



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIUS FLOR SILVA

**TUTORIAL PARA SIMULAÇÕES DE TRANSFORMADORES VIA MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS**

PALMAS/TO
2019

VINICIUS FLOR SILVA

**TUTORIAL PARA SIMULAÇÕES DE TRANSFORMADORES VIA MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia
elétrica para obtenção do título de trabalho de
conclusão de curso e aprovada em sua forma final
pelo Orientador e pela Banca Examinadora.
Orientador: Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho
Coorientadora: Dra. Priscila da Silva Oliveira

Palmas/TO
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

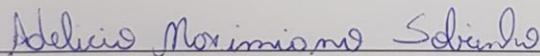
VINICIUS FLOR SILVA

TUTORIAL PARA SIMULAÇÕES DE TRANSFORMADORES VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

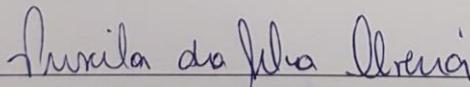
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia elétrica para obtenção do título de trabalho de conclusão de curso e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 03 / 12 / 19

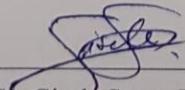
Banca Examinadora



Prof. Dr. Adélcio Maximiano Sobrinho, UFT



Prof. Dra. Priscila da Silva Oliveira, UFT



Prof. MSc. Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT

Palmas, 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado sabedoria e força para poder concluir este curso, agradeço aos meus pais e meus irmãos por estarem sempre ao meu lado ajudando nas horas mais difíceis e compartilhando cada momento de alegria, me dando conselhos para chegar onde estou hoje. Não posso deixar de agradecer aos meus amigos que estiveram por perto durante esse caminho de conclusão do curso de engenharia elétrica.

RESUMO

Este trabalho visa à aplicação detalhada da análise eletromagnética de um transformador via Método dos Elementos Finitos (MEF) através do *software* FEMM com o objetivo de produzir um tutorial apresentando o passo a passo de como utilizar esse *software* FEMM. O MEF pode ser utilizado em diversas áreas devido a sua grande aplicabilidade e eficiência. Nesta perspectiva, o presente trabalho deve analisar através de método computacional o comportamento da parte ativa do transformador, demonstrando os resultados da densidade de fluxo magnético, as perdas a vazio e a perdas nos enrolamentos. Para isso será apresentado detalhadamente todas as etapas para obtenção dos resultados, desde o pré-processamento, processamento até o pós-processamento. Por fim, serão mostrados todos os resultados das simulações feitas.

Palavras-chaves: Elementos Finitos. *Software*. Transformador. FEMM. Processamento.

ABSTRACT

This work aims at the detailed application of the electromagnetic analysis of a transformer through the Finite Element Method (FEM) through the FEMM software in order to produce a tutorial showing the step by step how to use the FEMM software. The FEM can be used in many areas due to its great applicability and efficiency. In this perspective, the present work should analyze, through the computational method, the behavior of the active part of the transformer, demonstrating the results of the magnetic flux density, the empty losses and winding losses. For that, all the steps to obtain the results will be presented in detail, from preprocessing, processing to postprocessing. Finally, all the results of the simulations will be shown.

Key-words: Finite Elements. Software. Transformer. Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parte ativa do transformador	12
Figura 2 - Parte ativa e a parte complementar do Transformador.	18
Figura 3 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido.	19
Figura 4 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvente.....	19
Figura 5 - Forma para seção do núcleo.	20
Figura 6 - Cortes das chapas em 45°.....	21
Figura 7 - Formatos das culatras.....	21
Figura 8 - Núcleo de um transformador trifásico.	22
Figura 9 - Exemplo de elementos empregados.....	25
Figura 10 - Geometria da parte ativa do transformador.....	28
Figura 11 - Exemplo de uma malha gerada no software FEMM em uma geometria quadrada.....	29
Figura 12 - Malha de elementos finitos do transformador trifásico.	30
Figura 13 - Curva BH chapa do núcleo.....	31
Figura 14 - Densidade do fluxo da parte ativa do Transformador.....	32
Figura 15 - Ferramentas utilizadas para iniciar a construção da parte ativa do transformador.....	34
Figura 16 - Dimensões do Núcleo.	34
Figura 17 - Coordenadas dos pontos da Parte ativa do Núcleo.	36
Figura 18 - Ilustração da coordenada do primeiro nó.	37
Figura 19 - Ilustração da ferramenta superior do <i>Software</i>	38
Figura 20 - Geometria quadrada da parte externa do núcleo.	38
Figura 21 - Parte ativa completa do transformador.	40
Figura 22 - Ferramentas para inserir os materiais desejados.....	40
Figura 23 - a) botão de inserir o ponto do material e b) botão de inserir o material que deseja inserir no local.....	41
Figura 24 – Condição de contorno para malha dos elementos finitos.	42
Figura 25 - Ferramenta para executar gerador de malha.....	43
Figura 26 - Aplicação da malha na forma geométrica do transformador.	43
Figura 27 - Processamento do transformador no FEMM.....	44
Figura 28 - a) botão de execução de análise do transformador, b) botão para execução da simulação do transformador.....	44
Figura 29 - Janela com as grandezas do material	45
Figura 30 - Botão (a) aplicar a malha MEF, (b) executar análise e (c) ver resultados. ..	46
Figura 31 - Botões utilizados para encontrar as perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e a densidade de fluxo magnético.	46
Figura 32 - Resultado eletromagnética de um transformador trifásico.....	47
Figura 33- Barra de ferramenta, janela de modificar corrente e local para inserir valor da corrente.	48
Figura 34 – Abas para análise do desenho.	48
Figura 35 - Botão para ter o valor total das perdas.....	48
Figura 36 - Janela para identificar o item <i>total losses</i>	49
Figura 37 - Perdas a vazio do transformador simulado no FEMM.	50
Figura 38 - Ilustração de como inserir a corrente nominal de fase no lado de baixa tensão.....	51
Figura 39 - Corrente nominal de fase no lado de alta tensão.	51
Figura 40 - Perdas nos enrolamentos do transformador simulação no FEMM.....	52

Figura 41 - Resultados das grandezas das perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos.	53
Figura 42 - Resultados das grandezas da densidade do fluxo magnético.	53
Figura 43 - Desenho do transformador no AutoCAD.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área [m ²];
Abc	Área bruta da coluna [mm ²];
Aj	Área do julgo da coluna [mm ²]
B	Densidade do fluxo magnético [T];
B	Tesla [T];
Bm	Densidade de fluxo magnético [T];
d	Distância entre enrolamento de baixa tensão [mm];
D	Distância entre os centros das duas colunas do núcleo [mm];
FEMM	Finite Element Method Magnetics;
H	Intensidade do campo magnético [Ae/m]
H	Altura total do núcleo [mm];
hj	Altura da culatra [mm];
hw	Altura da janela [mm];
I ₀	Corrente a vazio [A];
I _{AT}	Corrente no lado de alta tensão [A];
I _{BT}	Corrente no lado de baixa tensão [A];
Infat	Corrente nominal de fase nos enrolamentos de alta tensão [A];
Infbt	Corrente nominal de fase nos enrolamentos de baixa tensão [A];
J	Densidade de corrente nos condutores das bobinas [A/mm ²];
MEF	Método dos elementos finitos;
N _{AT}	Número de espiras no lado de alta tensão [esp];
N _{BT}	Número de espiras no lado de baixa tensão [esp];
P ₀	Perdas a vazio [W];
P _j	Perdas por efeito joule [W];
Rat	Resistencia dos enrolamentos de alta tensão [Ω];

R_{bt}	Resistencia dos enrolamentos de baixa tensão [Ω];
V_{AT}	Tensão de fase no lado de alta tensão [V];
V_{BT}	Tensão de fase no lado de baixa tensão [V];
W	Largura total do núcleo envolvido [mm];
W_c	Maior largura da coluna do núcleo do transformador [mm];
W_w	Largura da janela [mm];
Φ	Fluxo magnético [Wb];

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema de pesquisa.....	13
1.1.2 Delimitação de escopo.....	13
1.1.3 Justificativa	14
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Metodologia	14
1.3.1 Procedimentos metodológicos.....	15
1.4 Revisão bibliográfica.....	15
1.5 Estrutura do Trabalho.....	17
2 TRANSFORMADORES.....	18
2.1 Características construtivas.....	18
2.2 Núcleo do transformador.....	19
2.3 Enrolamento do Transformador	22
2.4 Processo de Resfriamento do Transformador.....	23
2.5 Perdas nos enrolamentos	23
2.6 Perdas a vazio.....	24
2.7 Densidade de fluxo magnético	24
2.8 Conclusões.....	24
3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS MEF E <i>SOFTWARE</i> FEMM.....	25
3.1 Equações de Maxwell.....	26
3.2 Aplicação do método dos elementos finitos na análise de transformadores trifásicos.....	27
3.3 Pré-processamento	27
3.4 Processamento 1	29
3.5 Processamento 2.....	30
3.6 Pós-processamento	31
3.7 Conclusões	32
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	33
4.1 Passo a passo do Pré-processamento	33

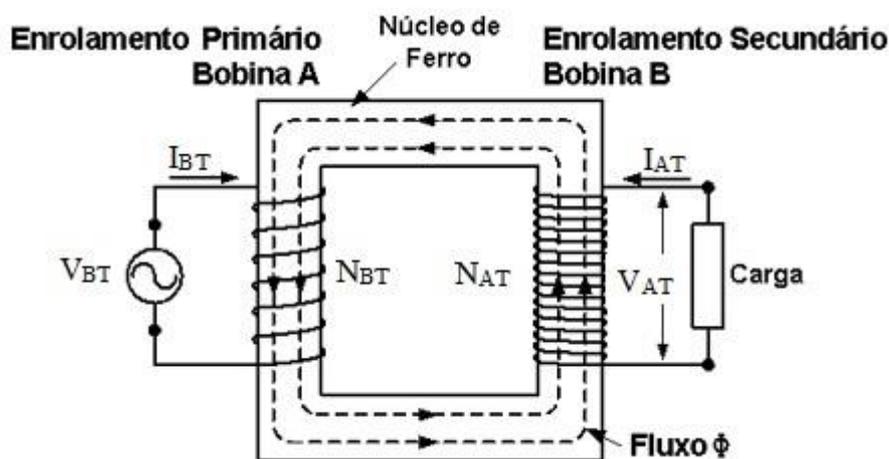
4.3 Passo a passo do pós-processamento	43
4.4 Exportar do FEMM para o AutoCAD	53
5 CONCLUSÕES	55
5.1 Sugestões de trabalhos	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são equipamentos fundamentais para os níveis de geração, transmissão e distribuição de energia, através da aplicação de uma tensão alternada no enrolamento primário, na qual, à medida que a tensão aumenta, cria-se um campo magnético no núcleo, cujo fluxo varia e percorre o enrolamento secundário, causando uma elevação ou redução da tensão ou da corrente do circuito (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Para um melhor entendimento a Figura 1 mostra como é o formado um transformador. Com resalta do autotransformador, não há uma conexão elétrica entre as partes dos circuitos interligados por meio do autotransformador (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Figura 1 - Parte ativa do transformador



Fonte: Adaptada de MARTGNONI, 1969.

Onde:

N_{BT} : é o número de espiras no lado de baixa tensão;

N_{AT} : é o número de espiras no lado de alta tensão;

V_{BT} : é a tensão de fase no lado de baixa tensão;

V_{AT} : é a tensão de fase no lado de alta tensão;

I_{AT} : é a corrente no lado de alta tensão;

I_{BT} : é a corrente no lado de baixa tensão;

Φ : é o fluxo magnético.

Os cálculos para fazer a análise eletromagnética do transformador são complexos para encontrar os resultados da densidade do fluxo, perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos e por isso utiliza-se o método dos elementos finitos para facilitar esta análise.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) faz a divisão da geometria da arte ativa do transformador em elementos menores a fim de permitir a análise eletromagnética através de métodos de aproximações do transformador através de simulações utilizando o *software* FEMM do inglês *Finite Element Method Magnetic* (SOBRINHO, 2019).

O FEMM é um *software* baseado no MEF, de distribuição livre que é utilizado para solucionar problemas eletromagnéticos de baixa frequência e em duas dimensões, para tanto se faz uso da análise dos elementos finitos e definição das condições de contorno (MEEKER, 2014).

Para melhorar o processo de simulação no FEMM, a linguagem de programação LUA *script* que é uma forma de linguagem de código utilizada para adicionar *scripts* no *software* FEMM de modo que a utilização desse torna-se mais simples para alguns casos (simulação eletromagnética dos transformadores e motores de indução). Com essa linguagem de código pode-se ter a definição de todo o processo de simulação, desde a descrição dos materiais à aquisição dos dados para se traçar as curvas do transformador (MEEKER, 2015).

1.1 Problema de pesquisa

Visto que este assunto é relevante e com uma escassez de material em português, essa pesquisa, visa detalhar o procedimento para suprir o entendimento sobre o uso adequado da análise eletromagnética do transformador via simulações no FEMM.

1.1.1 Hipótese

Desenvolver um tutorial a fim de facilitar aos estudantes e demais profissionais a realizarem as simulações eletromagnéticas dos transformadores utilizando a ferramenta, via método dos elementos finitos, através do *software* FEMM. Esse *software* permite a análise eletromagnética do transformador através da divisão da geometria da parte ativa do transformador em elementos menores, os quais, permitem aos computadores resolverem os problemas complexos através de aproximações das soluções por interpolações.

1.1.2 Delimitação de escopo

A fim de apresentar uma proposta de modelagem de um transformador de distribuição, o emprego deste projeto possibilita avaliar os resultados obtidos através de cálculos analíticos. A partir destes cálculos, as principais grandezas obtidas do núcleo e bobinas do transformador foram simuladas, através do Método dos Elementos Finitos (MEF)

via *software* FEMM para determinar a densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador, perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e demais grandezas interessantes (SOBRINHO, 2019).

1.1.3 Justificativa

Auxiliar o uso do *software* FEMM pra análise eletromagnética do transformador de distribuição trifásico via método dos elementos finitos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a produção de um tutorial usando como base a simulação do *software* FEMM para utilizar o Método dos Elementos Finitos (MEF) como o principal meio de análise dos resultados. Com isso ajudando alunos e outros profissionais do curso de Engenharia Elétrica no entendimento do uso do FEMM para fazer simulações eletromagnética de um transformado na parte computacional.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar detalhadamente a análise eletromagnética via MEF através do *software* FEMM. Este procedimento é realizado em quatro etapas: pré-processamento, processamento, processamento 2 e pós-processamento.

1. Pré-processamento: Inserção dos pontos, ligação desses pontos através de linhas, formação da geometria e divisão dessa geometria em elementos menores (malhação);
2. Processamento 1 e 2: Aplicação da malha do MEF e a realização dos cálculos para analisar a solução eletromagnética;
3. Pós-processamento: Apresentação dos resultados tais como: densidade de fluxo magnético, perda a vazio, perda nos enrolamentos entre outras;
4. Determinar a perdas a vazio e perda nos enrolamentos via simulações através do *software* FEMM;

1.3 Metodologia

Estudar os conceitos gerais do método dos elementos finitos e o manual do *software* FEMM e mapear detalhadamente os meios para simular um transformador.

Mapear detalhadamente passo a passo desde a inserção dos pontos, confecção da geometria, inserção dos dados de materiais das bobinas, número de espiras, característica da curva BH do núcleo, isolamento e análise dos resultados, etc. As simulações eletromagnéticas serão realizadas através do *software* FEMM. O texto desta pesquisa será ilustrado através de Figuras, Tabelas através do programa Word.

Estes dados serão analisados e coletados na segunda etapa do trabalho.

a) Sob o ponto de vista de sua natureza

Este trabalho trata-se de uma pesquisa básica tática por ser composto de um trabalho teórico para ajudar posteriormente na prática computacional.

b) Sob o ponto de vista da forma de abordagem do problema

- Pesquisa qualitativa.

c) Sob o ponto de vista de seus objetivos

A pesquisa descritiva já que surgiu da ideia de apresentar uma forma de explicar passo a passo de como produzir um equipamento via método do elemento infinito através de *software* FEMM, porém com um direcionamento para um público mais restrito. Apresentando sucintamente cada ponto e cada dimensão que precisa para a criação da forma geométrica do transformador.

1.3.1 Procedimentos metodológicos

Este trabalho se enquadra em uma pesquisa bibliográfica devido à procura de citações em livros, artigos e trabalhos acadêmicos. Documental devido a utilização de dados retirados de um programa de computador. Estudo de caso por ser um tutorial destinado a facilitar os estudos de um restrito grupo e uma pesquisa ação por envolver a necessidade da utilização de *software* para a coleta de dados que será utilizado na próxima etapa do trabalho.

1.4 Revisão bibliográfica

Os transformadores de distribuição são equipamentos essenciais na linha de distribuição de energia. São utilizados conhecimentos multidisciplinares para sua análise e projeto, tais como: Método analíticos envolvendo eletromagnetismo, elementos finitos, análise de regime permanente e transitório e estudos de como é o funcionamento da parte ativa do transformador. Por tanto, este trabalho propõe-se investigá-lo, recomendando efetuar uma análise bibliográfica, a qual foi dividido em dois tópicos: Análise do funcionamento da parte ativa do transformador e uma breve explicação da sua importância; métodos dos elementos finitos (SOBRINHO, 2019).

A referência (BERTINI, 1989), (CAMARGO, 2007), (NOGUEIRA; ALVES, 2009), detalha o aspecto do transformador consolidando informações essenciais desde a teoria, até as técnicas de proteção recente desenvolvidas. A importância do transformador, por isso faz-se necessário que a aplicação e o projeto sejam feitos corretamente, minimizando ou eliminando riscos na sua construção, instalação e segurança à vida humana.

Nas referências (OLIVEIRA, 2013), (TRANSFORMADORES, 2014), (MEIER, 2013), são discutidos a importância de fazer os ensaios, auxiliando o seu diagnóstico, tais como, a sua condição para instalação no sistema elétrico e a sua conformidade com as normas técnicas. Além disso, definir um método factível, prático e automatizado para a obtenção dos seus parâmetros, que isso não necessite das informações construtiva do transformador.

Os trabalhos de (MEEKER, 2015), (SOBRINHO, 2019) e (MEIER, 2013), foram utilizados os conceitos referentes ao método dos elementos finitos via *software* FEMM, para a escolha dos tipos de matérias, utilizados e o conceito básico do método para melhor entendimento.

Os trabalhos de (REZENDE; AZEVEDO, 2005), (PEREIRA, 1996), apresentou os resultados das análises da modelagem computacional de um transformador trifásico utilizando método dos elementos finitos e a verificação do método deu com a comparação do desempenho do modelo com os resultados encontrado no laboratório. Os resultados mostraram que o método utilizado foi bem satisfatório e com uma boa concordância com os valores calculados.

O trabalho de (OBRZINER, 2008), apresentou a estudo das equações de Maxwell e os modelos eletrocinético, eletrostático e as aplicações dos mesmos, notou-se que o método dos elementos finitos é bastante utilizado na engenharia para a solução das equações diferenciais proveniente das equações de Maxwell. A suas aplicações são bastante utilizadas onde não se tem soluções analíticas, a análise dos resultados obtidos com o método dos elementos finitos auxilia no projeto dos dispositivos elétricos e magnéticos.

A referência (SALUSTIANO, 2012), buscou mostrar o equacionamento para projetos de transformadores de distribuição de média tensão. Através de cálculos realizados foi notado que a necessidade de se utilizar dados para o desenvolvimento de melhorias de projetos independente de outros preexistentes. Para tal basta o conhecimento ou a capacidade de se estimar certos valores de entrada.

1.5 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 introdutório, é apresentado os principais conceitos que fundamentam o desenvolvimento do trabalho da seguinte forma: o enfoque central bem como a explicação de cada referência estudado, a justificativa, os objetivos gerais e específicos, a metodologia, por fim, a revisão bibliográfica.

O Capítulo 2, a respeito dos transformadores, inicia-se primeiramente com um levantamento bibliográfico para se obter conhecimentos referentes ao transformador, como é o seu funcionamento, suas características construtivas e os materiais que o compõem, a forma que é constituída o enrolamento do transformador, o processo de resfriamento para aumentar o seu rendimento, as perdas a vazio e perdas nos enrolamentos.

O capítulo 3, que trata o método dos elementos finitos MEF e *software* FEMM, apresenta uma descrição do método dos elementos finitos, bem como uma descrição de como é o seu desenvolvimento, a sua aplicação via *software* FEMM, a sua importância e como é capaz de resolver cálculos que são de difíceis entendimento. O procedimento para aplicação do MEF através do FEMM é realizado em quatro etapas: pré-processamento, processamento 1, processamento 2 e pós processamento.

Neste Capítulo o desenvolvimento do projeto é apresentado passo a passo de como inserir a geometria da parte ativa do transformador no *software* FEMM, com figuras e explicações de como utiliza-lo, ensinar como aplicar o MEF na geometria da parte ativa do transformador e como exportar o desenho projetado no FEMM para o *software* AutoCad.

2 TRANSFORMADORES

Os transformadores funcionam com o princípio do eletromagnetismo, baseado nas leis de Faraday e de Lenz. Estas duas leis relatam que para ser possível criar uma corrente elétrica em um determinado circuito, logo este deve está submetido a um campo magnético variável. Com isso, por ser necessário essa variação do fluxo magnético, os transformadores só conseguem trabalhar quando estão em correntes alternadas (KASPAREIT, 2015).

2.1 Características construtivas

O transformador é constituído por duas partes: a parte ativa do transformador que é onde fica o núcleo e as bobinas, e a parte complementar do transformador, que é constituído pela carcaça externa do transformador. A elevação da temperatura limita a potência a ser fornecida por um transformador. O aquecimento em excesso irá contribuir no envelhecimento precoce do isolamento, diminuindo assim a vida útil do transformador que é teoricamente de 65.000 horas de operação com o ponto mais quente do enrolamento de 95°C; por esses motivos o transformador deve ser construído com um material rígido, capaz de suportar todo tipo de condições, como altas temperaturas e correntes elevadas (KASPAREIT, 2015). A Figura 2 ilustra a parte ativa e a parte complementar de um transformador.

Figura 2 - Parte ativa e a parte complementar do Transformador.

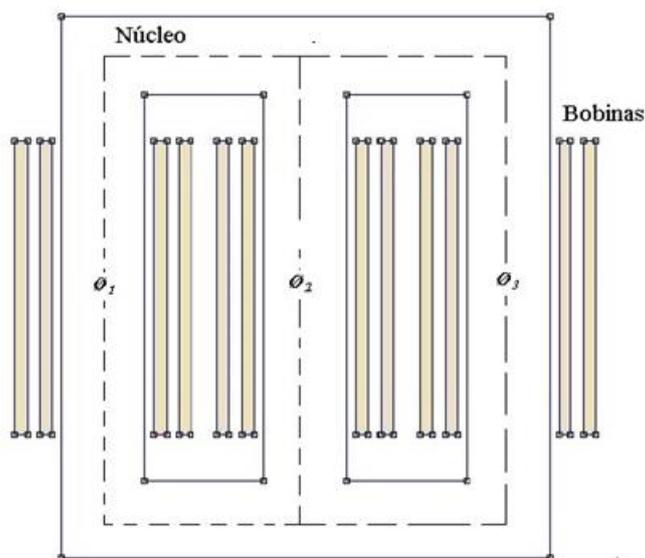


Fonte Escola Web.

2.2 Núcleo do transformador

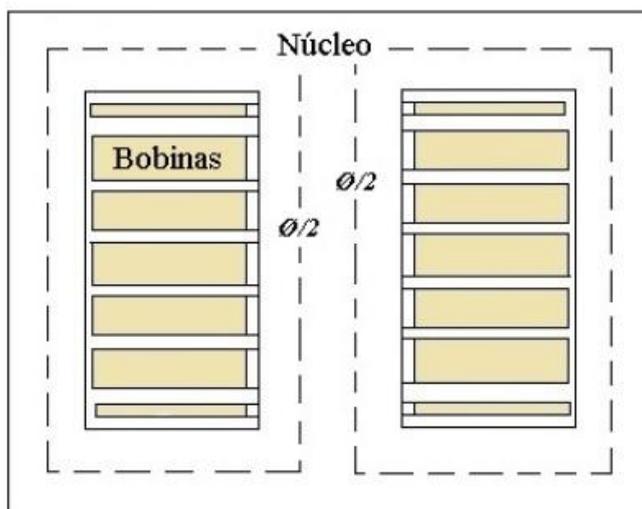
Na prática existem dois tipos de circuitos magnéticos para transformadores, isto é, o tipo de transformador com o núcleo envolvido e os transformadores de núcleo envolvente. As Figuras 3 e 4 ilustram os dois tipos de transformadores (SOBRINHO, 2019).

Figura 3 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido.



Fonte: (SOBRINHO, 2019).

Figura 4 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvente



Fonte (SOBRINHO, 2019)

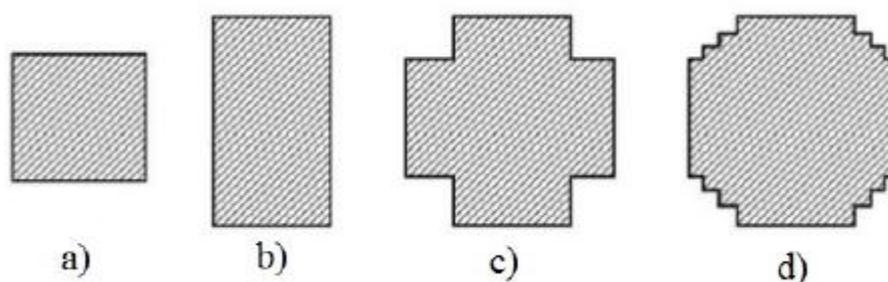
No núcleo envolvido as colunas são envolvidas pelos enrolamentos, conforme mostrado na Figura 3. Já o núcleo envolvente os enrolamentos ficam na parte interna das colunas, conforme mostrado na Figura 4 (MARTIGNONI, 1969).

Os núcleos dos transformadores são constituídos de lâminas ou chapas de ferrosilício com 1,5 a 8% de Silício, com uma espessura de 0,23mm e 0,35mm. É constituído por

colunas, onde são montadas as bobinas e pelas culatras que completam o retorno do circuito magnético do fluxo (MARTIGNONI, 1969).

A seção do núcleo pode ser dividida em várias partes, como: a) quadrada, b) retangular, c) cruciforme ou d) aproximadamente circular em degraus, como mostra a Figura 5 (SOBRINHO, 2019).

Figura 5 - Forma para seção do núcleo.



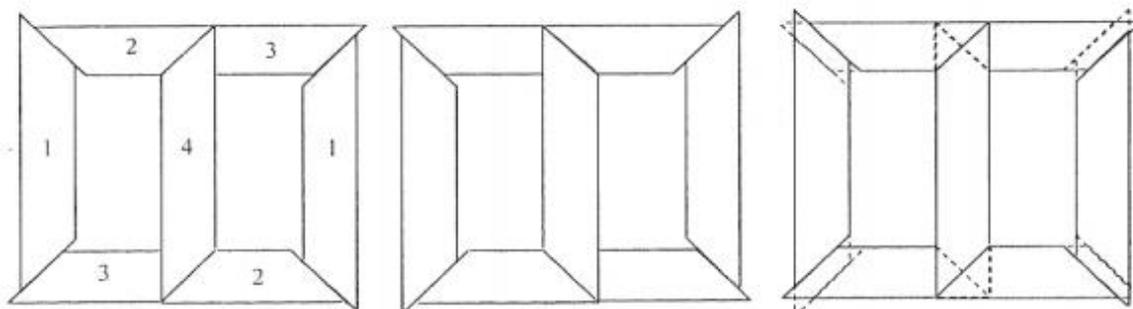
Fonte: (SOBRINHO, 2019).

Para o núcleo em degraus, como na Figura 5 (d), o problema consiste em inscrever, num círculo, uma seção escalonada, de área máxima para um dado número. A utilização do número de degraus para um diâmetro de núcleo é um compromisso com o custo de fabricação e as vantagens advindas de um maior coeficiente de utilização circular. O número de degraus também acaba aumentando o diâmetro do núcleo do transformador (SALUSTIANO, 2012).

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 (MARTIGNONI, 1969).

Essas chapas que compõe o núcleo que são chamadas de chapas de grãos orientados devido a melhor característica magnética no sentido de orientação dos grãos, procura-se fazer um corte de 45° em cada, pois assim, o fluxo magnético percorre o sentido de orientação dos grãos (SALUSTIANO, 2012). Para evitar o entreferro contínuo nas junções dessas chapas são desenvolvidos um deslizamento cíclico e o sentido desse deslizamento é alternado, como pode ser visto na Figura 6.

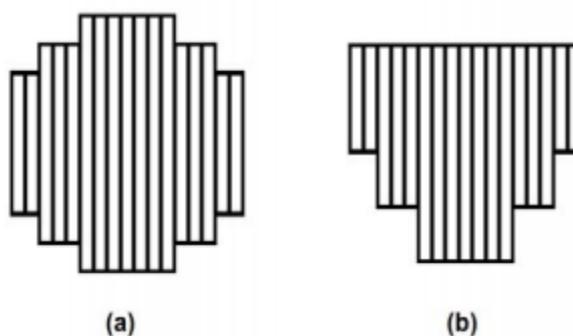
Figura 6 - Cortes das chapas em 45°.



Fonte: (SALUSTIANO, 2012).

As culatras podem ter dois formatos, o formato tipo escalonada circular como as colunas e o formato tipo escalonada com a face superior plana para a culatra superior e a face inferior plana para a culatra inferior, a Figura 7 mostra a representação a) escalonada circular e b) escalonada (SALUSTIANO, 2012).

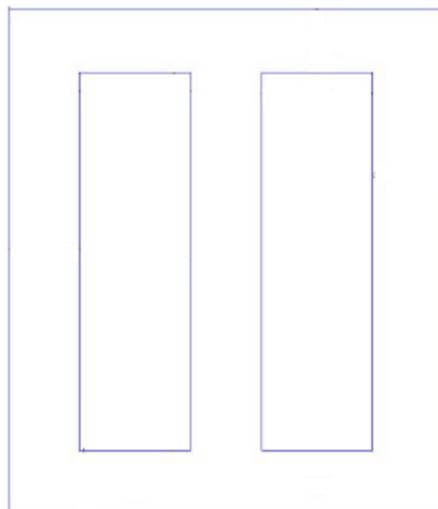
Figura 7 - Formatos das culatras.



Fonte (SALUSTIANO, 2012).

Para um melhor entendimento das principais grandezas da parte ativa do transformador, a Figura 8 mostra o desenho do seu núcleo. Afim de fazer a simulação eletromagnética via FEMM, este trabalho explica passo a passo de como construir as principais dimensões da parte ativa do transformador.

Figura 8 - Núcleo de um transformador trifásico.



Fonte Adaptada de SOBRINHO, 2019.

2.3 Enrolamento do Transformador

Os enrolamentos ou bobinas do transformador são considerados as partes mais importantes desse equipamento, por isso requerem muito cuidado para seus cálculos estejam corretos durante o projeto. A vida útil do transformador depende diretamente da vida útil das suas bobinas. Suas características elétricas e mecânicas devem ser capazes de suportar a grandes temperaturas, elevados valores de correntes e seu isolamento deve suportar os níveis de tensão de sua classe de tensão (SALUSTIANO, 2012). As bobinas normalmente são enroladas em um cilindro isolante que serve de base para elas. Esses cilindros são na maioria das vezes feito de papelão prensados.

Fundamentalmente os tipos existentes de bobinas do transformador são: bobina helicoidal que é o tipo de bobina mais utilizado para baixa tensão, ela é formada pelo condutor enrolado em forma de espiral em uma única camada, iniciando em um dos lados do enrolamento e terminando no outro. Bobina em camadas onde o fio é de seção circular ou retangular, normalmente é utilizado um cilindro isolante como base. O enrolamento em camadas é construído praticamente igual o helicoidal, a grande diferença é a presença das camadas. Bobina concêntricos onde duas bobinas de enrolamentos diferentes, uma com alta tensão e a outra com baixa tensão, por exemplo, são alinhadas e dispostas umas sobre as outras de forma centralizadas (SALUSTIANO, 2012).

Com a umidade absorvida pelo cilindro isolante, as bobinas devem ser compactadas em estufas antes de montadas sobre o núcleo. Este tipo de tratamento é realizado em temperaturas de 90 a 100° durante um período de 24 a 36 horas. Quando em tratamento de

secagem, as bobinas devem ser prensadas entre duas placas de ferro, sendo aconselhável que a pressão de prensagem permaneça ativa durante a perda de umidade das bobinas (SALUSTIANO, 2012).

2.4 Processo de Resfriamento do Transformador

Quando o transformador está em uso, ou seja, sua parte ativa está conduzindo correntes elétricas, tensões e fluxo magnéticos, o sistema perde energia por efeito Joule entre outros tipos de perdas, resultando no aquecimento do núcleo. Para amenizar essa situação o transformador precisa de um sistema de resfriamento para que não ocorra o aquecimento exorbitante e descontrolado do núcleo (SOBRINHO, 2019).

Uma forma de evitar que os transformadores atinjam valores que podem danificar os isolamentos, são utilizando alguns processos de resfriamento do óleo, tais como: refrigeração natural, ventilação forçada, circulação do óleo e refrigeração a água. Nos transformadores de média tensão a forma mais utilizada para ter uma boa temperatura no núcleo é por refrigeração forçada, onde é feita a circulação natural do óleo, que retira o calor do sistema núcleo-bobina, transferindo-o para o ambiente externo do transformador. Este processo também é chamado de “líquido natural”. Outra forma de resfriar a parte ativa do transformador de média tensão é utilizando a ventilação forçada onde, neste caso são instalados ventiladores, com a finalidade de aumentar a ventilação do ar nos radiadores, aumentando assim a transferência de calor do óleo para o exterior do tanque. Este processo também é conhecido como “Líquido com ventilação forçada” (SALUSTIANO, 2012).

A função do óleo é basicamente para fazer resfriamento e ajudar na isolação entre núcleo e bobina. Este é extraído do petróleo, para pôr tratamento específico e destinado para a utilização em transformadores, chaves elétricas, disjuntores e outros equipamentos. No requisito de isolamento o óleo deve ser isento de umidade e de contaminantes e para o resfriamento deve possuir uma viscosidade baixa e um baixo ponto de fluidez para facilitar a sua circulação entre o sistema de refrigeração (SANTOS, 2006).

2.5 Perdas nos enrolamentos

As perdas nos enrolamentos são referentes às perdas por efeito Joule. Essas perdas estão relacionadas com a variação da carga do transformador, mais concentrada com o quadrado da corrente drenada pela carga ligada no enrolamento secundário.

As perdas por efeito Joule ocorrem em forma de calor, devido à resistência ôhmica dos enrolamentos do transformador. Essas perdas são conhecidas como perdas no cobre que

são causadas pelos efeitos da histerese magnética e das correntes parasitas, conhecida como correntes de Foucault.

2.6 Perdas a vazio

As perdas a vazio são produzidas através da somatória das perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault e pela perda por histerese magnética. Estas perdas são persistentes aos equipamentos que envolvem fluxos variáveis no tempo para sua operação (BERTINI, 1989). As perdas a vazio dependem unicamente da tensão de alimentação para suprir o fluxo magnético, o enrolamento que é utilizado para pôr a tensão de alimentação é o de baixa tensão do transformador onde é absorvida uma corrente denominada de corrente a vazio (I_0), que pode chegar a ordem de até 6 (%) da magnitude da corrente nominal (I_n) desse enrolamento (SOBRINHO, 2019).

2.7 Densidade de fluxo magnético

A densidade de fluxo magnético, cuja a unidade de medida é tesla (T), é a medida da concentração do fluxo magnético em um devido material. Geradores, motores e transformadores são equipamentos que permitem a passagem de elevadas densidades de fluxo magnético. A densidade do fluxo magnético define uma grandeza cuja intensidade está relacionada com as propriedades magnéticas do material, como a permeabilidade às linhas de fluxo. A Equação 1 a seguir é para encontrar a densidade de fluxo magnético.

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

Onde:

B = Densidade de fluxo magnético (T);

Φ = Fluxo magnético (Wb);

A = Área (m^2)

2.8 Conclusões

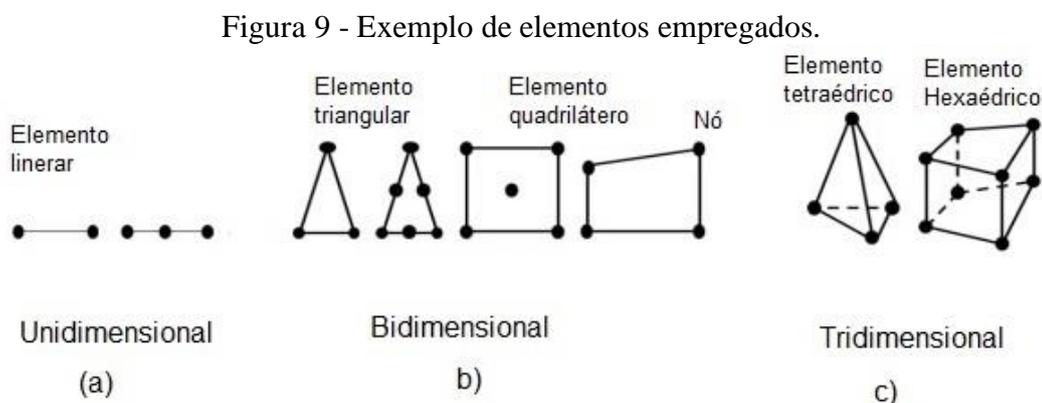
Neste Capítulo, foi descrito as principais etapas para a construção de um transformador de distribuição trifásico, bem como: perdas a vazio, as correntes de magnetização a vazio, como é constituído o núcleo e as bobinas da parte ativa do transformador.

3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS MEF E *SOFTWARE* FEMM

O Método dos Elementos Finitos, denominado MEF, pode ser aplicado em diferentes estruturas geométricas e ambientes que tem várias mudanças no meio. Este método tem uma formulação matemática muito trabalhada, sendo um conjunto de técnicas e métodos que se baseia na discretização de uma figura geométrica em partículas menores, denominadas em elementos finitos que são conectadas por pontos chamados de nós e a são nomeados de planos nodais ou linhas (SOBRINHO, 2019).

O MEF foi inicialmente divulgado por volta dos anos 1950 na resolução de problemas de empenho em fuselagem de aeronaves, e em meados de 1960 foi utilizado pela primeira vez na obtenção de resolução de problemas eletromagnéticos. Com o grande reconhecimento em resoluções de problemas importantes, vários *softwares* foram criados para a obtenção do MEF (SOBRINHO, 2019). Um dos *softwares* que utiliza o método mencionado é o FEMM, o qual é detalhado durante o decorrer deste trabalho.

A Figura 9 apresenta um melhor entendimento dos conceitos apresentados sobre MEF.



Fonte (SOBRINHO, 2019).

Algumas vantagens e desvantagens da utilização do MEF são citados abaixo:

- Com o conceito de função de interpolação (aproximação) a solução é conhecida para qualquer ponto do domínio estudado;
- Os sistemas matriciais adquiridos são simétricos e esparsos, o que a solução mais eficiente;
- A implementação é complexa, mas, porém, é genérica;
- Não há problemas em aplicar o MEF em geometrias irregulares;

- A equação tem solução de forma integral, a equação diferencial é satisfeita segundo um certo critério de minimização do resíduo. Isso dá ao problema mais flexibilidade e generalidade no método para resolver problemas;

O MEF em *softwares* comerciais é bastante utilizado por apresentar uma precisão com a ajuda do grau da função aproximada que pode ser aumentado sem aumentar consideravelmente o número de nós. Com isso, o MEF torna-se adequado para limitação de memória (PEREIRA, 1996).

3.1 Equações de Maxwell

A maioria dos problemas que envolvem eletromagnetismo podem ser resolvidos utilizando as equações de Maxwell. As equações de Maxwell são formadas por quatro leis que, em conjunto com outras equações construtivas, dão origem a fenômenos diversos como onda eletromagnética e os campos que regem o imã permanente (SOBRINHO, 2019).

Com base nos estudos de Michael Faraday, Maxwell unificou em 1864, todas as equações e fenômenos elétricos e magnéticos, seu trabalho estabeleceu uma conexão entre várias teorias da época, derivando assim uma das teorias mais utilizada e estudada no eletromagnetismo (OBERZINER, 2008).

Neste trabalho utiliza o modelo magnetostático, onde são descritas duas das quatro leis de Maxwell no domínio do eletromagnetismo de baixa frequência, as quais compreendem partes de equipamentos eletromagnéticos como transformadores, motores elétricos, relé, entre outros. As equações de *Maxwell* são referidas nos dois campos vetoriais, ou seja, o campo elétrico e o campo magnético, que interagem com os princípios do eletromagnetismo (SOBRINHO, 2019).

As Equações 2 e 3 que são as equações de *Maxwell* que fazem a descrição do modelo magnetostático são:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

Onde:

\mathbf{B} é a densidade do fluxo magnético [T];

\mathbf{H} é a intensidade do campo magnético [A/m];

\mathbf{J} é a densidade de corrente nos condutores das bobinas [A/mm^2];

As Equações 2 e 3 são conhecidas como Lei de Ampère e a Lei de Gauss Magnética.

A Lei de Ampère descreve a relação do campo magnético e a corrente elétrica que da a sua origem. Ela explica que o campo elétrico sempre é construído por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável, o que acontece entre as bobinas e o núcleo do transformador. A segunda maneira de se obter o campo magnético foi previsto pelo próprio Maxwell, com a base na simetria da natureza, “Se um campo magnético variável induz uma corrente elétrica, e conseqüentemente um campo elétrico, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético” (OBERZINER, 2008).

A lei de Gauss, que é a primeira Lei de Maxwell, foi proposta pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855), onde essa lei é equivalente em situações estáticas a uma outra bem conhecida, a lei de Coulomb. Ela relaciona os campos elétricos e suas fontes, as cargas elétricas, e pode ser aplicada mesmo para campos variáveis com o tempo isso no requisito de elasticidade. A lei de Gauss para o magnetismo é aplicada em campos magnéticos evidenciando ainda a não existência de monopólios magnéticos. Essa lei explica que as linhas de campos são contínuas, ao contrário das linhas de força de um campo elétrico que tem a origem em cargas elétricas positivas e terminam em cargas elétricas negativas (OBERZINE, 2008).

3.2 Aplicação do método dos elementos finitos na análise de transformadores trifásicos

Os campos magnéticos e elétricos dos transformadores são descritos através de equações diferenciais de segunda ordem, no qual a sua solução analítica é de difícil obtenção. Devido a isso emprega-se a técnica do método dos elementos finitos na modelagem do transformador para a análise eletromagnética (SOBRINHO, 2019).

A análise eletromagnética do transformador é realizada através das simulações do *software* FEMM. Para que ocorra essa análise são definidas as geometrias do transformador, as propriedades dos materiais e as condições de contorno do transformador em projeto. Este *software* faz a análise eletromagnética de forma a possibilitar a exportação para outro *software* bastante conhecido, que é o Autocad. A importância de transportar a solução do FEMM para o Autocad é para facilitar a inserção das cotas no projeto (SOBRINHO, 2019).

O método dos elementos finitos através do aplicativo FEMM, é dividido em quatro etapas: pré-processamento, processamento 1, processamento 2 e pós-processamento.

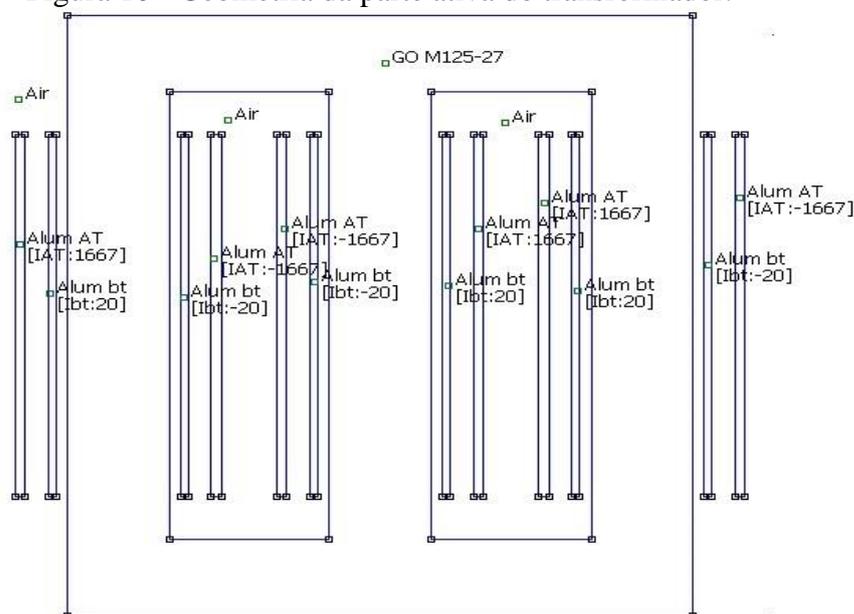
3.3 Pré-processamento

Nesta primeira etapa é desenhada a geometria da parte ativa do transformador a qual é formada pelo núcleo, bobinas e isolações no núcleo (SOBRINHO, 2019). Também são

definidas as propriedades que têm as seguintes características e condições: Materiais que compõem a parte ativa do transformador, como condutores das bobinas, ar, tipos de material que o núcleo é composto, números de espiras no enrolamento de alta e baixa, valor de corrente de fase e sentido de corrente que passa nas bobinas; condições de contorno, fluxo magnético, sentido do fluxo magnético nas culatras e colunas.

A Figura 10 mostra a geometria da parte ativa do transformador para análise eletromagnética do transformador projetado via método dos elementos finitos através do *software* FEMM.

Figura 10 - Geometria da parte ativa do transformador.



Fonte: Acervo do Autor.

Onde:

GO M125-27: é o material que constitui o núcleo;

Air: é o tipo de isolamento;

Alum AT: são as bobinas de alta tensão;

Alum bt: são as bobinas de baixa tensão;

O núcleo do transformador é formado em três dimensões, porém o *software* FEMM faz a simulação com a análise eletromagnética em duas dimensões. A profundidade da simulação do FEMM no caso, é realizada pela Equação 4.

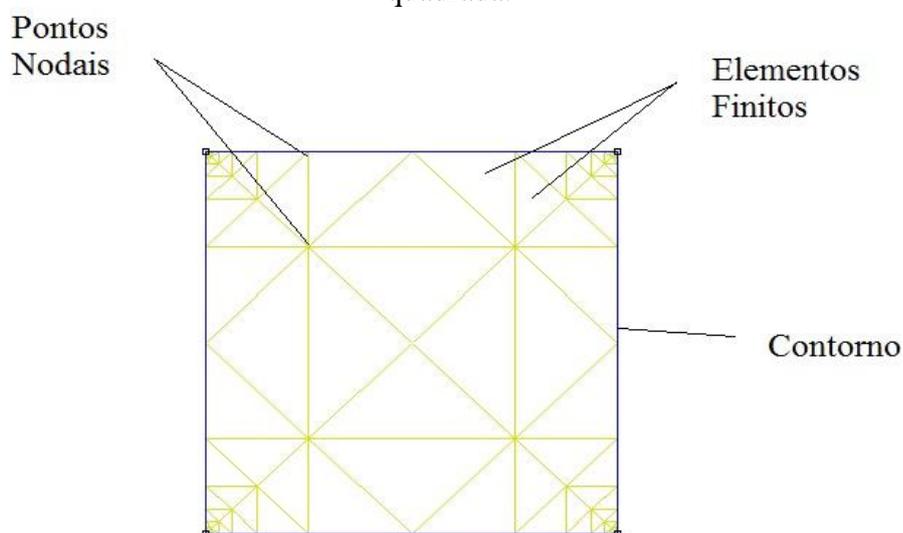
$$Prof\ fem = \frac{Abc}{wc} \quad (4)$$

3.4 Processamento 1

Nesta etapa é realizado a subdivisão do domínio de estudo em pequenos subdomínios, que são denominados de elementos finitos, onde são conectados por pontos chamados de nós, o conjunto desses nós e linhas interligada entre eles dá origem a malha eletromagnética que é a parte mais importante do nosso trabalho, é nesta etapa que o FEMM faz a análise de cada ponto da geometria do transformador. (REZENDE; AZEVEDO; CARVALHO; DELAIBA; OLIVEIRA, 2005).

O agrupamento de elementos finitos e pontos nodais ligados por linhas é chamado de malha de elementos finitos, mostrado na Figura 11.

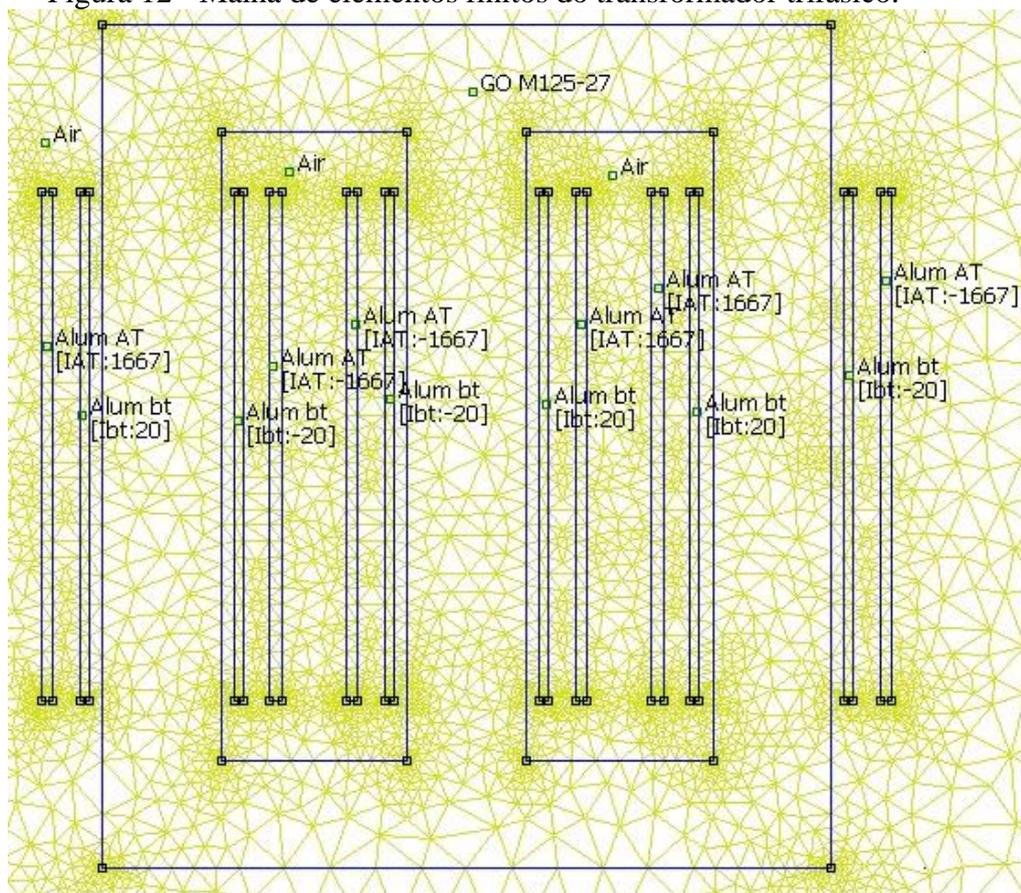
Figura 11 - Exemplo de uma malha gerada no software FEMM em uma geometria quadrada.



Fonte: Extraído da simulação do software FEMM (SOBRINHO, 2019).

A Figura 12 mostra a malha de elementos finitos criada na seção transversal do modelo do transformador trifásico estudado.

Figura 12 - Malha de elementos finitos do transformador trifásico.

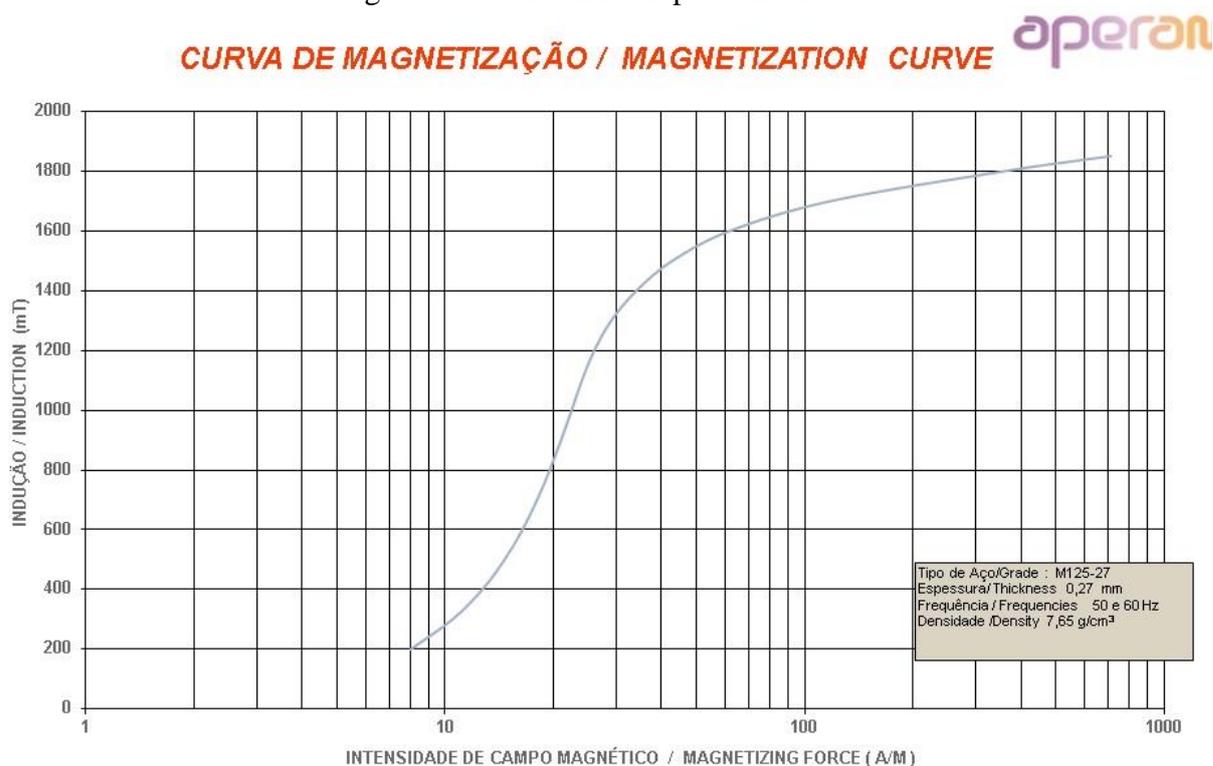


Fonte: Acervo do Autor.

3.5 Processamento 2

No processamento 2 são realizados os cálculos, os quais, são resolvidos pela divisão da geometria da parte ativa do transformador em elementos menores de forma triangular. Os elementos das malhas são resolvidos através de aproximações por interpolação linear. Já os dados referentes às curvas BH do material do núcleo as aproximações são realizadas por interpolações por *spline cúbicas* (SOBRINHO, 2019). A Figura 13 apresenta a curva BH do material do núcleo do transformador.

Figura 13 - Curva BH chapa do núcleo



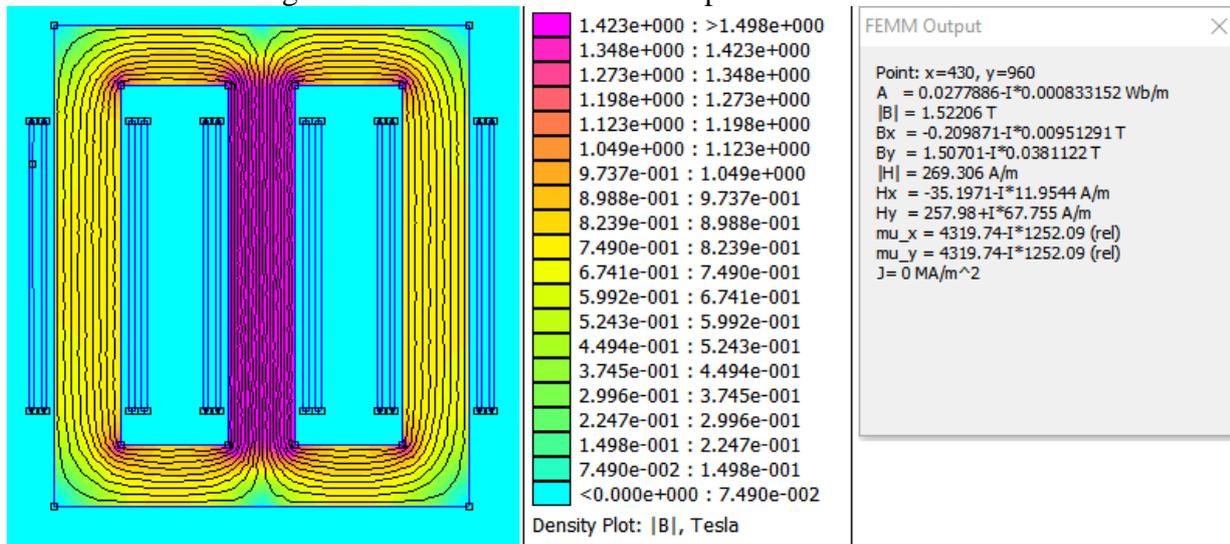
Fonte: (SOBRINHO, 2019).

Os dados referentes à curva BH são inseridos no *software* FEMM.

3.6 Pós-processamento

O pós-processamento é constituído por resultados gráficos obtidos para os campos magnéticos, na forma de gráficos da densidade fluxo, obtém também os valores das perdas a vazio, perda nos enrolamentos e demais grandezas (REZENDE; AZEVEDO; CARVALHO; DELAIBA; OLIVEIRA, 2005). A Figura 14 foi retirada da simulação do *software* FEMM e apresenta os resultados das densidades do fluxo de um transformador com os valores da densidade de fluxo magnético, as perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos.

Figura 14 - Densidade do fluxo da parte ativa do Transformador.



Fonte Acervo do Autor.

A Figura 14 representa a densidade de fluxo magnético onde as cores mais intensas significam a região que o fluxo magnético é maior, como por exemplo no centro do núcleo e as cores mais claras é a região que o fluxo magnético é menos que é na parte mais externa do núcleo.

3.7 Conclusões

Neste tópico foram apresentadas as duas equações de Maxwell que são utilizadas nas condições constitutivas de contorno na modelagem magnétostática. Apresentou a importância do *software* FEMM para a resolução de problemas de elementos finitos. O *software* foi a ferramenta base para a produção deste trabalho, dispõe também de interatividade entre a geométrica do transformador e seus aspectos físicos para a solução dos problemas eletromagnéticos.

É apresentado a explicação do MEF, como é constituído e aplicado na geometria da parte ativa do transformado e também a divisão das quatro etapas que é feito a sua análise para ter a obtenção dos resultados finais.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nesta parte do trabalho será apresentado cada procedimento de como construir a geometria da parte ativa do transformador, definição dos materiais dos núcleos, bobinas, isolante e etc. Será explicado o passo a passo de como produzir um projeto. As quatro etapas de pré-processamento, processamento 1, processamento 2 e pós-processamento serão detalhadamente explicado através de figuras, textos e além disso, será apresentado como realizar cada comando do *software* FEMM e como obtê-los.

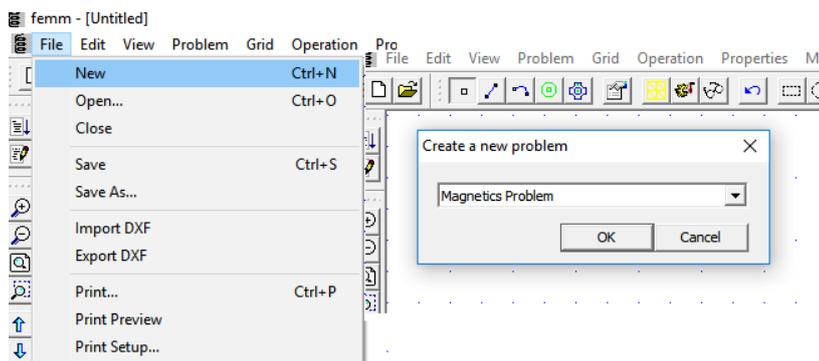
A forma de instalar o *software* FEMM no computador é simples, pois basta realizar uma pesquisa eletrônica e procurar por “*Finite Element Method Magnetics : HomePage*”, no qual encontra-se no site o *software* é: <http://www.femm.info/wiki/Download> e clicar na aba de executável de 32 bits. Onde irá baixar o arquivo executável com o nome “femm42bin_32_21Apr2019.exe”, o usuário deverá clicar na opção “Executar”, após deve aceitar os termos de contrato e acionar a tecla “Next” por três vezes seguidas e finalmente no item “Install”.

4.1 Passo a passo do Pré-processamento

Nesta parte do trabalho será explicado detalhadamente como apresentar cada ponto do núcleo para se possível realizar a ligação de cada ponto e assim construir a geometria desejada da parte interna do transformador. É na etapa do pré-processamento que são definidos os tipos de materiais e as características que compõem a parte ativa do transformador.

Para iniciar a simulação de um projeto no *software* FEMM deve-se abrir o programa e logo ir na barra de ferramenta no item “File” e clicar na ferramenta “new” onde vai abrir uma janela denominada “Create a new problem”, por se tratar de um transformador o usuário deverá escolher a opção “magnetics problem” e assim poderá iniciar a construção da geometria da parte ativa do transformador. A Figura 15 mostra cada item mencionado para iniciar a construção do desenho.

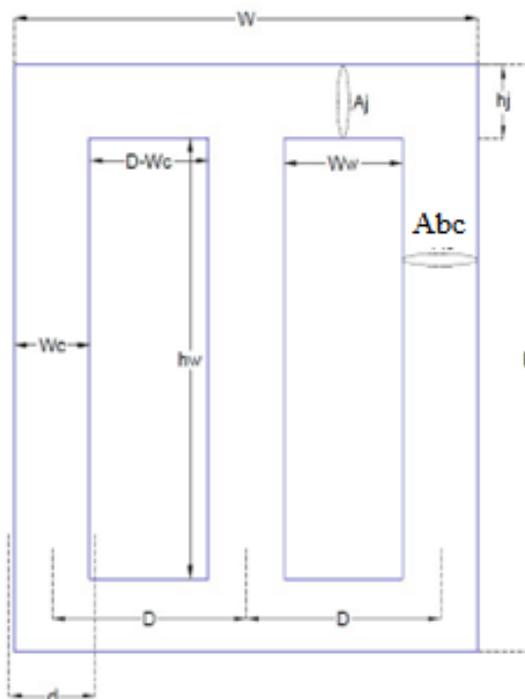
Figura 15 - Ferramentas utilizadas para iniciar a construção da parte ativa do transformador.



Fonte: Acervo do autor.

Para construir a geometria do núcleo, é necessário ter as dimensões de cada componente que constitui a parte ativa do transformador. A Figura 16 mostra todas as dimensões necessárias para a construção do transformador.

Figura 16 - Dimensões do Núcleo.



Fonte: Adaptada de SOBRINHO, 2019.

Onde:

Abc é a área bruta da coluna [mm^2];

Aj é a área do jugo ou da culatra [mm^2];

d é a distância entre o enrolamento de baixa tensão [mm];

D é a distância entre os centros das duas colunas do núcleo [mm];

H é a altura total do núcleo [mm];

h_j é a altura da culatra [mm];

h_w é a altura da janela [mm];

W é a largura total do núcleo envolvido [mm];

W_c é a maior largura da coluna do núcleo do transformador [mm];

W_w é a largura da janela [mm];

A Tabela 1 contém todos os valores de cada comprimento e área necessários para realizar a da construção do núcleo.

Tabela 1 - Descrições de dimensões do Núcleo

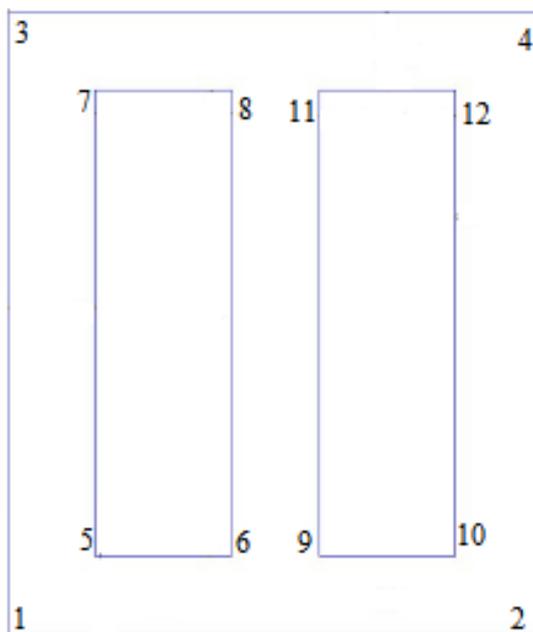
Simbologia	Descrição	Unidade	Valores
Abc	Área bruta da coluna	mm ²	16322
Aj	Área do jugo ou da culatra	mm ²	130,68
d	Distância entre o enrolamento de baixa tensão	mm	174,76
D	Distância entre os centros das duas colunas do núcleo	mm	370
H	Altura total do núcleo	mm	1033,86
h_j	Altura da janela	mm	130,69
h_w	Altura total do núcleo envolvido	mm	772,49
W	Largura total do núcleo envolvido	mm	884,46
W_c	Maior largura da coluna do núcleo do transformador	mm	143,80
W_w	Largura da janela	mm	226,53
I_0	Corrente de magnetização a vazio	A	8,99
P_0	Perdas a vazio	W	531,46
P_j	Perdas por efeito joule	W	1373,70

Fonte: (SOBRINHO, 2019).

A Figura 16 apresenta todas as coordenadas e como fazer os cálculos para encontrar essas coordenadas que são importantes na construção geométrica da parte ativa do núcleo, para ter um entendimento dos procedimentos explicados após a Figura 17. A Figura 17 vem para ter uma breve explicação de como vai ser e como é feito todos os cálculos para achar os pontos de cada parte do núcleo, assim construindo ele por inteiro. Essas medidas foram

retiradas de um transformador já executado, como todos os cálculos e estudos analisados e explicado pelo referência (SOBRINHO, 2019).

Figura 17 - Coordenadas dos pontos da Parte ativa do Núcleo.



Fonte Acervo do Autor.

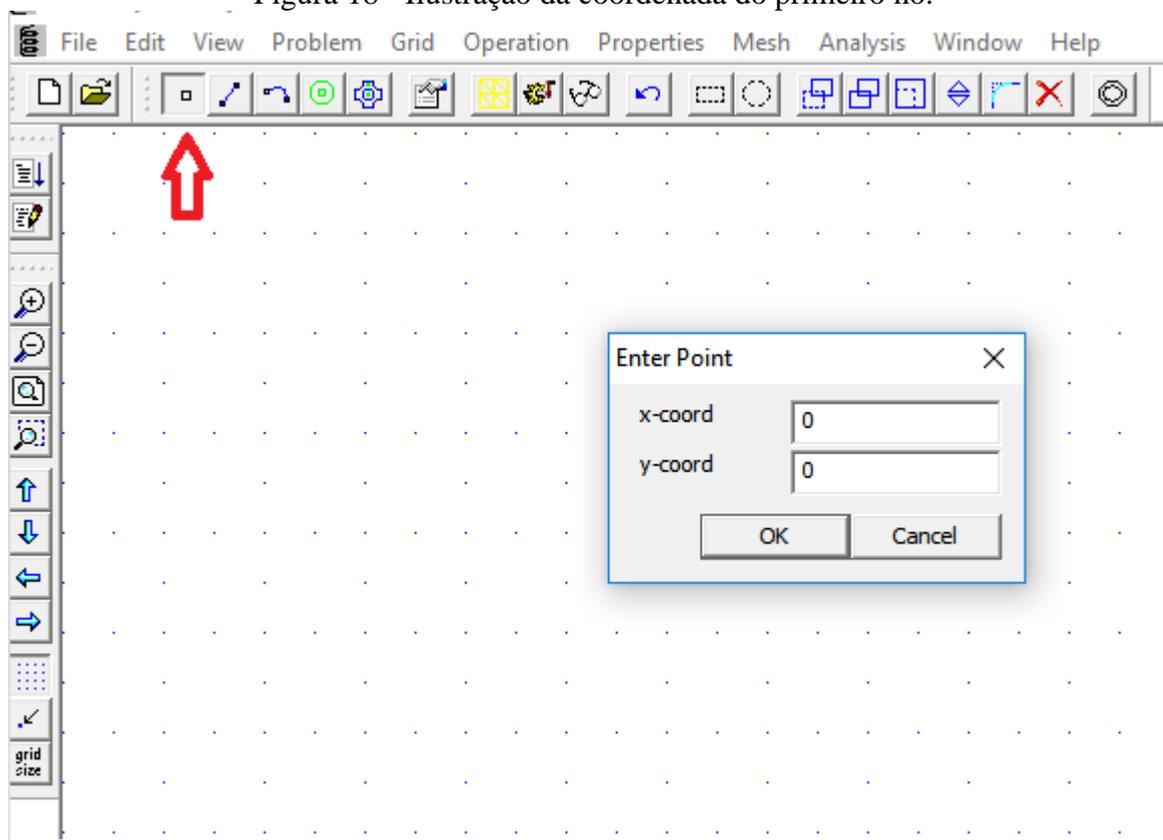
Onde:

- 1: é a Coordenada de (0,0)
- 2: é a coordenada de (0+W,0);
- 3: é a coordenada de (0+W, 0+H);
- 4: é a coordenada de (0, 0+H);
- 5: é a coordenada de (0+wc, 0+hy);
- 6: é a coordenada de (Wc+Ww, 0+hy);
- 7: é a coordenada de (0+Wc, hj+hw);
- 8: é a coordenada de (Wc+Ww, hj+hw);
- 9: é a coordenada de (2Wc+Ww, 0+hj);
- 10: é a coordenada de (W-Wc, hj);
- 11: é a coordenada de (2Wc+Ww, hj+hw);
- 12: é a coordenada de (W-Wc, hj+hw);

Sabe-se que a altura total do núcleo é de $H = 1033,869501$ [mm] e sua largura é de $W = 884,4658$ [mm], com esses dois dados já pode-se fazer a parte externa do núcleo. Basta abrir o programa FEMM e ativar a ferramenta “*operate on nodes*” que esta indicada com a seta na Figura 17. Após ativar a ferramenta de operar em nós tem-se que clicar a tecla “TAB”

do teclado, com isso a janela “*Enter Point*” irá abrir, assim é possível inserir as coordenadas do primeiro ponto que será $x\text{-coord} = 0$ e $y\text{-coord} = 0$ assim cria-se a referência x-y do plano. Para melhor entendimento a Figura 18 ilustra a janela Enter Point com a coordenadas já no ponto 0.

Figura 18 - Ilustração da coordenada do primeiro nó.



Fonte: Acervo do Autor

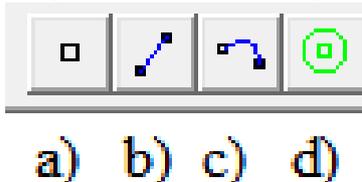
Logo após inserir o ponto de origem, desloca-se para o ponto 2, na distância da largura do transformador, clicando a tecla “TAB” novamente para poder iniciar o comando de “inserir nó” e colocar na coordenada x o valor da largura que é de $W = 884,4658$ [mm], e na coordenada y o valor 0. Com isso o próximo ponto se deslocará com valor pedido na largura.

Para fazer os pontos da parte externa superior do núcleo o procedimento é da mesma forma, aperta-se a tecla “TAB” inserir as coordenadas do ponto 3, para ter a altura total correta do núcleo, que nesse caso é de $H = 1033,869501$ [mm], mas agora essa distância será colocada na coordenada y e na coordenada x vai ser igual a 0.

E para inserir o último ponto 4 da parte externa do núcleo deve-se acionar a tecla “TAB” e inserir as coordenadas do último ponto, que é na coordenada x igual a altura total do núcleo $H = 1033,8695501$ [mm] e na y igual a largura do total do núcleo $W = 884,4658$

[mm]. Por último para realizar a ligação de cada nó deve-se clicar na parte superior onde está locado as ferramentas do programa o item “*operate on segments*” e com isso ir interligando cada ponto desejado. A Figura 19 ilustra cada comando da ferramenta superior do programa onde: a) para fazer pontos-nós, b) fazer a ligação dos nós, c) fazer uma circunferência ligando dois nós, d) acrescentar o tipo de material que deseja por no local.

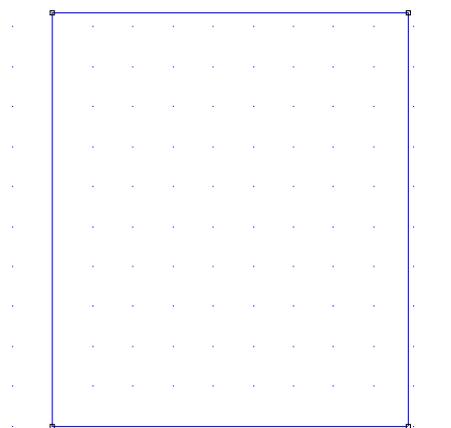
Figura 19 - Ilustração da ferramenta superior do *Software*.



Fonte: Acervo do Autor

Após fazer a ligação dos pontos com o comando “*operate on segments*”, logo irá perceber que a geometria externa do núcleo é no formato de um retângulo, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Geometria quadrada da parte externa do núcleo.



Fonte: Acervo do Autor

Próximo passo é construir as janelas que ficam na parte interna do núcleo, lembrando que as duas janelas devem ter os mesmos valores para largura, altura e distância entre elas e da parte interna do núcleo.

Encontrar as dimensões das janelas já é um pouco mais trabalhoso, pois o primeiro ponto da janela na parte da direita é preciso ter o tamanho de $W_c = 143.7973$ [mm] e a altura desse ponto deve ser igual o valor encontrado através da Equação 5.

$$hj = \frac{H - hw}{2} = \frac{1034 - 773}{2} = 130 \quad (5)$$

Onde:

hj é a altura da culatra (mm);

H é a altura do núcleo (mm);

hw é a altura da janela (mm);

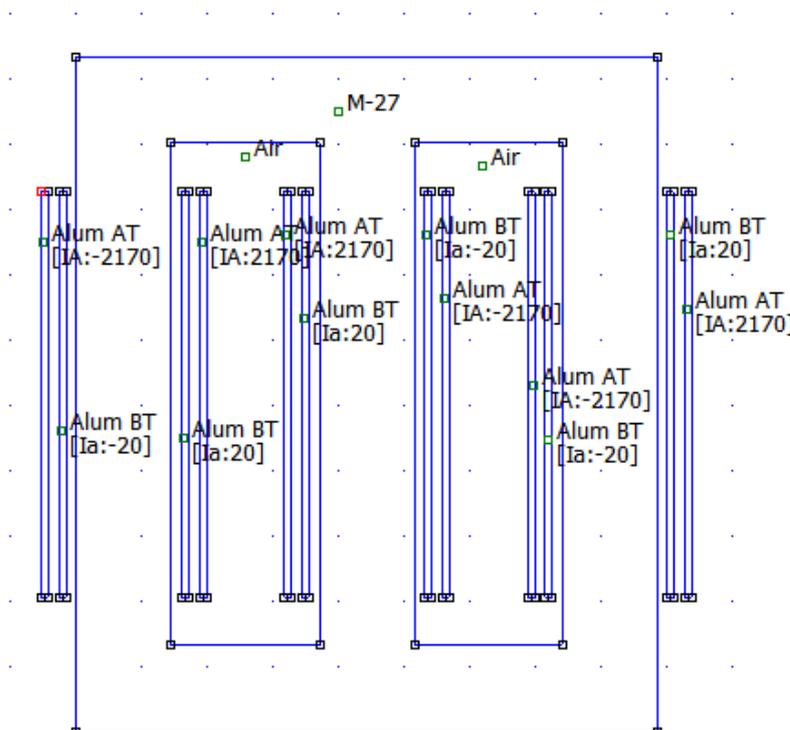
Para encontrar o próximo ponto na horizontal, deve-se inserir a soma do valor de Wc com o valor Ww para ter o ponto na coordenada x. Na coordenada y basta por o valor de hj. Com isso o último nó da parte horizontal da janela será inserido.

Nos pontos da parte superior da janela deve-se inserir o valor de Wc na coordenada do eixo x e na coordenada do eixo y incluir a soma de hj com a largura total do núcleo envolvido assim será encontrado o primeiro ponto superior da janela esquerda. O próximo ponto é a soma de Wc com Ww no eixo x e no eixo y é a soma do hj com a largura total do núcleo. O último procedimento é a ligação dos pontos e com isso repetir todos os procedimentos para criação da janela interna do lado direito.

O próximo passo é a construção das bobinas de alta e baixa tensão que são envolvidas no núcleo, assim a geometria da parte ativa do núcleo estará completa. A primeira forma de achar cada ponto é analisar onde estará cada uma das bobinas.

Cada bobina tem a largura de 11 milímetros e a distância de uma bobina para outra é de 16 milímetros, assim é possível calcular a coordenada de cada ponto para cada bobina tendo como base a Figura 21 para ter uma melhor explicação como ficará a parte ativa com as bobinas já construídas. Lembrando que as bobinas mais próximas das colunas do núcleo são as de baixa tensão e as bobinas mais distantes são das bobinas de alta tensão.

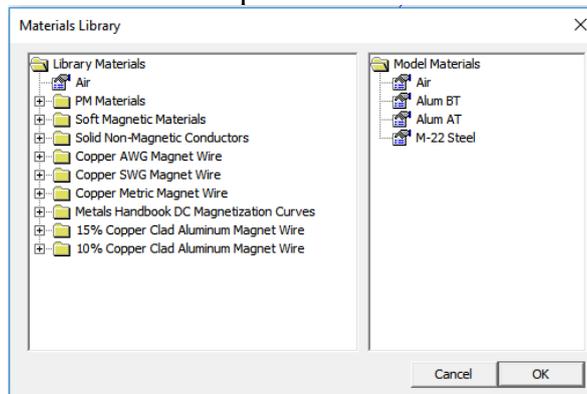
Figura 21 - Parte ativa completa do transformador.



Fonte: Acervo próprio do Autor

A última etapa do Pré-processamento é a parte que inclui o material utilizado na parte ativa do núcleo, nos enrolamentos de alta e de baixa tensão e na parte isolante do núcleo. Para viabilizar a inclusão dos materiais em cada ponto desejado é preciso ir na barra de “ferramentas” no comando “*Properties*” e depois em “*Materials Library*”, em seguida pesquisar o material desejado, acionar o botão direito do mouse e arrastar para a janela da parte direita, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Ferramentas para inserir os materiais desejados.



Fonte: Acervo do Autor

Após a obtenção de todos os materiais e suas características, deve-se clicar na ferramenta denominado de “*material node*” da barra de ferramenta onde se localiza na parte

superior do *software* e está identificada com a letra a na Figura 23, ir na região que deseja-se fixa o tipo de material, e o local onde ele vai ser aplicado e clicar com o botão direito do mouse.

Após ter acionado o comando de material node o próximo passo é clicar na barra de espaço do teclado que abrirá a janela, nesta etapa o usuário escolherá, para cada região (núcleo, bobinas e o isolamento do núcleo), o tipo de material a ser utilizado.

A Figura 23 apresenta os dois botões para inserir o material no lugar desejado e escolher o tipo de material para aquele lugar.

Figura 23 - a) botão de inserir o ponto do material e b) botão de inserir o material que deseja inserir no local.



Fonte: Acervo do Autor.

Com isso a construção da parte ativa do núcleo está completa e pronto para passar para a próxima etapa do desenvolvimento do método dos elementos finitos utilizando o *software* FEMM.

4.2 Passo a passo dos processamentos 1 e 2

No processamento 1 e 2 será realizada a divisão da geometria da parte ativa do transformador em subdomínios menores, em que esses subdomínios é denominado de elemento finito que geralmente na forma geométrica triangular para um melhor alcance da abrangência de toda a geometria original do transformador.

A união de cada ponto de todos os subdomínios dá-se a existência da malha, onde ela é a parte crucial do MEF, pois é com a malha dos elementos finitos que se obtêm o resultado por aproximação de todas as áreas da forma triangular.

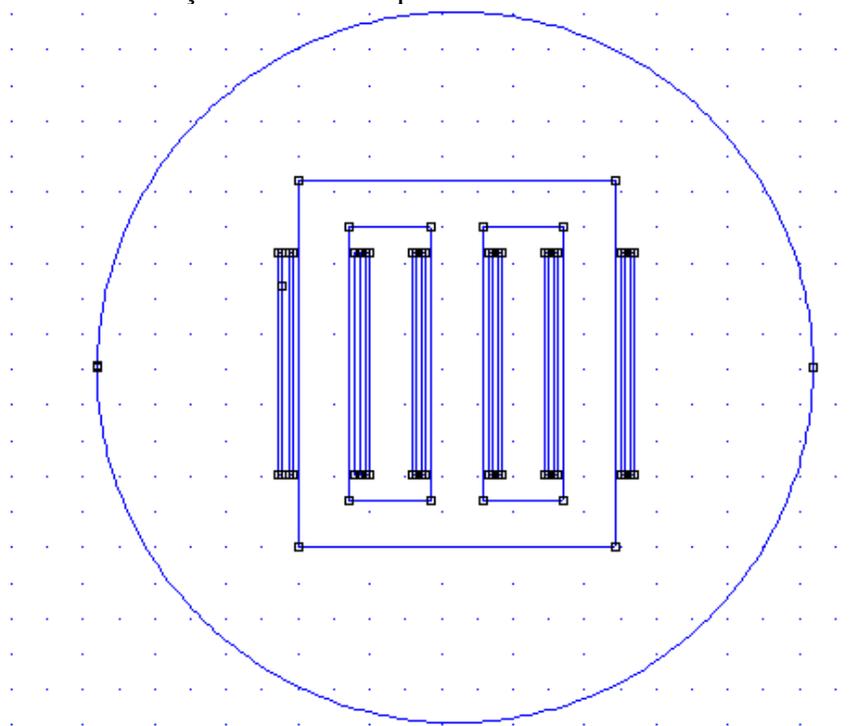
Para aplicar esta etapa no *software* é menos trabalhoso do que o processamento anterior, pois, é necessário apenas a utilização do comando “*Run mesh generator*” para ter toda a divisão da geometria da parte ativa do transformador, mas antes de aplicar a malha no núcleo deve-se fazer mais dois pontos para ter uma condição de contorno e assim limitando até onde essa malha será inserida.

Esses dois pontos são simples de incluir, basta ativar a ferramenta “*operate on nodes*” e acionar a tecla “TAB” do teclado e inserir na coordenada x o valor de -507 e na coordenada y o valor de 507, assim aparecerá um ponto com a distância de 507 a esquerda

do ponto de origem e no centro de toda a geometria do núcleo, o segundo ponto é com o mesmo procedimento, mas para ter a mesma distância é preciso somar a largura do núcleo com o valor de 507 milímetros que assim será inserido a direita do eixo x com o valor de y sendo o mesmo do ponto anterior.

Após ter inserido os dois pontos deve-se fazer a ligação entre eles que é através do item “*operate on arc segments*” onde é localizado na parte superior da barra de ferramentas do *software* e assim interligar um ponto ao outro fazendo uma circunferência ao redor do núcleo. Essa circunferência é o limite para a malha que será aplicada. A Figura 24 demonstra os dois pontos e a ligação pelo círculo entre eles.

Figura 24 – Condição de contorno para malha dos elementos finitos.

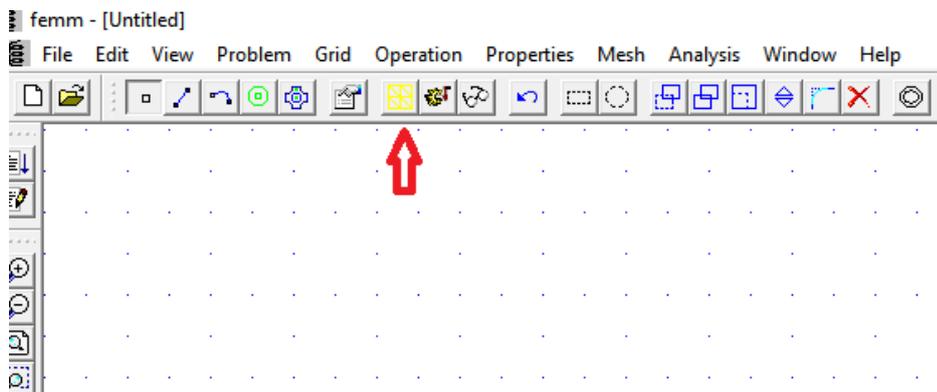


Fonte: Acervo do Autor

Após ter limitado onde a malha do elemento finito vai ser introduzida, pode-se fazer o comando da subdivisão da geometria do núcleo de forma bem rápida, basta acionar o item “*Run mesh generator*” onde se localiza na parte superior da barra de ferramenta do *software* e assim a geometria se divide em vários subdomínios que se ampliar a malha percebe-se que o formato é triangular.

Antes da malha ser aplicada uma informação vai aparecer mostrando quantos nós foram precisos para a criação da malha. A Figura 25 apresenta com a seta a ferramenta “*Run mesh generator*” na parte superior da barra de ferramenta do *software* FEMM.

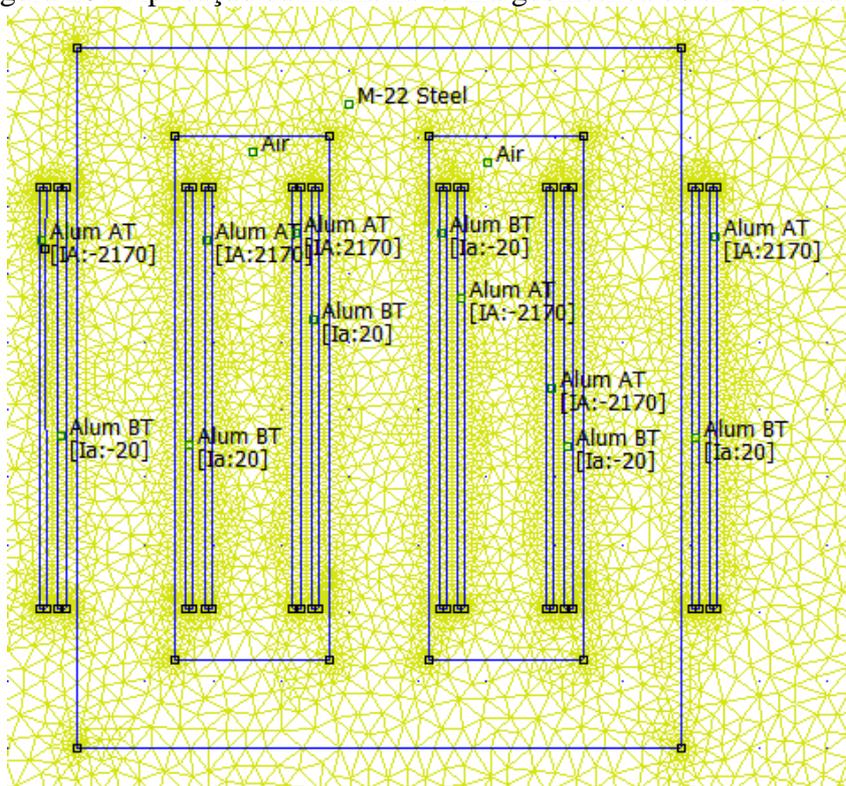
Figura 25 - Ferramenta para executar gerador de malha.



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 26 ilustra a parte ativa do transformador com os materiais de cada item que o constitui e aplicação da malha dos elementos finitos em toda a parte ativa do transformador.

Figura 26 - Aplicação da malha na forma geométrica do transformador.



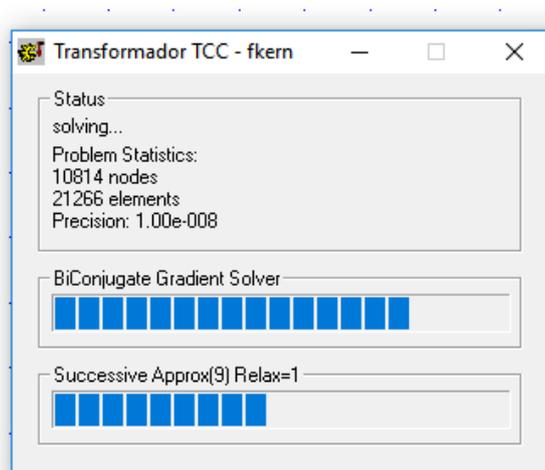
Fonte: Acervo do Autor

4.3 Passo a passo do pós-processamento

A última etapa é a parte onde apresenta como fazer a simulação e aquisição de todos os resultados desejados para ter a análise do transformador. Esta etapa é muito simples de ser feita. Todo o trabalho realizado no pré-processamento, processamento 1 e 2 foi para ter um resultado com sucesso no pós-processamento.

Antes de fazer a compilação do projeto, deve-se fazer uma análise para ver se está tudo correto e assim poder simular e encontrar todos os resultados desejados. Para realizar esta análise, basta acionar a ferramenta “*run analysis*” da barra de ferramenta da parte superior do *software*. A Figura 27 mostra a janela que abre quando o sistema está em análise.

Figura 27 - Processamento do transformador no FEMM.



Fonte: Acervo do Autor.

Após a conclusão da análise do projeto feita, basta clicar a ferramenta “*view results*” que se localiza na parte superior da barra de ferramenta do *software* FEMM e assim o transformador vai ser simulado, com isso podendo ter todos os resultados das grandezas desejadas durante toda a simulação eletromagnética. A Figura 28 item a) exibir o botão que faz a execução da análise do transformador e b) Exibe o botão que mostra a simulação do transformador.

Figura 28 - a) botão de execução de análise do transformador, b) botão para execução da simulação do transformador.



Fonte: Acervo do Autor.

Com isso fica explicado todo o passo a passo do tutorial de como projetar e simular um transformador no *software* FEMM.

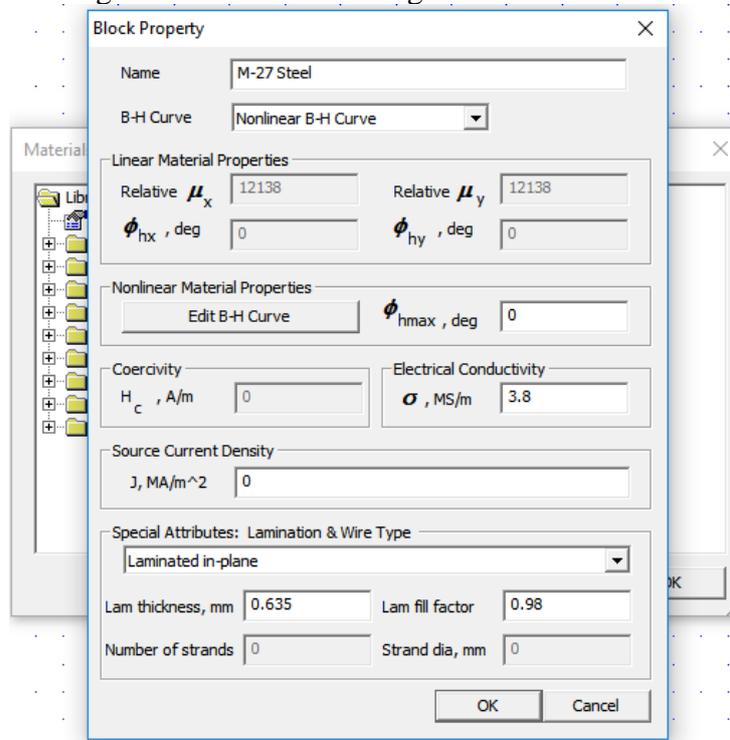
4.4 Resultados das simulações e valores calculados

Nesta etapa do trabalho mostra os resultados dos estudos eletromagnéticos, via método dos elementos finitos, para o projeto de um transformador trifásico de 150 (kVA), (13,8kV/220V), com isolamento a seco e frequência de 60 [Hz], tipo núcleo envolvido, com as

lâminas do núcleo de aço silício, com chapas de 0,27 [mm] grãos orientados, densidades de fluxo magnético máximo [Bm] de 1,55 (T).

Para encontrar os valores da densidade de fluxo magnético, perdas a vazio e perdas nos enrolamentos, basta aplicar a malha do método dos elementos finitos e após compilar para assim obter os resultados. A forma de compilar primeiramente deve-se observar se todas as grandezas estão corretas. Para fazer isso basta ir na barra de ferramentas do *software* FEMM no item “*materials library*” e clicar duas vezes com o botão esquerdo do mouse sobre o material que deseja ver as grandezas, logo após irá abrir uma janela onde mostra todos os dados no material, como mostra a Figura 29.

Figura 29 - Janela com as grandezas do material



Fonte: Acervo do Autor

Após organizar todas as grandezas e aplicar a malha do método dos elementos finitos, basta clicar no botão executar análise e esperar o computador fazer a análise do desenho e seus materiais, depois da análise feita basta ir na ferramenta ver resultados e assim irá abrir uma janela onde se encontra todos os resultados do FEMM. A Figura 30 ilustra os botões de (a) aplicar a malha MEF, (b) executar análise e (c) ver resultados.

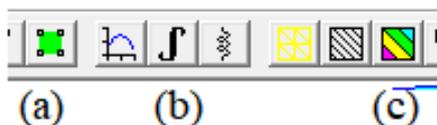
Figura 30 - Botão (a) aplicar a malha MEF, (b) executar análise e (c) ver resultados.



Fonte Acervo do Autor

Para encontrar a densidade de fluxo magnético, basta clicar a ferramenta “dialog” e ir no item “*show density plot*” e clicar “ok”, assim o desenho vai ser pintado com cores mais fortes onde o fluxo é mais intenso e com cores mais claras onde ele é menos intenso e na parte do canto superior direito a tela do computador aparecerá todo a densidade do fluxo magnético. A Figura 31 apresenta a ferramenta que deve ser clicada para encontrar a densidade do fluxo magnético e também as ferramentas onde desejam marcar no desenho a região para obter os valores das perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos. Onde (a) botão para marcar no desenho a região para obter perdas a vazio e perdas nos enrolamentos, (b) botão para pôr o total das perdas e (c) botão para visualizar a densidade de fluxo magnético.

Figura 31 - Botões utilizados para encontrar as perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e a densidade de fluxo magnético.



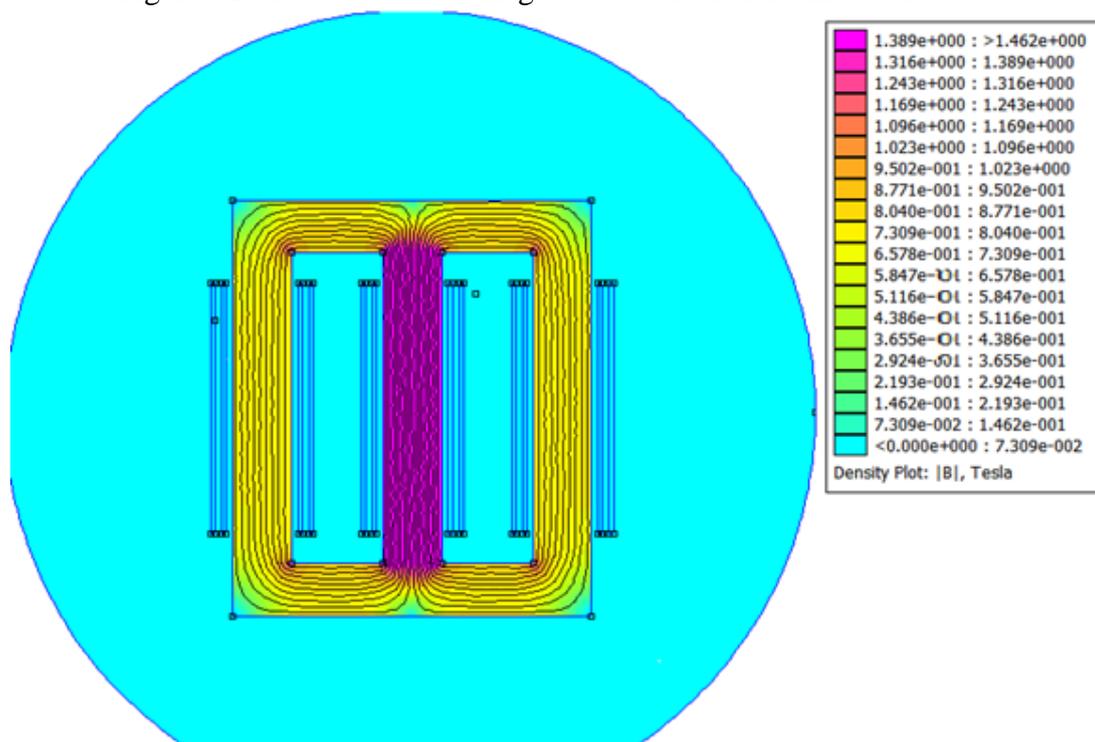
Fonte: Acervo do autor.

Onde:

- (a): é a ferramenta para inserir a região de onde encontra-se as perdas;
- (b): é a ferramenta para calcular o total de todas as perdas;
- (c): é a ferramenta para mostrar a densidade de fluxo magnético;

A densidade do fluxo magnético máximo do núcleo do transformador foi analisada através dos cálculos e os valores simulados no *software* FEMM. A Figura 32 apresenta a densidade do fluxo magnético e seus respectivos vetores do transformador simulado no *software* com uma corrente de magnetização (a vazio) de 8,99 [A]. As correntes inseridas para obter o valor da densidade de fluxo magnético são as mesmas para obter as perdas a vazio que é a corrente a vazio (I_0), mas porém o pós-processamento é diferente para encontrar o resultado.

Figura 32 - Resultado eletromagnética de um transformador trifásico.

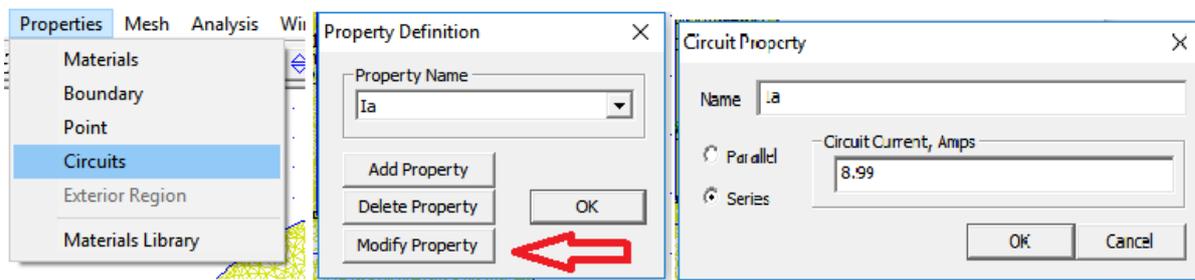


Fonte: Acervo do Autor.

A densidade do fluxo magnético calculado do projeto foi de 1.55 [T] e o valor simulado foi de 1,462 [T]. A diferença dos valores calculados e simulados é de 6,02%. O valor esperado é de até 10% de erro. Os calculados e simulados no *software* FEMM estão bem próximos como erros menores que o limite.

Para a simulação de perdas a vazio é necessário inserir a corrente a vazio nos enrolamentos da baixa tensão, onde a corrente a vazio é de 8,99 [A]. Já nos enrolamentos de alta tensão estes ficam em aberto, ou seja, a corrente da alta tensão é igual a 0 [A]. Para inserir a corrente a vazio nos enrolamentos de baixa tensão deve-se ir na barra de ferramenta do *software* FEMM no item “*Properties*” em seguida em “*circuits*”, onde irá aparecer a janela “*Property Definition*” com o item Ia que é a corrente nos enrolamentos de baixa tensão e IA que é referente a corrente nos enrolamentos de alta tensão. Nesta janela existe o item que está sinalizado com uma seta vermelha “*modifi property*” utilizado para modificar o valor da corrente, onde aparece o nome da corrente e logo a baixo um local para poder inserir o valor desejado. A Figura 33 apresenta a janela para modificação das correntes.

Figura 33- Barra de ferramenta, janela de modificar corrente e local para inserir valor da corrente.



Fonte: Acervo do autor.

Para encontrar as perdas a vazio e perdas nos enrolamentos, é necessário identificar a região onde será analisado cada uma no desenho. Para identificar essa região basta clicar na ferramenta identificar região para análise da parte superior da barra de ferramenta onde está identificada com a letra “a” na Figura 34 e apertar com o botão direito do mouse a região no desenho que deseja ser analisada. A Figura 34 mostra o botão que deve ser acionado para poder ter a análise das perdas a vazio e das perdas nos enrolamentos.

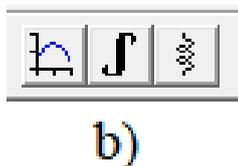
Figura 34 – Abas para análise do desenho.



Fonte: Acervo do autor.

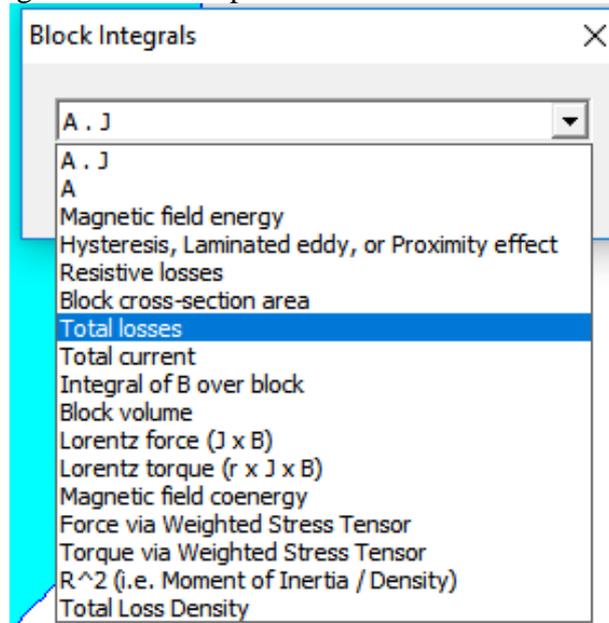
Após identificado a região onde deseja ter o valor das perdas a vazio e das perdas nos enrolamentos, deve-se ir no item “*block Integrals*” para escolher o item de “*total losses*” para ter o valor total das perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos. A Figura 35 b) ilustra o botão para ter acesso ao item “*block itegrals*” e a Figura 36 mostra a janela onde escolhe o item “*total losses*”.

Figura 35 - Botão para ter o valor total das perdas.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 36 - Janela para identificar o item *total losses*.



Fonte: Acervo do autor.

É nesta etapa que simula também as perdas a vazio e perdas nos enrolamentos, no qual são mostradas as simulações nas Figuras 37 e 40. E assim encontrando todos os resultados desejados do projeto e do trabalho.

As perdas a vazio é a potência ativa do transformador quando o mesmo é alimentado com a corrente a vazio que é o mesmo por um dos enrolamentos, como os terminais dos outros enrolamentos em circuito aberto. Essa perda é a somatória das perdas por histerese, que é provocada pelas propriedades ferromagnéticas de apresentarem um atraso entre a indução magnética e o campo magnético e as perdas por correntes parasitas, que é quando uma corrente alternada flui pelo enrolamento, um campo magnético variável surge no núcleo. A variação desse campo induz uma tensão no núcleo e essa força eletromotriz causa a circulação de uma corrente parasita. A Equação 6 apresenta as perdas a vazio.

$$P_o = P_h + P_p \quad (6)$$

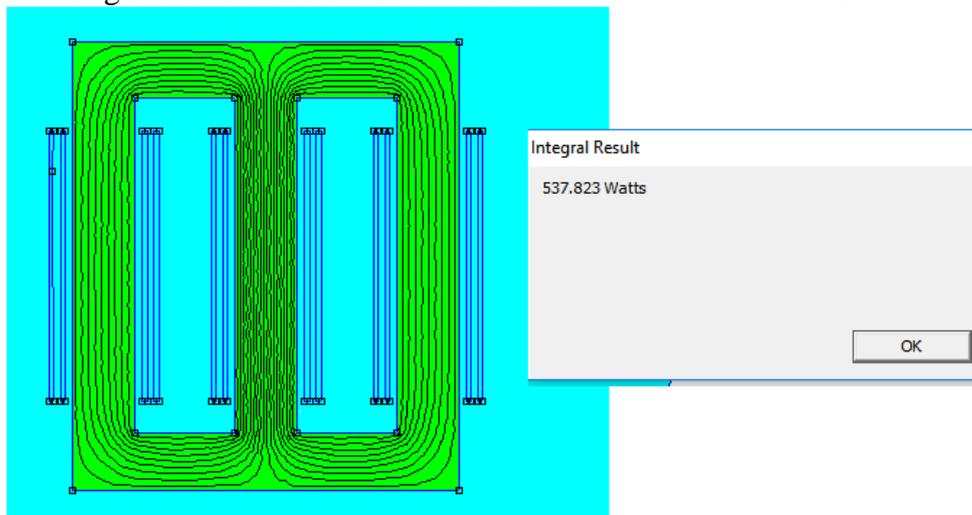
Onde:

P_o = Perdas a vazio;

P_h = Perdas por histerese;

P_p = Perdas por correntes parasitas;

Figura 37 - Perdas a vazio do transformador simulado no FEMM.



Fonte Acervo do Autor

As perdas nos enrolamentos tratam-se da dissipação de potência na forma de calor, por efeito Joule, que acontece pela passagem de uma corrente (I) por um condutor com uma determinada resistência (R). Essa perda é determinada pela Equação 7 (SOBRINHO,2019).

$$(R_{bt} \cdot I_{nfbt}^2) + (R_{at} \cdot I_{nfat}^2) \cdot 3 = P_j \quad (7)$$

Onde:

P_j = Perdas por efeitos Joule;

R_{bt} = Resistencia dos enrolamentos de baixa tensão;

R_{at} = Resistencia dos enrolamentos de alta tensão;

I_{nfbt} = Corrente nominal de fase nos enrolamentos de baixa tensão;

I_{nfat} = Corrente nominal de fase nos enrolamentos de alta tensão.

Neste trabalho foi utilizado um transformado de 150kVA, de 13,8kV/220V, com a configuração delta na alta e estrela no lado de baixa tensão.

A Equação 8 mostra o cálculo da corrente nominal do transformador no lado de baixa tensão (fechamento em estrela).

$$I_n = \frac{S}{V \cdot \sqrt{3}} = \frac{150000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 393,65 \text{ (A)} \quad (8)$$

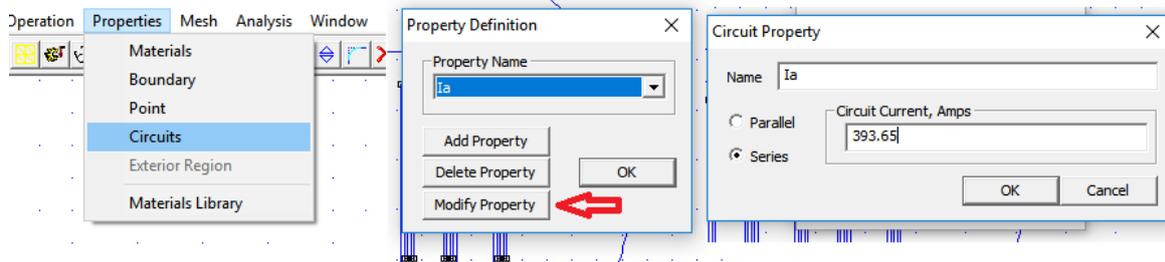
Para o fechamento em estrla a corrente nominal de fase é determinada pela Equação 9.

$$I_{nf Y} = I_n = 393,65 \text{ (A)} \quad (9)$$

Para simulação das perdas nos enrolamentos no lado de baixa deve-se inserir uma corrente de fase equivalente a 393,65 (A).

A Figura 38 apresenta como modificar os valores das correntes para fazer a simulação das perdas nos enrolamentos.

Figura 38 - Ilustração de como inserir a corrente nominal de fase no lado de baixa tensão.



Fonte: Acervo do Autor.

A Equação 10 mostra o cálculo da corrente nominal do transformador no lado de alta tensão (fechamento em delta).

$$I_n = \frac{S}{V \cdot \sqrt{3}} = \frac{150}{13,8 \cdot \sqrt{3}} = 6,27 \text{ (A)} \quad (10)$$

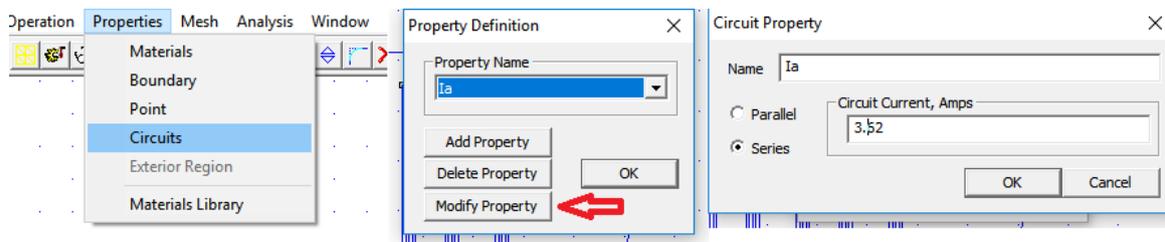
Para o fechamento em delta a corrente nominal de fase é determinada pela Equação 11.

$$I_{nf\Delta} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} = 3,62 \text{ (A)} \quad (11)$$

Para simulação das perdas nos enrolamentos no lado de baixa deve-se inserir uma corrente de fase equivalente a 3,62 (A).

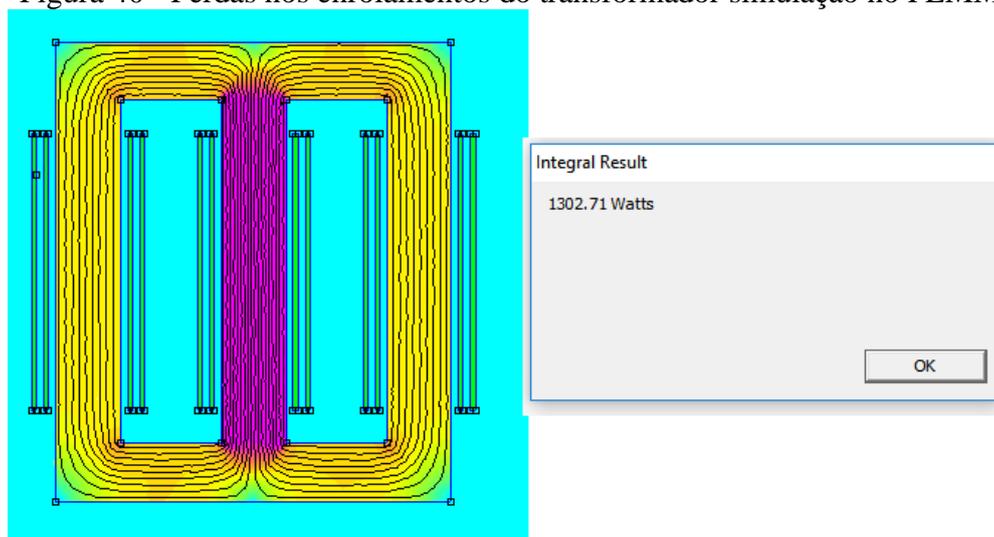
A Figura 39 apresenta como modificar os valores das correntes para fazer a simulação das perdas nos enrolamentos no lado de alta tensão.

Figura 39 - Corrente nominal de fase no lado de alta tensão.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 40 - Perdas nos enrolamentos do transformador simulação no FEMM



Fonte: Acervo do Autor

O valor das perdas a vazio simulado 537,823 (W) e o valor calculado foi de 531,70 (W). A diferença dos valores calculado dos valores simulados foi de 0,87 (%). Enquanto o valor das perdas nos enrolamentos calculados foi de 1373,70 (W) e o valor simulado foi de 1302,71 (W). A diferença entre o valor alcançado através dados da tese de referência e os valores simulados através o desenho projetado no FEMM foi de 3,49 (%) (SOBRINHO,2019).

Os valores calculados e simulados das grandezas perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e densidade de fluxo magnético estão apresentando na Tabela 2.

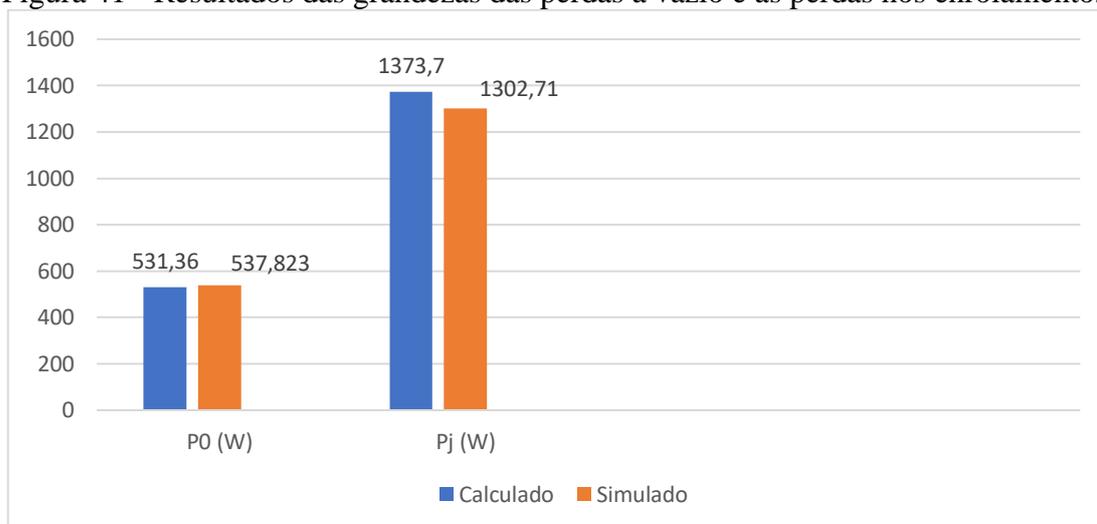
Tabela 2- Comparativo dos valores calculados, simulados e a diferença em porcentagem (%).

Parâmetros	Cálculo	Simulação	Diferença (%)
P_0 (W)	531,36	537,823	0,87
P_j (W)	1373,70	1302,71	3,49
B_m (W)	1,55	1,462	5,377

Fonte: Acervo do Autor.

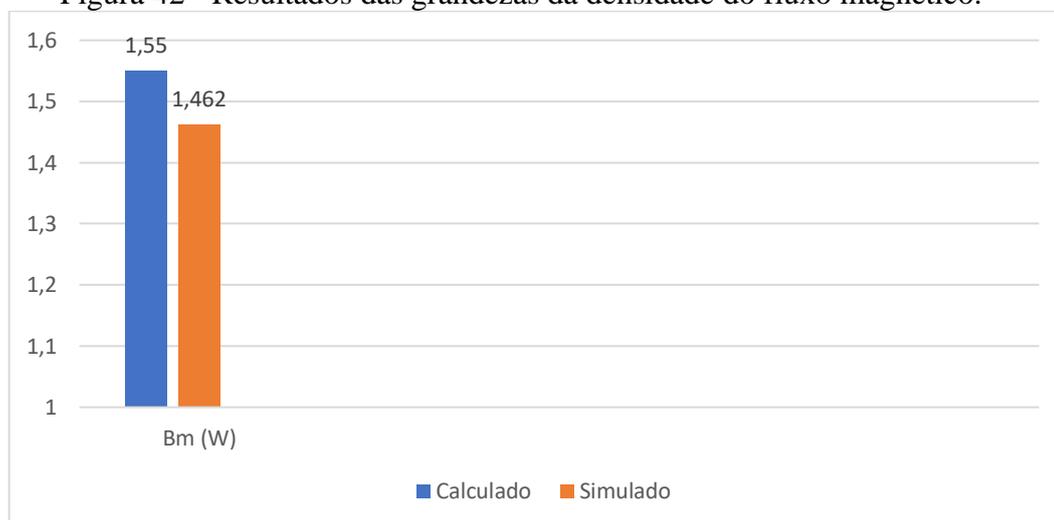
A Figura 41 e 42 apresenta o resultado obtido para as grandezas perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e a densidade de fluxo magnético máximo com as restrições e desigualdades.

Figura 41 - Resultados das grandezas das perdas a vazio e as perdas nos enrolamentos.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 42 - Resultados das grandezas da densidade do fluxo magnético.



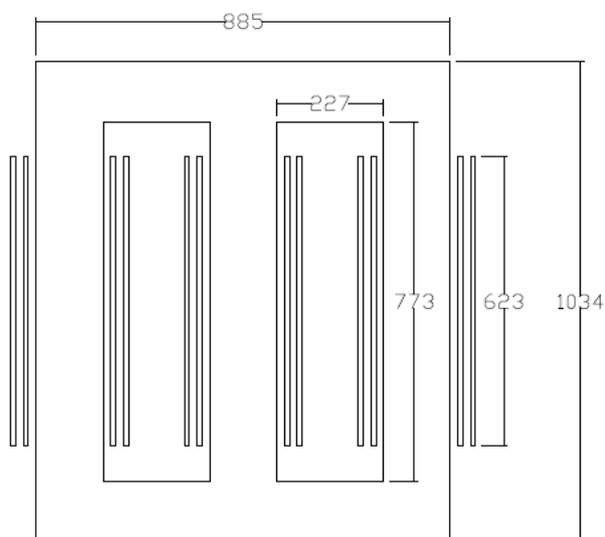
Fonte: Acervo do autor.

4.4 Exportar do FEMM para o AutoCAD

O *software* FEMM tem uma flexibilidade de exportar o desenho do transformador simulado por ele para o AutoCad, isso é de muita importância que assim tem como ter todas as dimensões plotadas no seu projeto e onde fica mais fácil para poder modificar se o projetista desejar futuramente modificar o transformador. Para poder exportar o desenho do FEMM para o Autocad basta ir na barra de ferramenta do FEMM onde tem uma janela escrita “File”, e em seguida na opção de Export DXF que é o formato utilizado para o transporte do FEMM para o CAD. Após ter ido no item de exportar, deve salvar o documento em alguma pasta do computador, com isso o desenho do transformador vai ser salva no formato de DWG para depois ser aberto do *software* AutoCAD e assim ter o projeto como todas as dimensões

de forma mais simples de modificar. A Figura 43 demonstra o desenho do transformador e todas suas cotas retiradas do AutoCad.

Figura 43 - Desenho do transformador no AutoCAD.



Fonte: Acervo do Auto

A Figura 38 representa o desenho com as cotas da largura do núcleo, altura do núcleo, comprimento das, altura das janelas internas e a largura das janelas internas do núcleo.

5 CONCLUSÕES

O trabalho exposto demonstrou um tutorial de como realizar a análise eletromagnética de um transformador, através do método dos elementos finitos, para simulações computacionais via *software* FEMM.

As tensões de transmissão em corrente alternada no Brasil variam de 69 kV até 750kV, essas tensões são obtidas através de transformadores instalados em subestações elevadoras e abaixadoras. Estas subestações promovem a transformação da tensão para níveis de subtransmissão, que varia de 13,8 kV até 69kV, e de distribuição normalmente em 34kV e 13,8kV, e finalmente as redes são rebaixadas para serem utilizadas nas unidades consumidoras. Conclui-se a importância dos transformadores de potência em qualquer sistema elétrico, pois é um equipamento utilizado para elevar ou abaixar as tensões ou correntes nas subestações, usinas de gerações de energia e até mesmo antes de ser consumida pelo cliente final.

Feitas estas considerações da grande importância do transformador, pode se dizer que para projetar um equipamento de tanta importância necessita-se de um método muito eficaz, o MEF é um dos métodos capazes de realizar a análise eletromagnética do transformador.

O MEF é um método que faz a subdivisão da geometria da parte interna do núcleo do transformador, com o intuito de utilizar métodos de aproximação linear e por splines cúbicas referentes às densidades do fluxo magnético, perdas a vácuo, perdas nos enrolamentos etc. O *software* FEMM faz a parte de simulação do MEF na área do transformador para ter uma rápida compilação e assim alcançar os objetivos que é os valores da densidade do fluxo, perdas a vácuo e as perdas nos enrolamentos.

O método dos elementos finitos é um estudo normalmente encontrado através de manuais em inglês e por isso tem pouco material sobre esse método muito eficaz, por esse motivo a criação deste trabalho para ter um material em português de como fazer uma simulação do transformador utilizando o FEMM via o método dos elementos finitos.

Por isso este trabalho tem que ajudar alunos e profissionais na área com o interesse de obter explicações e conhecimento na utilização do método dos elementos finitos através

do *software* FEMM. Explica também cada etapa de como o MEF é executado e aplicado para simular e encontrar os valores aproximados.

Para atingir o objetivo proposto o trabalho foi dividido em três etapas. A primeira etapa compõe-se de uma explicação sobre transformador e o método dos elementos finitos (MEF), para o leitor ter uma noção do que está projetando e qual é o método utilizado para encontrar os resultados questionados. A segunda etapa compreende toda explicação de desenhar a geometria do transformador e de como aplicar a malha do método dos elementos finitos nessa geometria, utilizar o *software* para simular e encontrar os resultados desejados. A terceira e última etapa, que é a mais importante, mostra passo a passo de como inserir as dimensões da parte ativa do transformador no FEMM e por fim aplicar o método dos elementos finitos MEF nesta geometria.

Os resultados alcançados pela simulação foram bem satisfatórios, pois em comparação com os resultados calculados observa-se que a diferença entre eles é bem irrisória com uma baixa diferença de porcentagem entre o calculado e o simulado, com isso pode-se notar que a simulação foi bem executada e o transformador está bem projetado com a máxima confiança no *software* FEMM.

Os resultados da densidade de fluxo magnético, perdas a vazio e perda nos enrolamentos simulado no *software* FEMM foram bem próximos dos calculados, onde o valor calculado da densidade de fluxo magnético foi de 1,55 (T) e o simulado foi de 1,462 (T), o valor das perdas a vazio calculado foi de 531,36 (W) e o valor simulado no *software* foi de 537,823 (W), e por último o valor das perdas nos enrolamentos calculado foi de 1373,70 (W) e o valor simulado foi de 1302,71 (W). Assim tendo muito sucesso nos resultados finais do trabalho, que é explicar passo a passo como trabalhar com MEF via o *software* FEMM e apresentar os resultados de todas as perdas do transformador.

5.1 Sugestões de trabalhos

Segue a baixo sugestões de trabalhos futuros:

- Análise das densidades de fluxos magnéticos e das perdas a vazio e perdas nos enrolamentos do transformador utilizando as simulações do *software* FEMM;
- Aplicação de técnicas de otimização na projeção de transformadores de potência;

- Utilização do *Software* LUA com o intuito de exportar as formulas para criação do transformado no *software* FEMM;

REFERÊNCIAS

BERTINI, L. A. B. **Transformadores, Teoria, Prática e Dicas: Para transformadores de pequena potência.** 1989, Eltec, 37f. 1989.

CAMARGO, I. C. **Transformadores Trifásicos.** 2007, 34f. Disponível em: <<http://www.gsep.ene.unb.br/osem/ivan/maquina/TRANSFORMADORES%20TRIF%20C1SICOS.pdf>> Acesso em: 09 de jun. 2019, 09:07:30.

KASPAREIT, Klaus. **Cálculo de Transformadores.** WEG. 2015.

MARTIGNONI, A. M. **Transformadores.** São Paulo: Globo S.A, 1969.

MEEKER, D. M. **Finite Element Method Magnetics.** [S.l], 2015, 160f. User`s Manual, 2015.

MEIER, G. A. N. M. B. M. **Estudos de transformadores trifásicos/heptafásicos aplicados a retificadores 14 pulsos com alto fator de potência.** 2013,123f. Monografia (Curso Engenharia Industrial Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal de Paraná-UTFPR, PR, 2013.

NOGUEIRA, D. S. N; ALVES, D.P.A. **Transformadores de Potência- Teoria e Aplicação tópicos essenciais.** 2009. 201f. Monografia (Curso Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica do Rio de Janeiro, RJ, 2009.

OBERZINER, A. P. B. O. **A equações de Maxwell e aplicações.** 2008. 74f. Monografia (Curso de Matemática) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, SC, 2008.

OLIVEIRA, B. T. O. **Estudo da Viabilidade de Substituição do Óleo Mineral Pelo Óleo Vegetal em Transformadores de Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétricas. Estudo de Caso: Cooperativa Energética Cocal.** 2013, 67f. Monografia (Curso de Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense- UNESC, SC, 2013.

PEREIRA, Orlando José Paulo Barreiros D'almeida. **Utilização de Elementos Finitos de Equilíbrio em Refinamento Adaptativo.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1996. Cap.4.

REZENDE, I. R; AZEVEDO, A. C. A; CARVALHO, B. C. C; DELAIBA, A. C. D; OLIVEIRA, A. C. D. O. **Modelagem de transformadores trifásicos utilizando o método dos elementos finitos.** Artigo (Curso Engenharia Elétrica) – Faculdade Federal de Uberlândia – UFU, MG, 2005.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Ed. da EFEI, 2006. 3ª edição revista e ampliada. Disponível em <http://www.eletobras.com>

SANTOS, L. S. **Cálculo das perdas técnicas dos Transformadores de distribuição, operando em ambientes não-senoidal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista- UNESP, SP, 2006.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para redes de Média Tensão**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais – MG, 2012.

SOBRINHO, A. M. S. **Uma Contribuição aos Projetos de Transformadores Via Algoritmos naturais e elementos finitos**. 2019, 177f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia – UFU, MG, 2019.