

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Pronóstico de pérdidas por flujo de dispersión en la tapa del
transformador eléctrico

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Energía que
presenta:

Jorge Luis Mendez Giron

Asesora:

Ana Cecilia Moreno Alamo

Lima, 2023

Informe de Similitud

Yo, *Ana Cecilia Moreno Alamo*, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesora de la tesis titulado *Pronostico de pérdidas por flujo de dispersión en la tapa del transformador eléctrico*, del autor *Jorge Luis Mendez Giron*, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 11/08/2023
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

La Molina, Lima, Perú; 11 de Agosto del 2023

Apellidos y nombres de la asesora: Moreno Alamo, Ana Cecilia	
DNI: 42146908	Firm
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1515-1250	

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi esposa e hijo por brindarme su apoyo y motivación para poder concluirlo, porque: lo que uno comienza lo debe terminar.

Finalmente, expreso mi gratitud a la empresa DELCROSA por prestar sus instalaciones para poder realizar las experimentaciones.

RESUMEN

El presente trabajo describe la generación de pérdidas en la plancha de fierro, por inducción de campo magnético, ante conductores energizados que atraviesan la plancha.

Para detallar el fenómeno se utilizó formulación matemática, simulación numérica y experimentación. Para cada metodología se utilizó distintos escenarios de conductores energizados a distintas corrientes eléctricas (1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A y 3000 A).

Primero, se analizó una plancha de fierro, cuyo resultado mostró que solo las pérdidas por acoplamiento magnético, si no son controladas, afectan a la eficiencia del transformador, además, por experimentación se evidenció la generación de puntos calientes.

Segundo, se analizó la mitigación de estas pérdidas con un inserto de acero inoxidable AISI 304, lo cual provocó que las pérdidas no se incrementen; por lo tanto, la eficiencia no se ve afectada. Además, producto de la mitigación de pérdidas, se verificó por prueba la eliminación de puntos calientes.

Los resultados a distintas corrientes (1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A y 3000 A) son presentados en gráficas que muestran los resultados en las distintas metodologías.

ABSTRACT

The present document describes the generation of losses in the iron plate, due to magnetic field induction, when energized conductors cross the plate.

Mathematical formulation, numerical simulation and experimentation were used to detail the phenomenon. For each methodology, different scenarios of energized conductors at different electric currents (1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A and 3000 A) were used.

First, an iron plate was analyzed, the result showed that losses due to magnetic coupling, if not controlled, affect the efficiency of the transformer, also by experimentation, the generation of hot spots was evidenced.

Second, the mitigation of these losses was analyzed with an AISI 304 stainless steel insert, which caused the losses not to increase; therefore, the efficiency is not affected. In addition, as a result of the loss mitigation, the elimination of hot spots was verified by test.

The results at different currents (1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A and 3000 A) are presented in graphs showing the results in the different methodologies.

ÍNDICE

Resumen	ii
Índice	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	ix
Nomenclatura	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo principal.....	2
1.2.2 Objetivo secundario.....	2
1.3 METODOLOGÍA.....	2
1.4 ESTADO DEL ARTE	3
CAPÍTULO 2. BASES TEÓRICAS	4
2.1 LEYES DE ELECTROMAGNÉTICAS.....	4
2.1.1 Ley de Faraday	4
2.1.2 Ley de Ampere	7
2.1.3 Densidad de flujo magnético	7
2.1.4 Campos armónicos en el tiempo.....	9
2.2 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	11
2.2.1 Discretización de los elementos finitos	11
2.2.2 Ecuaciones que rigen a los elementos	12

2.2.3	Reunión de todos los elementos	16
2.2.4	Resolución de las ecuaciones resultantes	16
2.3	COMPONENTES PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR	18
2.3.1	Núcleo.....	18
2.3.2	Devanado	19
2.3.3	Aceite.....	20
2.3.4	Tanque y tapa.....	21
2.3.5	Aisladores o Pasatapas (bushing).....	23
2.4	PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES.	24
2.4.1	Pérdidas por efecto Joule:.....	24
2.4.2	Pérdidas adicionales:	25
2.4.3	Cambio de las pérdidas en el devanado en función de la temperatura	27
2.4.4	Valores de pérdidas en los transformadores	28
CAPÍTULO 3. DESARROLLO.....		29
3.1	ESTUDIO ANALÍTICO	31
3.1.1	Caso de aplicación.....	39
3.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	41
3.2.1	Pérdidas en plancha de hierro.....	41
3.2.2	Pérdidas en plancha de hierro con inserto de acero inoxidable.....	55
3.3	ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	69
3.3.1	Objetivo	69
3.3.2	Materiales	69
3.3.3	Procedimiento y medición	72
3.3.4	Resultados.....	85

3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
3.4.1	Caso: plancha de fierro	89
3.4.2	Caso: Plancha de fierro con inserto de acero inoxidable.....	91
3.4.3	Caso: Plancha de fierro vs plancha de fierro con inserto de acero inoxidable	92
3.4.4	Impacto de incremento de pérdidas en la eficiencia del transformador	93
3.4.5	Impacto de la temperatura en las planchas de fierro	94
	CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	95
	CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES.....	96
	CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Estado del arte	3
Tabla 2-1 Propiedades del cobre	20
Tabla 2-2 Propiedades de la plancha de fierro	22
Tabla 2-3 Propiedades del acero inoxidable	22
Tabla 2-4 Cuadro de pérdidas y eficiencia de transformador	28
Tabla 3-1 Cálculos teóricos de pérdidas en la plancha de fierro	39
Tabla 3-2 Resultado de pérdidas en plancha de fierro para distintas corrientes	40
Tabla 3-3 Resultado de mallado.....	48
Tabla 3-4 Pasos de convergencia	49
Tabla 3-5 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro a partir de simulación numérica.....	54
Tabla 3-6 Resultado de mallado.....	61
Tabla 3-7 Pasos de convergencia	62
Tabla 3-8 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de simulación numérica	68
Tabla 3-9 Resultados de medición de resistencia	73
Tabla 3-10 Resultados de medición de pérdidas sin colocar la plancha de fierro a temperatura ambiente de medición 24°C	74
Tabla 3-11 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C sin plancha de fierro	76
Tabla 3-12 Resultados de medición de pérdidas colocando la plancha de fierro a temperatura ambiente de medición 24°C	78
Tabla 3-13 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C con plancha de fierro	79
Tabla 3-14 Resultados de medición de pérdidas colocando la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a temperatura ambiente de medición de 30°C	82

Tabla 3-15 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C con plancha de fierro con inserto de acero inoxidable	83
Tabla 3-16 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro a partir de experimentación.....	85
Tabla 3-17 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de experimentación	87
Tabla 3-18 Eficiencia con incremento de pérdidas debido a la plancha de fierro	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Diagrama de flujo de desarrollo.....	2
Figura 2-1	Fuerza electromotriz debida a una espira en un campo variable en el tiempo.....	6
Figura 2-2	Líneas de flujo magnético debidas a un alambre recto con corriente dirigida hacia fuera de la página.	8
Figura 2-3	Subdivisión del elemento finito representativo de un dominio irregular.....	11
Figura 2-4	Elemento triangular representativo	13
Figura 2-5	Reunión de tres elementos: i, j, k con numeración local 1-2-3	16
Figura 2-6	Partes del transformador	18
Figura 2-7	Núcleo del transformador.....	19
Figura 2-8	Elaboración del devanado	20
Figura 2-9	Aceite mineral	21
Figura 2-10	Tapa del transformador	23
Figura 2-11	Aisladores o pasatapas	23
Figura 2-12	Diagrama de pérdidas en el transformador	24
Figura 2-13	Campo magnético dentro del transformador.....	25
Figura 2-14	a.- Corriente por conductor en el devanado b.- flujo de dispersión c. La corriente de autoinducción que se produce durante la fase ascendente de la corriente. d. Efecto pelicular.....	26
Figura 2-15	Pérdidas por acoplamiento magnético en la plancha de fierro de forma de disco ...	27
Figura 3-1	Dimensiones de la plancha de fierro para el estudio.....	29
Figura 3-2	Dimensiones de la plancha de fierro con inserto de plancha inoxidable	29
Figura 3-3	Geometría idealizada y parámetros usados para calcular las pérdidas debido a un cable que pasa a través del tanque.....	31
Figura 3-4	Longitud de evaluación (radio a y b)	39

Figura 3-5 Resultado de pérdidas en la plancha de hierro para distintas corrientes.....	40
Figura 3-6 Dimensiones de plancha de hierro	41
Figura 3-7 Aisladores o pasatapas de cobre tipo ED-N/30 (1/3150 en 50386)	42
Figura 3-8 Modelo Simplificado para simulación	43
Figura 3-9 Condición de frontera exterior	43
Figura 3-10 Condición de frontera entre dos medios magnéticos	44
Figura 3-11 Ingreso de la corriente de excitación.....	45
Figura 3-12 Configuración del mallado.....	45
Figura 3-13 Configuración del error y números de pasos	46
Figura 3-14 Configuración de las propiedades de la plancha de hierro	47
Figura 3-15 Configuración de propiedades del cobre.....	47
Figura 3-16 Mallado de la tapa (plancha de hierro)	49
Figura 3-17 Corte longitudinal del mallado.....	50
Figura 3-18 Curva de convergencia.....	50
Figura 3-19 Resultado plancha de hierro a corriente de 1000 A.....	51
Figura 3-20 Resultado plancha de hierro a corriente de 1500 A.....	51
Figura 3-21 Resultado plancha de hierro a corriente de 2000 A.....	52
Figura 3-22 Resultado plancha de hierro a corriente de 2500 A.....	52
Figura 3-23 Resultado plancha de hierro a corriente de 3000 A.....	53
Figura 3-24 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro a partir de simulación numérica	54
Figura 3-25 Dimensiones de plancha de hierro con inserto de acero inoxidable.....	55
Figura 3-26 Modelo simplificado de la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable	56
Figura 3-27 Condición de frontera exterior	56
Figura 3-28 Condición de frontera entre dos medios magnéticos	57

Figura 3-29 Ingreso de la corriente de excitación.....	58
Figura 3-30 Configuración del mallado.....	58
Figura 3-31 Configuración del error y números de pasos	59
Figura 3-32 Configuración de las propiedades de la plancha de fierro	59
Figura 3-33 Configuración de las propiedades del inserto de acero inoxidable.....	60
Figura 3-34 Configuración de las propiedades del cobre	60
Figura 3-35 Corte longitudinal de mallado de la tapa con inserto de acero inoxidable	63
Figura 3-36 Mallado de la tapa con inserto de acero inoxidable	63
Figura 3-37 Curva de convergencia.....	64
Figura 3-38 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 1000 A65	
Figura 3-39 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 1500 A65	
Figura 3-40 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 2000 A66	
Figura 3-41 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 2500 A66	
Figura 3-42 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 3000 A67	
Figura 3-43 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de simulación numérica	68
Figura 3-44 Circuito de medición de resistencia de devanados.....	72
Figura 3-45 Circuito de prueba de transformador en cortocircuito sin plancha de fierro	73
Figura 3-46 Circuito de prueba de transformador auxiliar en cortocircuito con plancha de fierro	77
Figura 3-47 Prueba de transformador auxiliar en cortocircuito con plancha de fierro con inserto de inoxidable.....	81
Figura 3-48 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro a partir de experimentación	85
Figura 3-49 Distribución de temperatura en la plancha de fierro a 3000 A	86

Figura 3-50 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de experimentación	87
Figura 3-51 Distribución de temperatura en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a 3000 A.....	88
Figura 3-52 Comparación de valores de pérdidas en la plancha de fierro entre los 3 métodos: Analítico, Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental.....	89
Figura 3-53 Comparación de valores de pérdidas en el fierro entre los 3 métodos: Analítico con factor, Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental	90
Figura 3-54 Comparación de valores de pérdidas en la plancha de fierro entre 2 métodos: Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental	91
Figura 3-55 Comparación entre las pérdidas de plancha de fierro y pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable.....	92
Figura 3-56 Reducción de la eficiencia	93

NOMENCLATURAS

Abreviaciones

P_{Tcu}	Pérdidas totales en el cobre	W
P_{nu}	Pérdidas en el núcleo	W
P_{Joule}	Pérdidas por efecto Joule	W
P_{adic}	Pérdidas adicionales	W
P_{fe}	Pérdidas en el hierro	W
P_{feSt}	Pérdidas en hierro con inserto de acero inoxidable	W
η	Eficiencia	
S_t	Potencia	VA

Símbolos

f	Frecuencia	Hz
\vec{E}	Intensidad de campo eléctrico	V/m
\vec{H}	Intensidad de campo magnético	A/m
l	Longitud de una trayectoria	m
S	Superficie o área	m ²
\vec{V}	Tensión, Voltaje o diferencia de potencial	V
\vec{I}	Corriente eléctrica	A
\vec{j}	Densidad de corriente	A/m ²
μ_0	Permeabilidad del vacío	T.m/A
μ_r	Permeabilidad relativa	
ϵ_0	Permitividad del vacío	F/m

ϵ_r	Permitividad relativa	
σ	Conductividad eléctrica	$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
R	Resistencia	Ω

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores eléctricos son máquinas estáticas que transmiten potencia a una frecuencia eléctrica variando la tensión y la corriente mantienen una eficiencia mayor al 98.5%, debido a que los dos tipos de pérdidas (en el núcleo y cobre) son menores al 1.5% de la potencia del transformador. Estas características permiten que la distribución de energía en la red eléctrica sea segura y económica, dando lugar al empleo de los transformadores en todo el sistema eléctrico mundial.

Con el crecimiento demográfico de la población se necesita emplear cada vez transformadores de mayor potencia, hecho que a su vez implicará una mayor demanda de corriente eléctrica. Sin embargo, el incremento de la corriente provoca un aumento exponencial en las pérdidas por flujo de dispersión en la plancha de hierro, reduce la eficiencia y produce zonas de elevada temperatura que al contacto con el aceite en el transformador originan gases combustibles. Esto provoca, en el mejor escenario la desconexión del transformador y la pérdida de la energía eléctrica o, en el peor de ellos, la explosión y el daño al medio ambiente. Por lo mencionado líneas arriba, es necesario cuando amerite reducir las pérdidas por flujo disperso (PFD) en las planchas de hierro.

El presente trabajo se enfocará en la plancha de hierro superior (tapa), por ser uno de los componentes más grandes en la estructura metálica de un transformador. Para poder pronosticar las PFD se realizan cálculos analíticos (teóricos), simulación mediante método de elementos finitos (MEF) y ensayos que validen los resultados

1.1 Descripción del problema

Los transformadores son máquinas estáticas que convierten el valor de tensión y la corriente en uno mayor o menor, de forma inversamente proporcional. En la actualidad el uso de transformadores en la generación, transmisión y distribución de energía es de uso común a nivel mundial. Por cual es importante conocer los distintos fenómenos que dan lugar a esta máquina.

Con el crecimiento poblacional la demanda de la energía eléctrica va incrementándose, lo que provoca que la corriente aumente a valores que genere acoplamiento magnético. Esto provoca pérdidas en las partes metálicas que rodean al transformador. Dichas pérdidas, si no son

controladas, pueden generar puntos calientes con posterior generación de gases, lo que acabaría en el colapso y/o explosión de la máquina.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Pronosticar la pérdida de acoplamiento de flujo disperso en planchas metálicas (tapa de transformador).

1.2.2 Objetivo secundario

Mitigación de la pérdida de acoplamiento de flujo disperso en planchas metálicas (tapa de transformador).

1.3 Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo sigue los pasos descritos en el diagrama de flujo

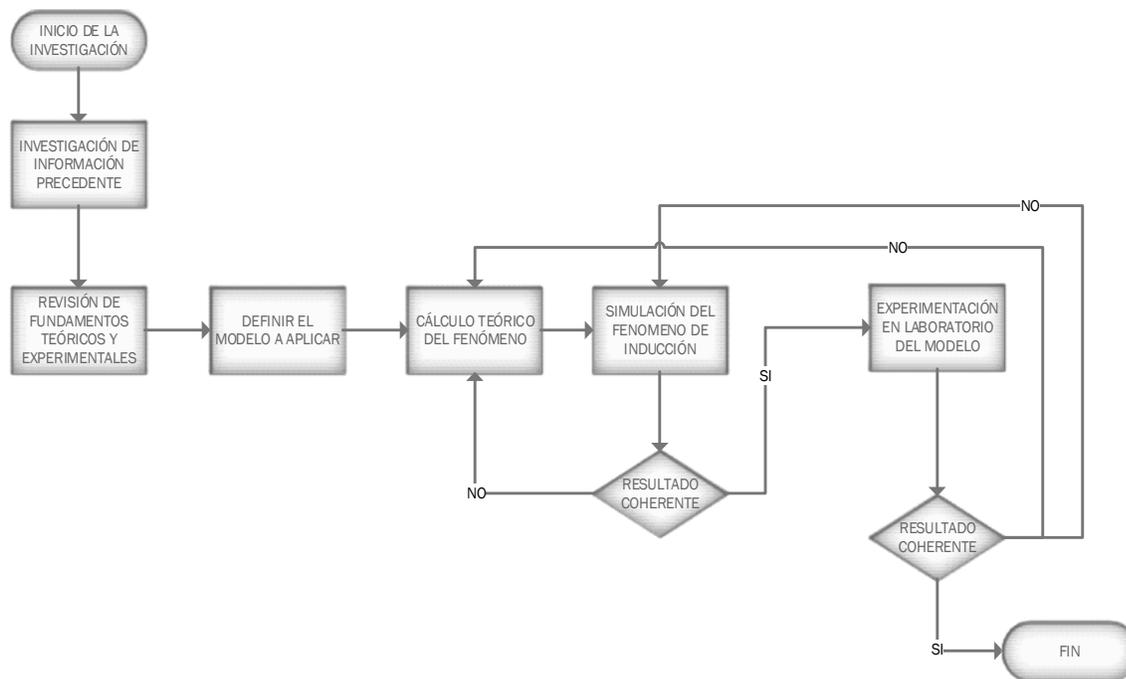


Figura 1-1 Diagrama de flujo de desarrollo

1.4 Estado del Arte

Tabla 1-1 Estado del arte

AÑO/LUGAR	TÍTULO	AUTOR	CONCEPTO CLAVE
2004/India, México, Polonia	Evaluation of Eddy current losses in the cover plates of distribution transformers	S.V. Kulkarni, J. C. Olivares, R EscarelaPerez, V.K. Lakhiani y J. Turowski	Determina las pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a través del Método de elementos finitos (MEF), para después corroborar con experimentación sus valores.
1997/Polonia	Eddy current losses and hot spot evaluation in cover of power transformers	J. Turowski, A. Pelikant	Presenta la fórmula analítica de pérdidas en la plancha de fierro, la cual se basa en el teorema de Poynting. Finalmente muestra un cuadro de resultados de pérdidas en plancha de fierro que fueron medidos en la experimentación de tres modelos a distintas corrientes.
1999/SeulKorea	Improved Design of cover plates of power transformers for Lower eddy Current Losses	Dong Hun Kim, Song Yo phan, Sang-Youn Kim	Mediante mediciones y técnicas numéricas, como el Método de ecuación integral de fronteras (BIEM), que muestra el resultado de la variación de la distribución de pérdidas en las planchas de fierro ante cortes rectangulares. Esto permite disminuir la concentración de pérdidas en puntos focalizados.

Capítulo 2. BASES TEÓRICAS

El transformador tiene sus orígenes en el siglo XIX, cuando el investigador Michael Faraday dedujo que ante un campo magnético variable se puede generar tensión variable con el tiempo; a dicho fenómeno lo llamó tensión inducida y en la actualidad es el principio de funcionamiento del transformador en su parte eléctrica. Años más tarde el matemático **Maxwell** recopiló las experimentaciones de los distintos investigadores y brindo un ropaje matemático formulando así la física moderna del electromagnetismo.

2.1 Leyes de electromagnéticas¹

El campo eléctrico que varía en el tiempo también se relaciona con un campo magnético que varía en tiempo lo cual es representado con $\vec{E}(x, y, z, t)$ y $\vec{H}(x, y, z, t)$. Por teoría se conoce que los campos electrostáticos son producidos por cargas eléctricas estáticas y que los campos magnetostáticos son producidos por el desplazamiento de cargas eléctricas a velocidad uniforme o de cargas magnéticas estáticas; por otro lado los campos variables en el tiempo u ondas se indica que se deber a cargas aceleradas o corrientes variables en el tiempo, por tanto:

- Cargas estacionarias producen campos electrostáticos.
- Corrientes estacionarias producen campos magnetostáticos.
- Corrientes variables en el tiempo producen campos u ondas electromagnéticos.

2.1.1 Ley de Faraday

Según los ensayos de Faraday, un campo magnético estático no genera flujo de corriente, pero un campo variable en el tiempo genera una tensión inducida (llamado fuerza electromotriz), el cual si provoca un flujo de corriente en un circuito cerrado.

Faraday reveló que la fuerza electromotriz inducida, V_{fe} (en volts), en un circuito cerrado es igual a la rapidez de cambio del flujo magnético por el circuito.

La ley de Faraday, la cual se expresa como:

¹ La teoría mostrada corresponde a (Sadiku, 2002)

$$V_{fe} = -\frac{d\phi}{dt} \rightarrow \text{para } N \text{ espiras, } V_{fe} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad 2-1$$

Donde N es el número de vueltas en el circuito y ϕ el flujo a través de cada una de ellas. El signo negativo indica que la tensión inducida es contraria al flujo que lo produce. Ésta es a su vez la ley de Lenz, según la cual la dirección de flujo de corriente en el circuito es tal que el campo magnético inducido resultante del corriente inducido se opondrá al campo magnético original

De la ecuación 2-1 se considera un circuito con una vuelta $N=1$, de la cual se convierte en:

$$V_{fe} = \frac{d\phi}{dt} \quad 2-2$$

En términos de \vec{E} y \vec{B} , la ecuación 2-2 puede expresarse como:

$$V_{fe} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad 2-3$$

Donde ϕ ha sido reemplazada por $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ y S es el área de la superficie del circuito limitado por la trayectoria cerrada L. De la ecuación 2-3 se puede notar que los campos eléctricos y magnéticos se relacionan dentro de la variación del tiempo. Los vectores $d\vec{l}$ y $d\vec{S}$ siguen la regla de la mano derecha y el teorema de Stokes, lo que puede observarse en la **Figura 2-1**. La variación del flujo en el tiempo puede deberse a las siguientes tres causas:

- Una espira estacionaria en un campo \vec{B} variable en el tiempo
- Una espira de área variable en el tiempo en un campo \vec{B} estático
- Una espira de área variable en el tiempo en un campo \vec{B} variable en el tiempo

2.1.1.1 Espira estacionaria en un campo B variable en el tiempo

En la **Figura 2-1** se muestra una espira conductora estacionaria que se ubica en un campo magnético \vec{B} variable en tiempo. Por lo tanto, la ecuación 2-3 se puede plasmar de la siguiente manera:

$$V_{fe} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \oint_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad 2-4$$

Cuando un campo variable en el tiempo \vec{B} cruza una espira cerrada, genera una fuerza electromotriz inducida que a su vez genera un corriente variable en el tiempo

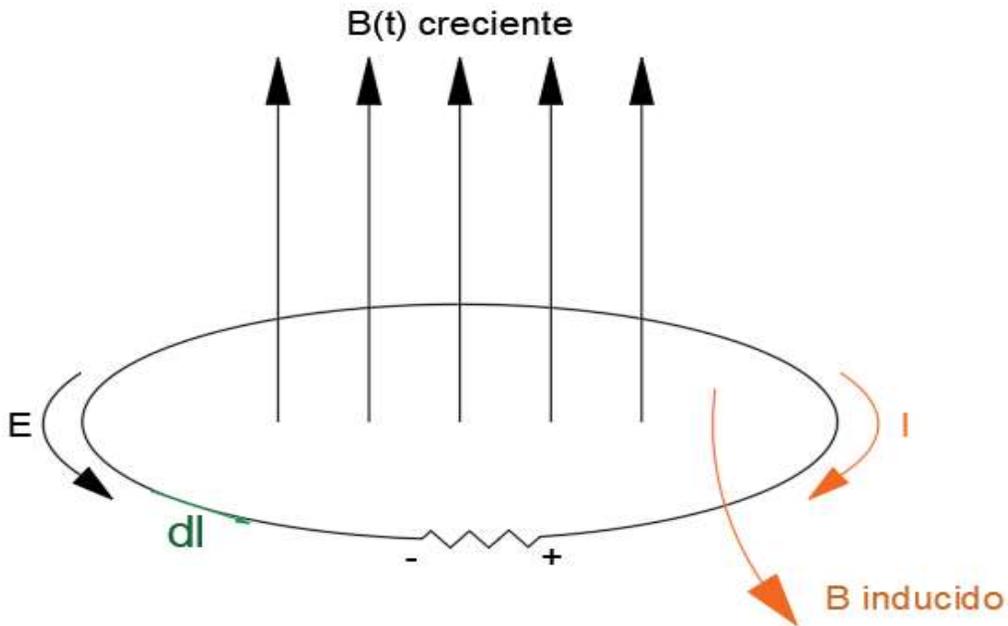


Figura 2-1 Fuerza electromotriz debida a una espira en un campo variable en el tiempo

Fuente: Adaptado de fuerza electromotriz estática y cinética (p.372), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

De la aplicación del teorema de Stokes a la ecuación 2-4 se obtiene:

$$\int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad 2-5$$

A partir de la igualdad de los integrando se tiene:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad 2-6$$

La ecuación 2-5 indica que el campo eléctrico \vec{E} no es conservativo ($\nabla \times \vec{E} \neq 0$). El trabajo realizado introduce carga en la trayectoria cerrada en un campo eléctrico variable que genera una corriente inducida \vec{I} que produce un campo magnético que se opone (\vec{B}), obedeciendo la ley de Lenz.

2.1.2 Ley de Ampere

La ley de ampere indica que la integral de línea de la componente tangencial de \vec{H} de una trayectoria cerrada es igual a la corriente neta I_{enc} comprendida dentro de la trayectoria. De lo descrito se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enc} \quad 2-7$$

Al aplicar el teorema de Stokes al integrando izquierdo de la ecuación 2-7 se obtiene:

$$I_{enc} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad 2-8$$

Pero:

$$I_{enc} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad 2-9$$

De la igualdad de la ecuación 2-8 y 2-9 se obtiene:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad 2-10$$

2.1.3 Densidad de flujo magnético

La densidad de flujo magnético (\vec{B}) guarda una relación la intensidad de campo magnético (\vec{H}) según la siguiente ecuación:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad 2-11$$

Donde μ_0 es una constante llamada permeabilidad del vacío. Esta constante se expresa en Tesla metro/Amper (T.m/A) y su valor es:

$$\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} Tm/A \quad 2-12$$

El flujo magnético (Φ) que atraviesa una superficie S se expresa por:

$$\Phi = \oint_S \vec{B} d\vec{S} \quad 2-13$$

Donde Φ se expresa en weber (Wb) y la densidad de flujo magnético en (Wb/m²) o Tesla.

La densidad de campo magnético (\vec{B}) es tangencial a las líneas de flujo magnético en cualquier punto

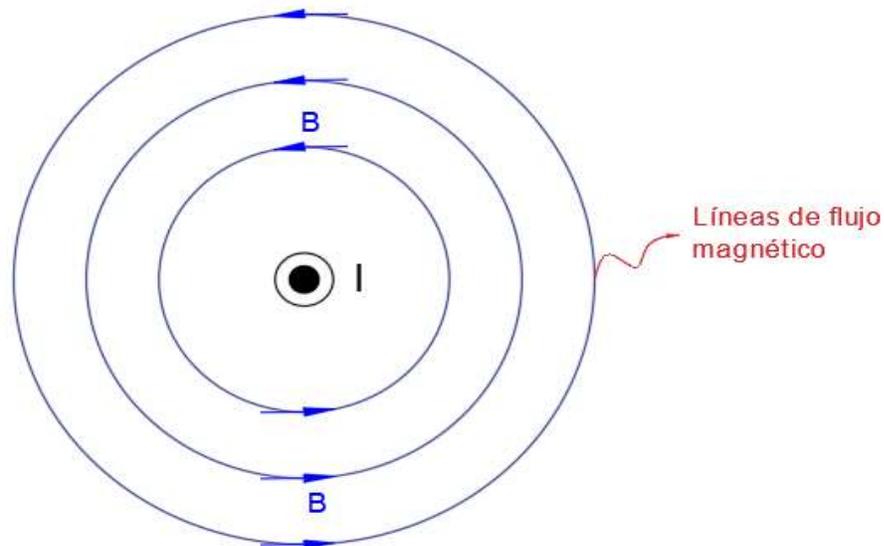


Figura 2-2 Líneas de flujo magnético debidas a un alambre recto con corriente dirigida hacia fuera de la página.

Fuente: Adaptado de densidad de flujo magnético (p.281), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

Cada línea de flujo es cerrada; no tiene principio ni fin. Independientemente de la distribución de corriente, las líneas del campo magnético están cerradas y no se cruzan entre sí; por lo tanto, no existen cargas magnéticas aisladas.

En un campo magnético, el flujo total a través de una superficie cerrada debe ser cero.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad 2-14$$

Al aplicar el teorema de la divergencia a la ecuación 2-14 se obtiene:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 2-15$$

2.1.4 Campos armónicos en el tiempo

El campo armónico cambia periódicamente con el tiempo. El análisis sinusoidal se puede aplicar a la mayoría de las formas de onda utilizando técnicas de transformada de Fourier. Un fasor se representa como:

$$\vec{z} = x + jy = r \angle \phi \quad 2-16$$

Al introducir el tiempo:

$$\phi = \omega t + \theta \quad 2-17$$

Donde θ esta en función de coordenadas (temporales o especiales o una constante). La parte real (Re) e imaginaria (Im) se expresa:

$$r e^{j\phi} = r e^{j\theta} e^{j\omega t} \quad 2-18$$

Desarrollando la ecuación anterior en su parte real e imaginaria:

$$\begin{aligned} Re(r e^{j\phi}) &= r \cos(\omega t + \theta) \\ Im(r e^{j\phi}) &= r \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad 2-19$$

Así una corriente sinusoidal $I(t) = I_o \cos(\omega t + \theta)$ representa la parte real de 2-18 e $I'(t) = I_o \sin(\omega t + \theta)$ representa la parte imaginaria de 2-18. Utilizar ambas expresiones en el mismo momento (real e imaginaria) no es factible.

La expresión $I_o e^{j\theta}$, muestra la supresión del factor tiempo $e^{j\omega t}$ en $I(t)$, se llama corriente de fase y se define:

$$I_s = I_o e^{j\theta} \quad 2-20$$

El subíndice “s” se relaciona con la forma del fasor $I(t)$, así $I(t) = I_o \cos(\omega t + \theta)$. La forma instantánea se expresa:

$$I(t) = \text{Re}(I_s e^{j\omega t}) \quad 2-21$$

2.2 Método de elemento finito²

El método de elementos finitos (FEM) se originó en el análisis estructural y se aplicó a problemas electromagnéticos recién en 1968.

El método de elementos finitos es adecuado para geometrías con límites de forma irregular. El desarrollo tiene cuatro pasos principales:

- Discretizar el dominio de la solución en un número limitado de subdominios o elementos.
- Deducir las ecuaciones que gobiernan los elementos representativos.
- Recoger todos los elementos en el área de solución.
- Resolver el sistema de ecuaciones resultante..

2.2.1 Discretización de los elementos finitos

La región de solución se divide en varios elementos finitos como se muestra en la **Figura 2-3**, en manera de ejemplo se considera dividir la región en 6 elementos triangulares y 7 nodos.

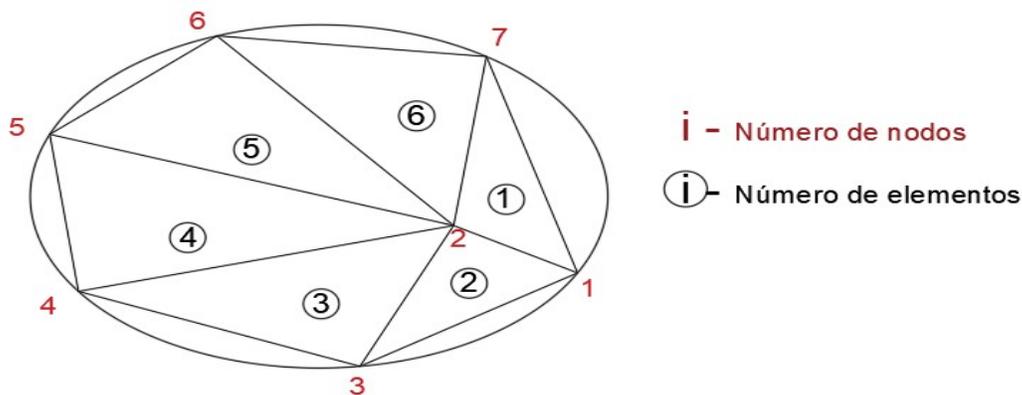


Figura 2-3 Subdivisión del elemento finito representativo de un dominio irregular

Fuente: Adaptado de Método del elemento finito (p.695), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

² La teoría mostrada corresponde a (Sadiku, 2002)

Se trata de encontrar un valor próximo al potencial V_e en el elemento e y posteriormente se relaciona las distribuciones de potencial entre los distintos elementos de manera que el potencial sea continuo entre los puntos de lado a lado de la frontera en los elementos. La solución cercana para toda la región es:

$$V(x, y) \approx \sum_{e=1}^N V_e(x, y) \quad 2-22$$

De la ecuación, N es el número de elementos triangulares en la que se secciona la región para encontrar la solución.

Una forma común de solución de V_e en un elemento es por aproximación polinomial. Por tanto, se tiene en el elemento triangular:

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad 2-23$$

Y en el caso cuadrilátera:

$$V_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad 2-24$$

La solución para elementos cuadriláteros es aplicable en fronteras regulares, pero cuando son figuras irregulares es mejor los elementos triangulares ya que se adaptan mejor a la forma geométrica.

2.2.2 Ecuaciones que rigen a los elementos

El potencial en la **Figura 2-4** es V_{e1} , V_{e2} y V_{e3} en los vértices 1, 2 y 3 (llamados nodos).

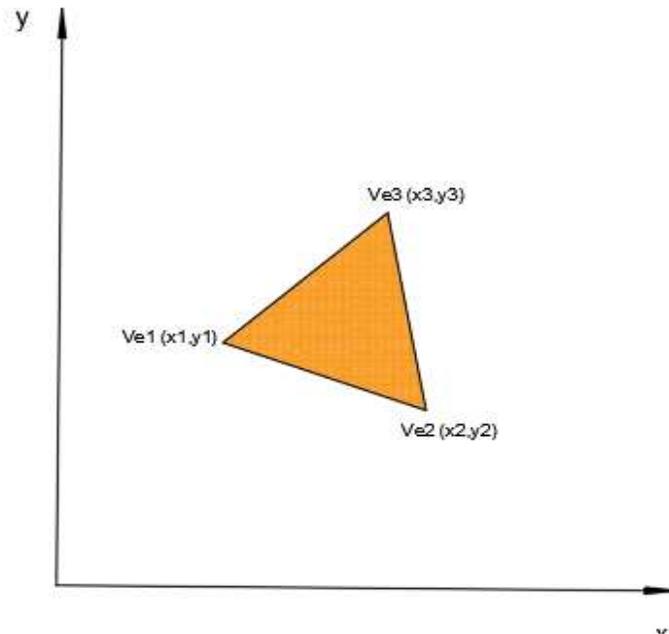


Figura 2-4 Elemento triangular representativo

Fuente: Adaptado de Método del elemento finito (p.697), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

De lo cual se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad 2-25$$

La solución de la ecuación 2-23 resulta:

$$V_e = [1 \quad x \quad y] \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad 2-26$$

o

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad 2-27$$

Donde:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y]$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y]$$

Donde A representa el área del elemento e :

$$2A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

$$= (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)$$

$$A = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)] \quad 2-28$$

Si los nodos se enumeran en sentido antihorario, el valor de A es positivo.

La ecuación 2-27 da el potencial en cualquier punto (x,y) de la celda siempre que se conozca el potencial en el vértice.

Tomar en consideración que los α_i es una función de interpolación lineal. Estas se denominan funciones de forma de elemento y tienen las siguientes propiedades:

$$\alpha_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

La energía por unidad de longitud asociada al elemento viene dada por:

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad 2-29$$

Se está considerando una región de solución de dos dimensiones sin carga ($\rho_s=0$). Según la ecuación 2-27:

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad 2-30$$

Reemplazando la ecuación 2-30 en la ecuación 2-29 se obtiene:

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} \left[\int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} \quad 2-31$$

Si el componente entre corchetes se especifica como:

$$C_{if}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \quad 2-32$$

La ecuación 2-31 se expresa en forma matricial como:

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad 2-33$$

El exponente T representa la transposición de la matriz

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

$[C^{(e)}]$ es la matriz de coeficientes de los elementos, sus coeficientes se relacionan con los nodos i y j; el valor se consigue de las ecuaciones 2-27 y 2-32.

2.2.3 Reunión de todos los elementos

Se debe reunir los elementos en la región de solución. La energía se obtiene con la unión de todos los elementos en la malla:

$$W = \sum_{e=1}^N \frac{1}{2} \varepsilon [V]^T [C] [V] \quad 2-34$$

Donde:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

n es el número de nodos, N es el número de elementos y C es la matriz de coeficientes global.

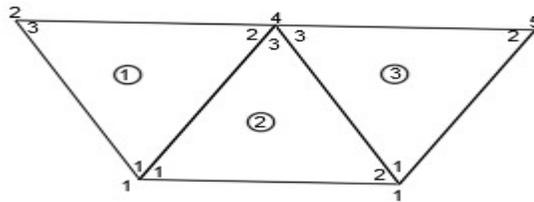


Figura 2-5 Reunión de tres elementos: i, j, k con numeración local 1-2-3

Fuente: Adaptado de Método del elemento finito (p.700), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

2.2.4 Resolución de las ecuaciones resultantes

La ecuación de Laplace (o la de Poisson) se cumple cuando la energía total en la zona o región de solución es mínima. Por tanto, las derivadas parciales de W en función de cada nodo de potencial es cero.

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \dots = \frac{\partial W}{\partial V_n} = 0$$

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad 2-35$$

Para obtener $\frac{\partial W}{\partial V_1} = 0$, por ejemplo, en la malla de elementos finitos de la **Figura 2-5** se tiene 3 elementos, los cuales son reemplazados en la ecuación 2-34, obteniéndose la derivada parcial de W respecto a V_1 , obteniendo:

$$0 = \frac{\partial W}{\partial V_1} = 2V_1C_{11} + V_2C_{12} + V_3C_{13} + V_4C_{14} + V_5C_{15} + V_2C_{21} + V_3C_{31} + V_4C_{41} + V_5C_{51}$$

En general la solución se conduce:

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \quad 2-36$$

n es la cantidad de nodos en la malla. Al expresar la ecuación 2-36 para todos los nodos $k=1, 2, \dots, n$ se consigue un grupo de ecuaciones para los cuales se tiene que hallar la solución de $[V]^T = [V_1, V_2, \dots, V_n]$.

2.3 Componentes principales del transformador

Los transformadores son máquinas estáticas y tienen distintos componentes. Entre los más resaltantes:

Leyenda:

1. Núcleo
2. Devanado
3. Aceite
4. Tanque
5. Tapa
6. Pasatapas
7. Accesorios

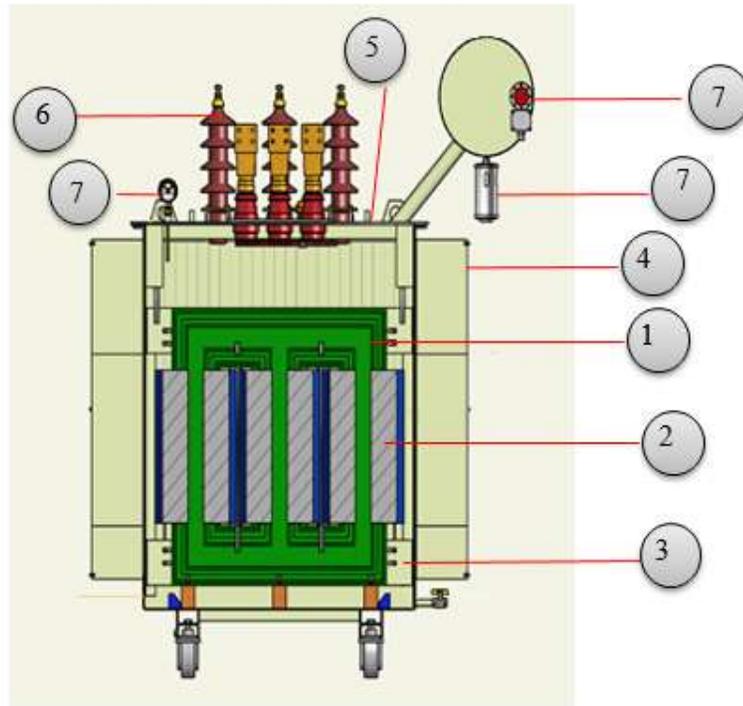


Figura 2-6 Partes del transformador

2.3.1 Núcleo

Los transformadores consisten en un núcleo magnético compuesto de láminas delgadas de aleación de acero a base de silicio (alrededor de 3% a 5%) (Ras, 1975). El silicio reduce las pérdidas por histéresis y aumenta la resistencia del acero (reduciendo las pérdidas por corrientes parásitas). El grosor de la lámina utilizada varía según las características del material, encontrándose en 0.23, 0.27, 0.3, 0.35 mm de espesor. Las pérdidas en el núcleo se producen debido a la histéresis y las corrientes de Foucault. La pérdida por histéresis se da en vatios por kilogramo de material y se puede expresar a 50 Hz o 60 Hz en varias inductancias operativas (siendo común de 1,6 a 1,8 teslas). Las láminas de grano orientado se fabrican con un tratamiento especial (termoquímico de

nombre "carlite"), que proporciona el aislamiento (en ambos lados) para reducir las pérdidas provocadas por las corrientes parásitas.

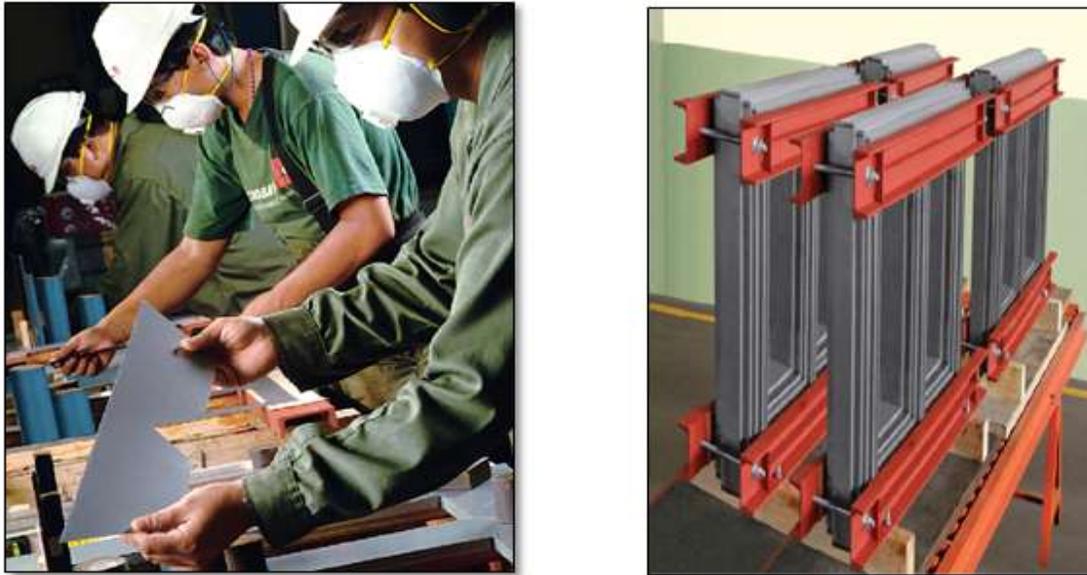


Figura 2-7 Núcleo del transformador

Fuente: Adaptado de Catálogo transformadores de distribución (DELCROSA, 2022)

2.3.2 Devanado

Los devanados son realizados por materiales de cobre o aluminio con un grado de pureza al 99.9999%, con lo cual se puede tener un valor de pérdidas aceptables. Existen diferentes tipos de ejecuciones de devanados los cuales dependen de la tensión y de la corriente; siendo lo más común en transformadores de distribución el de tipo capa continua, y para transformadores de potencia el de tipo de disco continuo.

En los devanados existen dos tipos de pérdidas: las óhmicas y las pérdidas adicionales, este último es producto del flujo de dispersión en el devanado y del acoplamiento de materiales magnéticos, como la parte metálica (fierro) del transformador.

Durante el proceso de fabricación estos devanados son secados y ajustados a presión con la finalidad de no tener humedad y ser estructuralmente sólidos. Siendo finalmente ensamblado en el núcleo y conectado a los pasatapas (bushing) para la ligación a la parte exterior del transformador.

Este material tiene las siguientes características:

Tabla 2-1 Propiedades del cobre

PROPIEDADES DEL COBRE	
Permitividad Relativa (ϵ_r) y vacío (ϵ_0)	1 y 8.8541878176 (F/m)
Permeabilidad Relativa (μ_r) y vacío (μ_0)	1 y $4\pi 10^{-7}$ (T.m/A)
Conductividad (σ)	$58000000 (\Omega.m)^{-1}$

Fuente: Adaptado de Apéndice B constantes de materiales (p.737) y Apéndice D (p. 761), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México



Figura 2-8 Elaboración del devanado

Fuente: Adaptado de Catálogo transformadores de distribución (DELCROSA, 2022)

2.3.3 Aceite

El aceite del transformador es de base mineral, tiene dentro de su composición moléculas nafténicas, parafínicas y aromáticas; dependiendo de la proporción puede ser del tipo nafténico o parafínico. En el Perú el uso común es de aceite mineral nafténico.

Al aceite se le reconoce 3 propiedades dentro del transformador que son:

- Refrigeración. – Tiene un coeficiente de refrigeración por convección de 4 veces al aire. Permite disipar el calor al ambiente provocado por las pérdidas del devanado y núcleo del transformador.
- Dieléctrico. – Tiene una permitividad eléctrica de 3 a 4 veces el aire. Esto permite que la tensión de ruptura se encuentre en valores mayores de 50 kV por 2.5 mm de separación de electrodos semicirculares.
- Portador de información. – El comportamiento del transformador (sobrecargas, sobretensiones, humedad, etc.) es almacenado en el aceite con lo cual durante un mantenimiento y/o falla es posible realizar un análisis químico para determinar el estado del transformador.



Figura 2-9 Aceite mineral

Fuente: Adaptado de Catálogo transformadores de distribución (DELCROSA, 2022)

2.3.4 Tanque y tapa.

El tanque y tapa del transformador sirve como un recipiente que contiene la parte activa (devanado y núcleo) y el aceite, aislando estos componentes del medio ambiente.

La plancha utilizada para estos fines es ASTM A-36, aceros con contenido de carbono, para el presente trabajo se le llamará plancha de hierro. Al ser un material ferromagnético es susceptible a acoplamiento magnético, lo que provoca pérdidas (carga térmica) que será evidenciado en calentamiento.

El tanque y la tapa al ser armados soportan vacío de 1 mbar y sobrepresión de 15 PSI sin tener deformaciones permanentes.

Este material tiene las siguientes características:

Tabla 2-2 Propiedades de la plancha de hierro

PROPIEDADES DE LA PLANCHA DE FIERRO	
Permitividad Relativa (ϵ_r) y vacío (ϵ_0)	1 y 8.8541878176 (F/m)
Permeabilidad Relativa (μ_r)y vacío (μ_0)	300 y $4\pi 10^{-7}$ (T.m/A)
Conductividad (σ)	4070000 ($\Omega.m$) ⁻¹

Fuente: Adaptado de “Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers” (p. 315), (J.C. Olivares, 2004), IEEE Proceedings - Science Measurement and Technology

El material de acero inoxidable utilizado en la fabricación es AISI 304 con las siguientes características electromagnéticas

Tabla 2-3 Propiedades del acero inoxidable

PROPIEDADES DE LA PLANCHA DE ACERO INOXIDABLE	
Permitividad Relativa (ϵ_r) y vacío (ϵ_0)	1 y 8.8541878176 (F/m)
Permeabilidad Relativa (μ_r)y vacío (μ_0)	1 y $4\pi 10^{-7}$ (T.m/A)
Conductividad (σ)	1150000 ($\Omega.m$) ⁻¹

Nota. Adaptado de “Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers” (p. 315), (J.C. Olivares, 2004), IEEE Proceedings - Science Measurement and Technology



Figura 2-10 Tapa del transformador

2.3.5 Aisladores o Pasatapas (bushing)

Los pasatapas se utilizan para realizar nexo de los cables de energía de la parte interior a la parte exterior del transformador. Tienen un terminal o una varilla de cobre que está envuelta por porcelana o silicona; en la interfase de cobre a la porcelana ingresa el aceite dieléctrico.

Los pasatapas son determinados por la tensión y la corriente que transmitirá a la red eléctrica. Además, son montados en el tanque o tapa del transformador.



Figura 2-11 Aisladores o pasatapas

Nota. Adaptado portada catálogo (CEDASPE, 2021)

2.4 Pérdidas en los transformadores.

El transformador es una máquina muy eficiente debido a que su eficiencia se encuentra entre 98% a 99%. Las pérdidas que se presentan en el transformador son las pérdidas del núcleo y cobre. La investigación está enfocada en las pérdidas en el cobre en su apartado flujo de dispersión según se observa en la **Figura 2-12**. Se detalla algunos conceptos de las pérdidas en el cobre.

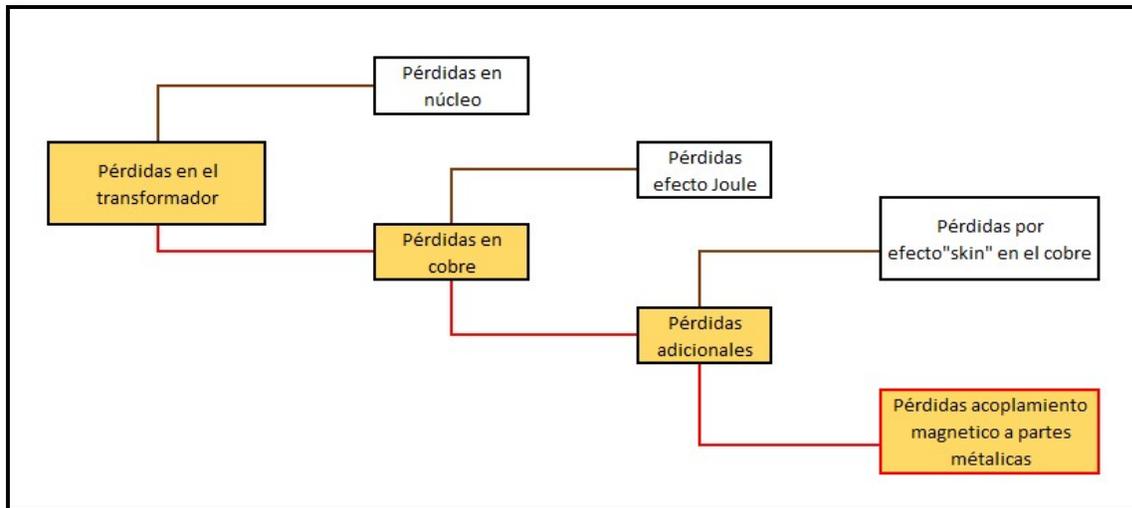


Figura 2-12 Diagrama de pérdidas en el transformador

Las pérdidas en el cobre se manifiestan debido a la corriente que circula por los devanados; gran parte de las pérdidas (85 % aproximadamente) son debido al efecto Joule (P_{Joule}) y la otra parte restante de pérdidas adicionales se provocan por los flujos dispersos en el devanado y por acoplamiento magnético a planchas metálicas.

$$P_{Tcu} = P_{\text{Joule}} + P_{\text{adicionales}} \quad 2-37$$

2.4.1 Pérdidas por efecto Joule:

La pérdida por efecto Joule es la pérdida principal en el devanado. Este tipo de pérdida es determinado por la resistencia R (ohms) y por la corriente continua que circula por el devanado, y viene dada por:

$$P_{Joule} = RI^2$$

2.4.2 Pérdidas adicionales:

Las pérdidas adicionales surgen de la circulación de corriente alterna a través del conductor, lo que provoca un aumento de la resistencia (efecto piel o efecto de superficie). Esto se debe al flujo auto inducido en el cobre y al acoplamiento del campo magnético en las placas metálicas del transformador. Las pérdidas adicionales se subdividen en pérdidas por efecto pelicular y pérdidas por acoplamiento magnético en planchas metálicas

2.4.2.1 Pérdidas por efecto pelicular (efecto skin)

La **Figura 2-13** muestra el flujo de dispersión ϕ_d que atraviesa a los devanados, lo cual provoca este tipo de pérdidas.

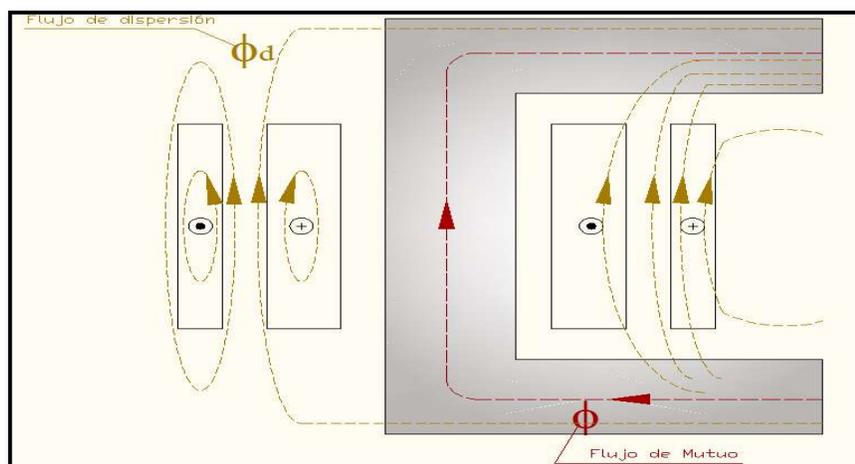


Figura 2-13 Campo magnético dentro del transformador

Fuente: Adaptado de cálculo de características y constantes de transformador en carga (p.46), por (Corrales, 1969), Editorial labor S.A. Barcelona

Para una explicación del fenómeno físico, véase la **Figura 2-14**, donde solo se considera una pequeña parte del devanado (el proceso se representa gráficamente).

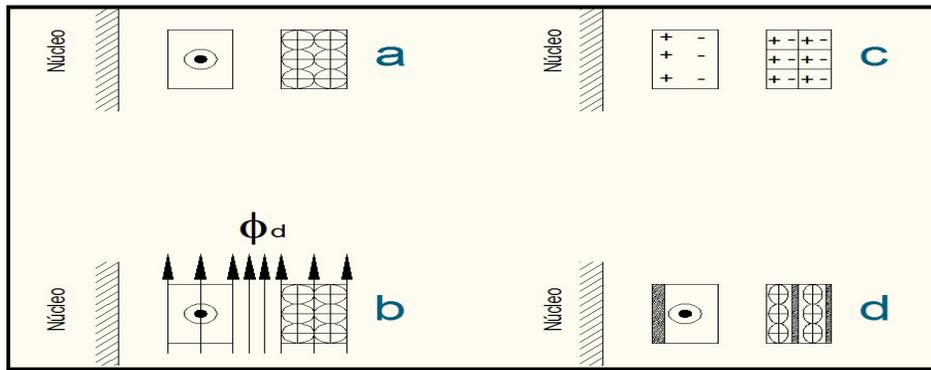


Figura 2-14 a.- Corriente por conductor en el devanado b.- flujo de dispersión c. La corriente de autoinducción que se produce durante la fase ascendente de la corriente. d. Efecto pelicular

Fuente: Adaptado de cálculo de características y constantes de transformador en carga (p.47), por (Corrales, 1969), Editorial labor S.A. Barcelona

Cuando la corriente circula por los devanados, como se indica el punto **a**, estas generan un campo magnético que corta a los devanados según punto **b**, este campo magnético tiende a aumentar; de acuerdo con la ley de Lenz, habrá una corriente dentro de cada conductor opuesto a este campo magnético, como se muestra en **c**, lo cual genera un aumento en un lado del conductor y resta en el lado opuesto, desplazando así la corriente de carga y acumulándose en la zona de la periferia según el punto **d**. La recomendación es laminar las platinas de cobre a espesores pequeños para reducir las corrientes parasitas

2.4.2.2 Pérdidas por acoplamiento magnético en planchas metálicas

Cuando uno o varios conductores son alimentados por corriente eléctrica se genera un fenómeno de acoplamiento a materiales por campo magnético, su intensidad de acoplamiento depende de su permeabilidad magnética (material ferromagnético, paramagnético o diamagnético). Este campo magnético al atravesar el material genera corrientes parasitas que se oponen al campo magnético

principal. Estas corrientes parasitas al ser divididas por la conductividad del material generan las pérdidas.

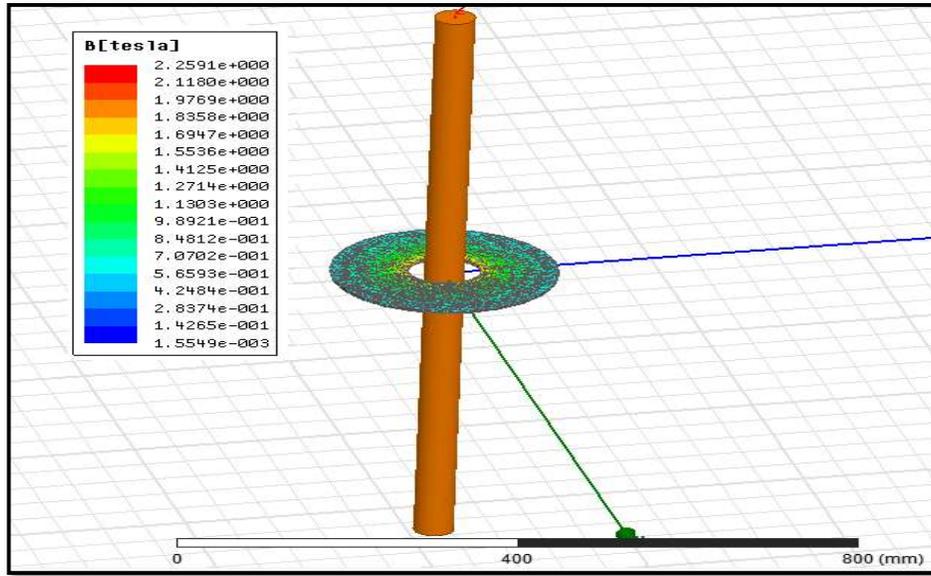


Figura 2-15 Pérdidas por acoplamiento magnético en la plancha de hierro de forma de disco

2.4.3 Cambio de las pérdidas en el devanado en función de la temperatura

Las pérdidas en los devanados dependen de la resistencia R , que a su vez depende de la temperatura de funcionamiento. Según la norma (IEC 60076-1, 2011-04) para transformadores sumergidos en aceite los resultados de pérdidas en el devanado se deben transferir de la temperatura ambiente a 75°C .

Las pérdidas por efecto Joule en el devanado aumentan con la temperatura y las pérdidas adicionales disminuyen con la temperatura, por tanto, la separación de pérdidas es necesaria. Según la norma (IEC 60076-1, 2011-04) en su anexo E describe el comportamiento según la siguiente fórmula:

$$P_{Tcu(temp_{ref})} = \frac{(234.5 + temp_{ref})}{(234.5 + temp_{medida})} * P_{Joule} + \frac{(234.5 + temp_{medida})}{(234.5 + temp_{ref})} * P_{adic} \quad 2-39$$

2.4.4 Valores de pérdidas en los transformadores

Se muestra cuadro de pérdidas del cobre y pérdidas en el núcleo para diferentes potencias del transformador. La información es recopilada de transformadores fabricados por DELCROSA a partir del protocolo de pruebas

Tabla 2-4 Cuadro de pérdidas y eficiencia de transformador

Serie de transformador	Potencia S_t - (kVA)	Corriente (A)	Pérdidas núcleo P_{nu} - (W)	Pérdidas totales cobre P_{Tcu} - (W)	Eficiencia (%)
148088	1000	1202	1635	11998	98.66%
149343	1250	1503.5	1827	14319	98.72%
148795	1500	1800	2596	14936	98.84%
148055	2000	2405	3001	17786	98.97%
148473	2500	3000.7	3525	22064	98.99%

La eficiencia (η) se calculó a partir de ecuación 2-40 (Ras, 1975) en su apartado II-8 donde se expresa la fórmula de la eficiencia:

$$\eta = \frac{S_t}{S_t + P_{fe} + P_{Tcu}} * 100 \quad 2-40$$

Capítulo 3. DESARROLLO

El presente trabajo muestra el modelo teórico, la simulación numérica y la corroboración mediante ensayo en laboratorio de un fabricante de transformadores (DELCROSA) de una plancha de hierro ASTM A36 de 1200 x 800 x 6 mm con tres agujeros de 87 mm de diámetro. Por cada agujero atravesará un conductor de cobre que conducirá 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 amperios.

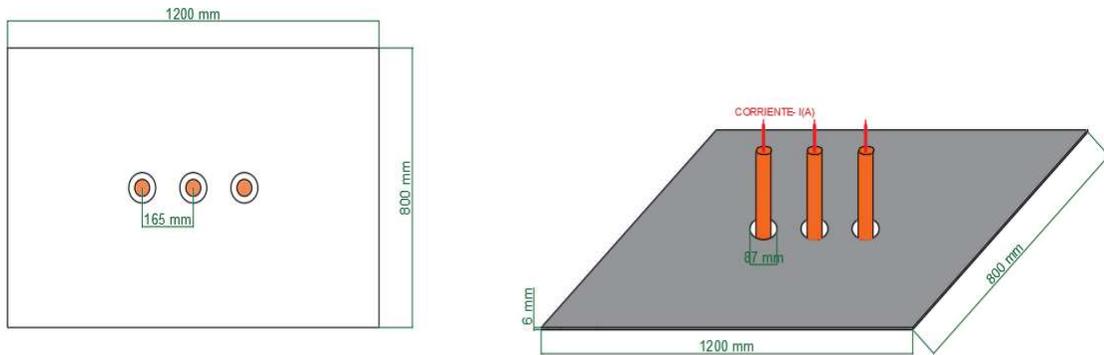


Figura 3-1 Dimensiones de la plancha de hierro para el estudio

Además, se contemplará la mitigación mediante un inserto de acero inoxidable AISI 304 (material antimagnético) para la disminución de las pérdidas.

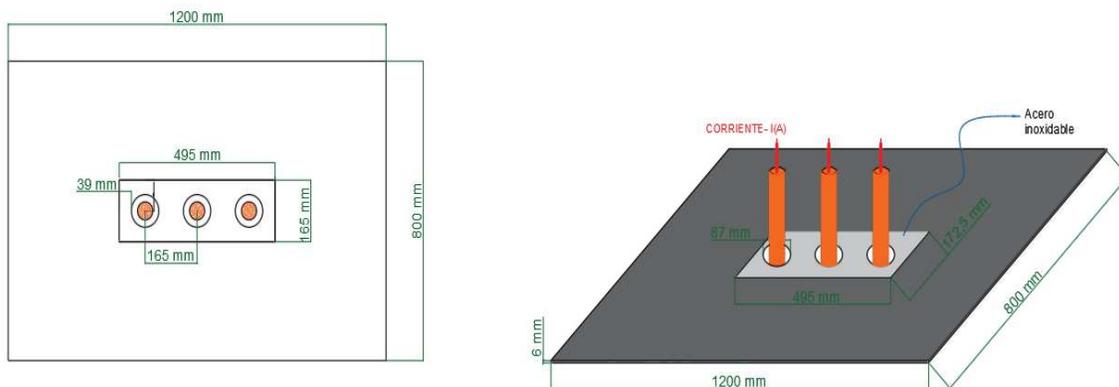


Figura 3-2 Dimensiones de la plancha de hierro con inserto de plancha inoxidable

Se contempla 3 etapas de desarrollo, cada una de ellas utilizará distintas corrientes mencionadas dando como resultado las pérdidas por flujo de dispersión en la tapa del transformador.

1. Estudio Análítico.- Se utilizarán las ecuaciones Maxwell para realizar una fórmula aproximada que describa las pérdidas por flujo disperso en la tapa que sirva para calcular las pérdidas con plancha de hierro, según **Figura 3-1**
2. Simulación numérica.- Se utilizará el software ANSYS Maxwell Versión 15.0 licenciado en la empresa DELCROSA, donde se aplicara técnicas para mejorar la malla y así reducir los tiempos de ejecución. Se realizará para ambos casos: plancha de hierro según **Figura 3-1** y plancha de hierro con inserto de acero inoxidable **Figura 3-2**
3. Estudio experimental.- Los ensayos se realizarán en la fabrica “Construcciones Electromecánicas DELCROSA S.A.”; durante los ensayos se medirán las pérdidas. Este punto se realizará con plancha de hierro según **Figura 3-1** y plancha de hierro con inserto de acero inoxidable **Figura 3-2**

Finalmente se realizará una comparación entre los tres puntos mencionado líneas arribas para la conclusión del trabajo.

3.1 Estudio Analítico³

El presente trabajo estimará, mediante cálculo teórico, las pérdidas que se producen en la tapa del transformador cuando es atravesado por un conductor energizado (conduce corriente). La geometría se muestra en la **Figura 3-3**:

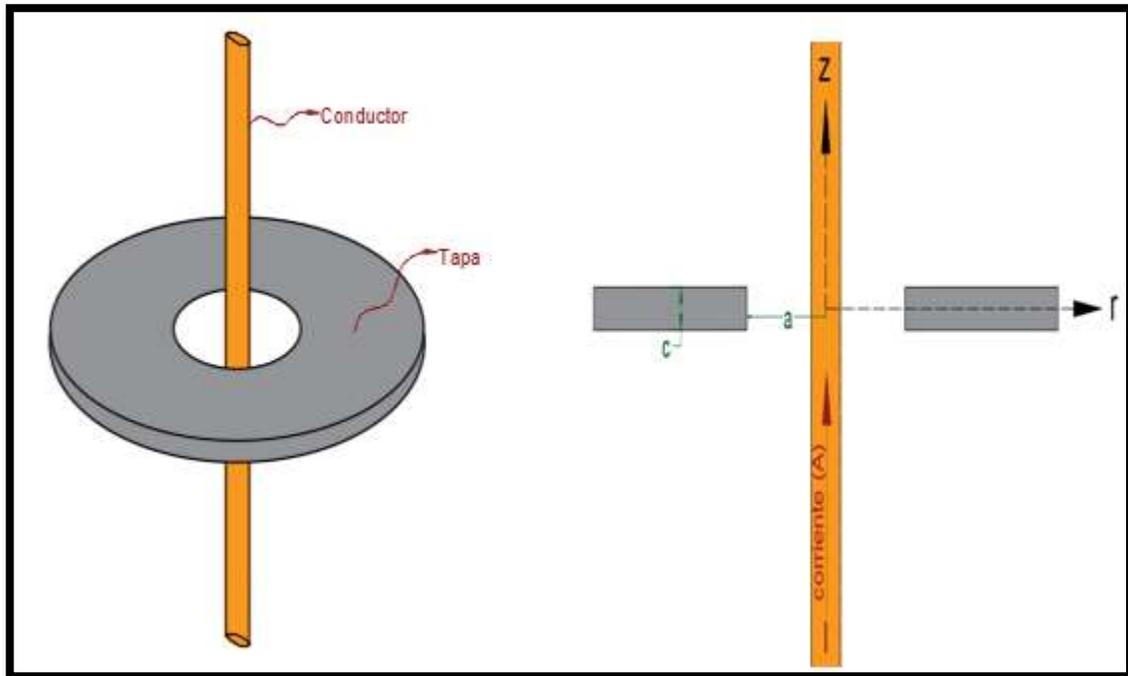


Figura 3-3 Geometría idealizada y parámetros usados para calcular las pérdidas debido a un cable que pasa a través del tanque

Fuente:.. Adaptada (Vecchio, 2003)

Pero para obtener una solución del problema se asume que:

- El conductor tenga una longitud infinita
- La tapa tiene como geometría un circular

³ Referencia (Vecchio, 2003)

Cuando se asume que la tapa es un círculo de gran radio centrado en el agujero, por la teoría punto 2.1.2, se conoce que la concentración del campo magnético será cerca al agujero, por tanto, las pérdidas también se concentrarán en ese punto. También, desde que el campo que genera las corrientes parasitas en la tapa viene de la porción del cable cerca del tanque, la extensión infinita no afecta grandemente el resultado analítico.

La geometría en la **Figura 3-3** se puede trabajar con las ecuaciones de Maxwell en un sistema de coordenadas cilíndricas. La permeabilidad (μ) de la pared del tanque y la conductividad (σ). Combinando las ecuaciones de Maxwell con la ley de Ohm dentro de la pared de la tapa y asumiendo que varían armónicamente en el tiempo.

Al juntar la ecuación 2-10 se obtiene:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma(\vec{E}) \quad 3-1$$

Aplicando $\nabla \times$ a ambos lados de la ecuación, resulta:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \times (\sigma(\vec{E})) \quad 3-2$$

Por identidades vectoriales se obtiene:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2(\vec{H}) = \sigma(\nabla \times(\vec{E})) \quad 3-3$$

De la ecuación 2-15 se obtiene $\nabla \cdot \vec{H} = 0$, además, al sustituir la ecuación 2-5 en la ecuación 3-3, brinda la siguiente expresión:

$$-\nabla^2 \cdot \vec{H} = \sigma \left(-\frac{d\vec{B}}{dt} \right) \quad 3-4$$

Despejando con la ecuación 2-11 se obtiene:

$$\nabla^2 \cdot \vec{H} = \sigma \mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad 3-5$$

Reemplazando la expresión sinusoidal \vec{H} según la ecuación 2-21, se tiene:

$$\vec{H}(r, t) = \vec{H}e^{j\omega t} \quad 3-6$$

Reemplazando la ecuación 3-6 en 3-5, resulta:

$$\nabla^2 \vec{H} = j\omega\sigma\mu\vec{H} \quad 3-7$$

De la **Figura 3-3** se puede determinar que \vec{H} tiene la dirección del componente azimutal (φ), entonces, lo necesario para generar las corrientes parasitas en la plancha de metálica a lo largo de la dirección r y z. Así se tiene:

$$H(r) = H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi \quad 3-8$$

Donde \hat{a}_φ es el vector unitario en dirección acimutal. Expresando la ecuación 3-7 y 3-8 en coordenadas cilíndricas por el comportamiento del campo magnético de forma circular y usando la ecuación 3-8, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \{H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi\}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \{H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi\}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \{H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi\}}{\partial z^2} \\ = j\omega\mu\sigma H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi \end{aligned} \quad 3-9$$

El vector unitario \hat{a}_φ tiene una dependencia angular expresada:

$$\hat{a}_\varphi = -\text{sen}\varphi\hat{a}_x + \text{cos}\varphi\hat{a}_y \quad 3-10$$

Reemplazando la ecuación 3-10 en la ecuación 3-9, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{a}_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \{H_\varphi(r, z)\}}{\partial r} \right) + \frac{H_\varphi(r, z)}{r^2} \frac{\partial^2 \{(-\text{sen}\varphi\hat{a}_x + \text{cos}\varphi\hat{a}_y)\}}{\partial \varphi^2} + \frac{\hat{a}_\varphi \partial^2 \{H_\varphi(r, z)\}}{\partial z^2} \\ = j\omega\mu\sigma H_\varphi(r, z)\hat{a}_\varphi \end{aligned} \quad 3-11$$

Derivando la ecuación anterior, se llega a:

$$\frac{\hat{a}_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \{H_\varphi(r, z)\}}{\partial r} \right) - \frac{H_\varphi(r, z) \hat{a}_\varphi}{r^2} + \frac{\hat{a}_\varphi \partial^2 \{H_\varphi(r, z)\}}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma H_\varphi(r, z) \hat{a}_\varphi \quad 3-12$$

La ecuación 3-15 debe estar sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi a}, r = a,$$

$$H_\varphi = 0, r = \infty \quad 3-13$$

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi r}, \quad z = \pm \frac{c}{2}$$

Para resolver la ecuación 3-12, se utilizará la técnica de separación de variables, para esto se definen las variables:

$$H_\varphi(r, z) = R(r)Z(z) \quad 3-14$$

Reemplazando la ecuación 3-14 en la ecuación 3-12, se obtiene:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial RZ}{\partial r} \right) - \frac{RZ}{r^2} + \frac{\partial^2 RZ}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma RZ \quad 3-15$$

Resolviendo la expresión y realizando la separación de variables:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rZ \frac{\partial R}{\partial r} \right) - \frac{RZ}{r^2} + R \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma RZ$$

$$\frac{1}{R} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R}{\partial r} \right) - \frac{R}{r^2} \right) + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma \quad 3-16$$

Se puede notar que existen dos funciones, uno de dependencia de r y otra de dependencia de z, además la suma de estas dos funciones es una constante. Es posible escoger la siguiente solución:

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma \quad 3-17$$

$$\frac{1}{R} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R}{\partial r} \right) - \frac{R}{r^2} \right) = 0 \quad 3-18$$

Se puede considerar $k^2 = j\omega\mu\sigma$ tal que: $k = (1 + j)q, q = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$

De las diversas soluciones de la ecuación diferencia se puede resolver la ecuación 3-17 como:

$$Z = \cosh kz, Z' = k \sinh kz, Z'' = k^2 \cosh kz$$

$$\frac{1}{\cosh kz} (k^2 \cosh kz) = k^2$$

Entonces se comprueba que una solución es:

$$Z = \cosh kz \rightarrow Z = \cosh(qz) \cos(qz) - j \sinh(qz) \sin(qz) \quad 3-19$$

Se resuelve la ecuación 3-18 por ecuaciones diferenciales de Cauchy Euler, pero antes se le brindará la forma de solución:

$$\frac{1}{R} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R}{\partial r} \right) - \frac{R}{r^2} \right) = 0$$

$$\frac{1}{R} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} - \frac{R}{r^2} \right) = 0$$

$$r^2 \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + r \frac{\partial R}{\partial r} - R = 0 \quad 3-20$$

Aplicando Cauchy-Euler:

$$R = r^a, R' = ar^{a-1}, R'' = a(a-1)r^{a-2}$$

$$a(a-1)r^{a-2}$$

Reemplazando en la ecuación 3-20:

$$r^2(a(a-1)r^{a-2}) + r(ar^{a-1}) - r^a = 0$$

$$(a^2 - 1)r^a = 0$$

De la ecuación anterior se puede decir que la componente r^a no puede ser 0, entonces el otro componente es 0, por lo tanto, la solución será:

$$a = 1 \text{ y } a = -1$$

$$R = r \text{ y } R = \frac{1}{r}$$

Se escogerá como solución:

$$R = \frac{1}{r} \quad 3-21$$

Usando las condiciones de frontera 3-13, la completa solución sería:

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi r} \left(\frac{\cosh(qz) \cos(qz) - j \sinh(qz) \sin(qz)}{\cosh(qc/2) \cos(qc/2) - j \sinh(qc/2) \sin(qc/2)} \right) \quad 3-22$$

Para calcular la corriente parasita generada debido a H_φ se puede utilizar la ecuación 2-10 como sigue:

$$\vec{J} = \nabla \times H \quad 3-23$$

Operando la rotación en coordenadas cilíndricas:

$$\vec{J} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} \right) \hat{a}_r + \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \hat{a}_\varphi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r H_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi} \right) \hat{a}_z \quad 3-24$$

Como se mencionó y representó en la ecuación 3-8, la intensidad de campo \vec{H} tiene como dirección angular con dependencia radial y axial. Además, debido a que los espesores de la plancha son pequeñas comparados con el radio de influencia, se despreciará el efecto de la componente z en la corriente parasita \vec{J} .

$$\vec{J} = - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} \hat{a}_r \quad 3-25$$

$$\vec{J} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{I}{2\pi r} \left(\frac{\cosh(qz) \cos(qz) - j \sinh(qz) \sin(qz)}{\cosh(qc/2) \cos(qc/2) - j \sinh(qc/2) \sin(qc/2)} \right) \right) \hat{a}_r$$

$$\vec{j} = -\frac{I}{2\pi r} \left(\frac{-q \sin(qz) \cosh(qz) + q \cos(qz) \sinh(qz) - j(\cos(qz) \sinh(qz) + \sin(qz) \cosh(qz))}{\cosh(qc/2) \cos(qc/2) - j \sinh(qc/2) \sin(qc/2)} \right) \hat{a}_r$$

$$\vec{j} = \frac{Iq}{2\pi r} \left(\frac{\sin(qz) \cosh(qz) - \cos(qz) \sinh(qz) + j(\cos(qz) \sinh(qz) + \sin(qz) \cosh(qz))}{\cosh(qc/2) \cos(qc/2) - j \sinh(qc/2) \sin(qc/2)} \right) \hat{a}_r \quad 3-26$$

En la densidad de corriente se asume que la corriente está en rms, por tanto.

$$\begin{aligned} \frac{|J|^2}{\sigma} &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{(\sin(qz) \cosh(qz) - \cos(qz) \sinh(qz))^2 + (\cos(qz) \sinh(qz) + \sin(qz) \cosh(qz))^2}{\left(\cosh\left(\frac{qc}{2}\right) \cos\left(\frac{qc}{2}\right) \right)^2 + \left(\sinh\left(\frac{qc}{2}\right) \sin\left(\frac{qc}{2}\right) \right)^2} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{2 \sin^2(qz) \cosh^2(qz) + 2 \cos^2(qz) \sinh^2(qz)}{\cosh^2\left(\frac{qc}{2}\right) \cos^2\left(\frac{qc}{2}\right) + \sinh^2\left(\frac{qc}{2}\right) \sin^2\left(\frac{qc}{2}\right)} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{2 \sin^2(qz) \cosh^2(qz) + 2 \cos^2(qz) \sinh^2(qz)}{\cosh^2\left(\frac{qc}{2}\right) \cos^2\left(\frac{qc}{2}\right) + \sinh^2\left(\frac{qc}{2}\right) \sin^2\left(\frac{qc}{2}\right)} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{2 \sin^2(qz) \cosh^2(qz) + 2 \cos^2(qz) \cosh^2(qz) - 2 \cos^2(qz)}{\cosh^2\left(\frac{qc}{2}\right) \cos^2\left(\frac{qc}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{qc}{2}\right) \cosh^2\left(\frac{qc}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{qc}{2}\right)} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{2 \cosh^2(qz) - 1 - 2 \cos^2(qz) + 1}{\cosh^2\left(\frac{qc}{2}\right) - \frac{1}{2} - \sin^2\left(\frac{qc}{2}\right) + \frac{1}{2}} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{\cosh(2qz) - \cos(2qz)}{\frac{\cosh(qc)}{2} + \frac{\cos(qc)}{2}} \right) \\ &= \frac{2}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{\cosh(2qz) - \cos(2qz)}{\cosh(qc) + \cos(qc)} \right) \end{aligned}$$

Calculando las pérdidas en el volumen de la superficie metálica:

$$\begin{aligned} P_{fe} &= \int_{-c/2}^{c/2} \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{|J|^2}{\sigma} r d\varphi dr dz \\ P_{fe} &= 2\pi \int_a^b \int_{-c/2}^{c/2} r \frac{2}{\sigma} \left(\frac{Iq}{2\pi r} \right)^2 \left(\frac{\cosh(2qz) - \cos(2qz)}{\cosh(qc) + \cos(qc)} \right) dz dr \end{aligned}$$

$$P_{fe} = 2\pi \int_a^b r \frac{2}{\sigma} \left(\frac{lq}{2\pi r}\right)^2 \frac{1}{q} \left(\frac{\sinh(qc) - \sin(qc)}{\cosh(qc) + \cos(qc)}\right) dr$$

$$P_{fe} = \frac{ql^2}{\pi\sigma} \left(\frac{\sinh(qc) - \sin(qc)}{\cosh(qc) + \cos(qc)}\right) \int_a^b \frac{1}{r} dr$$

$$P_{fe} = \frac{ql^2}{\pi\sigma} \left(\frac{\sinh(qc) - \sin(qc)}{\cosh(qc) + \cos(qc)}\right) \left(\ln \frac{b}{a}\right)$$

3-27

Se agrega un factor de corrección (f_c):

$$P_{fe} = f_c \frac{ql^2}{\pi\sigma} \left(\frac{\sinh(qc) - \sin(qc)}{\cosh(qc) + \cos(qc)}\right) \left(\ln \frac{b}{a}\right)$$

3-28

3.1.1 Caso de aplicación

3.1.1.1 Plancha de hierro

Se considera una plancha de hierro de 1200x800x6 mm que circulará las corrientes de 1000, 1500, 2000, 2500, 3000. Además, las propiedades magnéticas de la plancha de hierro mencionadas en Tabla 2-2 $\mu_r = 300$, $g=4070000 (\Omega.m)^{-1}$, $f=60$ Hz, $a=43.5$ mm y $b=95.5$ mm.

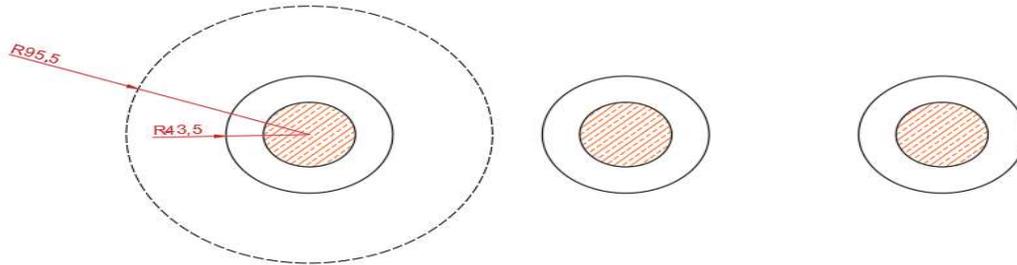


Figura 3-4 Longitud de evaluación (radio a y b)

Procediendo a los cálculos para una corriente 1000 A:

Tabla 3-1 Cálculos teóricos de pérdidas en la plancha de hierro

Plancha de hierro	
a	0.0435 m
b	0.0955 m
c	0.006 m
Permeabilidad relativa	300
Conductividad	4070000 S/m
Frecuencia	60 Hz
Corriente	1000 A
Permeabilidad aire	1.2566E-06 H/m
Factor de corrección	1
qc	3.23
Pérdidas por aislador	36.0 watt/kA ²
Formula aproximada	185.197819 watt/kA ²
Pérdidas totales	108.117 watt

Resultado variando las corrientes:

Tabla 3-2 Resultado de pérdidas en plancha de fierro para distintas corrientes

Corriente -I(A)	Pérdida-Pfe (W)
1000	108
1500	243
2000	432
2500	676
3000	973

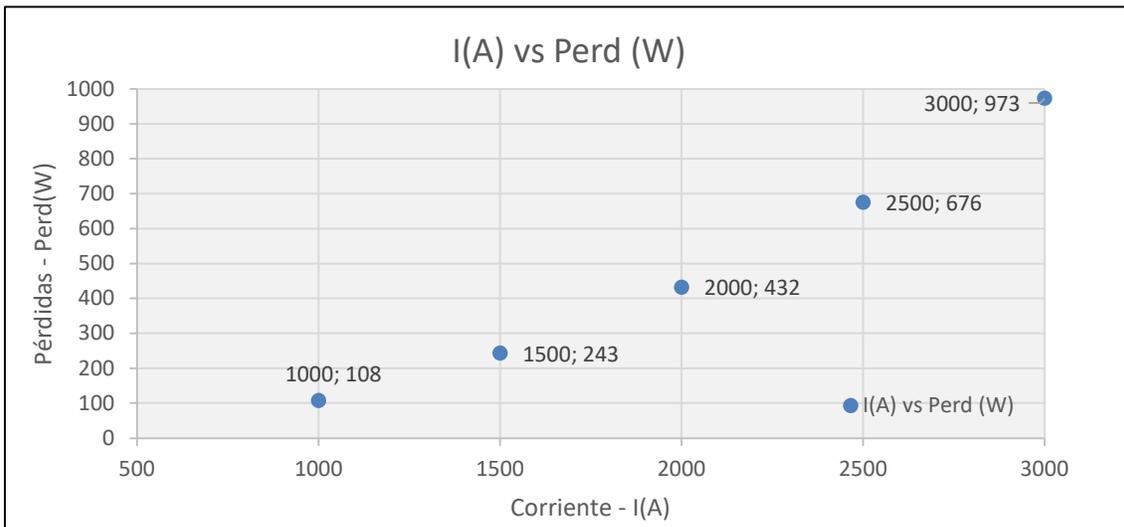


Figura 3-5 Resultado de pérdidas en la plancha de fierro para distintas corrientes

3.2 Simulación numérica

Para la simulación se utilizará el software de la empresa ANSYS, que tiene el paquete computacional de electromagnetismo el software Maxwell Versión 15.0. Las simulaciones fueron realizadas en la empresa DELCROSA que cuenta con la licencia del mismo.

3.2.1 Pérdidas en plancha de fierro

3.2.1.1 Descripción de elemento de análisis

Plancha de fierro:

Se consideró una plancha fierro de 800 x 1200 x 6 mm con agujeros por donde atravesarán conductores de cobre según muestra la **Figura 3-6**

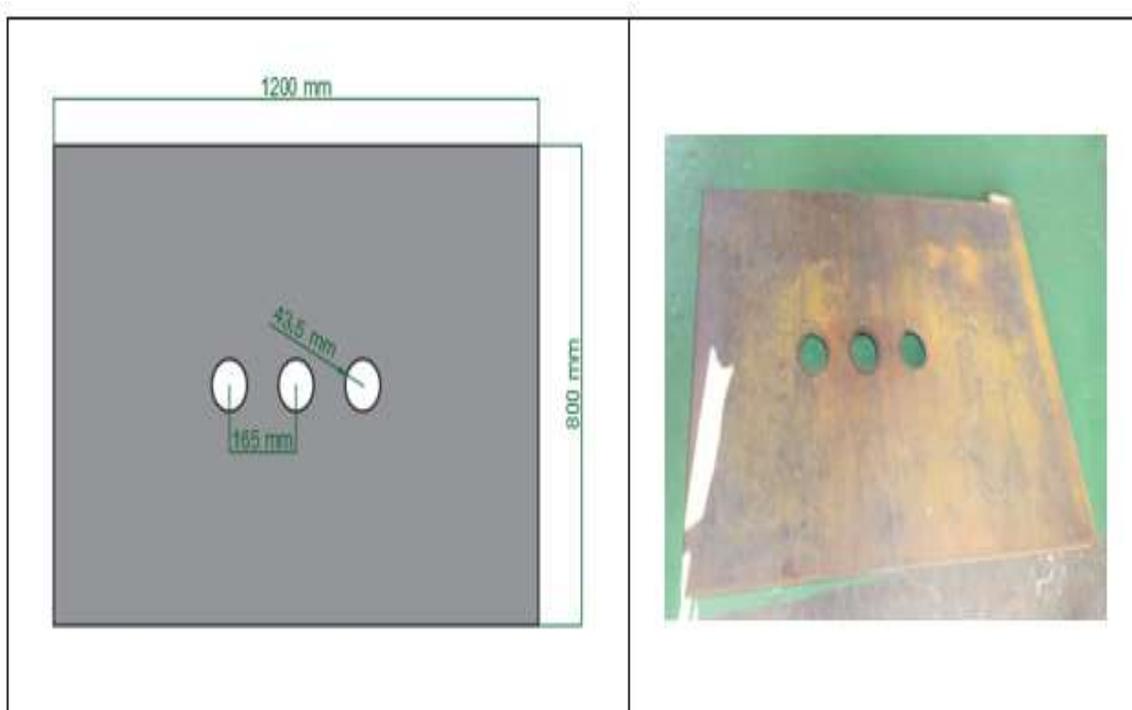


Figura 3-6 Dimensiones de plancha de fierro

Las características electromagnéticas de la plancha de fierro según **Tabla 2-2**

Conductor

Se colocarán tres aisladores o pasatapas cuyo eje principal es de cobre, por el cual circulará la corriente eléctrica (Ver **Figura 3-7**).

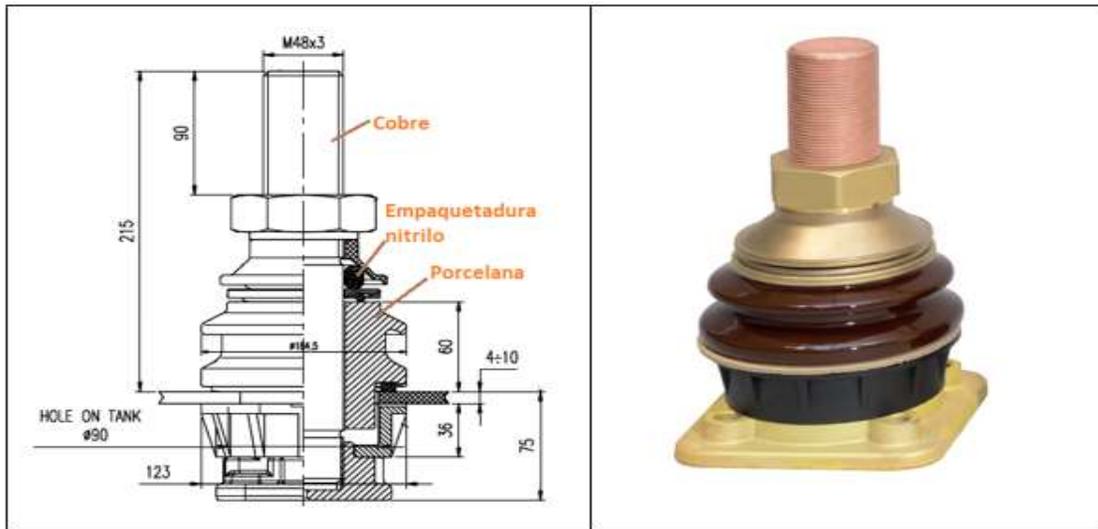


Figura 3-7 Aisladores o pasatapas de cobre tipo ED-N/30 (1/3150 en 50386)

Fuente: Adaptada catálogo Porcelain bushings new cedaspe 1 kV series 2021 (p. 14) (CEDASPE, 2021)

Las características electromagnéticas del cobre están descritas en la **Tabla 2-1**

3.2.1.2 Simplificación del modelo para la aplicación del método numérico

Debido a que el aislador o pasatapas está compuesto a base de porcelana y empaquetaduras que no conducen la corriente eléctrica, además, son materiales no magnéticos ($\mu_r = 1$), se despreciarán para el modelo.

La longitud del cobre es de 1 metro; medio metro sobre la tapa y el otro medio metro debajo de la tapa, debido a la longitud que se necesita para las conexiones cuando se realiza la prueba.

El modelo quedaría según la **Figura 3-8**

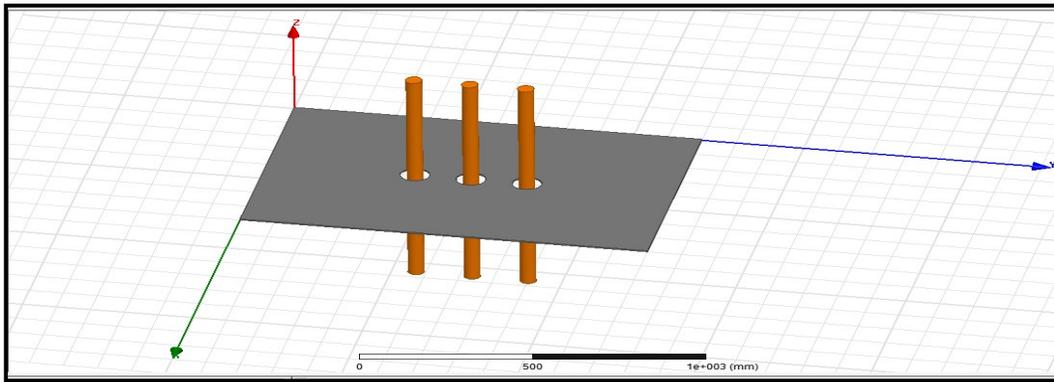


Figura 3-8 Modelo Simplificado para simulación

3.2.1.3 Ajustes numéricos

3.2.1.3.1 Condiciones de Frontera:

- La condición de frontera exterior utilizada es:

Frontera Natural. - La intensidad de campo (H) es continua a través de la frontera

Frontera Neumann. La intensidad de campo (H) es tangencial a la frontera y el flujo no puede atravesarla.

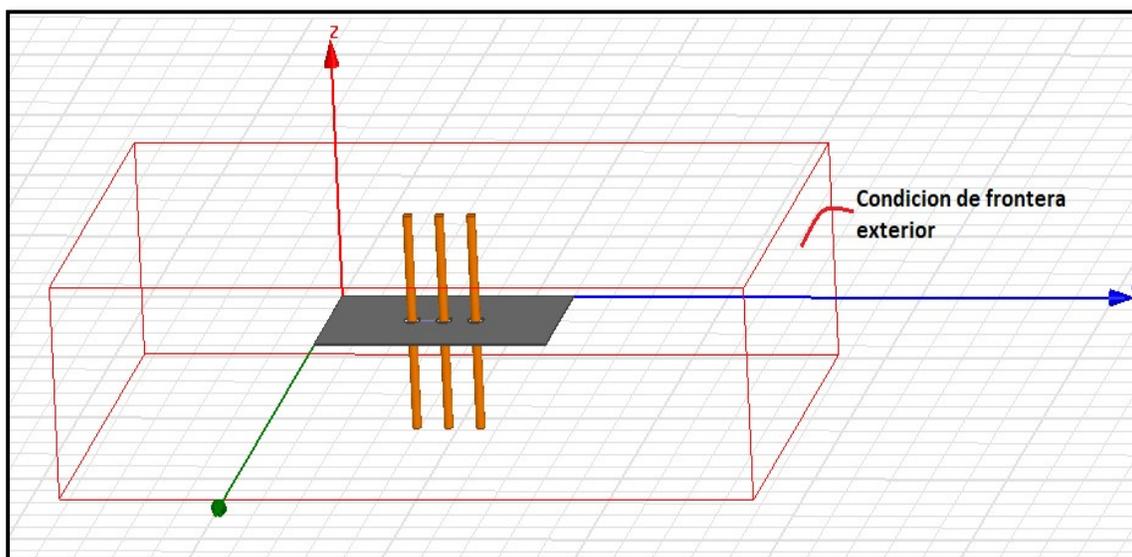


Figura 3-9 Condición de frontera exterior

- Entre medios magnéticos distintos se aplica:

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$H_{t1} = H_{t2}$$

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

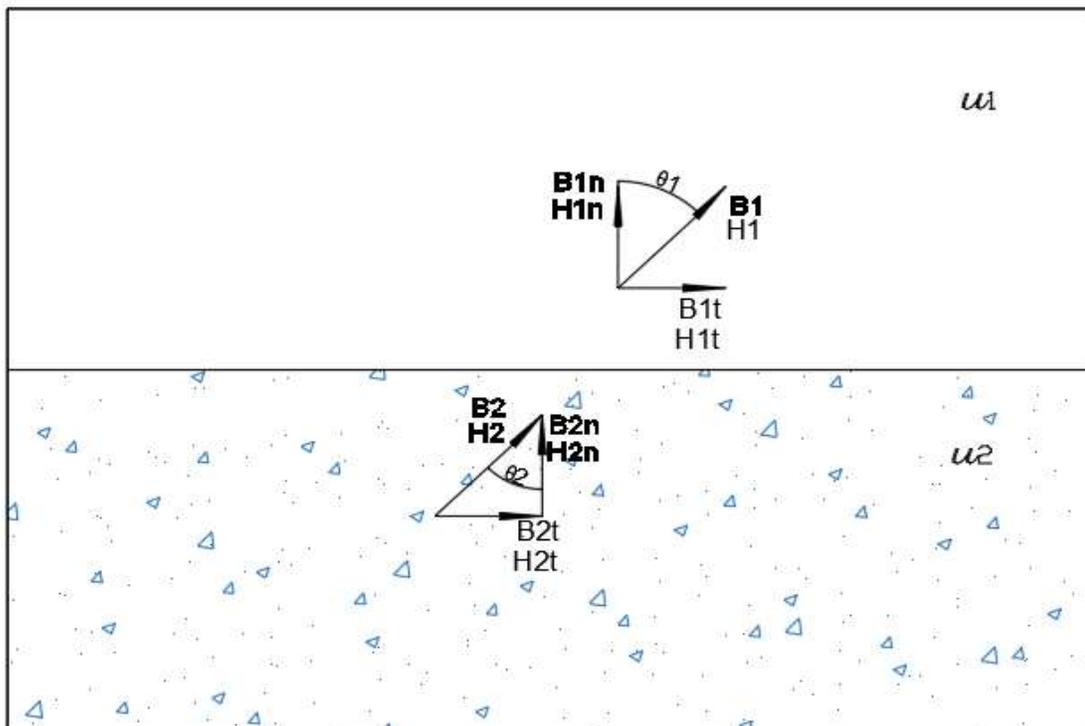


Figura 3-10 Condición de frontera entre dos medios magnéticos

Nota. Adaptado de condiciones de frontera en magnetismo (p.330), por (Sadiku, 2002), Oxford Press México

3.2.1.3.2 Ingreso de la excitación a los conductores (Excitations)

A continuación se muestra el ingreso de datos de excitación del conductor en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

La corriente de excitación en el cobre varía en la fase U, V y W en 120°, además la corriente varía en 5 escenarios 1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A y 3000 A.

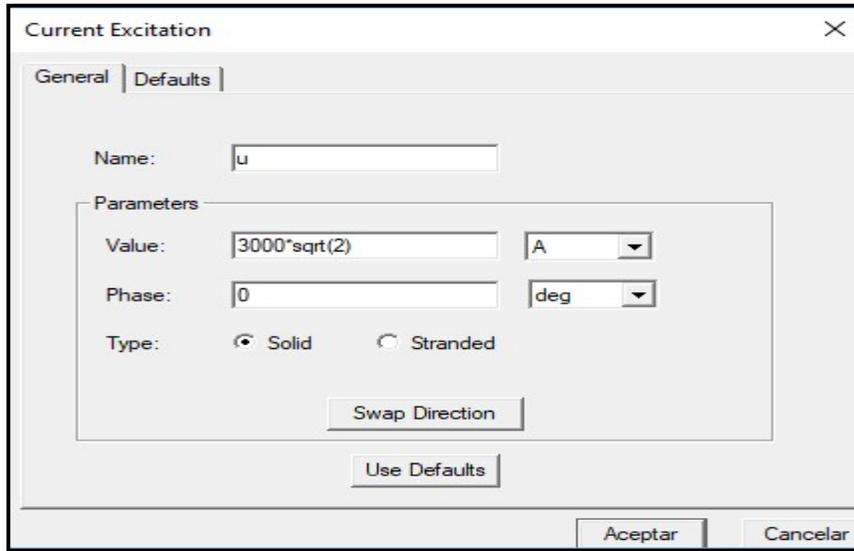


Figura 3-11 Ingreso de la corriente de excitación

3.2.1.3.3 Operación en Mallado (Meshoperations)

A continuación se muestra el ingreso de datos del mallado de la región en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Se está utilizando el mallado tipo “Skin Depth”, el cual determina la profundidad de penetración de onda de campo magnético según las características del material. Para este caso la profundidad de penetración es de 1.86 mm, lo cual le permite al software intensificar su mallado en dicha zona.

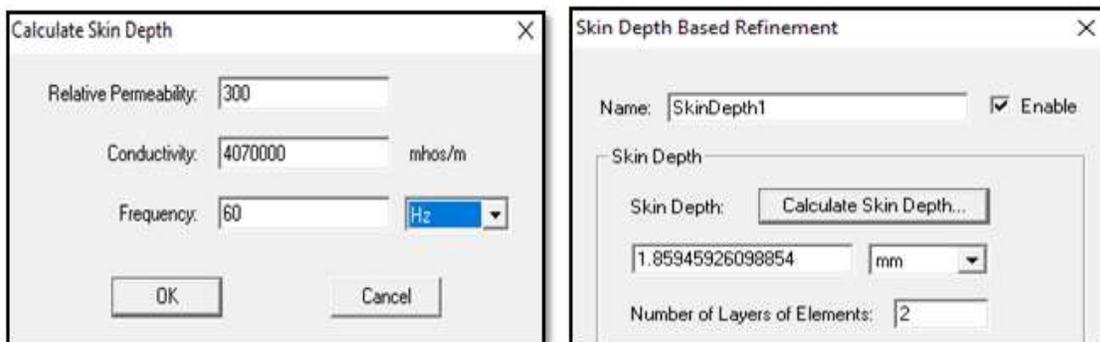


Figura 3-12 Configuración del mallado

3.2.1.3.4 Configuración del análisis (analysisSetup)

Se determina dos métodos de convergencia en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Por energía

El porcentaje de error que será aceptable de un paso a otro será de 1%, debido a la memoria RAM de la computadora de 16 GB. Al disminuir este error de paso el computador se satura y colapsa rebasando su capacidad.

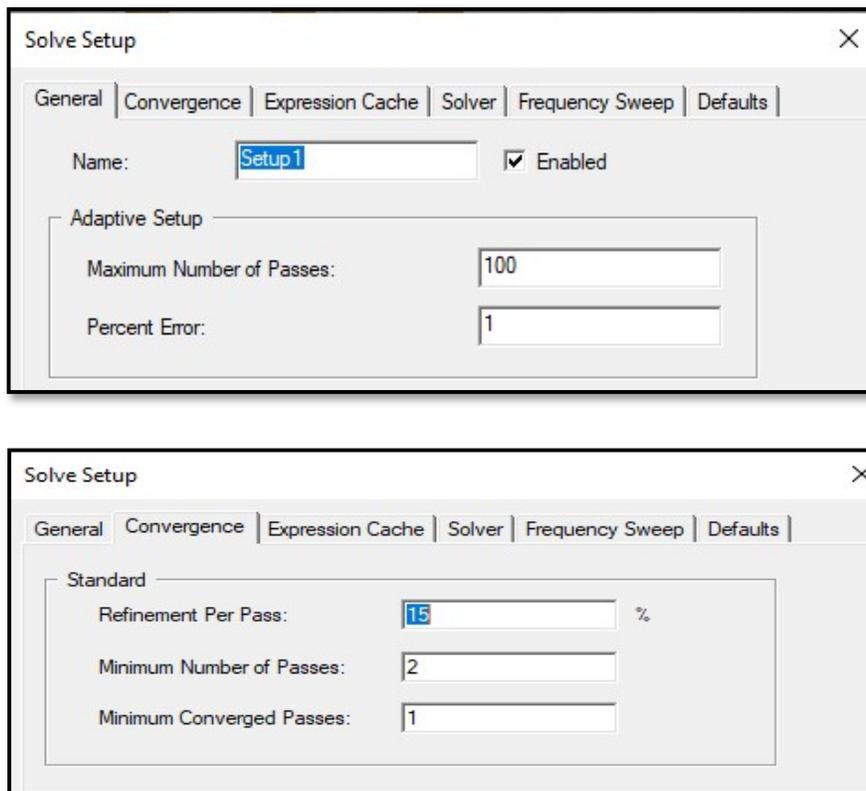


Figura 3-13 Configuración del error y números de pasos

3.2.1.4 Ingreso de datos físicos de los materiales

Se realiza el ingreso de datos de materiales en software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Material Fierro:

The screenshot shows the 'Material Properties' dialog box for a material named 'steel'. The 'Material Coordinate System Type' is set to 'Cartesian'. The 'Properties of the Material' table is as follows:

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	300	
Bulk Conductivity	Simple	4070000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Type		None	w/m ³
Mass Density	Simple	8055	kg/m ³

On the right side, there are two sections: 'View/Edit Material for' with radio buttons for 'Active Design' (selected), 'This Product', and 'All Products'; and 'View/Edit Modifier for' with a checkbox for 'Thermal Modifier' which is unchecked.

Figura 3-14 Configuración de las propiedades de la plancha de fierro

Material Cobre:

The screenshot shows the 'Material Properties' dialog box for a material named 'copper'. The 'Material Coordinate System Type' is set to 'Cartesian'. The 'Properties of the Material' table is as follows:

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1	
Bulk Conductivity	Simple	58000000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Type		None	w/m ³
Mass Density	Simple	8933	kg/m ³

On the right side, there are two sections: 'View/Edit Material for' with radio buttons for 'Active Design' (selected), 'This Product', and 'All Products'; and 'View/Edit Modifier for' with a checkbox for 'Thermal Modifier' which is unchecked.

Figura 3-15 Configuración de propiedades del cobre

3.2.1.5 Misceláneos del proceso de simulación

3.2.1.5.1 Capacidades del computador

Procesador	Intel (R) Core (TM) i5 2310CPU @2.9GHz
Memoria Instalada (RAM)	16 GB

3.2.1.5.2 Duración de las simulaciones:

Duración promedio de cada simulación	2 horas :38 minutos: 46 segundos
Uso de memoria RAM por cada simulación	13.6 G
Número de pasos por cada simulación	25

3.2.1.5.3 Mallado:

Para corriente de excitación 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 A

Tabla 3-3 Resultado de mallado

Partes	Nº Tetraedros	Prom. Vol. Tetraedro	Desv. estándar (vol)
Plancha de fierro	124073	45.5717	94.6495
U	3125	572.466	602.659
V	3348	534.338	660.269
W	3204	558.351	626.394
Región	408445	21126.4	269283

Para poder llegar a una solución se tuvieron que realizar varias iteraciones (pasos), los cuales fueron modificando el mallado hasta llegar a la convergencia. La convergencia se obtuvo en el paso 25 con 542195 tetraedros.

Tabla 3-4 Pasos de convergencia

N°	N° Tetraedro	N° Paso	N° Tetraedro	N° Paso	N° Tetraedro
1	17924	11	74262	21	307258
2	20663	12	85598	22	354133
3	23822	13	98658	23	408159
4	27461	14	113713	24	470426
5	31658	15	131067	25	542195
6	36497	16	151064		
7	42071	17	174114		
8	48493	18	200679		
9	55899	19	231297		
10	64429	20	266586		

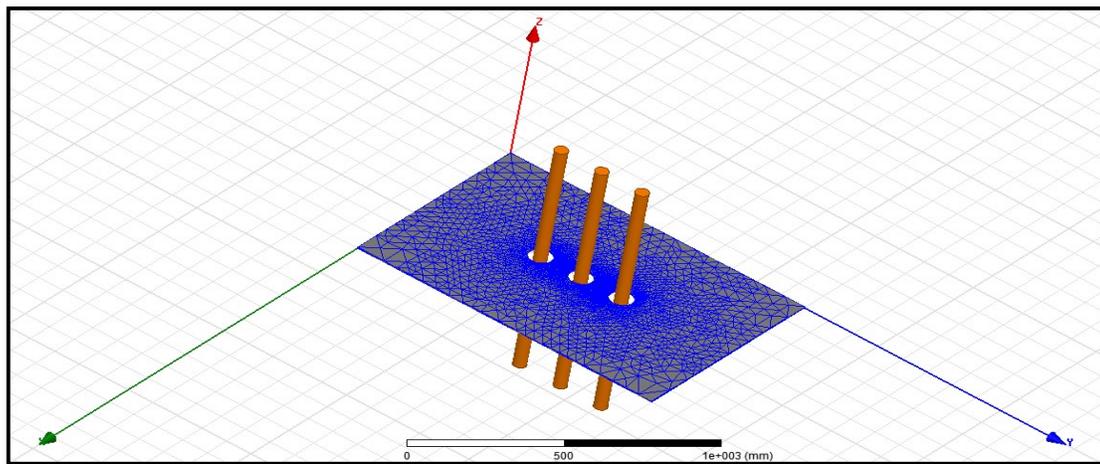


Figura 3-16 Mallado de la tapa (plancha de fierro)

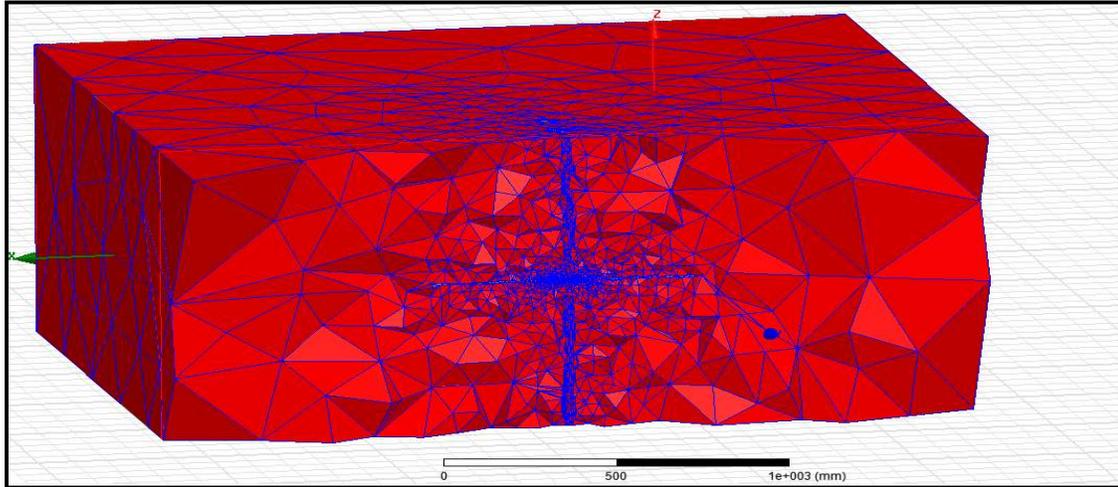


Figura 3-17 Corte longitudinal del mallado

3.2.1.5.4 Convergencia:

La convergencia se realizó en 25 pasos (iteraciones) según el criterio de convergencia anotado en el punto 3.2.1.3.4, dando como resultado:

Por energía

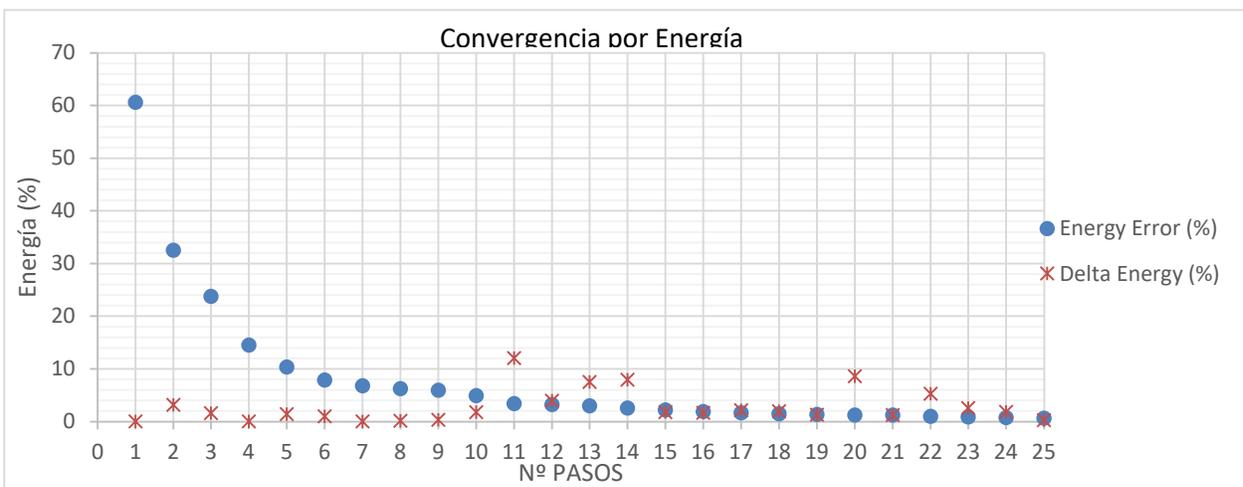


Figura 3-18 Curva de convergencia

3.2.1.6 Resultados de simulación

a) Concentración de pérdidas en la plancha de hierro (W/m^3)

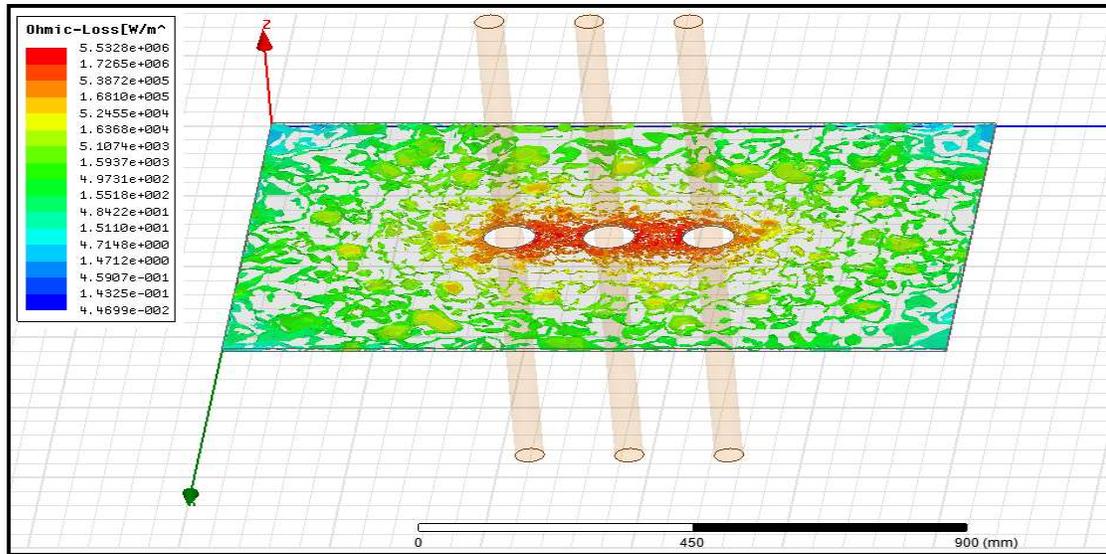


Figura 3-19 Resultado plancha de hierro a corriente de 1000 A

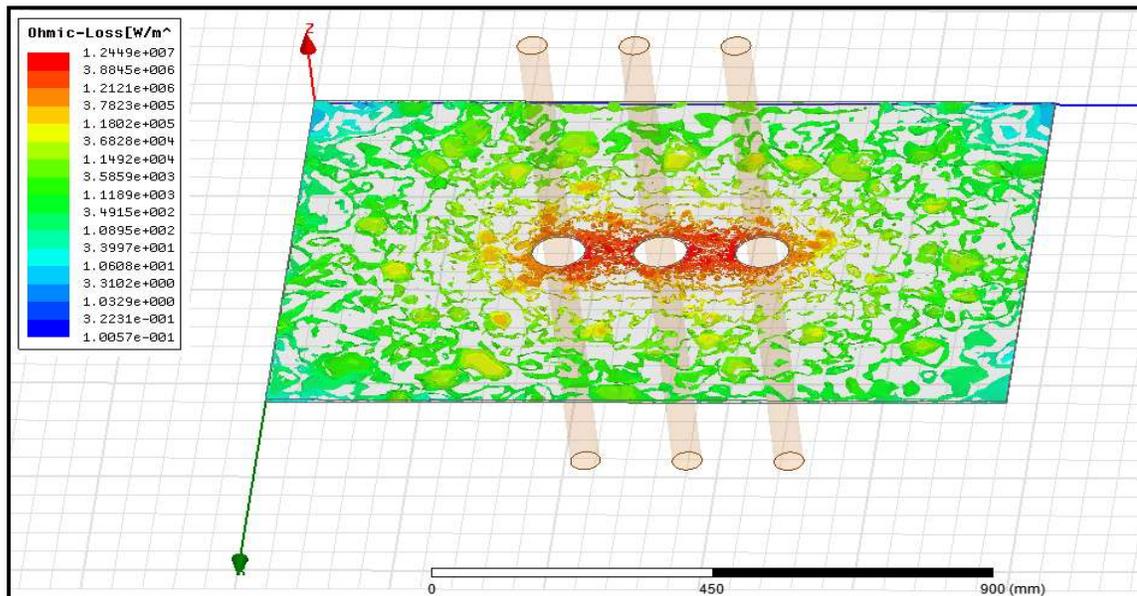


Figura 3-20 Resultado plancha de hierro a corriente de 1500 A

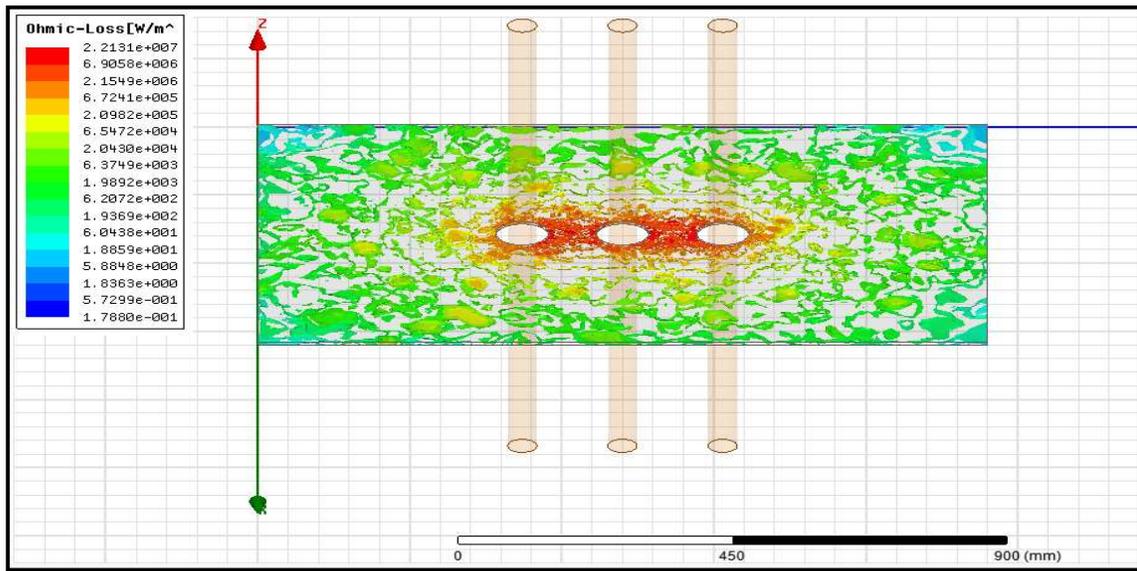


Figura 3-21 Resultado plancha de fierro a corriente de 2000 A

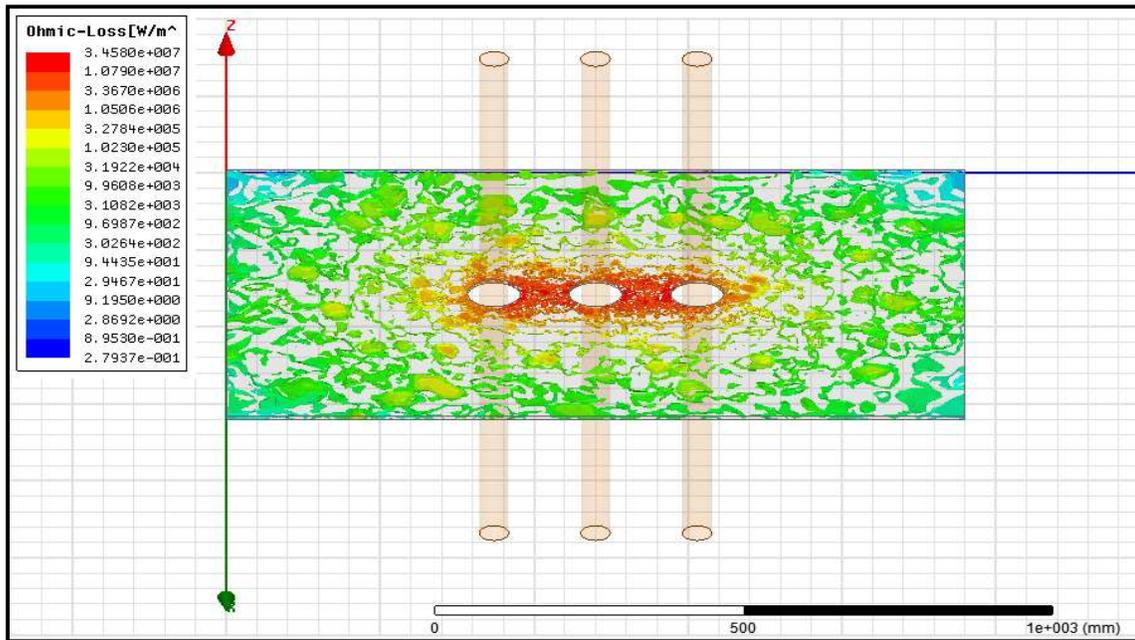


Figura 3-22 Resultado plancha de fierro a corriente de 2500 A

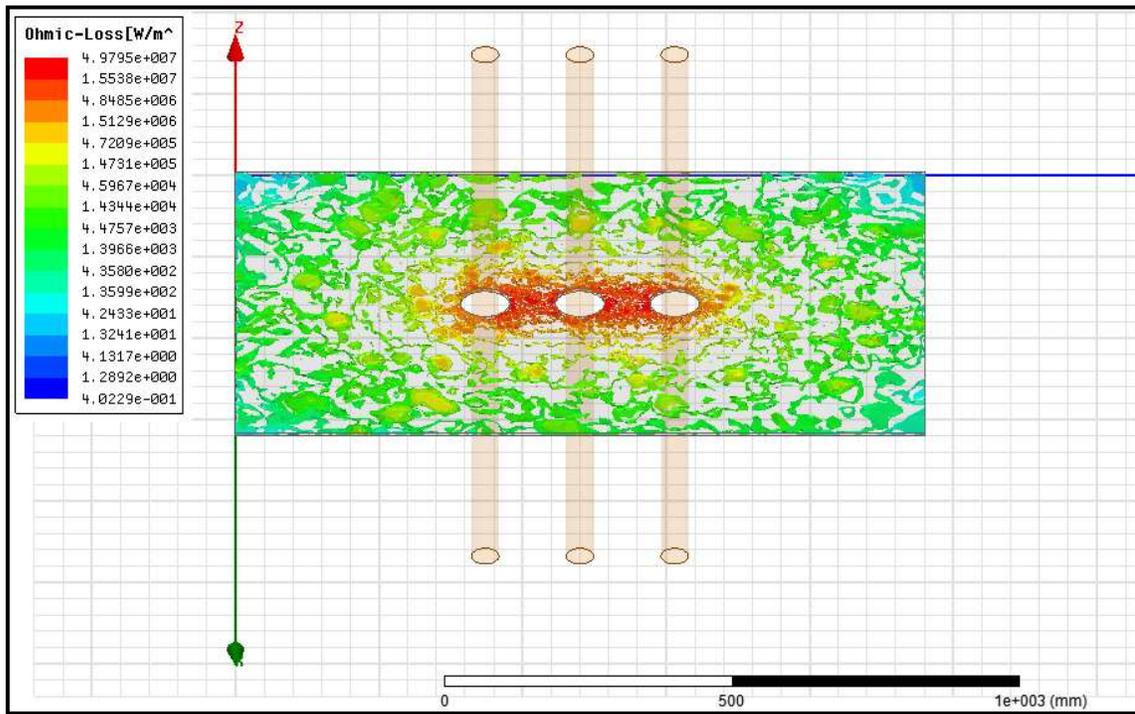


Figura 3-23 Resultado plancha de hierro a corriente de 3000 A

b) Pérdidas en la plancha de hierro

Las pérdidas en la plancha de hierro por acoplamiento de campo magnético provocado por conductor a diferentes corrientes muestran los siguientes resultados:

Tabla 3-5 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro a partir de simulación numérica

Corriente (A)	Pérdidas planchas de hierro P_{fe} (W)
1000	169.51
1500	381.38
2000	678.02
2500	1059.41
3000	1525.55

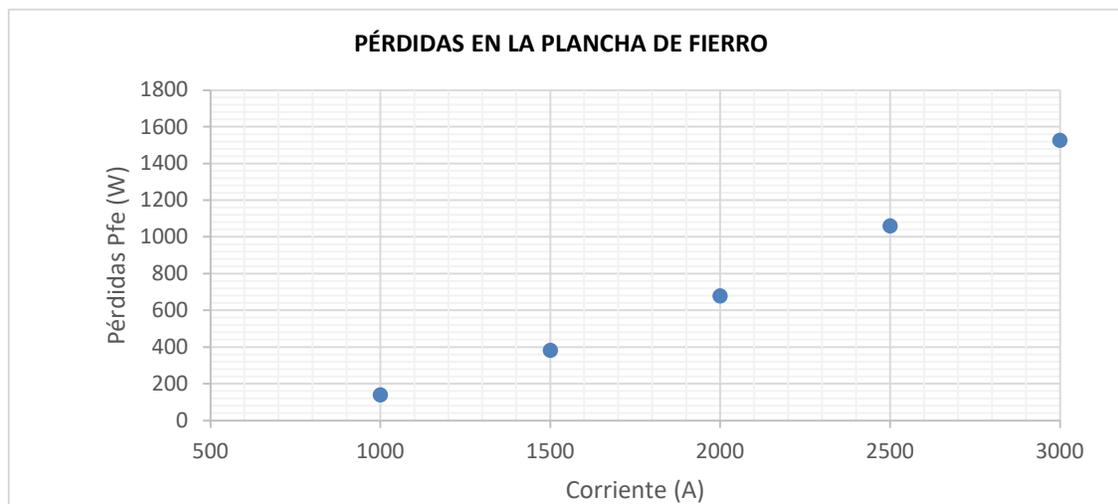


Figura 3-24 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro a partir de simulación numérica

3.2.2 Pérdidas en plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

3.2.2.1 Descripción de elemento de análisis

Plancha de hierro con inserto de acero inoxidable:

A la plancha de hierro de 800 x 1200 x 6 mm, por el cual atraviesan conductores de cobre, se le adiciona un inserto de acero inoxidable según muestra la **Figura 3-25**.

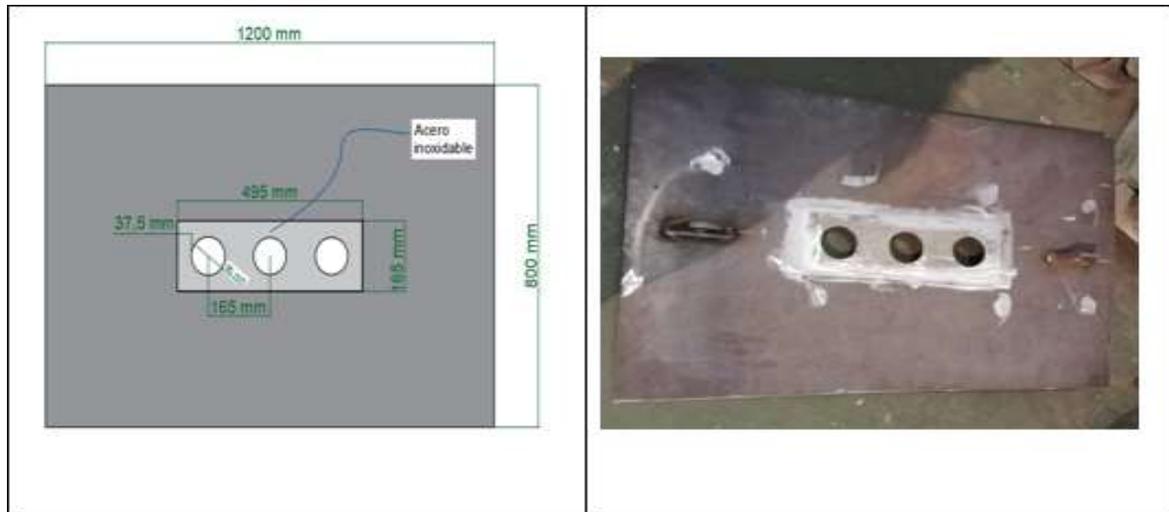


Figura 3-25 Dimensiones de plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

Las características de la plancha de hierro y conductor están descritas en el punto anterior (3.2.1.1). El material adicional a considerar es el acero inoxidable cuya característica es según **Tabla 2-3**

3.2.2.2 Simplificación del modelo para la aplicación del método numérico-

Debido a que el aislador o pasatapas está compuesto en base a porcelana y empaquetaduras que no conducen la corriente eléctrica, además, son materiales no magnéticos ($\mu_r = 1$), se despreciarán para el modelo.

La longitud del cobre se está considerando 1 metro; medio metro sobre la tapa y el otro medio metro debajo de la tapa, debido a la longitud que se necesita para las conexiones cuando se realiza la prueba.

El modelo quedaría según *Figura 3-26*

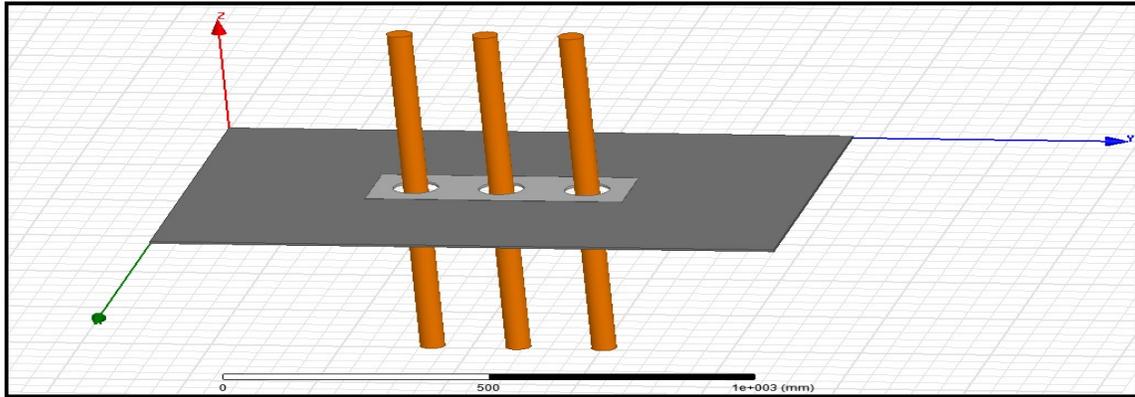


Figura 3-26 Modelo simplificado de la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

3.2.2.3 Ajustes numéricos

3.2.2.3.1 Condiciones de Frontera:

- La condición de frontera exterior utilizada es:

Frontera Natural. - La intensidad de campo (H) es continua a través de la frontera

Frontera Neumann. La intensidad de campo (H) es tangencial a la frontera y el flujo no puede atravesarla.

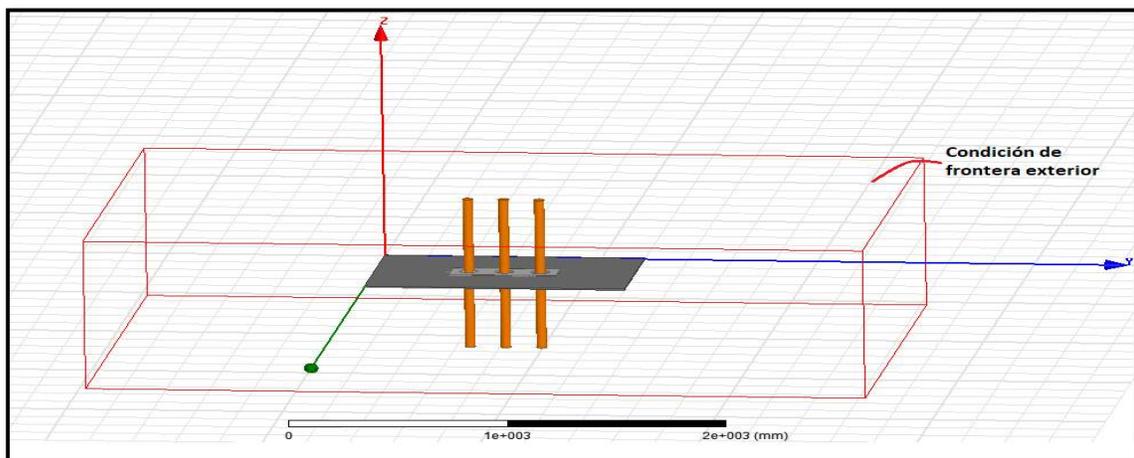


Figura 3-27 Condición de frontera exterior

- Entre medios magnéticos distintos se aplica:

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$H_{t1} = H_{t2}$$

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

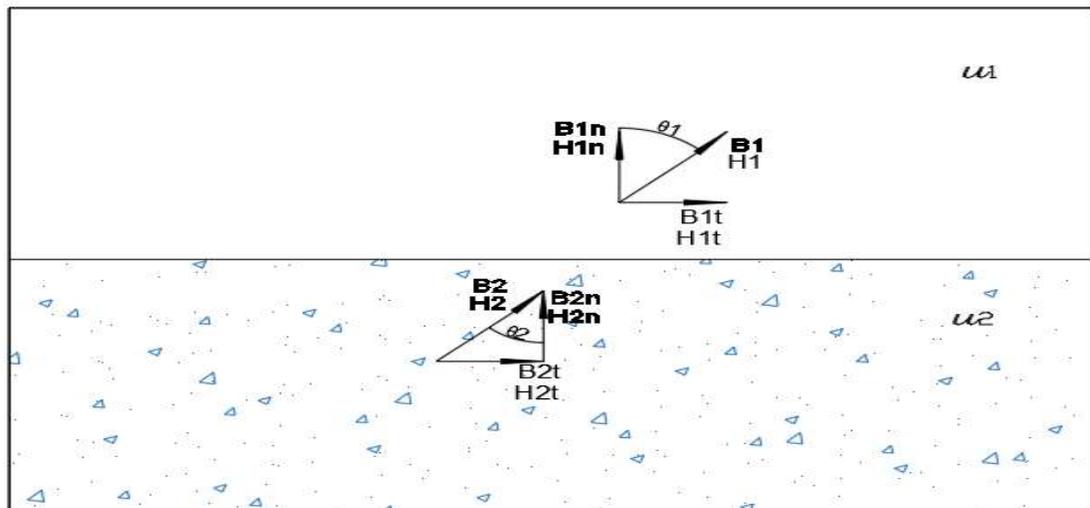


Figura 3-28 Condición de frontera entre dos medios magnéticos

3.2.2.3.2 Ingreso de la excitación a los conductores (Excitations)

A continuación se muestra el ingreso de datos de excitación del conductor en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

La corriente de excitación en el cobre varía en la fase U, V y W en 120°, además la corriente varía en 5 escenarios 1000 A, 1500 A, 2000 A, 2500 A y 3000 A.

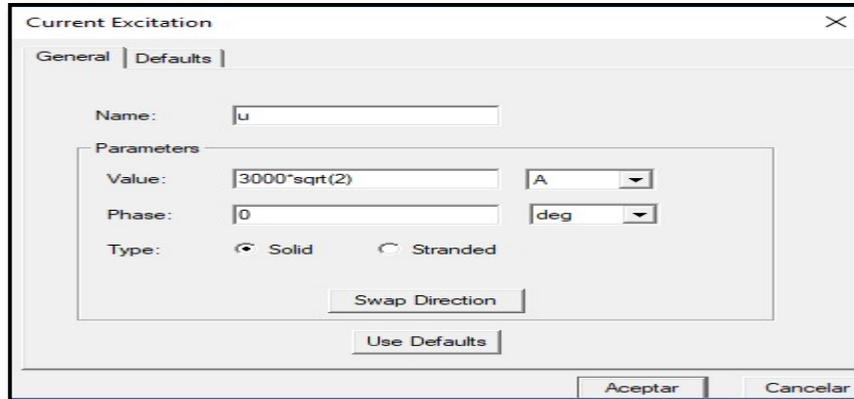


Figura 3-29 Ingreso de la corriente de excitación

3.2.2.3.3 Operación en Mallado (Meshoperations)

A continuación se muestra el ingreso de datos del mallado de la región en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Se está utilizando el mallado tipo “Skin Depth” para la parte fierro, el cual determina la profundidad de penetración de onda de campo magnético según las características del material. Para este caso la profundidad de penetración es de 1.86 mm, lo cual le permite al software intensificar su mallado en dicha zona.

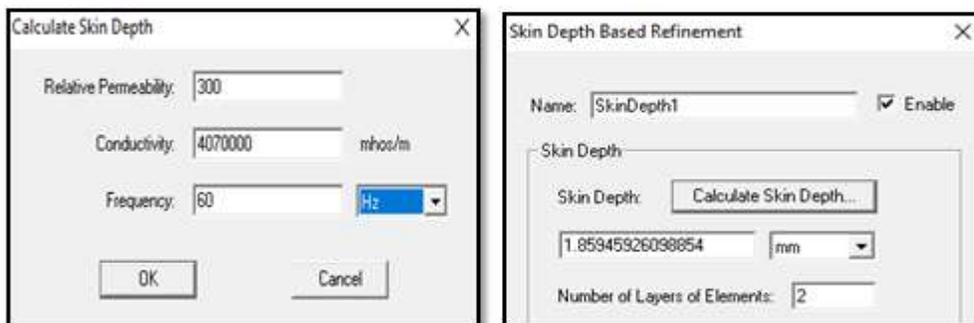


Figura 3-30 Configuración del mallado

3.2.2.3.4 Configuración del análisis (análisis Setup)

Se determina dos métodos de convergencia en el software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Por energía

El porcentaje de error será aceptable de un paso a otro será de 0.3%, debido a la memoria RAM de la computadora de 16 GB, al disminuir este error de paso el computador se satura y rebasa su capacidad, colapsando.

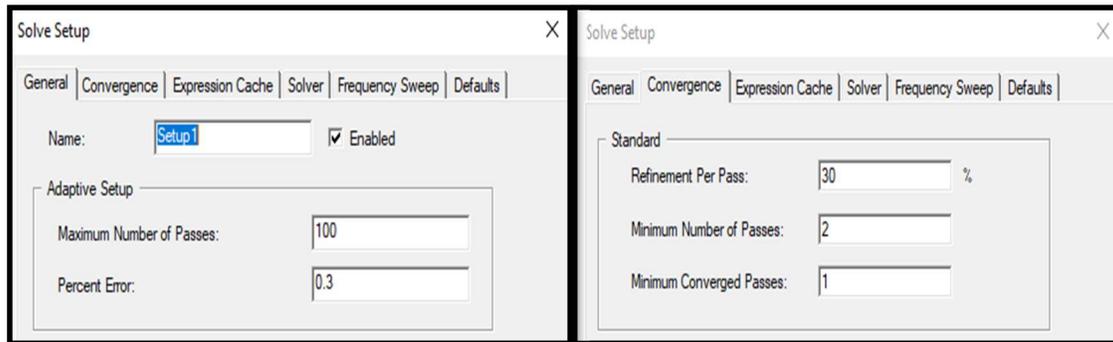


Figura 3-31 Configuración del error y números de pasos

3.2.2.4 Ingreso de datos físicos de los materiales

Se realiza el ingreso de datos de materiales en software ANSYS MAXWELL vers. 15.0

Material Hierro:

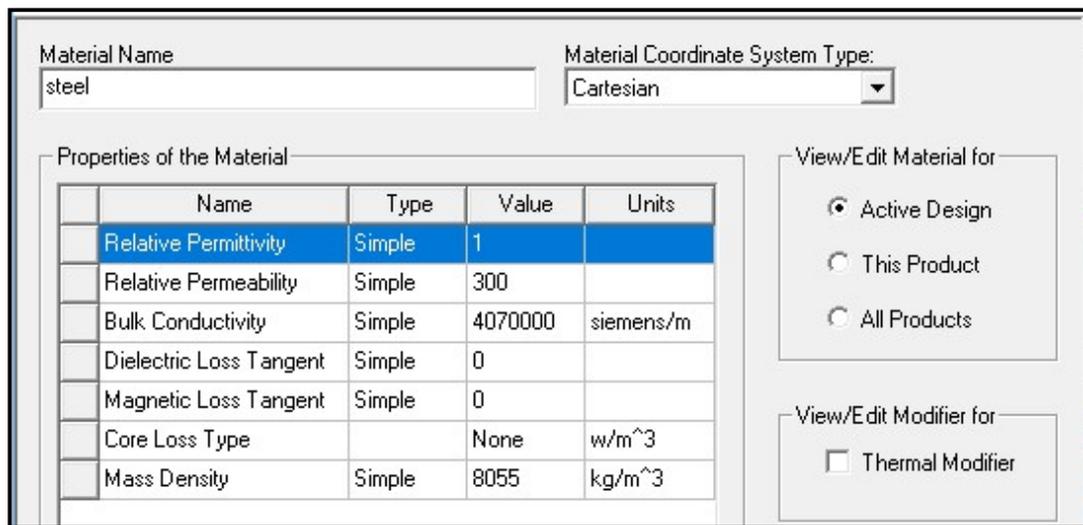


Figura 3-32 Configuración de las propiedades de la plancha de hierro

Material Acero Inoxidable:

The screenshot shows a software interface for configuring material properties. At the top, the 'Material Name' is 'steel_stainless' and the 'Material Coordinate System Type' is 'Cartesian'. Below this is a table titled 'Properties of the Material' with columns for Name, Type, Value, and Units. The 'Relative Permittivity' row is highlighted in blue. To the right of the table are two sections: 'View/Edit Material for' with radio buttons for 'Active Design', 'This Product', and 'All Products'; and 'View/Edit Modifier for' with a checkbox for 'Thermal Modifier'.

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1	
Bulk Conductivity	Simple	1150000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Type		None	w/m ³
Mass Density	Simple	8055	kg/m ³

Figura 3-33 Configuración de las propiedades del inserto de acero inoxidable

Material Cobre:

The screenshot shows a software interface for configuring material properties. At the top, the 'Material Name' is 'copper' and the 'Material Coordinate System Type' is 'Cartesian'. Below this is a table titled 'Properties of the Material' with columns for Name, Type, Value, and Units. To the right of the table are two sections: 'View/Edit Material for' with radio buttons for 'Active Design', 'This Product', and 'All Products'; and 'View/Edit Modifier for' with a checkbox for 'Thermal Modifier'.

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1	
Bulk Conductivity	Simple	58000000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Type		None	w/m ³
Mass Density	Simple	8933	kg/m ³

Figura 3-34 Configuración de las propiedades del cobre

3.2.2.5 Misceláneos del proceso de simulación

3.2.2.5.1 Capacidades del computador

Procesador	Intel (R) Core (TM) i5 2310CPU @2.9GHz
Memoria Instalada (RAM)	16 GB

3.2.2.5.2 Duración de las simulaciones

Duración promedio de cada simulación	1 hora :03 minutos: 11 segundos
Uso de memoria RAM por cada simulación	10.54 G
Número de pasos por cada simulación	13

3.2.2.5.3 Mallado:

Para corriente de excitación 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 A.

Tabla 3-6 Resultado de mallado

Partes	Nº Tetraedros	Prom. Tetraedro	Vol. Desv. estándar (vol)
plancha_Fe	84013	83.2835	149.672
stainless	6367	117.06	209.401
U	3177	563.096	554.993
V	3187	561.33	577.338
W	3161	565.947	503.57
Región	332955	25910.1	312021

Para poder llegar una solución, se tuvieron que realizar varias iteraciones (pasos) las cuales fueron modificando el mallado hasta llegar a la convergencia. La convergencia se obtuvo en el paso 13 con 432860 tetraedros.

Tabla 3-7 Pasos de convergencia

Nº Paso	Nº Tetraedro
1	17706
2	23116
3	30177
4	39389
5	51412
6	67101
7	87582
8	114311
9	149194
10	194715
11	254129
12	331668
13	432860

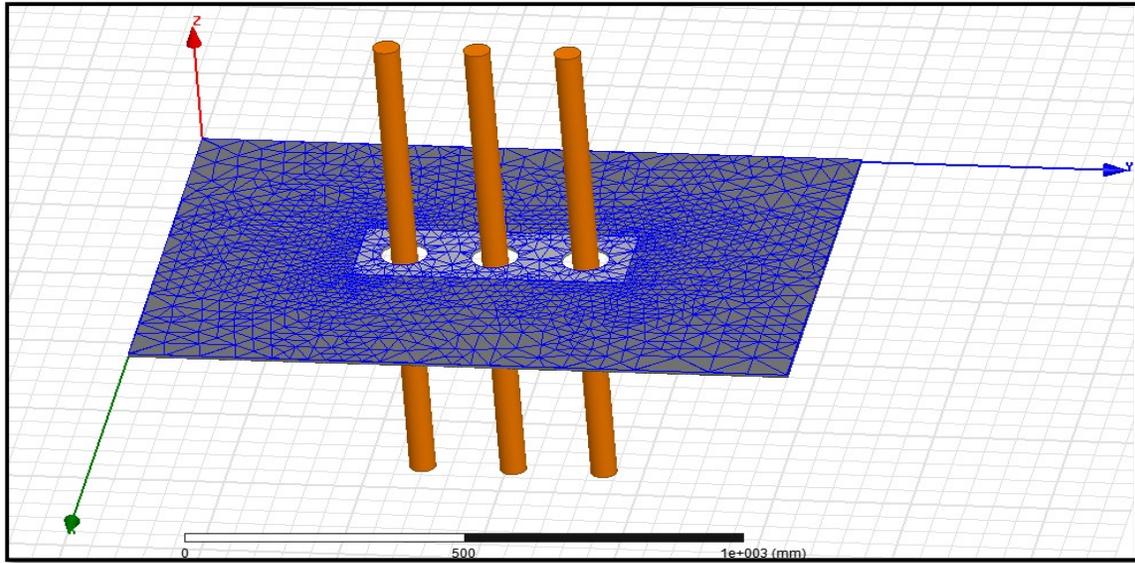


Figura 3-36 Mallado de la tapa con inserto de acero inoxidable

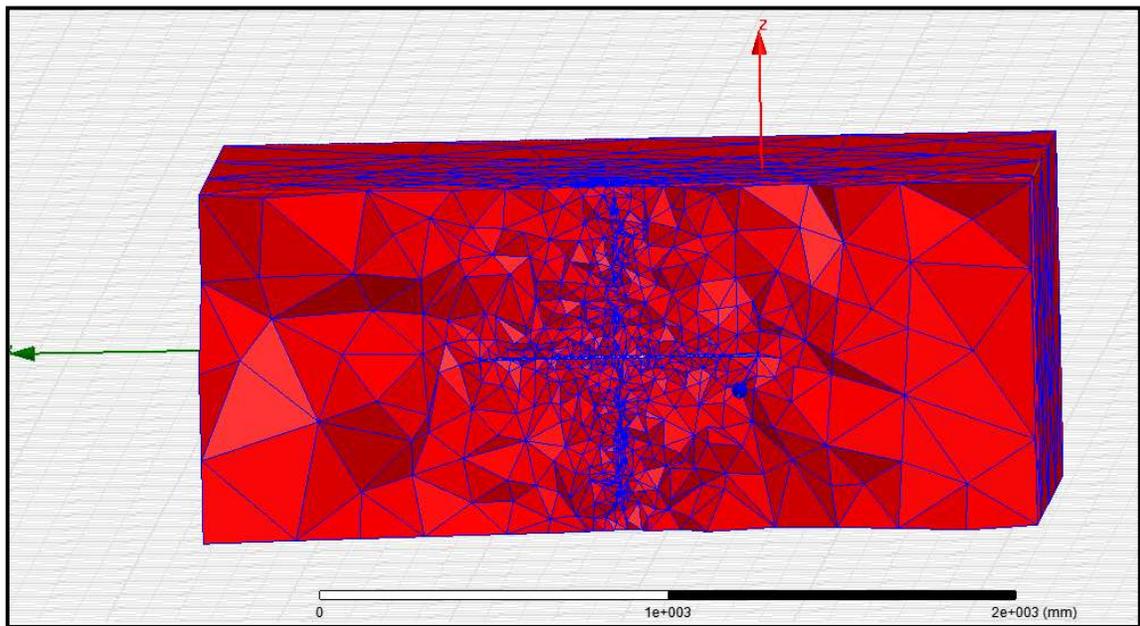


Figura 3-35 Corte longitudinal de mallado de la tapa con inserto de acero inoxidable

3.2.2.5.4 Convergencia:

La convergencia se realizó en 13 pasos (iteraciones) según el criterio de convergencia anotado en el punto 3.2.1.3.4, dando como resultado:

Por energía

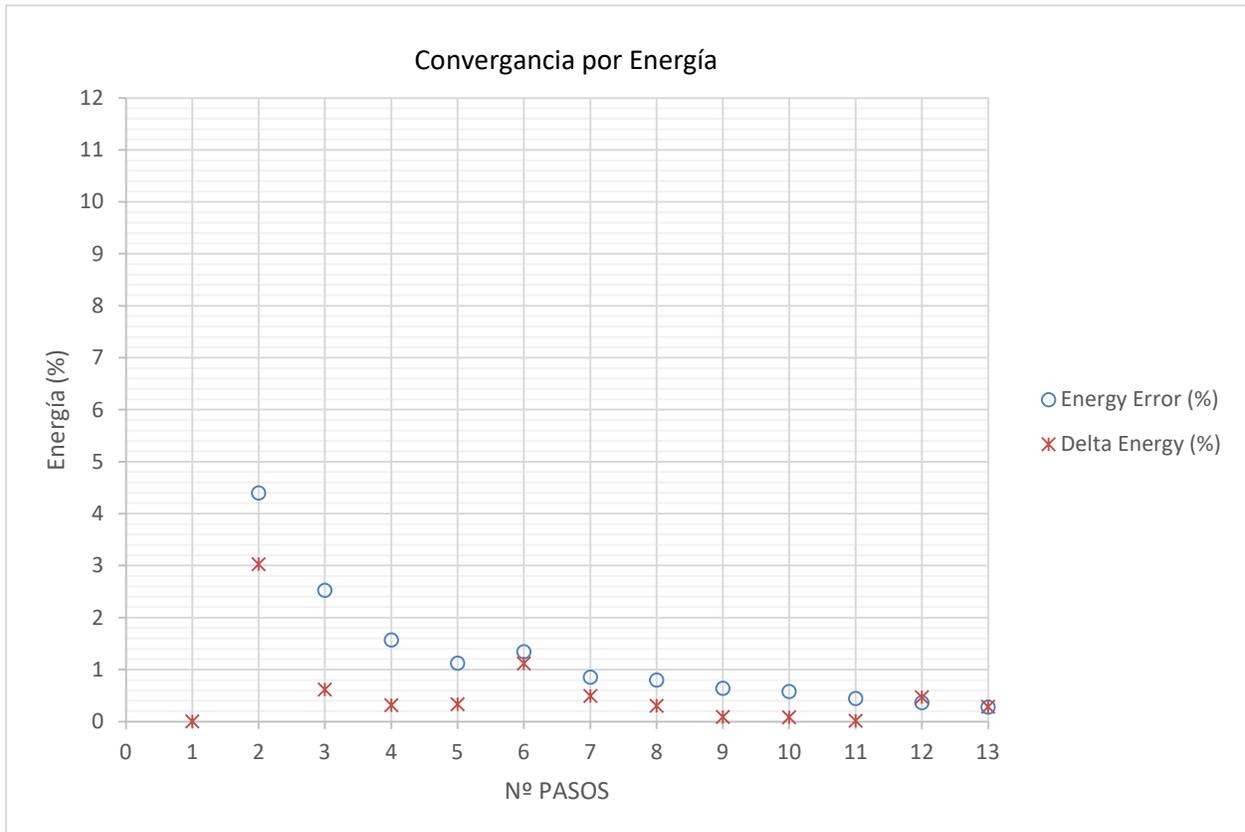


Figura 3-37 Curva de convergencia

3.2.2.6 Resultados de simulación

a) Concentración de pérdidas en la plancha de hierro (W/m^3)

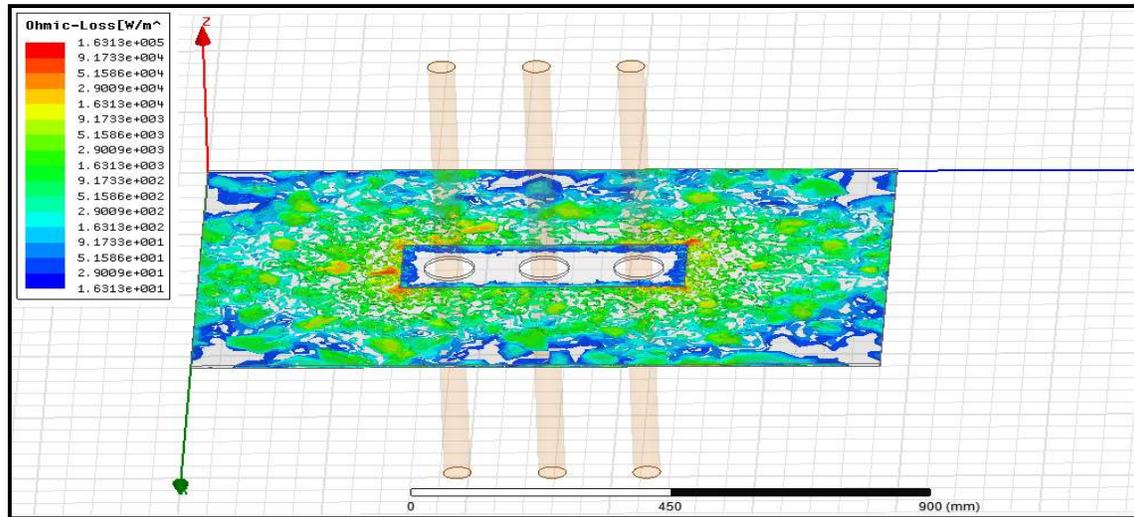


Figura 3-38 Resultado plancha de hierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 1000 A

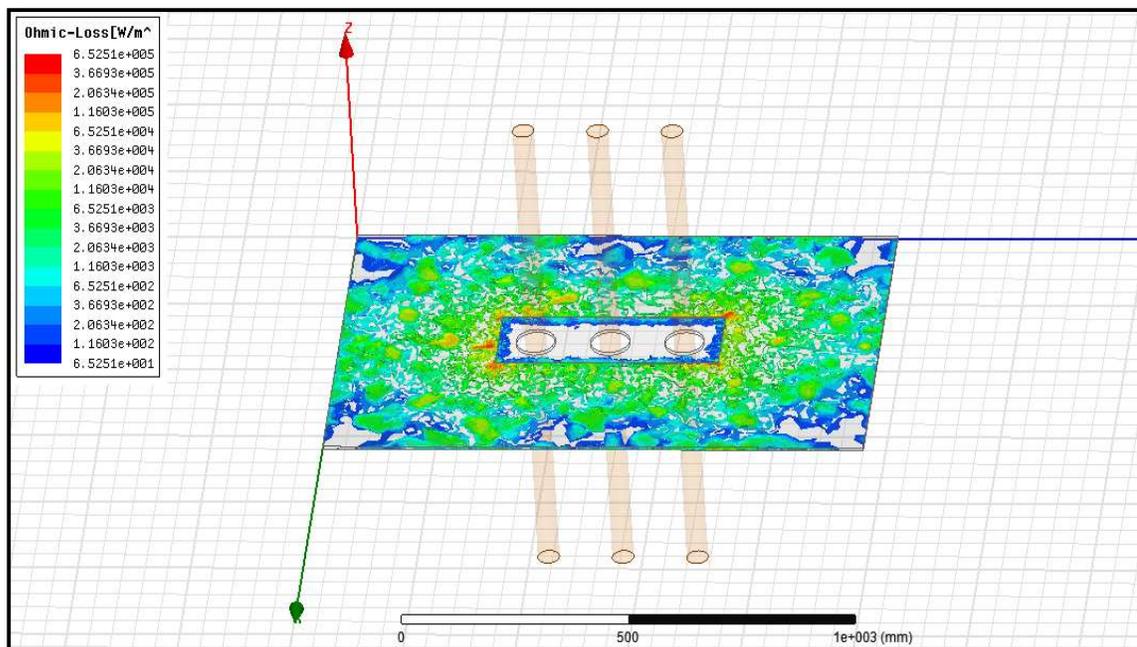


Figura 3-39 Resultado plancha de hierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 1500 A

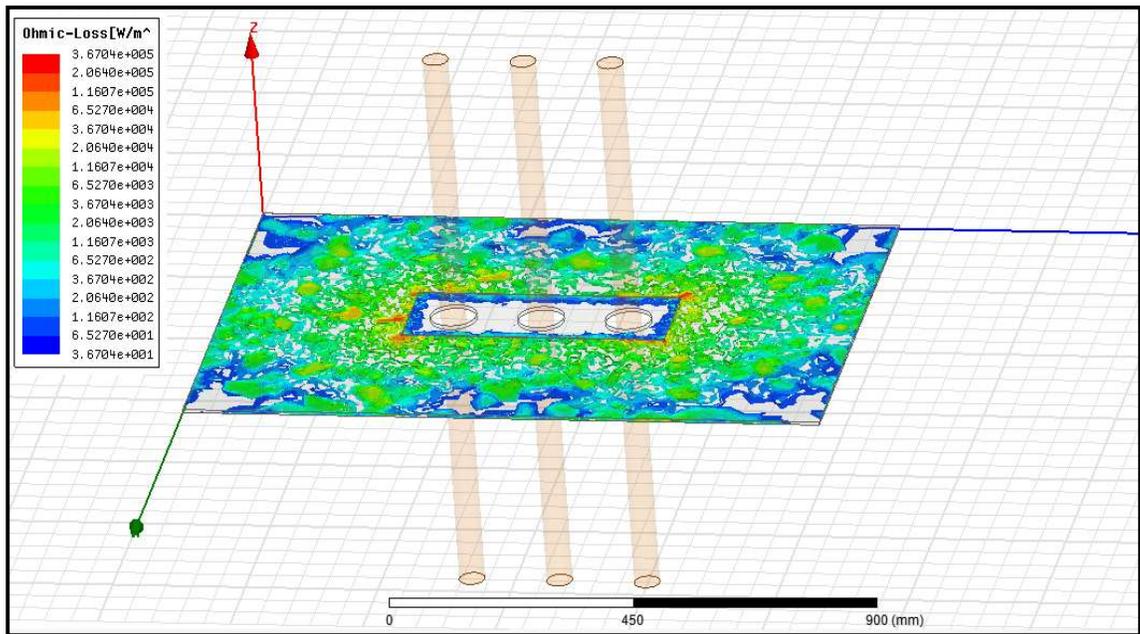


Figura 3-40 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 2000 A

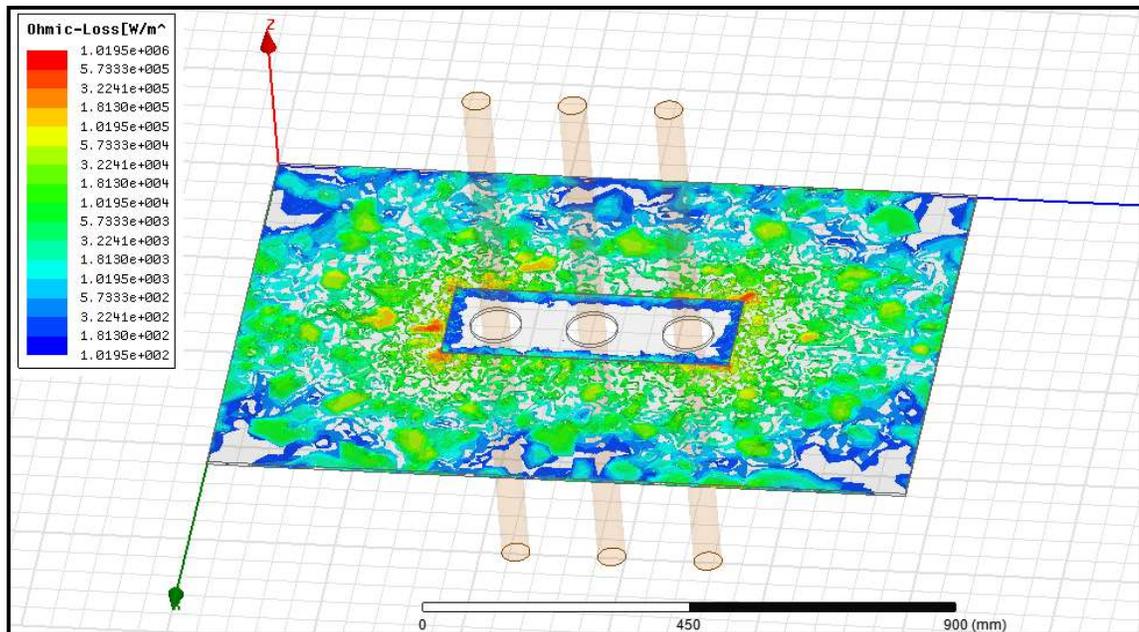


Figura 3-41 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 2500 A

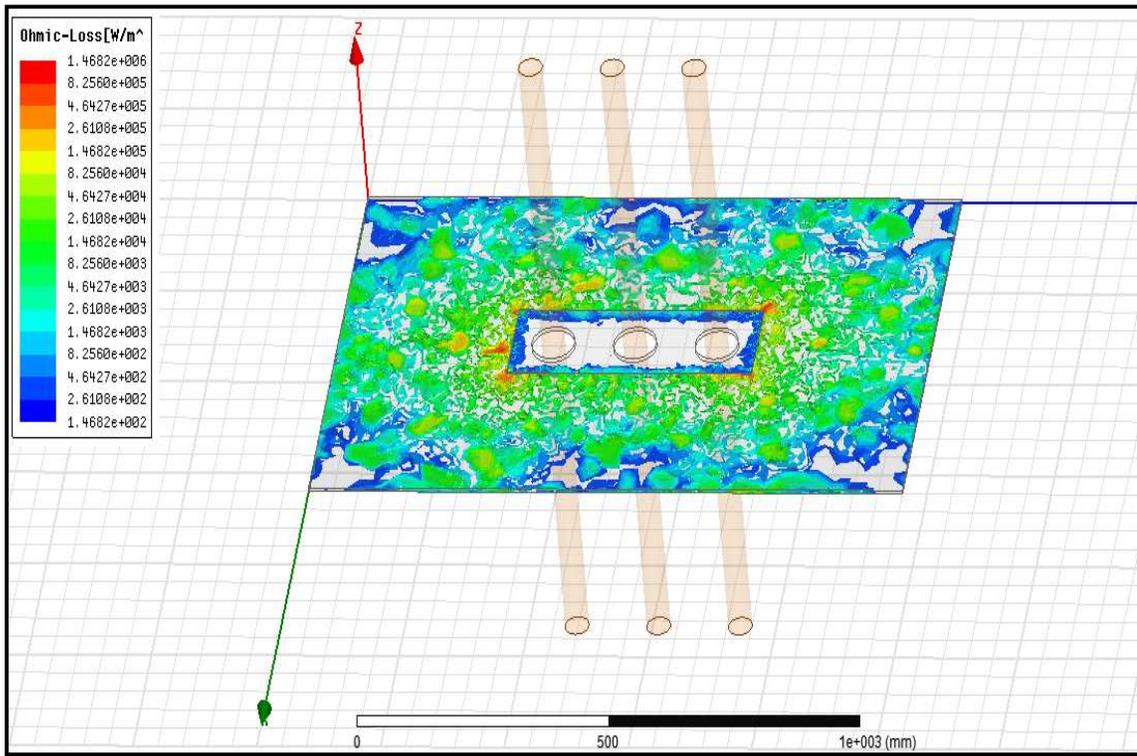


Figura 3-42 Resultado plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a corriente de 3000 A

b) Pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable.

Las pérdidas en la plancha de fierro con acero inoxidable por acoplamiento de campo magnético provocado por conductor a diferentes corrientes muestran los siguientes resultados:

Tabla 3-8 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de simulación numérica

CORRIENTE (A)	PÉRDIDAS PLANCHAS DE FIERRO CON INSERTO DE ACERO INOXIDABLE P_{feSt} (W)
1000	8.31
1500	18.70
2000	33.26
2500	51.97
3000	74.83

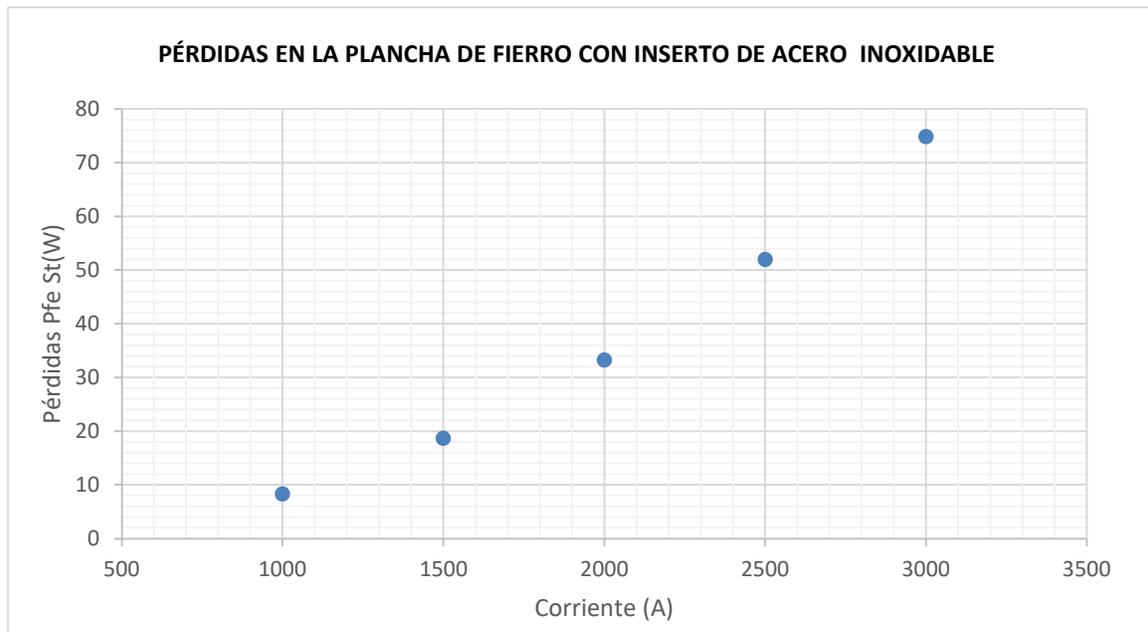


Figura 3-43 Resultados de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a partir de simulación numérica

3.3 Estudio experimental

3.3.1 Objetivo

El objetivo del experimento es poder evaluar los resultados teóricos frente a los resultados de laboratorio.

3.3.2 Materiales

Para realizar la experimentación se utilizó los siguientes materiales:

- Tablero de control (suministro de energía)

TABLERO DE CONTROL						
Magnitud a medir	Marca	Unidad	Instrumento	Rango	Resolución	Clase
Potencia Eléctrica	YOKOGAWA	Vatio	Vatímetro	0-50 kW	1 vatio	0.1 % de lectura
Potencial Eléctrico	YOKOGAWA	Volt	Voltímetro	0-5 kV	1 voltio	0.1 % de lectura
Corriente Eléctrica	YOKOGAWA	Amperio	Amperímetro	0-10 kA	1 amperio	0.1 % de lectura



- Transformador auxiliar 2.5 MVA

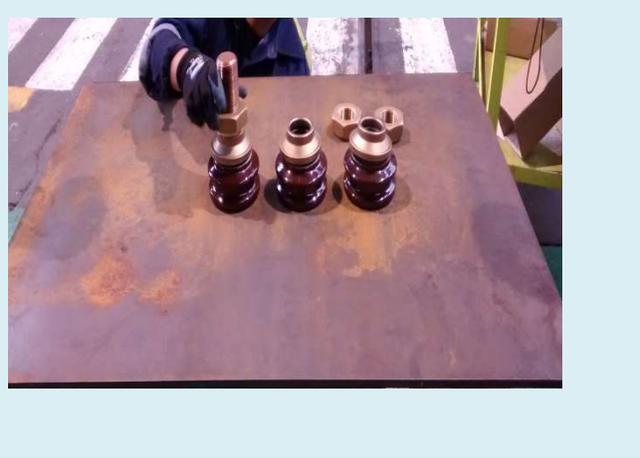
Transformador auxiliar - Marca: DELCROSA

Potencia	2500	kVA
Tensión (AT)	6160	V
Corriente (AT)	234.31	A
Tensión (BT)	440	V
Corriente (BT)	3280.4	A



- Una plancha de fierro de 1200 x 800 x6 mm

Plancha de fierro



- Termógrafo

TERMOGRAFO							
Magnitud a medir	Marca	Modelo	Unidad	Instrumento	Rango	Resolución	Clase
TEMPERATURA	FLUKE	Ti32	°C	Termógrafo	-10 a 600 °C	0.1 °C	±2 °C o 2%, (a 25 °C nominal)



- Medidor de resistencia

MEDIDOR DE RESISTENCIA						
Magnitud a medir	Marca	Modelo	Unidad	Rango	Exactitud	Corriente (A) y Tensión DC (V)
Ohmios	Haefely Hipotronics	2293	Ω	0.1 $\mu\Omega$... 300 $\mu\Omega$	0.1%±0.5 $\mu\Omega$	32 A (seleccionable) y 100 V
				300.1 $\mu\Omega$... 30 k Ω	0.1%	
				30.01k Ω ... 300 k Ω	1%	



3.3.3 Procedimiento y medición

La prueba consistió de tres etapas para lograr obtener las pérdidas por acoplamiento de plancha metálica (tapa de transformador).

3.3.3.1 Resistencia de devanados

3.3.3.1.1 Procedimiento de medición

La medida de la resistencia de devanado se realiza entre fases o de fase a neutro tanto del lado de alta tensión como del de baja tensión, también se debe anotar la temperatura del devanado durante la medición.

Según la norma (IEC 60076-1, 2011-04), en su apartado 10.2.- Medición de resistencia de devanados indica: La medición será en corriente continua para minimizar los efectos de autoinducción. La temperatura media del aceite será la misma que la temperatura de devanado considerando que el transformador debe estar sin excitación con un tiempo mínimo de 3h.

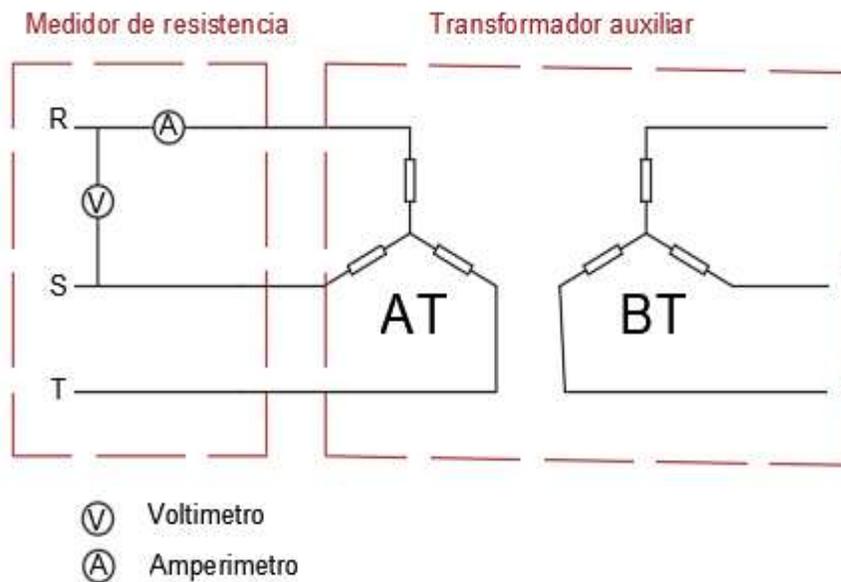


Figura 3-44 Circuito de medición de resistencia de devanados

Resultados de la Medición:

Medición de resistencia de fase a fase ($R_{fase-fase}$) a una temperatura de medición 27 °C:

Tabla 3-9 Resultados de medición de resistencia

Lado de Alta tensión (AT)		Lado de Baja tensión (BT)	
1U-1V	0.097578	2U-2V	0.00079806
1V-1W	0.0969	2V-2W	0.0007675
1W-1U	0.09819	2W-2U	0.00078214
Promedio (ohm)	0.097556	Promedio (ohm)	0.000782567

3.3.3.2 Pérdidas sin colocar la plancha de hierro

3.3.3.2.1 Procedimiento de pérdidas sin colocar la plancha de hierro

En la **primera etapa** se realiza una prueba de cortocircuito sin la plancha de hierro (según **Figura 3-45**), el motivo es conocer las pérdidas base sin plancha de hierro. Lo indicado se midió para 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 A. Como resultado se obtuvo las pérdidas base para cada corriente.

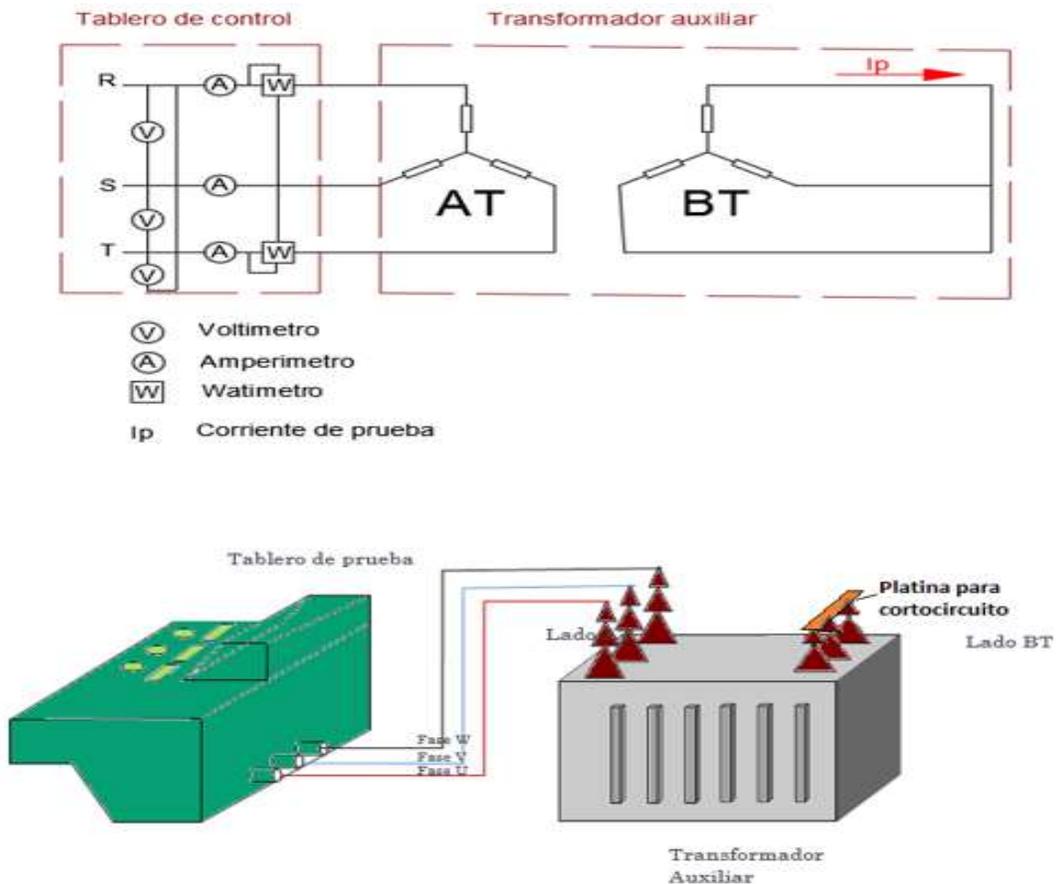


Figura 3-45 Circuito de prueba de transformador en cortocircuito sin plancha de hierro

3.3.3.2.2 Resultados de la Medición

Tabla 3-10 Resultados de medición de pérdidas sin colocar la plancha de fierro a temperatura ambiente de medición 24°C

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
113.1	112.9	112.9	112.99	70.3	74.1	69.9	71.43	-2440	4900	2460.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
169.5	170.4	170.1	169.98	105.4	111.0	105.0	107.11	-5500	11020	5520.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
226.5	226.7	226.5	226.53	140.7	148.3	139.6	142.85	-9760	19540	9780.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
283.1	283.7	283.5	283.43	175.9	185.3	174.6	178.61	-15320	30550	15230.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
339.1	340.9	340.0	340.01	211.1	221.9	209.9	214.31	-22110	44010	21900.0

3.3.3.2.3 Separación de pérdidas óhmicas y pérdidas adicionales de los resultados medidos

Para realizar la separación de pérdidas se procederá a calcular las pérdidas óhmicas (P_{ohm}) del transformador según la siguiente fórmula:

$$P_{joule} = 1.5 * I_r^2 * R_{fase-fase} \quad 3-29$$

Donde I_r es la corriente de referencia y P_{ohm} es las pérdidas óhmicas del transformador.

Después se referencia las pérdidas totales medidas a la corriente de referencia.

$$P_{Tcu\ ref} = P_{medida} * \left(\frac{I_r}{I_{medido}} \right)^2 \quad 3-30$$

Para obtener las pérdidas adicionales (P_{adic}) se debe:

$$P_{adic} = P_{Tcu\ ref} - P_{ohm} \quad 3-31$$

Se debe tener en cuenta que la temperatura de medida es una referencia ya que según la norma (IEC 60076-1, 2011-04) en su apartado 10 “Pruebas” indica que la temperatura de referencia será 75 °C para transformadores en aceite; por lo tanto, todas las pérdidas serán referidas a esta temperatura según la siguiente fórmula:

$$P_{Tcu(temp_{ref})} = \frac{(234.5 + temp_{ref})}{(234.5 + temp_{medida})} * P_{joule} + \frac{(234.5 + temp_{medida})}{(234.5 + temp_{ref})} * P_{adic} \quad 3-32$$

De lo indicado se procede para cada nivel de corriente de referencia:

Tabla 3-11 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C sin plancha de fierro

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	738.04	883.65
Pérdidas óhmicas BT (W)	1160.38	1389.32
Pérdidas adicionales(W)	561.25	468.77
Pérdida Totales (W)	2459.67	2741.73

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	1660.58	1988.20
Pérdidas óhmicas BT (W)	2610.86	3125.96
Pérdidas adicionales(W)	1251.94	1045.64
Pérdida Totales (W)	5523.39	6159.81

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	2952.15	3534.58
Pérdidas óhmicas BT (W)	4641.53	5557.27
Pérdidas adicionales(W)	2186.84	1826.49
Pérdida Totales (W)	9780.52	10918.34

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	4612.73	5522.79
Pérdidas óhmicas BT (W)	7252.40	8683.24
Pérdidas adicionales(W)	3358.30	2804.91
Pérdida Totales (W)	15223.42	17010.93

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	6642.33	7952.81
Pérdidas óhmicas BT (W)	10443.45	12503.86
Pérdidas adicionales(W)	4809.94	4017.35
Pérdida Totales (W)	21895.72	24474.02

3.3.3.3 Pérdidas colocando la plancha de hierro

3.3.3.3.1 Procedimiento de pérdidas colocando la plancha de hierro

La **segunda etapa** se realiza una prueba de cortocircuito con la plancha de hierro (según **Figura 3-46**) el motivo es conocer las pérdidas base con la plancha de hierro. Lo indicado se midió para 1000, 1500, 2000, 2500, 3000. Como resultado se obtuvo las pérdidas para cada corriente.

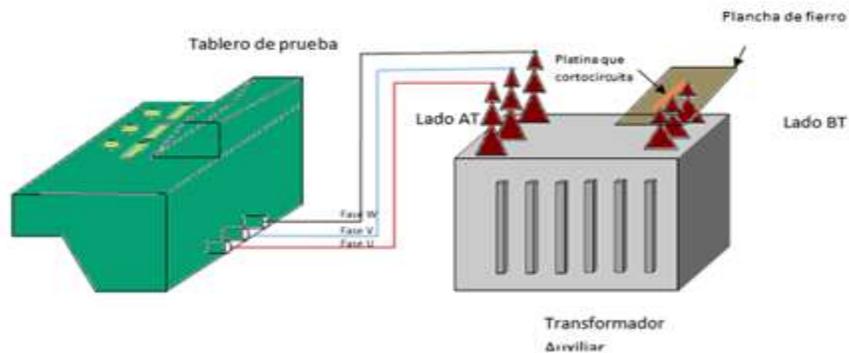
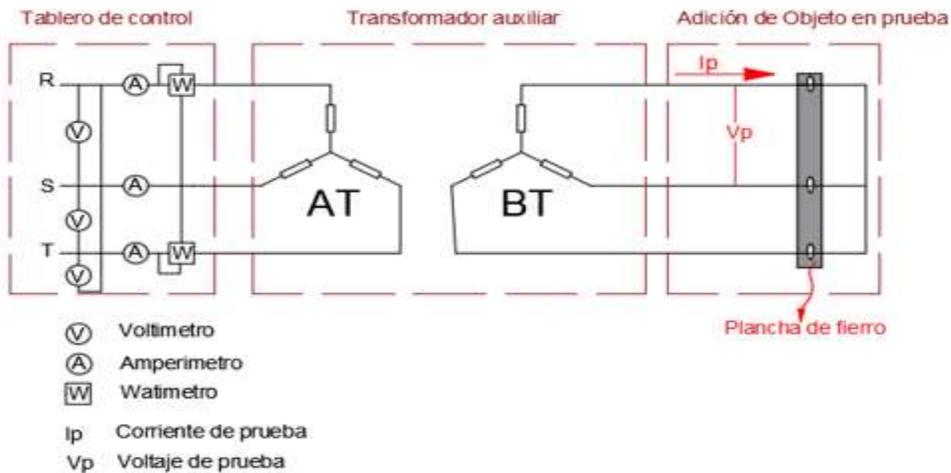


Figura 3-46 Circuito de prueba de transformador auxiliar en cortocircuito con plancha de hierro

3.3.3.2 Resultados de la Medición

Tabla 3-12 Resultados de medición de pérdidas colocando la plancha de hierro a temperatura ambiente de medición 24°C

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
115.6	115.4	115.4	115.48	70.2	74.6	69.4	71.40	-2330	5020	2690.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
173.2	174.1	173.7	173.68	105.3	111.7	104.5	107.17	-5280	11310	6030.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
231.3	231.9	231.5	231.59	140.5	149.1	139.1	142.88	-	20080	10680.0
								9400		

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
288.9	288.4	289.4	288.92	175.5	186.4	173.8	178.56	-14720	31320	16600

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
345.3	347.8	346.5	346.53	210.7	222.9	209.0	214.20	-21230	45050	23820.0

3.3.3.3 Separación de pérdidas óhmicas y pérdidas adicionales de los resultados medidos

Se procederá de igual forma que el punto 3.3.3.2.3, de lo cual se obtendrá:

Tabla 3-13 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C con plancha de fierro

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	738.04	883.65
Pérdidas óhmicas BT (W)	1160.38	1389.32
Pérdidas adicionales(W)	793.98	663.15
Pérdida Totales (W)	2692.40	2936.11

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	1660.58	1988.20
Pérdidas óhmicas BT (W)	2610.86	3125.96
Pérdidas adicionales(W)	1755.88	1466.54
Pérdida Totales (W)	6027.32	6580.71

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	2952.15	3534.58
Pérdidas óhmicas BT (W)	4641.53	5557.27
Pérdidas adicionales(W)	3082.40	2574.48
Pérdida Totales (W)	10676.09	11666.33

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	4612.73	5522.79
Pérdidas óhmicas BT (W)	7252.40	8683.24
Pérdidas adicionales(W)	4736.38	3955.91
Pérdida Totales (W)	16601.51	18161.93

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Temperatura (°C)	24	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	6642.33	7952.81
Pérdidas óhmicas BT (W)	10443.45	12503.86
Pérdidas adicionales(W)	6754.03	5641.09
Pérdida Totales (W)	23839.81	26097.76

3.3.3.4 Pérdidas colocando la plancha de hierro más el inserto de acero inoxidable

3.3.3.4.1 Procedimiento de pérdidas colocando la plancha de hierro con el inserto de acero inoxidable

En la tercera etapa se realiza una prueba de cortocircuito con la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable (Figura 3-47), el motivo es conocer las pérdidas base con la plancha de hierro. Lo indicado se midió para corrientes de 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 A. Como resultado se obtuvo las pérdidas para cada corriente.

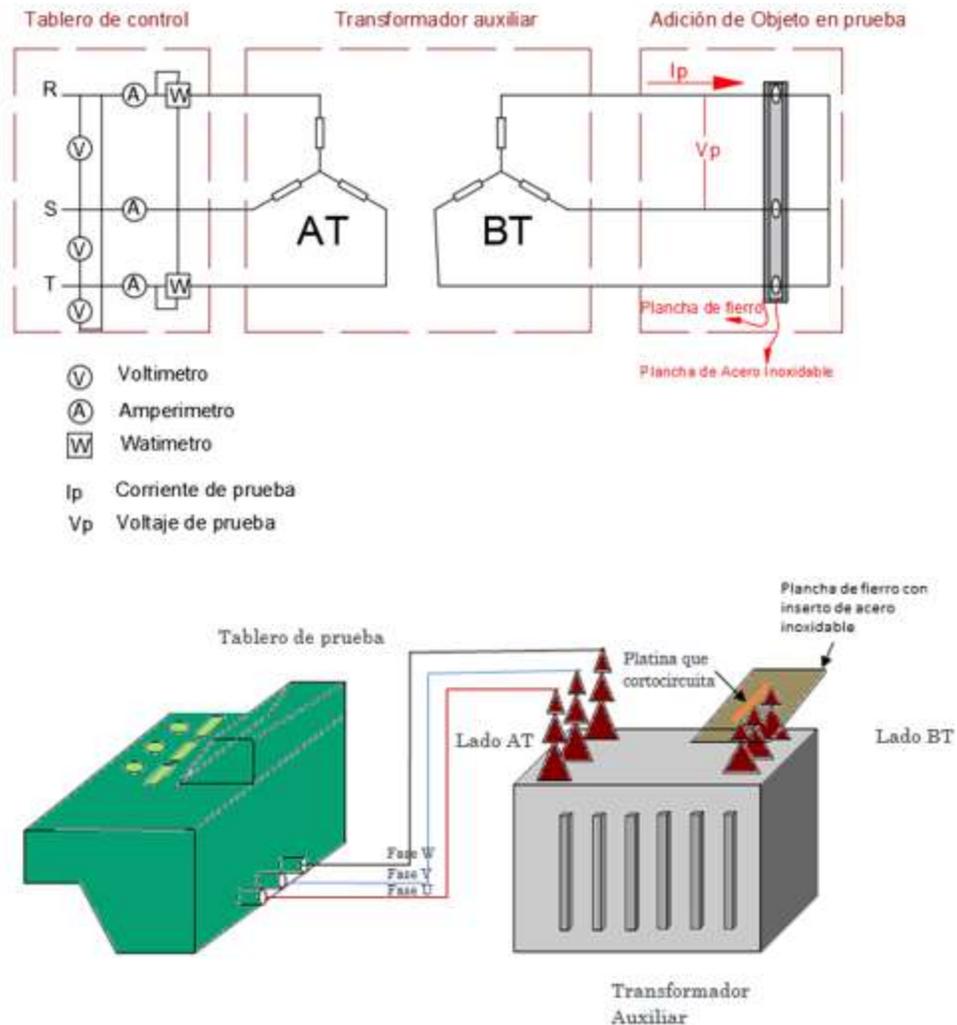


Figura 3-47 Prueba de transformador auxiliar en cortocircuito con plancha de hierro con inserto de inoxidable

3.3.3.4.2 Resultados de la Medición

Tabla 3-14 Resultados de medición de pérdidas colocando la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable a temperatura ambiente de medición de 30°C

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
114.5	114.3	114.2	114.33	70.5	74.3	69.7	71.50	-2450	4956	2506.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
171.4	172.2	171.7	171.77	105.4	111.1	104.6	107.03	-5500	11106	5606.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
229.1	229.5	229.0	229.20	140.6	148.5	139.3	142.80	-9750	19691	9941.0

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
286.4	286.8	286.5	286.55	175.7	185.8	174.2	178.57	-15260	30750	15490

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Tensión medida (V)				Corriente medida (A)				Pérdidas medidas (W)		
--------------------	--	--	--	----------------------	--	--	--	----------------------	--	--

1U	1V	1W	Promedio	1U	1V	1W	Promedio	W1	W3	Suma
343.0	345.1	343.8	343.97	211.0	222.7	209.6	214.42	-21960	44268	22308

3.3.3.4.3 Separación de pérdidas óhmicas y pérdidas adicionales de los resultados medidos

Se procederá de igual forma que el punto 3.3.3.2.3 de lo cual se obtendrá:

Tabla 3-15 Separación de pérdidas y posterior referencia a 75 °C con plancha de fierro con inserto de acero inoxidable

- **Corriente a baja tensión (BT): 1000 A, Corriente a alta tensión (AT): 71.43 A**

Temperatura (°C)	30	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	755.17	883.65
Pérdidas óhmicas BT (W)	1187.32	1389.32
Pérdidas adicionales(W)	558.51	477.31
Pérdida Totales (W)	2501.00	2750.27

- **Corriente a baja tensión (BT): 1500 A, Corriente a alta tensión (AT): 107.14 A**

Temperatura (°C)	30	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	1699.13	1988.20
Pérdidas óhmicas BT (W)	2671.46	3125.96
Pérdidas adicionales(W)	1247.59	1066.20
Pérdida Totales (W)	5618.18	6180.36

- **Corriente a baja tensión (BT): 2000 A, Corriente a alta tensión (AT): 142.86 A**

Temperatura (°C)	30	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	3020.67	3534.58
Pérdidas óhmicas BT (W)	4749.27	5557.27
Pérdidas adicionales(W)	2178.56	1861.80
Pérdida Totales (W)	9948.49	10953.66

- **Corriente a baja tensión (BT): 2500 A, Corriente a alta tensión (AT): 178.57 A**

Temperatura (°C)	30	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	4719.80	5522.79
Pérdidas óhmicas BT (W)	7420.73	8683.24
Pérdidas adicionales(W)	3349.72	2862.69
Pérdida Totales (W)	15490.25	17068.71

- **Corriente a baja tensión (BT): 3000 A, Corriente a alta tensión (AT): 214.29 A**

Temperatura (°C)	30	75
Pérdidas óhmicas AT (W)	6796.51	7952.81
Pérdidas óhmicas BT (W)	10685.85	12503.86
Pérdidas adicionales(W)	4798.40	4100.74
Pérdida Totales (W)	22280.76	24557.41

3.3.4 Resultados

3.3.4.1 Resultado de pérdidas en la plancha de hierro

Las pérdidas por acoplamiento magnético son el resultado de restar las pérdidas adicionales con plancha de hierro (ítem 3.3.3.3.3) menos las pérdidas adicionales sin plancha de hierro (ítem 3.3.3.2.3), obteniéndose:

Tabla 3-16 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro a partir de experimentación

Corriente (A)	Pérdidas en la plancha de hierro (W)
1000	194.38
1500	420.89
2000	747.99
2500	1151.00
3000	1623.74

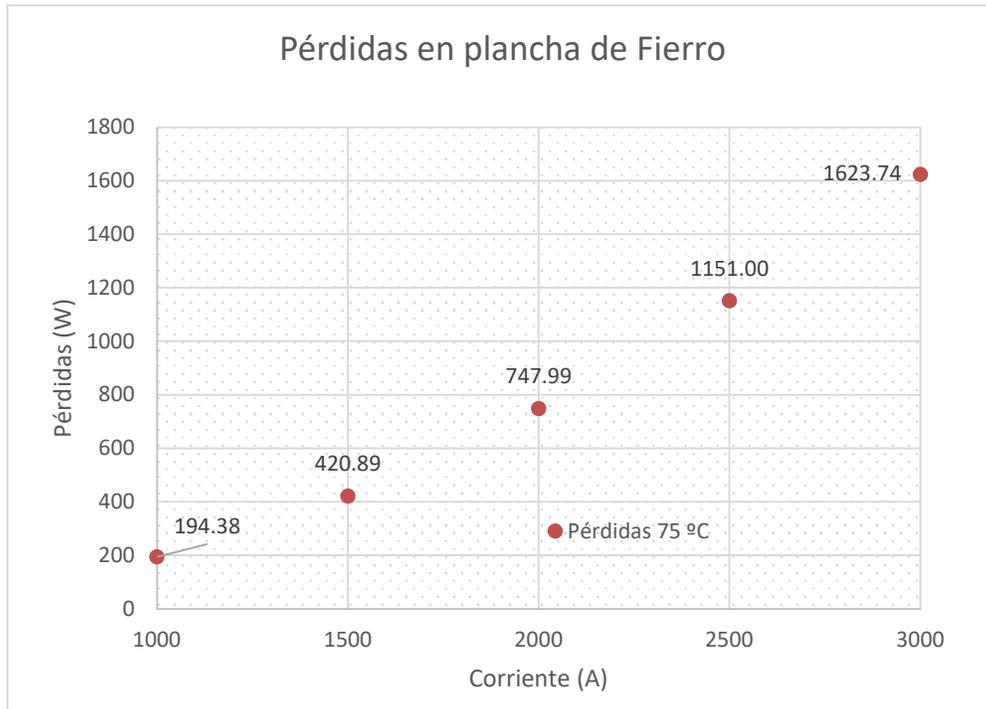


Figura 3-48 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro a partir de experimentación

Termografía

Para la corriente de 3000 A se midió 186 °C en la plancha de hierro

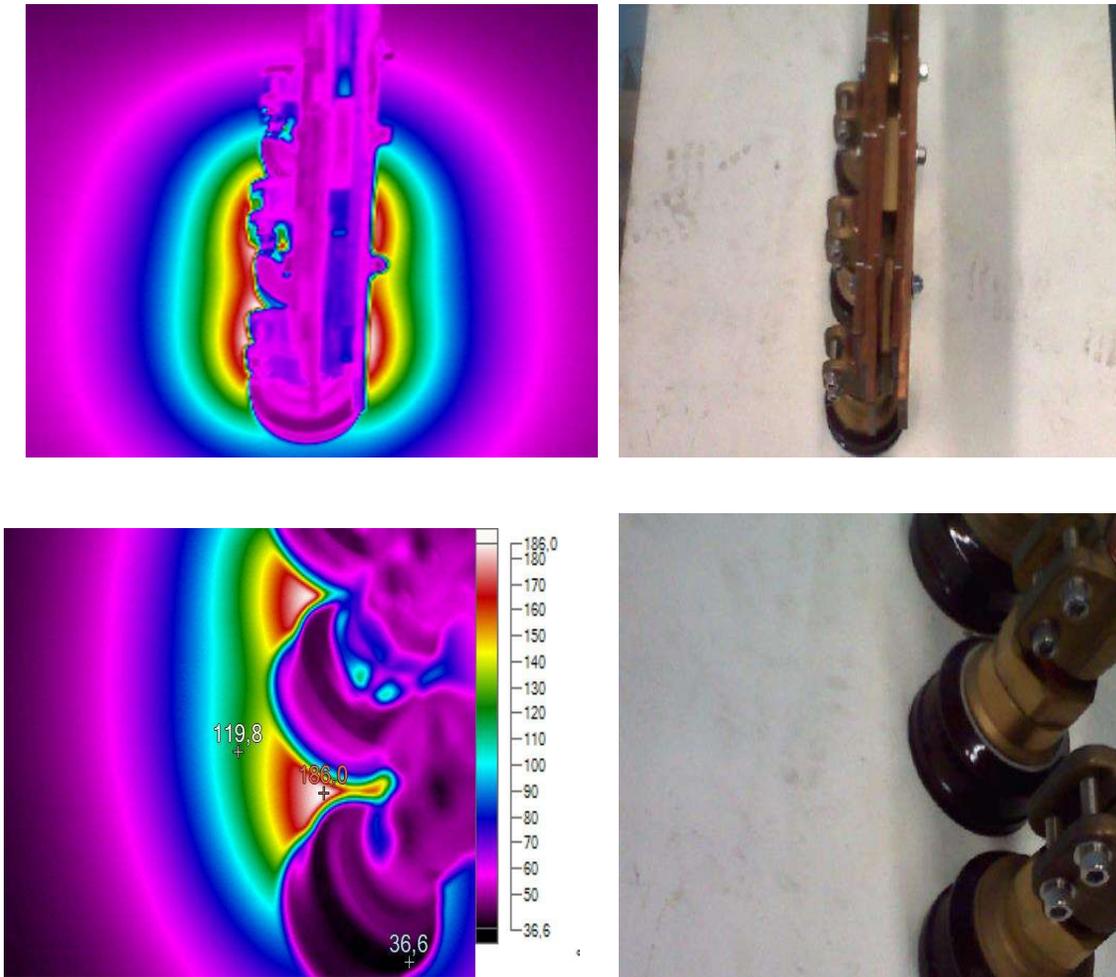


Figura 3-49 Distribución de temperatura en la plancha de hierro a 3000 A

3.3.4.2 Resultado de pérdidas en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

Las pérdidas por acoplamiento magnético son el resultado de restar las pérdidas adicionales con plancha de hierro con inserto de acero inoxidable (ítem 3.3.3.4.3) menos las pérdidas adicionales sin plancha de hierro (ítem 3.3.3.2.3), obteniéndose:

Tabla 3-17 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable a partir de experimentación

Corriente (A)	Pérdidas en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable (W)
1000	8.54
1500	20.55
2000	35.31
2500	57.78
3000	83.39

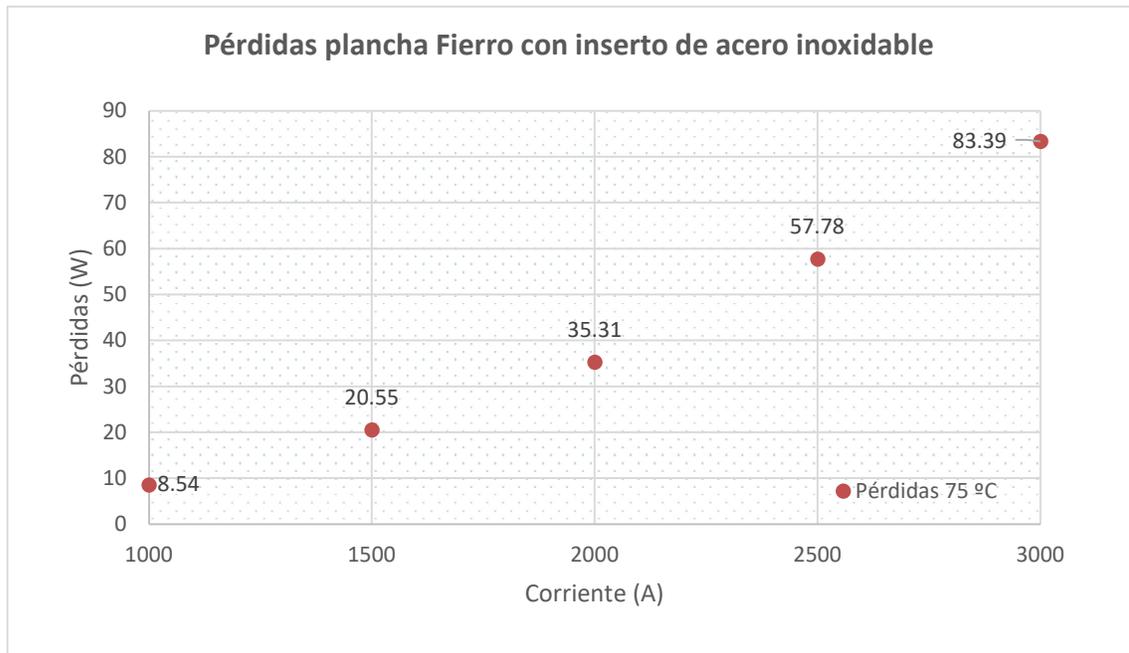


Figura 3-50 Resultados de pérdidas en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable a partir de experimentación

Termografía

Para la corriente de 3000 A se midió 55.7 °C en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

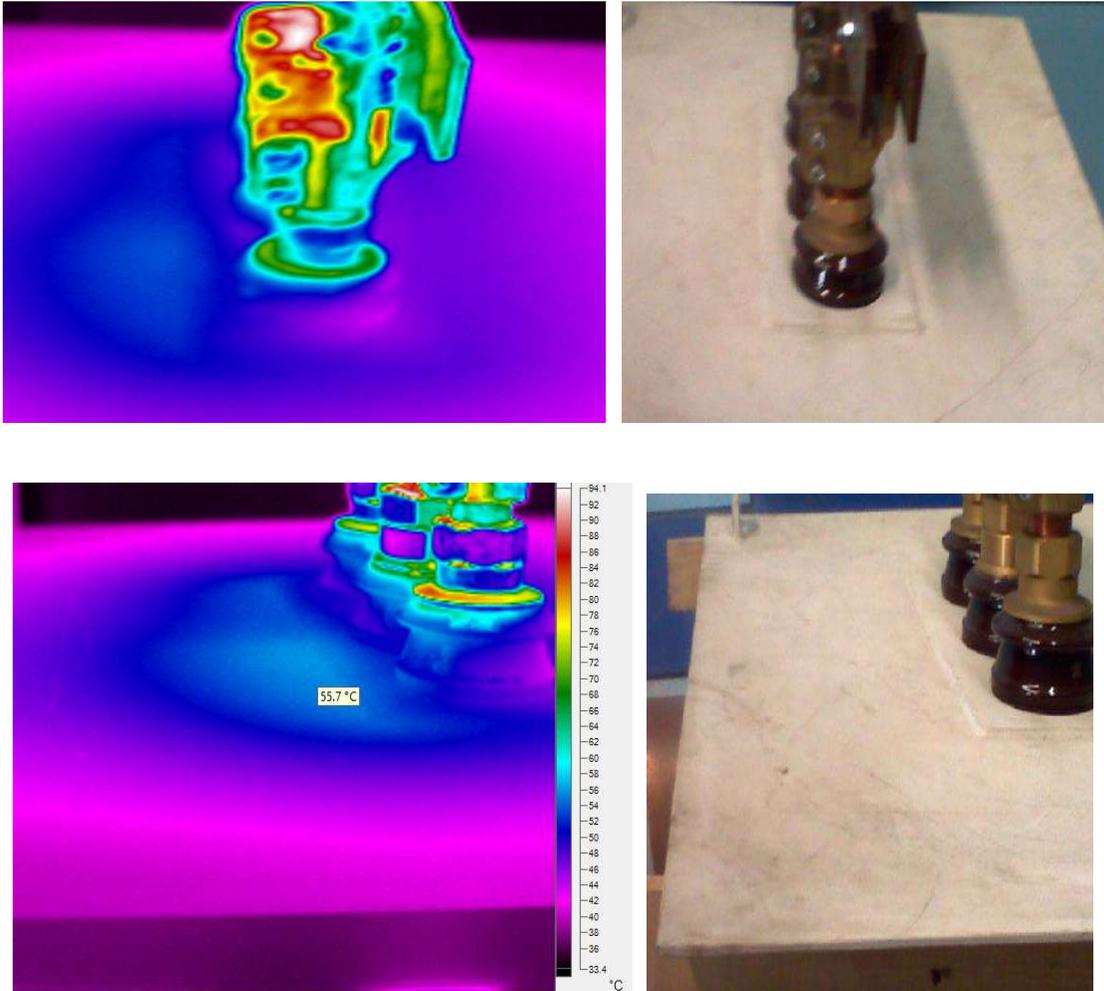


Figura 3-51 Distribución de temperatura en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable a 3000 A

3.4 Análisis de resultados

3.4.1 Caso: plancha de hierro

En acorde a los ítems 3.1 Estudio Analítico, 3.2 Simulación numérica y 3.3 Estudio experimental, se muestran los siguientes resultados con respecto a las pérdidas en la plancha de hierro.

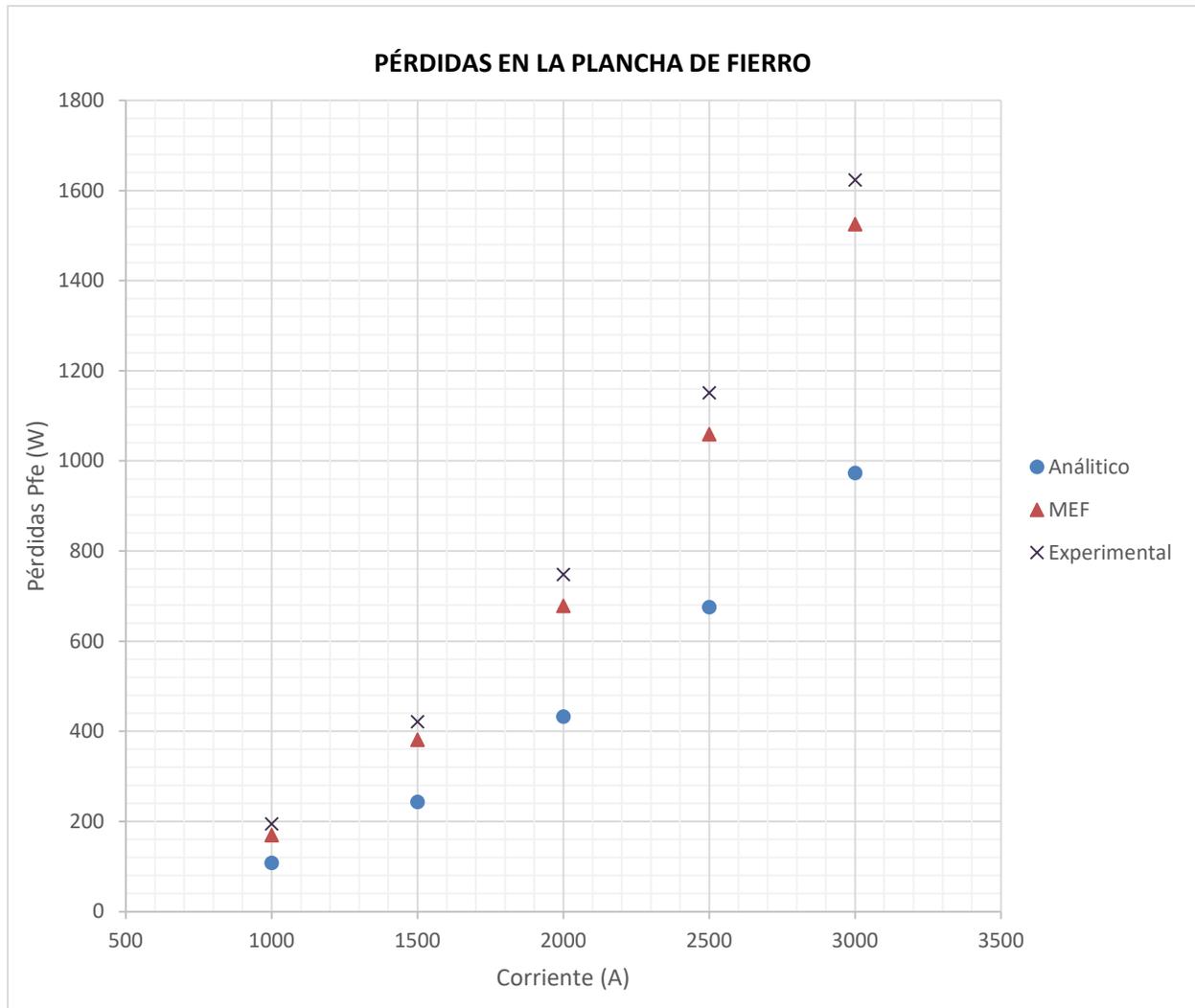


Figura 3-52 Comparación de valores de pérdidas en la plancha de hierro entre los 3 métodos: Analítico, Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental

La desviación del cálculo analítico se acusa a la aproximación de la trayectoria y área de incidencia del campo magnético. Se adicionará un factor de ajuste que multiplicará a los valores de cálculo analítico.

El factor de ajuste que reduce el error es 1.6, se muestran los resultados a continuación:

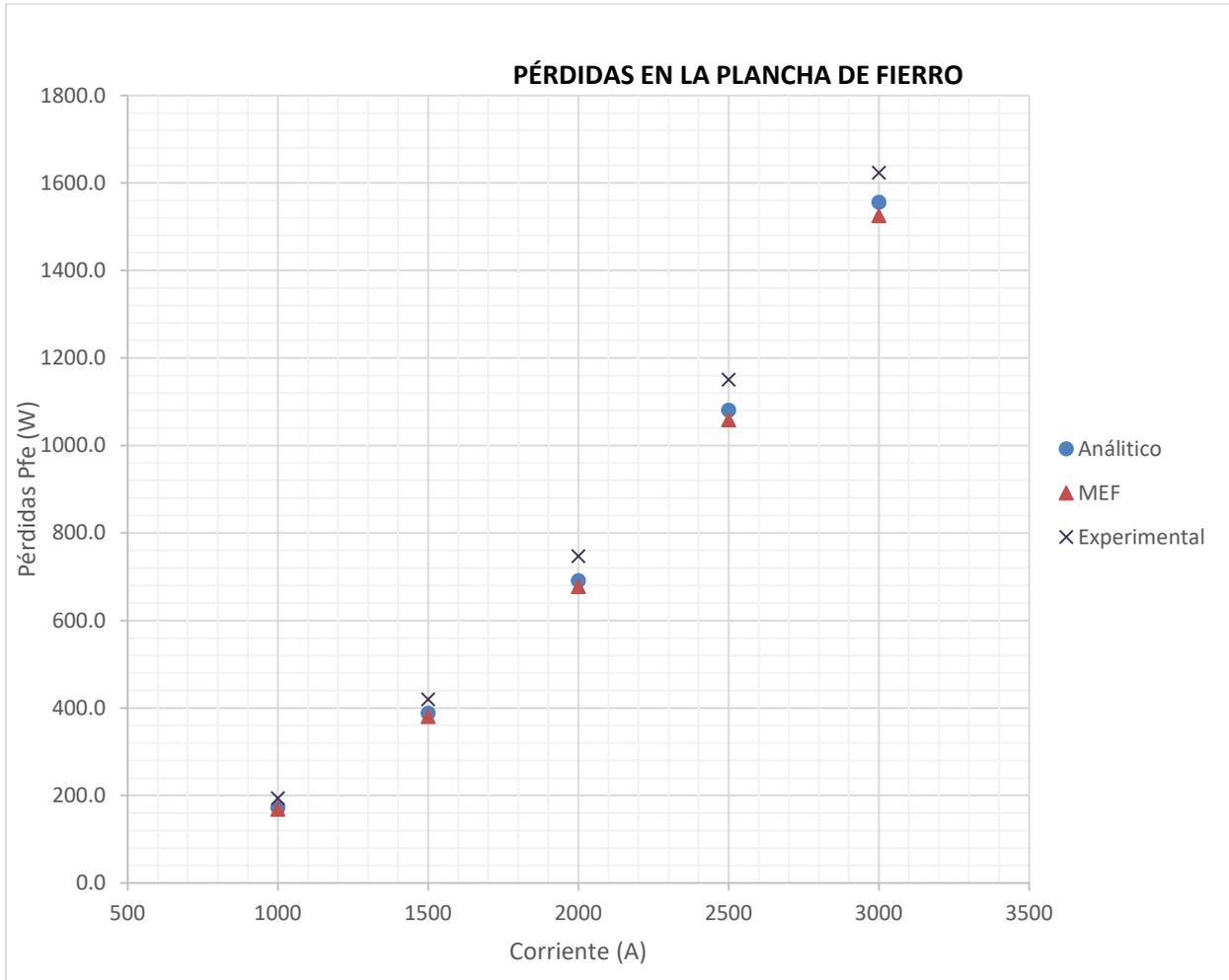


Figura 3-53 Comparación de valores de pérdidas en el hierro entre los 3 métodos: Análítico con factor, Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental

3.4.2 Caso: Plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

Se muestra la comparación de resultados del cálculo numérico (Método de elementos finitos) y la parte experimental, donde se puede apreciar que se obtienen resultados muy próximos.

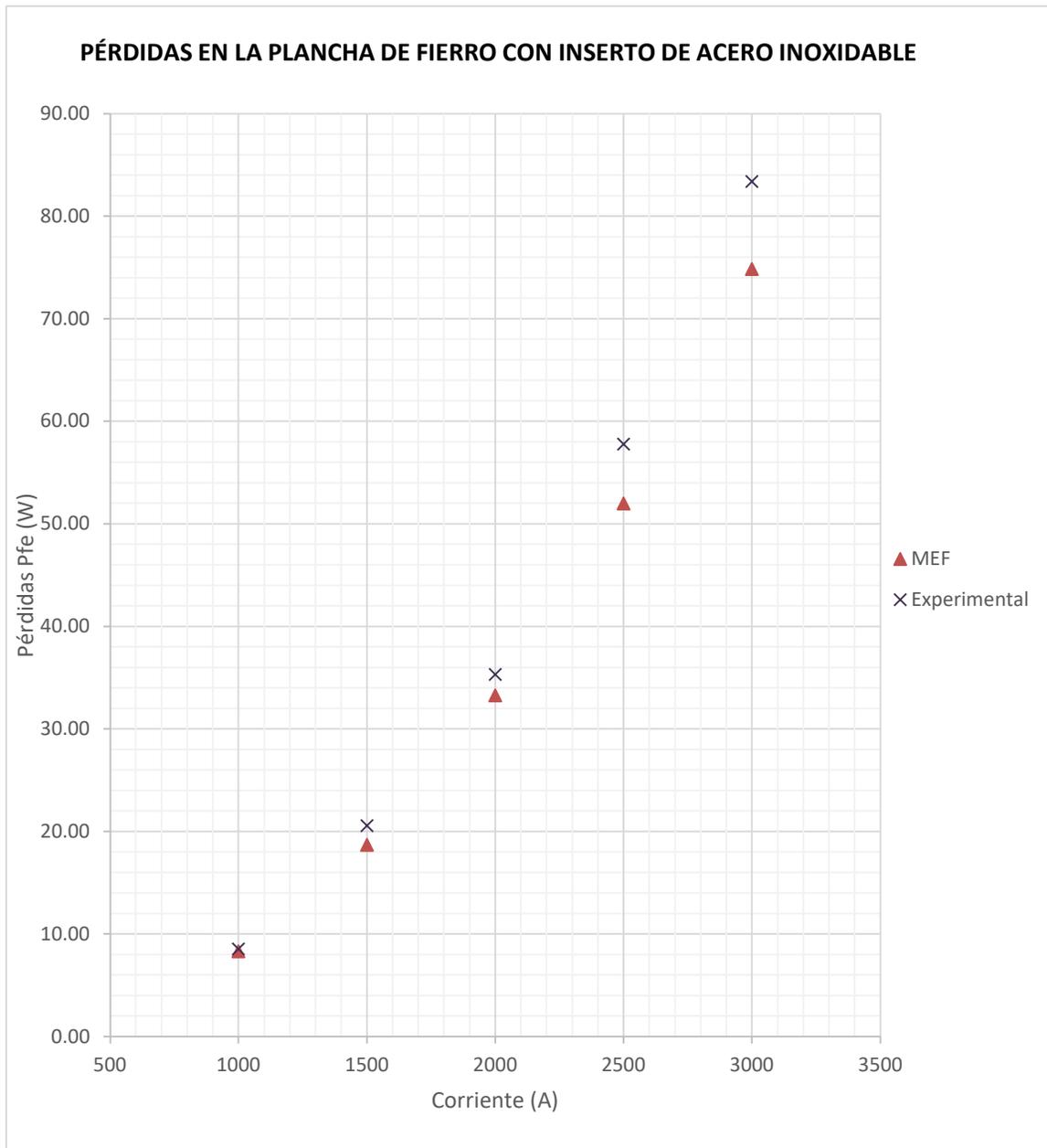


Figura 3-54 Comparación de valores de pérdidas en la plancha de hierro entre 2 métodos: Método de Elementos Finitos (MEF) y experimental

3.4.3 Caso: Plancha de hierro vs plancha de hierro con inserto de acero inoxidable

La **Figura 3-55** muestra la comparación de resultados entre la plancha de hierro y la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable. Se puede notar que la reducción de pérdidas es considerable más aún en corrientes elevadas.

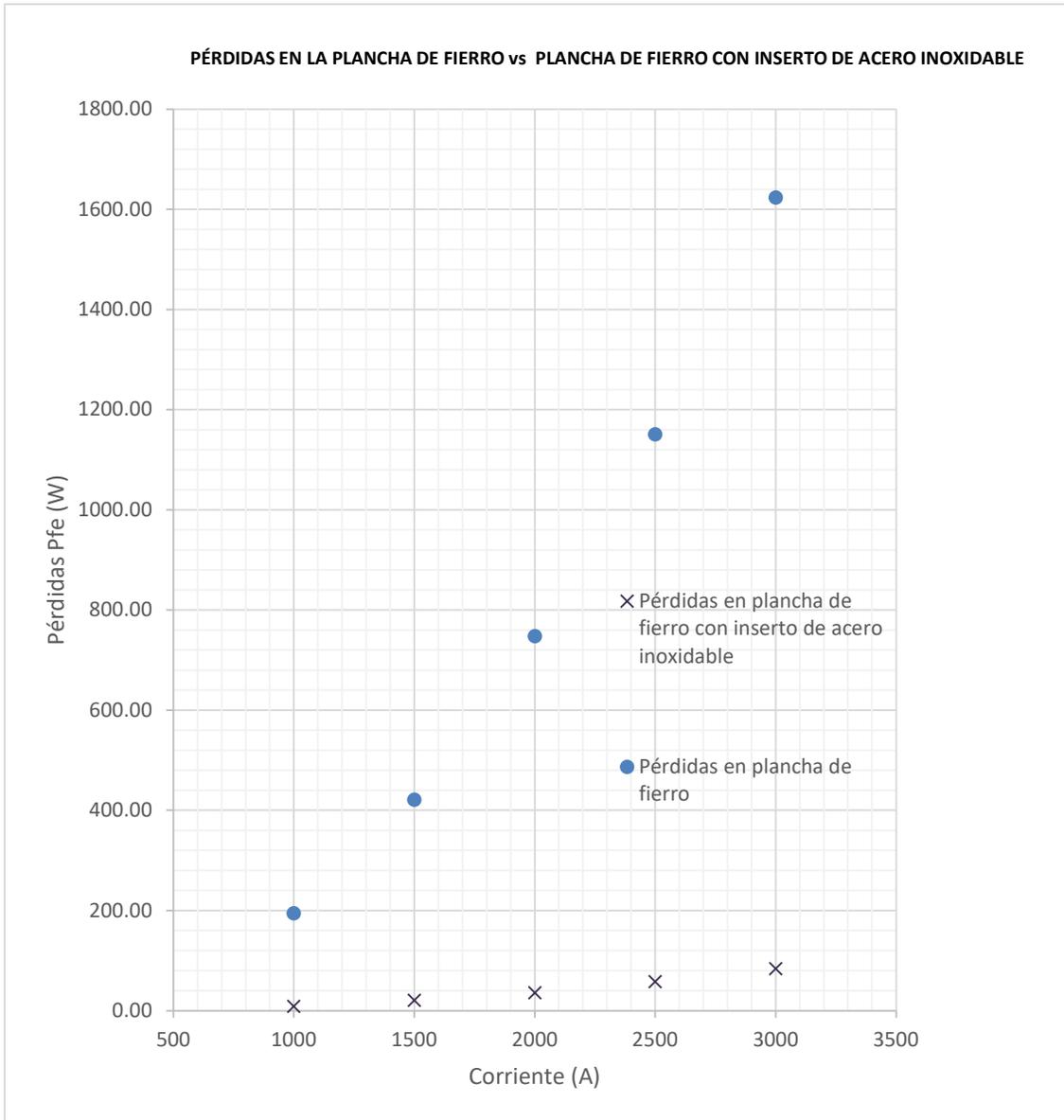


Figura 3-55 Comparación entre las pérdidas de plancha de hierro y pérdidas en la plancha de hierro con inserto de acero inoxidable.

3.4.4 Impacto de incremento de pérdidas en la eficiencia del transformador

A partir de la **Tabla 2-4** se le agregará la pérdida en la plancha de fierro sin mitigación experimental de acuerdo con la corriente

Tabla 3-18 Eficiencia con incremento de pérdidas debido a la plancha de fierro

Serie de transformador	Potencia S_t - (kVA)	Tensión (V)	Corriente (A)	Pérdidas núcleo P_{nu} - (W)	Pérdidas totales cobre P_{Tcu} - (W)	Eficiencia (%)
148088	1000	480	1202	1635	12192.38	98.64%
149343	1250	480	1503.5	1827	14739.89	98.69%
148795	1500	480	1800	2596	15683.99	98.80%
148034	2000	480	2405	3001	18937.00	98.92%
148473	2500	480	3000.7	3525	23687.74	98.92%

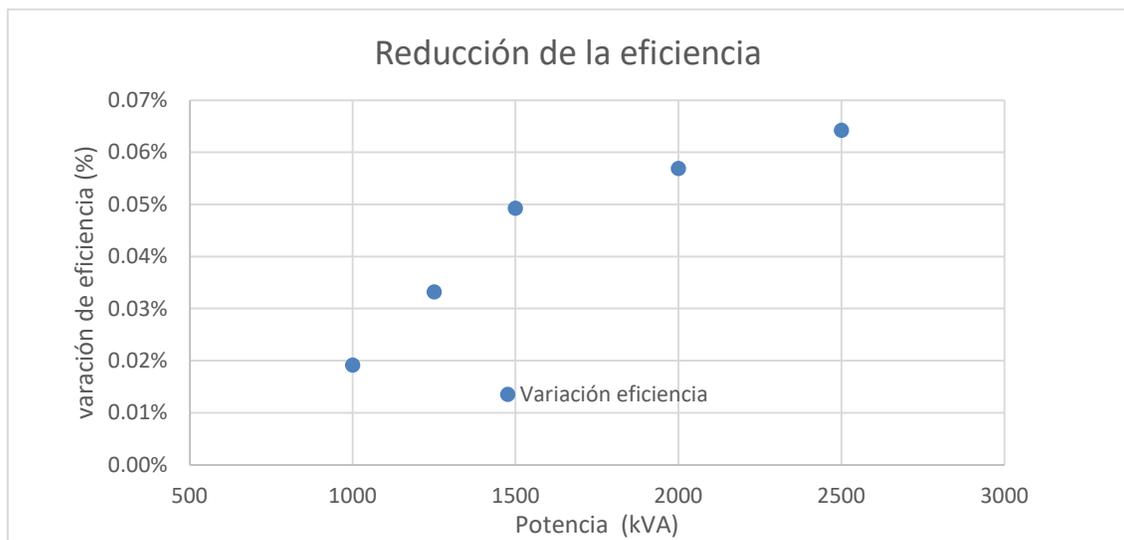


Figura 3-56 Reducción de la eficiencia

3.4.5 Impacto de la temperatura en las planchas de fierro

La temperatura obtenida de 186 °C para una corriente 3000 A cuando la plancha de fierro no tiene inserto de acero inoxidable, genera un punto caliente en el transformador; que en contacto con el aceite mineral del transformador desprende suficientes vapores como para que se inflamen en presencia de una fuente de ignición [punto de inflamación de 130 °C de acuerdo con la norma (IEC 60296, 2020)]

Cuando la plancha de fierro tiene un inserto de acero inoxidable la temperatura en la plancha se reduce a 55.7 °C lo cual es adecuado ya que se encuentra debajo de la temperatura máxima de operación del transformador que de acuerdo con la norma (IEC 60076-2, 2011-02) es de 100 °C.

Capítulo 4. CONCLUSIONES

A partir de lo desarrollado en el presente trabajo se concluye lo siguiente:

1. El porcentaje de desviación de resultados de las mediciones de pérdidas en la plancha de fierro del estudio experimental respecto al pronóstico de pérdidas por método analítico muestra un error promedio de 7.2% en el rango de corriente 1000 a 3000A.
El porcentaje de desviación de resultados de las mediciones de pérdidas en la plancha de fierro del estudio experimental respecto al pronóstico de pérdidas por método de simulación muestra un error promedio de 9.1% en el rango de corriente 1000 a 3000A.
Ambos pronósticos de pérdidas del método analítico y del método de simulación evidencian resultados con desviación $< 10\%$ respecto al resultado experimental. Por tanto, se pueden usar ambos métodos.
2. El porcentaje de desviación de resultados de las mediciones de pérdidas en la plancha de fierro con inserto de acero inoxidable del estudio experimental respecto al pronóstico de pérdidas obtenido con el método de simulación muestra un error promedio de 7.6% en el rango de corriente 1000 a 3000A.
El método analítico no pudo ser realizado, debido a la mezcla de materiales (plancha de fierro y acero inoxidable) lo que hace compleja una solución matemática de las ecuaciones diferenciales, por lo que para el pronóstico de pérdidas se utiliza el método iterativo de elementos finitos MEF.
3. En la experimentación se puede evidenciar la temperatura alcanzada en la plancha de fierro (tapa del transformador) a una corriente de 3000 A es de 186 °C. De acuerdo con la norma IEC 60072 “Temperature rise for liquid-immersed transformers”, la máxima temperatura en contacto con el aceite debe ser 100 °C por lo que es necesaria la mitigación de la pérdida, se plantea en el presente trabajo la colocación de un inserto de acero inoxidable que reduce la temperatura a 55.7 °C.
4. Fabricar transformadores sin inserto de acero inoxidable en su tapa genera mayores pérdidas que se traduce en pérdidas económicas al usuario, además del riesgo de ocasionar punto caliente, provocando en el mejor escenario la desconexión del transformador y la pérdida de la energía eléctrica o, en el peor de ellos, la explosión y el daño a la vida y al medio ambiente.

Capítulo 5. RECOMENDACIONES

Se sugiere para futuras investigaciones lo siguiente:

1. Ampliar el pronóstico de pérdidas para otras partes del transformador distintas a la tapa como el tanque, soportes estructurales internos que están fabricados de plancha de fierro. Posteriormente, determinar mecanismos de mitigación para reducir las pérdidas y evitar la generación del punto caliente.
2. Desarrollar métodos de cálculo que determinen la temperatura en la plancha de fierro a partir del pronóstico de las pérdidas desarrollado en el presente trabajo.

Capítulo 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CEDASPE. (NOVIEMBRE de 2021). PORCELAIN BUSHINGS NEW CEDASPE 1KV SERIES 2021. *CATÁLOGO*. SAN GIULIANO MILANESE, ITALY.
- Corrales, J. M. (1969). *LA ESCUELA DEL TÉCNICO ELECTRICISTA*. Barcelona: Labor.
- D., K. K. (1987). *LARGE POWER TRANSFORMER*. New York: Elseiver.
- DELCROSA. (2022). TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. *CATALOGO DE TRANSFORMADOR*, 9.
- Fierro TRADI S.A. (2008). *Catalogo de productos 2008*. Peru: Peru.
- IEC 60076-1, C. I. (2011-04). Power transformer. *IEC 60076-1*.
- IEC 60076-2, C. I. (2011-02). Temperature rise for liquid-immersed transformers .
- IEC 60296, C. I. (2020). Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical.
- J. Turowski, A. P. (1997). Eddy current losses and hot spot evaluation in cover plates of power transformers. *IEEE Power application Vol 144 N°6*, 435.
- J.C. Olivares, S. K.-P. (2004). Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers. *IEEE Proceedings - Science Measurement and Technology*, 6.
- Normalización-INDECOPI, C. d. (2013). TRANSFORMADORES. Transformadores de distribución monofásicos y trifásicos auto refrigerados, sumergidos en líquido aislante. Corriente en vacío, pérdidas y tensión de corto circuito. *Norma Tecnica Peruana NTP 370.400, Edición 1*, 11.
- Ras, E. (1975). *Transformadores de potencia de medida y proteccion*. Barcelona: BOIXAREU.
- S.V. Kulkarni, J. O. (2004). Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Vol 151 N° 5.
- Sadiku, M. N. (2002). *Elementos de Electromagnetismo* (Tercera edición ed.). New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS MÉXICO.
- V., K. S. (2004). *TRANSFORMER ENGINEERING DESIGN AND PRACTICE*. New york: Marcel.

Vecchio, R. M. (2003). *TRANSFORMER DESIGN PRINCIPLES*. New York: CRC Press.

Xose M. Lopez-Fernández, H. B. (2013). *TRANSFORMERS ANALYSIS, DESIGN, AND MEASUREMENT*. Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group.