño del equipo.	47
Tabla 3.2 Esfuerzos mecánicos de acuerdo a la construcción del transformador.	48
Tabla 4.1 Esfuerzos aplicables según el tipo de transformador.	63
Tabla 5.1 Información técnica transformador caso de aplicación.	65
Tabla 5.2 Cálculo de las corrientes de cortocircuito.	67
Tabla 5.3 Resultados de fuerzas para el caso de aplicación MEF detallado.	74
Tabla 5.4 Resultados de las fuerzas con las dimensiones de la ventana principal.	75
Tabla 5.5 Resultados de las fuerzas con las dimensiones fuera de la ventana.	75
Tabla 5.6 Resultados de fuerzas utilizando el método de Roth.	75
Tabla 5.7 Resultados de fuerzas utilizando el MEF simplificado.	76
Tabla 5.8 Comparación resultados de fuerzas según el método.	76
Tabla 5.9 Esfuerzo circunferencial promedio en los devanados.	77
Tabla 5.10 Esfuerzo circunferencial en la capa 1 AT y espira 11 de BT.	77
Tabla 5.11 Esfuerzos producidos por fuerzas radiales.	78
Tabla 5.12. Esfuerzos de compresión axial en la espira 1 BT y la capa 10 AT.	78
Tabla 6.1 Verificación de esfuerzos máximos caso de aplicación 400kVA.	82
Tabla 6.2 Pruebas de rutina antes y después para el transformador de 400kVA.	83
Tabla 6.3 Características constructivas de equipos similares.	83
Tabla 6.4 Valores máximos de esfuerzos en equipos similares.	83
Tabla 6.5 Valores máximos para la impedancia de cortocircuito en transformadores trifásicos con potencias entre 75kVA y 10000kVA.	84
Tabla A.1 Valores constante K3 utilizada para el cálculo de la fuerza crítica de inclinación	VIII
Tabla A.2 Valores constante K4 para el cálculo de la fuerza crítica de inclinación.	VIII
Tabla B.1 Resultados de fuerzas en la ventana del núcleo.	XI
Tabla B.2 Resultados de fuerzas en la región fuera de la ventana del núcleo.	XII
Tabla B.3 Variables calculo analítico de fuerzas en transformador de 400kVA.	XV

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación del transformador en el proceso de transformación y uso de la energía eléctrica.	10
Figura 1.2. Causas de fallas en transformadores con potencias superiores a 25MVA.	11
Figura 1.3 Campos de pruebas para ensayos de cortocircuito en transformadores.	12
Figura 1.4 Variación de la corriente de cortocircuito y la fuerza en el tiempo.	15
Figura 1.5 Distribución del campo magnético y fuerzas en transformadores tipo núcleo y acorazado.	15
Figura 1.6 Variación de las fuerzas axiales de cortocircuito.	16
Figura 1.7 Principales modos de falla durante la condición de cortocircuito.	18
Figura 1.8 Pandeo del devanado interno debido a esfuerzos radiales de compresión.	19
Figura 1.9 Deformación en espiral producida por fuerzas radiales.	19
Figura 1.10 Desplazamiento telescópico de los devanados.	20
Figura 1.11 Construcción transformadores con núcleos enrollados.	21
Figura 1.12 Transformador trifásico con núcleo enrollado y devanados rectangulares.	21
Figura 1.13 Efecto de las fuerzas radiales de cortocircuito en devanados rectangulares.	22
Figura 2.1 Clasificación de los métodos para modelado electromagnético y cálculo de fuerzas de cortocircuito.	25
Figura 2.2 Consideraciones para el cálculo de fuerzas axiales y fuerzas de empuje.	26
Figura 2.3 Arreglos de devanados y diagrama de ampere-vuelta residual.	28
Figura 2.4 Representación de la ventana del núcleo y los devanados.	29
Figura 2.5 Diagrama de modelamiento a través de método de elementos finitos.	33
Figura 2.6 Post-procesado simulación magneto-estática con programa de elementos finitos.	34
Figura 2.7 Elemento rectangular de 2 dimensiones de una red de reluctancia.	35
Figura 2.8 Circuito de reluctancias equivalente para la red de la Figura 2.7	37
Figura 2.9 Distribución de las fuerzas radiales y partes de los devanados rectangulares.	39
Figura 3.1 Evolución de la normatividad relacionada con la aptitud al cortocircuito en transformadores.	44
Figura 3.2 Diagrama de flujo procedimiento de validación teórica norma IEC 60076-5 de 2006.	45
Figura 3.3 Requerimientos de similitud entre transformadores.	46
Figura 4.1 Devanados de alta y baja tensión para transformadores con núcleo enrollado (transformador tipo 1).	59
Figura 4.2 Fuerzas axiales en transformador con núcleo enrollado (transformador tipo 1).	60
Figura 4.3 Esfuerzos en transformador seco con bobinas circulares (transformador tipo 2)	60

Figura 4.4 Parámetros considerados en el análisis de esfuerzos en equipos con bobinas rectangulares.	61
Figura 4.5 Metodología para realizar la validación teórica de la aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia.	62
Figura 5.1. Vista frontal transformador caso de aplicación.....	66
Figura 5.2. Vista lateral transformador caso de aplicación.	66
Figura 5.3. Densidad de flujo magnético para condición de cortocircuito.	68
Figura 5.4 Densidad de corriente en la espira 1 y 11 del devanado en flejes.....	69
Figura 5.5. Fuerzas radiales y axiales distribuidas en los flejes del devanado de baja tensión en la región de la ventana del núcleo.	71
Figura 5.6. Fuerzas radiales y axiales distribuidas para las capas del devanado de alta tensión en la región de la ventana del núcleo.	72
Figura 5.7 Fuerzas radiales y axiales distribuidas capas 7 y 8 devanado de alta tensión en la región de la ventana del núcleo.	73
Figura B.1. Geometría y condiciones de frontera modelo FEMM.....	IX
Figura B.2 propiedades bloques de los devanados en FEMM.	IX
Figura B.3 Materiales devanados y núcleo modelo FEMM.	X
Figura B.4 Circuitos del modelo y parámetros para simulación en FEMM.....	X
Figura B.5 Fuerzas radiales y axiales distribuidas para los flejes del devanado de baja tensión en la región fuera de la ventana del núcleo.	XIII
Figura B.6 Fuerzas radiales y axiales distribuida para las capas del devanado de alta tensión en la región fuera de la ventana del núcleo.	XIV
Figura B.7. Comparación de resultados para diferentes posiciones del cambiador de tomas.	XVI
Figura B.8. Comparación de resultados para devanados con centros magnéticos desplazados. ...	XVI

LISTA DE ABREVIATURAS

$B_{\max}$	Densidad máxima de flujo magnético en canal de dispersión
I_r	Valor RMS corriente nominal del devanado
N	Número de espiras del devanado
H_w	Altura del devanado
F_{rad}^*	Fuerza radial de cortocircuito en devanados concéntricos circulares
D_m	Diámetro medio del devanado
r	Factor de sobre corriente
k	Factor de asimetría
F_{ax}^*	Fuerza axial acumulativa de compresión por pierna para devanados concéntricos circulares
K	Factor de Rogowski
H_{w1}	Altura media de los devanados
a_1	Espesor radial devanado 1
a_2	Espesor radial devanado 2
d	Espesor del ducto principal
S_1	Potencia nominal por pierna en kVA
f	Frecuencia nominal
v	Desplazamiento entre devanados
F_s^*	Fuerza de empuje final devanados
Λ	Permeancia por unidad de longitud de pierna
$i_{\max}$	Corriente pico de cortocircuito
a	Diferencia fraccional en la altura de los devanados

A	Potencial magnético vectorial
μ	Permeabilidad magnética
J	Densidad de corriente
σ_t^*	Esfuerzo circunferencial promedio de tensión o compresión
J_r	Densidad de corriente nominal del devanado
$ \sigma_{ti}^* $	Esfuerzo circunferencial medio en la capa i
σ_{br}^*	Esfuerzo de flexión radial entre separadores axiales para devanados internos
σ_{cwi}^*	Esfuerzo de compresión axial en conductores de devanados
σ_{ba}	Esfuerzo de flexión axial de conductores entre espaciadores radiales devanados tipo disco y helicoidales
σ_{tiwi}	Esfuerzo en el aislante de devanados en capas
σ_{spwi}	Esfuerzos en espaciadores radiales en devanados tipo disco y helicoidales
σ_{cr}	Esfuerzo de compresión medio critico de pandeo para devanados circulares
σ_{lc}^*	Esfuerzo de flexión en cruces y transposiciones de conductores en devanados helicoidales
σ_b	Esfuerzos de tensión en correas de sujeción de espiras finales
σ_{cesi}^*	Esfuerzos en los elementos de soporte entre las bobinas y yugos
σ_{espi}^*	Esfuerzos en esparcidores de devanados y anillos electrostáticos
F_{axcr}^*	Fuerza axial critica para inclinación de conductores en cobre
$\vec{df_{ac}}$	Campo vectorial complejo densidad de fuerzas de cortocircuito
$\vec{df_{dc}}$	Campo vectorial componente estacionaria densidad de fuerzas de cortocircuito
$\vec{J}$	Campo vectorial densidad de corriente
$\vec{B}$	Campo vectorial densidad de flujo magnético
$df_{r(t)}$	Densidad de fuerza de cortocircuito radial
$df_{z(t)}$	Densidad de fuerza de cortocircuito axial

RESUMEN

La prueba de aptitud al cortocircuito permite verificar la capacidad del transformador para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos generados durante una falla externa. El ensayo es considerado como el método directo para evaluar esta condición, sin embargo, debido a los altos costos y la ausencia de laboratorios con la capacidad suficiente para su realización, desde el año 2006 la comisión electrotécnica internacional (CEI) definió un procedimiento alternativo de validación basado en el cálculo teórico de las fuerzas y esfuerzos originadas por un cortocircuito. En el procedimiento, los valores calculados son comparados con los obtenidos en un transformador de referencia sometido al ensayo o con los valores definidos por la norma. En este trabajo se realiza una revisión del procedimiento de validación teórica y se propone una metodología, se desarrolla un caso de análisis para un transformador trifásico de 400kVA. Las fuerzas fueron calculadas a través del método de elementos finitos y los esfuerzos se estimaron a partir de fórmulas aproximadas. Los resultados del cálculo permiten concluir, para este caso, que el equipo es teóricamente apto para soportar los esfuerzos de cortocircuito, lo cual fue corroborando con lo obtenido durante las pruebas.

Palabras Claves: Transformador, Fuerzas de cortocircuito, Esfuerzos mecánicos, Método de elementos finitos.

ABSTRACT

The short-circuit withstand test verifies that transformers support the thermal and mechanical stresses generated during an external failure. The test is considered as the direct way to evaluate this condition, however, due to high costs and lack of laboratories with enough capacity, since 2006, international electrotechnical commission (IEC) defined an alternative procedure based on theoretical calculations of forces and stresses. In this procedure, the calculated values are compared with those obtained in a reference transformer subjected to test or with standard recommended values. In this document, the theoretical validation procedure is reviewed and a methodology is proposed, an analysis case was developed for a 400kVA three phase transformer. The forces were calculated through finite elements method and stresses were estimated from approximate formulas. The calculated results allow to conclude, in this case, that the transformer is suitable to support the forces and mechanical stresses during a short-circuit, which was confirmed by the tests.

Keywords: Power Transformer, Short-circuit Forces, Mechanical stresses, Finite elements method.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de aptitud al cortocircuito permite verificar la capacidad de un transformador para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos por sobre-corrientes. El ensayo se realiza conectando el transformador a una red de gran capacidad que pueda suministrar la potencia requerida por la prueba, a modo de ejemplo, un transformador de 100 KVA con una impedancia de cortocircuito de 4,0% demanda una potencia de 2500 KVA durante el ensayo, los requerimientos normativos obligan a que el ensayo se efectúe en instalaciones especializadas para pruebas de alta potencia disponibles en Norteamérica y Europa principalmente.

En Colombia el ensayo de aptitud al cortocircuito empezó a ser obligatorio para transformadores de distribución en el año de 1994, esto motivó que en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle se implementara un campo de pruebas de cortocircuito, en estas instalaciones se pueden realizar ensayos en transformadores trifásicos de hasta 500 kVA. A lo largo de los 20 años de operación, el campo de pruebas de cortocircuito ha contribuido con el desarrollo y mejoramiento en la calidad de los transformadores de distribución fabricados en Colombia, sin embargo, este laboratorio no cubre todas las necesidades de ensayo de los fabricantes nacionales e internacionales de transformadores.

Ante las dificultades que representa la realización del ensayo, la Comisión electrotécnica internacional propuso un procedimiento de validación teórica de la aptitud al cortocircuito en transformadores, este se basa en el cálculo analítico de fuerzas y esfuerzos mecánicos.

En este trabajo se revisan los métodos para el cálculo de fuerzas de cortocircuito aplicables a las diferentes formas constructivas de los transformadores, se estudian las formulaciones teóricas para el cálculo de esfuerzos mecánicos y se desarrolla una propuesta metodológica considerando los diseños utilizados por los fabricantes nacionales, en la parte final se presenta un caso de aplicación de la metodología utilizando la información de un equipo de 400kVA de núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares.

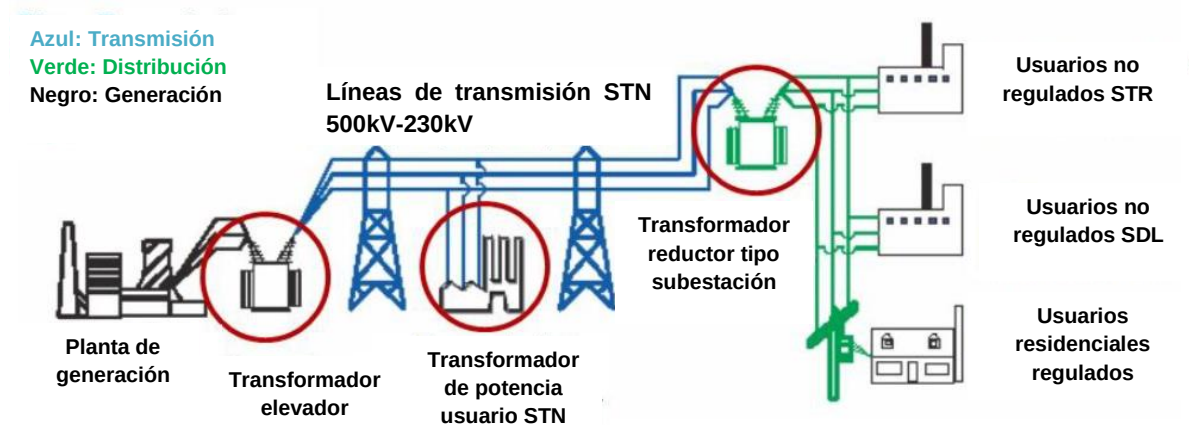
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

En este capítulo se exponen generalidades relacionadas con la importancia de los transformadores en los sistemas eléctricos, causas de fallas en estos equipos y los requerimientos de aptitud al cortocircuito. En la segunda parte del capítulo se explica el fenómeno de las fuerzas de cortocircuito, los modos de falla y los efectos de los esfuerzos electrodinámicos, finalmente se estudian las fuerzas en transformadores con devanados rectangulares y conductores laminados.

1.1 EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO

El transformador es un equipo estático con dos o más devanados el cual a través de inducción electromagnética transforma un sistema de voltajes y corrientes alternas en otro sistema de voltajes y corrientes a la misma frecuencia con el propósito de transmitir energía eléctrica [1]. En la Figura 1.1 se presenta la ubicación del transformador en el proceso de transformación y uso de la energía.

Figura 1.1 Ubicación del transformador en el proceso de transformación y uso de la energía eléctrica.



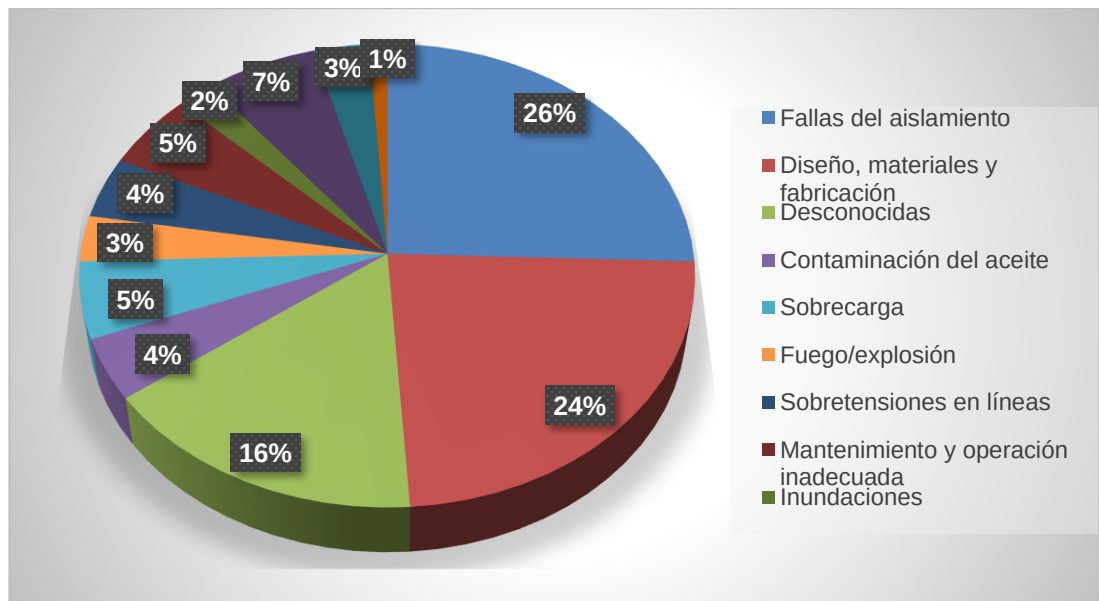
Tomada de [2] y modificada.

Considerando su función estratégica, existe interés por parte de fabricantes, empresas electrificadoras y usuarios para mejorar la calidad de los transformadores a través de ensayos y revisiones de diseño que permitan confirmar su capacidad para soportar condiciones de falla que pueden ocurrir durante operación.

1.2 FALLAS EN TRANSFORMADORES

Según un estudio de análisis de fallas en transformadores realizado por la compañía *Hartford Steam Boiler and Insurance Company*, de un total de 94 fallas en transformadores con potencias superiores a 25MVA reportadas entre los años de 1997 y 2001 alrededor del mundo, la segunda causa de averías estuvo asociada a problemas de diseño, materiales y fabricación originadas por pérdida de sujeción de los devanados e inadecuada capacidad de cortocircuito; en la Figura 1.2 se presentan los resultados del estudio [3].

Figura 1.2. Causas de fallas en transformadores con potencias superiores a 25MVA.



Tomado de [3] y modificado.

La aptitud al cortocircuito tiene un efecto considerable sobre la tasa de fallas en transformadores [3], por ello se requiere verificar esta condición a través de pruebas, simulaciones, cálculos en la etapa de diseño, revisión de procesos de fabricación y materiales utilizados en la construcción de estos equipos.

1.3 PRUEBA DE APTITUD AL CORTOCIRCUITO

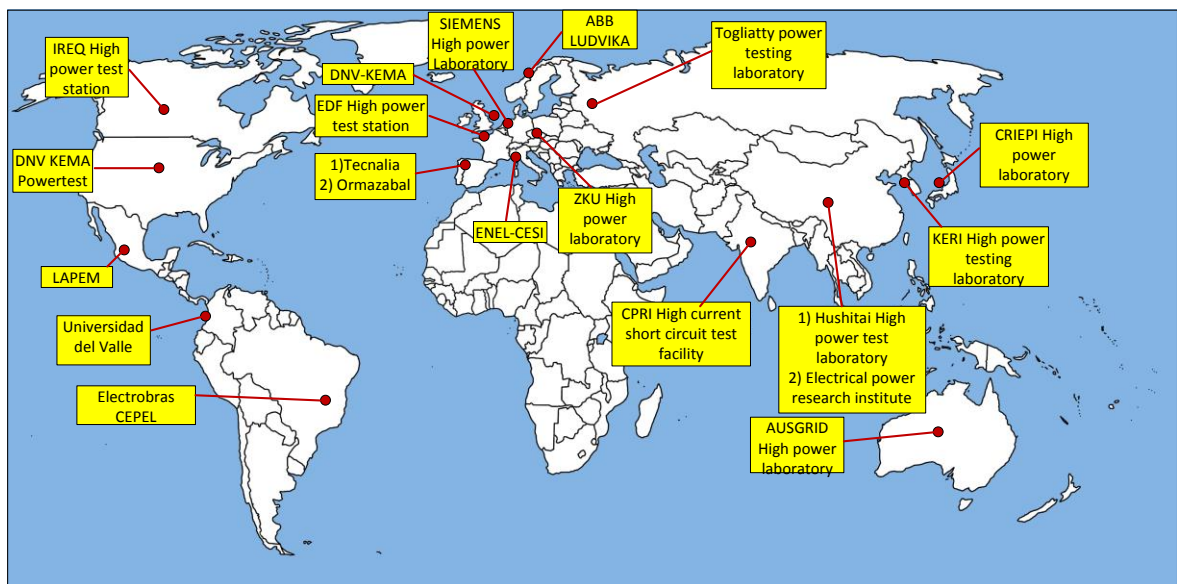
La prueba de aptitud al cortocircuito permite demostrar la habilidad del transformador para soportar los esfuerzos mecánicos inherentes a una condición de sobre-corriente. El ensayo está reglamentado por las normas IEEE C57.12.90-2016

[4], IEC 60076-5 de 2006 [5], en Colombia el método de prueba está definido en la norma NTC 532 de 1999 [6].

El ensayo consiste en someter el transformador a una serie de cortocircuitos trifásicos o monofásicos, la fuente de alimentación debe tener la capacidad para suplir la corriente de cortocircuito del equipo a tensión nominal, el número y la duración de las pruebas depende de la potencia del equipo y el procedimiento utilizado. Antes y después de la prueba, al transformador se le realizan ensayos de rutina y dieléctricos para verificar que mantiene sus características constructivas y ha pasado satisfactoriamente el ensayo.

Las principales instalaciones para pruebas de aptitud al cortocircuito en transformadores se encuentran en Norteamérica, Europa y Asia (ver Figura 1.3).

Figura 1.3 Campos de pruebas para ensayos de cortocircuito en transformadores.



La prueba es considerada el método directo para verificar la capacidad mecánica del transformador ante condiciones de cortocircuito, sin embargo, la puesta en marcha de instalaciones para este tipo de ensayos requiere de una gran inversión razón por la cual existen pocos laboratorios donde se puede realizar este ensayo en transformadores de gran capacidad¹.

¹ Un laboratorio tipo red con capacidad para probar equipos de hasta 15MVA tiene un costo aproximado de 13MUSD.

Colombia cuenta con el campo de pruebas de cortocircuito del laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle, en estas instalaciones se realizan ensayos en equipos de 13,2kV con potencias de hasta 500kVA. Este laboratorio ha contribuido con el mejoramiento en la calidad de los transformadores de distribución, sin embargo, no cuenta con la capacidad suficiente para probar toda la gama de equipos fabricados en nuestro país, esta falencia representa una barrera tecnológica para las empresas nacionales, quienes incurren en costos elevados y tiempos prolongados para certificar sus productos [7].

Considerando las dificultades para la realización de la prueba, la actualización de la norma IEC 60076-5 del año 2006 incluyó la alternativa de validación a través de cálculos y revisión de diseño, este procedimiento consiste en calcular fuerzas y esfuerzos máximos según la forma constructiva del equipo, estos valores son comparados con los límites de diseño del fabricante o los presentes en una unidad de referencia exitosamente sometida a la prueba [5].

1.4 FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES

Los cortocircuitos son disturbios que ocurren en los sistemas de potencia, estos eventos generan altas magnitudes de corriente e interrumpen el flujo normal de potencia. La severidad del cortocircuito depende de las características del sistema, el nivel de cortocircuito en el punto de conexión del transformador, la relación de impedancia de secuencia positiva y secuencia cero de la red y el voltaje de pre-falla [8].

En un transformador cuyo devanado primario es alimentado al voltaje nominal y cuya salida es cortocircuitada, la magnitud de la corriente fluyendo a través de las bobinas es determinada principalmente por la impedancia de cortocircuito. La corriente de cortocircuito es 8-10 veces la corriente nominal en transformadores de potencia y 20 a 25 veces en transformadores de pequeña capacidad. El aumento súbito de la corriente durante un cortocircuito genera afectaciones mecánicas sobre los devanados y produce aumento de la temperatura al interior del transformador [9].

1.4.1 FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS DE TRANSFORMADORES

De acuerdo a la ley de Lorentz cada elemento diferencial rectilíneo de conductor con longitud dl , transportando una corriente I , en un campo magnético de densidad de flujo B , perpendicular a la longitud dl , se somete a una fuerza df como se indica

en la ecuación (1.1). El diferencial de fuerza es perpendicular al plano formado por el vector de densidad de flujo magnético y el diferencial de longitud del conductor [10].

$$df = I \, dl \times B \quad (1.1)$$

Si el análisis de fuerzas es hecho en dos dimensiones, con la densidad de corriente en el eje Z, la densidad de flujo magnético en cualquier punto puede ser resuelta en dos componentes, uno en la dirección radial (B_x) y otro en la dirección axial (B_y), las fuerzas radiales en la dirección X (F_x) se producen por la densidad de flujo magnético axial (B_y), las fuerzas axiales en la dirección Y (F_y) son producidas por la densidad de flujo magnético radial (B_x) [11].

La ecuación (1.2) define la corriente en un circuito conformado por una resistencia (R) y una inductancia (L), las cuales simulan el comportamiento de un transformador bajo condición de cortocircuito en un sistema eléctrico [8].

$$I(t) = \frac{|U|}{|Z|} * \left[\sin(w * t + \alpha - \varphi) - e^{\frac{-t * R}{L}} * \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (1.2)$$

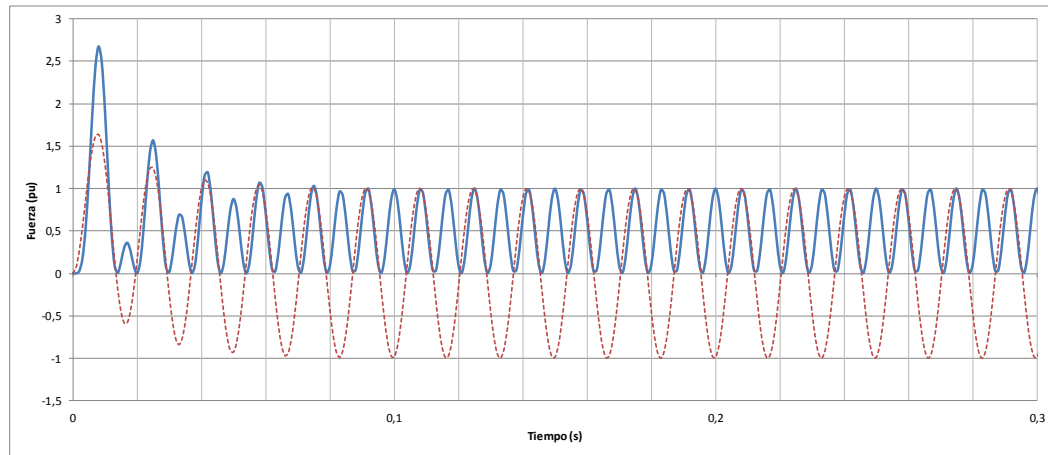
$|U|$ = magnitud del voltaje α = ángulo del voltaje durante la falla

$|Z|$ = magnitud de la impedancia φ = ángulo de la impedancia equivalente

Si se expresa el vector de densidad de flujo magnético B en función de la corriente del devanado, las fuerzas experimentadas por una bobina durante el cortocircuito son proporcionales al cuadrado de la corriente [11]. En la ecuación (1.3) se presenta una expresión para la fuerza, siendo F_{max} el valor máximo de la misma [8].

$$F(t) = F_{Max} * \left[\frac{1}{2} + e^{\frac{-2 * t * R}{L}} - 2 * e^{\frac{-t * R}{L}} * \cos(w * t) + \frac{1}{2} \cos(2 * w * t) \right] \quad (1.3)$$

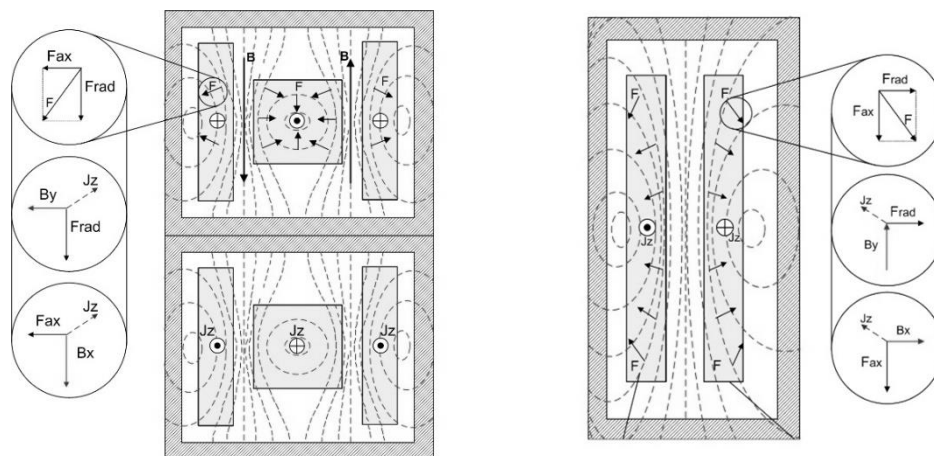
En la Figura 1.4 se representa la forma de onda de la corriente de cortocircuito (curva roja) y la fuerza (curva azul) para un transformador con relación reactancia resistencia $X/R=6,83$.

Figura 1.4 Variación de la corriente de cortocircuito y la fuerza en el tiempo.

La onda de fuerza es unidireccional y presenta un valor máximo que coincide con el pico asimétrico de la corriente de cortocircuito, en la medida en que la corriente se estabiliza la componente de la fuerza que varía con el doble de la frecuencia se hace más notoria.

1.4.2 CAMPOS MAGNÉTICOS EN TRANSFORMADORES

En la Figura 1.5 se presenta la distribución de la densidad de flujo magnético y fuerzas en transformadores con núcleo tipo columnas y acorazados.

Figura 1.5 Distribución del campo magnético y fuerzas en transformadores tipo núcleo y acorazado.

(a) Transformador tipo acorazado

(b) Transformador tipo núcleo

Tomado de [8] y modificada.

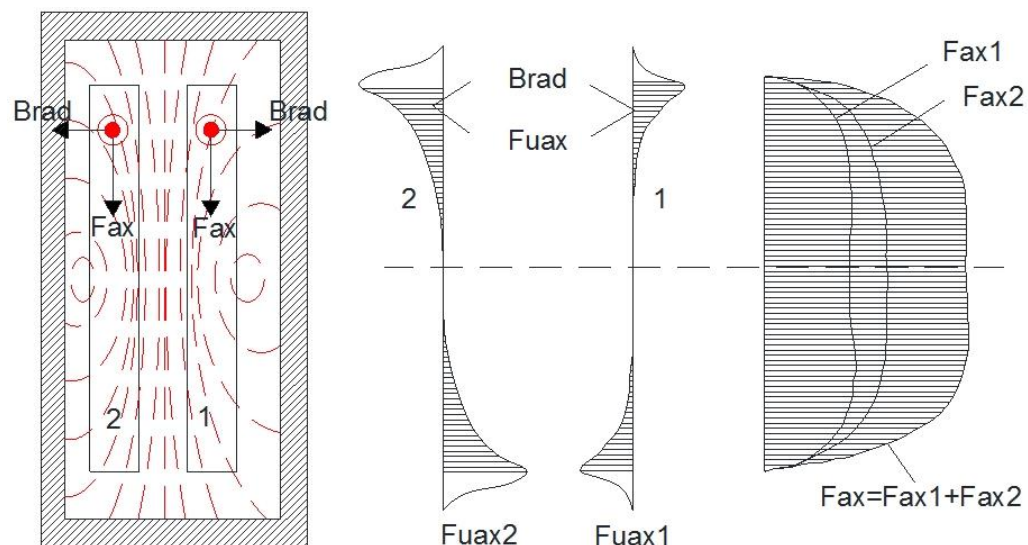
Las líneas de campo magnético en transformadores con núcleo tipo columnas tienen un mayor componente axial, la componente radial solo se manifiesta en los finales de bobinas (ver Figura 1.5), por esta razón las fuerzas radiales de cortocircuito en estos transformadores son mayores comparadas con las fuerzas axiales. En transformadores acorazados el flujo magnético de dispersión es principalmente radial (paralelo a la superficie de las bobinas panqueque), por lo tanto, las fuerzas son mayores en la dirección axial (ver Figura 1.5).

1.4.2.1 Fuerzas de cortocircuito en transformadores tipo núcleo

Las fuerzas radiales en transformadores tipo núcleo tienden a comprimir el devanado interior hacia el centro del núcleo y expandir el devanado exterior, esto genera esfuerzos de tensión en los conductores del devanado externo y de compresión en los conductores del devanado interno. Los esfuerzos de tensión representan una de las mayores limitaciones de la capacidad de cortocircuito de los transformadores [12].

Las fuerzas axiales aparecen como consecuencia del establecimiento de líneas de campo magnético en la dirección radial, esta variación toma lugar en los finales de los devanados (ver Figura 1.6).

Figura 1.6 Variación de las fuerzas axiales de cortocircuito.



Las fuerzas axiales por unidad de longitud alcanzan valores máximos en los extremos de las bobinas mientras que en el centro son nulas, por otra parte, la

sumatoria de las fuerzas axiales en cada espira (fuerza axial acumulativa) tienen una naturaleza compresiva siendo mayores en el devanado más cercano al núcleo.

Cuando los centros magnéticos de los devanados no están alineados, como ocurre en la mayoría de los casos, las fuerzas axiales tienden a aumentar el desbalance entre los centros magnéticos, pequeños desalineamientos de los devanados generan fuerzas axiales de gran amplitud [14], [14].

Las fuerzas electromagnéticas tienen un carácter oscilatorio y actúan sobre un sistema mecánico compuesto por los conductores, el aislamiento y las estructuras de sujeción. Las fuerzas dinámicas transmitidas pueden ser muy diferentes de las fuerzas de origen magnético dependiendo de la relación entre la frecuencia natural del sistema mecánico y las frecuencias de las fuerzas de excitación del sistema.

En la dirección radial, las frecuencias naturales del sistema mecánico son mayores a 100Hz y 120Hz, por lo tanto, es menos probable que se presente el fenómeno de resonancia mecánica.

En la dirección axial la cantidad de aislamiento y separadores es significativa, principalmente en equipos de mediana y gran potencia, esto conlleva a que las frecuencias naturales de oscilación estén cerca de las frecuencias de oscilación de las fuerzas de cortocircuito, incrementándose la probabilidad de aparición del fenómeno de resonancia mecánica, el cual puede conducir a daños permanentes en los devanados y estructuras de soporte del transformador [15].

1.4.2.2 Fuerzas de cortocircuito en transformadores acorazados

En transformadores acorazados las fuerzas radiales tienden a comprimir las bobinas hacia sus centros magnéticos. Las fuerzas de compresión son más fáciles de manejar que las fuerzas de tracción, lo cual le da una ventaja a los transformadores acorazados frente a los tipo núcleo [12]. Las fuerzas axiales en los transformadores acorazados son mitigadas utilizando material de relleno entre las bobinas, los devanados y las bobinas de baja tensión y el tanque [16].

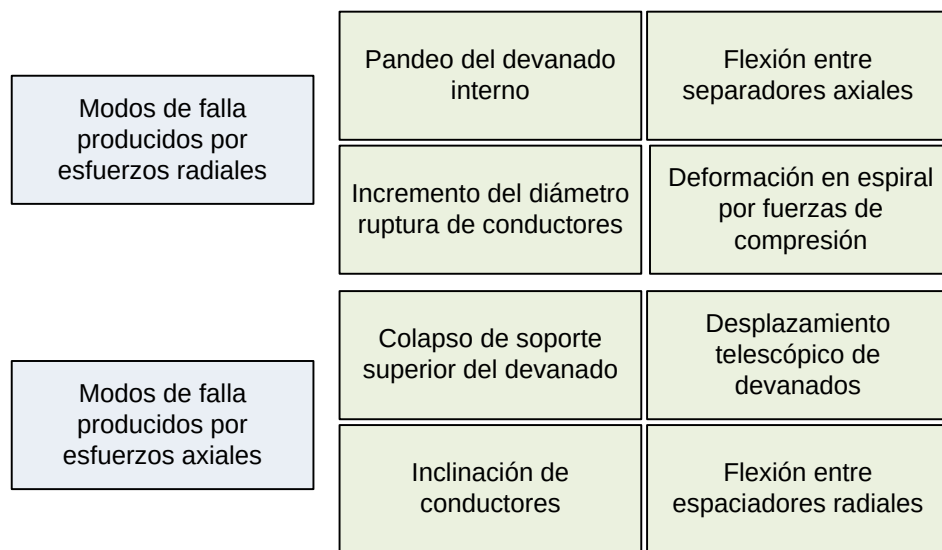
1.5 MODOS DE FALLA EN TRANSFORMADORES CON NÚCLEO TIPO COLUMNAS

Los modos de falla que se producen en transformadores con núcleo tipo columnas son diferentes a los generados en transformadores acorazados, además, dependiendo de la forma constructiva de las bobinas los conductores tendrán

diferentes capacidades para resistir las fuerzas de cortocircuito. Las propiedades mecánicas del conductor y la rigidez del sistema aislante y de sujeción juegan un papel determinante en la respuesta de los devanados ante condiciones de cortocircuito [17].

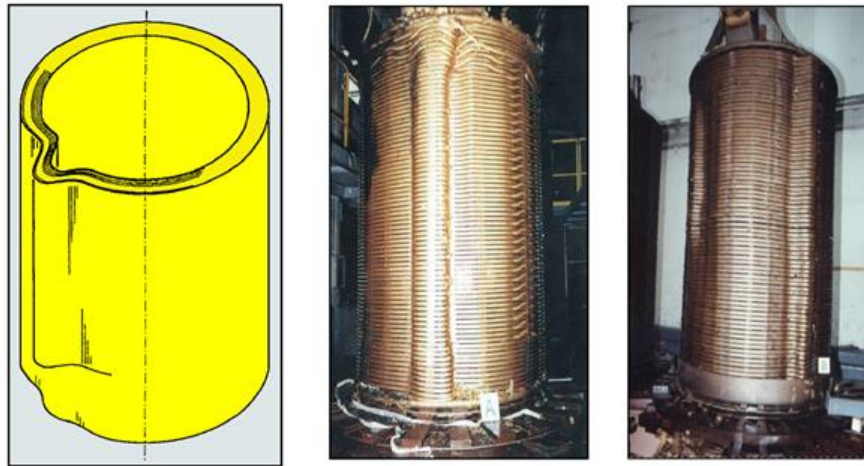
Dependiendo de la naturaleza de los esfuerzos ejercidos y de las características constructivas, bajo la condición de cortocircuito se producen diferentes modos de falla, en la Figura 1.7 se muestra la clasificación de estos [18], [19]

Figura 1.7 Principales modos de falla durante la condición de cortocircuito.



En transformadores con núcleo tipo columnas las fuerzas radiales de compresión en los devanados internos pueden ocasionar flexión de los conductores entre los soportes axiales y pandeo (ver Figura 1.8), las fuerzas radiales en los devanados externos pueden producir ruptura de los conductores.

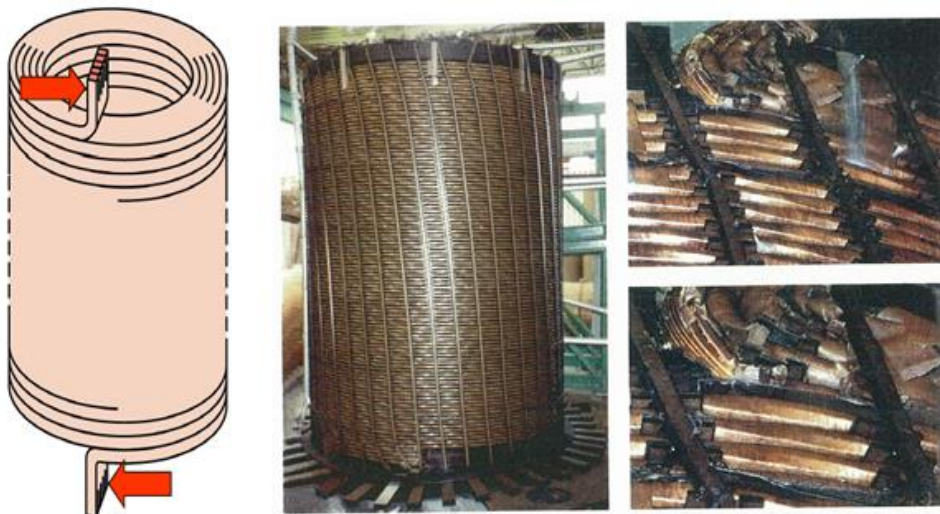
Figura 1.8 Pandeo del devanado interno debido a esfuerzos radiales de compresión.



Tomado de [19] y modificado.

En devanados helicoidales las fuerzas radiales generan un modo de falla conocido como deformación en espiral (Figura 1.9), cuando este fenómeno ocurre sobre los extremos del devanado aparecen fuerzas que tienden a comprimirlo en un diámetro menor produciendo esfuerzos tangenciales considerables en las espiras.

Figura 1.9 Deformación en espiral producida por fuerzas radiales.

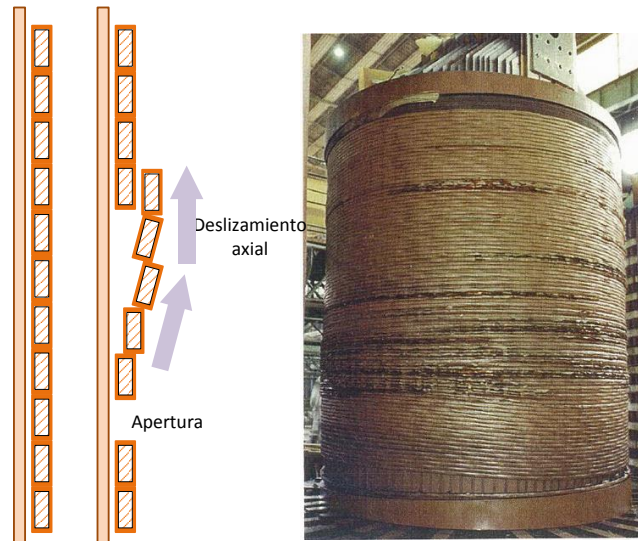


Tomado de [8], [19] y modificado.

Las fuerzas axiales pueden producir inclinación de conductores por el movimiento de la sección transversal del conductor sobre su eje de simetría, de igual forma, en

devanados tipo capas estas fuerzas pueden desplazar telescópicamente las espiras (ver Figura 1.10).

Figura 1.10 Desplazamiento telescópico de los devanados.



Tomado de [8] y modificado.

1.6 FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES CON DEVANADOS RECTANGULARES

Las empresas nacionales han adoptado la construcción de transformadores con núcleos enrollados y bobinas rectangulares para equipos de distribución y media potencia, esta forma constructiva permite reducir el tiempo de fabricación y el tamaño del equipo, disminuyendo costos. Las bobinas de alta tensión se construyen en conductor redondo o rectangular con recubrimiento aislante, las bobinas de baja tensión se construyen en flejes, el aislamiento entre capas se elabora a partir de papel diamantado (ver Figura 1.11 y Figura 1.12).

Debido a la geometría de las bobinas, los esfuerzos de cortocircuito no están uniformemente distribuidos, bajo una condición de cortocircuito las bobinas tienden a deformarse sobre la parte central de la parte recta (más cercana al núcleo), como se muestra en la Figura 1.13 [20].

Figura 1.11 Construcción transformadores con núcleos enrollados.



(a) Transformador con núcleo enrollado



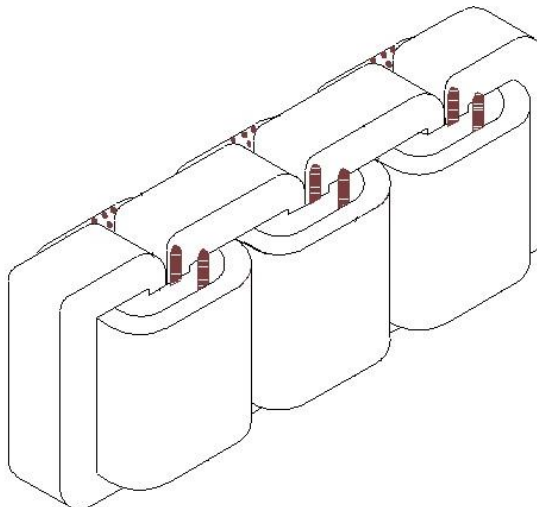
(b) Conductores de baja tensión



(c) Conductores de alta tensión

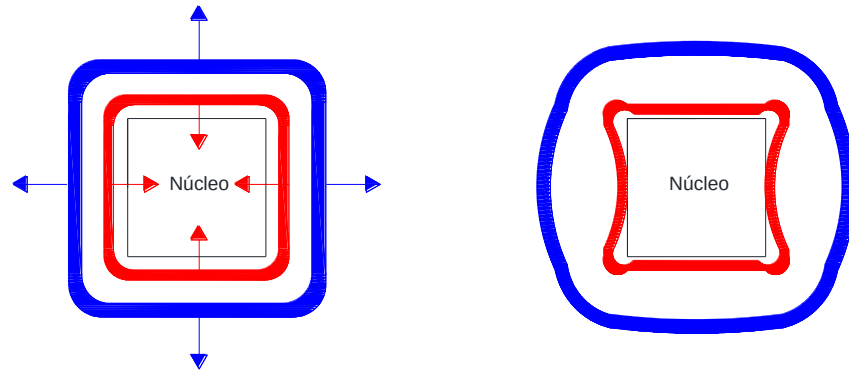
Tomado de [21], [22] y modificado.

Figura 1.12 Transformador trifásico con núcleo enrollado y devanados rectangulares.



Tomado de [23] y modificado.

Figura 1.13 Efecto de las fuerzas radiales de cortocircuito en devanados rectangulares.



Tomado de [20] y modificado.

En transformadores de distribución y media potencia el devanado de baja tensión habitualmente se construye a partir de láminas de cobre o aluminio de espesor delgado, una de las ventajas de esta forma constructiva radica en que las fuerzas axiales se vuelven insignificantes ya que las corrientes parasitas inducidas debilitan la componente radial del flujo magnético de dispersión en la parte superior e inferior del devanado, en estas bobinas las fuerzas radiales tienen un mayor impacto que las axiales [24].

1.7 CONCLUSIONES

En la dirección axial se puede generar una condición de resonancia mecánica la cual produce colapso de los devanados y el sistema de soporte, el estudio de este fenómeno requiere un enfoque dinámico en el cual se caracterice el comportamiento mecánico de conductores, espaciadores, separadores, aislamiento y elementos de sujeción de las bobinas.

Las fuerzas axiales son sensibles al desplazamiento del centro magnético de los devanados, en la medida en que el desequilibrio sea mayor su efecto será más pronunciado, este es un aspecto a tener en cuenta para el cálculo de estas fuerzas.

En transformadores con devanados concéntricos, las fuerzas radiales alcanzan su valor máximo en la parte media de las bobinas, mientras que las axiales se hacen significativas sobre los finales de las bobinas siendo mínimas en el 60% de la altura del devanado.

El cálculo de las fuerzas de cortocircuito requiere determinar la densidad de flujo magnético en la dirección axial y radial en la ventana del núcleo producido por la

corriente máxima de cortocircuito, el estudio de los métodos de cálculo de la densidad de flujo magnético y las fuerzas es objeto de análisis en el capítulo II de este documento.

CAPÍTULO 2 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO

Este trabajo de investigación pretende definir una metodología que permita aplicar el procedimiento de validación teórica establecido por la norma IEC 60076-5 de 2006, el alcance se circunscribe a transformadores de distribución y media potencia con capacidad nominal de hasta 20MVA y tensiones de hasta 44kV, estos equipos se fabrican comúnmente de dos formas: Construcción en núcleo apilado tipo columnas con devanados concéntricos circulares y construcción con núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares.

Los devanados con tensiones nominales de 13,2kV; 34,5kV y 44kV² se construyen en arreglos tipo capas o helicoidales, las bobinas se elaboran a partir de conductores rectangulares o circulares de cobre o aluminio. Los devanados con tensiones de 0,208kV; 0,460kV y 2,6kV se fabrican a partir de flejes de cobre o aluminio con espesores entre 0,45mm y 1,05mm y dimensión axial entre 500mm y 1000mm [25]. Los devanados con tensiones de 66kV, 115kV y 230kV se fabrican habitualmente en arreglos tipo disco con conductores continuamente transpuestos (CTC) los cuales tienen una mayor capacidad para soportar esfuerzos de cortocircuito.

En este capítulo se estudiarán los principales métodos utilizados para el modelado electromagnético y cálculo de fuerzas de cortocircuito en transformadores, los métodos objeto de análisis permiten cubrir las formas constructivas adoptadas por los fabricantes nacionales las cuales son parte del alcance de este trabajo.

2.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS CONVENCIONALES

La estimación de las fuerzas representa la primera etapa para aplicar el procedimiento de validación teórica, para este propósito se pueden utilizar diferentes métodos de modelado magnético, estos se clasifican en métodos aproximados, métodos analíticos, métodos numéricos y métodos especializados (ver Figura 2.1).

² El reglamento técnico de instalaciones eléctricas clasifica a los sistemas con tensiones nominales menores a 1000V como instalaciones de baja tensión, sistemas con tensiones entre 1000V y 57,5kV como instalaciones de media tensión, sistemas con tensiones entre 57,5kV y 230kV como instalaciones de alta tensión y sistemas con tensiones mayores a 230kV como instalaciones de extra alta tensión.

Figura 2.1 Clasificación de los métodos para modelado electromagnético y cálculo de fuerzas de cortocircuito.

1. Métodos aproximados	2. Métodos analíticos
Formulas sencillas Método de volts por espira Método de ampere vuelta residual	Método de Roth Método de Rabins Método de las imágenes
3. Métodos numéricos	4. Métodos especializados para conductores laminados
Método de elementos finitos Método de Redes de reluctancia Método de elementos de frontera	Método de Mullineux Método de El Missiry Método Semianalitico integral

Tomado de [25], [26] y modificado.

2.1.1 MÉTODOS APROXIMADOS

Estos métodos están basados en estudios teórico-prácticos los cuales sirvieron como primera aproximación para estimar densidades de flujo magnético y fuerzas de cortocircuito, se basan en formulaciones obtenidas a partir de leyes fundamentales del electromagnetismo.

2.1.1.1 Fórmulas sencillas

En un transformador de dos devanados el diagrama de fuerza magnetomotriz tiene forma trapezoidal. El valor máximo de la densidad de flujo $B_{\max}$ es alcanzado en el ducto principal (espacio entre los devanados de alta y baja tensión), en la ecuación (2.1) se presenta una expresión para calcular esta variable.

$$B_{\max} = \frac{1,256 * \sqrt{2} * N * I_r * 10^{-3}}{H_w} [T] \quad (2.1)$$

N = Número de espiras del devanado H_w = Altura geométrica promedio devanados [m]

I_r = Valor RMS corriente nominal devanado [A]

La fuerza radial total F^*_{rad} durante una condición de cortocircuito se calcula a partir de la ecuación (2.2), en esta expresión el factor de sobrecorriente (r) es la relación entre la corriente de cortocircuito RMS de estado estable y la corriente nominal, k es el factor de asimetría [5], [27].

$$F_{rad}^* = \frac{0,628 * (N * I_r)^2 * \pi * D_m * r^2 * (k * \sqrt{2})^2 * 10^{-9}}{H_w} \quad [kN] \quad (2.2)$$

D_m = Diámetro medio del devanado [mm] k = Factor de asimetría

r = Factor de sobrecorriente

El valor máximo de la fuerza axial por pierna afectando a los dos devanados F_{ax}^* se calcula con la ecuación (2.3). F_{ax}^* es la fuerza axial acumulativa de compresión en ambos devanados, alrededor de 2/3 a 3/4 de esta fuerza actúa en el devanado interno y 1/3 a 1/4 en el devanado externo [8], [16]. En la Figura 2.2 se explican los parametros necesarios para el cálculo de la fuerza axial acumulativa.

$$F_{ax}^* = \frac{0,628 * (N * I_r)^2 * \pi * D_m * r^2 * (k * \sqrt{2}) * \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) * (2K - 1) * 10^{-9}}{H_{w1}^2} \quad [kN] \quad (2.3)$$

D_{m1} = Diámetro medio de los devanados [mm]

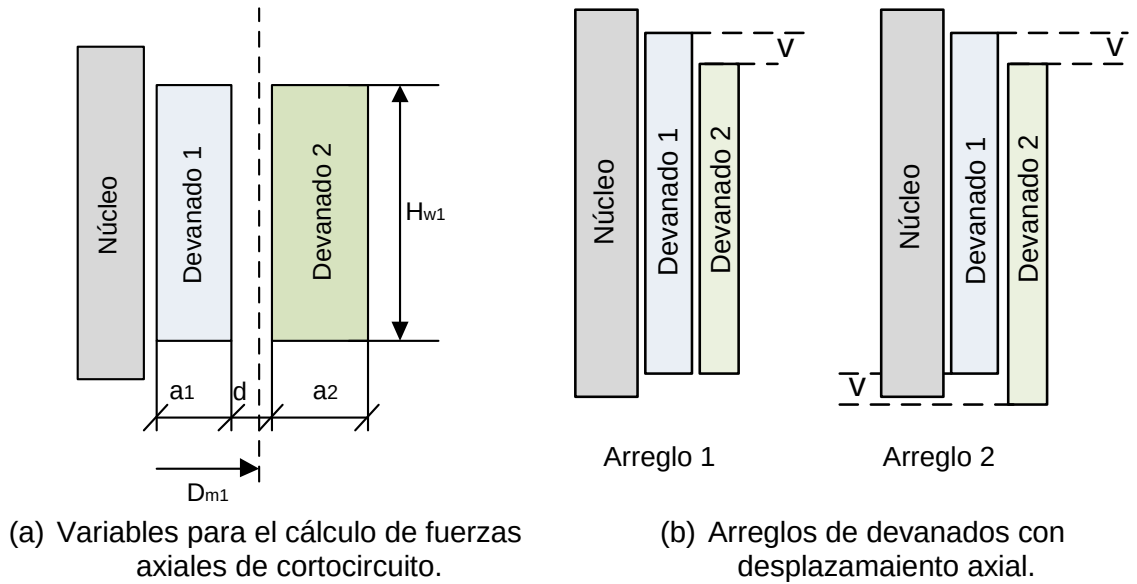
d = Espesor del ducto principal

H_{w1} = Altura media de los devanados [mm]

K = Factor de Rogowski = $1 - \frac{d + a_1 + a_2}{\pi * H_{w1}}$

a_1, a_2 = Espesor radial de los devanados 1 y 2

Figura 2.2 Consideraciones para el cálculo de fuerzas axiales y fuerzas de empuje.



Tomado de [16] y modificado.

En la ecuación (2.4) se presenta una expresión simplificada para calcular la fuerza axial por pierna con un factor de asimetría $k=1,8$, la ecuación aplica para devanados en cobre.

$$F_{ax}^* = \frac{510 * S_1 * r}{f * H_{w2}} \text{ [kN]} \quad (2.4)$$

H_{w2} = Longitud axial promedio de los devanados [mm] f = Frecuencia [Hz]

S_1 = Potencia nominal por pierna [kVA] r = Factor de sobrecorriente

Si los devanados no tienen los centros magnéticos alineados se generan fuerzas axiales de empuje final, para el caso de transformadores de dos devanados con distribución uniforme de FMM e igual longitud axial, la fuerza de empuje final (F_s^*) para un desplazamiento v (mm) puede calcularse a través de la ecuación (2.5).

$$F_s^* = 2,5 * F_{rad}^* * \frac{v}{H_w} \text{ [kN]} \quad (2.5)$$

2.1.1.2 Método de ampere vuelta residual

Cualquier arreglo de dos devanados concéntricos en los cuales la suma de la fuerza magnetomotriz (ampere-vuelta) es cero se puede dividir en dos grupos cada uno teniendo una relación de ampere-vuelta balanceada, un grupo produce el campo magnético axial y el otro el campo magnético radial. Los ampere-vuelta radiales son calculados como la suma algebraica de los ampere vuelta del primario y del secundario entre el punto y cualquiera de los finales de bobina, una gráfica de todos los puntos constituye el diagrama de ampere-vuelta residual [26].

En el cálculo de las fuerzas axiales de empuje se requiere estimar la densidad de flujo magnético radial producida por los ampere-vuelta radiales, esto implica conocer la longitud efectiva del flujo radial para todos los puntos a lo largo del devanado (h_{eff}), la fuerza de empuje axial (ecuación (2.6)) depende a su vez de la longitud efectiva la cual ha sido estimada experimentalmente para diferentes arreglos.

$$F_s^* = \frac{2 * \pi * a * (n * i_{max})^2}{10^{11}} * \Lambda \text{ [Tons]} \quad (2.6)$$

$n * i_{\max}$ = Valor máximo de ampere vuelta del devanado [A] $i_{\max}$ = Corriente pico de cortocircuito [A]

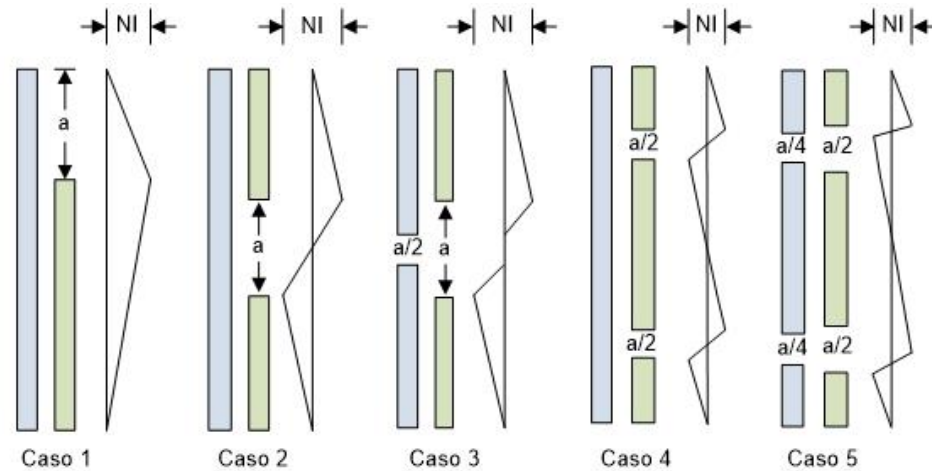
D_m = Diámetro medio de la pierna del transformador [mm] h_{eff} = Longitud efectiva del flujo radial [mm]

a = Diferencia fracional en la altura de los devanados

$$\Lambda = \text{Permeancia por unidad de longitud de la pierna} = \frac{\pi * D_m}{h_{\text{eff}}}$$

En la Figura 2.3 se observan diferentes arreglos de devanados, los respectivos diagramas de ampere-vuelta residual y las expresiones para el cálculo de las fuerzas de empuje.

Figura 2.3 Arreglos de devanados y diagrama de ampere-vuelta residual.



Arreglo	Fuerza de empuje (F*s) (Tons)	Permeancia Λ $\Lambda = \frac{\text{altura de la ventana } a}{\text{circulo del núcleo}} = 4,2$	Permeancia Λ $\Lambda = \frac{\text{altura de la ventana } a}{\text{circulo del núcleo}} = 2,3$
Caso 1	$\frac{2 * \pi * a * (n * i_{\max})^2}{10^{11}} * \Lambda$	5,5	6,4
Caso 2	$\frac{\pi * a * (n * i_{\max})^2}{2 * 10^{11}} * \Lambda$	5,8	6,6
Caso 3	$\frac{\pi * a * (n * i_{\max})^2}{4 * \left(1 - \frac{a}{2}\right) * 10^{11}} * \Lambda$	5,8	6,6
Caso 4	$\frac{\pi * a * (n * i_{\max})^2}{8 * 10^{11}} * \Lambda$	6,0	6,8
Caso 5	$\frac{\pi * a * (n * i_{\max})^2}{16 * \left(1 - \frac{a}{2}\right) * 10^{11}} * \Lambda$	6,0	6,8

Tomado de [26] y modificado.

2.1.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Los métodos analíticos en dos dimensiones se empezaron a difundir desde la década de 1930, estos aplican a geometrías sencillas y se basan en el uso de series de Fourier para resolver la ecuaciones de Laplace (regiones sin densidad de corriente) y Poisson (regiones con densidad de corriente), los métodos analíticos requieren menos información y tiempo de procesamiento para el cálculo, convirtiéndolos en los preferidos por fabricantes [16].

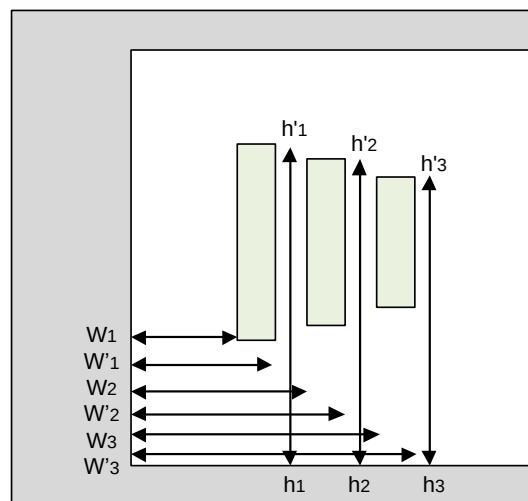
2.1.2.1 Método de Roth

Entre 1927 y 1938 el ingeniero francés Edouard Roth desarrollo un método para la solución de problemas de ingeniería eléctrica con condiciones de potencial vectorial magnético igual a cero en la frontera, esta metodología fue aplicada a problemas de campos magnéticos en máquinas eléctricas [28].

El método de Roth resuelve las ecuaciones de Laplace y Poisson que relacionan el vector de potencial magnético en cualquier punto con la densidad de FMM representada por la doble serie de Fourier, este método asume una geometría 2D en coordenadas cartesianas [16].

En la Figura 2.4 se presenta la ventana del núcleo de un transformador, las regiones rectangulares contienen un número (q) de conductores rectangulares que conducen la corriente de cortocircuito.

Figura 2.4 Representación de la ventana del núcleo y los devanados.



Tomado de [29] y modificado.

El potencial vectorial magnético (A) en la región de la ventana se describe a través de las ecuaciones diferenciales de Laplace y Poisson (2.7), μ_0 es la permeabilidad magnética del aire y J es la densidad de corriente, en las ecuaciones (2.8) se presentan las condiciones de frontera a partir de las cuales se obtiene la solución para (2.7) [29].

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 \cdot J \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} (A_x)|_{y=0} &= \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)|_{y=0} = 0 & (A_x)|_{y=h} &= \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)|_{y=h} = 0 \\ (A_y)|_{x=0} &= \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)|_{x=0} = 0 & (A_y)|_{x=w} &= \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)|_{x=w} = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

La densidad de corriente se calcula a partir de la ecuación (2.9), N_j es el número de espiras de la bobina j, w_j, h_j, w'_j y h'_j representan las coordenadas del devanado j-esimo (ver Figura 2.4) [29].

$$J_j = \frac{N_j \cdot I_j}{(w'_j - w_j) \cdot (h'_j - h_j)} \quad (2.9)$$

La solución para el potencial vectorial magnético (A) en la ventana del núcleo puede expresarse como una doble serie de Fourier, como se muestra en la ecuación (2.10).

$$A = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{m,n} \cdot \cos(M_m \cdot x) \cdot \cos(N_n \cdot y) \quad (2.10)$$

La expresión anterior será una solución para el potencial vectorial magnético si cumple las ecuaciones de Laplace y Poisson, con estas condiciones se calculan los coeficientes C_{m,n} de la ecuación (2.10) para diferentes valores de m y n, como se muestra en las ecuaciones (2.11), (2.12) y (2.13); para m=1 y n=1 C_{1,1} es una constante que puede ser ignorada [29].

Para m≠1 y n≠1.

$$C_{m,n} = \frac{4 \cdot \mu_0}{w \cdot h} \cdot \frac{1}{M_m^2 + N_n^2} \cdot \sum_{j=1}^q J_j \cdot \frac{\sin(M_m \cdot w'_j) - \sin(M_m \cdot w_j)}{M_m} \cdot \frac{\sin(N_n \cdot h'_j) - \sin(N_n \cdot h_j)}{N_n} \quad (2.11)$$

Para $m=1$ y $n \neq 1$

$$C_{m,n} = \frac{2 \cdot \mu_0}{w \cdot h} \cdot \sum_{j=1}^q J_j \cdot (w'_j - w_j) \cdot \frac{\sin(N_n \cdot h'_j) - \sin(N_n \cdot h_j)}{N_n} \quad (2.12)$$

Para $m \neq 1$ y $n=1$.

$$C_{m,n} = \frac{2 \cdot \mu_0}{w \cdot h} \cdot \sum_{j=1}^q J_j \cdot (h'_j - h_j) \cdot \frac{\sin(M_m \cdot w'_j) - \sin(M_m \cdot w_j)}{M_m} \quad (2.13)$$

Los factores M_m y N_n se determinan a partir de las expresiones que se muestran en la ecuación (2.14).

$$M_m = (m-1) \cdot \frac{\pi}{w} \quad N_n = (n-1) \cdot \frac{\pi}{h} \quad (2.14)$$

La densidad de flujo magnético en dirección radial (B_x) y axial (B_y) se calculan a partir del rotacional del potencial vectorial magnético, en (2.15) se muestran las expresiones para determinar las componentes de la densidad de flujo magnético.

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \quad (2.15)$$

Las funciones que definen las fuerzas radiales y axiales por unidad de longitud son las ecuaciones (2.16) y (2.17).

$$F_{rj} = -J_j \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{m,n} \cdot \frac{(\cos(M_m \cdot w'_j) - \cos(M_m \cdot w_j)) \cdot (\sin(N_n \cdot h'_j) - \sin(N_n \cdot h_j))}{N_n} \quad (2.16)$$

$$F_{aj} = J_j \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{m,n} \cdot \frac{(\sin(M_m \cdot w'_j) - \sin(M_m \cdot w_j)) \cdot (\cos(N_n \cdot h'_j) - \cos(N_n \cdot h_j))}{M_m} \quad (2.17)$$

Información detallada sobre el método de Roth se puede encontrar en el estudio realizado por P. Hammond y M.I.Mech.E.F [28].

2.1.2.2 Método de Rabins

Este método se basa en la solución de la ecuación de Laplace y Poisson en coordenadas cilíndricas considerando la curvatura de los devanados, el método puede ser aplicado a configuraciones de ventana de núcleo abiertas o cerradas, es

decir con y sin la presencia de una superficie de permeabilidad infinita en el lado opuesto de la ventana [16].

En el método de Rabins se asume una geometría simplificada consistente de una pierna la cual esta conformada por el núcleo y las bobinas alrededor con simetría en el eje central, los yugos se consideran infinitamente largos, la geometría es de extensión radial infinita, por lo tanto, no se cuenta con estructuras de sujeción y el tanque, los yugos y el núcleo se asumen como materiales de permeabilidad infinita [16].

2.1.2.3 Método de las imágenes

Este método se basa en la aplicación del principio de la imagen eléctrica asumiendo que el núcleo tiene una permeabilidad infinita y una configuración planar de los devanados. La sección transversal de los devanados es subdividida en filamentos de corriente, la contribución al campo magnético dada por cada filamento es calculada utilizando la ley de Biot Savart. Debido a que este procedimiento es aplicable solamente a medios homogéneos, las fronteras de permeabilidad infinita son remplazadas por imágenes de los conductores considerando las fronteras como espejos [10].

La contribución de todos los filamentos se calcula al integrar la ecuación fundamental para todos los conductores incluyendo las imágenes, teóricamente debería haber un número infinito de imágenes reflejadas, sin embargo, en la práctica dos veces el reflejo se considera suficiente [10].

La fuerza de cada conductor en un haz de conductores de un devanado puede ser calculada al considerarlos como filamentos que conducen corriente en sus centros geométricos. La sección transversal del conductor se asume como circular, sin embargo secciones cuadradas y rectangulares pueden evaluarse usando las fórmulas correspondientes para diferentes formas geométricas [10].

La fuerza en cada conductor del devanado es calculada asumiendo que cada espira tiene la misma longitud y transportan corrientes en paralelo. Con este método las fuerzas axiales y radiales son estimadas a la vez si la posición de cada conductor es representada en forma compleja $(X+jY)$ donde X y Y corresponden a las coordenadas de un sistema cartesiano [10].

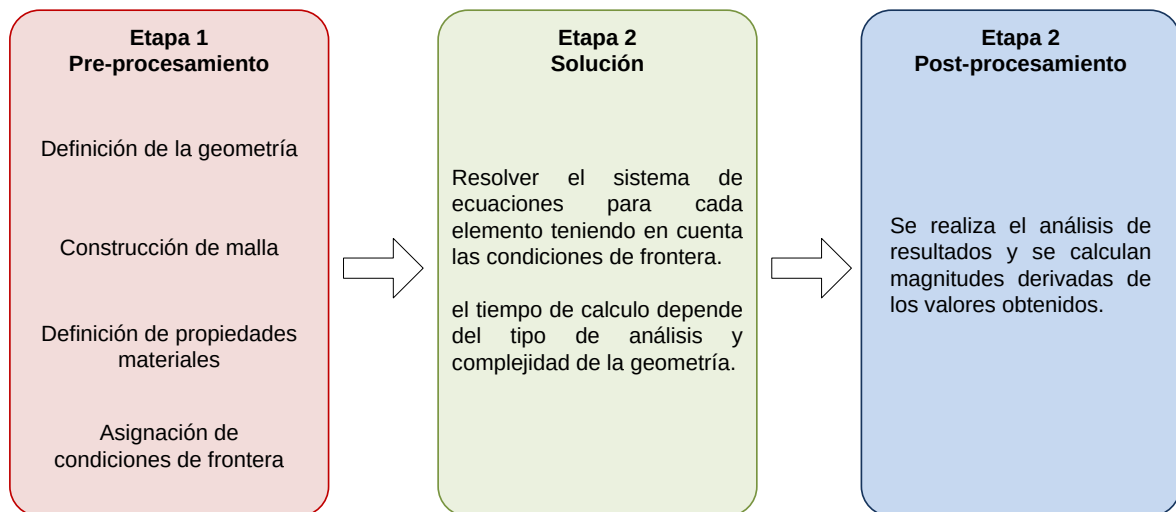
2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos permiten la solución a problemas con geometrías más complejas y no linealidades, los tiempos de cálculo de estos métodos están asociados a la complejidad del problema y pueden ser mayores a los obtenidos con métodos analíticos. La ventaja es que se reducen las limitaciones asociadas a los supuestos asumidos en otras metodologías. Dentro de los métodos numéricos más utilizados para el modelamiento magnético de transformadores se pueden destacar el Método de elementos finitos (MEF) y el Método de redes de reluctancia (MRR).

2.2.1 Metodo de elementos finitos (MEF)

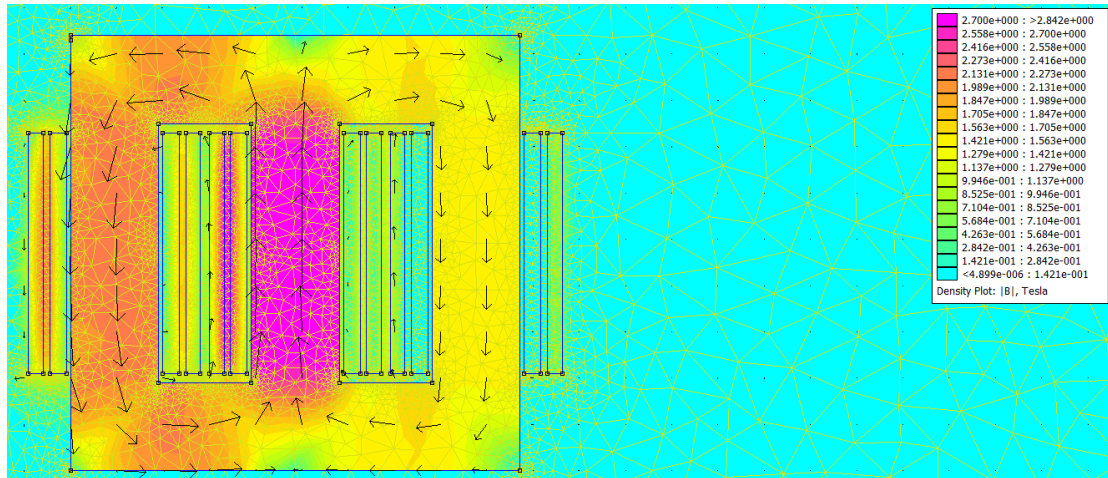
El MEF es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales utilizado en diversos problemas de ingeniería y física, para el caso de la solución de problemas en transformadores, el MEF es utilizado en el análisis de campos eléctricos y magnéticos, los problemas resueltos pueden evaluarse desde el punto de vista estático ó transitorio, en 2D o 3D y en un solo tipo de fenómeno o multifísico. El análisis por MEF puede dividirse en tres etapas pre-procesado, solución y post-procesado (ver Figura 2.5).

Figura 2.5 Diagrama de modelamiento a través de método de elementos finitos.



En la Figura 2.6 se muestra la geometría, el mallado y el post-procesado para el caso de un transformador trifásico de dos devanados con núcleo tipo columnas de 630kVA, con relación de tensiones 10kV/0,4kV, el equipo tiene una impedancia de cortocircuito de 5,58% y un grupo de conexión Dy5. El modelo de este equipo se elaboró en el programa FEMM (*finite element method magnetics*) [30].

Figura 2.6 Post-procesado simulación magneto-estática con programa de elementos finitos.



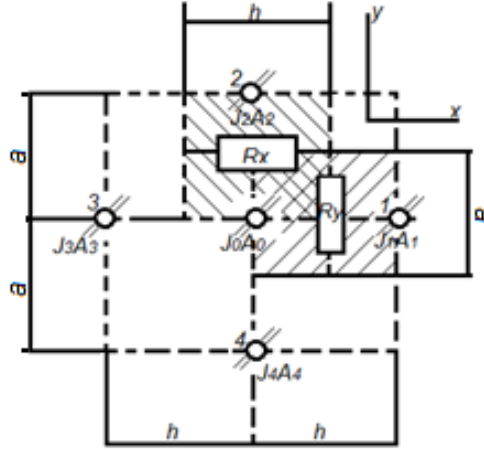
2.2.2 Método de redes de reluctancia (MRR)

El MRR está basado en la ley de Ohm magnética y las leyes de Kirchhoff para nodos y mallas. Los principales beneficios del MRR se evidencian en el cálculo de campos tridimensionales de geometrías complicadas, el método fue utilizado inicialmente por el autor Janusz Turowski en 1960 para el modelado en 2D de un transformador trifásico [31].

La teoría del método de redes de reluctancia se deriva del método de las diferencias finitas, la ecuación de Poisson para el potencial magnético vectorial A en dos dimensiones con los componentes de densidad de corriente $J=J_z$, $J_x=J_y=0$ y $A=A_z$, $A_x=A_y=0$, en un medio con permeabilidad constante μ queda definida por la ecuación (2.18).

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu \cdot J \quad (2.18)$$

La expresión anterior puede transformarse en una ecuación de diferencias expandiendo la función de potencial magnético vectorial $A(x,y)$ en una serie de Taylor, para esto considérese la red de la Figura 2.7 con una malla rectangular de dimensión $a \times h$ la cual puede ajustarse a diferentes formas geométricas.

Figura 2.7 Elemento rectangular de 2 dimensiones de una red de reluctancia.

Tomado de [31] y modificado.

Asumiendo las coordenadas del nodo 1 y nodo 3 iguales a $X_1=x+h$ y $X_3=x-h$ el potencial vectorial magnético en función de la serie de Taylor en estos nodos queda definido por las expresiones dadas en la ecuación (2.19).

$$\begin{aligned} A_1 &= A(x+h) = A(x) + \frac{h}{1!} A'(x) + \frac{h^2}{2!} A''(x) + \dots + \frac{h^n}{n!} A^{(n)}(x) \\ A_3 &= A(x-h) = A(x) - \frac{h}{1!} A'(x) + \frac{h^2}{2!} A''(x) - \dots + \frac{h^n}{n!} A^{(n)}(x) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Reemplazando (2.19) en (2.18) y teniendo en cuenta que $A(x)=A_0$ se obtiene la ecuación (2.20).

$$\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} = A''(x) = \frac{1}{h^2} [A_1 + A_3 - 2A_0 - \varepsilon(h^4)] \quad (2.20)$$

De igual forma, para los nodos 2 y 4 con coordenadas $Y_2=y+a$ y $Y_4=y-a$, tomando $A(y)=A_0$ se obtiene la ecuación (2.21).

$$\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2} = A''(y) = \frac{1}{a^2} [A_2 + A_4 - 2A_0 - \varepsilon(a^4)] \quad (2.21)$$

El último término de las ecuaciones (2.20) y (2.21) indica el orden de error de aproximación, despreciando este error se obtienen las expresiones mostradas en (2.22).

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \approx \frac{A_1}{h^2} + \frac{A_3}{h^2} - \frac{2A_0}{h^2} \quad \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \approx \frac{A_2}{a^2} + \frac{A_4}{a^2} - \frac{2A_0}{a^2} \quad (2.22)$$

La ecuación de Poisson (2.18) se convierte en una ecuación de diferencias finitas como se muestra en (2.23).

$$\frac{A_1 - A_0}{h^2} + \frac{A_3 - A_0}{h^2} + \frac{A_2 - A_0}{a^2} + \frac{A_4 - A_0}{a^2} = -\mu J \quad (2.23)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación anterior por ah/μ e introduciendo valores de reluctancia elementales por metro de longitud a lo largo del eje z (ver ecuación (2.24)).

$$R_x = \frac{h}{\mu a * 1} \quad R_y = \frac{a}{\mu h * 1} \quad (2.24)$$

La ecuación de Poisson de diferencias finitas se puede re-definir en términos de las reluctancias elementales y la corriente total de una sola malla (ver ecuación (2.25)).

$$(A_1 - A_0)R_y + (A_3 - A_0)R_y + (A_2 - A_0)R_x + (A_4 - A_0)R_x = -I_0 \quad (2.25)$$

$I_0 = \text{corriente total en una sola malla} = J * A * h$

El flujo magnético Φ_i se obtiene analíticamente a través de la integral de superficie de la densidad de flujo magnético, o considerando el teorema de Stokes a través de la integral de línea del potencial magnético vectorial (ver ecuación (2.26)).

$$\phi_i = \iint_{S_i} B_i \cdot dS_i = \iint_{S_i} \nabla \times A_i \cdot dS_i = \oint A_i \cdot dl_i \quad (2.26)$$

Para una sola malla el flujo magnético se puede expresar en términos de la diferencia entre el potencial vectorial magnético (ver ecuación (2.27)).

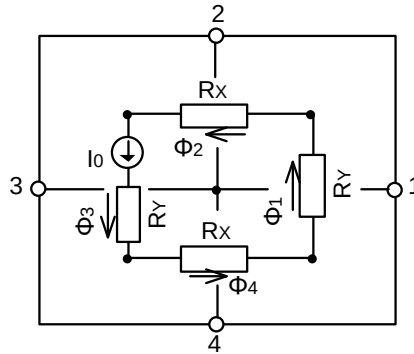
$$\phi_i = A_0 - A_i, \text{ donde } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.27)$$

Sustituyendo (2.27) en (2.25) se obtienen las ecuaciones de la ley de Kirchhoff para circuitos magnéticos (2.28), el circuito equivalente de reluctancias para la red de la Figura 2.7 se muestra en la Figura 2.8.

$$\phi_1 \cdot R_y + \phi_3 \cdot R_y + \phi_2 \cdot R_x + \phi_4 \cdot R_x = I_0 \quad (2.28)$$

$$\text{generalizando } \sum_{i=1}^4 \phi_i \cdot R_i = I_0$$

Figura 2.8 Circuito de reluctancias equivalente para la red de la Figura 2.7



Tomado de [31] y modificado.

El problema ha sido reducido a una estructura de malla del transformador bajo análisis, resolviendo este sistema de múltiples ramas a través de un programa computacional se obtiene el flujo magnético y otras cantidades derivadas. El MRR puede aplicarse en 2D y 3D para casos de análisis magnético de transformadores con núcleo tipo columnas, las últimas investigaciones en MRR han estado orientadas a desarrollos para análisis de transformadores con núcleo acorazado [32].

2.3 MÉTODOS PARA MODELADO DE DEVANADOS EN CONDUCTORES LAMINADOS

Debido a las ventajas constructivas, los fabricantes han optado por el uso de conductores laminados para elaborar las bobinas de baja tensión, en estos conductores la dimensión axial es mayor a la profundidad de penetración del campo magnético, debido a esto la distribución de corriente es no homogénea haciéndose necesario la implementación de simulaciones magnéticas de baja frecuencia. Otro aspecto que complica el modelado magnético de estas bobinas radica en que los conductores deben ser divididos internamente para contemplar el efecto de la densidad de flujo magnético sobre la densidad de corriente, en vista de esta problemática se han planteado diversas metodologías para modelar este tipo de bobinas [25], [33].

2.3.1 Método de Mullineux

En 1969 se propone un método para encontrar la distribución de la densidad de corriente en transformadores con conductor laminado, el método no considera la curvatura de los devanados, el efecto de las columnas se simula a través de dos imágenes radiales mientras que el efecto de los yugos no se considera, se asume que la densidad de corriente no varía en la dirección radial de las bobinas y solo depende de la posición axial [34].

2.3.2 Método de El Missiry

En 1978 El Missiry propuso un método para el cálculo de la distribución de corriente y reactancia de dispersión para transformadores con conductores laminados considerando el efecto de la curvatura de los devanados y la presencia de las fronteras magnéticas. En este trabajo se evalúa el efecto de varios arreglos de devanados, distancia entre bobinas y ubicación de fronteras sobre la distribución de corriente, los resultados son comparados con mediciones de flujo de dispersión en ubicaciones específicas [35].

El modelamiento magnético de los devanados en conductor laminado está en función del método de Rabins, inicialmente se asume que la variación en la distribución de la corriente con respecto al radio es despreciable. El método de cálculo de la distribución de corriente en la longitud axial depende de dividir el devanado en bobinas elementales con una distribución uniforme de la corriente, las corrientes de estas bobinas elementales son expresadas como un conjunto de ecuaciones complejas simultaneas, la distribución de la corriente se obtiene a partir de la solución del sistema de ecuaciones complejas, en este trabajo se desarrollan expresiones para el cálculo de las fuerzas radiales y axiales [35], [36].

2.3.3 Método de B.S Ram

B.S Ram en 1998 propone un método basado en elementos finitos que considera la variación de la densidad de corriente tanto en sentido axial como radial, el método asume que el núcleo tiene una permeabilidad infinita y cuenta con una sección transversal circular, el yugo se considera como un plano radial, la corriente de magnetización y el efecto de las otras fases es ignorado, se asume que la caída de voltaje en la dirección axial es mínima. El devanado en conductor laminado es dividido en m partes axiales y n partes radiales [37].

Este método es validado con un caso de estudio correspondiente a un transformador trifásico de 6MVA. Las espiras del devanado en conductor laminado son modeladas detalladamente, cada espira tiene una corriente circunferencial de

carga impuesta que balancea los A-vuelta del devanado de alta tensión. Una frontera externa concéntrica cilíndrica es ubicada utilizando la mínima distancia al tanque, los resultados de pérdidas bajo carga son comparados con los obtenidos en la prueba del transformador encontrándose diferencias mínimas [37].

2.3.4 Metodología Semi-analítica Integral (MSAI)

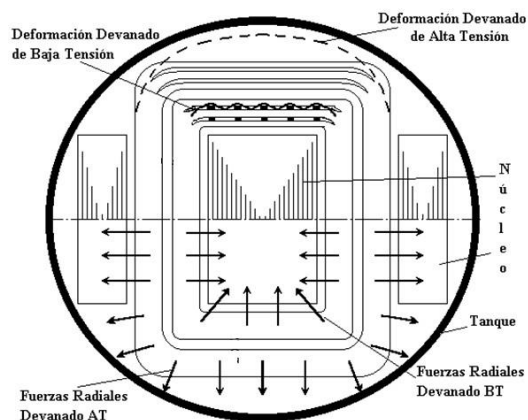
La metodología semi-analítica integral (MSAI) representa un método alternativo para el modelado de transformadores con devanados elaborados en conductores laminados, los resultados obtenidos con el método MSAI fueron comparados con simulaciones detalladas por MEF en transformadores de 5MVA y 10MVA, logrando una reducción significativa en el tiempo de modelado [25], [33].

La metodología MSAI plantea un procedimiento de simulación de baja frecuencia en simetría de rotación, la parte geométrica del campo magnético es pre calculada mediante expresiones analíticas, el efecto del núcleo y de las corrientes de torbellino es determinado mediante solución numérica de un sistema de ecuaciones, se modela espira por espira del devanado en conductor laminado mientras que los devanados de conductor tradicional se modelan de forma simplificada [25], [33].

2.4 ESTUDIOS DE FUERZAS EN TRANSFORMADORES CON BOBINAS RECTANGULARES

En la Figura 2.9 se muestra la distribución no homogénea de las fuerzas radiales para un transformador con núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares.

Figura 2.9 Distribución de las fuerzas radiales y partes de los devanados rectangulares.



Tomado de [23].

Los transformadores con núcleo enrollado y bobinas concéntricas rectangulares han sido adoptados como metodología de diseño por fabricantes nacionales, sin embargo, los estudios llevados a cabo para evaluar los esfuerzos de cortocircuito en estos equipos son pocos debido a que el ensayo es considerado el medio directo para verificar la aptitud al cortocircuito en transformadores de pequeña capacidad, a continuación, se revisan algunos estudios relacionados con estos transformadores.

En el año 1982 la compañía Westinghouse desarrolló una investigación para analizar las fuerzas y esfuerzos de cortocircuito en transformadores de distribución, los resultados son confrontados con pruebas realizadas en equipos trifásicos con potencias entre 75kVA y 1500kVA y monofásicos entre 10kVA y 500kVA, de acuerdo a la experiencia se definieron esfuerzos mecánicos clave y valores límite con el objetivo de evaluar teóricamente la aptitud al cortocircuito [38].

En 1994 Kladas, Papadopoulos y Tegopoulos, compararon diferentes modelos y técnicas para determinar el flujo de dispersión en transformadores trifásicos de distribución con núcleos enrollados y devanados rectangulares, los resultados fueron confrontados con mediciones en diferentes puntos, también se calcularon las fuerzas de cortocircuito, la principal conclusión de este estudio es que para un análisis detallado de estos transformadores se requiere un modelo en 3D, principalmente para calcular la reactancia de cortocircuito [39].

En 1997 Aponte, Cadavid y Lurie llevaron a cabo un trabajo en el cual evaluaron las fuerzas de cortocircuito para un transformador monofásico de 25kVA y uno trifásico de 75KVA utilizando una herramienta computacional. El análisis del caso monofásico se dividió en dos partes, Zona 1 (dentro de la ventana) y Zona 2 (fuera de la ventana), el transformador trifásico se dividió en Zona A (fuera de la ventana), Zona B (ventanas laterales) y Zona C (ventanas centrales), en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se presentan los resultados de este estudio [40], [41].

Tabla 2.1. Fuerzas máximas en transformador monofásico de 25kVA.

Devanado	Fuerza Máxima	Lugar de análisis	
		Zona 1 ventana	Zona 2 fuera ventana
Baja tensión	Axial (kN)	11,1	20,5
	Radial (kN)	31,0	19,3
Alta tensión	Axial (kN)	4,5	4,9
	Radial (kN)	29,6	28,9

Tomado de [41].

Tabla 2.2. Fuerzas axiales en transformador trifásico de 75kVA.

Devanado	Fuerza Máxima (kN)	Lugar de análisis		
		Zona A fuera de la ventana	Zona B ventanas laterales	Zona C ventanas centrales
Baja tensión	Axial (kN)	5,2	11,4	5,3
Alta tensión	Axial (kN)	19,3	25,2	11,8

Tomado de [41].

En el año 2000 Salon, LaMattina y Sivasubramanian analizaron diferentes enfoques para modelar transformadores con núcleos enrollados y devanados rectangulares utilizando el MEF [42]. En la Tabla 2.3 se observan las fuerzas obtenidas para un transformador monofásico de 50kVA con arreglo BT-AT-BT, de acuerdo a este estudio, en la parte curva de los devanados (fuera de la ventana) las fuerzas tienen dos componentes F_y y F_z , mientras que en las partes rectas aparecen las fuerzas F_x y F_y .

Tabla 2.3. Fuerzas de cortocircuito para transformador de 50KVA núcleo tipo acorazado monofásico con devanado interno de baja tensión desplazado 5mm.

Devanado	Parte del devanado	Análisis MEF 3D (10Nm)			Análisis MEF 2D (10Nm)	
		Eje X F_x	Eje Y F_y	Eje Z F_z	Eje X F_x	Eje Y F_y
Interno baja tensión	Recta	108,3	15,3	0,0	108,0	15,6
	Curva	0,0	9,3	-71,5	NA	NA
Alta tensión	Recta	-0,4	-22,0	0,0	-0,2	-24,1
	Curva	0,0	-16,2	-1,8	NA	NA
Externo baja tensión	Recta	-107,4	8,1	0,0	-107,0	9,1
	Curva	0,0	6,4	121,0	NA	NA

Las simulaciones en 2D y 3D son comparables y no hay pérdida de precisión en cuanto a los resultados obtenidos en la ventana del núcleo. Un enfoque en 3D es necesario cuando se requieren obtener las fuerzas finales fuera de la ventana y estudiar asimetrías presentes por fuera del dominio de la simulación en 2D [42].

2.5 CONCLUSIONES

En devanados con conductores laminados es necesario utilizar metodologías de cálculo analítico diferentes a las usadas en devanados con conductores rectangulares o redondos (conductor convencional), esto debido al efecto del campo magnético en la distribución de la corriente.

Los métodos analíticos en 2D tienen buena precisión para el caso de transformadores con núcleos apilados y devanados concéntricos circulares fabricados en conductores convencionales. En el caso de devanados rectangulares con núcleos enrollados se obtienen buenos resultados en la zona de la ventana del núcleo.

La metodología de elementos finitos está ampliamente difundida para el análisis de campos magnéticos y diseño de máquinas eléctricas, si bien el tiempo de modelamiento y simulación puede ser prolongado, el mismo está asociado al grado de detalle del modelo, la complejidad se puede reducir a través de simplificaciones sin afectar la precisión de los resultados.

En el caso de transformadores con núcleo tipo columnas y devanados circulares en conductores convencionales, la metodología recomendada para el cálculo de la densidad de flujo magnético y las fuerzas de cortocircuito es el método de Roth o simulación magneto-estática MEF en 2D.

En el caso de transformadores con devanados en flejes se recomienda aplicar la metodología semi-analítica integral (MSAI) o el método de elementos finitos en 2D con simulación detallada de los flejes y análisis en AC.

En este capítulo se revisaron algunos métodos para el cálculo de fuerzas de cortocircuito en transformadores con devanados convencionales y en flejes, también se revisaron estudios relacionados con las fuerzas de cortocircuito en equipos con devanados rectangulares, en el siguiente capítulo se estudiará el procedimiento de validación teórica planteado por la norma IEC y las fórmulas para calcular los esfuerzos máximos.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO TEÓRICO DE LA NORMA IEC 60076-5 DE 2006

En este capítulo se analiza la evolución normativa relacionada con los requerimientos de aptitud al cortocircuito para transformadores eléctricos, para esto se revisaron los estándares propuestos por el instituto IEEE de los Estados Unidos, la IEC de Europa y el instituto Colombiano ICONTEC. En la segunda parte se revisa el procedimiento de validación teórica propuesto en la norma IEC 60076-5 de 2006, se explican las formas de aplicación del procedimiento, los límites de fuerzas y esfuerzos definidos según el diseño del transformador. En la parte final se presentan algunas fórmulas para calcular esfuerzos en conductores y estructuras de soporte de los devanados.

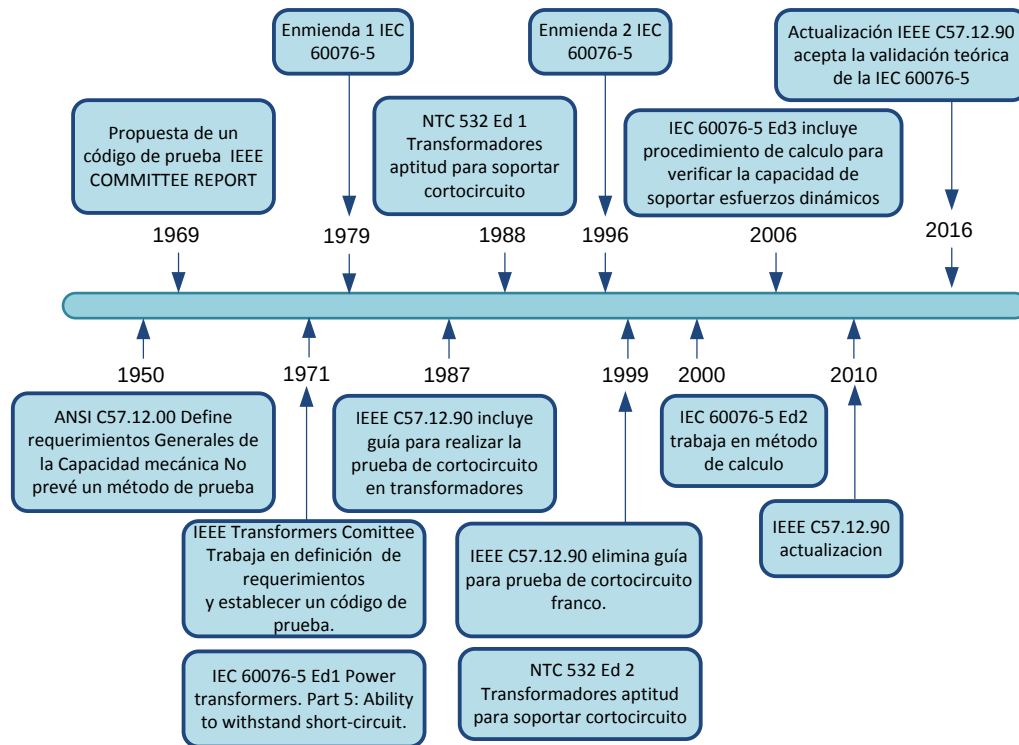
3.1 NORMATIVIDAD PARA VERIFICACIÓN DE LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES

El primer antecedente normativo relacionado con los requisitos de aptitud al cortocircuito en transformadores se publicó en 1950 por parte del instituto americano de estándares (ANSI), la norma ANSI C57.12.00 estableció que los transformadores deberían soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos por cortocircuitos, sin embargo no se definía un procedimiento para validar esta condición [43].

En 1969 el comité de transformadores del IEEE publica un documento en el que se define un código de prueba para determinar la aptitud al cortocircuito de los transformadores. En el año 1971 se publica la primera edición de la norma IEC 60076-5, en este estándar se definió un procedimiento de prueba para verificar la capacidad de soporte térmico y dinámico de los transformadores ante el cortocircuito.

En Colombia, en el año 1988 se publicó por primera vez la norma técnica NTC 532, sin embargo, el ensayo empezó a ser obligatorio en el año de 1994 para transformadores de distribución [44]. En la actualidad las normas IEEE std C57.12.90 del 2016 e IEC 60076-5 de 2006 definen los requisitos y procedimientos de ensayo para verificar la aptitud al cortocircuito en transformadores [4], [5]. En la Figura 3.1 se detalla la evolución cronológica de la normatividad relacionada con la aptitud al cortocircuito en transformadores.

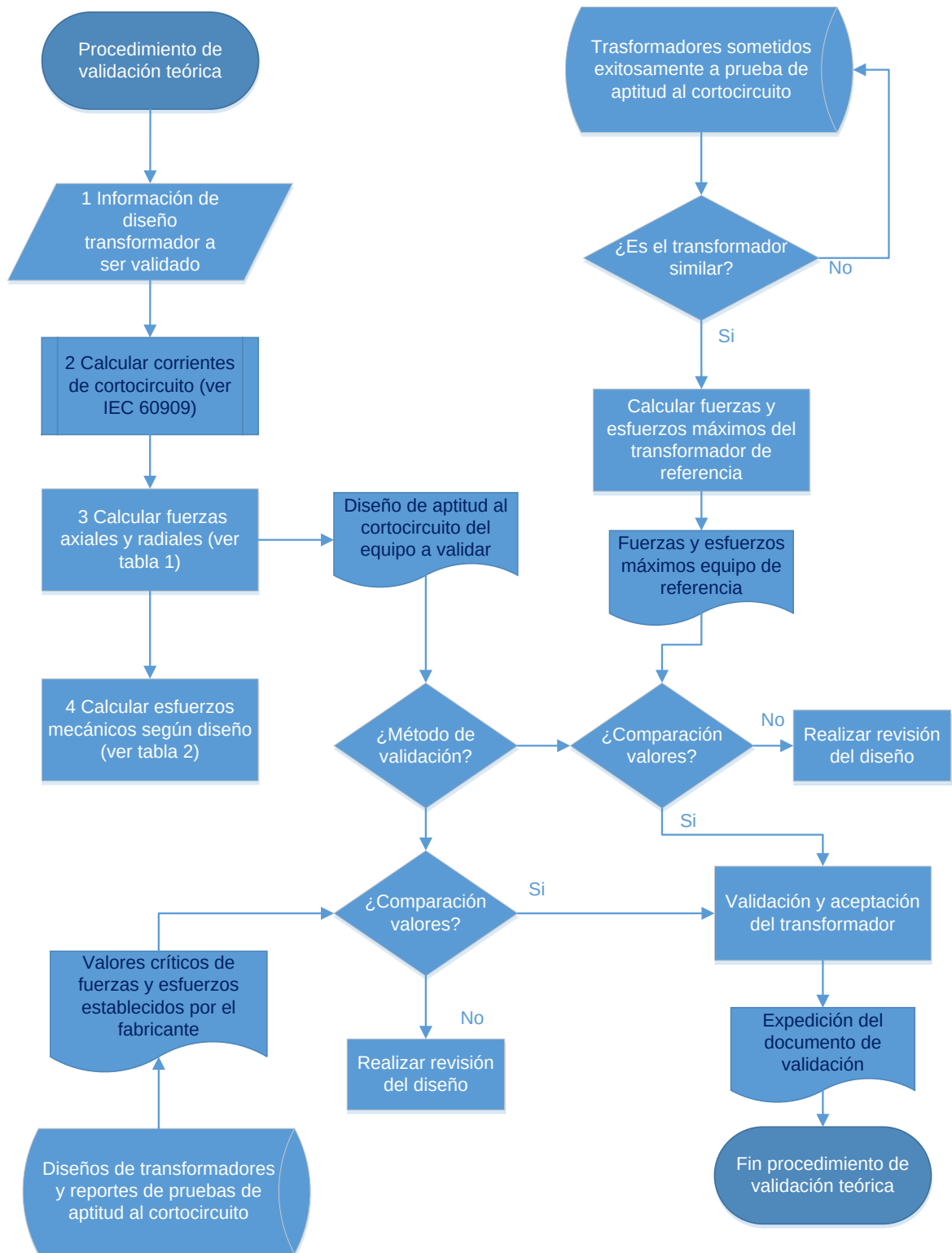
Figura 3.1 Evolución de la normatividad relacionada con la aptitud al cortocircuito en transformadores.



3.2 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LOS ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES

El método de validación teórica contemplado en la norma IEC 60076-5 de 2006 está basado en el cálculo de algunas fuerzas y esfuerzos claves, estos valores se comparan con los límites de diseño establecidos por el fabricante o con los calculados en un transformador de referencia sometido exitosamente a la prueba de aptitud al cortocircuito. El procedimiento descrito en la norma aplica para transformadores con potencias superiores a 2500kVA (categoría II y III), para transformadores con potencias menores el método de validación más rápido consiste en llevar a cabo la prueba, sin embargo, también es posible adoptar una revisión de diseño para validar la aptitud al cortocircuito en estos equipos, en la Figura 3.2 se observa el diagrama de proceso para efectuar el procedimiento de validación teórica de la norma IEC 60076-5 de 2006.

Figura 3.2 Diagrama de flujo procedimiento de validación teórica norma IEC 60076-5 de 2006.



La información recopilada para el procedimiento de validación teórica debe incluir datos del diseño electromagnético, planos de los devanados y sistema aislante, especificación de materiales, cálculo de corrientes de cortocircuito, cálculo de fuerzas considerando posiciones de los taps y desplazamiento de los devanados, cálculo de esfuerzos mecánicos en conductores y estructuras de soporte.

3.2.1 Selección del transformador de referencia

La validación de la aptitud al cortocircuito se puede realizar a través de un equipo de referencia el cual haya pasado satisfactoriamente la prueba de aptitud al cortocircuito, el transformador a validar debe ser similar al transformador de referencia y cumplir los requisitos de la Figura 3.3.

Figura 3.3 Requerimientos de similitud entre transformadores.



En [45] se describe la aplicación del procedimiento de validación utilizando un equipo de referencia. En este caso a través de un transformador de 2500kVA con impedancia de cortocircuito de 6,23% la potencia de cortocircuito absorbida durante el ensayo sería de 40128KVA, con este transformador se podrían validar equipos de 500kVA y 3000kVA.

Un aspecto importante a considerar en el caso de aplicación de la validación por equipo de referencia consiste en que las fuerzas y esfuerzos del transformador a validar no sean mayores al 120% de los presentes en el equipo de referencia.

En [46] se presenta el caso de validación de la aptitud al cortocircuito de un transformador monofásico de 570MVA 420kV/20kV a través de una unidad prototipo con capacidad de 300MVA en cortocircuito y relación de tensiones de 37,6kV/3,23kV, el diseño del prototipo se realizó conservando las características y dimensiones de las bobinas, conductores y estructuras de apoyo, también se verificaron las fuerzas máximas y esfuerzos.

3.2.2 Fuerzas de cortocircuito y esfuerzos máximos

El cálculo de las fuerzas de cortocircuito se realiza con la corriente máxima de falla, debido a que las fuerzas críticas dependen del diseño del transformador evaluado, la norma indica los parámetros que hay que calcular de acuerdo al tipo de transformador (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Fuerzas a calcular de acuerdo al diseño del equipo.

Fuerzas en transformadores con núcleo tipo columnas
Fuerzas radiales en cada devanado físico
Fuerza axial máxima de compresión en cada devanado físico
Fuerzas axiales máximas de empuje final en cada devanado físico
Fuerzas axiales máximas por pierna en abrazaderas anillos de presión y abrazaderas del núcleo.
Fuerzas de empuje actuando en terminales de salida del devanado de baja.
Fuerzas en transformadores con núcleo tipo acorazado
Fuerzas axiales en cada bobina y en los grupos de devanados al interior y exterior de la ventana del núcleo.
Fuerzas radiales actuando en bobinas tipo panqueque.
Fuerzas totales en cuñas y bloques con el núcleo y estructuras de reforzamiento del tanque.
Fuerza total en laminaciones del núcleo.
Fuerzas totales en estructuras de soporte del tanque.

Tomado de [5] y modificado.

Los esfuerzos mecánicos en estructuras de soporte y sujeción se determinan teniendo en cuenta las fuerzas máximas, según sea el criterio de validación adoptado estos se comparan con los valores permisibles o los presentes en el equipo de referencia. A modo de guía la norma indica algunos valores permisibles, los cuales son obtenidos a partir de las propiedades mecánicas de los conductores y materiales utilizados en la construcción del transformador, en la Tabla 3.2 se

muestran los esfuerzos a calcular dependiendo de la forma constructiva y los límites según el criterio de evaluación utilizado.

Tabla 3.2 Esfuerzos mecánicos de acuerdo a la construcción del transformador.

Esfuerzos mecánicos en transformadores con núcleo tipo columnas		Valores permisibles según IEC	Valores equipo de referencia
1	Esfuerzos circunferenciales de tensión en devanados externos σ^*t	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*t, ref$
2	Esfuerzos circunferenciales de compresión en devanados internos (a) σ^*c	$\leq 0,35 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,1 \cdot \sigma^*c, ref$
3	Esfuerzo equivalente de compresión circunferencial en devanados internos (b) σ^*c, eq	$\leq 0,35 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,1 \cdot \sigma^*c, eq, ref$
4	Esfuerzos debidos a flexión radial de los conductores en espacio entre separadores axiales, y entre espaciadores utilizados para construir ductos axiales dentro del espesor radial del devanado σ^*br	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*br, ref$
5	Esfuerzos debidos a flexión axial en conductores en el espacio entre espaciadores radiales (c) σ^*ba	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*ba, ref$
6	Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales (d) σ^*sp	$\leq 80 \text{ MPA (f)}$ $\leq 120 \text{ MPA (g)}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*sp, ref$
7	Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor (e) σ^*pi	$\leq 35 \text{ MPA}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*pi, ref$
8	Esfuerzos de compresión en estructura de aislamiento final σ^*es y abrazaderas finales σ^*er	$\leq 40 \text{ MPA (h)}$ $\leq 80 \text{ MPA (i)}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*es, ref$ $\leq 1,2 \cdot \sigma^*er, ref$
9	Esfuerzos de compresión en anillos de presión comunes o placas de presión σ^*pr	$\leq 80 \text{ MPA}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*pr, ref$
10	Esfuerzos de tensión en tie rods (fitch plates) de la estructura de sujeción σ^*rod	$\leq R_{EL}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*rod, ref$
Esfuerzos mecánicos en transformadores con núcleo tipo acorazado		Valores permisibles según IEC	Valores equipo de referencia
1	Esfuerzos producidos por flexión radial en espaciadores de bobinas σ^*ba	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*ba, ref$
2	Esfuerzos de compresión en papel aislante σ^*pi y en espaciadores de bobinas panqueque σ^*sp	$\sigma^*pi, \sigma^*sp \leq 35 \text{ MPA}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*pi, ref$
3	Esfuerzos de compresión en cuñas ubicadas entre fases σ^*iw y en bloques de presión del núcleo y tanque σ^*pb	$\sigma^*iw \sigma^*pb \leq 80 \text{ MPA (j)}$ $\sigma^*iw \sigma^*pb \leq 80 \text{ MPA (k)}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*iw, ref$ $\leq 1,2 \cdot \sigma^*pb, ref$
4	Esfuerzo de tensión y flexión en laminaciones del núcleo σ^*cl	$\leq R_{EL}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*cl, ref$
5	Esfuerzos de tensión y flexión en estructuras de reforzamiento del tanque σ^*tr	$\leq R_{EL}$	$\leq 1,2 \cdot \sigma^*tr, ref$
(a) Aplica para devanados internos en discos helicoidales, en capa sencilla. (b) Aplica para devanados internos en capas. (c) Aplica para devanados en disco y helicoidales. (d) Aplica para devanados en discos y helicoidales. (e) Aplica para devanados en capas. (f) conductores recubiertos de papel. (g) conductores con recubrimiento de esmalte. (h) transformadores con núcleo enrollado. (i) transformadores con núcleo apilado. (j) cuñas de cartón prensado. (k) cuñas de plástico, fibras reforzadas o madera. Nota: R_{EL} es el esfuerzo de fluencia mínimo del material, prácticamente igual a $R_{P0,2}$.			

Tomado de [5] y modificado.

El proceso de verificación y chequeo de la aptitud al cortocircuito se efectúa comparando las fuerzas y esfuerzos máximos con los valores permisibles o críticos que el fabricante ha adoptado en su práctica de diseño. Los valores permisibles hacen referencia a aquellos que puede soportar el transformador sin sufrir daño, mientras que los valores críticos son aquellas fuerzas o esfuerzos que causan deformaciones permanentes, pérdida de estabilidad y colapso de la estructura [5].

El transformador bajo evaluación se considerará apto para soportar un cortocircuito si ninguna de las fuerzas y esfuerzos excede los valores permisibles y 0,8 veces los valores críticos. Los valores permisibles de esfuerzos en conductores están basados en el esfuerzo de fluencia convencional del 0,2% ($R_{P0,2}$), esta cantidad se define como el esfuerzo de tensión al cual se produce una deformación plástica de 0,2% [5].

Este trabajo se centrará en el cálculo de fuerzas y esfuerzos para transformadores tipo columnas por ser el diseño habitual utilizado en equipos de distribución y media potencia.

3.3 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO

En el capítulo 2 se presentaron algunos métodos para el cálculo de fuerzas de cortocircuito, este es el paso preliminar para la estimación de esfuerzos mecánicos en conductores, estructuras de soporte, separadores axiales, espaciadores radiales, papel aislante entre otros elementos. A continuación, se presentan algunas formulaciones para el cálculo de esfuerzos mecánicos en transformadores.

3.3.1 Esfuerzo circunferencial medio de tensión o compresión

En devanados circulares las fuerzas radiales producen esfuerzos en la dirección tangencial de los conductores de los devanados, este tipo de esfuerzo es conocido como esfuerzo tangencial o circunferencial y puede ser de tensión cuando es producido por fuerzas radiales dirigidas hacia el exterior y de compresión cuando es producto de fuerzas radiales hacia el interior.

Los devanados circulares bajo la acción de fuerzas radiales pueden ser considerados como cilindros delgados sometidos a una presión uniforme P^* , la presión es producida por la fuerza radial total F_{rad}^* la cual actúa sobre el área del devanado $\pi^* D_m^* H_w$. El esfuerzo circunferencial promedio de tensión o compresión producido por las fuerzas radiales se calcula a partir de la ecuación (3.1).

$$P^* = \frac{F_{rad}^*}{\pi \cdot D_m \cdot H_w} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \sigma_t^* = \frac{P^* \cdot D_m}{2 \cdot a} \quad (3.1)$$

D_m = Diámetro medio del devanado [mm]

F_{rad}^* = Fuerza radial total devanado completo [N]

H_w = Longitud axial del devanado [mm]

a = Espesor del devanado [mm]

El esfuerzo circunferencial promedio originado por fuerzas de tensión o compresión radial en devanados conformados solamente por una bobina de alta y una de baja tensión se calcula de acuerdo a la ecuación (3.2).

$$\sigma_t^* = \frac{P^* \cdot D_m}{2 \cdot a} = 0,314 \cdot \frac{N \cdot I_r}{H_w} \cdot D_m \cdot J_r \cdot r^2 \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.2)$$

J_r = Valor de la densidad de corriente correspondiente a la corriente nominal [A/mm^2]

r, k, D_m, N, I_r, H_w se definieron en la ecuación 2.2 del capítulo 2

En arreglos donde los devanados están conformados por múltiples capas la ecuación debe ser modificada para considerar la fuerza magneto-motriz que actúa en cada uno de los devanados físicos, de esta forma el valor absoluto del esfuerzo circunferencial medio en la capa i producido por fuerzas radiales queda definido por la ecuación (3.3).

$$|\sigma_{ti}^*| = 0,314 \cdot \frac{|2 \cdot M_{di} + M_{wi}|}{H_w} \cdot D_{mi} \cdot J_i \cdot r^2 \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.3)$$

M_{wi} = FMM generada en la capa i [A]

M_{di} = suma de la FMM generada por las capas anteriores a i (valor RMS con su signo)[A]

D_{mi} = Diámetro medio de la capa i [mm]

J_i = Densidad de corriente de la capa i (valor RMS) [A/mm^2]

En devanados con múltiples capas la ecuación (3.2) proporciona el esfuerzo medio en todas las capas, mientras que la ecuación (3.3) permite estimar el esfuerzo en una capa definida, si el devanado consiste de m capas iguales con el mismo número

de espiras el esfuerzo en la capa con mayor estrés circunferencial será igual a $(2m-1)/m$ veces el calculado con la ecuación (3.2).

En la ecuación (3.4) se presenta una expresión alternativa para calcular el esfuerzo circunferencial medio en arreglos de dos devanados concéntricos circulares fabricados en conductores de cobre, la expresión está definida en función de las pérdidas óhmicas por pierna P_{ohm} (kW) a 75°C, esta expresión facilita hacer un análisis rápido de los esfuerzos circunferenciales de acuerdo a parámetros eléctricos del equipo.

$$\sigma_t^* = 4,8 \cdot \frac{P_{ohm}}{8,9 \cdot H_w} \cdot r^2 \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.4)$$

3.3.2 Esfuerzos de flexión radial entres separadores axiales en devanados internos

Este esfuerzo es el producido en los conductores sometidos a fuerzas radiales cuyo movimiento está restringido por los separadores axiales dispuestos para crear canales de refrigeración. En este caso al ejercer una fuerza radial los conductores se comportan como vigas fijas en ambos extremos con carga uniformemente distribuida, el esfuerzo máximo de flexión radial para devanados internos con conductores rectangulares está definido por la ecuación (3.5).

$$\sigma_{br}^* = \frac{F_{rul}^* \cdot l^2}{2 \cdot h \cdot b^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.5)$$

F_{rul}^* = Fuerza radial promedio por unidad de longitud de conductor [N/mm]

l = distancia entre soportes consecutivos [mm]

h = Altura axial del hilo [mm]

b = Espesor radial del hilo [mm]

En la ecuación (3.6) se presenta una expresión alternativa para el cálculo del esfuerzo de flexión en conductores de devanados internos, la ecuación está en función de la densidad de corriente nominal J_r .

$$\sigma_{br}^* = 0,314 \cdot \frac{N \cdot I_r}{H_w} \cdot \frac{l^2}{b} \cdot J_r \cdot r^2 \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.6)$$

r , k , N , I_r , H_w se definieron en la ecuación 2.2 del capítulo 2

En el caso de que el devanado esté provisto de uno o mas ductos axiales, el cálculo debe realizarse considerando el grupo de conductores localizados entre el ducto principal y el ducto axial mas cercano, para estos conductores el máximo esfuerzo de flexión axial es el calculado con la ecuación (3.6) multiplicado por $(2m-1)/m$, donde m es la relación del espesor radial sin considerar los ductos y el espesor de los conductores mencionados anteriormente.

3.3.3 Esfuerzos de compresion axial en conductores de devanados

Los conductores de los devanados son sometidos a compresión debido a las fuerzas axiales acumulativas, para cada devanado se deben identificar los casos de falla y las condiciones que producen las mayores fuerzas de compresión para calcular este esfuerzo bajo la condición mas crítica.

En el caso de devanados en capas sin espaciadores radiales, el esfuerzo de compresión axial σ_{cwi}^* en los conductores del devanado #i se define por la expresión (3.7).

$$\sigma_{cwi}^* = \frac{FC_{wi}}{\pi \cdot D_{mwi} \cdot C_c} \cdot 10^3 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.7)$$

FC_{wi} = Fuerza max de compresión en el devanado i utilizando el desplazamiento promedio

$C_c = p \cdot b$ para conductores rectangulares $C_c = g \cdot \frac{f-1}{2} \cdot b$ para conductores continuamente transpuestos

D_{mwi} = Diámetro promedio del devanado #i [mm] p = número de hilos en la dirección del espesor radial

b = dimensión radial del conductor (espesor) [mm] g =número de conductores CTC en el espesor radial

f =número de hilos en el CTC

En devanados en discos y helicoidales con espaciadores radiales se considera el factor dinámico χ el cual tiene en cuenta la amplificación de las fuerzas por efectos de movimientos internos y resonancia (ver ecuación (3.8)).

$$\sigma_{cwi}^* = \frac{FC_{wi} \cdot x}{C_c \cdot z \cdot c} \cdot 10^3 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.8)$$

FC_{wi} = Fuerza max de compresión en el devanado i utilizando el desplazamiento promedio

$C_c = p \cdot b$ para conductores rectangulares $C_c = g \cdot \frac{f-1}{2} \cdot b$ para conductores continuamente transpuestos

p = número de hilos en la dirección del espesor radial b = dimensión radial del conductor (espesor) [mm]

g =número de conductores CTC en el espesor radial del devanado f =número de hilos en el CTC

x = factor dinámico=1,3 z =número de espaciadores radiales en la circunferencia

c = ancho de los espaciadores radiales [mm]

El esfuerzo de compresión por fuerzas axiales no representa un aspecto crítico ya que muchas veces se encuentra por debajo de los límites del material conductor, sin embargo, estas fuerzas pueden colapsar por inclinación devanados elaborados con conductores continuamente transpuestos que no tienen adhesión.

3.3.4 Esfuerzo de flexión axial de conductores entre espaciadores radiales en devanados tipo disco y helicoidales

Debido a la aparición de líneas de campo magnético en la dirección radial, en los finales de los devanados se presentan fuerzas axiales las cuales tienden a doblar los conductores entre los espaciadores radiales en devanados en discos y helicoidales. Este esfuerzo se puede estimar en función de la fuerza axial promedio por unidad de longitud de acuerdo a la ecuación (3.9), o a través de la ecuación (3.10) conociendo el valor máximo de la densidad de flujo magnético radial. Nótese que para la definición de esta expresión se ha considerado que los conductores se comportan como vigas rígidas soportadas en ambos extremos sometida a una carga uniformemente distribuida.

$$\sigma_{ba} = \frac{F_{aul} \cdot l^2}{2 \cdot b \cdot h^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.9)$$

$$\sigma_{ba} = \frac{\hat{B}_{r \max} \cdot J_r \cdot l^2}{2 \cdot h} \cdot r^2 \cdot k^2 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-3} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.10)$$

F_{aul} = Fuerza axial promedio por unidad de longitud del conductor [N/mm]

l = Distancia entre espaciadores radiales consecutivos [mm]

b = Espesor radial de cada hilo [mm]

$h = h_1$ altura del hilo si el conductor es en hilo o doble hilo [mm]

$B_{r\max}^{\wedge}$ = Máxima componente radial de densidad de flujo [T]

J_r = Valor de la densidad de corriente correspondiente a la corriente nominal [A/mm^2]

r, k se definieron en la ecuación 2.2 del capítulo 2

Si se establece como límite el esfuerzo de cedencia del 0,2% del material $R_{p0,2}$ entonces se puede definir una expresión para calcular la máxima separación posible de los espaciadores radiales (ver ecuación (3.11)).

$$T^* \leq 2 \cdot \frac{h}{l^2} \cdot R_{p0,2\%} \quad (3.11)$$

$$T^* = B_{r\max}^{\wedge} \cdot J_r \cdot r^2 \cdot k^2 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-3}$$

$$T^* = \text{carga por unidad de volumen de conductor} \left[\frac{N}{mm^3} \right]$$

El esfuerzo de flexión axial entre espaciadores radiales representa una condición mas crítica en la medida en que menor sea la altura del hilo conductor de los devanados y mayor sea la separación de los espaciadores.

3.3.5 Esfuerzos en el aislante de los conductores de devanados en capas y espaciadores radiales de devanados en discos y helicoidales

Las fuerzas axiales causan esfuerzos de compresión en el aislamiento de las espiras de devanados en capas y en aislamiento y espaciadores radiales en devanados helicoidales y en discos. La ecuación (3.12) permite calcular el esfuerzo en el aislamiento en devanados en capas, mientras que la ecuación (3.13) se utiliza para calcular el esfuerzo en espaciadores radiales para devanados helicoidales y en capas.

$$\sigma_{twi} = \sigma_{cwi} = \frac{FC_{wi}}{\pi \cdot D_{mwi} \cdot C_c} \cdot 10^3 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.12)$$

$$\sigma_{spwi} = \sigma_{cwi} = \frac{FC_{wi} \cdot \chi}{C_c \cdot z \cdot c} \cdot 10^3 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.13)$$

FC_{wi} = Fuerza max de compresión en el devanado i utilizando el desplazamiento promedio

χ = Multiplicador dinámico que tienen en cuenta efectos de impacto y resonancia=1,3

c = Espesor del espaciador radial [mm]

z = Número de espaciadores radiales en la circunferencia

D_{mwi} = Diámetro promedio de la bobina número i

C_c = factor que depende de la forma de los conductores calculado según ecuación 3.9

3.3.6 Esfuerzo de compresión medio crítico de pandeo para devanados circulares

El esfuerzo crítico de pandeo para un devanado circular con apoyos axiales distribuidos en su circunferencia está dado por la ecuación (3.14).

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{12} \cdot z^2 \cdot E \cdot \left(\frac{b}{D_w} \right)^2 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.14)$$

z = Número de soportes en la circunferencia

E = Módulo de elasticidad del material conductor [N/mm²]

b = Espesor radial del conductor [mm]

D_w = Diámetro medio del devanado [mm]

En el Anexo A se presentan formulaciones para el cálculo de esfuerzos en estructuras de soporte y accesorios los cuales habitualmente hacen parte de transformadores con núcleo tipo columnas, estas expresiones se han tomado de [17].

3.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se revisaron en detalle los requerimientos y las alternativas de la norma IEC 60076-5 de 2006 para efectuar la validación teórica de la aptitud al cortocircuito en transformadores, también se estudiaron algunas fórmulas para el cálculo de los esfuerzos producidos por las fuerzas radiales y axiales en conductores, separadores y estructuras de soporte de los devanados.

Las fórmulas de esfuerzos radiales asumen que las fuerzas son uniformemente distribuidas y que los devanados tienen geometría circular.

En el caso de los transformadores de distribución, generalmente los devanados tienen pocas estructuras de soporte y solo cuentan con separadores axiales ubicados en algunas determinadas capas con el propósito de crear canales de refrigeración, por lo tanto, los esfuerzos a calcular dependen de la forma constructiva de los devanados.

La norma establece para el caso de esfuerzos en los conductores unos valores permisibles basados en el esfuerzo de fluencia del 0,2% ($R_{P0,2}$), esta propiedad es inherente al tipo de material conductor utilizado, para el caso del cobre recocido el valor es de 90 N/mm², para cobre endurecido este valor esta entre 110-280N/mm². Para el caso del aluminio este valor esta entre 65-130N/mm², aunque el aluminio es menos resistente a los esfuerzos mecánicos, para una misma densidad de corriente los conductores de aluminio tienen un tamaño mayor, esto compensa la menor resistencia a los esfuerzos.

Una vez revisados los métodos de cálculo de fuerzas, el procedimiento de validación de la norma IEC y las fórmulas para estimar esfuerzos producidos por fuerzas axiales y radiales de cortocircuito, en el siguiente capítulo se planteará una metodología para realizar el procedimiento de validación teórica para el caso de transformadores de distribución y media potencia según el alcance de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA APLICACIÓN DE LA VALIDACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se describen los procedimientos para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, posteriormente se seleccionan los métodos para el cálculo de fuerzas de cortocircuito en transformadores, finalmente se definirán los esfuerzos a estimar para el caso de equipos de distribución y media potencia, en la parte final se presenta un diagrama de la propuesta metodológica.

4.1 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

El primer paso del procedimiento de validación es el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas en los devanados del transformador, para este propósito la norma IEC 60076-5 [5] y el estándar IEEE C57.12.00 [47] incluyen un apartado donde se describe un procedimiento de cálculo.

La norma IEC 60909-0 de 2016 presenta una metodología generalizada para el cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas de potencia [27]. En Norteamérica se utilizan los estándares ANSI C37.010 de 1979 [48] y la IEEE Std 551-2006 [49]. cualquiera de estos métodos puede ser adoptado para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas del transformador.

4.2 CÁLCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO

En 1979 el grupo de trabajo 12-04 del CIGRE llevó a cabo un estudio en el cual se compararon los métodos de Roth, imágenes, Rabins y elementos finitos en 2D para el cálculo de fuerzas de cortocircuito en un transformador con núcleo tipo columnas y devanados circulares. La principal conclusión fue que todos los métodos permitían obtener valores aproximados de fuerzas con una diferencia de $\pm 10\%$ respecto al MEF, el método de Rabins fue el que presentó el menor error, en este estudio también se concluye que el efecto de la curvatura de los devanados es despreciable sobre los valores de fuerzas obtenidos [50].

En el año 2000 se publica un trabajo de fabricantes franceses de transformadores, en este estudio se concluye que el método de Roth en 2D es apropiado para el análisis magnético y cálculo de esfuerzos en transformadores de núcleo tipo columnas y acorazados [51].

Teniendo en cuenta estos antecedentes, en este trabajo se recomienda el uso del método de Roth o simulaciones magneto-estáticas utilizando MEF 2D para el caso de análisis de fuerzas en devanados concéntricos circulares con conductores convencionales (rectangulares o redondos).

En el caso de devanados con conductores en flejes, el cálculo de las fuerzas debe realizarse con un método que considere la distribución no homogénea de la densidad de corriente en los flejes por el efecto de la densidad de flujo magnético, la metodología semi-analítica integral (MSAI) presentada en el título 2.3.4 del capítulo 2 o simulaciones en AC a través del MEF 2D son recomendadas.

En transformadores de pequeña potencia con devanados circulares concéntricos fabricados en capas de conductores convencionales, las formulas sencillas son apropiadas para tener una aproximación de las fuerzas y de la magnitud de la densidad de flujo magnético en el canal de dispersión.

En transformadores de distribución con núcleos enrollados y bobinas rectangulares, un análisis en 3D sería el más preciso, sin embargo, el objetivo de este trabajo es proponer un método simple, modelos en 2D de elementos finitos para determinar las fuerzas en la ventana del núcleo y en la zona por fuera de la ventana podrían aplicarse [52].

Es conservativo asumir que las fuerzas radiales son del mismo orden tanto en la parte recta como en la parte por fuera de la ventana en transformadores con bobinas rectangulares [42], [51].

Las fuerzas axiales son sensibles al alineamiento de los centros magnéticos de las bobinas y la configuración de las derivaciones, para el cálculo de estas fuerzas en este trabajo se recomienda utilizar un desplazamiento del 10% sobre la altura del devanado de mayor longitud, además se debe considerar el arreglo de derivaciones que produzca el mayor desbalance de fuerza magneto-motriz.

4.3 CALCULO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO

En la Figura 4.1 se observa un corte de las bobinas de alta y baja tensión de un transformador con núcleo enrollado y bobinas rectangulares (transformador tipo 1). La bobina de baja tensión (flejes) cuenta con un aislamiento de base (cartón prensado) entre la primera espira y el núcleo mientras que entre los flejes se dispone papel aislante diamantado [53]. La bobina de alta tensión se fabrica en conductores de cobre o aluminio con recubrimiento en resina de poliéster y sobrecapa de

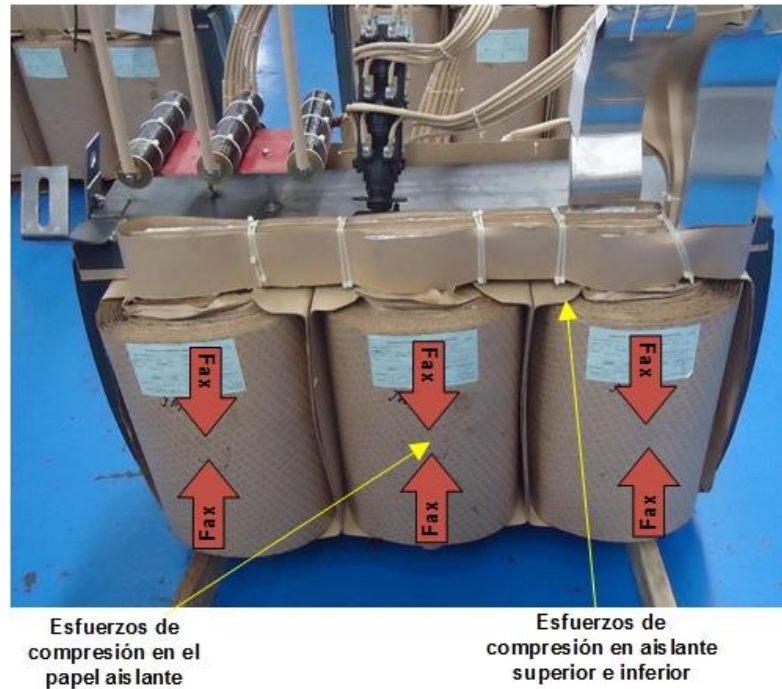
poliamida-imida, este material tiene buenas características dieléctricas y térmicas [54], cada capa de los devanados es aislada con papel diamantado.

Figura 4.1 Devanados de alta y baja tensión para transformadores con núcleo enrollado (transformador tipo 1).

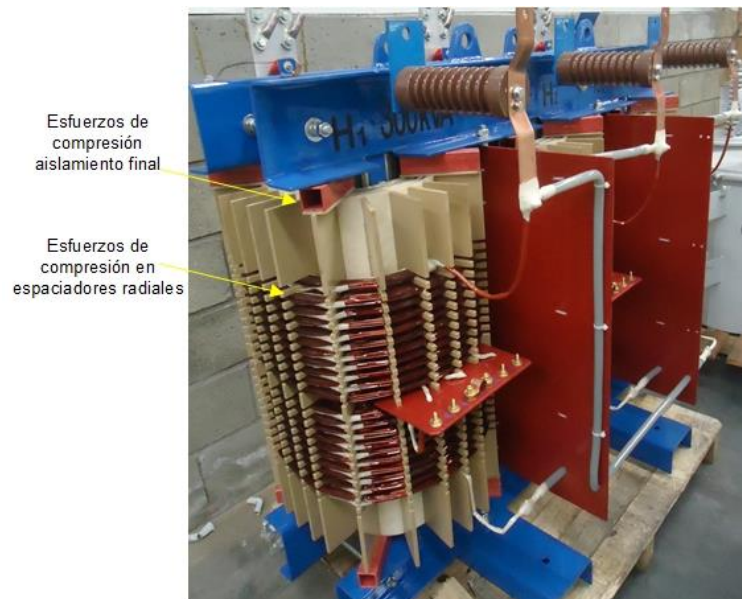


En determinadas capas de las cabezas de bobina de los devanados de baja y alta tensión se instalan soportes axiales de cartón prensado para generar espacio para las salidas de los conductores y las tomas de regulación, además, estos espacios son utilizados como canales de refrigeración para circulación del aceite dieléctrico. La acción de las fuerzas radiales en esta zona puede generar esfuerzos de flexión en los conductores.

Las fuerzas axiales en este tipo de transformadores generan esfuerzos de compresión en los conductores y en el papel aislante, también pueden aparecer fuerzas de empuje axial sobre el aislante dispuesto entre las bobinas y los yugos del núcleo. El efecto de las fuerzas axiales se manifiesta principalmente como desplazamientos y no como deformaciones en estos equipos (ver Figura 4.2).

Figura 4.2 Fuerzas axiales en transformador con núcleo enrollado (transformador tipo 1).

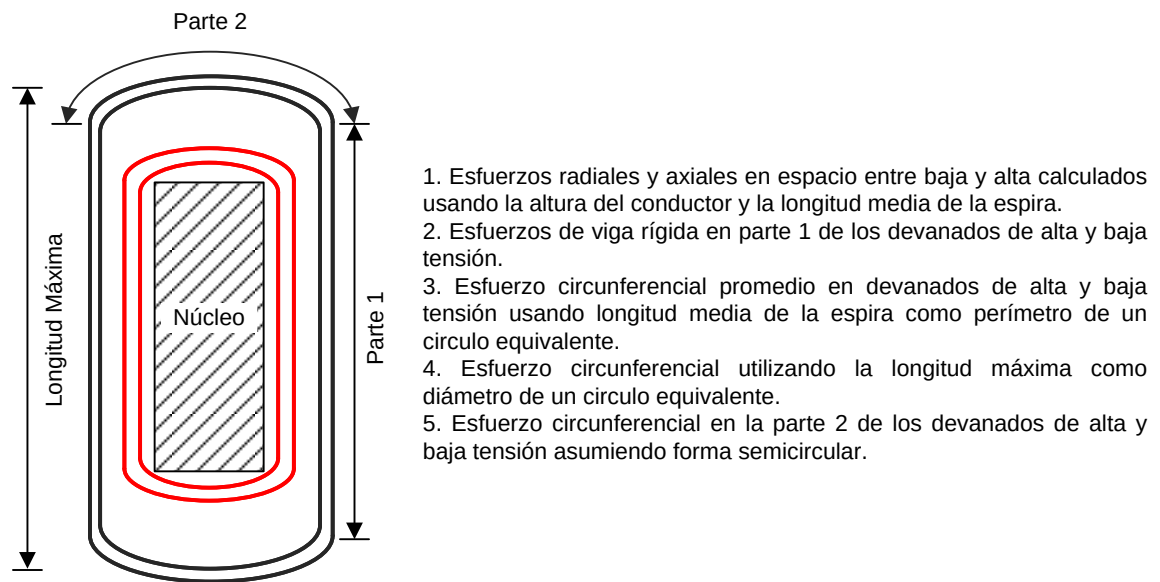
En distribución y media potencia es habitual el uso de transformadores tipo seco con núcleo apilado y bobinas circulares o rectangulares (ver Figura 4.3), en este estudio estos equipos serán identificados como transformador tipo 2.

Figura 4.3 Esfuerzos en transformador seco con bobinas circulares (transformador tipo 2)

En transformadores tipo seco el devanado de alta tensión es construido con soportes radiales en fibra de vidrio distribuidos a lo largo de la altura, estos soportes proporcionan rigidez mecánica y generan canales de refrigeración, los conductores son recubiertos con resina resistente a altas temperaturas la cual a su vez mejora la resistencia del devanado a las fuerzas radiales y axiales de cortocircuito. El devanado de baja tensión es construido en flejes aislados con papel Nomex® el cual provee buenas propiedades térmicas y aislantes [55].

En la evaluación teórica de la aptitud al cortocircuito de los transformadores tipo 1 se incluirán los cálculos propuestos en el trabajo desarrollado por Sinha R.P en 1982, en la Figura 4.4 se resumen las consideraciones asumidas en este estudio [38].

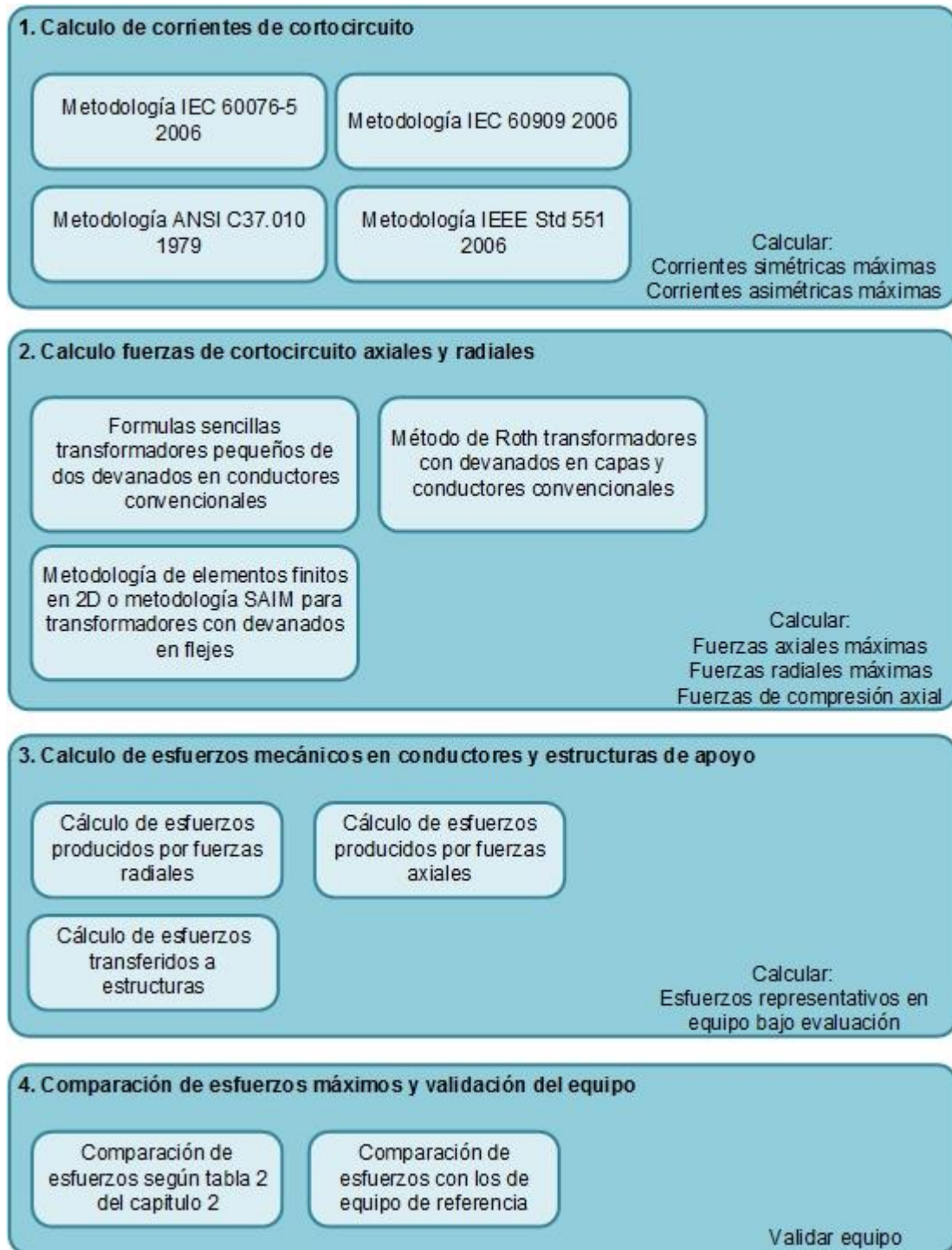
Figura 4.4 Parámetros considerados en el análisis de esfuerzos en equipos con bobinas rectangulares.



Tomado de [38] y modificado.

El procedimiento de validación teórica consta de cuatro procesos principales los cuales son: cálculo de corrientes de cortocircuito, cálculo de fuerzas radiales y axiales máximas, cálculo de esfuerzos mecánicos en conductores y estructuras de apoyo y finalmente comparación de esfuerzos y fuerzas máximas con equipo de referencia o valores propuestos por la norma, en la Figura 4.5 se presenta un esquema del procedimiento metodológico propuesto en este trabajo.

Figura 4.5 Metodología para realizar la validación teórica de la aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia.



En la Tabla 4.1 se describen los esfuerzos a calcular según el tipo de transformador, no es necesario el cálculo de todos los esfuerzos ya que los equipos cubiertos por el alcance de este trabajo no cuentan con los accesorios y estructuras de soporte donde se requiere evaluar el esfuerzo. Las ecuaciones para determinar de forma aproximada los esfuerzos fueron presentadas en el capítulo 3.

Tabla 4.1 Esfuerzos aplicables según el tipo de transformador.

#	Esfuerzo a calcular	Transformador		Ecuación
		Tipo 1	Tipo 2	
1	Esfuerzos circunferenciales de tensión en devanados externos σ^*t	Aplica	Aplica	(3.3), (3.4), (3.5)
2	Esfuerzos circunferenciales de compresión en devanados internos (a) σ^*c	Aplica	Aplica	(3.3), (3.4), (3.5)
3	Esfuerzo equivalente de compresión circunferencial en devanados internos (b) σ^*c, eq	Aplica	Aplica	(3.3), (3.4), (3.5)
4	Esfuerzos de flexión radial de los conductores entre separadores axiales, y entre espaciadores utilizados para construir ductos axiales dentro del espesor radial del devanado σ^*br	Aplica	Aplica en BT	(3.6), (3.7)
5	Esfuerzos debidos a flexión axial en conductores en el espacio entre espaciadores radiales (c) σ^*ba	No aplica no cuentan con estos elementos	Aplica en AT	(3.11), (3.12), (3.13)
6	Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales (d) σ^*sp	No aplica no cuentan con estos elementos	Aplica	Ver anexo A
7	Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor (e) σ^*pi	Aplica	Aplica	Ver anexo A
8	Esfuerzos de compresión en estructura de aislamiento final σ^*es y abrazaderas finales σ^*er	No aplica no es critico	Aplica	Ver Anexo A
9	Esfuerzos de compresión en anillos de presión comunes o placas de presión σ^*pr	No aplica no cuentan con estos elementos	No aplica no cuentan con estos elementos	Ver Anexo A
10	Esfuerzos de tensión en tie rods (fitch plates) de la estructura de sujeción σ^*rod	No aplica no cuentan con estos elementos	No aplica no cuentan con estos elementos	Ver Anexo A

Tipo 1: Transformador con núcleo enrollado y bobinas rectangulares, alta tensión en conductor circular y baja tensión en conductor en fleje.

Tipo 2: Transformador tipo seco con núcleo apilado y bobinas rectangulares, alta tensión en conductor circular y baja tensión en conductor en fleje.

4.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron los esfuerzos a considerar para el caso de transformadores de distribución y media potencia cubiertos por el alcance de ese trabajo.

La metodología de validación teórica puede dividirse en 4 etapas principales: cálculo de corrientes de cortocircuito, cálculo de fuerzas axiales y radiales, cálculo de esfuerzos de cortocircuito y proceso de comparación y validación.

Los cálculos de esfuerzos para transformadores con bobinas rectangulares presentados en este trabajo están basados en formulas teóricas, los resultados obtenidos a partir de estas permitirán tomar decisiones relacionadas con la aptitud al cortocircuito del equipo e inferir sobre modificaciones necesarias en el proceso constructivo y de diseño de los equipos.

En el siguiente capítulo se presenta el análisis para el caso de un transformador de distribución de 400kVA sumergido en aceite, para el mismo se realizará el cálculo de fuerzas y esfuerzos principales.

CAPÍTULO 5 APLICACIÓN METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se presentan los cálculos de fuerzas y esfuerzos para el caso de un transformador de 400kVA sumergido en aceite con devanados rectangulares y núcleo enrollado, este equipo es representativo de un transformador de media potencia en nuestro país ya que los fabricantes utilizan metodologías de diseño y procedimientos de construcción similares.

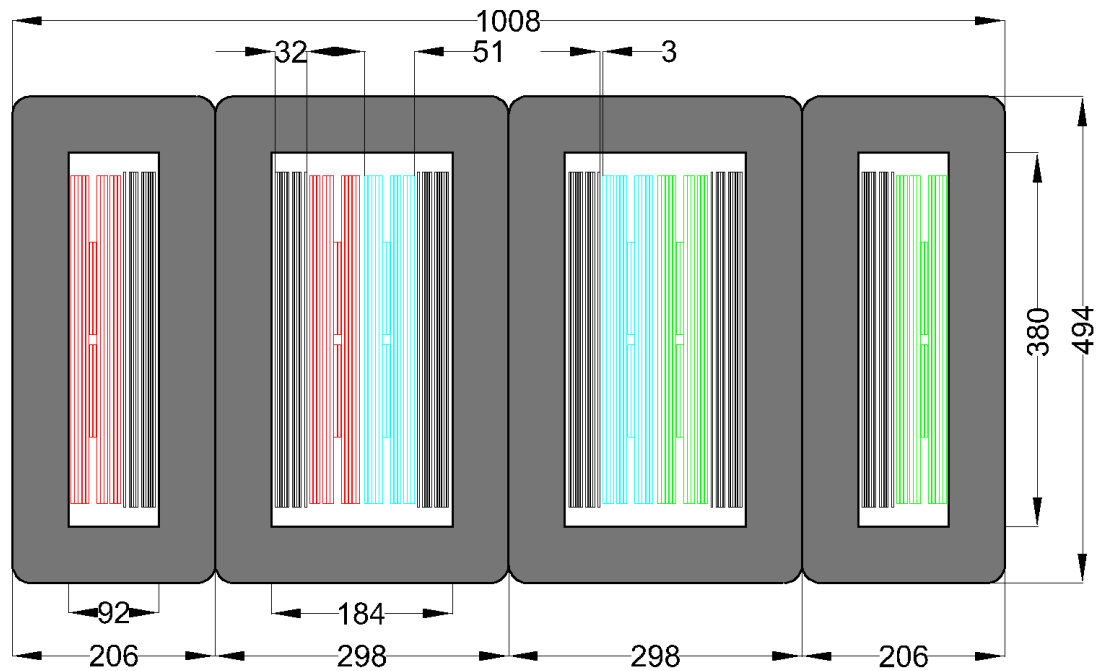
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR CASO DE APLICACIÓN

El transformador del caso de aplicación es un equipo de 400kVA el cual pasó satisfactoriamente el ensayo de aptitud al cortocircuito realizado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, en la Tabla 5.1 se presentan las características técnicas del equipo.

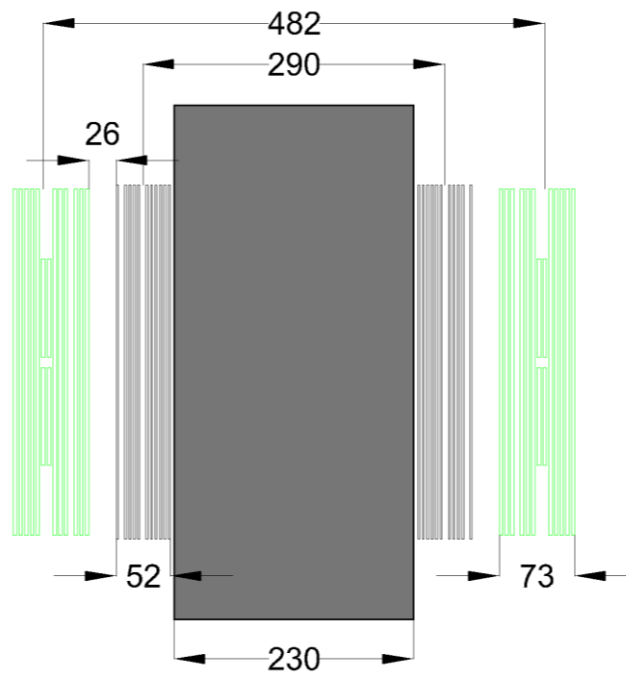
Tabla 5.1 Información técnica transformador caso de aplicación.

Potencia nominal (kVA)	400
Numero de fases	3
Tensión nominal del primario (V)	13200
Tensión nominal del secundario (V)	220
Corriente nominal primaria (A)	17,49
Corriente nominal secundaria (A)	1049,7
Frecuencia	60
Impedancia de cortocircuito (%) a 85 °C	5,51
Taps de derivación	+2 * 2,5 a -2 * 2,5
Material de los devanados	AT Al / BT Al
Conexión	Dyn5

El devanado de alta tensión fue elaborado de 13 capas de alambre de aluminio esmaltado circular de 3,36mm de diámetro, las capas 7 y 8 corresponden a las derivaciones de 28 espiras cada una. El devanado de baja tensión se construyó en fleje de aluminio de 340mm de alto por 1,9mm de espesor. En la Figura 5.1 y Figura 5.2 se muestran las dimensiones del transformador del caso de aplicación.

Figura 5.1. Vista frontal transformador caso de aplicación.

Nota: Dimensiones en mm.

Figura 5.2. Vista lateral transformador caso de aplicación.

Nota: Dimensiones en mm.

5.2 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

El cálculo de las corrientes de cortocircuito en los devanados se realizó utilizando el procedimiento de la norma IEEE C57.12.00-2015, en la Tabla 5.2 se muestran las variables y los valores de las corrientes simétricas y asimétricas obtenidas.

Tabla 5.2 Cálculo de las corrientes de cortocircuito.

Factor X/R	5,27
Angulo ϕ	1,38
Factor de asimetría K	2,20
Corriente simétrica de cortocircuito AT (A)	183,26
Corriente asimétrica de cortocircuito AT (A)	404,68
Corriente simétrica de cortocircuito BT (A)	19056,24
Corriente asimétrica de cortocircuito BT (A)	42057,12

5.3 CÁLCULO DE LAS FUERZAS DE CORTOCIRCUITO

El cálculo de las fuerzas axiales y radiales se realizó a través de simulaciones de la ventana principal y de la región externa utilizando el programa de elementos finitos FEMM 4.2®, el devanado de baja tensión fue modelado por espiras y el devanado de alta tensión por cada capa.

5.3.1 CÁLCULO DE FUERZAS CON SOFTWARE FEMM 4.2

Se realizaron simulaciones magnéticas a 60Hz para determinar la densidad de flujo magnético, fuerzas radiales y axiales en los devanados, para este propósito se desarrollaron dos modelos el primero correspondió a la ventana principal y el segundo a la región por fuera de la ventana.

El modelo de la ventana principal se simplificó para no incluir el efecto de las fases adyacentes, esta consideración ha sido utilizada en otros estudios encontrándose diferencias mínimas entre un modelo completo y uno simplificado de la ventana [56], [57]. En la simulación se asumió geometría plana y se asignó una profundidad de 1mm al dominio.

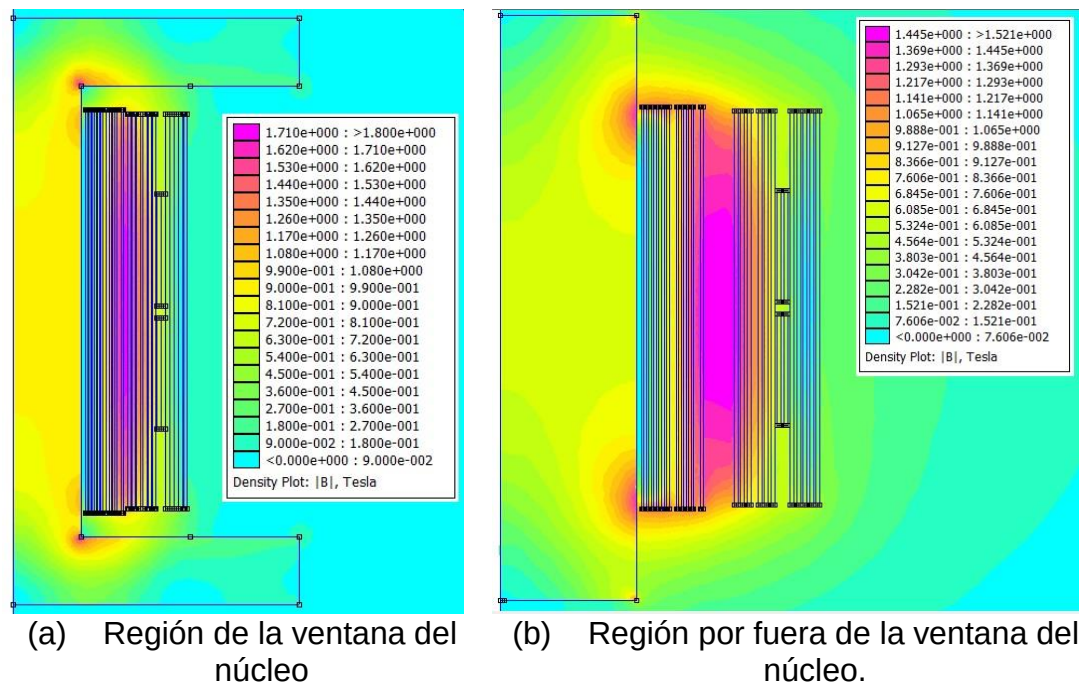
El material del núcleo se definió como acero M-45 ($\mu_r=4689$, $\sigma=2,9$ MS/m). Para análisis de fuerzas de cortocircuito el modelo preciso del núcleo tiene pocas implicaciones sobre los resultados, incluso muchos modelos analíticos asumen un valor de permeabilidad infinita, sin embargo, en este estudio se utilizó un material ferromagnético típico.

Las espiras del devanado de baja tensión fueron modeladas de forma detallada [37], mientras que las capas del devanado de alta tensión se modelaron como bloques a los cuales se les asignó el número de espiras correspondientes, 99 para las capas completas y 28 espiras para las derivaciones, el material utilizado fue aluminio 1100 ($\mu_r=1$, $\sigma=34,45$ MS/m) [58].

El mallado se realiza automáticamente con el programa, obteniéndose 66822 elementos para el modelo de la ventana del núcleo y 20304 para el modelo por fuera de la ventana. Los resultados calculados corresponden a la posición de máximo voltaje del devanado de alta tensión (todas las bobinas energizadas). En el **Anexo B** se presenta un análisis comparativo para otros regímenes de funcionamiento y posición de las bobinas para el transformador del caso de aplicación, también se detalla el modelo elaborado en MEF y el algoritmo de cálculo de fuerzas.

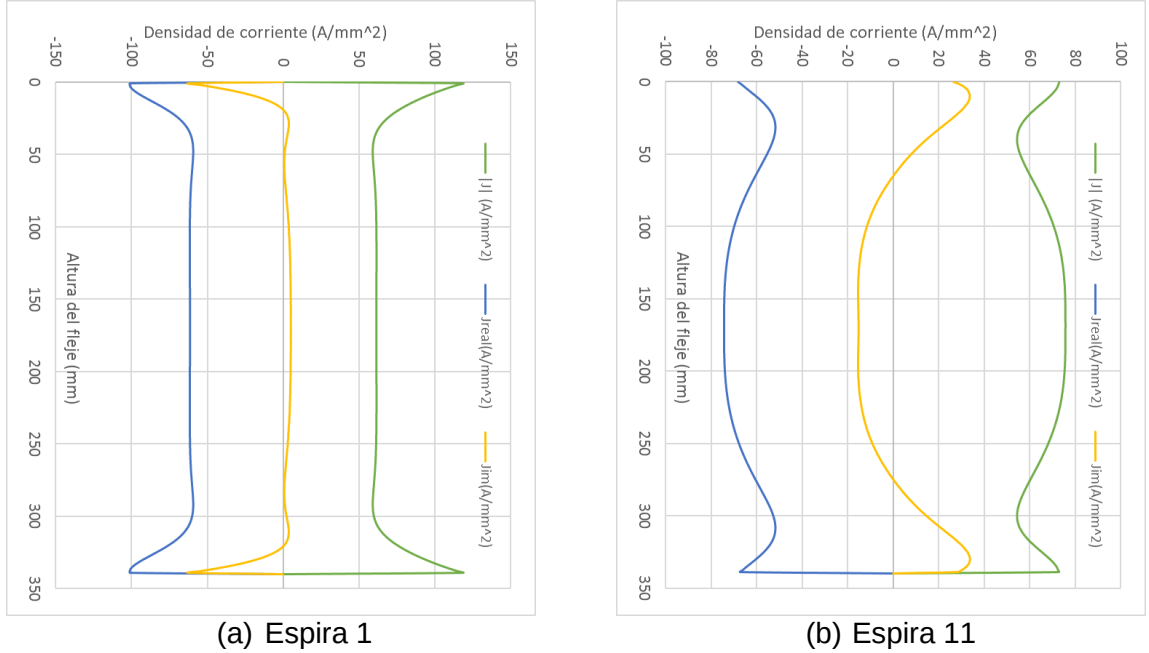
En la Figura 5.3 se observa la densidad de flujo magnético para las regiones de análisis, en las simulaciones se ha asumido que el devanado de alta tensión está operando en la derivación de máximo voltaje. La densidad de flujo magnético se concentra en el canal de dispersión alcanzando un valor máximo de 1,7T en la ventana del núcleo y 1,5T en la región por fuera de la ventana.

Figura 5.3. Densidad de flujo magnético para condición de cortocircuito.



En la Figura 5.4 se muestra el efecto del campo magnético en la distribución de la densidad de corriente en las espiras 1 (cercana al núcleo) y 11 (cercana al canal de dispersión) del devanado en flejes. La densidad de corriente se concentra en la parte superior e inferior de las espiras, este efecto se manifiesta en mayor proporción en las espiras cercanas al núcleo.

Figura 5.4 Densidad de corriente en la espira 1 y 11 del devanado en flejes.



El cálculo de las fuerzas se realizó dividiendo la altura de las capas y los flejes en 30 segmentos [59], en cada uno se determinaron los componentes de la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente; a partir de estas variables se calcularon las componentes estacionarias y oscilatorias de la densidad de fuerza utilizando la ecuación (5.1) [25].

$$\vec{df}_{ac} = \frac{1}{2} \vec{J} \times \vec{B} \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad \vec{df}_{dc} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \vec{J} \times \vec{B} \right\} \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad (5.1)$$

$\vec{df}_{ac}$ campo vectorial complejo variando al doble de la frecuencia $\left[\frac{N}{m^3} \right]$

$\vec{df}_{dc}$ campo vectorial componente estacionaria $\left[\frac{N}{m^3} \right]$

$\vec{J}$ campo vectorial complejo densidad de corriente $[A / m^2]$

$\vec{B}$ campo vectorial complejo densidad de flujo magnético $[T]$

A partir de los componentes AC y DC de las fuerzas se obtiene la densidad de fuerza radial (df_r) y axial (df_z) en el tiempo en segmento de espira o capa, para este proposito se utilizó la ecuación (5.2) tomada de [25]. El termino $\arg$ corresponde al argumento de la componente variable de la fuerza, estos calculos se efectuaron con Matlab® para el instante de tiempo 8,33ms donde la componente de doble frecuencia alcanza un máximo, en el Anexo B se presenta detalles del procedimiento de cálculo de MATLAB.

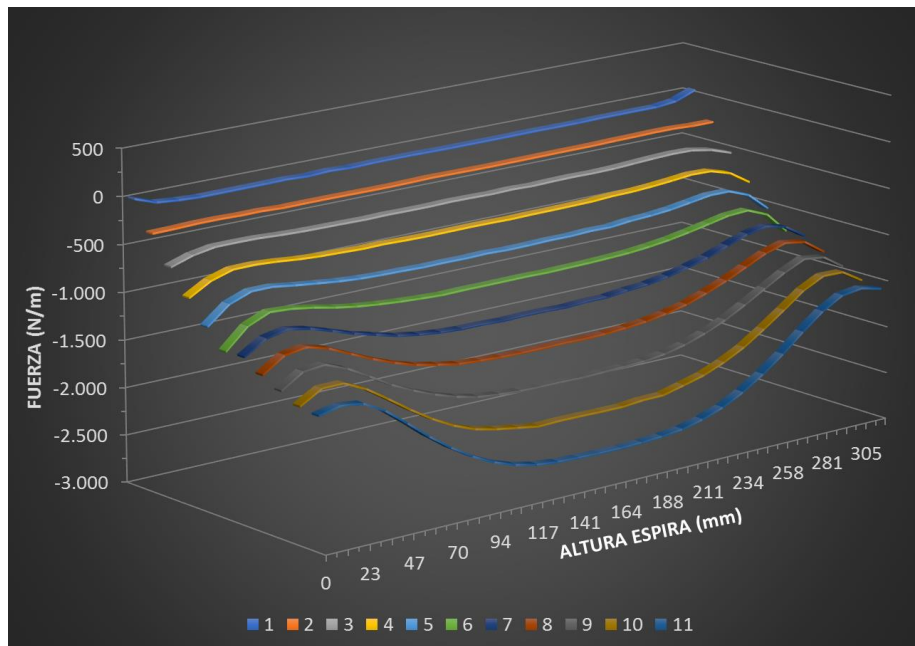
$$\begin{aligned} df_{r(t)} &= df_{rdc} + |df_{rac}| * \cos\left(2wt + \arg[df_{rac}]\right) \left[\frac{N}{m^3}\right] \\ df_{z(t)} &= df_{zdc} + |df_{zac}| * \cos\left(2wt + \arg[df_{zac}]\right) \left[\frac{N}{m^3}\right] \end{aligned} \quad (5.2)$$

En la Figura 5.5 se muestran las fuerzas radiales y axiales distribuidas en los flejes del devanado de baja tensión para la región de la ventana del núcleo. En este devanado se evidenció un comportamiento característico relacionado con la distribución de las fuerzas de cortocircuito, las fuerzas radiales son mayores en los flejes cercanos al canal de dispersión (espiras 9 a 11), mientras que las fuerzas axiales son predominantes en los flejes cercanos al núcleo (espiras 1 a 3).

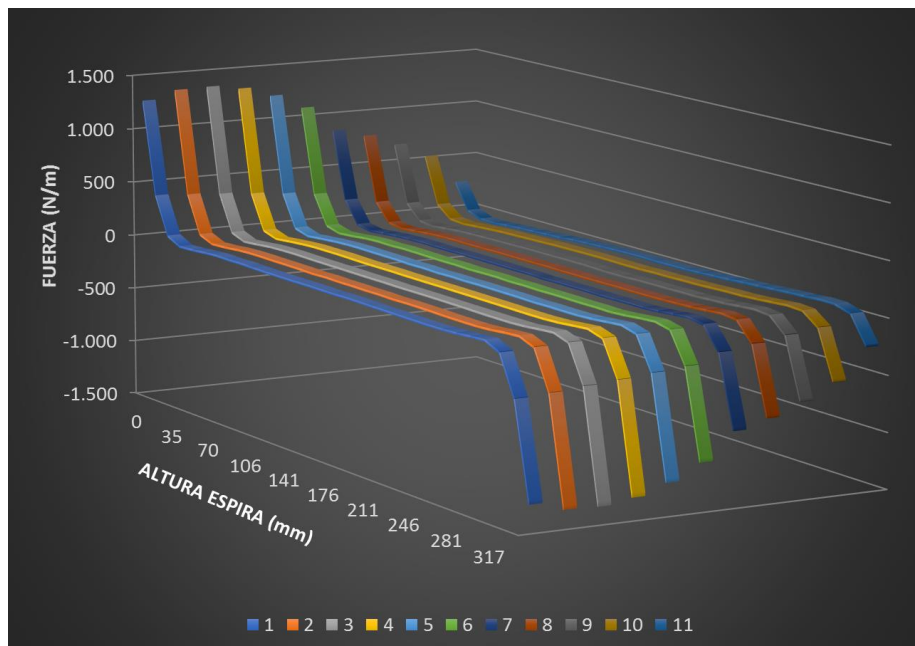
En la Figura 5.6 se observa la fuerza radial y axial distribuida para las capas del devanado de alta tensión en la región de la ventana del núcleo. Las fuerzas radiales son de tensión y alcanzan un valor máximo en la parte central de las capas cercanas al canal de dispersión (capas 1 a 4), por otra parte, las fuerzas axiales alcanzan valores máximos y opuestos en los extremos, siendo más significativas en las capas alejadas del canal de dispersión (capas 10 a 13).

En la capa 13 (más alejada del canal de dispersión) la fuerza radial presenta un comportamiento particular ya que alcanza un máximo positivo en los extremos y en la mayor parte de la capa toma un valor negativo (fuerza de compresión), sin embargo, su valor es bajo, por lo que es poco probable que las fuerzas radiales causen alguna afectación en esta zona.

Figura 5.5. Fuerzas radiales y axiales distribuidas en los flejes del devanado de baja tensión en la región de la ventana del núcleo.

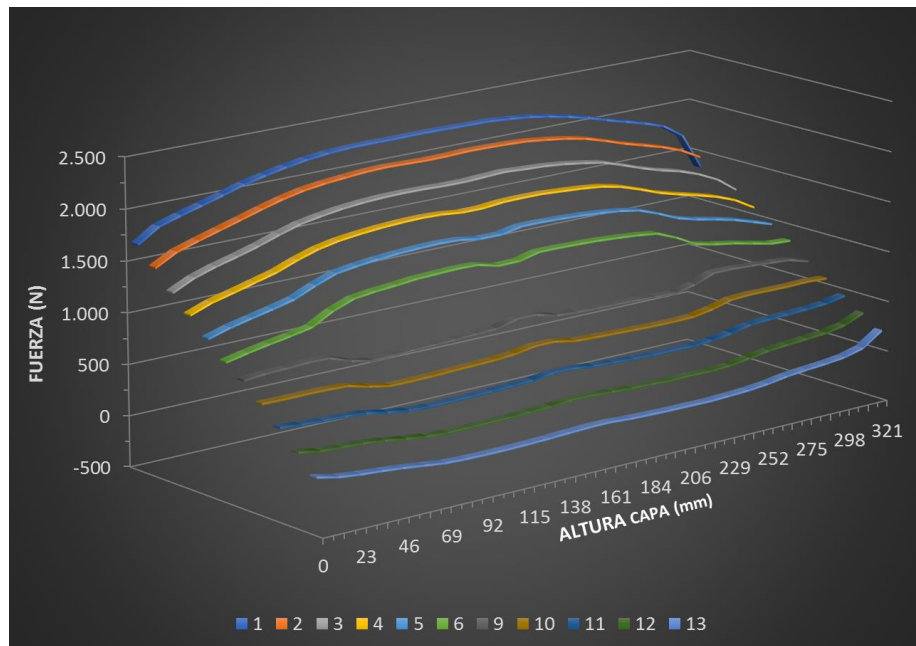


(a) Fuerza radial distribuida sobre la altura de los flejes.

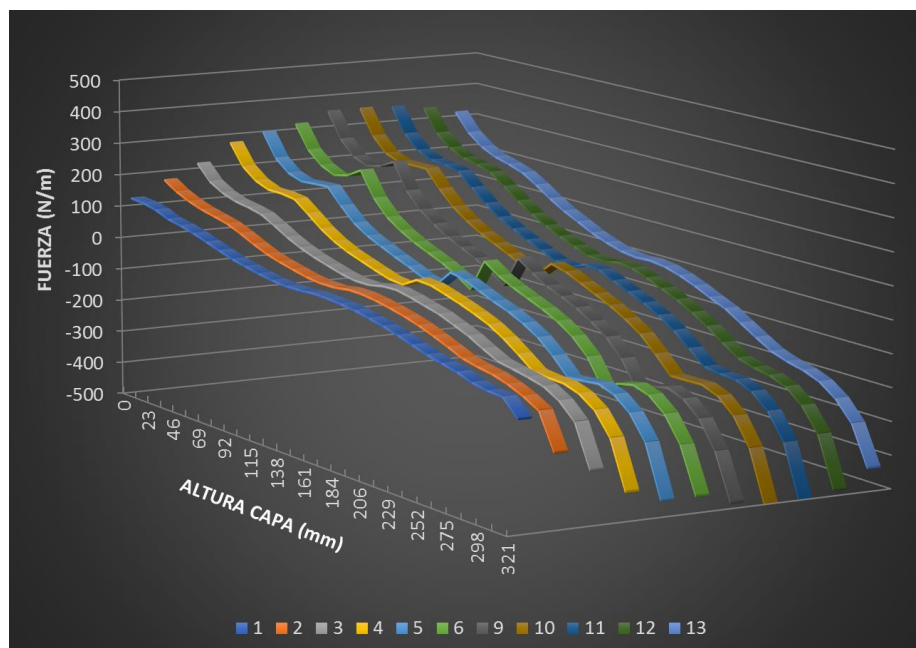


(b) Fuerza axial distribuida sobre la altura de los flejes.

Figura 5.6. Fuerzas radiales y axiales distribuidas para las capas del devanado de alta tensión en la región de la ventana del núcleo.



(a) Fuerza radial distribuida sobre la altura de las capas.

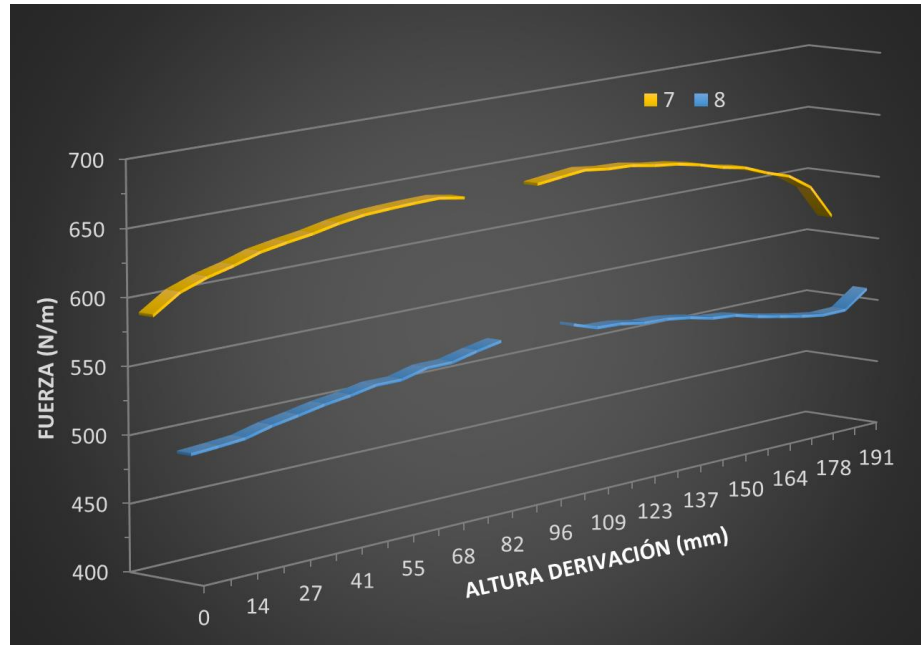


(b) Fuerza axial distribuida sobre la altura de las capas.

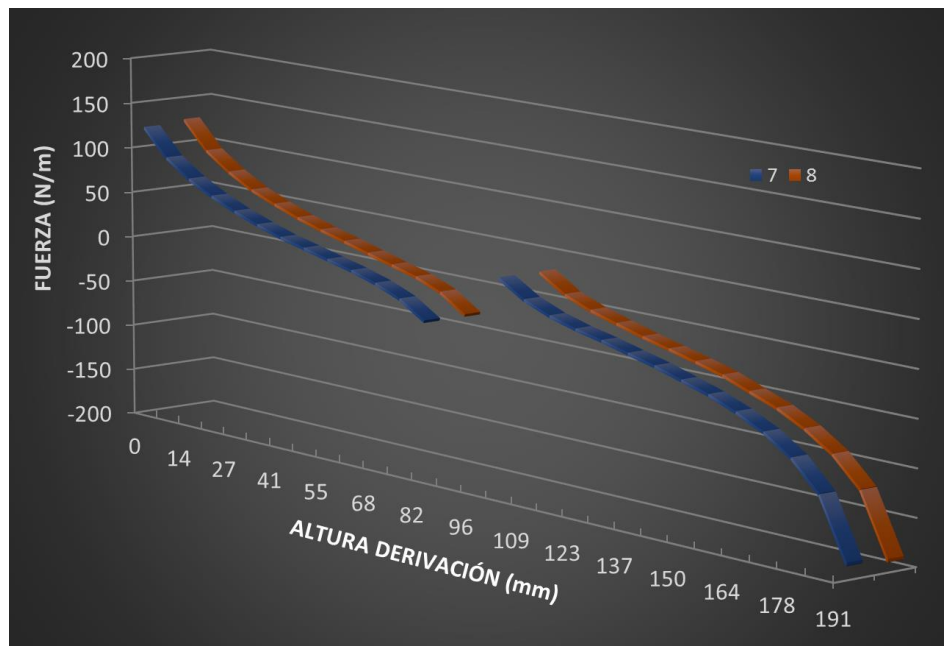
Las fuerzas radiales y axiales en las capas de las derivaciones del devanado de alta tensión (ver Figura 5.7) no se distribuyen de forma homogénea en cada segmento

de devanado, este fenómeno podría generar desplazamiento de los conductores en esta zona.

Figura 5.7 Fuerzas radiales y axiales distribuidas capas 7 y 8 devanado de alta tensión en la región de la ventana del núcleo.



(a) Fuerza radial distribuida sobre la altura de la capa.



(b) Fuerza axial distribuida sobre la altura de la capa.

Un comportamiento similar se encontró en la distribución de fuerzas radiales y axiales en la región fuera de la ventana, sin embargo, las fuerzas axiales alcanzan valores mayores comparados con los obtenidos en la ventana del núcleo, por el contrario, las fuerzas radiales son menores. En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las fuerzas de cortocircuito para el caso de aplicación, más información de las fuerzas calculadas se presenta en el **Anexo B**.

Tabla 5.3 Resultados de fuerzas para el caso de aplicación MEF detallado.

Devanado	Fuerza	Ventana	Fuera ventana
Baja tensión	Radial máxima promedio (N)	-1325	-1094
	Radial total promedio (N)	-32152	-26685
	Axial máxima promedio (N)	950	2813
	Axial acumulativa promedio (N)	1023	1098
Alta tensión	Radial máxima promedio (N)	1005	812
	Radial total promedio (N)	26706	20307
	Axial máxima promedio (N)	377	514
	Axial acumulativa promedio (N)	1359	2941

Nota 1: Resultados por metro de profundidad

Nota 2: Información adicional sobre estos resultados se encuentra en el **Anexo B**.

Las fuerzas radiales y axiales de cortocircuito fueron calculadas de igual forma a través de las fórmulas del capítulo 2, empleando el método de Roth y a partir de una simulación con geometría simplificada en MEF.

5.4 CÁLCULO DE FUERZAS POR FORMULAS

Se estimaron las fuerzas radiales totales (F_{rad}^* ecuación 2.2 capítulo 2), fuerzas axiales de compresión por pierna (F_{ax}^* ecuación 2.3 capítulo 2) y fuerzas de empuje (F_s ecuación 2.5 capítulo 2). En este análisis se tuvieron en cuenta las dimensiones de los devanados en la región dentro y fuera de la ventana del núcleo, las variables para el cálculo de fuerzas con las formulas sencillas se presentan en el **Anexo B**. En la Tabla 5.4 y Tabla 5.5 se presentan los resultados calculados, utilizar las dimensiones por fuera de la ventana permite obtener valores mayores de fuerzas, siendo estos resultados conservativos para el cálculo de esfuerzos mecánicos.

Tabla 5.4 Resultados de las fuerzas con las dimensiones de la ventana principal.

Fuerza radial total devanado alta tensión ventana (kN)	332,294
Fuerza radial total devanado de baja tensión ventana (kN)	-191,8856
Fuerza axial de compresión por pierna ventana (kN)	25,2531
Fuerza de empuje final alta tensión ventana (kN)	9,8897
Fuerza de empuje final baja tensión ventana (kN)	5,71

Tabla 5.5 Resultados de las fuerzas con las dimensiones fuera de la ventana.

Fuerza radial total devanado alta tensión fuera ventana (kN)	642,1821
Fuerza radial total devanado de baja tensión fuera ventana (kN)	-361,768
Fuerza axial de compresión por pierna fuera ventana (kN)	92,615
Fuerza de empuje final alta tensión fuera ventana (kN)	19,1126
Fuerza de empuje final baja tensión fuera ventana (kN)	10,7669

5.5 CÁLCULO DE FUERZAS CON EL MÉTODO DE ROTH

El método de Roth se utilizó para el cálculo de fuerzas radiales y axiales, los devanados fueron modelados como bloques rectangulares con el número total de espiras, 1200 en alta tensión y 11 en baja tensión, las distancias correspondieron a las presentes en la ventana del núcleo. La altura de los devanados se dividió en 100 segmentos y se utilizaron 30 armónicos, en la Tabla 5.6 se presentan los resultados del método de Roth.

Tabla 5.6 Resultados de fuerzas utilizando el método de Roth.

Fuerza radial total devanado alta tensión (kN)	427,21
Fuerza radial total devanado baja tensión (kN)	-393,42
Fuerza axial máxima de compresión devanado alta tensión (kN)	670,45
Fuerza axial máxima de compresión devanado baja tensión (kN)	1875,83
Fuerza axial máxima extremos alta tensión (kN)	6,7
Fuerza axial máxima extremos baja tensión (kN)	18,75

5.6 CÁLCULO DE FUERZAS CON MEF SIMPLIFICADO

Se calcularon las fuerzas a través de simulaciones simplificadas con el MEF, los devanados fueron simulados como un bloque con el número de espiras total y la corriente de cortocircuito, las dimensiones fueron las de la región de la ventana del núcleo, en la Tabla 5.7 se presentan los resultados con MEF simplificado.

Tabla 5.7 Resultados de fuerzas utilizando el MEF simplificado.

Fuerza radial total devanado alta tensión (kN)	463,426
Fuerza radial total devanado baja tensión (kN)	-303,147
Fuerza axial máxima de compresión devanado alta tensión (kN)	625,498
Fuerza axial máxima de compresión devanado baja tensión (kN)	546,632
Fuerza axial máxima extremos alta tensión (kN)	8,350
Fuerza axial máxima extremos baja tensión (kN)	8,008

Al comparar los métodos (ver Tabla 5.8) se encuentra que los resultados de las fuerzas radiales presentan menores diferencias que los obtenidos para las fuerzas axiales, sin embargo, los modelos simplificados no permiten considerar el efecto de la distribución no homogénea de la densidad de corriente en los flejes del devanado de baja tensión. En un trabajo desarrollado en la Universidad del Valle, se encontró que el método de Roth presentaba algunas diferencias para el cálculo de las fuerzas axiales máximas en los extremos de los devanados, las diferencias podrían atribuirse al efecto de las funciones trigonométricas involucradas en el algoritmo, este tema está en revisión por parte de un nuevo trabajo de investigación [60].

Tabla 5.8 Comparación resultados de fuerzas según el método.

Fuerza (kN)	MEF detallado	MEF simplificado	Formulas sencillas	Método Roth
Radial total AT	452,26	463,42	332,29	427,21
Radial total BT	-295,30	-303,14	-191,88	-393,42
Axial máxima extremos AT	10,570	8,350	-	6,70
Axial máxima extremos BT	22,095	8,008	-	18,75
Axial compresión total AT	730,180	625,498	8,472	670,45
Axial compresión total BT	448,209	546,632	16,94	1875,83

5.7 CÁLCULO DE ESFUERZOS MECÁNICOS

El cálculo de los esfuerzos de cortocircuito se efectuó tomando como referencia los valores de las fuerzas obtenidas con el MEF detallado, se estimaron esfuerzos producidos por fuerzas radiales y axiales

5.7.1 Esfuerzos producidos por fuerzas radiales

En la Tabla 5.9 se presentan las variables y los valores de los esfuerzos circunferenciales promedio para los devanados de alta y baja tensión, los esfuerzos

circunferenciales se calculan con base en la fuerza radial total en cada uno de los devanados.

De igual manera se calcularon los esfuerzos circunferenciales producidos en la capa 1 del devanado de alta tensión y en el fleje 11 del devanado de baja, estos fueron seleccionados por presentar las mayores fuerzas radiales totales, los resultados se presentan en la Tabla 5.10.

Tabla 5.9 Esfuerzo circunferencial promedio en los devanados.

Fuerza radial total devanado alta tensión (kN)	452,26
Fuerza radial total devanado baja tensión (kN)	-295,30
Diámetro medio equivalente alta tensión (m)	0,451
Diámetro medio equivalente baja tensión (m)	0,282
Presión devanado alta tensión (N/mm ²)	0,958
Presión devanado baja tensión (N/mm ²)	-0,978
Espesor devanado alta tensión / baja tensión (m)	0,056 / 0,032
Esfuerzo circunferencial promedio alta tensión (MPa)	4,273
Esfuerzo circunferencial promedio baja tensión (MPa)	-4,353

Tabla 5.10 Esfuerzo circunferencial en la capa 1 AT y espira 11 de BT.

Fuerza radial total capa 1 alta tensión (kN)	65,802
Fuerza radial total fleje 11 baja tensión (kN)	-62,14
Diámetro medio equivalente capa 1 alta tensión (m)	0,37
Diámetro medio equivalente fleje 11 baja tensión (m)	0,33
Presión capa 1 alta tensión (N/mm ²)	0,167
Presión fleje 11 baja tensión (N/mm ²)	-0,174
Esfuerzo circunferencial capa 1 alta tensión (MPa)	9,37
Esfuerzo circunferencial fleje 11 baja tensión (MPa)	-15,31

Como complemento a los esfuerzos circunferenciales, se estimaron los esfuerzos de viga rígida en el devanado de baja tensión y los circunferenciales en la parte curva del devanado de alta tensión como se propone en [38]. En la Tabla 5.11 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5.11 Esfuerzos producidos por fuerzas radiales.

Módulo de sección $Z_{bt-recta}$ (mm ³)	611716
Profundidad del devanado $L_{bt-recta}$ (mm)	289,87
Carga distribuida $W_{bt-recta}$ (N/mm)	-1324,29
Esfuerzo de viga rígida parte recta devanado baja tensión (MPa)	-15,155
Módulo de sección $Z_{bt-curva}$ (mm ³)	1001870
Profundidad del devanado $L_{bt-curva}$ (mm)	153,75
Carga distribuida $W_{bt-curva}$ (N/mm)	-1094
Esfuerzo de viga rígida parte curva devanado baja tensión (MPa)	-2,151
Módulo de sección $Z_{at-recta}$ (mm ³)	933881
Profundidad del devanado $L_{at-recta}$ (mm)	467,23
Carga distribuida $W_{at-recta}$ (N/mm)	1004
Esfuerzo de viga rígida parte recta devanado alta tensión (MPa)	19,557
Presión $P_{at-curva}$ (N/mm ²)	1,587
Diámetro $D_{at-curva}$ (mm)	242,14
Espesor devanado $t_{at-curva}$ (mm)	72,77
Esfuerzo circunferencial parte curva devanado alta tensión (MPa)	2,640

5.7.2 Esfuerzos producidos por fuerzas axiales

Para determinar los esfuerzos producidos por las fuerzas axiales en los conductores solo se consideraron las espiras y capas con mayor estrés axial, estos se produjeron en la espira 1 del devanado de baja tensión y en la capa 10 de alta tensión, en la Tabla 5.12 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5.12. Esfuerzos de compresión axial en la espira 1 BT y la capa 10 AT.

Fuerza de compresión capa 10 devanado alta tensión (kN)	101,957
Fuerza de compresión fleje 1 devanado de baja tensión (kN)	33,740
Constante Cc capa 10 (mm)	3,36
Constante Cc fleje 1 (mm)	1,9
Diámetro equivalente capa 10 devanado alta tensión (mm)	558,92
Diámetro equivalente espira 1 devanado baja tensión (mm)	231,51
Esfuerzo de compresión axial capa 10 devanado alta tensión (MPa)	17,28
Esfuerzo de compresión axial espira 1 devanado baja tensión (MPa)	24,41
Fuerza de compresión devanado alta tensión (kN)	730,18

Fuerza de compresión devanado de baja tensión (kN)	448,20
Constante Cc devanado de alta tensión (mm)	43,68
Constante Cc devanado de baja tensión (mm)	20,90
Diámetro devanado de alta tensión (mm)	451,59
Diámetro devanado de baja tensión (mm)	282,41
Esfuerzo de compresión axial devanado de alta tensión (MPa)	11,78
Esfuerzo de compresión axial devanado de baja tensión (MPa)	24,17

5.8 CONCLUSIONES

La distribución no homogénea de la densidad de corriente en los devanados en flejes tiene efecto sobre las fuerzas radiales y axiales de cortocircuito, por lo tanto se recomienda en transformadores con este tipo de devanado que las fuerzas sean calculadas con simulaciones de baja frecuencia a través del MEF.

Las fuerzas radiales totales en los devanados de alta y baja tensión no presentaron diferencias significativas al comparar los métodos MEF detallado y Roth, la mayor diferencia se obtiene en la fuerza radial del devanado de baja tensión alcanzando un 33%; para las fuerzas axiales máximas las diferencias son del 36% para el devanado de alta tensión y 15% para el de baja tensión; para las fuerzas axiales acumulativas se obtiene un 8% para el devanado de alta tensión y 318% para el de baja. Para propósitos de cálculo de esfuerzos de cortocircuito se recomienda utilizar las fuerzas obtenidas con el método de elementos finitos detallado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las fallas por fuerzas radiales de cortocircuito se pueden presentar principalmente en las capas o flejes cercanos al canal de dispersión.

En las capas correspondientes a las derivaciones del devanado de alta tensión, las fuerzas radiales y axiales no se distribuyen simétricamente respecto a la altura de cada segmento de devanado, esto puede contribuir a que se presenten fallas por efecto de las fuerzas de cortocircuito en esta zona.

Las fuerzas axiales resultaron más significativas en las espiras cercanas al núcleo para el caso del devanado de baja tensión y en las capas más alejadas para el devanado de alta tensión, por lo tanto, estas zonas son más propensas a sufrir averías.

En este capítulo se calcularon las fuerzas y los esfuerzos para aplicar el procedimiento de validación teórica, en el capítulo 6 se realizará la comparación de los valores obtenidos con los límites propuestos por la norma IEC, también se revisarán las condiciones necesarias para utilizar el transformador de 400kVA como equipo de referencia con el propósito de validar la aptitud al cortocircuito de otros equipos.

CAPÍTULO 6 VALIDACIÓN DEL CASO DE APLICACIÓN

En la primera parte de este capítulo se comparan los valores de fuerzas y esfuerzos, calculados para el caso de aplicación, con respecto a los valores permisibles definidos por la norma IEC 60076-5 de 2006; en la segunda parte se evalúan las condiciones para utilizar el transformador de 400kVA como equipo de referencia para validar la aptitud al cortocircuito de transformadores con diseños similares.

6.1 REVISIÓN DE ESFUERZOS MECÁNICOS EN CASO DE APLICACIÓN

Una de las condiciones exigidas para la validación teórica de la aptitud al cortocircuito, es la de comparar las fuerzas y esfuerzos calculados respecto a los valores permisibles recomendados por la norma, en este proceso es importante conocer el esfuerzo de fluencia del 0,2% del material conductor.

Los devanados de alta y baja tensión del transformador bajo análisis fueron contruidos con aluminio, el esfuerzo de fluencia del 0,2% de conductores en aluminio utilizados en aplicaciones eléctricas está entre 65N/mm^2 y 130N/mm^2 [61], con el propósito de realizar un análisis conservativo se utilizó el valor de 65N/mm^2 para evaluar los esfuerzos mecánicos en el transformador.

En la Tabla 6.1 se comparan los esfuerzos calculados para el caso de aplicación con respecto a los valores máximos permisibles de la norma. Solo se han calculado estos esfuerzos ya que el diseño utilizado para el caso de aplicación no cuenta con muchos accesorios o estructuras de soporte donde la norma exige calcular esfuerzos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los esfuerzos circunferenciales de compresión por efecto de las fuerzas radiales, y los esfuerzos de compresión producto de las fuerzas axiales son los parámetros más críticos durante la aplicación del procedimiento de validación, esto debido a que los valores permisibles son menores comparados con otros esfuerzos.

Los esfuerzos del transformador bajo análisis no superaron los valores máximos permisibles recomendados por la norma IEC 60076-5 de 2006, por lo tanto, el equipo es teóricamente apto para soportar los esfuerzos dinámicos de cortocircuito.

Tabla 6.1 Verificación de esfuerzos máximos caso de aplicación 400kVA.

#	Esfuerzos mecánicos	Permisibles según IEC (MPa)	Permisibles en caso de aplicación (MPa)	Obtenidos en caso de aplicación (MPa)
1	Esfuerzos circunferenciales de tensión σ^*t	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	58,5	4,27 ⁽¹⁾ 9,37 ⁽²⁾ 19,56 ⁽³⁾ 2,64 ⁽⁴⁾
2	Esfuerzos circunferenciales de compresión σ^*c	$\leq 0,35 \cdot R_{P0,2}$	22,75	-4,35 ⁽⁵⁾ -15,31 ⁽⁶⁾ -15,51 ⁽⁷⁾ -2,15 ⁽⁸⁾
3	Esfuerzo equivalente de compresión circunferencial σ^*c, eq	$\leq 0,35 \cdot R_{P0,2}$	22,75	NO APLICA
4	Esfuerzos de flexión radial de conductores en espacio entre separadores axiales σ^*br	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	58,5	NO FUE CALCULADO
5	Esfuerzos de flexión axial en conductores en el espacio entre espaciadores radiales σ^*ba	$\leq 0,9 \cdot R_{P0,2}$	58,5	NO APLICA
6	Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales (d) σ^*sp	120	120	NO APLICA
7	Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor (e) σ^*pi	35	35	17,28 ⁽⁹⁾ 24,41 ⁽¹⁰⁾ 11,78 ⁽¹¹⁾ 24,17 ⁽¹²⁾
8	Esfuerzos de compresión en aislamiento final σ^*es y abrazaderas finales σ^*er	40	40	NO APLICA
9	Esfuerzos de compresión en anillos de presión comunes o placas de presión σ^*pr	80	80	NO APLICA
(1) Esfuerzo circunferencial promedio alta tensión (2) Esfuerzo circunferencial capa 1 alta tensión (3) Esfuerzo de viga rígida parte recta devanado alta tensión (4) Esfuerzo circunferencial parte curva devanado alta tensión (5) Esfuerzo circunferencial promedio baja tensión (6) Esfuerzo circunferencial espira 11 baja tensión (7) Esfuerzo de viga rígida parte recta devanado baja tensión (8) Esfuerzo de viga rígida parte curva devanado baja tensión (9) Esfuerzo de compresión axial capa 10 devanado alta tensión (10) Esfuerzo de compresión axial espira 1 devanado baja tensión (11) Esfuerzo de compresión en devanado completo alta tensión (12) Esfuerzo de compresión en devanado completo baja tensión				

6.2 REVISIÓN DE LAS CONDICIONES PARA UTILIZAR EL TRANSFORMADOR DEL CASO DE APLICACIÓN COMO EQUIPO DE REFERENCIA

Los esfuerzos calculados para el transformador de 400kVA son menores que los valores permisibles de la norma, adicionalmente el equipo fue sometido exitosamente a la prueba ya que los ensayos de rutina no mostraron variaciones

por fuera de los valores permitidos (ver Tabla 6.2), por lo anterior, este equipo podría ser utilizado como referencia para validar transformadores de diseño similar siempre y cuando cumplan las características de diseño presentadas en la Tabla 6.3 y los valores máximos de esfuerzos de la Tabla 6.4.

Tabla 6.2 Pruebas de rutina antes y después para el transformador de 400kVA.

Ensayos tap nominal	Antes	Después	Variación	Permitido
Z_{CC} [%]	5,51	5,89	7,00%	7,50%
I_{EXC} [A]	10,34	12,36	19,54%	25,00%

Tabla 6.3 Características constructivas de equipos similares.

Característica	Descripción
Tipo de operación	Transformador de distribución trifásico de dos devanados Devanado de alta tensión clase 15kV, devanado de baja tensión clase 1kV.
Diseño conceptual	Sumergido en aceite Núcleo enrollado Devanados concéntricos rectangulares
Arreglo de devanados	Devanado interno baja tensión Devanado externo alta tensión
Tipo de conductores	Fleje en aluminio baja tensión Conductor redondo esmaltado de aluminio en alta tensión
Tipo de devanados	Capa sencilla en fleje baja tensión Capa sencilla en alta tensión

Tabla 6.4 Valores máximos de esfuerzos en equipos similares.

#	Esfuerzos mecánicos en transformadores con núcleo tipo columnas	Valores máximos en equipos similares (MPa)
1	Esfuerzos circunferenciales de tensión σ^*t	$\leq 23,47$ ⁽¹⁾
2	Esfuerzos circunferenciales de compresión σ^*c	$\leq 17,06$ ⁽²⁾
3	Esfuerzo equivalente de compresión circunferencial σ^*c, eq	NO APLICA
4	Esfuerzos de flexión radial de conductores en espacio entre separadores axiales σ^*br	NO CALCULADO
5	Esfuerzos de flexión axial en conductores en el espacio entre espaciadores radiales σ^*ba	NO APLICA
6	Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales (d) σ^*sp	NO APLICA
7	Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor (e) σ^*pi	$\leq 20,74$ $\leq 29,29$
8	Esfuerzos de compresión en aislamiento final σ^*es y abrazaderas finales σ^*er	NO APLICA
9	Esfuerzos de compresión en anillos de presión comunes o placas de presión σ^*pr	NO APLICA
(1) y (2) se tomaron como referencia los valores máximos presentados en la Tabla 6.1		

Finalmente se debe revisar que la potencia de cortocircuito máxima absorbida por el transformador a comparar, este entre 30% y 130% de la potencia absorbida por el equipo de referencia, en la ecuación (6.1) se muestra el cálculo de la potencia absorbida y los límites que debe cumplir el equipo a comparar.

$$P_{absorbida} = \frac{S_n}{Z_{cc}} = \frac{400 \text{ kVA}}{0,0551} = 7259 \text{ kVA} \quad (6.1)$$

$$2177 \text{ kVA} \leq P_{absorbida \text{ similar}} \leq 9437 \text{ kVA}$$

La norma NTC 819 especifica valores máximos para la impedancia de cortocircuito en transformadores trifásicos con devanado de alta tensión entre 15kV y 46kV. (ver Tabla 6.5) [62], considerando estos valores se calcula la potencia absorbida para transformadores de diferentes capacidades. Comparando los valores de potencia absorbida, se podrían validar transformadores con potencias entre 150kVA y 500kVA.

Tabla 6.5 Valores máximos para la impedancia de cortocircuito en transformadores trifásicos con potencias entre 75kVA y 10000kVA.

Potencia Nominal (kVA)	Impedancia de cortocircuito (%)	Potencia absorbida (kVA)
75	6,0	1250
112,5	6,0	1875
150	6,0	2500
225	6,0	3750
300	6,0	5000
400	6,0	6667
500	6,0	8333
630	6,0	10500
750	6,0	12500
800	6,0	13333
1000	6,0	16667

Tomado de [62] y modificado

6.3 CONCLUSIONES

Se realizó la verificación teórica de los esfuerzos en el equipo de 400kVA con respecto a los valores permisibles de la norma, encontrándose que la unidad es

apta para soportar los esfuerzos de cortocircuito, condición que fue validada con la prueba real.

Los cálculos muestran que los esfuerzos producidos por fuerzas radiales están alejados de los valores permisibles según la norma, sin embargo, especial atención se debe tener con los esfuerzos de compresión radial ya que el límite permisible es menor comparado con los esfuerzos de tensión.

La condición de potencia de cortocircuito absorbida indirectamente restringe la potencia nominal de los equipos a ser validados por medio de un equipo de referencia, en el caso de estudio, con los resultados del transformador de 400kVA se podrían validar equipos con potencias entre 150kVA y 500kVA.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se calcularon las fuerzas y esfuerzos para el caso de un transformador trifásico de dos devanados con potencia de 400kVA, además se confrontaron los esfuerzos con los valores permitidos por la norma, llegándose a la conclusión que el equipo es teóricamente apto para soportar la condición de cortocircuito.

Se demostró que es posible utilizar un transformador sometido al ensayo como equipo de referencia para validar la aptitud al cortocircuito de otros transformadores. En el caso de análisis, con el equipo de 400kVA se podrían validar transformadores entre 150 y 500kVA que tengan un diseño similar y cumplan con las restricciones de esfuerzos máximos.

El procedimiento de validación teórica planteado por la norma IEC está orientado a la revisión de transformadores con potencias mayores a 2500kVA con devanados concéntricos circulares. En este proyecto se plantea la posibilidad de aplicar dicha validación para transformadores de menor capacidad, con devanados concéntricos rectangulares, haciendo una revisión de los principales esfuerzos generados.

El cálculo de las fuerzas de cortocircuito para transformadores con devanados fabricados en conductor convencional (rectangular o redondo) se puede efectuar con métodos analíticos como el de Roth, sin embargo, para devanados elaborados en flejes se sugieren realizar simulaciones en el dominio de la frecuencia o temporales con programas de Elementos Finitos.

La distribución no homogénea de la densidad de corriente en los flejes del devanado de baja tensión tiene efecto sobre las fuerzas de cortocircuito. En el fleje más cercano al núcleo, la fuerza axial es dominante alcanzando valores máximos en los extremos. El fleje ubicado cerca al canal de dispersión experimenta fuerzas predominantemente radiales de naturaleza compresiva.

En el caso del devanado en capas, las fuerzas radiales son más significativas en la medida que las capas estén más cercanas al canal de dispersión, por su parte, las

fuerzas axiales tienen un comportamiento opuesto, siendo predominantes en las capas más alejadas.

Las fuerzas en las capas de las derivaciones no presentan una distribución simétrica sobre la altura de cada segmento de bobina, esta condición es propicia para que se generen fallas por acción de las fuerzas de cortocircuito.

Se encontró que las fuerzas axiales son mayores en el devanado de baja tensión que en las capas de alta tensión, tal como está documentado en las referencias bibliográficas.

Los resultados de las fuerzas obtenidos en la región por fuera de la ventana muestran fuerzas axiales mayores, comparadas con las resultantes en la ventana del núcleo, por lo tanto, en esta zona es más probable que se presenten fallas por efecto de estas fuerzas.

Los esfuerzos producidos por las fuerzas radiales de compresión, en el caso de devanados internos, resultan ser más críticos que los generados en devanados externos, ya que el valor máximo permisible es mucho menor para este tipo de esfuerzos.

Los esfuerzos de compresión axial en los flejes de baja tensión resultaron mayores que los producidos en las capas de alta tensión, siendo más probable que se produzca daño del papel aislante en estas bobinas.

Actualmente la norma técnica colombiana NTC 532 solamente considera el ensayo en laboratorio como el método para verificar la aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución. Podrían hacerse estudios complementarios a este trabajo, para analizar si es factible emplear el método de validación teórica como una alternativa frente a la prueba.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

En un proyecto financiado con recursos de la Universidad del Valle, se realizarán mediciones de los esfuerzos de cortocircuito en un transformador trifásico de 75kVA, los resultados serán comparados con los calculados a través de la metodología propuesta en este trabajo.

La metodología de diseño preferida por los fabricantes nacionales corresponde a equipos con núcleo enrollado y devanados rectangulares concéntricos, se requiere realizar un análisis de los modos de falla en estos transformadores ya que es mínima la bibliografía relacionada con este tema.

Las fuerzas de cortocircuito generadas en los conductores de los devanados representan un fenómeno dinámico que se trasmite a otros componentes del transformador, un análisis completo del fenómeno debería incluir simulaciones acoplando los módulos de electromagnetismo y resistencia de materiales en programas de elementos finitos.

El cálculo de las fuerzas de cortocircuito utilizando el programa FEMM podría ser automatizado en un aplicativo en lenguaje de programación LUA, esto reduciría el tiempo de modelado y permitiría obtener resultados basados en MEF, ingresando solamente los parámetros geométricos y eléctricos del transformador.

Desarrollar un aplicativo en el cual se incluyan las fórmulas teóricas para el cálculo de fuerzas y esfuerzos en transformadores con núcleo tipo núcleo tipo columnas y acorazado.

La metodología de validación teórica propuesta en este trabajo requiere de más casos de aplicación para verificar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-1 Power transformers - Part 1: General*, 3rd ed. Geneve, 2011.
- [2] Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, "Large power transformers and the U.S. electric grid," Washington, 2012.
- [3] W. Bartley, "Investigating Transformers failures," in *Annual technical conference*, 2003, p. 9.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Std C57.12.90-2015 Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers." New York, p. 120, 2016.
- [5] International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-5 Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*, 3rd ed. Geneve, 2006.
- [6] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, *NTC 532 Transformadores Aptitud para soportar el Cortocircuito*, 2nd ed. Bogotá, 1999.
- [7] I. F. Orduña, G. Aponte, and D. F. Echeverry, "Compensación Paralelo de Reactivos Durante la Prueba de Aptitud al Cortocircuito en Transformadores de Distribución," *Inf. tecnológica*, vol. 23, no. 5, pp. 47–56, 2012.
- [8] G. Bertagnolli, *The ABB Approach to Short-circuit duty of power transformers*, 3rd ed. Zurich, 2006.
- [9] K. Karsai, D. Kerényi, and K. László, *Large Power Transformers*, 1st ed. Budapest, Hungria: Elsevier Science Publisher, Akademiai Kiado, 1987.
- [10] M. S. Aslam Minhas, "Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits," University of the Witwatersrand, 2007.
- [11] S. V Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, 4th ed. Mumbai, India: Taylor & Francis, 2004.
- [12] J. J. Winders, *Transformers Principles and Applications*. 2002.
- [13] A. De Azevedo, I. Rezende, A. Delaiba, J. De Oliveira, B. Carvalho, and S. Herivelto De, "Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM," in *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, pp. 1–6.
- [14] M. J. Heathcote, "The J & P Transformer Book, A Practical Techology of The Power Transformer," *Reed Educ. Prof. Publ. Ltd*, p. 844, 1998.
- [15] M. Patel, "Dynamic Response of Power Transformers Under Axial Short Circuit Forces Part I - Winding and Clamp as Individual Components," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, no. 5, pp. 1558–1566, Sep. 1973.
- [16] International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-5 Annex B Calculation method for the demostration of the ability to withstand the dynamic effects of Shortcircuit*. Geneve, 2006.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, Analysis, and Reporting for Power Transformers and Shunt Reactors," *IEEE Std C57.125-2015 (Revision of IEEE*

- Std C57.125-1991*). pp. 1–84, 2015.
- [18] ABB, “Short – Circuit withstand capability for distribution and power transformers,” Zurich, p. 58, 2013.
 - [19] Gary McLeish, “Designing transformers to withstand system faults and high acceleration,” 2013.
 - [20] M. Mouhamad, C. Elleau, F. Mazaleyrat, C. Guillaume, and B. Jarry, “Short-Circuit Withstand Tests of Metglas 2605SA1-Based Amorphous Distribution Transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 4489–4492, Oct. 2011.
 - [21] D. Roller, “The Modern Transformer: Rectangular Core Design and Construction.” ABB, Boston, p. 25, 2013.
 - [22] Power Core, “Power Core products,” 2015. [Online]. Available: <http://www.powercores.com/product.php>. [Accessed: 21-Jul-2017].
 - [23] G. Aponte, H. Cadavid, and A. Lurie, “Modelamiento y evaluación de fuerzas por cortocircuito en transformadores de distribución,” in *III Jornadas latinoamericanas en alta tensión y aislamiento eléctrico ALTAE’97*, 1997, pp. 90–96.
 - [24] ABB-Group, *Transformer Handbook*, 2nd ed. Zurich, Suiza: ABB, 2004.
 - [25] G. Diaz, “Nueva metodología para el modelado magnético de transformadores con devanados en conductor laminado,” Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2013.
 - [26] M. Waters, *The Short-circuit Strength of Power Transformers*, 1st ed. Londres: MacDonald, 1966.
 - [27] International Electrotechnical Commission, *IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*. Geneve, 2016.
 - [28] P. Hammond, “Roth’s method for the solution of boundary-value problems in electrical engineering,” *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 114, no. 12. pp. 1969–1976, 1967.
 - [29] S. Saffari, J. Faiz, A. Fereidunian, and B. M. Ebrahimi, “Analytical estimation of short circuit axial and radial forces on power transformers windings,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 2, pp. 250–260, Feb. 2014.
 - [30] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics : HomePage,” 2014. [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. [Accessed: 30-Jun-2016].
 - [31] J. Sykulski, *Computational magnetics*. Springer Science & Business Media, 2012.
 - [32] A. Soto, D. Souto, J. Turowski, X. M. Lopez-Fernandez, and D. Couto, “Software for fast interactive three-dimensional modeling of electromagnetic leakage field and magnetic shunts design in Shell type transformers,” in *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, 2008, pp. 1–6.
 - [33] G. Diaz and E. Mombello, “Semianalytic Integral Method for Fast Solution of Current Distribution in Foil Winding Transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 9, pp. 1–9, Sep. 2015.
 - [34] N. Mullineux, J. R. Reed, and I. J. Whyte, “Current distribution in sheet- and foil-wound transformers,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 116, no. 1, p. 127, 1969.
 - [35] M. M. El-Missiry, “Calculation of current distribution and optimum dimensions

- of foil-wound air-cored reactors,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 124, no. 11, p. 1073, 1977.
- [36] M. M. El-Missiry, “Electromagnetic forces in sheet-and foil-wound transformers,” *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, vol. 129, no. 2, p. 86, 1982.
 - [37] B. S. Ram, “Loss and current distribution in foil windings of transformers,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 6, p. 709, 1998.
 - [38] R. R. P. Sinha, “Evaluation of Short-Circuit Strength of Distribution Transformers,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 7, pp. 2249–2259, Jul. 1982.
 - [39] A. G. Kladas, M. P. Papadopoulos, and J. A. Tegopoulos, “Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2D and 3D models based on the theory of images and the finite element method compared to measurements,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 5, pp. 3487–3490, 1994.
 - [40] H. Cadavid, “Магнитное поле и стойкость при коротком замыкании распределительных трансформаторов,” Московский энергетический институт– МЭИ, 1995.
 - [41] H. Cadavid, Z. B.П., Л. А.И., and П. А.Н., “Study of resistance of distribution transformers with rectangular windings to short-circuit,” *Elektrotehnika*, no. 4, p. 9, 1997.
 - [42] S. Salon, B. LaMattina, and K. Sivasubramaniam, “Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3521–3523, 2000.
 - [43] W. J. McNutt, C. J. McMillen, P. Q. Nelson, and J. E. Dind, “Transformer short-circuit strength and standards; A state-of-the-art paper,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 94, no. 2, pp. 432–443, 1975.
 - [44] G. Aponte, H. Cadavid, F. Castro, and C. Lozano, “La prueba de cortocircuito y la calidad de los transformadores en Colombia,” *Energía y Computación, Vol 6, No 1, Ed 12*, Cali, pp. 91–95, May-1997.
 - [45] TESAR, “Ability to Withstand Dynamic Effects of Short Circuit Comparative Statement,” Milan, 2010.
 - [46] G. Leber, H. Passath, M. Ryadi, and P. Hurlet, “Short circuit verification for a 570 MVA, 420 kV single-phase GSU-transformer by SC-withstand tests on a mock-up unit,” *e i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 131, no. 8, pp. 340–348, Dec. 2014.
 - [47] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE Std C57.12.00-2015 Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.” New York, p. 74, 2016.
 - [48] American National Standards Institute, “ANSI/IEEE C37.010 IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis,” p. 54, 1979.
 - [49] *IEEE Std 551-2006 Recommended Practice for Calculating AC Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.

- [50] CIGRE WG 04 study Committee 12, "Calculation of short-circuit forces in transformers," *ELECTRA*, vol. 67, p. 47, 1979.
- [51] P. Macor, G. Robert, D. Girardot, J. . Riboud, T. Ngnegueu, J. . Arthaud, and E. Chemin, "The Short-Circuit Resistance of Transformers : The feedback in France based on tests, service and calculation approaches," in *Study comittee 12-102_2000*, 2000, p. 14.
- [52] A. Lurie, V. Zenova, A. Panibratets, E. Leviskaya, A. Drovisheskij, L. Milman, and H. Cadavid, *Elektrodinamicheskaya stoikost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh (Electrodynamical Resistance of Transformers and Reactors under Short Circuits)*. Moscú: Znak, 2005.
- [53] Weidmann, "Insulation Paper," 2015. [Online]. Available: <http://www.weidmann-electrical.com/en/insulation-paper-paper.html>. [Accessed: 15-Oct-2016].
- [54] Centelsa, "Alambres Magneto." Cali, Colombia, p. 18, 2012.
- [55] DuPont, "NOMEX® type 418 and 419 Technical Data sheet." Richnmond, p. 4, 2003.
- [56] A. Ahmad, I. Javed, W. Nazar, and M. A. Mukhtar, "Short Circuit Stress Analysis Using FEM in Power Transformer on H-V Winding Displaced Vertically & Horizontally," *Alexandria Eng. J.*, p. 11, Nov. 2016.
- [57] S. Jamali, M. Ardebili, and K. Abbaszadeh, "Calculation of short circuit reactance and electromagnetic forces in three phase transformer by finite element method," in *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, p. 1725–1730 Vol. 3.
- [58] H.-M. Ahn, Y.-H. Oh, J.-K. Kim, J.-S. Song, and S.-C. Hahn, "Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 819–822, Feb. 2012.
- [59] Hyun-Mo Ahn; Ji-Yeon Lee; Joong-Kyoung Kim; Yeon-Ho Oh; Sang-Yong Jung; Sung-Chin Hahn, "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1267–1272, May 2011.
- [60] W. Correa, "Análisis de los esfuerzos dinámicos generados en un transformador de hasta 10 MVA durante una condición de cortocircuito franco," Universidad del Valle, 2014.
- [61] M. Hrkac, "Aluminium Transformers Technical and Economical Analysis." Guatemala, p. 25, 2012.
- [62] Instituto Colombiano De Normas Técnicas y Certificación, Ed., *NTC 819 Electrotecnia Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito.*, 4th ed. Bogotá, 1995.

ANEXO A FORMULACIONES CÁLCULO DE ESFUERZOS

En este anexo se presentan expresiones para el cálculo de esfuerzos transmitidos a estructuras de apoyo y accesorios del transformador durante una condición de cortocircuito.

A1 Esfuerzo de flexión en cruces y transposiciones de conductores en devanados helicoidales

La flexión en cruzamientos de conductores tipo discos y transposiciones de devanados helicoidales es la tendencia del conductor a doblarse axialmente y radialmente cuando se somete a esfuerzos de compresión, cuando este fenómeno ocurre los conductores se desplazan y los cruzamientos se deforman. Los factores que juegan un rol importante en la deformación son el tamaño del conductor, límite de elasticidad del material, el paso axial de los cruzamientos y el radial de las transposiciones, la ecuación (A.1) presenta una formulación teorica para el calculo del esfuerzo de compresión local el cual esta en función de la fuerza magnetomotriz.

$$\sigma_{lc}^* = 0,628 \cdot \frac{|M|}{H_w} \cdot J_r \cdot D_c \cdot r^2 \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (A.1)$$

$|M|$ = F.M.M que cruza el conductor [A]

$$|M| = N \cdot I_r \cdot \frac{(2m-1)}{2m} \text{ para arreglos de 2 devanados con m conductores en la extensión radial}$$

D_c = Diámetro del conductor en los cruzamientos o transposiciones [mm]

r, k se definieron en la ecuación 2.2 del capítulo 2

Las deformaciones en cruzamientos de devanados en discos y transposiciones de devanados helicoidales son eventos poco comunes y existen evidencias de que este fenomeno generalmente se presenta en devanados elaborados con conductores continuamente transpuestos sin adherente.

A2 Esfuerzos de flexión en cruzamientos series entre capas y devanados helicoidales dobles

Este fenomeno comunmente se presenta en devanados elaborados con conductores continuamente transpuestos sin adherente los cuales son sometidos a esfuerzos de compresión, aunque estos eventos son poco comunes los fabricantes recomiendan utilizar cruzamientos distribuidos en devanados tipo discos, helicoidales dobles y capas.

A3 Esfuerzos de tensión en correas de sujeción en espiras finales

Cuando los conductores de los devanados son sometidos a esfuerzos circunferenciales de tensión, las espiras en la parte final del devanado tienden a deshacer la bobina, este fenomeno ocurre en devanados helicoidales y en capas ya que el ancho radial de los devanados es ocupado por una espira, contrario a lo que ocurre en devanados en discos. Para contrarrestar el problema, sobre las espiras finales de los devanados se ubican dispositivos de sujeción no metalicos de alta resistencia mecánica (cintas de papel dielectrico, fibra de vidrio entre otros).

El medio de sujeción de los finales de las bobinas debe cubrir 2 a 3 espiras adyacentes y estar en la capacidad de desarrollar una fuerza hacia el interior que contrarreste la fuerza radial que surge en las espiras, en la ecuación (A.2) se presenta una expresión para determinar el esfuerzo de tensión en las correas de sujeción de las espiras finales en función del ancho de la correa y el tamaño de las espiras.

$$\sigma_b = \frac{\sigma_t \cdot A_{lt} \cdot \nu}{b_b \cdot H_{lt}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (A.2)$$

σ_t = Esfuerzo circunferencial de tensión promedio en devanado exterior [N/mm²]

A_{lt} = Area de la sección transversal de la última espira [mm²]

b_b = Espesor radial de la correa [mm]

H_{lt} = Altura neta de los conductores de la ultima espira [mm]

ν = relación de densidad de flujo magnético axial en región de la ultima espira a la densidad máxima en el espacio entre los devandos dividido por 2

A4 Esfuerzos originados por fuerzas axiales en aislamientos, componentes estructurales y de sujeción

Debido a que las fuerzas axiales son sensibles a la distribución de la fuerza magnetomotriz y la posición de las bobinas su calculo debe ser efectuado para varios casos, diferentes posiciones de los taps y desplazamientos de las bobinas, para este proposito se tienen en cuenta los desplazamientos aleatorios δ_r los cuales simulan las variaciones de ubicación de las bobinas en el proceso de manufactura y desplazamientos equivalentes δ_e para considerar el efecto del paso de las bobinas.

El desplazamiento equivalente simulando el efecto de la inclinación de los conductores en devanados helicoidales y en capas se expresa en términos del paso de las bobinas w_p . La inclinación de los conductores resulta en una distorsión de las líneas locales de campo magnético generando fuerzas axiales que afectan en mayor proporción a los accesorios inherentes a uno de los devanados, mientras que los elementos comunes a los dos devanados se ven menos afectados por este fenómeno, por ello se sugiere utilizar dos valores de desplazamientos equivalentes.

$$\delta_{e1} = \frac{3 \cdot w_p}{8} = \text{para elementos que pertenecen solamente a un devanado}$$

$$\delta_{e2} = \frac{1 \cdot w_p}{4} = \text{para elementos comunes a como mínimo dos devanados con F.M.M opuesta}$$

Si las bobinas no tienen paso se debe considerar que estan desplazadas unicamente por la cantidad δ_r , el valor máximo de las fuerzas axiales de cortocircuito será el utilizado para propósitos de diseño.

Si hay un solo devanado con inclinación o paso, los cálculos se realizan de la siguiente forma:

$\delta_a = \text{Max} \{ \delta_r, \delta_{e2} \}$ conocido como el desplazamiento promedio cuando se trata de componentes comunes a un par de devanados.

$\delta_p = \delta_r + \delta_{e1}$ conocido como desplazamiento pico cuando se habla de elementos asociados a un solo devanado con paso.

Si se tienen devanados con un número par de capas iguales contruidos de forma alternada positiva y negativa, el desplazamiento equivalente se asume igual a cero. Mientras que, para devanados con un número impar de capas iguales contruidos de forma alternada, el paso es igual a la altura de una espira dividido por el número de capas. Para devanados helicoidales conformados por dos capas iguales con polaridades opuestas conectadas en serie el paso es igual a cero.

El efecto de las fuerzas axiales se reduce cuando se disponen bobinas con circuitos axiales en paralelo, si las bobinas están dispuestas simétricamente los circuitos en paralelo comparten la misma corriente, sin embargo, si se presenta un desplazamiento la igualdad de las corrientes desaparece y estas se redistribuyen de tal forma que se reducen las fuerzas axiales.

Como se explicó en el capítulo 2, en la dirección axial los devanados pueden considerarse como un sistema elástico el cual puede liberar una gran cantidad de energía cuando la corriente pasa por cero, tal como ocurre en el caso de un resorte la fuerza restauradora es proporcional a la fuerza que comprime el sistema elástico, por lo tanto, para el diseño de accesorios dispuestos a lo largo de la altura de los devanados se tienen en cuenta dos parámetros, fuerza de compresión máxima (FC_{wi}) y fuerza de empuje final (FE_{wi}). Para el cálculo de esfuerzos transmitidos a las estructuras de soporte producidos por las fuerzas axiales se definen los siguientes factores.

$$FS_u^* = \sum_{i=1}^n FE_{wi-up} = \text{fuerza resultante de todos los devanados hacia el yugo superior [kN]}$$

$$FS_d^* = \sum_{i=1}^n FE_{wi-down} = \text{fuerza resultante de todos los devanados hacia el yugo inferior [kN]}$$

Los elementos estructurales comunes a los dos devanados se deben especificar de acuerdo a dos fuerzas las cuales son calculadas teniendo en cuenta desplazamientos promedio δ_a .

FM^{*}_w mayor de todas las fuerzas de compresión que aparecen en los devanados (aplica solamente para devanados en discos y helicoidales)

FM^{*}_y mayor de todas las fuerzas resultantes hacia el yugo

$$FM_w^* = \max \left[FC_{wi}^* \right] \text{ [kN]}$$

$$FM_y^* = \max \left[FS_u^*, FS_d^* \right] \text{ [kN]}$$

A5 Esfuerzos en los elementos de soporte entre la bobina y los yugos

Los esfuerzos de compresión producidos por las fuerzas axiales en los elementos de soporte ubicados entre las bobinas y los yugos para cada devanado físico i se calculan utilizando la fuerza de diseño $FE_{si}^* = \varepsilon FE_{wi}^*$, donde ε es un factor de impacto estimado para devanados en discos y helicoidales, actualmente no se conoce un valor del factor de impacto y debe ser objeto de investigación (ver ecuación (A.3)).

$$\sigma_{cesi}^* = \frac{\varepsilon \cdot FE_{wi}^* \cdot 10^3 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}{A_{esi}} \quad (A.3)$$

FE_{wi}^* = máxima fuerza final calculada con desplazamiento pico [kN]

A_{esi} = Area de la porción estresada de los apoyos finales [mm^2]

para elementos en contacto con la circunferencia completa de los devanados

A_{esi} es el área de la sección transversal de estos anillos

$$A_{esi} = \pi \cdot D_{mwi} \cdot b_{wi}$$

D_{mwi} = es el diámetro medio de la bobina i [mm]

b_{wi} = es el espesor radial neto de la bobina i [mm]

para componentes caracterizados por la presencia de espaciadores o en contacto con ellos

$$A_{esi} = c \cdot z \cdot b_{wi}$$

b_{wi} = es el espesor radial neto de la bobina i [mm]

c = ancho radial de cada espaciador (a lo largo de la circunferencia) [mm]

z =número de espaciadores radiales en la circunferencia

A6 Esfuerzos en esparcidores de devanados y anillos electrostáticos dispuestos en la altura media de los devanados

El cálculo de los esfuerzos en estos elementos se realiza teniendo en cuenta la fuerza FE^*_{spi} y la ecuación (A.4)

$$\sigma^*_{espi} = \frac{F^*_{spi} \cdot 10^3}{A_{spi}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (A.4)$$

$$F^*_{spi} = \max \left[\varepsilon \cdot FE^*_{wi}, FS^*_{wi} \right]$$

FE^*_{wi} fue definido en la ecuación anterior [kN]

FS^*_{wi} = Fuerza de compresión del devanado i en la ubicación del esparciador o anillo calculada

utilizando el desplazamiento pico [kN]

FS^*_{wi} también puede ser remplazado por FC^*_{wi}

FE^*_{wi} = máxima fuerza final calculada con desplazamiento pico [kN]

A_{esi} = Área de la porción estresada de los esparcidores o anillos electrostáticos [mm^2]

A7 Fuerza crítica para inclinación de conductores

La inclinación de los conductores consiste en la rotación de estos sobre su eje de simetría debido a la acción de fuerzas axiales, este fenómeno conduce a ruptura de material aislante, fallas entre espiras y aumento de las fuerzas. En términos cualitativos la inclinación de los conductores es el resultado de una relación grande entre la altura y el ancho de los conductores, o espesor del papel al ancho del conductor, también puede producirse por falta de apriete en el proceso de construcción del devanado.

La fuerza axial crítica para la inclinación de los conductores de cobre está dada en la ecuación (A.5).

$$F^*_{axcr} = \left[K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot b_{eq} \cdot h^2}{D_{mw}} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot b_{eq}^3 \cdot \pi \cdot D_{mw} \cdot \gamma}{h} \right] \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3} [kN] \quad (A.5)$$

E_0 = Modulo de elasticidad del cobre = $1,1 \cdot 10^5$ N/mm²

n = número de hilos o conductores dobles en el ancho radial del devanado para conductores planos

$n = g \cdot (F-1)/2$ en caso de CTC, siendo g el número de CTC en el ancho del devanado y F el número de hilos del CTC

b_{eqv} = espesor radial del conductor en conductores planos [mm]

= el doble del espesor radial de un conductor en el caso de conductores dobles adheridos [mm]

= el espesor radial de un hilo en el caso de CTC no adheridos [mm]

D_{mw} = diámetro promedio del devanado [mm]

$X = \frac{C \cdot Z}{\pi \cdot D_{mw}}$ = factor de cubrimiento del espaciador para devanados en discos y helicoidales, para capas=1

C = Espesor radial del espaciador en la dirección de la circunferencia[mm]

Z = Número de espaciadores radiales en la circunferencia

h = altura del hilo si el conductor es plano [mm]

= doble de la altura de un hilo si hay dos conductores paralelos en dirección axial cubiertos por un papel [mm]

= altura de un hilo si el conductor es CTC [mm]

γ = constante de forma del conductor

= 1,0 para conductores con esquinas redondeadas

= 0,85 para conductores redondos completamente

K_1 = coeficiente para el termino de giro=0,5

K_2 = coeficiente bedding

= 45 para conductores sencillos y dobles

= 22 para CTC no adheridos

K_3 = factor para considerar el grado de dureza del cobre (ver tabla 3)

K_4 = factor para considerar inclinación dinámica (ver tabla 4)

En la Tabla A.1 y Tabla A.2 se observan los valores de las constantes K_3 y K_4 a utilizar para el cálculo de la fuerza axial critica de inclinación de los conductores.

Tabla A.1 Valores constante K3 utilizada para el cálculo de la fuerza critica de inclinación

$\sigma_{0,2}[\text{N/mm}^2]$	K_3
Recocido	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
Mayor a 230	1,4

Tabla A.2 Valores constante K4 para el cálculo de la fuerza critica de inclinación.

Tipo de conductor	Tipo de devanado	
	Disco o helicoidales	Capas
Hilos o conductor doble	1,4	1,0
CTC no adherido	2,0	1,2

Los devanados contruidos en conductores continuamente transpuestos adheridos son muy resistentes a las fuerzas axiales independientemente del grado de dureza, por lo tanto, no se requiere verificar su resistencia a la inclinación. La fuerza axial critica debe ser mayor a la máxima fuerza de compresión en los devanados calculada con el desplazamiento promedio (ver ecuación (A.6)).

$$F_{ax,crt}^* > FC_w^* \cdot \chi \text{ devanados discos y helicoidales} \quad (\text{A.6})$$

$$F_{ax,crt}^* > FC_w^* \text{ devanados en capas}$$

FC_w^* = fuerza de compresión máxima calculada con el desplaxamiento promedio [kN]

χ = multiplicador dinamico=1,3

ANEXO B RESULTADOS MODELO EN FEMM

TRANSFORMADOR BAJO ANÁLISIS

Modelo de elementos finitos

Se presentan detalles del modelo de elementos finitos construido para el cálculo de fuerzas de cortocircuito, este es similar al utilizado en el modelo por fuera de la ventana.

Figura B.1. Geometría y condiciones de frontera modelo FEMM.

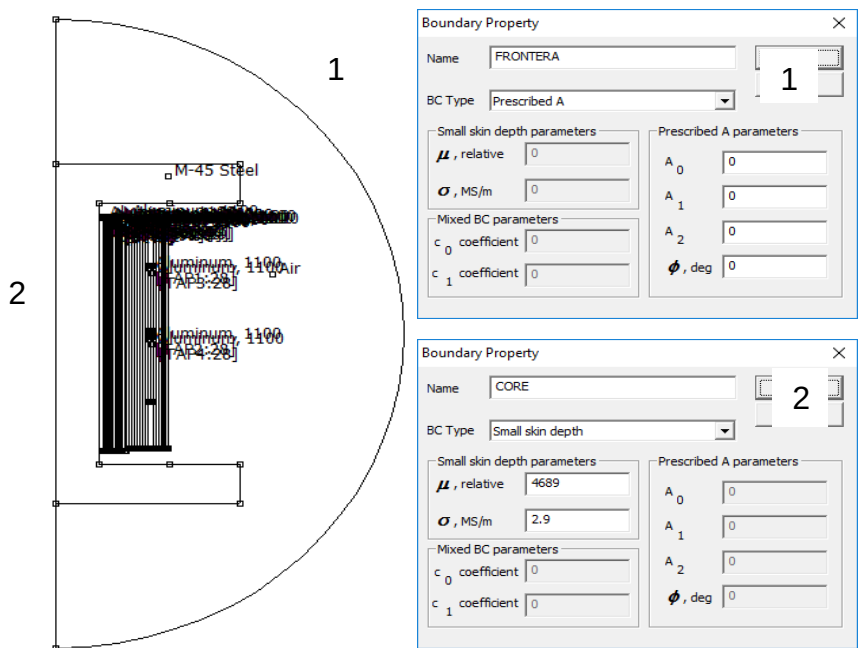


Figura B.2 propiedades bloques de los devanados en FEMM.

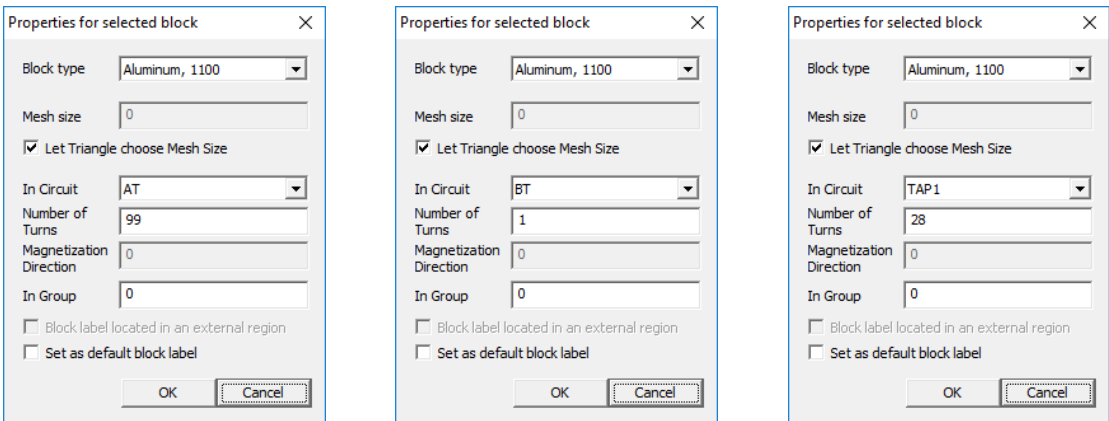


Figura B.3 Materiales devanados y núcleo modelo FEMM.

Block Property (Aluminum, 1100)

Name: Aluminum, 1100
B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative μ_x	1	Relative μ_y	1
ϕ_{hx} , deg	0	ϕ_{hy} , deg	0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m	0
-------------	---

Electrical Conductivity

σ , MS/m	34.45
-----------------	-------

Source Current Density

J , MA/m ²	0
-------------------------	---

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm	0	Lam fill factor	1
Number of strands	0	Strand dia, mm	0

Block Property (M-45 Steel)

Name: M-45 Steel
B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative μ_x	4689	Relative μ_y	4689
ϕ_{hx} , deg	0	ϕ_{hy} , deg	0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m	0
-------------	---

Electrical Conductivity

σ , MS/m	2.9
-----------------	-----

Source Current Density

J , MA/m ²	0
-------------------------	---

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Laminated in-plane

Lam thickness, mm	0.635	Lam fill factor	0.98
Number of strands	0	Strand dia, mm	0

Figura B.4 Circuitos del modelo y parámetros para simulación en FEMM.

Circuit Property (AT)

Name: AT

☐ Parallel ☒ Series

Circuit Current, Amps: 404.54

(a) Devanado de alta tensión

Circuit Property (BT)

Name: BT

☐ Parallel ☒ Series

Circuit Current, Amps: -42057.12

(b) Devanado de baja tensión

Circuit Property (TAP1)

Name: TAP1

☐ Parallel ☒ Series

Circuit Current, Amps: 404.54

(c) Derivaciones Alta tensión

Problem Definition

Problem Type: Planar

Length Units: Millimeters

Frequency (Hz): 60

Depth: 1

Solver Precision: 1e-008

Min Angle: 30

AC Solver: Succ. Approx

Previous Solution:

Comment: Add comments here.

(d) Parametros modelo FEMM

Tabla B.1 Resultados de fuerzas en la ventana del núcleo.

Fleje	Fradial máxima (N)	Fradial total (N)	Faxial máxima (N)	Faxial acumulativa centro (N)	Faxial acumulativa total (N)
1	-115	-2627	1250	1710	47532
2	-362	-8238	1330	421	10228
3	-603	-14342	1340	1720	48218
4	-844	-19853	1300	1650	46872
5	-1080	-25709	1210	1510	43019
6	-1270	-32062	1070	1340	37576
7	-1480	-38194	829	963	27378
8	-1750	-43541	752	792	23417
9	-2050	-49670	641	605	18471
10	-2350	-56543	504	372	12220
11	-2670	-62897	225	174	-1228
Suma	-14574	-353676	10451	11257	313703
Promedio	-1325	-32152	950	1023	28518
Capa	Fradial máxima (N)	Fradial total (N)	Faxial máxima (N)	Faxial acumulativa centro (N)	Faxial acumulativa total (N)
1	2230	58689	169	744	15198
2	2050	53572	278	938	19255
3	1840	48033	341	1130	23106
4	1630	42579	416	1400	28939
5	1420	37103	453	1560	32193
6	1210	31631	454	1690	35173
7	633	16476	185	443	10476
8	529	13523	189	465	10870
9	740	20014	486	1880	38874
10	531	14563	510	1890	38470
11	323	9133	508	1880	37802
12	116	3670	484	1850	36934
13	-189	-1813	433	1800	35637
Suma	13063	347173	4906	17670	362927
Promedio	1005	26706	377	1359	27917

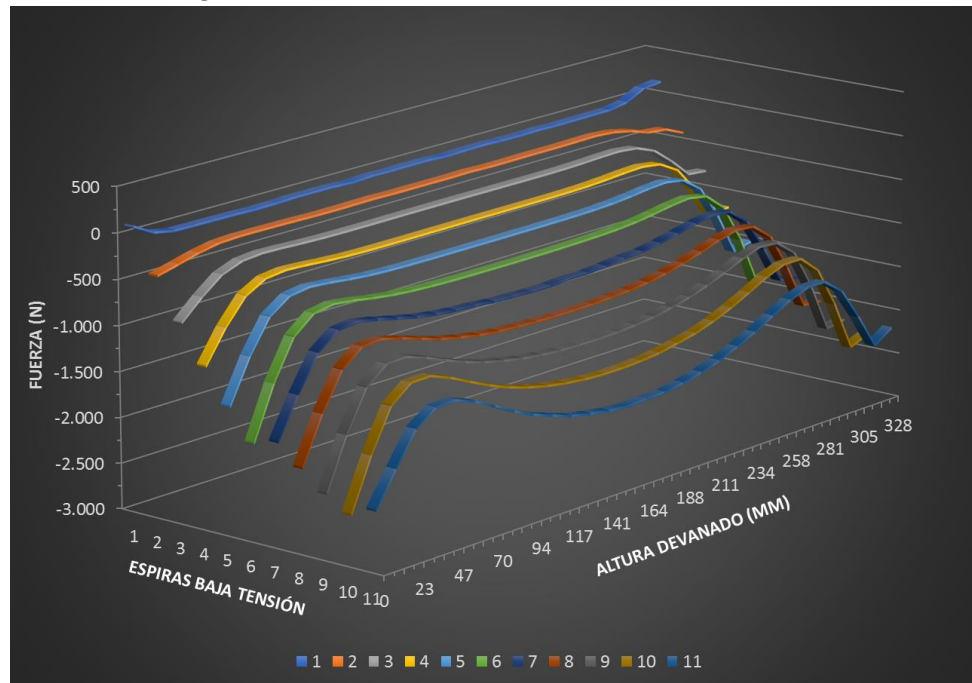
Nota: Valores en Newtons por metro de profundidad

Tabla B.2 Resultados de fuerzas en la región fuera de la ventana del núcleo.

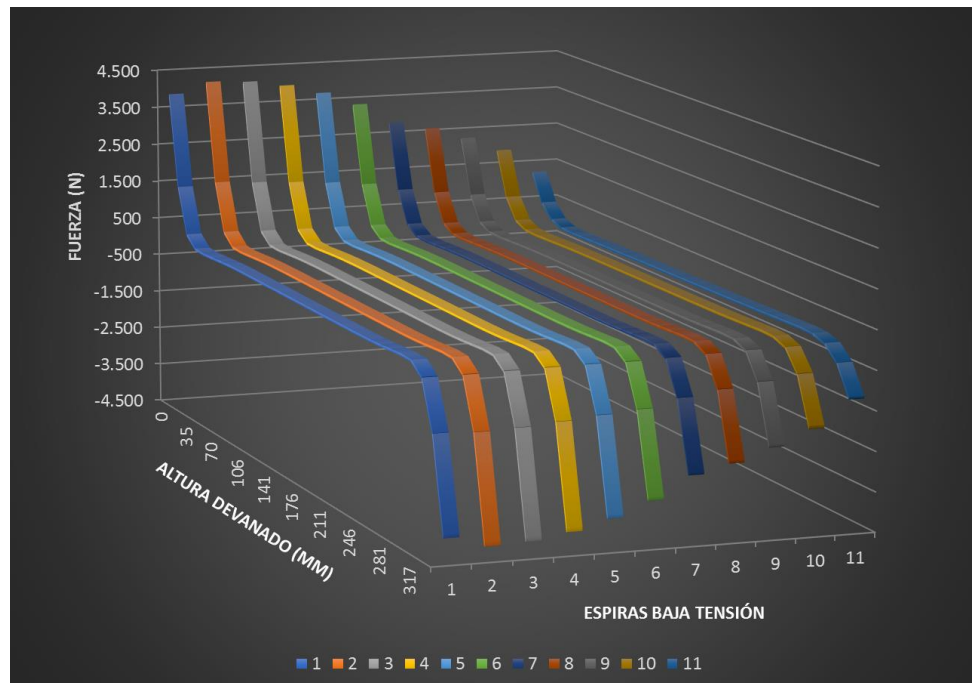
Fleje	Fradial máxima (N)	Fradial total (N)	Faxial máxima (N)	Faxial acumulativa centro (N)	Faxial acumulativa total (N)
1	106	-1463	1510	1630	44176
2	-441	-6454	4111	1600	41266
3	-837	-11562	4006	1510	38805
4	-1230	-16589	3910	1450	37368
5	-1610	-21649	3660	1380	35704
6	-1930	-26703	3290	1290	33277
7	-1888	-31125	2740	1040	27110
8	-2009	-36231	2530	863	22737
9	-2280	-41760	2210	688	18632
10	2440	-47222	1820	510	14752
11	-2360	-52774	1160	117	6373
Suma	-12039	-293532	30947	12078	320200
Promedio	-1094	-26685	2813	1098	29109
Capa	Fradial máxima (N)	Fradial total (N)	Faxial máxima (N)	Faxial acumulativa centro (N)	Faxial acumulativa total (N)
1	1950	50038	205	1620	34666
2	1750	45354	392	2300	47676
3	1570	40139	459	2630	55080
4	1360	34774	551	3170	66976
5	1170	29673	594	3430	72776
6	953	24565	606	3620	76959
7	479	12506	254	971	19937
8	387	9826	259	979	20395
9	535	13584	666	4000	84629
10	363	8563	695	3980	84459
11	209	3400	698	3960	83864
12	122	-1719	676	3860	81331
13	-296	-6716	625	3710	78718
Suma	10552	263987	6680	38230	807466
Promedio	812	20307	514	2941	62113

Nota: Valores en Newtons por metro de profundidad

Figura B.5 Fuerzas radiales y axiales distribuidas para los flejes del devanado de baja tensión en la región fuera de la ventana del núcleo.



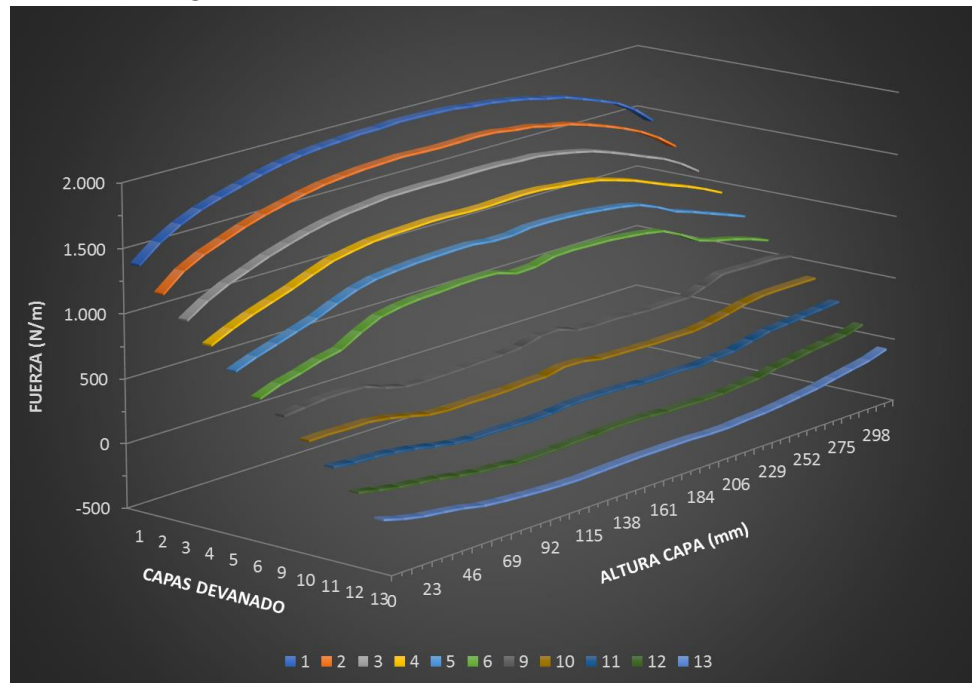
(a) Fuerzas radiales distribuidas sobre la altura de los flejes



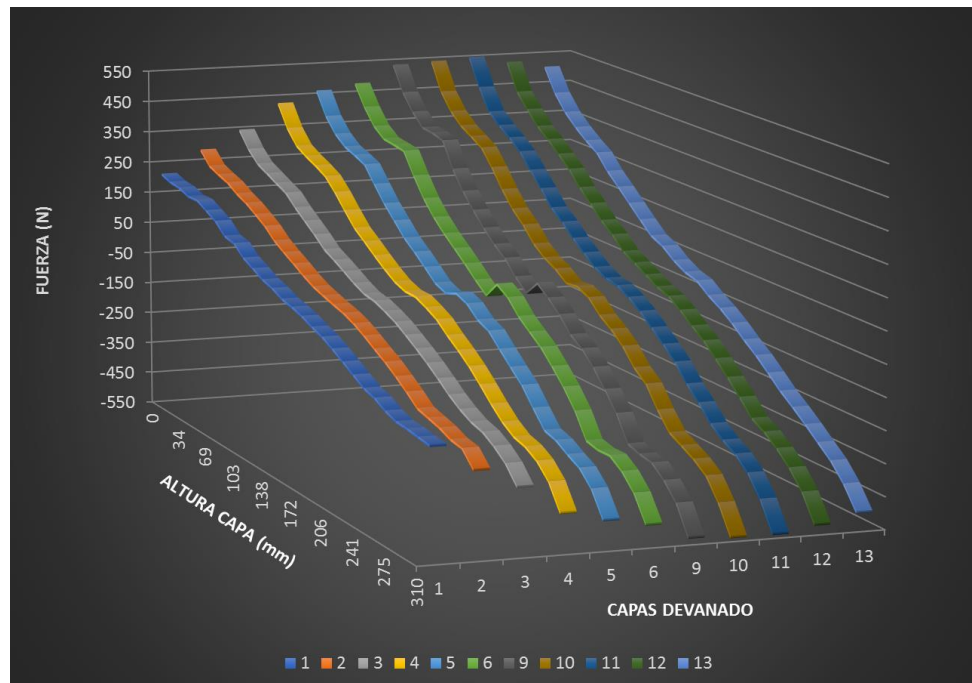
(b) Fuerzas axiales distribuidas sobre la altura de los flejes.

Nota: Valores en Newtons por metro de profundidad

Figura B.6 Fuerzas radiales y axiales distribuida para las capas del devanado de alta tensión en la región fuera de la ventana del núcleo.



(c) Fuerzas radiales distribuidas sobre la altura de las capas.



(d) Fuerzas axiales distribuidas sobre la altura de las capas.

Nota: Valores en Newtons por metro de profundidad

Tabla B.3 Variables calculo analítico de fuerzas en transformador de 400kVA.

Número de espiras alta tensión	1200
Número de Espiras baja tensión	11
Altura devanado alta tensión H_{wat} (mm)	332
Altura devanado baja tensión H_{wbt} (mm)	340
Corriente nominal alta tensión I_{rat}	10,1
Corriente nominal baja tensión I_{rbt}	1049,7
Factor de asimetría K	2,2
Factor de sobrecorriente r	18,154
Diámetro medio alta tensión ventana D_{mat} (mm)	242,14
Diámetro medio baja tensión ventana D_{mbt} (mm)	153,75
Diámetro medio ambas bobinas ventana (mm)	197,945
Diámetro medio alta tensión fuera ventana D_{mat} (mm)	467,23
Diámetro medio baja tensión fuera ventana D_{mbt} (mm)	289,87
Diámetro medio ambas bobinas fuera ventana (mm)	378,55
Ancho capas alta tensión región de la ventana a_1 (mm)	50,64
Ancho flejes baja tensión región de la ventana a_2 (mm)	31,75
Espesor canal de dispersión región de la ventana d (mm)	3
Ancho capas alta tensión región fuera ventana a_1 (mm)	72,77
Ancho flejes baja tensión región fuera ventana a_2 (mm)	52
Espesor canal de dispersión región fuera de la ventana d (mm)	26,3
Altura media devanados H_{w1} (mm)	335,9761
Factor de Rogowski con distancias en la ventana K	0,9191
Factor de Rogowski con distancias fuera de la ventana K	0,8568

Comparación regímenes de funcionamiento

Se presenta un análisis de resultados para diferentes regímenes de funcionamiento y variaciones en la altura de los devanados (**Figura B.7 y Figura B.8**)

El cambio de posición de tap afectó principalmente las fuerzas radiales, la variación de las fuerzas axiales fue marginal.

El desplazamiento de los centros magnéticos produce un incremento de las fuerzas axiales, sin embargo, su efecto tiende a ser más notorio en devanados de gran altura.

Figura B.7. Comparación de resultados para diferentes posiciones del cambiador de tomas.

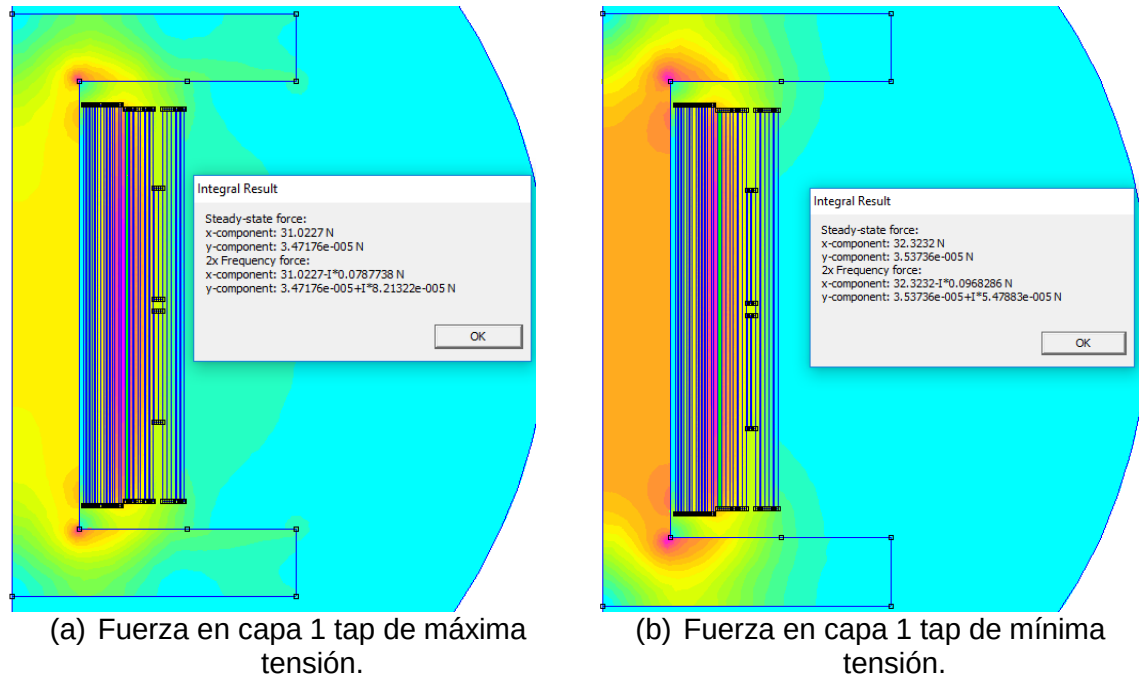
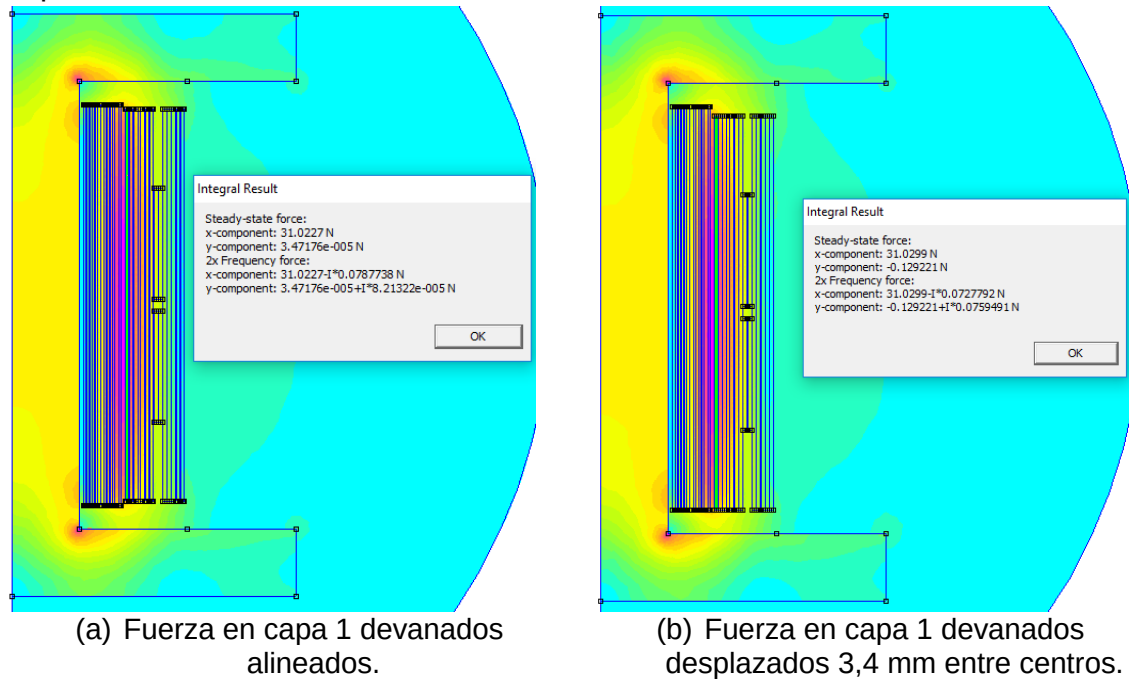


Figura B.8. Comparación de resultados para devanados con centros magnéticos desplazados.



Algoritmo MATLAB cálculo de Fuerzas de cortocircuito

A continuación, se presenta la script desarrollada para tomar los datos de FEMM correspondientes a la densidad de flujo magnético radial, axial y la densidad de corriente para el cálculo de las componentes de fuerzas de cortocircuito

```
% script para calcular fuerzas axiales y radiales de lorentz y graficar
tipo=input('ingrese devanado de calculo AT=1 BT=2: ');
ancho=input('ingrese ancho del fleje o capa en metros: ');
alto=input('ingrese la altura del devanado o fleje en metros: ');
div=input('ingrese el numero de divisiones en la altura del devanado:');
volumen_division=(ancho*alto*1/div);
a=importdata('normal.txt');
b=importdata('tangencial.txt');
c=importdata('dcorriente.txt');

%vectores cantidades principales

%altura en milimetros del modelo
altura=a(:,1);

%densidad de flujo teslas
bnormal_real=a(:,3);
bnormal_imag=a(:,4);
btangencial_real=b(:,3);
btangencial_imag=b(:,4);

%densidad de corriente MA/m2
J_real=c(:,3);
J_imag=c(:,4);
BX=bnormal_real+1i*bnormal_imag;
BY=btangencial_real+1i*btangencial_imag;
if tipo==2
    J=-1e6*(J_real+1i*J_imag);
else
    J=-1e6*(J_real+1i*J_imag);
end

%calculo del vector divisiones del devanado o fleje
divisiones=(1:div)';

%calculo de componentes AC y DC densidades de fuerzas (N/m3)
Fradial_ac=0.5*(J.*BY);
Faxial_ac=0.5*(J.*BX);
Fradial_dc=0.5*(real(J.*conj(BY)));
Faxial_dc=0.5*(real(J.*conj(BX)));

%Componentes tiempo fuerzas radiales y axiales por unidad de
profundidad(N)
Fradial_tiempo=(Fradial_dc+(abs(Fradial_ac).*cos(2*2*pi*60*8.33/1000+angl
e(Fradial_ac)))).*volumen_division;
```

```
Faxial_tiempo=(Faxial_dc+(abs(Faxial_ac).*cos(2*2*pi*60*8.33/1000+angle(F
axial_ac)))).*volumen_division;

%calculo de fuerza axial acumulativa en el tiempo por unidad de
profundidad(N)
Faxial_tiempo_acumu=cumsum(Faxial_tiempo);

%calculo de fuerzas totales por unidad de profundidad (N)
Fradial_tiempo_total=trapz(Fradial_tiempo);
Faxial_tiempo_total=trapz(Faxial_tiempo);
Faxial_tiempo_acumtotal=trapz(Faxial_tiempo_acumu);

%calculo de fuerzas totales DC y AC (N/m3)
Fradial_total_dc=trapz(altura, Fradial_dc);
Faxial_total_dc=trapz(altura, Faxial_dc);
Fradial_total_ac=trapz(altura, Fradial_ac);
Faxial_total_ac=trapz(altura, Faxial_ac);

%descomposicion factores de fuerzas (N/m3)
magnitud_Fradial_ac=abs(Fradial_ac);
magnitud_Faxial_ac=abs(Faxial_ac);

real_Fradial_ac=real(Fradial_ac);
imag_Fradial_ac=imag(Fradial_ac);

real_Faxial_ac=real(Faxial_ac);
imag_Faxial_ac=imag(Faxial_ac);

disp('RESULTADOS FASORIALES: ')
disp('FUERZA RADIAL TOTAL DC N/m3')
disp(Fradial_total_dc)
disp('FUERZA AXIAL TOTAL DC N/m3')
disp(Faxial_total_dc)
disp('FUERZA RADIAL TOTAL AC N/m3')
disp(Fradial_total_ac)
disp('FUERZA AXIAL TOTAL AC N/m3')
disp(Faxial_total_ac)

disp('RESULTADOS TIEMPO=8.33ms: ')
disp('FUERZA RADIAL TOTAL TEMPORAL (N)')
disp(Fradial_tiempo_total)
disp('FUERZA AXIAL TOTAL TEMPORAL (N)')
disp(Faxial_tiempo_total)
disp('FUERZA AXIAL TOTAL TEMPORAL ACUMULATIVA (N)')
disp(Faxial_tiempo_acumtotal)
```