



<b>Data</b> 17/09/2024 08:48:20	<b>Setor de Origem</b> CAMPUS-JP - <a href="#">PV-JP</a>
<b>Tipo</b> Entrega de trabalho de conclusão de curso	<b>Assunto</b> Entrega de TCC para registro de nota no suap
<b>Interessados</b> Hugo Samuel Guedes de Oliveira	
<b>Situação</b> Em trâmite	

### Trâmites

- 24/09/2024 11:08  
Recebido por: CBNP-JP: Ivanise Andrade Melo de Almeida
- 23/09/2024 22:00  
Enviado por: CCSBEE-JP: Gilvan Vieira de Andrade Junior
- 23/09/2024 21:52  
Recebido por: CCSBEE-JP: Gilvan Vieira de Andrade Junior
- 17/09/2024 08:48  
Enviado por: PV-JP: Hugo Samuel Guedes de Oliveira



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA



# REQUERIMENTO DE PROCESSO

## DADOS DO REQUERENTE

<b>Nome:</b>	Hugo Samuel Guedes de Oliveira
<b>Matrícula do discente:</b>	20192610032
<b>E-mail:</b>	Hugosamuel13@gmail.com
<b>Curso:</b>	61 - Bacharelado em Engenharia Elétrica - João Pessoa (CAMPUS JOÃO PESSOA)

## DADOS DO REQUERIMENTO

<b>Setor Destino:</b>	CCSBEE-JP
<b>Tipo de Solicitação:</b>	Entrega de trabalho de conclusão de curso
<b>Assunto:</b>	Entrega de TCC para registro de nota no suap
<b>Descrição:</b>	Entrega do tcc para registro de notas no suap e para ser publicado
<b>Data da Emissão:</b>	17/09/2024 08:48:20

Este documento foi emitido pelo SUAP e validado por : **Hugo Samuel**



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA  
CAMPUS JOÃO PESSOA  
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Aplicação do Software FEMM na Simulação de  
Transformadores: Uma Perspectiva para o Ensino  
Dinâmico em Conversão de Energia**

HUGO SAMUEL GUEDES DE OLIVEIRA

João Pessoa - PB  
2024

Hugo Samuel Guedes de Oliveira

# **Aplicação do Software FEMM na Simulação de Transformadores: Uma Perspectiva para o Ensino Dinâmico em Conversão de Energia**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Alvaro de Medeiros Maciel, Dr.

João Pessoa - PB

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, campus João Pessoa

O48a Oliveira, Hugo Samuel Guedes de.

Aplicação de software FEMM na simulação de transformadores:  
uma perspectiva para o ensino dinâmico em conversão de energia / Hugo Samuel  
Guedes de Oliveira. – 2024.

70 f. : il.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ci-  
ência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel.

1. Software FEMM. 2. Elementos finitos. 3. Ensino dinâmico. 4. Transformadores.  
5. Conversão de energia I. Título.

CDU 621.3:004.4


Bibliotecária responsável: Taize Araújo da Silva – CRB15/536

Hugo Samuel Guedes de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso


Aprovado em: 22/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 ALVARO DE MEDEIROS MACIEL  
Data: 17/09/2024 04:14:07-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


---

Prof. Alvaro de Medeiros Maciel, Dsc.  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 JOSE ARTUR ALVES DIAS  
Data: 16/09/2024 22:43:56-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. José Artur Alves Dias, Dsc.  
IFPB

Documento assinado digitalmente  
 FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA  
Data: 16/09/2024 20:49:10-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Franklin Martins Pereira Pamplona,  
Dsc.  
IFPB

# Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a diversas pessoas e entidades que tornaram possível a conclusão deste curso. Em primeiro lugar, sou grato a Deus por me conceder sabedoria e fortaleza ao longo dessa jornada.

Não posso deixar de reconhecer o apoio incondicional dos meus pais e irmãos que estiveram sempre ao meu lado, tanto nos momentos difíceis quanto nos de alegria, compartilhando experiências e oferecendo conselhos valiosos que me ajudaram a alcançar este objetivo.

À minha noiva Brunna, que é um anjo em minha vida e que nunca saiu do meu lado em todos os momentos de dificuldades que passei.

Aos meus grandes amigos, que conheci durante o curso e na vida ao qual devo uma enorme gratidão por todos os momentos de diversão e descontração que compartilhamos, mas também pelos momentos desafiadores em que sempre estiveram presentes, me motivando e incentivando a seguir em frente até a conclusão deste ciclo.

Quero também expressar minha profunda gratidão ao Professor Alvaro de Medeiros Maciel, que aceitou me orientar neste percurso, dedicando seu tempo e esforço para garantir os melhores resultados possíveis. Sua amizade e apoio foram fundamentais durante todo esse tempo.

# Resumo

Este estudo propõe analisar o software FEMM (Finite Element Method Magnetics) como uma ferramenta para simulação de transformadores, com foco em sua aplicação no ensino dinâmico de conversão de energia. Foram realizadas simulações computacionais de transformadores, comparando resultados com dados teóricos e os obtidos via software. Os resultados destacam a precisão do FEMM na simulação de transformadores, permitindo uma análise detalhada de seu comportamento dinâmico. Ademais, sua utilização proporciona uma abordagem interativa, dinâmica e voltada a projetos no ensino de conversão de energia, fomentando uma compreensão mais profunda dos conceitos teóricos e familiaridade com aplicações práticas da engenharia elétrica. Sob essa perspectiva, são apresentadas minuciosamente todas as etapas para obtenção dos resultados, desde o pré-processamento até o pós-processamento. Por último, são exibidos todos os resultados das simulações. Esse trabalho evidencia a relevância do FEMM no contexto do ensino de conversão de energia, ampliando as possibilidades educacionais disponíveis.

**Palavras-Chave:** Software FEMM. Elementos Finitos. Ensino Dinâmico. Transformadores. Conversão de energia.



# Abstract

This study proposes to analyze the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software as a tool for transformer simulation, with a focus on its application in dynamic energy conversion education. Computational simulations of transformers were conducted, comparing the results with theoretical data and those obtained via the software. The results highlight the accuracy of FEMM in transformer simulation, allowing for a detailed analysis of their dynamic behavior. Furthermore, its use provides an interactive, dynamic, and project-oriented approach in energy conversion education, fostering a deeper understanding of theoretical concepts and familiarity with practical applications in electrical engineering. From this perspective, all the steps for obtaining the results, from pre-processing to post-processing, will be presented in detail. Finally, all the simulation results will be displayed. This work underscores the relevance of FEMM in the context of energy conversion education, expanding the available educational possibilities.

**Keywords:** FEMM Software. Finite Elements. Dynamic Teaching. Transformers. Energy Conversion.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Parte Complementar do transformador. . . . .	18
Figura 2 – Parte ativa do transformador . . . . .	19
Figura 3 – Principais tipos de bobina. . . . .	21
Figura 4 – Transformador trifásico tipo núcleo envolvido. . . . .	22
Figura 5 – Transformador trifásico tipo núcleo envolvente. . . . .	23
Figura 6 – Forma para seção do núcleo. . . . .	23
Figura 7 – Núcleo de um transformador trifásico. . . . .	24
Figura 8 – Tipos de Elementos. . . . .	30
Figura 9 – configuração geométrica das componentes ativas de um transformador. . . . .	35
Figura 10 – Geometria quadrada no software FEMM. . . . .	37
Figura 11 – MEF Aplicado no transformador. . . . .	38
Figura 12 – Curva BH do Material M-22 Steel. . . . .	39
Figura 13 – Densidade do Fluxo Magnético do Transformador. . . . .	40
Figura 14 – Ferramentas de inicialização do Software FEMM. . . . .	41
Figura 15 – Dimensões do Transformador . . . . .	42
Figura 16 – Coordenadas dos pontos para montar o Núcleo. . . . .	43
Figura 17 – Ilustração da inclusão da coordenada. . . . .	45
Figura 18 – Ferramentas da Barra Superior. . . . .	46
Figura 19 – Transformador Completo . . . . .	48
Figura 20 – Ferramenta para Selecionar Tipos de Materiais . . . . .	48
Figura 21 – Ferramentas de inserir tipo de material e ponto de materials . . . . .	49
Figura 22 – Condições de contorno de Dirichlet Para o MEF . . . . .	51
Figura 23 – Ferramenta Run mesh generator . . . . .	52
Figura 24 – Malha do Transformador aplicado forma geométrica . . . . .	53
Figura 25 – Etapa do Processamento das informações e Visualização de Resultados . . . . .	55
Figura 26 – Informações do Material usado no transformador . . . . .	56
Figura 27 – Interface dos Botões que mostram os resultados da aplicação . . . . .	57
Figura 28 – Interface dos Botões que mostram as perdas e a densidade de fluxo . . . . .	58
Figura 29 – Plot da análise eletromagnética do transformador . . . . .	58
Figura 30 – Ferramenta para Criar uma propriedade no Circuito . . . . .	59
Figura 31 – Ferramentas para analisar o desenho . . . . .	60
Figura 32 – Ferramenta para analisar o Valor Total das Perdas . . . . .	60
Figura 33 – Interface onde permite a Escolha das Perdas Totais do Transformador . . . . .	60
Figura 34 – Perdas a vazio do transformador no FEMM. . . . .	62
Figura 35 – Mudança de corrente nos enrolamentos BT. . . . .	64
Figura 36 – Mudança de corrente nos enrolamentos AT. . . . .	65

---

Figura 37 – Perdas nos enrolamentos do transformador no FEMM. . . . .	65
Figura 38 – Gráficos das relações das perdas a vazio , perdas nos enrolamentos e perdas totais. . . . .	67
Figura 39 – Gráfico densidade de fluxo Simulado x Calculado. . . . .	67
Figura 40 – Desenho exportado para o autocad. . . . .	68

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Diferença entre os valores calculados e simulados. . . . .	66
---	----

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

**B:** *Densidade de fluxo magnético (T)*

**A:** *Área (m<sup>2</sup>)*

$\phi$ : *Fluxo magnético (Wb)*

**H:** *Intensidade do campo magnético [A/m]*

**J:** *Densidade de corrente nos condutores das bobinas [A/mm<sup>2</sup>]*

$\nabla \times \mathbf{B}$ : *Rotacional do Campo Magnético*

$\mu_0$ : *Permeabilidade do Vácuo*

**L:** *Largura total do núcleo envolvido [mm]*

**Lc:** *Maior largura da coluna do núcleo [mm]*

**Lj:** *Largura da janela [mm]*

**H:** *Altura da culatra [mm]*

**HJ:** *Altura da janela [mm]*

**Hc:** *Altura da culatra [mm]*

**Atc:** *Área da coluna [mm<sup>2</sup>]*

**Ac:** *Área da culatra [mm<sup>2</sup>]*

**d:** *Distância entre o enrolamento bt e o núcleo [mm]*

**D:** *Medida entre os pontos centrais das duas colunas do núcleo [mm]*

**FEMM:** *Finite Element Methods Magnetics*

**MEF:** *Método dos Elementos Finitos*

**Po:** *Perda a Vazio*

**Ph:** *Perda por Histerese*

**Pp:** *Perda por Correntes parasitas*

**Penrolamento:** *Perda nos Enrolamentos causada pelo efeito joule*

**Rat:** *Resistência dos Enrolamentos de Alta Tensão*

**Rbt:** *Resistência dos Enrolamentos de Baixa Tensão*

**Ifbt:** *Corrente Nominal de Fase de Baixa Tensão*

**Ifat:** *Corrente Nominal de Fase de Alta Tensão*

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Transformadores</b>	<b>17</b>
2.1.1	Montagem e Configuração de um Transformador	17
2.1.2	Enrolamento do Transformador	20
2.1.3	Núcleo do Transformador	21
2.1.4	Perdas a vazio	25
2.1.5	Perdas nos enrolamentos	26
2.1.6	Densidade de fluxo magnético	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>28</b>
3.1.1	Especificações do Transformador:	28
3.1.2	Software de Simulação (FEMM):	28
3.1.3	Requisitos e Instalação do Software (FEMM):	28
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>29</b>
3.2.1	Método dos Elementos Finitos MEF:	29
3.2.2	Equações de Maxwell	31
3.2.3	Análise de Transformadores utilizando o Método dos Elementos Finitos.	34
3.2.3.1	Pré-processamento	35
3.2.3.2	Processamento 1	36
3.2.3.3	Processamento 2	38
3.2.3.4	Pós-processamento	39
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Procedimento detalhado do Pré-processamento</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Procedimento detalhado dos processamentos 1 e 2</b>	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Procedimento detalhado do pós processamento</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>56</b>
<b>5.1</b>	<b>Importar e Exportar do FEMM para o AutoCAD</b>	<b>68</b>

---

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Prospecção de Futuros Trabalhos . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>71</b>

# 1 Introdução

O crescimento da demanda por fontes de energia limpa e eficiente impulsionou avanços tecnológicos na engenharia elétrica. Nesse cenário, a simulação computacional desempenha um papel crucial ao permitir a análise minuciosa de dispositivos como os transformadores, essenciais nos sistemas de distribuição de energia. A eficiência e o desempenho desses equipamentos são fundamentais para assegurar o funcionamento adequado das redes elétricas.

Com o contínuo avanço tecnológico, a modelagem eletromagnética tem evoluído, possibilitando análises cada vez mais precisas de sistemas complexos, notadamente sistemas que envolvem campos de acoplamento. O método dos elementos finitos (FEM), destacado por [CABREIRA, 1996], viabiliza a análise de problemas envolvendo campos magnéticos e geometrias complexas, simplificando a descrição do funcionamento desses dispositivos e dos fenômenos associados.

O presente trabalho concentra-se na avaliação do software FEMM (Finite Element Method Magnetics) como ferramenta para simulação de transformadores, especialmente em sua aplicação no ensino dinâmico de conversão de energia. O objetivo é investigar a precisão e eficácia do FEMM na simulação de transformadores, explorando seu potencial como recurso didático.

A escolha do FEMM é respaldada por sua ampla utilização e reconhecimento na comunidade acadêmica e profissional, além de sua capacidade de fornecer resultados precisos em simulações magnéticas. Este estudo contribui para o avanço do ensino de conversão de energia, fornecendo uma ferramenta interativa para auxiliar os alunos na compreensão dos conceitos teóricos e de projetos.

Ademais, a abordagem iterativa no ensino, que estimula a interação contínua entre professores e alunos, é fundamental para aprimorar o aprendizado. O uso do FEMM como recurso de simulação oferece uma oportunidade única para essa prática, permitindo que os alunos experimentem e visualizem os conceitos de forma dinâmica e interativa, o que melhora a eficácia do ensino e o engajamento dos alunos.



## 1.1 Contexto

Dado que este tópico é relevante e apresenta escassez de material em língua portuguesa, este trabalho tem como objetivo detalhar o procedimento para proporcionar compreensão sobre a utilização adequada da análise eletromagnética de transformadores por meio de simulações no software FEMM.

Foi elaborado um guia para facilitar aos alunos no processo iterativo de aprendizagem da disciplina de conversão eletromecânica de energia, reduzindo a ênfase na teoria e proporcionando uma abordagem prática. Além disso, busca-se auxiliar outros profissionais na realização de simulações eletromagnéticas de transformadores utilizando o método dos elementos finitos, através do software FEMM. Esta iniciativa visa implementar o uso do software no meio acadêmico, uma vez que pode ser aplicado em diversas disciplinas.

O programa possibilita a análise eletromagnética do transformador ao subdividir a geometria da parte ativa em elementos menores, permitindo que computadores resolvam problemas complexos através de interpolações de soluções aproximadas. Propõe-se, então, uma modelagem de um transformador de distribuição, permitindo a avaliação dos resultados obtidos por meio de cálculos analíticos. A partir desses cálculos, as principais grandezas do núcleo e bobinas do transformador foram simuladas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) via software FEMM, com o objetivo de determinar a densidade de fluxo magnético no núcleo, as perdas a vazio, as perdas nos enrolamentos e outras grandezas relevantes.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar o software FEMM (Finite Element Method Magnetics) como ferramenta para simulação de transformadores, com foco em sua aplicação no ensino dinâmico de conversão de energia.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Detalhar o procedimento para utilizar o software FEMM na simulação de transformadores nas seguintes etapas:

- pré-processamento: Realizar a inserção de pontos seguida pela conexão destes pontos por meio de linhas, formando assim a geometria do sistema. Posteriormente, subdividir essa geometria em elementos menores, um processo conhecido como malhação.
- processamento: Realizar a aplicação da malha do Método dos Elementos Finitos (MEF) e a execução dos cálculos necessários para analisar a solução eletromagnética.
- pós-processamento: Apresentar os resultados obtidos, incluindo a densidade de fluxo magnético, as perdas a vazio, as perdas nos enrolamentos, entre outras grandezas relevantes.
- Desenvolver um guia prático para auxiliar alunos no aprendizado iterativo da disciplina de conversão eletromecânica de energia, bem como em máquinas Elétricas.
- Apoiar outros profissionais na realização de simulações eletromagnéticas de transformadores utilizando o método dos elementos finitos através do software FEMM.
- Implementar o uso do software no meio acadêmico, visando sua aplicação em diversas disciplinas.
- Realizar a modelagem de um transformador de distribuição e avaliar os resultados obtidos por meio de cálculos analíticos.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Transformadores

Os transformadores desempenham um papel fundamental na transmissão e distribuição eficiente de energia elétrica. Eles operam com base nos princípios da indução eletromagnética, onde a variação de corrente em um enrolamento gera um campo magnético variável que, por sua vez, induz uma corrente no enrolamento adjacente. Este fenômeno é governado pelas leis de Faraday e Lenz.

#### 2.1.1 Montagem e Configuração de um Transformador

O livro de [MARTIGNONI, 1991] fornece uma abordagem detalhada sobre o projeto de transformadores trifásicos com núcleos envolvidos e envolventes, além de abordar a construção dos enrolamentos de alta e baixa tensão. Ele apresenta as principais equações utilizadas para calcular as perdas a vazio e as perdas sob carga dos transformadores.

O transformador consiste em duas partes distintas, a parte ativa composta pelo:

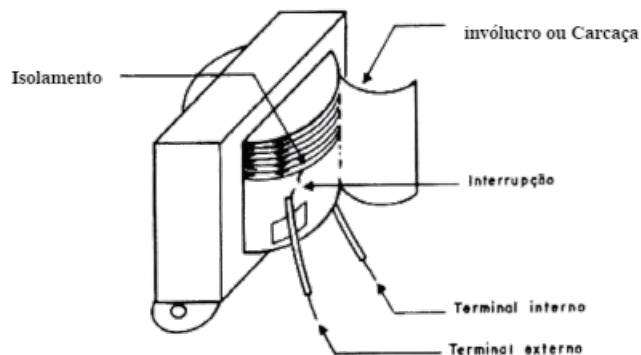
- Núcleo Magnético: Geralmente feito de ferro ou materiais ferromagnéticos, é responsável por direcionar e concentrar as linhas de fluxo magnético geradas pelas correntes elétricas alternadas que passam pelas bobinas.
- Bobinas Primária e Secundária: São enrolamentos condutores de fio de cobre ou outro material condutor, que são dispostos ao redor do núcleo magnético. A bobina primária é conectada à fonte de energia elétrica, enquanto a bobina secundária está conectada à carga. A corrente alternada na bobina primária induz uma corrente alternada correspondente na bobina secundária, por meio do campo magnético criado, pela passagem de corrente no enrolamento primário e concentrado no núcleo, devido a sua alta permeabilidade.

Além do mais [FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2013] fornece princípios fundamentais e físicos das máquinas rotativas. Os autores apresentam a análise da conversão eletromecânica de energia nas máquinas elétricas e evidencia que as técnicas de análise dos transformadores formam a base dos estudos sobre máquinas elétricas.

A parte Parte Complementar de um transformador como ilustrado na figura 1 é composta pelo:

- Isolamento: O isolamento é crucial para garantir que as correntes elétricas fluam apenas nos condutores apropriados, evitando curtos-circuitos ou outros problemas elétricos.
- Invólucro ou Carcaça: É a estrutura física do transformador que protege as partes internas e fornece suporte mecânico. Pode ser feito de materiais isolantes ou metálicos, dependendo da aplicação e do ambiente em que o transformador será utilizado.
- Terminais de Conexão: São os pontos nos quais os condutores elétricos são conectados às bobinas do transformador. Permitem a ligação do transformador ao sistema elétrico mais amplo, seja como fonte de energia ou como dispositivo de distribuição de energia.

Figura 1 – Parte Complementar do transformador.



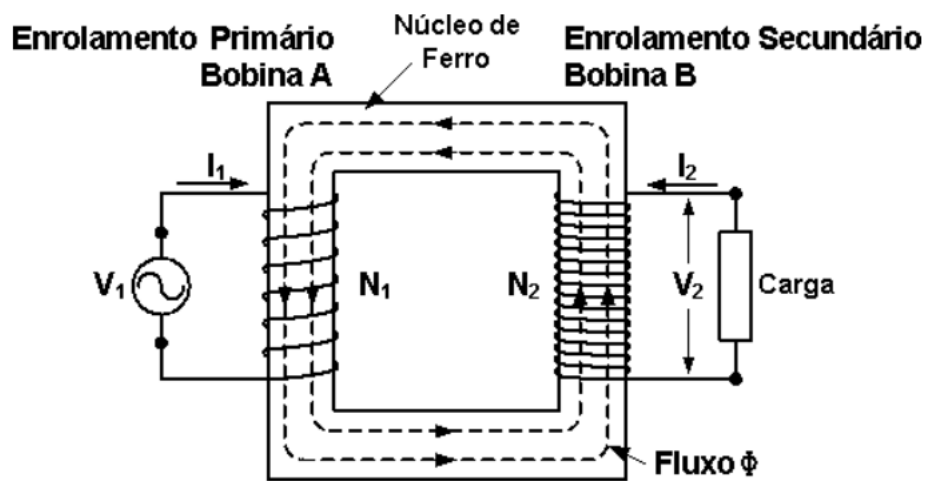
Fonte: Adaptado de Newton C.Braga.

Essas partes funcionam em conjunto para cumprir a função principal do transformador: transferir energia elétrica de um nível de tensão para outro, geralmente alterando a corrente, sem modificar a frequência da energia. A Figura 2 ilustra a parte ativa de um transformador, que é composta pelos componentes principais responsáveis pela transformação de energia elétrica. Esses componentes são essenciais para o funcionamento eficiente e eficaz do transformador.

Onde:

- $N_1$ : é o número de espiras no primário;
- $N_2$ : é o número de espiras no secundário;
- $V_1$ : é a tensão de alimentação primária;
- $V_2$ : é a tensão induzida no enrolamento secundário;
- $I_2$ : é a corrente no terminal secundário;
- $I_1$ : é a corrente no terminal primário;
- $\varphi$ : é o fluxo magnético que acopla eletromagneticamente as bobinas do transformador.

Figura 2 – Parte ativa do transformador .



Fonte: Adaptada de Explicatorium.

### 2.1.2 Enrolamento do Transformador

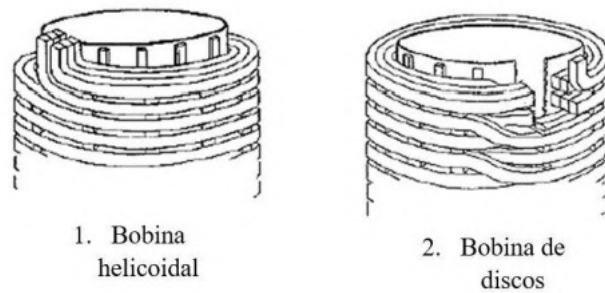
Os enrolamentos de um transformador desempenham um papel fundamental na eficiente transferência de energia entre circuitos distintos. Compostos por condutores elétricos, geralmente de cobre ou alumínio, envolvidos ao redor do núcleo do transformador, esses componentes são indiscutivelmente os mais vitais do equipamento. Por conseguinte, seu projeto exige extrema precisão nos cálculos para garantir sua correta operação.

A durabilidade e a vida útil do transformador estão diretamente ligadas à integridade das suas bobinas. Assim, as bobinas do transformador não apenas conduzem a energia, mas também são responsáveis por preservar sua integridade ao longo do tempo. O cuidado meticuloso dedicado ao projeto e à construção desses enrolamentos é essencial para garantir o desempenho confiável e duradouro do transformador [NOGUEIRA; ALVES, 2009].

Os enrolamentos de um transformador podem ser configurados de diversas maneiras, como as bobinas helicoidais e em discos, ilustradas na Figura 3. Cada tipo de enrolamento oferece características específicas, tornando-os adequados para diferentes aplicações e faixas de tensão.

- **Bobina Helicoidal:** A bobina helicoidal é o tipo mais utilizado para baixa tensão. Ela é formada pelo condutor enrolado em forma de espiral em uma única camada. O enrolamento inicia em um dos lados e termina no outro, seguindo um padrão helicoidal. Esse tipo de enrolamento é especialmente eficaz em aplicações onde o espaço é limitado e a dissipação de calor é uma preocupação, devido à sua construção compacta e eficiente [NOGUEIRA; ALVES, 2009].
- **Bobina em Discos:** Na bobina em discos, o fio condutor é enrolado em múltiplos discos isolados, formando uma série de camadas sobre uma estrutura cilíndrica ou retangular. Esta técnica é frequentemente utilizada em transformadores de potência e alta tensão, onde são exigidas tensões elevadas e um isolamento eficiente entre as espiras. O fio condutor pode ter uma seção circular ou retangular, conforme os requisitos do projeto e as características elétricas desejadas. A disposição em discos permite um melhor controle sobre a distribuição das espiras e uma capacidade aprimorada de dissipação de calor, crucial em aplicações de alta potência. Além disso, a separação física entre os discos ajuda a minimizar as capacitâncias parasitas e melhorar o desempenho do transformador em altas frequências. Esta configuração também facilita a manutenção e a inspeção das espiras, contribuindo para a confiabilidade e longevidade do equipamento.

Figura 3 – Principais tipos de bobina.



Fonte: Adaptado de ABB (2004).

### 2.1.3 Núcleo do Transformador

Tipicamente, o núcleo do transformador é confeccionado a partir de um material ferromagnético e tem a função de concentrar o fluxo magnético, produzido pelos enrolamentos [MARTIGNONI, 1991]. Em essência, o núcleo do transformador é a peça central do dispositivo, mas ele não opera de forma isolada. Ele interage com duas ou mais bobinas de acordo com as leis da indução eletromagnética e a indução mútua descritas por Faraday. Normalmente, o núcleo do transformador é composto por lâminas de aço que são agrupadas e unidas em tiras. Essas lâminas são empilhadas para formar o núcleo magnético do transformador. Os transformadores elétricos, impulsionados pelo fluxo entre os enrolamentos primários, secundários e terciários, dependem essencialmente dos núcleos magnéticos para confinar o fluxo. Esses núcleos podem ser confeccionados a partir de diversos materiais [SOUZA et al., 2010]:

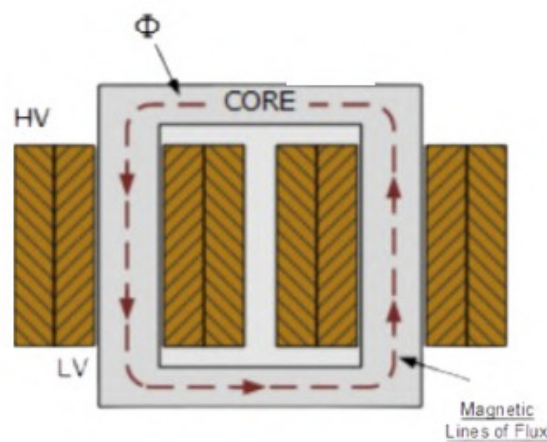
- Aço Amorfo: Feito com fitas metálicas finas, reduzindo correntes parasitas. Ideal para operação em altas temperaturas, sendo comumente empregado em transformadores de alta eficiência em médias frequências.
- Núcleo de Ferro Sólido: Oferece fluxo magnético, retendo campos magnéticos elevados sem saturação de ferro. No entanto, não é indicado para aplicações de corrente alternada devido às grandes correntes parasitas e produção de calor em altas frequências.
- Metais Amorfos: Reconhecidos por sua natureza vítrica ou não cristalina, são utilizados em transformadores de alto desempenho, graças à sua baixa condutividade, que reduz as correntes parasitas.
- Cerâmica Ferrita: Composta de óxido de ferro e outros elementos metálicos, é empregada em aplicações de alta frequência devido à sua eficiência como isolante e à capacidade de reduzir correntes parasitas.

- Núcleos Magnéticos Laminados: Fabricados a partir de chapas de ferro revestidas por uma camada isolante, impedindo a ocorrência de correntes parasitas.
- Núcleos de Ferro Carbonilado: Feitos de ferro carbonilado em pó, garantem estabilidade em diferentes níveis de fluxo magnético e temperatura, reduzindo as correntes parasitas em altas temperaturas.
- Aço Silício: Com alta resistividade elétrica, proporciona desempenho estável ao longo do tempo e alta densidade de fluxo de saturação, sendo comumente posicionado em último lugar.

Os transformadores são classificados de acordo com o formato do caminho magnético criado em dois tipos principais de núcleos: núcleo envolvente e núcleo envolvido. Nos transformadores com núcleo envolvido, as bobinas são envolvidas em torno do núcleo. Por outro lado, nos transformadores com núcleo envolvente, é o núcleo que envolve as bobinas [SALUSTIANO, 2012].

As Figuras 4 e 5 representam os dois tipos de transformadores.

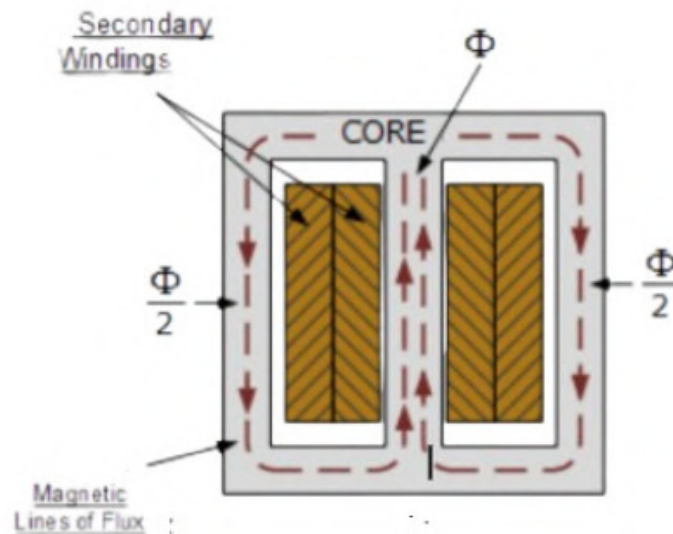
Figura 4 – Transformador trifásico tipo núcleo envolvido.



Fonte: MBT Transformer.



Figura 5 – Transformador trifásico tipo núcleo envolvente.

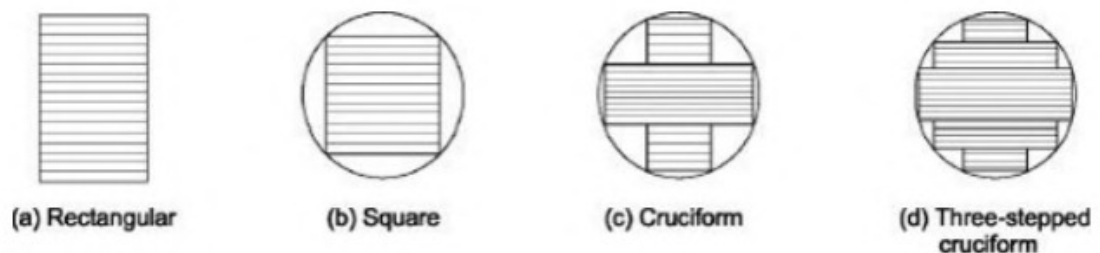


Fonte: MBT Transformer.

Na situação particular do núcleo envolvente, visível na Figura 5, é evidente que as colunas exteriores são mais estreitas do que a coluna central do núcleo. Isso ocorre porque o fluxo que atravessa a coluna central se divide em duas partes iguais ao atingir a culatra. A culatra, também chamada de tampa do transformador, é uma parte crucial do transformador, pois proporciona a interface necessária para a entrada e saída de corrente elétrica de maneira segura e eficiente, garantindo a integridade do isolamento e a operação confiável do transformador. Como resultado dessa divisão do fluxo, as seções restantes do núcleo envolvente são duas vezes menores do que a seção da coluna central, uma vez que recebem apenas metade do fluxo gerado na coluna central. Em contraste, no projeto do núcleo envolvido, todas as partes do núcleo possuem uma seção uniforme, sem essa diferença de tamanho.

A seção no núcleo pode ser subdividida em várias partes, e a forma desta seção tem diversas influências no desempenho e características do transformador.

Figura 6 – Forma para seção do núcleo.



Fonte: Quora.

A forma da seção do núcleo do transformador influencia na:

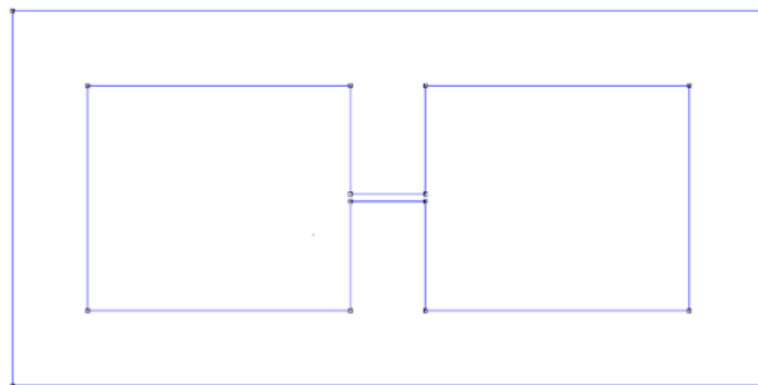
- Distribuição do fluxo magnético: Afeta como o fluxo magnético é distribuído dentro do núcleo, o que pode impactar a eficiência do transformador.
- Pode influenciar a capacidade do transformador de dissipar o calor gerado durante a operação, afetando sua eficiência e segurança.
- A geometria da seção do núcleo pode afetar a resistência mecânica do transformador, influenciando sua durabilidade e confiabilidade.

Pode-se afirmar que a forma que o núcleo é construído em chapas ou lâminas tem o objetivo de minimizar o efeito Foucault, o qual é caracterizado pela a apresentação de correntes parasitas circulantes que causam as perdas e aquecimentos localizados. Essas chapas que compõem o núcleo são denominadas chapas de grãos orientados, devido às suas propriedades magnéticas superiores quando os grãos estão alinhados em uma direção específica. Para evitar um entreferro contínuo nas junções dessas chapas, é desenvolvido um deslizamento cíclico, alternando o sentido desse deslizamento[SOUZA et al., 2010].

Para entendermos melhor as dimensões fundamentais da parte ativa de um transformador, é essencial compreender o que essa parte representa. A parte ativa de um transformador é o conjunto composto pelos enrolamentos primário e secundário, juntamente com o núcleo magnético. Essa parte desempenha o papel central na conversão da energia elétrica de um nível de tensão para outro.

O núcleo magnético é responsável por transferir o fluxo magnético entre os enrolamentos, facilitando a transformação eficiente da energia. Assim, a parte ativa é onde ocorre o processo de conversão de energia elétrica, tornando-a essencial para o funcionamento do transformador. Ao utilizar o desenho do núcleo apresentado na Figura 7 como referência e seguir as etapas delineadas neste trabalho, os estudantes têm a oportunidade de construir e visualizar virtualmente essas dimensões, fortalecendo sua compreensão dos conceitos teóricos e práticos relacionados à engenharia elétrica.

Figura 7 – Núcleo de um transformador trifásico.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

### 2.1.4 Perdas a vazio

As perdas a vazio nos transformadores são um tipo de perda que ocorre quando o transformador está energizado, mas não está fornecendo energia a uma carga externa. Elas são influenciadas principalmente pela tensão de alimentação, que é aplicada no enrolamento de baixa tensão do transformador. Quando o transformador é energizado, uma pequena corrente, chamada corrente de magnetização ( $I_Z$ ), flui através do enrolamento primário. Essa corrente é necessária para estabelecer o fluxo magnético no núcleo do transformador, mesmo quando não há carga conectada ao secundário.

Essa corrente a vazio, junto com a tensão de alimentação, é responsável por suprir o fluxo magnético necessário no transformador, e é durante esse processo que ocorrem as perdas a vazio. Essas perdas incluem as perdas por correntes parasitas (ou de Foucault) e as perdas por histerese magnética [FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2013].

As perdas por histerese magnética são causadas pelo fenômeno da histerese nos materiais ferromagnéticos, como o núcleo do transformador. Quando o campo magnético no núcleo é alternado, os domínios magnéticos do material precisam ser realinhados, o que requer energia. Essa energia é dissipada na forma de calor, contribuindo para as perdas totais do transformador.

As perdas a vazio em transformadores são consideradas "a vazio" porque ocorrem independentemente da carga conectada ao transformador. Mesmo quando não há carga no secundário do transformador, as perdas a vazio persistem, afetando a eficiência e a confiabilidade do transformador. Portanto, é importante entender e minimizar essas perdas para garantir a eficiência e a confiabilidade do transformador em diversas aplicações.

Além disso, é recomendado que os transformadores não operem com cargas muito inferiores à sua potência nominal, pois isso pode comprometer a qualidade de energia e a eficiência energética das instalações. O funcionamento com cargas abaixo da capacidade nominal pode resultar em problemas como baixo fator de potência, aumento das perdas e degradação do desempenho do equipamento. Portanto, é fundamental dimensionar corretamente os transformadores para as aplicações específicas, garantindo assim seu funcionamento eficiente e confiável.

### 2.1.5 Perdas nos enrolamentos

As perdas nos enrolamentos dos transformadores são uma parte significativa das perdas totais no funcionamento desses equipamentos. Com a passagem de corrente nos enrolamentos de AT e BT do transformador, haverá perdas por efeito Joule, devido à resistividade do material das bobinas [KOSOW, 1985].

Essas perdas são diretamente proporcionais à resistência dos condutores e ao quadrado da corrente no enrolamento secundário. Assim, maiores resistências e correntes resultam em mais calor gerado e, conseqüentemente, maiores perdas por resistência.

### 2.1.6 Densidade de fluxo magnético

A densidade de fluxo magnético em transformadores é uma medida da quantidade de fluxo magnético que está passando através do núcleo do transformador por unidade de área transversal. Ela é denotada pelo símbolo  $B$  e é medida em Tesla (T) ou gauss (G).

O fluxo magnético é uma medida do campo magnético que permeia uma área específica. No contexto dos transformadores, o fluxo magnético é gerado pela corrente elétrica que flui através dos enrolamentos do transformador, criando um campo magnético ao redor desses enrolamentos e através do núcleo do transformador.

A densidade de fluxo magnético é importante nos transformadores porque está diretamente relacionada à eficiência e ao desempenho do dispositivo. Uma densidade de fluxo magnético adequada é necessária para garantir que a energia seja transferida eficientemente do enrolamento primário para o enrolamento secundário. Se a densidade de fluxo magnético for muito baixa, a eficiência do transformador pode ser comprometida. Por outro lado, se a densidade de fluxo magnético for muito alta, podem ocorrer perdas adicionais no núcleo do transformador devido a fenômenos como a saturação magnética.

A equação para encontrar a densidade de fluxo magnético é denotada por:

$$B = \frac{\phi}{A}. \quad (1)$$

Onde:

- $\phi$ : Fluxo magnético (Wb);
- $B$  : Densidade de fluxo magnético (T);
- $A$  : Área  $m^2$ ;

A densidade de campo nos transformadores é um aspecto crucial na relação de tensões dentro desses dispositivos. Quando a densidade de campo é alta, significa que há

uma maior concentração de fluxo magnético em uma determinada região do transformador. Isso é especialmente importante nos transformadores, onde a relação entre as tensões primária e secundária é determinada pelo fluxo magnético, como indicado nas equações (2) e (3):

$$V_p = \frac{N_p \times 2\pi \times f \times B \times A}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{N_s \times 2\pi \times f \times B \times A}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

- $V_p$ : Esta é a tensão primária do transformador, expressa em volts (V).
- $V_s$ : Esta é a tensão secundária do transformador, expressa em volts (V). Assim como na equação anterior, representa a tensão induzida no enrolamento secundário do transformador.
- $N_s$ : É o número de espiras no enrolamento secundário do transformador. Da mesma forma que no enrolamento primário, o número de espiras no enrolamento secundário afeta diretamente a tensão induzida.
- $N_p$ : É o número de espiras no enrolamento primário do transformador. O número de espiras em um enrolamento afeta diretamente a tensão induzida nesse enrolamento. Quanto mais espiras, maior será a tensão induzida.
- $f$ : Esta é a frequência da corrente alternada aplicada ao transformador, expressa em hertz (Hz). A frequência da corrente alternada afeta a taxa na qual o fluxo magnético muda no transformador.
- $B$ : É a densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador, medida em teslas (T). A densidade de fluxo magnético é uma medida da quantidade de campo magnético por unidade de área no núcleo do transformador.
- $A$ : É a área da seção transversal do núcleo do transformador, medida em metros quadrados ( $m^2$ ). A área da seção transversal é importante porque determina a quantidade de fluxo magnético que pode passar através do núcleo.

## 3 Materiais e Métodos

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Especificações do Transformador:

Na definição das especificações do transformador, no contexto do presente trabalho, serão utilizadas as informações técnicas de um transformador típico de distribuição de energia elétrica, incluindo potência nominal, tensões primária e secundária, corrente nominal, frequência de operação e outras características relevantes.

#### 3.1.2 Software de Simulação (FEMM):

O software Finite Element Method Magnetics (FEMM) será empregado para realizar as simulações e análises eletromagnéticas do transformador. Esse software oferece recursos avançados de modelagem e análise, sendo amplamente utilizado na engenharia elétrica. A análise eletromagnética realizada pelo FEMM envolve a resolução de equações de campo magnético para calcular distribuições de fluxo magnético, densidade de fluxo, campos elétricos e potenciais. Os resultados das simulações são apresentados de forma visual, facilitando a interpretação e análise por parte dos usuários.

Além disso, o FEMM é gratuito e usa pouca memória RAM, o que o torna uma opção acessível e eficiente para simulações complexas. É altamente personalizável e extensível, permitindo que os usuários desenvolvam suas próprias rotinas de simulação e implementem novos recursos conforme necessário. Essa flexibilidade torna o software adequado para uma ampla variedade de aplicações industriais, educacionais e de pesquisa.

#### 3.1.3 Requisitos e Instalação do Software (FEMM):

Para executar o software de simulação FEMM e realizar as análises eletromagnéticas necessárias, é crucial ter um computador adequado que atenda aos requisitos mínimos de sistema. A configuração mínima recomendada para garantir um desempenho satisfatório inclui um processador com capacidade razoável, idealmente um processador Intel Core i5 ou equivalente, pelo menos 4 GB de memória RAM, um sistema operacional compatível como Windows 7, 8 ou 10 (32 ou 64 bits), espaço livre em disco suficiente para instalar o software e armazenar os arquivos de simulação, e uma placa de vídeo que suporte as funcionalidades gráficas necessárias para visualizar os resultados das simulações de forma adequada.

A instalação do software FEMM pode ser realizada seguindo os seguintes passos: Realize uma pesquisa eletrônica e procure por "Finite Element Method Magnetics: Home-Page". Acesse o site oficial do software em <http://www.femm.info/wiki/Download>. Clique na aba referente ao executável de 64 bits para baixar o arquivo.

Após o download, execute o arquivo clicando duas vezes sobre ele. Aceite os termos de contrato apresentados durante o processo de instalação. Clique em "Next" três vezes seguidas para avançar nas etapas de instalação. Finalmente, selecione a opção "Install" para concluir o processo de instalação. Seguindo esses passos e garantindo que seu computador atenda aos requisitos mínimos de sistema, você estará pronto para utilizar o software FEMM para realizar suas análises eletromagnéticas com eficiência.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Método dos Elementos Finitos MEF:

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver problemas de engenharia e física em diversas áreas, como análise estrutural, térmica, fluidodinâmica, eletromagnética, entre outras. Ele é empregado para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento de sistemas físicos complexos [AZEVEDO, 2003].

O princípio básico do MEF envolve a divisão do domínio do problema em uma malha discreta de elementos finitos interconectados. Cada elemento é uma representação local da geometria real do problema e é definido por um conjunto de nós (ou pontos), onde as soluções são calculadas. Esse processo transforma as equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas, facilitando sua resolução numérica [LOTTI et al., 2006].

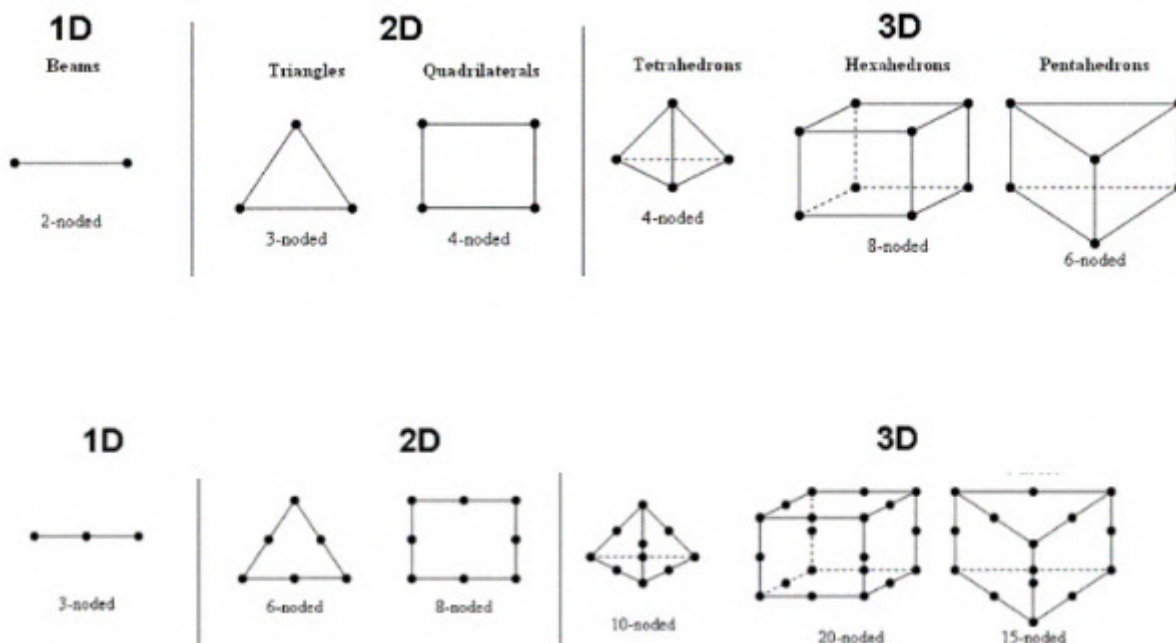
As etapas do Método dos Elementos Finitos compreendem: a discretização do domínio do problema, a formulação do modelo matemático com equações diferenciais parciais que representam o comportamento do sistema físico, a aplicação das condições de contorno que indicam as restrições físicas impostas, a discretização das equações usando métodos de interpolação polinomial, como ilustrado na Figura 8, a montagem da matriz de rigidez e do vetor de forças, a resolução numérica do sistema de equações e, finalmente, o pós-processamento dos resultados para análise e tomada de decisões [ALVES, 2014].

O MEF encontra aplicação em uma ampla variedade de campos da engenharia e física, incluindo análise estrutural, simulação de processos de fabricação, análise térmica, simulação de fluxos de fluidos, modelagem eletromagnética, entre outros.

O FEMM (Finite Element Method Magnetics) é um exemplo de software que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). Desenvolvido para resolver problemas em

eletromagnetismo e engenharia elétrica, o FEMM é especialmente projetado para analisar sistemas magnéticos, como motores, transformadores, dispositivos de geração de energia eletromagnética, entre outros.

Figura 8 – Tipos de Elementos.



## SECOND ORDER ELEMENTS

Fonte: Autorial Própria.

A escolha entre elementos de primeira ordem (lineares) e elementos de segunda ordem (quadráticos) no Método dos Elementos Finitos (MEF) não é uma decisão simples e direta. Em vez disso, depende das características específicas do problema em questão [LOTTI et al., 2006].

Para problemas que envolvem contato entre componentes, como em simulações de montagens mecânicas, os elementos de primeira ordem tendem a apresentar um desempenho melhor do que os elementos de segunda ordem. Isso ocorre porque os elementos de primeira ordem são menos suscetíveis a oscilações espúrias e instabilidades numéricas que podem ocorrer em regiões de contato, onde as deformações e as tensões variam rapidamente. Assim, mesmo que os elementos de segunda ordem possam oferecer uma melhor representação da geometria, eles podem não ser adequados para resolver problemas de contato devido a essas oscilações [ALVES, 2014].

Por outro lado, em problemas que envolvem flexão ou incompressibilidade, os elementos de segunda ordem geralmente apresentam um desempenho superior. Isso ocorre porque os elementos de segunda ordem podem capturar melhor a variação de curvatura e a distribuição de tensões em regiões de flexão, proporcionando resultados mais precisos.



Além disso, eles podem ser mais eficazes na redução do fenômeno conhecido como "efeito de espessura finita" em modelos que representam materiais incompressíveis [SALUSTIANO, 2012].

No âmbito da simulação de transformadores, o Método dos Elementos Finitos (MEF) se destaca como uma ferramenta de inestimável valor para a análise do comportamento eletromagnético desses dispositivos. Ele proporciona aos engenheiros uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos envolvidos, além de permitir a otimização do design.

O software FEMM (Finite Element Method Magnetics) emerge como uma poderosa ferramenta que opera sob o MEF, focalizando especificamente em problemas eletromagnéticos. Com ele, é possível realizar modelagens detalhadas de componentes magnéticos, como núcleos de transformadores e bobinas, oferecendo recursos avançados para a análise de campos magnéticos, distribuição de corrente e perdas.

Ao integrar o MEF com o software FEMM, os engenheiros podem desenvolver modelos computacionais precisos de transformadores, levando em consideração todas as complexidades geométricas e físicas pertinentes. Isso engloba desde a inclusão de materiais magnéticos não lineares até a análise de distribuição não uniforme de corrente, efeitos de histerese e correntes parasitas, entre outros aspectos relevantes.

A principal vantagem dessa abordagem reside na capacidade de realizar simulações detalhadas e precisas do comportamento eletromagnético dos transformadores. Tais simulações fornecem insights valiosos sobre o desempenho do dispositivo sob diversas condições operacionais, permitindo aos engenheiros otimizar o design para atender aos requisitos específicos da aplicação, como eficiência energética, regulação de tensão e minimização de perdas.

Além disso, o uso do software FEMM simplifica consideravelmente o processo de modelagem e análise, oferecendo uma interface intuitiva e robustas ferramentas de visualização de resultados. Isso torna a simulação de transformadores mais acessível e eficiente, possibilitando aos engenheiros testar rapidamente diferentes cenários de projeto e avaliar seu impacto no desempenho global do dispositivo.

### 3.2.2 Equações de Maxwell

Baseando-se nas pesquisas de Michael Faraday, Maxwell consolidou, em 1864, todas as equações e fenômenos relacionados à eletricidade e ao magnetismo. Seu trabalho estabeleceu uma conexão entre diversas teorias existentes na época, resultando na formulação de uma das teorias mais abrangentes e estudadas no campo do eletromagnetismo.

As equações de Maxwell são um conjunto de quatro equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento dos campos elétrico e magnético em resposta a fontes

de carga e corrente. Essas equações desempenham um papel fundamental na análise eletromagnética e são amplamente utilizadas em métodos de simulação, incluindo o Método dos Elementos Finitos (MEF).

No MEF, as equações de Maxwell são discretizadas para representar numericamente o comportamento do campo elétrico e magnético em uma região de interesse [BASTOS, 2004]. Isso envolve dividir o domínio em elementos finitos e aproximar as soluções das equações de Maxwell em cada elemento. Através de técnicas de integração numérica, as contribuições de cada elemento são combinadas para obter uma solução global para o problema.

As equações de Maxwell são utilizadas para formular as matrizes de rigidez e os vetores de carga do sistema de equações do MEF. Essas matrizes e vetores são então resolvidos numericamente para obter a distribuição dos campos elétrico e magnético dentro do domínio de análise.

As equações de Maxwell que utilizamos são a Lei de Ampère, equação (4), e a Lei de Gauss Magnética, equação (5):

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

A primeira lei de Maxwell, também conhecida como lei de Gauss para o campo elétrico, é uma das quatro equações fundamentais que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos. Ela estabelece que o fluxo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional à carga elétrica contida dentro dessa superfície.

Essencialmente, a lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é diretamente proporcional à carga elétrica contida dentro dessa superfície. Isso implica que o campo elétrico diverge ou converge em relação às cargas elétricas presentes na região em questão.

Esta lei é de extrema importância na análise e compreensão de distribuições de carga, campos elétricos e suas interações com materiais dielétricos. Ela fornece uma base fundamental para entender fenômenos eletrostáticos e é frequentemente aplicada em diversas áreas da física e engenharia, incluindo eletrodinâmica, óptica e eletrônica.

A lei de Gauss é frequentemente equiparada à lei de Coulomb, que descreve a força eletrostática entre duas cargas pontuais. Isso ocorre porque, em situações estáticas, a lei de Gauss para o campo elétrico pode ser derivada a partir da lei de Coulomb. Em outras palavras, a lei de Gauss oferece uma maneira alternativa e mais abrangente de entender a distribuição de cargas e os campos elétricos resultantes, fornecendo uma perspectiva mais geral e poderosa sobre os fenômenos eletrostáticos.

A lei de Ampère, a segunda das quatro equações de Maxwell, descreve a relação entre um campo magnético estático e as correntes elétricas que o geram. Foi formulada pelo físico francês André-Marie Ampère e é essencial para entender o comportamento dos campos magnéticos em situações estáticas.

A lei de Ampère pode ser expressa matematicamente de diferentes maneiras, dependendo do contexto e das condições específicas do problema.

Maxwell previu a segunda forma de gerar um campo magnético com base na simetria natural: "Se um campo magnético em mudança produz uma corrente elétrica e, conseqüentemente, um campo elétrico, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético".

Em essência, isso implica que a variação temporal de um campo magnético induz um campo elétrico, e a variação temporal de um campo elétrico induz um campo magnético. Esse princípio é exemplificado pelo fenômeno da indução eletromagnética, onde a alteração de um campo magnético induz um campo elétrico e vice-versa. É esse fundamento que possibilita o funcionamento de transformadores, motores elétricos, geradores e diversos outros dispositivos eletromagnéticos cruciais em várias aplicações da engenharia elétrica e da física.

### 3.2.3 Análise de Transformadores utilizando o Método dos Elementos Finitos.

A análise eletromagnética de transformadores é crucial para entender seu comportamento sob diferentes condições operacionais. Devido à complexidade das equações diferenciais que descrevem os campos magnéticos e elétricos dos transformadores, a obtenção de soluções analíticas é difícil. Por isso, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é empregado na modelagem desses dispositivos para análise eletromagnética[BASTOS, 1992].

O software FEMM (Finite Element Method Magnetics) é comumente utilizado para realizar simulações eletromagnéticas de transformadores. Nesse processo, as geometrias do transformador, as propriedades dos materiais e as condições de contorno são definidas para o projeto específico. O FEMM permite a análise detalhada do comportamento eletromagnético do transformador e oferece a capacidade de exportar os resultados para outros softwares, como o Autocad.

A integração com o Autocad é valiosa, pois facilita a adição de cotas e outras informações relevantes ao projeto. Isso simplifica o processo de documentação e permite uma comunicação eficiente entre os profissionais envolvidos no projeto do transformador.

O método dos elementos finitos, quando aplicado através do FEMM, é geralmente dividido em quatro etapas principais: pré-processamento, processamento 1, processamento 2 e pós-processamento. Durante o pré-processamento, são definidos o modelo geométrico do transformador, as propriedades dos materiais e as condições de contorno.

Na etapa de processamento 1, as equações do problema são formuladas e discretizadas em elementos finitos. O processamento 2 envolve a resolução numérica destas equações, utilizando técnicas específicas do método dos elementos finitos. Por fim, no pós-processamento, os resultados são analisados e interpretados, muitas vezes com a visualização gráfica dos campos magnéticos e elétricos e outras informações relevantes para o projeto do transformador.

O estudo do comportamento eletromagnético de transformadores é uma tarefa complexa que envolve uma série de etapas cuidadosamente planejadas e executadas. Desde a formulação das equações até a análise dos resultados finais, cada fase desempenha um papel crucial na compreensão e otimização desses dispositivos fundamentais.

As etapas de processamento, que incluem a formulação das equações, sua discretização e a resolução numérica, são especialmente significativas. Elas representam o cerne do método dos elementos finitos, fornecendo as bases matemáticas e computacionais para a análise detalhada do comportamento eletromagnético. No entanto, para uma compreensão completa e aprofundada dessas etapas, é essencial explorar cada uma delas em maior detalhe. Nas próximas seções, vamos nos aprofundar em cada fase do processo, desde a formulação das equações até o pós-processamento dos resultados, destacando suas contri-

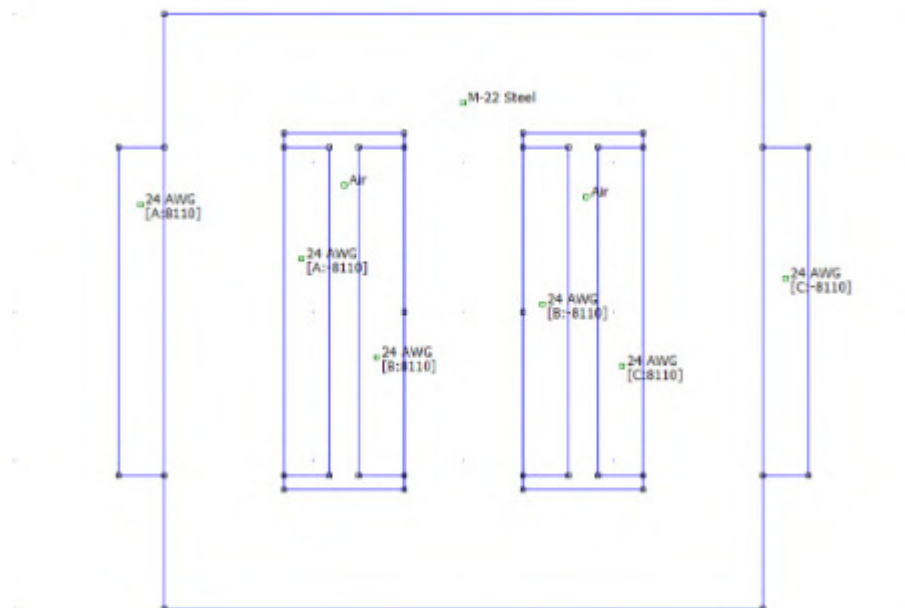
buições específicas para o projeto e otimização de transformadores.

### 3.2.3.1 Pré-processamento

Durante o estágio de pré-processamento, ocorre a elaboração da geometria da parte ativa do transformador, que abrange o núcleo, as bobinas e as isolações no núcleo. Nesta fase, são também determinadas as propriedades dos materiais que constituem a parte ativa, como os condutores das bobinas, o ar e os materiais utilizados no núcleo. Além disso, são definidos parâmetros importantes, como o número de espiras nos enrolamentos de alta e baixa tensão, o valor da corrente de fase e o sentido da corrente que flui através das bobinas. As condições de contorno são estabelecidas para descrever o comportamento do campo magnético, incluindo o fluxo magnético e sua direção nas culatras e colunas do transformador.

A Figura 9 ilustra a geometria da parte ativa do transformador, preparada para análise eletromagnética por meio do método dos elementos finitos utilizando o software FEMM.

Figura 9 – configuração geométrica das componentes ativas de um transformador.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

Detalhando os materiais temos:

- M-22 Steel: Material que constitui o núcleo do transformador
- 24 AWG: Material das bobinas de alta e baixa tensão
- Air: Tipo de isolamento (o ar atua como um dielétrico, separando os condutores e evitando o contato direto entre eles.)

O núcleo do transformador é tridimensional, entretanto, o programa FEMM executa a simulação eletromagnética em duas dimensões. A profundidade da simulação com o FEMM, nesse caso, é determinada pela equação 6.

$$D_{ph} = \frac{Atc}{Lc}. \quad (6)$$

- $Atc$  é a área da coluna [mm<sup>2</sup>];
- $D_{ph}$  é a a profundidade da simulação do FEMM;
- $Lc$  é a maior largura da coluna do núcleo [mm].

### 3.2.3.2 Processamento 1

Na etapa de processamento 1 do Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise eletromagnética de transformadores, as equações que descrevem o comportamento físico do sistema são formuladas e discretizadas em elementos finitos. Essa etapa é fundamental para estabelecer o sistema de equações que será resolvido numericamente.

A formulação das equações envolve a descrição matemática do comportamento eletromagnético do transformador, incluindo as equações de Maxwell, que descrevem o comportamento do campo elétrico e magnético, e as equações de circuito elétrico que modelam as interações elétricas entre as bobinas do transformador.

Após a formulação das equações, elas são discretizadas em elementos finitos, subdividindo o domínio do problema em pequenos elementos geométricos e aproximando as soluções dentro de cada elemento usando funções de interpolação.

Essa subdivisão resulta na formação de uma malha eletromagnética, que é a parte crucial do nosso trabalho. O software FEMM realiza a análise detalhada de cada ponto da geometria do transformador nessa etapa.

As condições de contorno estabelecidas na etapa de pré-processamento são então aplicadas às equações discretizadas, especificando as condições elétricas e magnéticas nos nós e elementos da malha, como correntes nas bobinas, tensões nos terminais e condições de simetria ou isolamento em partes específicas do domínio.

Com as equações discretizadas e as condições de contorno aplicadas, é possível formular o sistema de equações que governam o comportamento eletromagnético do transformador. Este sistema consiste em equações algébricas e/ou diferenciais discretizadas para cada nó ou elemento da malha.

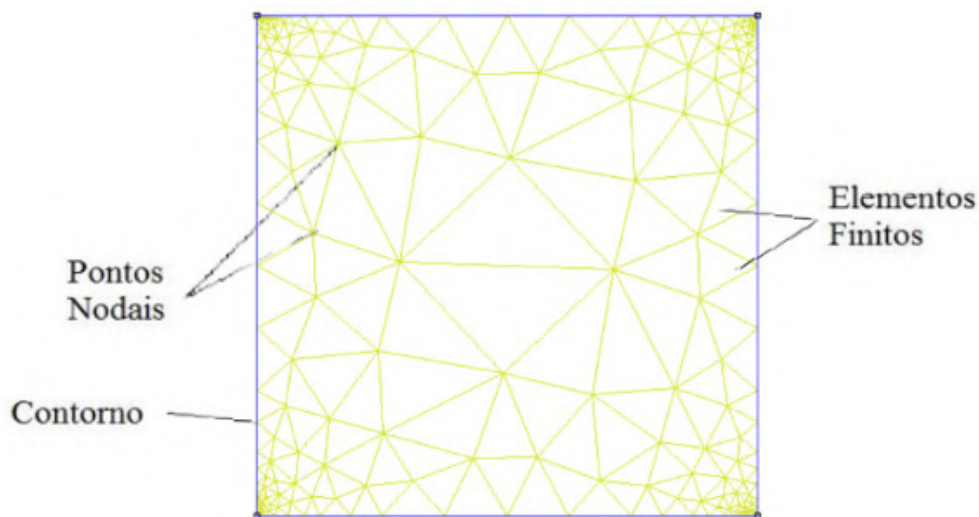
Ao final, utilizando o sistema de equações delineado, construímos a matriz de rigidez que abrange as propriedades do material e da geometria, moldando o comportamento elétrico e magnético. Também criamos o vetor de carga, refletindo as fontes de corrente

elétrica, as forças magnéticas e outras influências externas que impactam o sistema, representando assim a contribuição de cada elemento para o sistema como um todo. Esse processo envolve a síntese das contribuições individuais de cada elemento no âmbito do transformador.

Essa etapa é crucial para preparar o sistema de equações que será resolvido numericamente na etapa seguinte. É aqui que as equações que governam o comportamento físico do transformador são traduzidas em uma forma discretizada e pronta para a resolução numérica pelo Método dos Elementos Finitos.

Podemos ver a reunião de elementos finitos e pontos nodais conectados por linhas na figura 10.

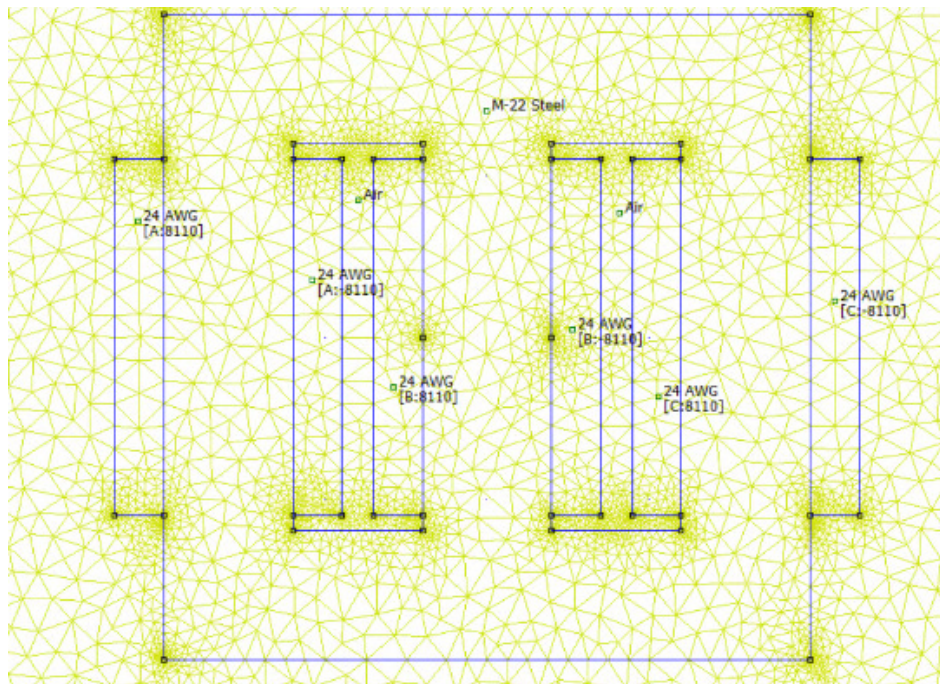
Figura 10 – Geometria quadrada no software FEMM.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

A Figura 11 exibe a grade de elementos finitos desenvolvida do modelo do transformador simulado da figura 10.

Figura 11 – MEF Aplicado no transformador.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

### 3.2.3.3 Processamento 2

Na etapa de processamento 2, ocorrem os cálculos para resolver o sistema de equações que descreve o comportamento eletromagnético do transformador. Para isso, a geometria da parte ativa do transformador é subdividida em elementos menores, geralmente em forma triangular, para formar uma malha. Esses elementos são então resolvidos usando aproximações por interpolação linear, o que significa que as soluções são estimadas ao longo da malha de acordo com os valores conhecidos em seus pontos nodais.

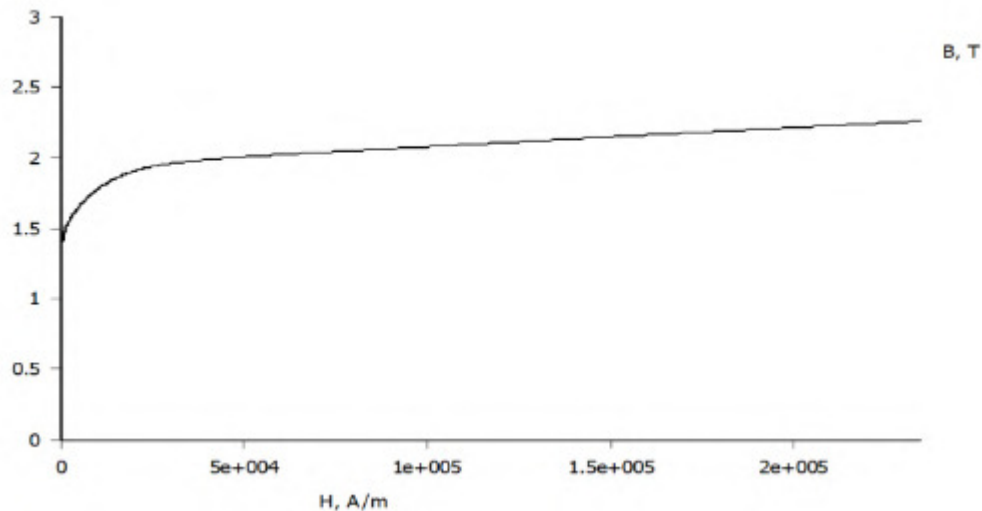
As curvas BH dos materiais do núcleo são fundamentais para compreender seu comportamento magnético em diferentes níveis de magnetização. Para lidar com esses dados, o software FEMM utiliza interpolações com spline cúbicas. Essas spline cúbicas são funções matemáticas que suavemente passam por um conjunto de pontos de dados, oferecendo uma representação mais precisa das características magnéticas do material do núcleo. O FEMM calcula e imprime essas curvas BH, permitindo que os usuários visualizem e compreendam melhor como o material do núcleo se comporta em resposta a diferentes condições magnéticas. Essa capacidade é essencial para a análise e simulação eficazes de sistemas eletromagnéticos.

Esses métodos são fundamentais para obter resultados precisos na análise eletromagnética do transformador, permitindo compreender detalhadamente como os campos elétricos e magnéticos se distribuem e se comportam dentro do dispositivo em diversas situações de funcionamento.



A Figura 12 apresenta a curva BH obtida no software FEMM para o material de aço M-22 utilizado no núcleo do transformador. A curva BH é fundamental porque fornece informações detalhadas sobre a relação entre o campo magnético aplicado (H) e a densidade de fluxo magnético (B) no material. Esta relação é crucial para entender o comportamento magnético do núcleo do transformador.

Figura 12 – Curva BH do Material M-22 Steel.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

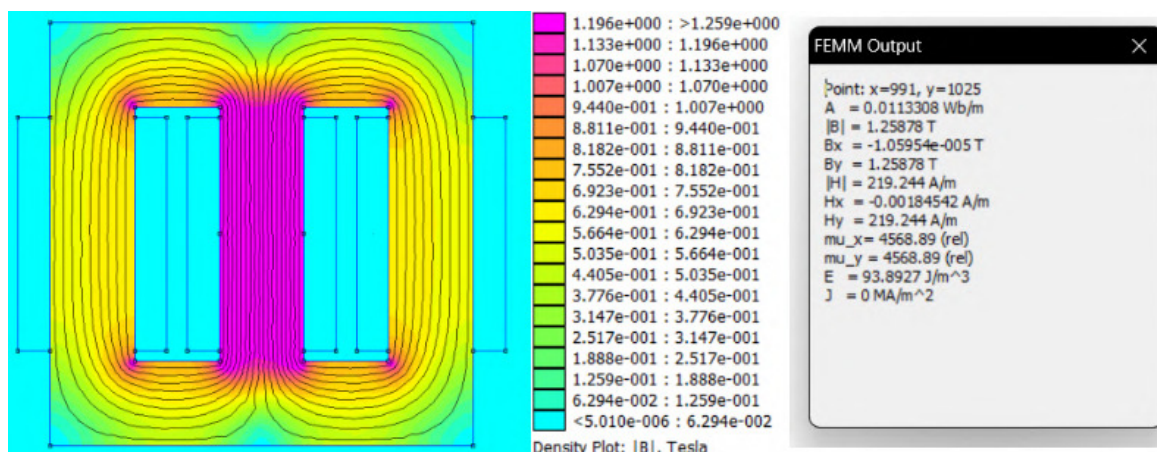
#### 3.2.3.4 Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento, os resultados obtidos na simulação são analisados e interpretados. Isso inclui a visualização dos campos elétricos e magnéticos dentro do transformador, geralmente através de gráficos ou mapas de cores, para entender melhor sua distribuição e comportamento.

Além disso, são realizadas análises quantitativas para extrair parâmetros importantes, como perdas de energia e densidades de fluxo magnético. Os resultados também são comparados com dados experimentais ou modelos teóricos conhecidos para verificar sua precisão e identificar possíveis discrepâncias. Com base na análise dos resultados, são identificadas áreas de otimização no projeto do transformador, visando melhorar seu desempenho e reduzir perdas.

A figura 13 mostra o resultado da simulação do transformador apresentado na figura 9, mostrando assim a densidade do fluxo do transformador com os valores da densidade de fluxo magnético, as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos.

Figura 13 – Densidade do Fluxo Magnético do Transformador.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

A variação na intensidade da densidade de fluxo magnético, conforme representada na Figura 13, está diretamente relacionada às propriedades magnéticas dos materiais presentes no transformador, bem como à sua geometria.

No centro do núcleo do transformador, onde o caminho magnético é mais curto e mais concentrado, a densidade de fluxo magnético tende a ser mais intensa. Isso ocorre porque a maioria das linhas de campo magnético está concentrada nessa região, resultando em uma cor mais intensa na representação visual. Essa concentração é facilitada pela alta permeabilidade magnética dos materiais utilizados no núcleo, que permitem uma maior densidade de fluxo.

Por outro lado, nas partes externas do núcleo, onde o caminho magnético se estende por uma distância maior, a densidade de fluxo magnético tende a ser menor. Isso acontece porque o fluxo magnético se dispersa em uma área maior, resultando em uma menor concentração de linhas de campo magnético e, conseqüentemente, em uma cor mais clara na representação visual.

Essa variação na intensidade da densidade de fluxo magnético ao longo do transformador é essencial para compreender como o campo magnético se distribui e se comporta dentro do dispositivo, o que é crucial para garantir seu funcionamento adequado e eficiente.

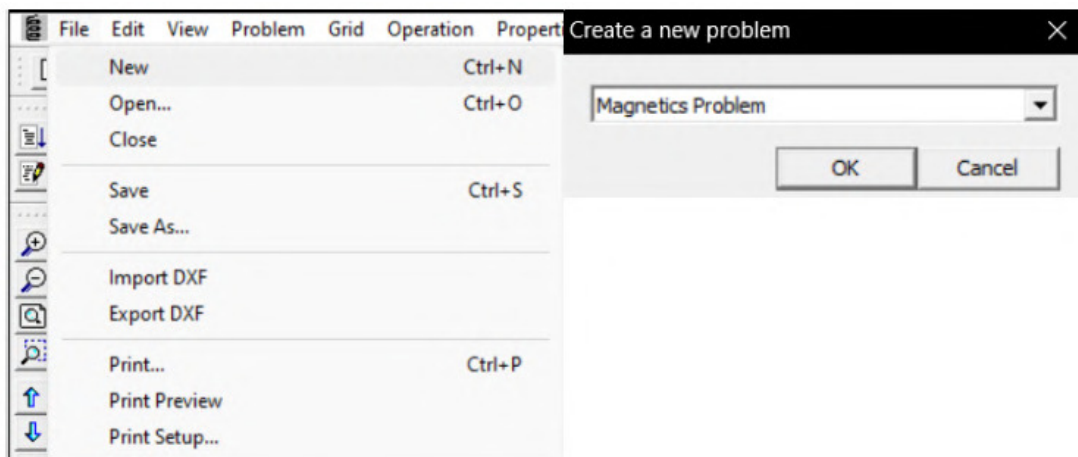
## 4 Desenvolvimento e Implementação Do Projeto

Nesta seção do trabalho, serão detalhados as quatro etapas distintas: pré-processamento, processamento 1, processamento 2 e pós-processamento. Cada uma dessas etapas será minuciosamente explicada por meio de figuras e textos elucidativos. Além disso, será apresentado um tutorial abrangente sobre como executar cada comando no software FEMM e obter os resultados desejados.

### 4.1 Procedimento detalhado do Pré-processamento

Para iniciar a simulação de um projeto no programa FEMM, é essencial abrir a aplicação e, em seguida, acessar a barra de ferramentas, onde estará localizado o menu "File". Ao clicar nele, será exibida a alternativa "new", que abrirá uma janela intitulada "Create a new problem". Como estamos lidando com um transformador, é necessário que o usuário escolha a opção "magnetics problem" para começar a elaborar a geometria da parte ativa do transformador. Podemos ver na figura 14 este processo detalhadamente.

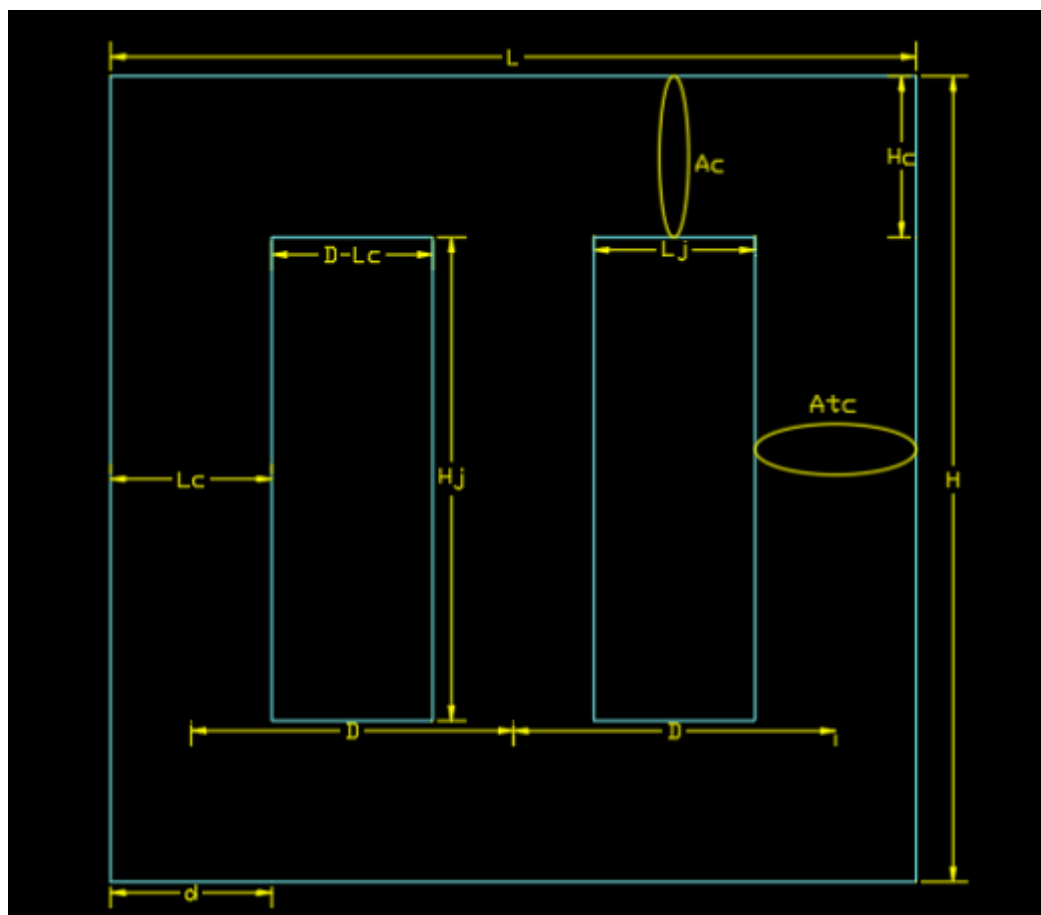
Figura 14 – Ferramentas de inicialização do Software FEMM.



Fonte: Interface do Software FEMM.

O próximo passo é a construção do transformador para isso é necessário ter dimensões do transformador como evidenciado na figura 15

Figura 15 – Dimensões do Transformador .



Fonte: Projetado no Software Autocad.

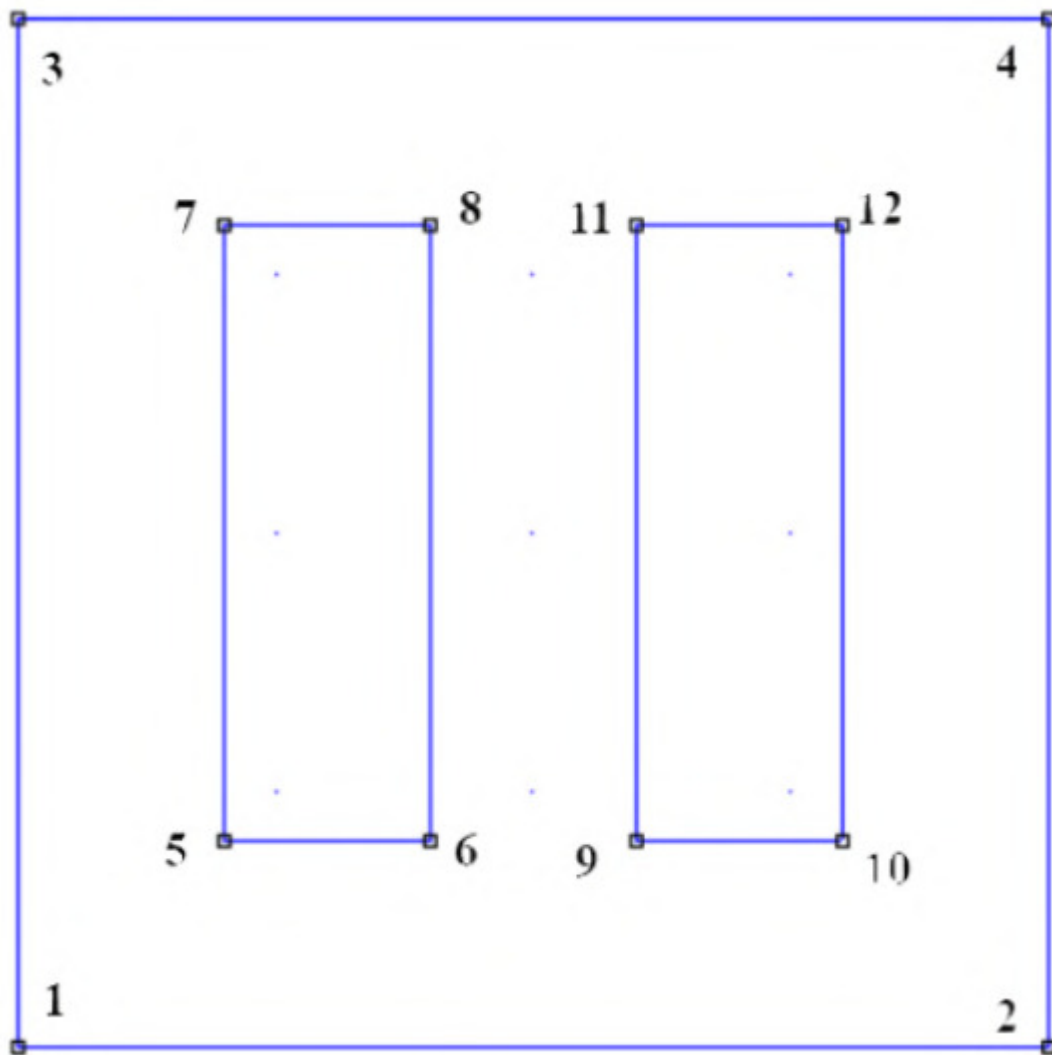
Para as áreas destacadas temos:

- $L$  é a largura total do núcleo envolvido [mm] ;
- $L_c$  é a maior largura da coluna do núcleo [mm] ;
- $L_j$  é a largura da janela [mm] ;
- $H$  é a altura total do núcleo [mm];
- $H_c$  é a altura da culatra [mm] ;
- $H_j$  é a altura da janela [mm] ;

- $A_{tc}$  é a área da coluna [mm<sup>2</sup>];
- $A_c$  é a área da culatra [mm<sup>2</sup>];
- $d$  é a distância entre o enrolamento  $bt$  e o núcleo [mm];
- $D$  é a medida entre os pontos centrais das duas colunas do núcleo [mm];

Para obter uma compreensão mais clara de como montar o transformador no software FEMM, a figura 16 fornece uma descrição detalhada dos pontos de aplicação. Uma breve explicação sobre o processo e os cálculos envolvidos na determinação dos pontos para cada parte do núcleo é crucial para a construção completa do transformador.

Figura 16 – Coordenadas dos pontos para montar o Núcleo.



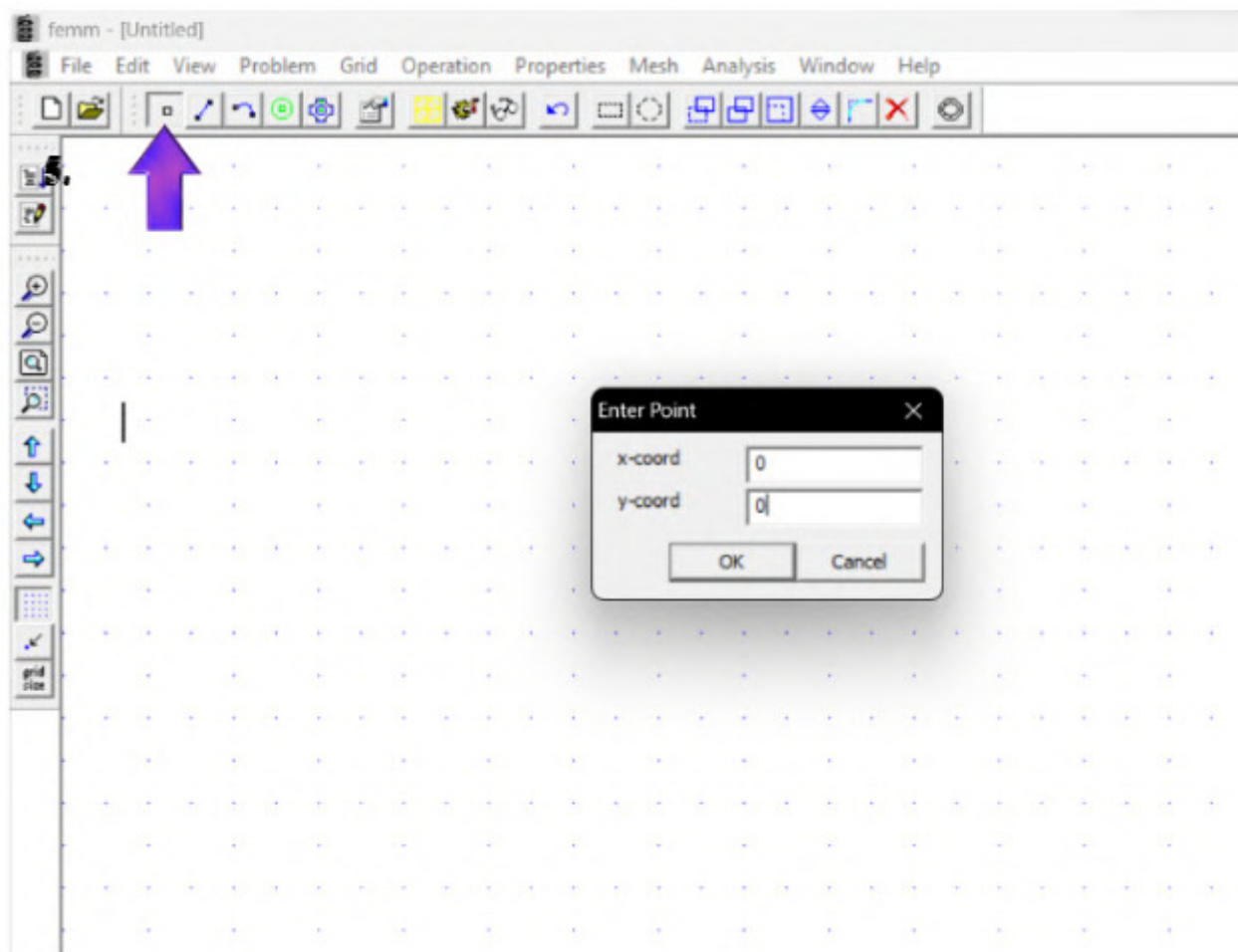
Fonte: Autoria Própria.

Para facilitar o entendimento irei informar como colocar as coordenadas de cada ponto, logo:

- 1: é a Coordenada de  $(0,0)$  ;
- 2: é a coordenada de  $(0+L,0)$ ;
- 3: é a coordenada de  $(0+L, 0+H)$ ;
- 4: é a coordenada de  $(0, 0+H)$ ;
- 5: é a coordenada de  $(0+Lc, 0+Hy)$ ;
- 6: é a coordenada de  $(Lc+Lj, 0+Hy)$ ;
- 7: é a coordenada de  $(0+Lc, hc+hj)$ ;
- 8: é a coordenada de  $(Lc+Lj, hc+hj)$ ;
- 9: é a coordenada de  $(2Lc+Lj, 0+hc)$ ;
- 10: é a coordenada de  $(L-Lc, hc)$ ;
- 11: é a coordenada de  $(2Lc+Lj, hc+hj)$ ;
- 12: é a coordenada de  $(L-Lc, hc+hj)$ ;

Para determinar a altura e largura total do núcleo, existem duas abordagens possíveis. Podemos estimar um valor aproximado para a montagem do transformador ou utilizar valores comerciais padrão. Suponhamos que a altura seja de  $H = 76$  [mm] e a largura seja de  $W = 142$  [mm]. Agora. Basta abrir o programa e ativar a função "operate on nodes". Após ativar essa função, pressione a tecla "TAB" no teclado para abrir a janela "Enter Point". Nessa janela, é possível inserir as coordenadas do primeiro ponto, que são  $x\text{-coord} = 0$  e  $y\text{-coord} = 0$ , criando assim a referência do plano x-y.

Figura 17 – Ilustração da inclusão da coordenada.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

Pressionando a tecla "TAB" novamente, você pode iniciar o comando de "inserir nó". Coloque o valor da largura, que é de  $W = 142$  [mm], na coordenada x e o valor 0 na coordenada y. Dessa forma, o próximo ponto se deslocará com o valor desejado na largura.

Para criar os pontos da parte externa superior do núcleo, o processo é semelhante. Pressione a tecla "TAB" para inserir as coordenadas do ponto 3. Para obter a altura total correta do núcleo, que neste caso é  $H = 72$  [mm] Coloque esse valor na coordenada y e defina a coordenada x como 0.

Para inserir o último ponto, ponto 4, da parte externa do núcleo, pressione a tecla "TAB" e insira as coordenadas do último ponto. A coordenada x é igual à altura total do núcleo,  $H=72$  [mm], e a coordenada Y é igual à largura total do núcleo,  $W=142$ [mm].

Por fim, para conectar cada nó, clique na parte superior onde estão localizadas as ferramentas do programa e selecione o item "operate on segments". Com isso, vá interligando cada ponto desejado.

O programa "Femm" possui uma série de ferramentas úteis para auxiliar na criação e edição de elementos na barra superior o programa data das seguintes ferramentas: Para criar pontos-nós, para conectar os nós, Para desenhar uma circunferência que conecta dois nós, Para adicionar o tipo de material desejado no local, Na figura será apresentada cada uma delas respectivamente.

Figura 18 – Ferramentas da Barra Superior.



Fonte: Interface do Software FEMM.

O próximo passo consiste em construir as janelas localizadas na parte interna do núcleo. É importante ressaltar que ambas as janelas devem ter as mesmas dimensões em termos de largura, altura e distância entre elas, assim como em relação à parte interna do núcleo.

Determinar as dimensões das janelas é um processo um pouco mais complexo. O ponto inicial da janela no lado direito deve ter uma largura de  $L_c$ , que assumimos ser igual a 200 mm. A altura da culatra pode ser encontrada usando a seguinte equação:

$$H_c = \frac{H - H_j}{2} = \frac{72 - 43.2}{2} = 14.4 \quad (7)$$

Onde:

- $H$  é a altura do Total [mm];
- $H_c$  é a altura do jugo ou culatra [mm];
- $H_j$  é a altura da janela [mm];
- $L_c$  é a maior largura da coluna do núcleo [mm];



- $L_j$  é a largura da janela [mm].

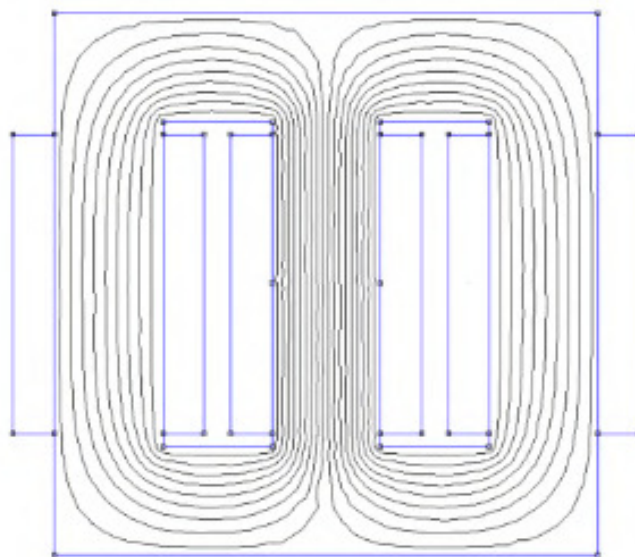
Para determinar o próximo ponto na direção horizontal, é necessário somar o valor de  $L_c$  ao valor de  $L_j$  para obter a coordenada  $x$  correspondente. Quanto à coordenada  $y$ , basta adicionar o valor de  $H_c$ . Isso resultará na inserção do último nó na parte horizontal da janela.

Para os pontos localizados na parte superior da janela, é preciso inserir o valor de  $L_c$  na coordenada do eixo  $x$ . Na coordenada do eixo  $y$ , deve-se adicionar a soma de  $H_c$  com a largura total do núcleo envolvido, o que resultará na identificação do primeiro ponto superior da janela esquerda. O próximo ponto será encontrado somando-se  $L_c$  com  $L_j$  no eixo  $x$ , e na coordenada do eixo  $y$ , a soma de  $H_c$  com a largura total do núcleo. O último passo consiste em conectar os pontos, repetindo-se esses procedimentos para criar a janela interna do lado direito.

O passo subsequente é a fabricação das bobinas de alta e baixa tensão, que estão envolvidas no núcleo, finalizando assim a geometria da parte ativa do núcleo. Uma abordagem inicial para encontrar cada ponto é analisar a localização de cada uma das bobinas.

Para fornecer uma explicação mais clara sobre a disposição da parte ativa após a construção das bobinas, é apresentada a figura 17. É importante ressaltar que as bobinas posicionadas em proximidade às colunas do núcleo são as de baixa tensão, enquanto as bobinas mais distantes correspondem às de alta tensão.

Figura 19 – Transformador Completo

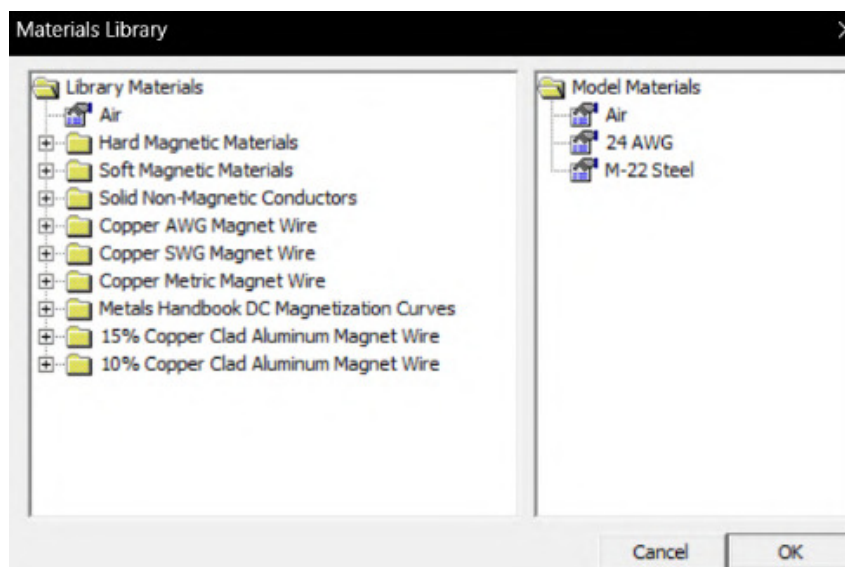


Fonte: Projetado no Software FEMM.

A fase final do pré-processamento compreende a integração dos materiais na parte ativa do núcleo, nos enrolamentos de alta e baixa tensão, bem como na parte isolante do núcleo. Para efetuar essa inclusão em cada ponto designado, é necessário acessar a barra de ferramentas e selecionar o comando "Properties", seguido por "Materials Library".

Posteriormente, é preciso pesquisar o material desejado, clicar com o botão direito do mouse e arrastá-lo para a janela correspondente à direita.

Figura 20 – Ferramenta para Selecionar Tipos de Materiais



Fonte: Interface do Software FEMM.

Após selecionar os tipos de materiais e suas respectivas características, é necessário acessar a ferramenta denominada "material node", localizada na barra de ferramentas na

parte superior do software, e aplicá-la em cada região conforme apropriado.

Ao acionar o comando do nó de material, o próximo passo é pressionar a barra de espaço do teclado para abrir a janela correspondente. Nesta etapa, o usuário deverá selecionar, para cada região (núcleo, bobinas e isolamento do núcleo), o tipo de material a ser empregado.

Há dois botões disponíveis: o botão para inserir o ponto do material e o botão para inserir o material desejado na região especificada. Na imagem 19, serão exibidos ambos, respectivamente.

Figura 21 – Ferramentas de inserir tipo de material e ponto de materiais



Fonte: Interface do Software FEMM.

Dessa forma, a conclusão da construção da parte ativa do núcleo marca um estágio crucial, preparando-se assim para avançar para a próxima fase do desenvolvimento do método dos elementos finitos, que serão os processamentos 1 e 2.

## 4.2 Procedimento detalhado dos processamentos 1 e 2

Nos processos 1 e 2, ocorrerá a subdivisão da geometria da parte ativa do transformador em subdomínios menores, denominados elementos finitos. Esses elementos finitos são tipicamente modelados na forma geométrica triangular para garantir uma abrangência mais precisa de toda a geometria original do transformador.

A união de cada ponto de todos os subdomínios resulta na formação da malha. Esta malha é de suma importância no Método dos Elementos Finitos (MEF), pois é por meio dela que se obtém uma representação aproximada de todas as áreas na forma triangular.

Assim, a malha dos elementos finitos desempenha um papel crucial no processo, pois é através dela que se realiza a análise e obtenção de resultados aproximados para a geometria complexa do transformador.

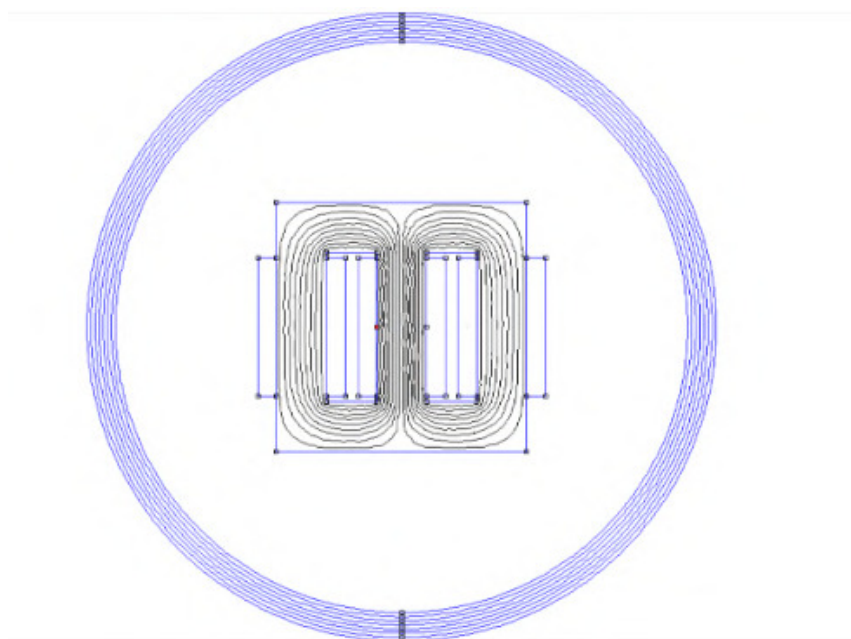
Para implementar esta fase no software é menos laborioso do que o procedimento anterior, uma vez que requer apenas a execução do comando "Run mesh generator" para obter toda a subdivisão da geometria da parte ativa do transformador. No entanto, antes de aplicar a malha ao núcleo, é necessário adicionar mais dois pontos para estabelecer uma condição de contorno, delimitando assim até onde essa malha será inserida.

A inclusão desses dois pontos é bastante simples. Basta ativar a ferramenta "Operate on nodes" e pressionar a tecla "TAB" do teclado para inserir na coordenada Y o valor de 360 e na coordenada X o valor de -360. O valor 360 é escolhido para representar uma posição específica no desenho, como centralizar um componente ou definir uma distância padrão dentro da geometria. O ponto resultante estará situado 360 unidades à esquerda do ponto de origem e no centro da geometria do núcleo. Para o segundo ponto, siga o mesmo procedimento, mas adicione a largura do núcleo ao valor de 360 unidades para garantir a mesma distância. Isso posicionará o segundo ponto à direita do eixo X, mantendo a coordenada Y igual ao do ponto anterior.

Usar o valor 360 facilita a criação de uma estrutura simétrica e centralizada, sendo um valor arredondado que simplifica cálculos e posicionamentos dentro da geometria do núcleo.

Após a inserção dos dois pontos, é necessário estabelecer a ligação entre eles utilizando o recurso "operate on arc segments", localizado na parte superior da barra de ferramentas do software. Isso permitirá conectar um ponto ao outro, formando uma circunferência ao redor do núcleo. Essa circunferência atua como limite para a aplicação da malha.

Figura 22 – Condições de contorno de Dirichlet Para o MEF

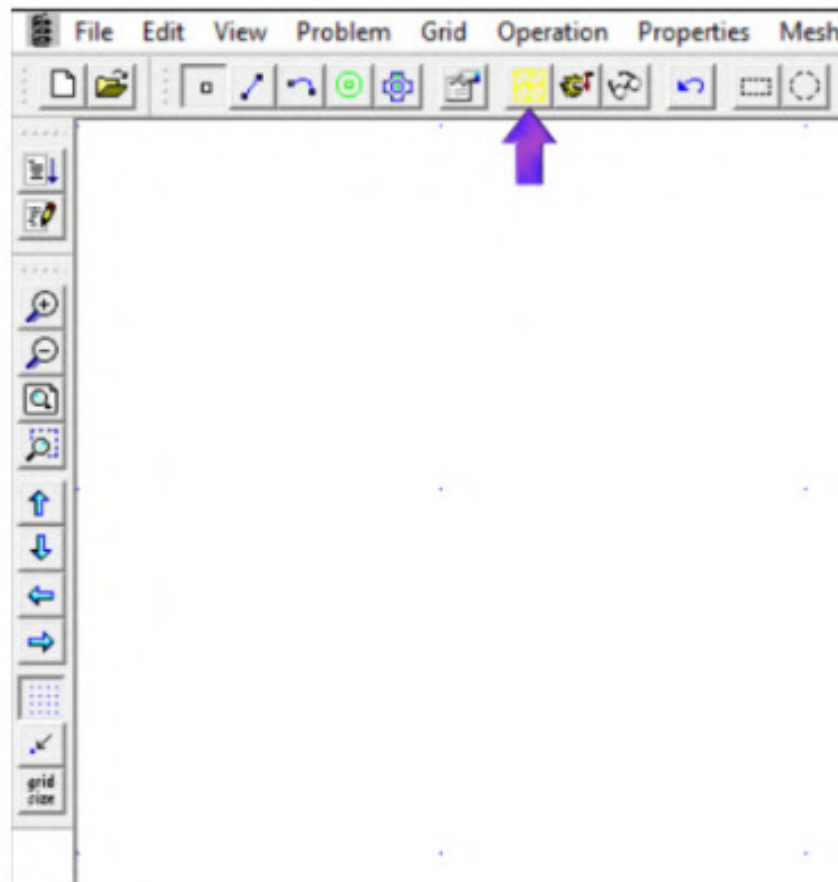


Fonte: Projetado no Software FEMM.

Após delimitar as condições de contorno, a fim de delimitar a localização da malha no elemento finito, é possível proceder com a subdivisão da geometria do núcleo de maneira eficiente. Para isso, basta acionar a opção "Run mesh generator", localizada na parte superior da barra de ferramentas do software. Ao executar esta função, a geometria será automaticamente dividida em vários subdomínios, e ao aumentar a resolução da malha, perceberá que a forma dos elementos é triangular.

Antes da aplicação da malha, uma mensagem informativa será exibida, indicando a quantidade de nós necessários para a criação da malha. Este processo visa garantir que a geometria seja discretizada adequadamente para a análise numérica, fornecendo uma representação precisa do problema em questão.

Figura 23 – Ferramenta Run mesh generator



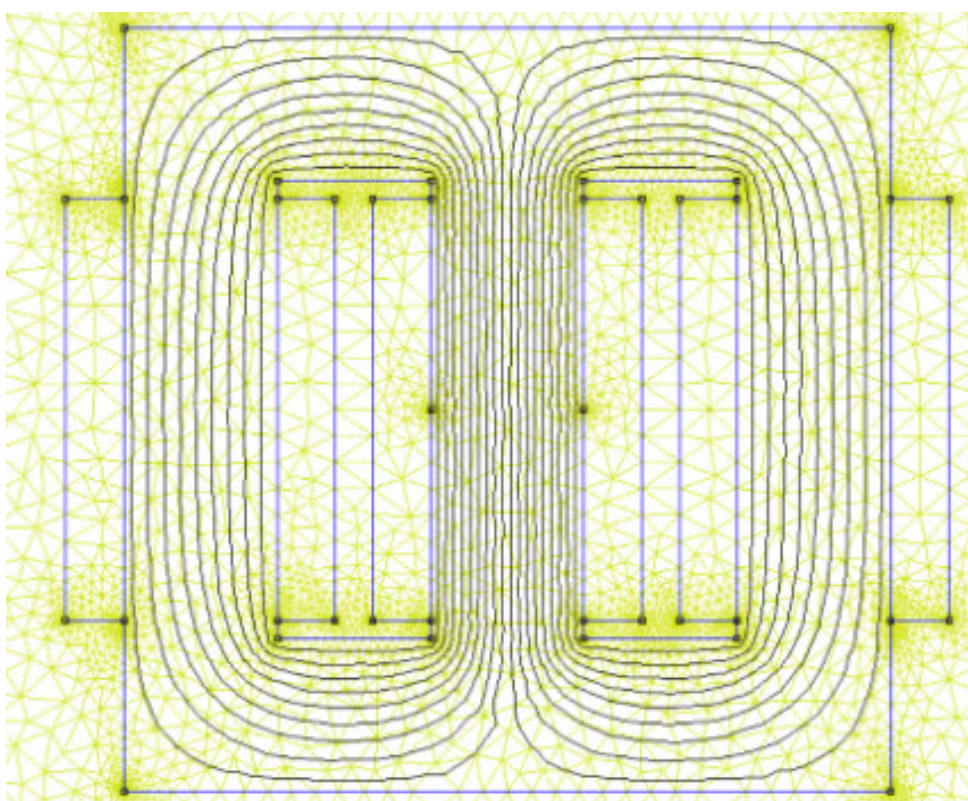
Fonte: Interface do Software FEMM.

Após clicar no botão "Run mesh generator", o software executa um algoritmo para gerar a malha na geometria definida. Esse algoritmo divide a região em subdomínios menores e cria elementos finitos triangulares ou quadrangulares, dependendo das configurações e da geometria do problema.

Durante o processo de geração da malha, o software pode realizar várias etapas, como a detecção de bordas, a suavização da malha e a otimização dos elementos para garantir uma distribuição adequada dos nós e uma boa qualidade dos elementos.

Ao finalizar a geração da malha, o software exibirá a malha resultante na interface gráfica, permitindo que o usuário a visualize e a analise. Além disso, é comum que o software forneça informações sobre o número de elementos e nós gerados, bem como métricas de qualidade da malha, como a razão de aspecto dos elementos e a ortogonalidade das arestas. Essa malha gerada pode então ser utilizada como entrada para a análise numérica por elementos finitos do problema em questão, permitindo a avaliação de propriedades físicas, como tensões, deformações, fluxos de calor, entre outros.

Figura 24 – Malha do Transformador aplicado forma geométrica



Fonte: Projetado no Software FEMM.

### 4.3 Procedimento detalhado do pós processamento

Antes de efetuar a compilação do projeto, é essencial realizar uma verificação para assegurar sua integridade e, conseqüentemente, a obtenção dos resultados desejados na simulação. Isso pode ser feito ativando a opção "Run Analysis" na barra de ferramentas situada no topo do software. Essa avaliação preliminar é crucial para identificar eventuais problemas ou erros no modelo antes de iniciar a simulação propriamente dita.

Após a conclusão da análise por elementos finitos e a obtenção dos resultados, o próximo passo é o pós-processamento. Nessa etapa, os resultados são carregados no software de pós-processamento. Isso geralmente envolve importar arquivos de saída gerados pelo software de análise por elementos finitos.

Uma vez carregados os resultados, o usuário pode selecionar as variáveis de interesse para visualização. Isso pode incluir, por exemplo, distribuição de tensões, deformações, deslocamentos, fluxos de calor, entre outros.

Com as variáveis de interesse selecionadas, o usuário pode então explorar diferentes técnicas de visualização para representar os resultados de forma clara e compreensível. Algumas das técnicas de visualização comuns incluem:

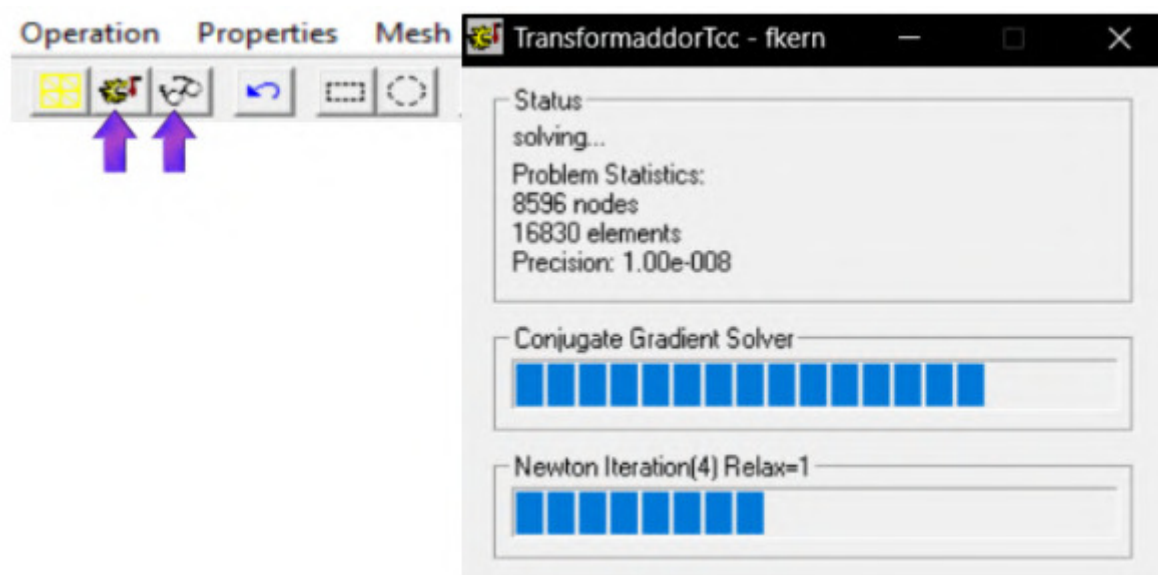
- Gráficos de contorno ou mapas de cores: Esses gráficos representam a distribuição espacial das variáveis de interesse através de diferentes cores ou contornos, permitindo visualizar padrões e variações dentro do domínio da análise.
- Diagramas de vetores: Esses diagramas mostram a direção e magnitude dos vetores associados às variáveis de interesse, como fluxo de calor ou deslocamento. Eles ajudam a entender os padrões de fluxo ou deformação dentro do sistema.
- Gráficos de barras ou histogramas: Esses gráficos são úteis para representar quantidades numéricas, como forças ou temperaturas em diferentes partes da estrutura.
- Animações: Em certos casos, animações podem ser criadas para acompanhar a evolução temporal do sistema ou para visualizar o comportamento dinâmico de certos fenômenos.

Durante o pós-processamento, é importante não apenas visualizar os resultados, mas também analisá-los criticamente para extrair insights significativos sobre o comportamento do sistema. Isso pode envolver comparar diferentes cenários, identificar pontos críticos de tensão ou deformação, e avaliar a validade dos resultados em relação às expectativas teóricas ou experimentais.



Na figura 25 podemos ver os botões de execução de análise do transformador e o botão para execução da simulação do transformador respectivamente. Além disso também é possível observar o programa sendo compilado.

Figura 25 – Etapa do Processamento das informações e Visualização de Resultados



Fonte: Projetado no Software FEMM.

concluindo assim o procedimento completo do tutorial para projetar e simular um transformador no FEMM.

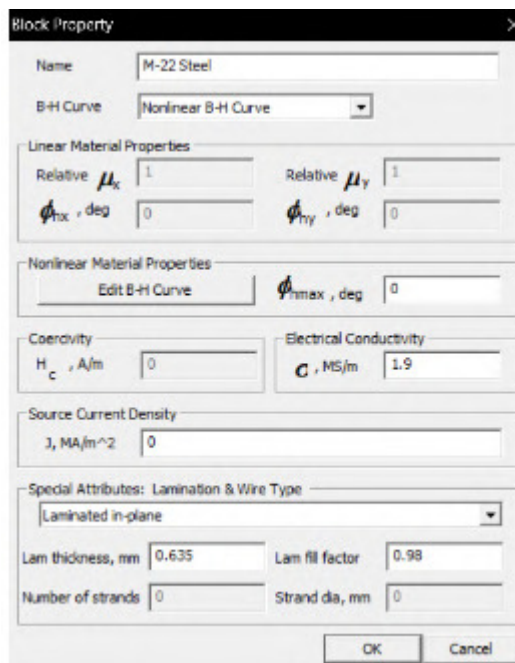
## 5 Resultados e Discussões

Os resultados das simulações realizadas no software FEMM proporcionaram insights valiosos sobre o comportamento dos transformadores sob diferentes condições de operação. A análise dos campos magnéticos, correntes induzidas e distribuição de fluxo permitem uma compreensão abrangente do desempenho do dispositivo, destacando sua eficácia na conversão de energia e sua resposta a variações de carga e tensão.

Para o projeto foi escolhido um transformador trifásico de 4,5 (kVA), (380/220V), frequência de 60 [Hz], tipo núcleo envolvido.

Para descobrir os valores da densidade de campo magnético, perdas a vácuo e perdas nos bobinados, é suficiente aplicar a rede do método dos elementos limitados e depois compilar para obter os resultados. O processo de compilação começa com a verificação de todas as medidas. Para isso, basta acessar a barra de ferramentas do programa FEMM e clicar duas vezes com o botão direito do mouse no ícone "materials library" para visualizar as medidas do material desejado. Em seguida, uma janela será aberta exibindo todos os dados referentes ao material.

Figura 26 – Informações do Material usado no transformador



Fonte: Interface do Software FEMM.

Depois de organizar todas as variáveis e implementar a malha através do método dos elementos finitos, é simplesmente uma questão de acionar o botão "Apply Mesh" e aguardar o processamento da análise pelo computador. Após a conclusão da análise, basta clicar no botão "Run Analysis" e permitir que o sistema processe o desenho e seus materiais. Uma vez finalizada a análise, é possível visualizar os resultados através do botão "Ver Resultados" que no geral é bem intuitivo como evidenciado na figura 27. Ao clicar neste botão, uma janela será aberta, exibindo de forma detalhada todos os resultados gerados pelo FEMM.

Figura 27 – Interface dos Botões que mostram os resultados da aplicação



Fonte: Interface do Software FEMM.

Dentro do software FEMM, você pode usar a ferramenta de “Dialog” para acessar opções de visualização. Uma dessas opções é "Show Density Plot". Ao selecionar essa opção e clicar em "OK", o software irá gerar uma representação visual do modelo onde as cores mais fortes indicam regiões com maior densidade de fluxo magnético, enquanto cores mais claras indicam regiões com menor densidade. Além disso, na parte do canto superior direito da tela, você geralmente pode encontrar informações numéricas detalhadas sobre a densidade de fluxo magnético, ajudando na análise dos resultados. Esse processo simplificado permite uma visualização rápida e fácil da distribuição do fluxo magnético em seu modelo.

Dentro da área de pós-processamento do software FEMM, encontra-se várias ferramentas específicas para análise detalhada. Para calcular as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos em regiões específicas do modelo, há uma ferramenta que permite marcar essas áreas diretamente no desenho.

Uma vez que se tenha marcado as regiões para análise, há outro botão designado para calcular o total das perdas. Ao clicar neste botão, o software soma as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos das áreas selecionadas, fornecendo o valor total das perdas.

Por fim, para visualizar a densidade de fluxo magnético em todo o modelo ou em regiões específicas, você pode encontrar um botão separado dedicado a essa função. Esse botão é representado por um ícone que sugere magnetismo ou fluxo, como linhas de campo magnético. Ao clicar neste botão, o software irá gerar uma representação gráfica da densidade de fluxo magnético, permitindo uma análise visual das variações de fluxo em diferentes partes do modelo.

Esses botões e ferramentas facilitam a análise detalhada das características magnéticas do modelo dentro do software FEEM, fornecendo uma maneira conveniente de identificar áreas de interesse, calcular perdas e visualizar a distribuição de fluxo magnético, e podem ser vistos respectivamente na figura 28.

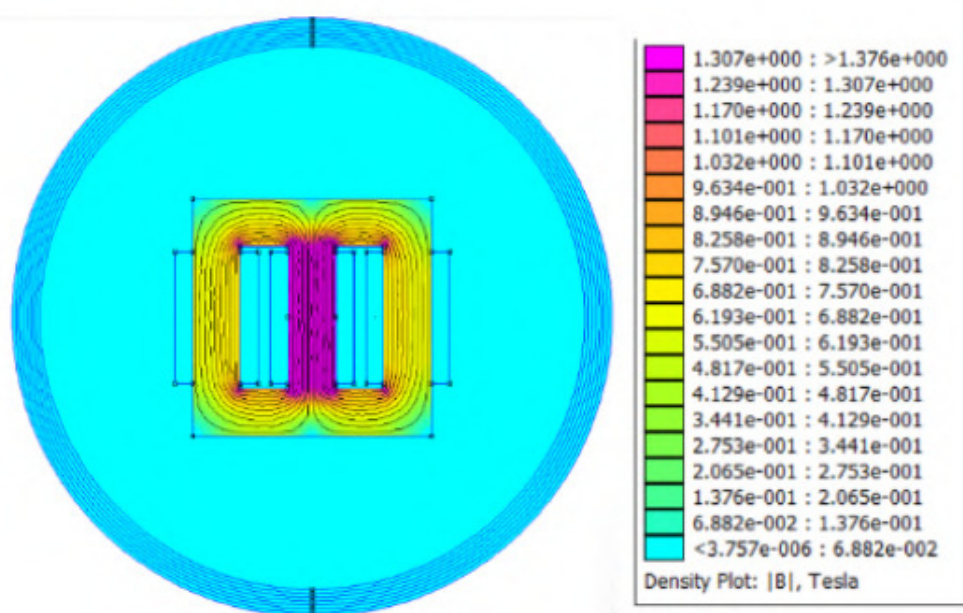
Figura 28 – Interface dos Botões que mostram as perdas e a densidade de fluxo



Fonte: Interface do Software FEMM.

A análise da máxima densidade do fluxo magnético no núcleo do transformador foi realizada por meio de cálculos e simulações de valores no software FEMM. A densidade do fluxo magnético e seus vetores correspondentes no transformador simulado podem ser visualizados de maneira detalhada na Figura 29. Utilizamos uma corrente de magnetização (sem carga) de 0,0097 [A], que foi especificada nas informações do nosso transformador de 4,5 kVA. As correntes introduzidas para calcular a densidade do fluxo magnético são as mesmas usadas para calcular as perdas sem carga, que é a corrente à vazio, mas o processo pós-simulação difere para obter o resultado.

Figura 29 – Plot da análise eletromagnética do transformador

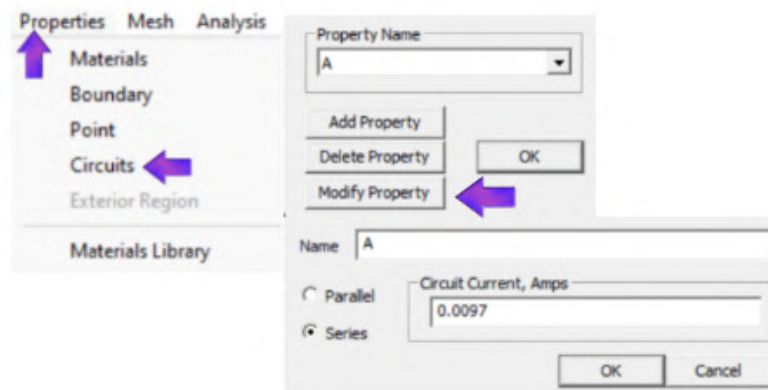


Fonte: Projetado no Software FEMM.

A densidade do fluxo magnético alvo para o projeto foi definida de acordo com as especificações do transformador como 1,47 [T], contrastando com o valor simulado de 1,376 [T]. A discrepância entre esses valores é de 6,6%, dentro do esperado, que era um erro de até 8%. Esta margem de erro é convencional em projetos de transformadores maiores, onde até 10% de discrepância é tolerado. No entanto, para este transformador de 4,5 kVA, um limite menor foi estimado, o que ressalta a precisão necessária para este projeto específico. É notável que os valores calculados e simulados no software FEMM estão bastante próximos, com erros menores que o limite estabelecido, demonstrando a confiabilidade e precisão do software utilizado.

Para simular as perdas a vazio no software FEMM, é necessário ajustar os parâmetros das correntes nos enrolamentos de baixa tensão e alta tensão. Para fazer isso, acesse a barra de ferramentas do software e selecione a opção "Properties". Em seguida, vá para a aba "circuits", onde você encontrará a janela "Property Definition". Nesta janela, você verá os itens "a", que correspondem à corrente nos enrolamentos de baixa tensão, e "A", para a corrente nos enrolamentos de alta tensão. Para ajustar a corrente, clique no botão "modify property", destacado com uma seta roxa na figura 30. Isso permitirá que você insira o valor desejado para a corrente a vazio nos enrolamentos correspondentes.

Figura 30 – Ferramenta para Criar uma propriedade no Circuito



Fonte: Interface do Software FEMM.

Para descobrir as perdas de vazio e perdas nos enrolamentos, é crucial delinear a área de interesse no esboço. Para determinar essa área, simplesmente selecione a opção "Identifying area for analysis", localizada na parte superior da barra de ferramentas, indicada pela "Seta" na figura 31. Logo em seguida o usuário deve clicar com o botão direito do mouse na região desejada do desenho para que assim seja selecionada a área desejada.

Figura 31 – Ferramentas para analisar o desenho



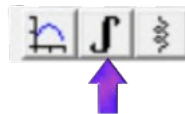
Fonte: Interface do Software FEMM.

Após concluir as etapas anteriores de identificação da região desejada para obter os valores das perdas a vazio e das perdas nos enrolamentos, é necessário acessar o recurso "block Integrals", selecionar a opção "total losses". Esta opção estará disponível em uma caixa do aplicativo que apresenta várias outras opções. Ao selecionar esta opção, você obterá o valor total das perdas a vazio e das perdas nos enrolamentos.

Os botões "block Integrals" e "total losses" desempenham as seguintes funções:

- Block Integrals: Esta função permite calcular integralmente diversas grandezas relacionadas ao sistema em análise .

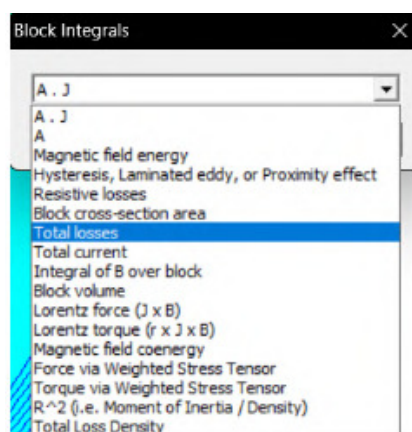
Figura 32 – Ferramenta para analisar o Valor Total das Perdas



Fonte: Interface do Software FEMM.

- Total Losses: Esta opção, dentro da função "Blocos Integrados", calcula o total das perdas, combinando as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos, fornecendo um valor consolidado dessas perdas para a região selecionada.

Figura 33 – Interface onde permite a Escolha das Perdas Totais do Transformador



Fonte: Interface do Software FEMM.

Assim, finalmente, podemos calcular as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos, obtendo todos os resultados desejados do trabalho.

Pode se dizer que as perdas a vazio são uma combinação das perdas por histerese devido ao atraso na magnetização/desmagnetização do núcleo e das perdas por correntes parasitas induzidas pelos campos magnéticos variáveis nos materiais condutores do núcleo. Essas perdas são importantes para entender a eficiência do transformador e devem ser minimizadas sempre que possível.

$$Pz = Ph + Pp \quad (8)$$

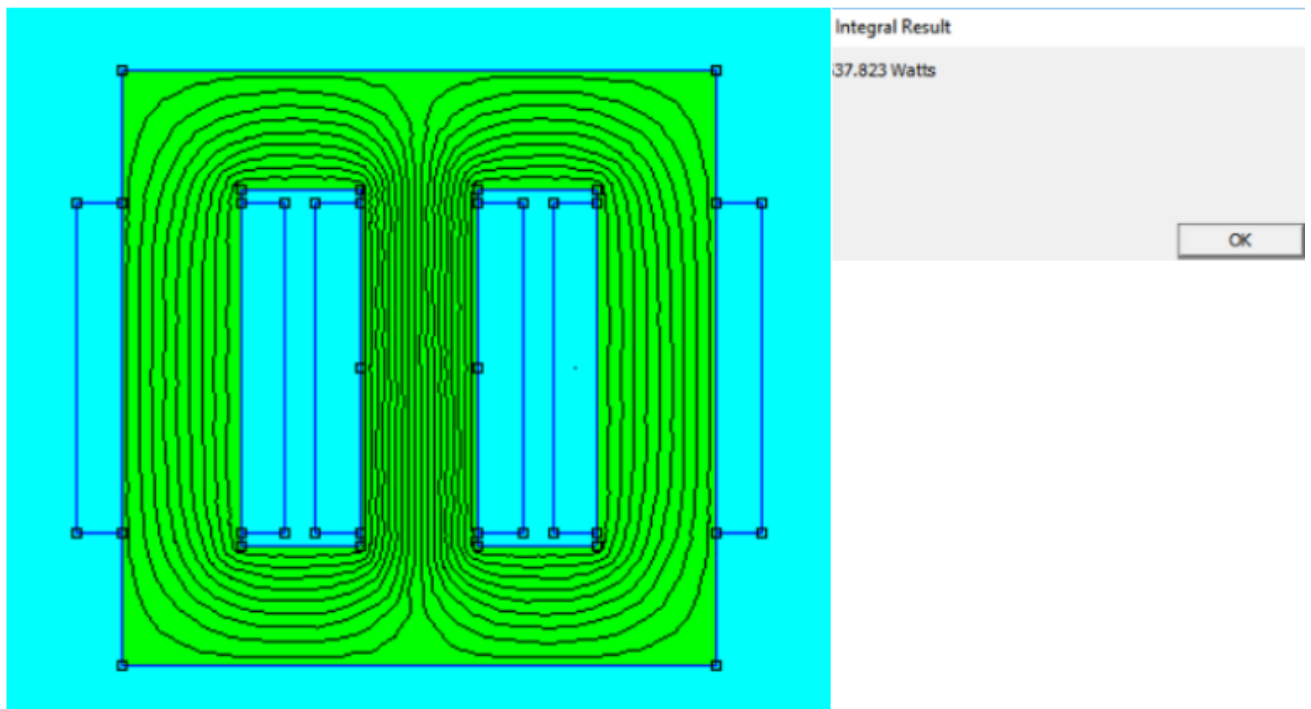
Onde:

- $Pz$  é a Perda a Vazio ;
- $Ph$  é a Perda por Histerese ;
- $Pp$  é a Perda por Correntes parasitas ;

Em geral, as perdas em um transformador são uma pequena fração da potência nominal do transformador. A magnitude das perdas depende de vários fatores, incluindo o tamanho do transformador, sua eficiência, a qualidade dos materiais utilizados na construção e as condições de operação [FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2013].

Geralmente, as perdas a vazio são especificadas nos dados técnicos dos transformadores e têm valores máximos recomendados. Uma estimativa comum é que as perdas totais em um transformador típico representem cerca de 1% a 4% da potência nominal do transformador, expresso como uma porcentagem da potência nominal. Por exemplo, em um transformador de 150kVA, a perda a total pode ser de até 6000 Watts. Com base nisso, podemos supor que o valor das perdas totais para o transformador em questão de 4500 VA esteja na faixa de 45 a 180 Watts.

Figura 34 – Perdas a vazio do transformador no FEMM.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

Após calcular as perdas a vazio, o próximo passo é calcular as perdas nos enrolamentos. Essas perdas referem-se à dissipação de potência na forma de calor devido ao efeito Joule. Geralmente, as perdas nos enrolamentos são maiores do que as perdas no núcleo em transformadores de média e alta potência. Isso acontece porque as perdas nos enrolamentos são proporcionais ao quadrado da corrente no enrolamento, enquanto as perdas no núcleo são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada.

A equação para calcular as perdas nos enrolamentos é:

$$Penrolamento = 3 \times ((Rat \times Ia^2) + (Rbt \times Ib^2)) \quad (9)$$

Onde:

- Penrolamento é a Perda nos Enrolamentos causada pelo efeito joule;
- Rat é a Resistência dos Enrolamentos de Alta Tensão ;
- Rbt é a Resistência dos Enrolamentos de Baixa Tensão ;
- Ia é a Corrente Nominal de Fase de Alta Tensão ;



- $I_b$  é a Corrente Nominal de Fase de Baixa Tensão ;

Para Calcular a Corrente nominal do lado de Baixa Tensão no transformador, temos :

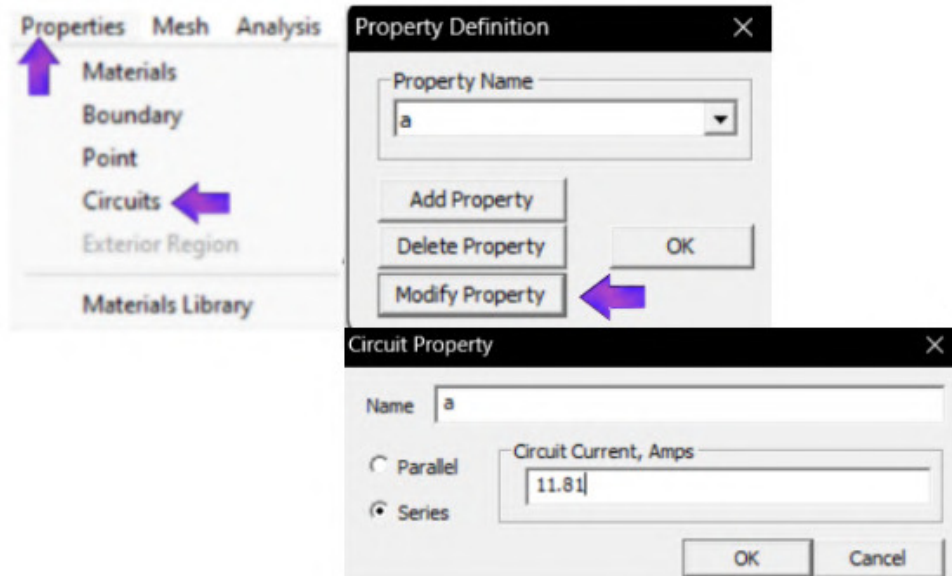
$$I_b = \frac{S}{V\sqrt{3}} = \frac{4500}{220\sqrt{3}} = 11.81 \text{ A.} \quad (10)$$

Para a conexão em estrela, a corrente nominal de fase é :

$$I_{NY} = I_b = 11.81 \text{ A.} \quad (11)$$

Para simular as perdas nos enrolamentos no lado de baixa, deve se mudar a corrente no lado de baixa tensão para a que foi calculada acima

Figura 35 – Mudança de corrente nos enrolamentos BT.



Fonte: Interface do Software FEMM.

Agora deve-se calcular a corrente nominal do transformador para o lado de alta tensão

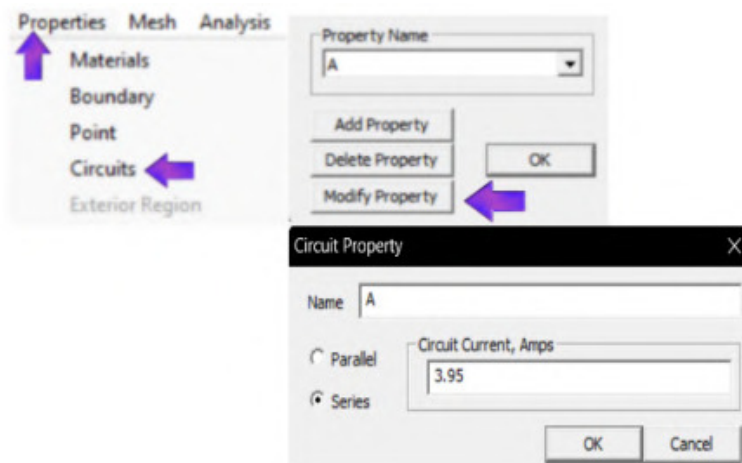
$$I_a = \frac{S}{V\sqrt{3}} = \frac{4500}{380\sqrt{3}} = 6.84 \text{ A.} \quad (12)$$

Como temos um fechamento a corrente nominal da fase deve ser calculada da seguinte maneira :

$$I_{N\Delta} = \frac{I_a}{\sqrt{3}} = 3.95 \text{ A.} \quad (13)$$

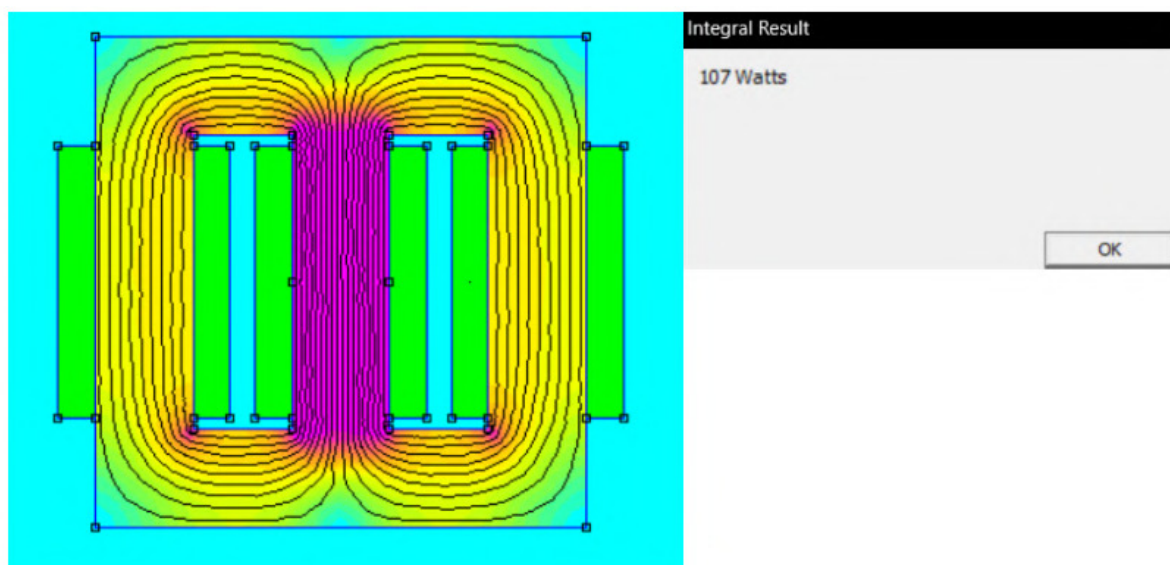
Para simulação das perdas nos enrolamentos no lado de alta deve-se inserir uma corrente de fase equivalente a 3,95 A.

Figura 36 – Mudança de corrente nos enrolamentos AT.



Fonte: Interface do Software FEMM.

Figura 37 – Perdas nos enrolamentos do transformador no FEMM.



Fonte: Projetado no Software FEMM.

Tabela 1 – Diferença entre os valores calculados e simulados.

<b>Parâmetros</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Simulação</b>	<b>Diferença (%)</b>
Bm (W)	1,47	1,376	6,6
P0 (W)	35,70	37,823	5,61
PJ (W)	138	107	29

Fonte: Autoria Própria.

Como foi evidenciado, o software demonstrou eficácia notável na determinação das perdas. Na análise das perdas a vazio, o valor simulado alcançou 37,823 W, enquanto o valor calculado foi de 35,70 W. A discrepância observada, que totalizou 5,61% a mais que o valor calculado, evidencia a precisão do software no cálculo das perdas.

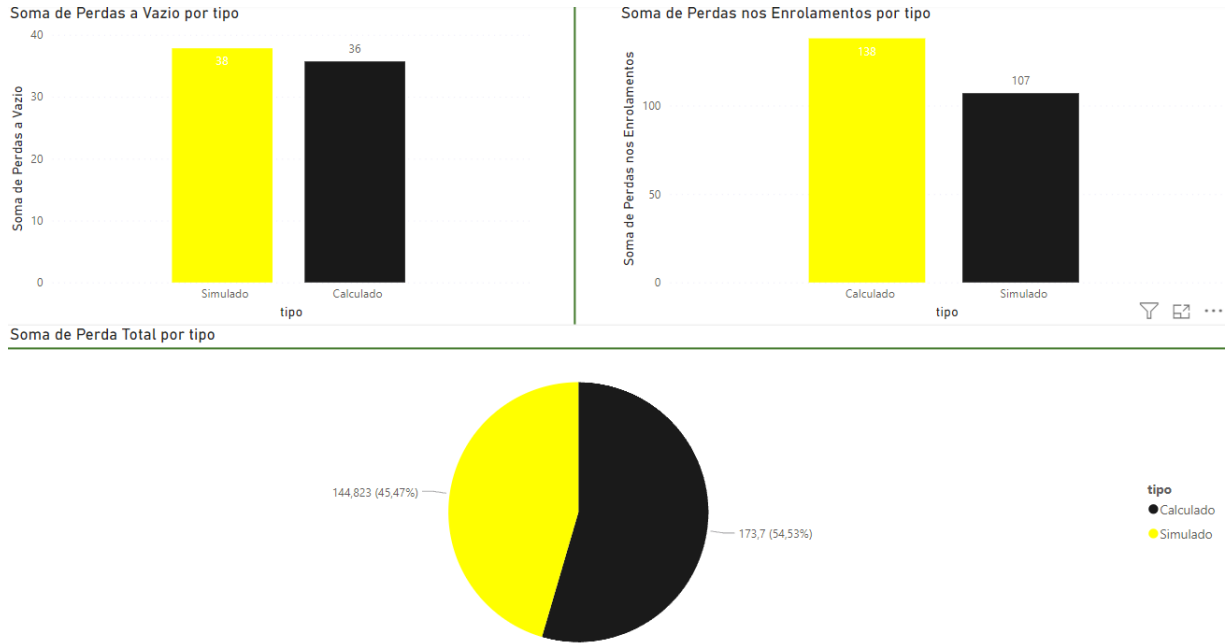
No que diz respeito às perdas nos enrolamentos, o software também apresentou desempenho satisfatório. O cálculo indicou perdas de 138 W, enquanto a simulação obteve 107 W. Nesse cenário, a diferença entre os valores obtidos a partir dos dados da tese de referência e os simulados pelo software foi de 29% .

Em geral, é conhecido que as perdas nos enrolamentos dos transformadores tendem a ser maiores em comparação com outras formas de perdas. Esta tendência é amplamente observada devido à natureza da operação desses dispositivos, onde correntes elétricas são induzidas nos enrolamentos para transferência de energia. Como resultado, é comum encontrar uma maior discrepância entre os valores calculados e simulados para essas perdas.

No entanto, apesar dessa característica, o software utilizado neste estudo demonstrou uma capacidade significativa de precisão na avaliação das perdas nos enrolamentos, graças ao seu emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF possibilita uma análise minuciosa e detalhada do comportamento eletromagnético dos enrolamentos, permitindo uma simulação precisa das perdas e contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do desempenho do sistema.

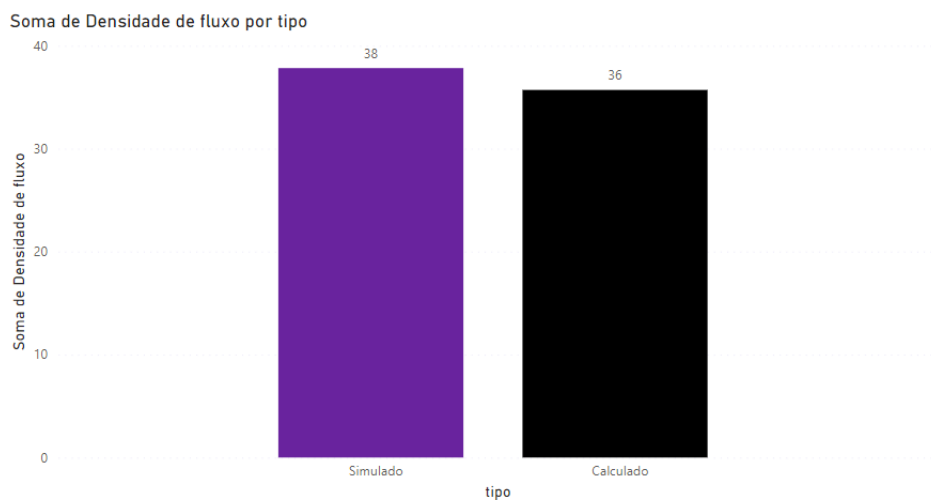
Na Figura 38 é ilustrado um gráfico no software Power BI que relaciona as grandezas de perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e densidade de fluxo magnético máximo, considerando as restrições e desigualdades pertinentes.

Figura 38 – Gráficos das relações das perdas a vazio , perdas nos enrolamentos e perdas totais.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Gráfico densidade de fluxo Simulado x Calculado.



Fonte: Autoria Própria.

## 5.1 Importar e Exportar do FEMM para o AutoCAD

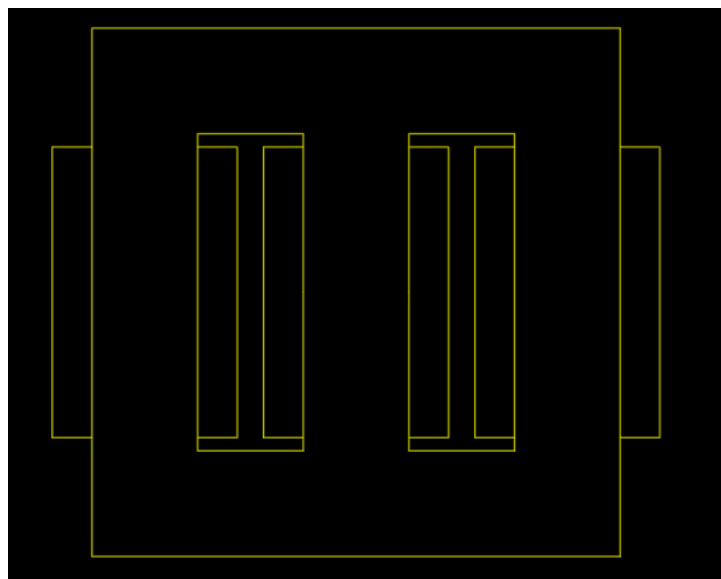
O software FEMM permite a importação de geometrias de outros programas CAD, também oferece flexibilidade na exportação dos desenhos dos transformadores simulados para o AutoCAD. Essa funcionalidade é de extrema importância, pois permite ter todas as dimensões plotadas no projeto, facilitando eventuais modificações futuras desejadas pelo projetista.

Para exportar o desenho do FEMM para o AutoCAD, o procedimento é simples. Basta acessar a barra de ferramentas do FEMM, onde está localizada a opção "File", e em seguida selecionar a função de Export DXF, que é o formato utilizado para transportar os desenhos do FEMM para o CAD. Após selecionar essa opção, o usuário deverá salvar o documento em uma pasta específica do computador.

Por outro lado, a importação de arquivos para o FEMM é igualmente valiosa. Ela permite uma integração suave com outros softwares CAD, economizando tempo e esforço ao eliminar a necessidade de redesenhar a geometria no FEMM. Além disso, a preservação da geometria e precisão original garante que os modelos criados no software CAD sejam fielmente representados no FEMM, sem perda de detalhes.

Combinadas, essas funcionalidades proporcionam uma abordagem eficiente e integrada para o projeto e a análise de sistemas magnéticos. A partir da importação de geometrias do CAD para o FEMM e da subsequente exportação dos resultados para o AutoCAD, o usuário têm acesso a um fluxo de trabalho contínuo e intuitivo, facilitando a colaboração entre diferentes membros de uma equipe por exemplo assim permitindo ajustes precisos e rápidos nos projetos conforme necessário.

Figura 40 – Desenho exportado para o autocad.



Fonte: Exportado no Software Autocad.

## 6 Conclusões

O uso eficiente do Software FEMM tendo em vista o projeto de transformadores revelou-se crucial para a compreensão aprofundada dos fenômenos envolvidos na simulação de transformadores. Sua capacidade de modelagem e análise permite explorar de forma interativa os princípios teóricos complexos subjacentes à conversão de energia, oferecendo uma abordagem prática e tangível para a aprendizagem. Essa eficácia na utilização do software não apenas ampliou o entendimento conceitual, mas também facilitou a conexão entre a teoria e sua aplicação prática.

Além disso, o enfoque no ensino dinâmico, caracterizado por metodologias ativas que incentivam a participação ativa dos alunos em seu processo de aprendizagem, demonstrou ser uma ferramenta poderosa na redução da defasagem no ensino superior de engenharia. A abordagem interativa e prática oferecida pelo uso do Software FEMM engaja os alunos de forma mais significativa, promovendo uma compreensão mais profunda dos conceitos e desenvolvendo habilidades essenciais para sua futura prática profissional.

Nesse contexto, torna-se evidente a importância do Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma ferramenta indispensável para o ensino e aprendizagem em engenharia. O MEF não apenas possibilita a simulação precisa de fenômenos complexos, como também estimula o pensamento crítico e a resolução de problemas, habilidades essenciais para os engenheiros do futuro. A escassez de material em português sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF) representa uma lacuna significativa no acesso ao conhecimento para estudantes e profissionais brasileiros. O MEF é uma técnica poderosa e amplamente utilizada em diversas áreas da engenharia, e a falta de recursos na língua nativa pode representar um obstáculo para seu pleno entendimento e aplicação. Logo ao introduzir recursos educacionais acessíveis na língua nativa, ampliamos significativamente o alcance e a relevância do estudo realizado.

Para alcançar o propósito estabelecido, a pesquisa foi subdividida em três fases. O primeiro estágio consiste em uma explanação sobre a aplicação do Software FEMM na simulação de transformadores, proporcionando ao leitor uma compreensão do processo de modelagem e análise empregado para obter os resultados almejados. A segunda fase aborda detalhadamente a criação da geometria do transformador e a implementação da malha pelo Software FEMM, essenciais para a simulação e obtenção dos resultados desejados. Por fim, a terceira e última etapa, de suma importância, apresenta um guia passo a passo sobre como inserir as dimensões da parte ativa do transformador no software FEMM e, conseqüentemente, aplicar o Método dos Elementos Finitos para análise nesta geometria específica.

Os resultados obtidos pela análise computacional foram bastante gratificantes,

visto que ao compará-los com os resultados teóricos, constata-se uma discrepância mínima, com uma diferença percentual insignificante entre os valores calculados e simulados. Isso evidencia uma execução eficaz da simulação e confirma a qualidade do projeto do transformador, proporcionando uma confiança máxima no software FEMM.


## 6.1 Prospecção de Futuros Trabalhos

- Desenvolvimento de tutoriais e recursos educacionais: Criar tutoriais e materiais educacionais para auxiliar os alunos no aprendizado autônomo do software FEMM e sua integração com o LUA.
- Introdução à programação com LUA: Incorporar o uso do LUA para programar e exportar fórmulas personalizadas no software FEMM
- Modelagem magnética de motores de corrente contínua (CC) no FEMM: Projetar e otimizar esses dispositivos, com benefícios significativos em termos de simplicidade, controle preciso, eficiência energética e aplicabilidade em diversas áreas.



# Referências

- ALVES, Á. F. R. Análise flexo torcional do eixo de um grupo gerador usando o método dos elementos finitos (mef). 2014.
- AZEVEDO, Á. F. Método dos elementos finitos. *Faculdade de Engenharia da universidade do Porto*, v. 1, n. 7, 2003.
- BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e cálculo de campos*. [S.l.]: Ed. da UFSC, 1992.
- BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. [S.l.]: Ed. da UFSC, 2004.
- CABREIRA, M. d. F. R. R. Análise termo-magnética de motores de indução de pequeno porte utilizando técnicas de elementos finitos em duas dimensões. 1996.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. Fitzgerald & kingsley's electric machinery. (*No Title*), 2013.
- KOSOW, I. L. *Máquinas elétricas e transformadores*. [S.l.]: Globo, 1985.
- LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial*, SciELO Brasil, v. 11, p. 35–43, 2006.
- MARTIGNONI, A. *Transformadores. 8ª*. [S.l.]: Edição, Editora Globo, São Paulo-SP, Brasil, 1991.
- NOGUEIRA, D. d. S.; ALVES, D. P. Transformadores de potência-teoria e aplicação tópicos essenciais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- SALUSTIANO, R. Análise técnica de transformadores para redes de média tensão. 2012.
- SOUZA, N. M. et al. Transformadores de alta tensão para utilização em laboratório: projetos e construção. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Trabalho de Conclusão de Curso

<b>Assunto:</b>	Trabalho de Conclusão de Curso
<b>Assinado por:</b>	Hugo Samuel
<b>Tipo do Documento:</b>	Tese
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Samuel Guedes de Oliveira, ALUNO (20192610032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 17/09/2024 08:48:21.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/09/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1250652

Código de Autenticação: b5af882b66





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
SECRETARIA ACADEMICA - CAMPUS JOAO PESSOA



ATA 99/2024 - SAC/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Às quinze e trinta horas do vigésimo segundo dia do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e quatro, foi realizada a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), na qual o discente **Hugo Samuel Guedes de Oliveira**, matrícula **20192610032**, apresentou o trabalho que tem como título “**Aplicação do Software FEMM na Simulação de Transformadores: Uma Perspectiva para o Ensino Dinâmico em Conversão de Energia**” sendo a Banca Examinadora constituída pelos seguintes participantes: **Dr. Alvaro de Medeiros Maciel**, IFPB (Orientador), **Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona**, IFPB (Examinador Interno), **Dr. José Artur Alves Dias**, IFPB (Examinador Interno). Após a apresentação e as considerações dos membros da Banca Examinadora, o trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota **95** (noventa e cinco pontos) e eu, **Alvaro de Medeiros Maciel**, lavrei a presente ata, assinada pelos membros desta banca, pelo discente e por mim.


Documento assinado eletronicamente por:

- Franklin Martins Pereira Pamplona, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/08/2024 23:35:51.
- Alvaro de Medeiros Maciel, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/08/2024 17:23:31.
- Hugo Samuel Guedes de Oliveira, ALUNO (20192610032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 29/08/2024 17:26:48.
- Jose Artur Alves Dias PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/09/2024 19:36:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 597765  
Verificador: fa35106138  
Código de Autenticação:



	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### ATA de defesa

<b>Assunto:</b>	ATA de defesa
<b>Assinado por:</b>	Hugo Samuel
<b>Tipo do Documento:</b>	Ata
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Samuel Guedes de Oliveira, ALUNO (20192610032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 17/09/2024 08:48:21.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/09/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1250653

Código de Autenticação: 9e6fc923ed





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO  
DIRETORIA DE EDUCAÇÃO SUPERIOR  
Avenida João da Mata, nº 256 – Bairro Jaguaribe – João Pessoa – Paraíba – CEP: 58015-020  
(83) 3612-9703 – [conselhosuperior@ifpb.edu.br](mailto:conselhosuperior@ifpb.edu.br)

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO POSTAGEM NO REPOSITÓRIO DIGITAL PELO MODERADOR

### IDENTIFICAÇÃO PESSOAL E DO MATERIAL BIBLIOGRÁFICO

Nome: Hugo Samuel Guedes de Oliveira

E-mail: [Guedes.hugo@academico.ifpb.edu.br](mailto:Guedes.hugo@academico.ifpb.edu.br)

RG:4370501

Telefone: (83)98195-3805

Matrícula: 20192610032

Identificação do Material: (xx) Tese: ( ) Dissertação: (x)

Especialização: ( ) Graduação: (xx) Relatório de Estágio: ( )

Outros:

#### Título do Trabalho:

Aplicação do Software FEMM na Simulação de Transformadores: Uma Perspectiva para o Ensino Dinâmico em Conversão de

#### Palavras-Chaves:

Software FEMM. Elementos Finitos. Ensino Dinâmico. Transformadores. Conversão de energia.

#### Orientador:

Alvaro de Medeiros Maciel

Área de Conhecimento (Tabela CAPES)<sup>1</sup>:

Engenharia Elétrica

**AUTORIZAÇÃO**

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação supracitada, de acordo com a **Lei Federal nº 9.610/98**, autorizo o **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB** a disponibilizá-la gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais do trabalho em meio eletrônico, no Repositório Digital da Instituição, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica gerada pela IFPB. Autorizo ainda a conversão do tipo digital do arquivo para fins de preservação, backup e continuidade da plataforma, de acordo com a política de gerenciamento e disponibilização informacional do IFPB.

João Pessoa, 06/09/2024

Cidade

Data

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

HUGO SAMUEL GUEDES DE OLIVEIRA


Data: 06/09/2024 15:39:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

3.04.00.00-7

<sup>1</sup> Inserir o código área de conhecimento da Tabela CAPES – Anexo I.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### termo de autorização

<b>Assunto:</b>	termo de autorização
<b>Assinado por:</b>	Hugo Samuel
<b>Tipo do Documento:</b>	Termo
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Samuel Guedes de Oliveira, ALUNO (20192610032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 17/09/2024 08:48:22.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/09/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1250654

Código de Autenticação: 954f1ad528





## Despacho:

Com os devidos cumprimentos, segue o pedido discente para entrega e arquivamento do TCC.

## Assinatura:

Despacho assinado eletronicamente por:

- Gilvan Vieira de Andrade Junior, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSBEE-JP, [CCSBEE-JP](#), em 23/09/2024 22:00:39.

**NOSSA MISSÃO:** Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

**VALORES E PRINCÍPIOS:** Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.