



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

MATEUS MORAIS MESQUITA

**PROJETO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO
TRIFÁSICO**
DIMENSIONAMENTO, PERDAS E DETERMINAÇÃO DA SUA
CORRENTE *INRUSH*

Palmas/TO
2019

MATEUS MORAIS MESQUITA

**PROJETO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO
TRIFÁSICO**
DIMENSIONAMENTO, PERDAS E DETERMINAÇÃO DA SUA
CORRENTE *INRUSH*

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica como requisito para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof^o. MSc. Adelicio Maximiano Sobrinho

Banca: Prof^o. MSc. Alcy Monteiro Júnior
Prof^a. MSc. Gisele Souza Parmezani Marinho
Prof^a. Dr^a. Priscila da Silva Oliveira

Palmas/TO
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M582p Mesquita, Mateus.
Projeto de um Transformador de Distribuição Trifásico:
Dimensionamento, Perdas e Determinação da sua Corrente Inrush. / Mateus
Mesquita. – Palmas, TO, 2019.

61 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Adélcio Maximiano Sobrinho

1. Dimensionamento de núcleo e bobinas de um transformador. 2. Cálculo de corrente a vazio, perdas a vazio e perdas por efeito Joule. 3. Cálculo e simulação da corrente inrush. 4. Simulação magnética para obtenção de fluxo magnético e perdas. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

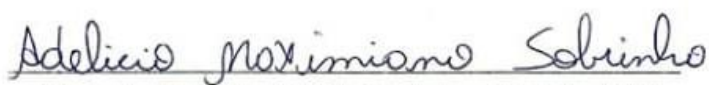
MATEUS MORAIS MESQUITA

PROJETO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO

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

Data de aprovação: 12 / 04 / 2019

Banca Examinadora



Orientador: Prof. Me. Adélcio Maximiano Sobrinho, UFT.



Prof. Me. Aicy Monteiro Júnior, UFT



Profª. Me. Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT



Profª. Drª. Priscila da Silva Oliveira, UFT

Palmas-TO, 2019

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer imensamente à Deus, em primeiro lugar, pelo final bem-sucedido de um grande ciclo em minha vida, ciclo este que trouxe mudanças em várias áreas e me fizeram um novo homem. Sou grato pela vida da minha família, em especial meus pais Adriano e Gicelma, e meu irmão Vinicius, que sempre me ajudaram antes e durante o percurso, contribuindo para que eu tivesse condições em todos os sentidos para poder frequentar as aulas e estudar.

Agradeço também a minha namorada, Vitória Carolina, que durante a reta final do curso contribuiu de muitas maneiras para me manter firme e focado no objetivo, sempre me apoiando a renunciar o que não convinha ao propósito. Faço lembrança também do imenso apoio que me deu meu orientador, Prof. MSc. Adelicio Maximiano Sobrinho, que sempre esteve, por quase um ano, de muita boa vontade, tirando dúvidas, corrigindo e fazendo sugestões a esse trabalho final, permitindo-me acrescentar um vasto conhecimento e experiência.

Sou grato ainda por muitos amigos, a saber, Alexandre e Jacileide, Mateus e Thayze, Daniel Barreto, que por muitas vezes me cederam lugar em suas casas para estadias durante semanas de aulas. Há ainda muitos outros amigos que pude dividir noites em claro de estudos, sempre me permitindo continuar firme no objetivo.

RESUMO

A proposta deste trabalho é projetar um transformador de distribuição trifásico, 150kVA, 13,8kV/380-220V, tipo núcleo envolvido, com isolamento a óleo. No projeto são feitos dimensionamentos de partes construtivas, tal como tamanho do núcleo, número de espiras das bobinas, seção dos condutores, perdas, através de equacionamento no *software* *OCTAVE*. São feitos também cálculos da corrente de energização (*inrush*) no mesmo *software*, além da simulação dessa corrente no *ATP* (fazendo a modelagem de um transformador saturável). Foi feito ainda simulação no *FEMM* visando obter dados de fluxo magnético e perdas. Para tal, o núcleo e bobinas são desenhados no *software*, com aplicação dos materiais pré-determinados na primeira etapa de cálculos. Com as simulações no *ATP* e no *FEMM* comprovou-se os dados calculados, onde os resultados das simulações estão coerentes com resultados esperados a luz da norma ABNT NBR 5440:2014 Versão Corrigida. Os resultados também são submetidos a comparações com equipamento de mercado. Com isso, obteve-se conclusões favoráveis a respeito da metodologia de cálculo e simulações utilizada, validando o equipamento projetado.

Palavras-chaves: transformador. simulação. *inrush*. fluxo. *ATP*. *FEMM*.

ABSTRACT

The purpose of this work is to design a 150 kVA, 13.8kV / 380-220V three phase distribution transformer, wrapped core type, with oil insulation. In the design, constructional parts are dimensioned, such as core size, number of coil turns, section of conductors, losses, through equation in the OCTAVE software. Inrush calculations are also made in the same software, as well as the simulation of this current in the ATP (making the modeling of a transformer saturable). FEMM simulation was performed to obtain magnetic flux and loss data. For this, the core and coils are drawn in the software, with application of the materials predetermined in the first stage of calculations. The simulations in the ATP and the FEMM proved the calculated data, where the results of the simulations are consistent with expected results in light of the ABNT NBR 5440: 2014 Version Corrected Standard. The results are also submitted to comparisons with market equipment. With this, favorable conclusions were obtained regarding the methodology of calculations and simulations used, validating the projected equipment.

Key-words: transformer. simulation. *inrush*. flow. ATP. FEMM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Núcleo Envolvido Trivial de um Transformador Monofásico.....	19
Figura 2: Estrutura do Núcleo Envolvido de um Transformador Trifásico	21
Figura 3: Representação do Circuito Equivalente de uma Fase de um Transformador	23
Figura 4: Exemplo de Curva BH	27
Figura 5: Dados de um Transformador <i>WEG</i>	34
Figura 6: Dados de Entrada do Transformador	36
Figura 7: Circuito Montado no <i>ATP</i>	36
Figura 8: Tensão na BT	37
Figura 9: Corrente <i>Inrush</i>	37
Figura 10: Núcleo e Bobinas do Transformador no <i>FEMM</i>	39
Figura 11: Dados de Entrada Para o Condutor de BT	40
Figura 12: Dados de Entrada Para o Condutor de AT.....	40
Figura 13: Dados do Material Utilizado no Núcleo	41
Figura 14: Exemplo da Seção Reta de um Núcleo Laminado	42
Figura 15: Aplicação dos Materiais no Núcleo e Bobinas	43
Figura 16: Inserção da Corrente a Vazio em <i>Ia</i>	44
Figura 17: Profundidade do Núcleo	44
Figura 18: Fluxo Magnético no Núcleo Simulado no <i>FEMM</i>	45
Figura 19: Perdas a Vazio.....	46
Figura 20: Corrente Nominal <i>I_I</i> em <i>Ia</i>	47
Figura 21: Profundidade das Bobinas de BT	47
Figura 22: Perdas <i>P_{J1}</i>	48
Figura 23: Perdas <i>P_{J2}</i>	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Constantes de Entrada para o Cálculo no <i>OCTAVE</i>	29
Quadro 2: Principais Dimensões do Núcleo.....	30
Quadro 3: Dimensões Externas de um Transformador Comercial.....	31
Quadro 4: Parâmetros das Bobinas.....	32
Quadro 5: Dados das Perdas do Transformador.....	33
Quadro 6: Valores Máximos das Correntes <i>Inrush</i> Calculadas.....	35
Quadro 7: Comparação Final das Perdas.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>Abj</i>	Área bruta do jugo
<i>Ac</i>	Área efetiva da coluna
<i>Aj</i>	Área da culatra (jugo)
<i>Aw</i>	Área da janela
<i>Bm</i>	Densidade de fluxo magnético do núcleo
<i>Br</i>	Densidade remanescente do núcleo
<i>Bs</i>	Densidade do núcleo na região saturada da Curva BH
<i>d</i>	Diâmetro interno do enrolamento da bobina de baixa-tensão
<i>D</i>	Distância entre os centros de duas colunas
<i>diametroA</i>	Diâmetro do condutor de alta-tensão
<i>diametroB</i>	Diâmetro do condutor de baixa-tensão
<i>Dfe</i>	Densidade do aço-silício utilizado no núcleo
<i>E₁</i>	Tensão induzida no primário
<i>E₂</i>	Tensão induzida no secundário
<i>f</i>	Frequência da tensão de alimentação
<i>Fc1</i>	Seção reta do condutor de baixa-tensão
<i>Fc2</i>	Seção reta do condutor de alta-tensão
<i>femm</i>	Força magnetomotriz no núcleo
<i>femmc</i>	Força magnetomotriz na coluna
<i>femmj</i>	Força magnetomotriz no jugo
<i>FmagA</i>	Fluxo de magnetização na alta-tensão
<i>FmagB</i>	Fluxo de magnetização na baixa-tensão
<i>H</i>	Altura total do núcleo
<i>hj</i>	Altura da culatra (jugo)
<i>hw</i>	Altura da janela
<i>I₁, I₁₁</i>	Corrente no primário
<i>I₂, I₂₂</i>	Corrente no secundário
<i>ibt</i>	Corrente de saturação do núcleo
<i>Imaximoa, Imaxzirka1</i>	Corrente <i>Inrush</i>
<i>I₀</i>	Corrente a vazio
<i>I_p</i>	Valor de pico da corrente <i>inrush</i>
<i>I_{P0}</i>	Parte ativa da corrente a vazio
<i>I_{Q0}</i>	Parte reativa da corrente a vazio
<i>J</i>	Densidade de corrente nos condutores dos enrolamentos
<i>J1</i>	Densidade de corrente no primário
<i>J2</i>	Densidade de corrente no secundário
<i>k</i>	Constante Relacionada ao número de degraus do núcleo
<i>Ke</i>	Constante de empilhamento
<i>Ksw</i>	Variável para o cálculo de <i>Kw</i>
<i>Kw</i>	Fator de espaçamento do núcleo
<i>kt</i>	Constante de relação de espiras
<i>Ku</i>	Fator de utilização relacionado ao número de degraus do núcleo
<i>MT</i>	Massa total do núcleo
<i>La</i>	Indutância na região não-saturada
<i>LA</i>	Indutância na alta-tensão

L_b	Indutância na baixa-tensão
L_{bs}	Indutância na região saturada
$L_{mATfemm}$	Comprimento da seção circunscrita das bobinas de alta-tensão
$L_{mbtfemm}$	Comprimento da seção circunscrita das bobinas de baixa-tensão
L_s	Soma da indutância na região saturada e de curto-circuito da rede
$N_1, N1$	Número de espiras do primário
$N_2, N2$	Número de espiras do secundário
P_{adc}	Perdas adicionais
$Perdas_{TT}$	Perdas totais no transformador
P_{J1}	Perdas nos enrolamentos de baixa-tensão
P_{J2}	Perdas nos enrolamentos de alta-tensão
P_j	Perdas nos enrolamentos
P_o	Perdas a vazio no núcleo
$prof, Prof$	Profundidade do núcleo
Q	Potência de entrada do transformador
Q_f	Potência de entrada de fase do transformador
$r_1, R1$	Resistência do enrolamento de baixa-tensão por fase
$r_2, R2$	Resistência do enrolamento de alta-tensão por fase
rel	Relação entre as áreas brutas da coluna e culatra
R_{jan}	Relação entre a altura e largura da janela
R_{magA}	Resistência de magnetização na alta-tensão
R_{magb}	Resistência de magnetização na baixa-tensão
tpk	Instante em que a corrente <i>inrush</i> atinge o pico
$V_1, V1$	Tensão de linha no primário
$V_2, V2$	Tensão de linha no secundário
$V1_f$	Tensão de fase no primário
$V2_f$	Tensão de fase no secundário
V_{max2}	Tensão máxima no secundário
W	Largura total do núcleo
W_c	Maior largura da coluna
W_{ic}	Perdas a vazio nas colunas
W_{ij}	Perdas a vazio nas culatras
W_w	Largura da janela
X_{L1}, X_b	Reatância do primário
X_{L2}, X_A	Reatância do secundário
Z_L	Impedância da carga
α	Relação de transformação
ρ	Resistividade dos condutores das bobinas
Φ_1	Fluxo magnético residual do núcleo
Φ_2	Fluxo magnético de saturação do núcleo
Φ_m	Fluxo magnético resultante nos enrolamentos
ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Introdução a Projetos de Transformadores.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Justificativa	13
1.4 Metodologia.....	14
1.5 Estrutura do Trabalho	15
1.6 Fundamentos Teóricos	16
2 TRANSFORMADORES.....	19
2.1 Núcleo	20
2.2 Circuito Equivalente	22
2.3 Perdas a Vazio.....	24
2.4 Corrente a vazio.....	25
2.5 Perdas nos Enrolamentos.....	26
2.6 Perdas Adicionais	26
2.7 Corrente <i>Inrush</i>	27
3 RESULTADOS e DISCUSSÕES	29
3.1 Cálculos no <i>OCTAVE</i>	29
3.1.1 Parâmetros Construtivos e Magnéticos do Núcleo.....	30
3.1.2 Parâmetros Construtivos e Elétricos das Bobinas	32
3.1.3 Perdas	33
3.1.4 Corrente de Energização.....	34
3.2 Simulação no <i>ATP</i>.....	35
3.3 Simulação no <i>FEMM</i>.....	38
3.3.1 Desenho e Materiais	38
3.3.2 Ensaio a Vazio	43
3.3.3 Ensaio em Curto-Circuito.....	46
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE A – CÓDIGO DE EQUACIONAMENTO NO <i>OCTAVE</i>	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução a Projetos de Transformadores

O primeiro passo no projeto é definir qual aplicação que o equipamento terá quando em uso. Se tratando dos transformadores, uma das principais aplicações a citar é a manipulação dos níveis de tensão para a distribuição de energia elétrica, onde se tem, geralmente níveis de tensão na baixa tensão variando entre 127V e 380V, a depender do local onde o equipamento será instalado.

Definir aplicação implica em determinar parâmetros como potência, níveis de tensão, tipos de isolamento, etc. Nesse estudo, o equipamento é projetado para utilização na rede de distribuição no estado do Tocantins, cuja companhia elétrica é a Energisa –TO. A potência determinada de pré-projeto é de 150kVA, visando obter um equipamento com potência intermediária no setor de aplicação em que se encontra.

Com a escolha da aplicação do equipamento, os níveis de tensão são estabelecidos em 13,8kV para o lado de alta-tensão (AT) e 380-220V para a baixa tensão (BT). A isolamento é determinada como sendo a óleo. Neste estudo, o tipo de isolamento não é um parâmetro analisado, apenas considerado para a determinação de parâmetros de pré-projeto, como a constante K_{sw} para o cálculo do fator de espaçamento do núcleo (K_w). Por fim, fica definido como o núcleo sendo do tipo envolvido, onde os enrolamentos envolvem as três colunas do núcleo do transformador trifásico.

Além do equacionamento no *OCTAVE*, os *softwares* que são usados para determinação da corrente *inrush* (*ATP*), fluxo e perdas (*FEMM*), possuem amplas possibilidades de modelagem de equipamentos e situações, não somente transformadores. No *ATP*, por exemplo, é possível modelar longas linhas de transmissão de energia elétrica em altas tensões, afim de se estudar efeitos capacitivos, por exemplo.

O *FEMM* permite ainda variadas possibilidades de estudos, utilizando como característica do programa o método de elementos finitos para a execução das simulações. Para o projeto de um transformador, o *software* permite obter dados de sentidos de fluxos, perdas magnéticas, elétricas, dentre vários outros parâmetros, além de permitir modelar os mais variados materiais de preenchimento das geometrias desenhadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

A proposta desta monografia é projetar um transformador de distribuição trifásico, com isolamento a óleo, 150 kVA, 13,8kV/380-220V, núcleo tipo envolvido, estudando aspectos principais de um transformador, tais como perdas, corrente *inrush* e densidade de fluxo magnético no núcleo.

1.2.2 Objetivos Específicos

De maneira global, o projeto de um transformador de distribuição trifásico aqui proposto terá como tópicos principais:

1. Dimensionamento de núcleo e bobinas;
2. Cálculo das perdas e correntes a vazio;
3. Cálculo das perdas nos enrolamentos (perdas por efeito *Joule*);
4. Estimativa da corrente transitória de energização (corrente *inrush*);
5. Simulação eletromagnética via método dos elementos finitos para determinação de perdas e densidades de fluxo magnético no núcleo do transformador.

1.3 Justificativa

Apesar do país passar por um período de estagnação econômica (CARNEIRO; VETTORAZZO, 2018), a demanda no consumo de energia elétrica continua a se expandir. Com isso, a necessidade de um sistema de geração, transmissão e distribuição cada vez maior e mais eficiente vêm exigindo do setor investimentos em pesquisas e estudos que possam viabilizar esse crescimento.

Assim, grande parte do crescimento e estabilidade do sistema elétrico como um todo passam pelos transformadores. Parte responsável na transmissão de energia em longas distâncias, rebaixando e aumentando o nível de tensão das redes, os transformadores exigem especial atenção principalmente quanto à estabilidade que esses equipamentos podem ou não oferecer ao sistema elétrico.

Desse modo, um estudo dos transformadores se faz necessário, visando aprimorar pontos como eficiência e estabilidade em regime permanente e transitório. Aspectos como a corrente de magnetização transitória (*inrush*), cuja magnitude é elevada, demanda atenção especial no dimensionamento, pois erros em características como essa poderiam causar quedas de tensão, além de danos no sistema de proteção da rede elétrica, prejudicando assim a confiabilidade (no quesito estabilidade) do sistema elétrico ao qual o equipamento está inserido.

1.4 Metodologia

O estudo se dará contemplando os seguintes tópicos:

A. Cálculo dos Parâmetros Construtivos Principais

Os principais parâmetros do transformador, tais como dimensões de núcleos e bobinas, cálculo de perdas a vazio, perdas nos enrolamentos, corrente de energização, dentre outros, serão feitos através de equacionamento matemático no *software OCTAVE*.

B. Simulação da Corrente *Inrush*

O estudo da corrente de energização será feito através do *software ATP*. Para tal, serão feitas simulações transitórias, utilizando a modelagem de transformadores trifásicos saturáveis de dois enrolamentos.

C. Simulação das Densidades de Fluxo Magnético e Perdas

Com os dados de dimensões do núcleo e corrente a vazio, será utilizado o *software FEMM* para o projeto da geometria do núcleo e bobinas, permitindo assim a análise (no mesmo *software*) das perdas e densidades de fluxo magnético.

D. Normatização

Será utilizado como referência principal a norma ABNT NBR 5440:2014 Versão Corrigida: 2014.

1.5 Estrutura do Trabalho

A escrita desse estudo se baseou em três grandes capítulos: 1, 2 e 3. O primeiro capítulo fez um levantamento acerca das diretrizes que guiarão o desenvolvimento do projeto, tais como características de pré-projeto, normas seguidas, etc. A última seção do primeiro capítulo abordará as principais bibliografias base que permitirão o desenvolvimento do estudo.

O 2º trará uma completa abordagem dos parâmetros e características de transformadores semelhantes ao aqui proposto a ser projetado. A divisão do capítulo seguirá de tal modo que em cada seção é apresentada uma característica e suas respectivas equações e/ou meios de se calcular o parâmetro, sendo essas seções: Núcleo, Circuito Equivalente, Perdas a Vazio, Corrente a vazio, Perdas nos Enrolamentos, Perdas Adicionais e Corrente *Inrush*.

O 3º capítulo estará dividido em três grandes seções: Cálculos no *OCTAVE*, Simulação no *ATP* e Simulação no *FEMM*. O início do capítulo mostra os dados de pré-projeto selecionados para a execução. Após isso, são mostrados os resultados de acordo com a categoria a qual pertence, a saber, as seguintes subseções: Parâmetros Construtivos e Magnéticos do Núcleo, Parâmetros Construtivos e Elétricos das Bobinas, Perdas e Corrente de Energização, sendo que para as perdas são mostrados dados comparativos com equipamento comercial.

Em seguida serão apresentados os dados de entrada utilizados na modelagem do transformador no *ATP*, sendo mostrado também o circuito montado e pronto para a simulação. Após isso, serão mostrados os resultados, entre eles a corrente *inrush*, sendo discutido e comentado o resultado apresentado.

Por fim, o desenvolvimento trará as perdas e o fluxo magnético no transformador simulados no *FEMM*. Serão apresentados os meios de se construir o modelo (desenho do núcleo e bobinas em 2D, seleção e aplicação de materiais) e os ensaios com seus resultados, através de figuras impressas do programa.

O quarto capítulo trará as CONSIDERAÇÕES FINAIS, onde serão feitos comentários pertinentes aos principais pontos do trabalho. Por fim, a última parte do trabalho traz as REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS completas do estudo.

1.6 Fundamentos Teóricos

Para o levantamento de dados e princípios que fundamentam projetos de transformadores de distribuição, serão levados em conta alguns estudos anteriores, em parte já conhecidos da comunidade acadêmica. Dentro de toda a bibliografia, alguns serão utilizados como sequência de roteiro e fundamentos, como se segue nas seções abaixo.

A. Fundamentos da Teoria Eletromagnética - John R. Reitz (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982)

Neste livro texto, são abordados os princípios fundamentais do eletromagnetismo, incluindo demonstrações matemáticas à nível de graduação.

São citados ao longo do livro tópicos da eletrostática (incluindo o conceito de capacitores), passando por corrente elétrica (leis de Ohm e Kirchhoff). Após isso se tem início o estudo do magnetismo e eletromagnetismo, onde são discutidos a partir do capítulo 8 (oito) leis importantíssimas para a engenharia elétrica, tais como: Lei de Biot e Savart, Lei de Ampere e Lei de Lenz. São estudados também os conceitos de ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo, que serão usados como parte do entendimento nos estudos dos materiais que compõe o núcleo de um transformador.

Mais ao fim da obra, tem-se início o estudo do conceito de indução eletromagnética, sendo esta uma das principais bases (se não a principal) que permite o funcionamento de um transformador. Sendo apresentados os conceitos de autoindutância e indutância mútua. Conceitos anteriormente estudados são novamente citados para dar base à formulação de correntes que variam lentamente, baseando a teoria de circuitos elétricos alternados.

B. Circuitos Elétricos – Joseph A. Edminister (EDMINISTER, 1991)

Esta obra, a partir do capítulo 13 (treze) irá tratar de temas envolvendo princípios eletromagnéticos vistos em Reitz; Milford; Christy (1982), aplicados em circuitos elétricos de corrente alternada. Isso dará base para se entender principalmente as simplificações dos circuitos representativos dos transformadores. É tratada a questão da indutância mútua entre duas bobinas, além da autoindutância. É visto também a questão de circuitos acoplados (pela indução, tal como o secundário ao primário de um transformador). Por fim, a corrente induzida

é estudada como uma das consequências da indutância mútua. São estudados os circuitos polifásicos, dando ênfase em circuitos elétricos trifásicos. Nesta seção são esplanadas as possibilidades que os circuitos polifásicos oferecem, tal como as ligações estrela-triângulo (importantíssimas nos terminais de ligação dos transformadores) e tensões do sistema trifásico. Estes conceitos são importantes para se entender a dinâmica de funcionamento de um transformador trifásico, dadas as mais variadas possibilidades de uso e conseqüentemente de projeto que esses equipamentos oferecem.

C. Curso *ATPDraw* (REIS et al., 2012)

Este curso disponibilizado na *web* por engenheiros da UFU traz um completo guia sobre o *software ATPDraw*. Esse *software* faz estudos de transitórios eletromagnéticos em elementos como motores de indução, transformadores, capacitores, etc. O *ATP* permite simulações de transformadores à vazio, em curto-circuito, além da análise da corrente de magnetização transitória *inrush*. Com isso, o manual permitirá num primeiro momento conhecer as principais seções do programa, como biblioteca, localização de componentes, simulações e saídas de dados. O capítulo 7 (sete) deste manual será de grande importância, pois é nesta seção que são explanados os comandos necessários para as simulações da corrente *inrush* do transformador.

D. Manual de Software: *Finite Element Method Magnetics (FEMM)* (MEEKER, 2015)

O manual do *software* referido traz em seu primeiro capítulo uma revisão das Equações de Maxwell para a solução de problemas via método de elementos finitos. O capítulo 3 (três) deste manual traz passos sobre como fazer a geometria do núcleo do transformador no *software* e simular as densidades de fluxo magnético.

E. *Optimization of Losses in a Three-Phase Transformer Design with Inrush Current Analysis* (MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018)

Este artigo dará caminho aos estudos propostos nessa monografia. O documento desenvolvido faz uma profunda análise em processos matemáticos, visando otimizar parâmetros dos transformadores, e aplicar essas otimizações em um projeto de transformador.

O tópico da seção de corrente *inrush* é de extrema importância para a monografia aqui proposta. No artigo, tem-se o estudo dos casos mais severos da corrente de energização do transformador. Após os cálculos terem sido feitos via *software OCTAVE*, obteve-se os parâmetros construtivos do transformador. Com esses dados, foram feitas as simulações no *software FEMM*, visando determinar-se as densidades de fluxo magnético no núcleo do transformador.

Após isso, o estudo fez o uso de técnicas de otimização mono e multiobjetivo, utilizando algoritmos de Evolução Diferencial e Otimização por Enxame de Partículas. Na monografia em construção, porém, não serão feitas análises mais profundas do tipo feitas no artigo.

F. ABNT NBR 5440:2014 Versão Corrigida: 2014 (ABNT, 2014)

Esta norma, cujo título é “Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição – Requisitos” trata dos requisitos mínimos, eletromagnéticos e mecânicos dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição.

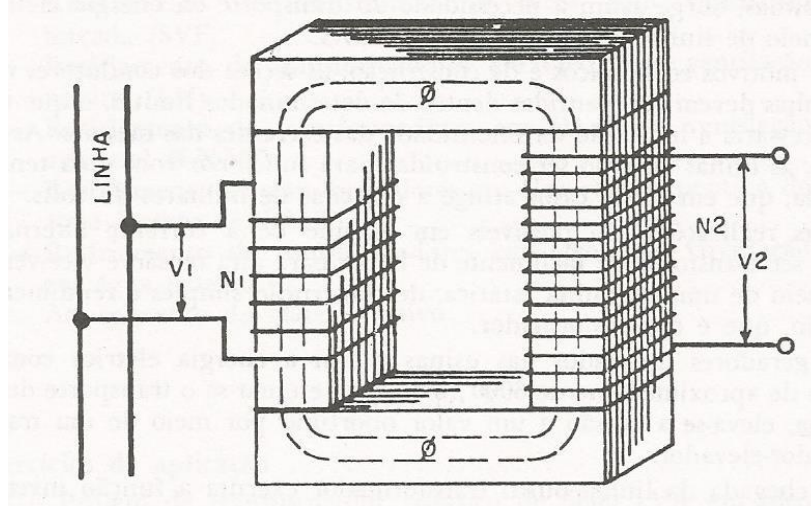
2 TRANSFORMADORES

Os transformadores trifásicos são importantes e essenciais componentes em todas as redes de distribuição de energia elétrica. A necessidade de obter variados níveis de tensão com objetivo do transporte e distribuição de energia em diferentes distâncias torna imprescindível os transformadores para o sistema.

Um transformador trifásico pode ser representado por um transformador monofásico (MARTIGNONI, 1991), onde a indutância mútua nos enrolamentos é um dos princípios de funcionamento. Assim, para se entender as leis de funcionamento será tomado como exemplo um transformador monofásico, o equivalente ao estudo de uma fase de um transformador trifásico.

Essas máquinas elétricas possuem dois circuitos eletricamente isolados e magneticamente ligados, podendo ser chamados de circuito primário e circuito secundário, ou somente “primário” e “secundário”, ou ainda, lado de baixa-tensão e alta-tensão. Estes circuitos envolvem (ou são envolvidos) um núcleo de material ferromagnético de baixa relutância (MARTIGNONI, 1991).

Figura 1: Núcleo Envolvido Trivial de um Transformador Monofásico



Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

De acordo com a Lei de Biot e Savart (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982), a circulação de uma corrente induzirá um campo magnético ao redor do fio; no caso do transformador, ao redor do enrolamento que está alimentando o trafo, o primário, por exemplo. Sendo a alimentação através de uma fonte alternada, será induzido um campo magnético alternado no enrolamento. Este campo magnético terá um fluxo magnético que fluirá no núcleo

de material ferromagnético. Daí o objetivo de se ter um núcleo ferromagnético: concentrar o fluxo magnético induzido.

Como é possível ver na Figura 1, da maneira como se está disposto o primário e secundário do transformador o fluxo magnético induzido fluirá dentro do enrolamento do secundário do transformador, e, de acordo com a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético em um circuito fechado produzirá uma tensão, e conseqüentemente uma corrente no circuito fechado (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982), proporcional ao número de espiras do circuito.

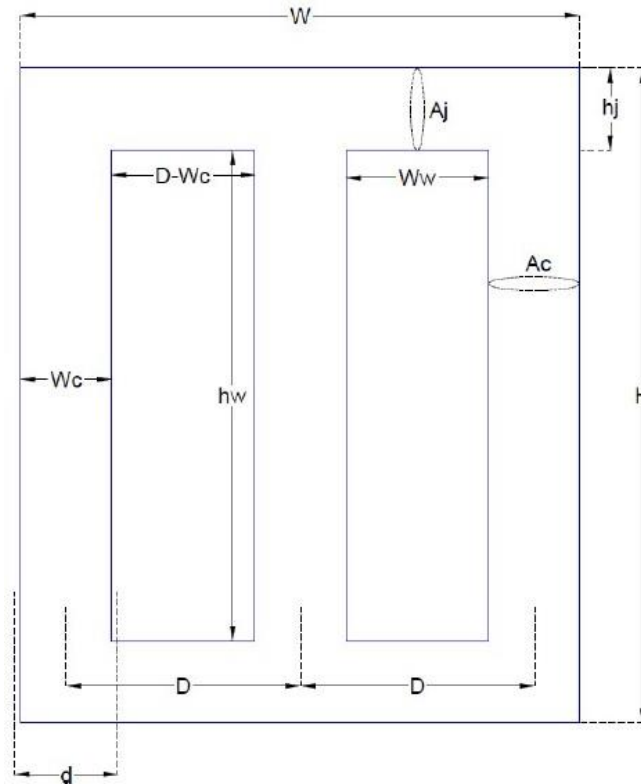
Dessa maneira, o princípio fundamental de funcionamento dos transformadores traz uma série de possibilidades e restrições no que se refere à parâmetros construtivos dessas máquinas. Antes de se iniciar o projeto de um transformador, é necessário definir alguns pontos, tais como: potência [kVA], tensão nominal [V], se o núcleo é do tipo envolvido ou envolvente, dentre outros parâmetros construtivos que definirão a aplicação do equipamento.

2.1 Núcleo

O núcleo de um transformador geralmente é do tipo laminado (MARTIGNONI, 1991), com lâminas isoladas fisicamente umas das outras. O objetivo desta construção é diminuir as correntes parasitas (KOSOW, 1998), minimizando assim as perdas na máquina.

No caso de um transformador trifásico do tipo núcleo envolvido, a geometria do núcleo pode ser dada como na Figura 2:

Figura 2: Estrutura do Núcleo Envolvido de um Transformador Trifásico



Fonte: Adaptado de Maximiano Sobrinho et al. (2018).

Onde:

A_c : área efetiva da coluna [mm^2];

A_j : área do jugo ou da culatra [mm^2];

d : diâmetro interno do enrolamento da bobina de baixa tensão [mm];

D : distância entre os centros de duas colunas [mm];

H : altura total do núcleo [mm];

h_j : altura da culatra [mm];

h_w : altura da janela [mm];

W : largura total do núcleo [mm];

W_c : maior largura da coluna [mm];

W_w : largura da janela [mm].

As distâncias entre os centros das colunas e a largura total do núcleo podem ser dadas pelas 22 e 22:

$$D = W_w + W_c \quad (1)$$

$$W = 2D + W_c \quad (2)$$

Afim de se diminuir a relutância e as perdas no ferro, a relação entre a área do jugo e da coluna é de 15% a 30% maior que a área da coluna, segundo Martignoni (1991), conforme a 22:

$$rel = \frac{A_j}{A_c} \times 1,15 \quad (3)$$

A altura total H do núcleo e a altura da culatra serão dadas conforme a 22 e 22 (MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018):

$$H = hw + 2hj \quad (4)$$

$$hj = Abj/prof \quad (5)$$

Onde:

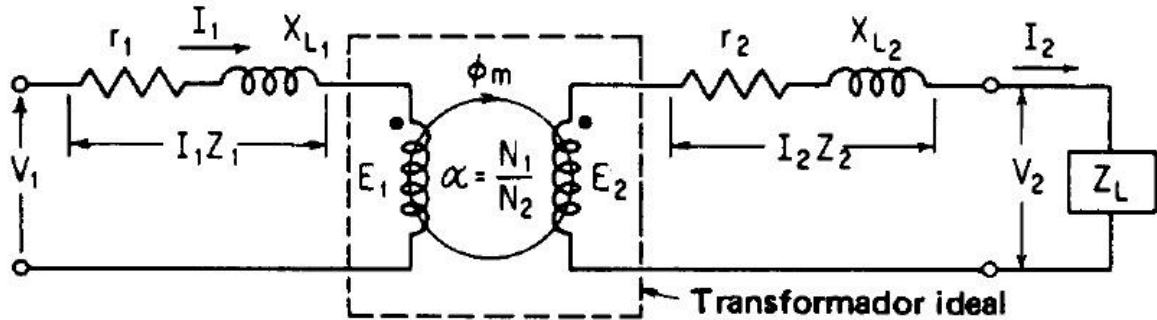
Abj : área bruta do jugo [mm^2];

$prof$: profundidade do núcleo [mm].

2.2 Circuito Equivalente

O circuito equivalente para uma fase de um transformador pode ser dado conforme a Figura 3:

Figura 3: Representação do Circuito Equivalente de uma Fase de um Transformador



Fonte: Kosow (1998).

Onde:

V_1 : tensão de alimentação [V];

V_2 : tensão entregue à carga [V];

E_1 : tensão induzida no primário [V];

E_2 : tensão induzida no secundário [V];

I_1 : corrente no primário [A];

I_2 : corrente no secundário [A];

r_1 : resistência no enrolamento primário [Ω];

r_2 : resistência no enrolamento secundário [Ω];

X_{L1} : reatância no enrolamento primário [Ω];

X_{L2} : reatância no enrolamento secundário [Ω];

N_1 : número de espiras do enrolamento primário [e];

N_2 : número de espiras do enrolamento secundário [e];

Z_L : impedância da carga [Ω];

Φ_m : fluxo magnético resultante nos enrolamentos [Wb];

α : relação de transformação [adimensional].

Sendo a Lei de Indução de Faraday para um circuito fechado de N espiras (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1992) dada pela 23:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (6)$$

De acordo com Kosow (1998), as equações circuitais, seguindo a Figura 3, serão conforme 24 e 24:

$$E_1 \dot{=} \dot{V}_1 - (I_1 \dot{Z}_1) = \dot{V}_1 - I_1(r_1 + jX_{L1}) \quad (7)$$

$$E_2 \dot{=} \dot{V}_2 - (I_2 \dot{Z}_2) = \dot{V}_2 - I_2(r_2 + jX_{L2}) \quad (8)$$

Assim, a potência aparente do transformador trifásico em kVA será dada pela 24 (UPADHYAY, 2008, apud MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018):

$$Q = 3,33 \times f \times Ac \times Bm \times J \times Aw \times Kw \times 10^3 \quad (9)$$

Onde:

f : frequência da tensão de alimentação [Hz];

Bm : indução magnética [T];

J : densidade de corrente nos condutores dos enrolamentos [A/mm^2];

Aw : área da janela.

Na equação acima, o termo Kw é fator de espaço do núcleo e é definido conforme potência do equipamento e isolamento. Para este caso, um transformador de $150kVA$ à óleo, o valor de Kw será $0,1826$, conforme Maximiano Sobrinho et al. (2018) e Upadhyay (2008).

2.3 Perdas a Vazio

Os parâmetros de operação a vazio de um transformador permitem obter informações como perdas no núcleo. Essas perdas no núcleo são as perdas por histerese e perdas devido as correntes parasitas. Segundo Upadhyay (2008) apud Maximiano Sobrinho et al. (2018), a perda para o transformador operando a vazio será:

$$P_0 = (W_{ic} + W_{ij}) \times 1,05 \quad (10)$$

O termo $(W_{ic} + W_{ij})$ representa as perdas específicas nas colunas e nos jugos. Esses valores são dados pelos fabricantes das chapas do núcleo, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Perda Magnética P_0 em função da indução magnética B_m

B_m [T]	$W_{ic} + W_{ij}$ [W/kg]
0,20	0,022
0,30	0,048
0,40	0,082
0,50	0,124
0,60	0,174
0,70	0,237
0,80	0,297
0,90	0,370
1,00	0,452
1,10	0,542
1,20	0,643
1,30	0,759
1,40	0,886
1,50	1,031
1,60	1,240
1,70	1,463
1,80	1,867
1,85	2,122

Fonte: Adaptado de Maximiano Sobrinho et al. (2018).

2.4 Corrente a vazio

Mesmo estando operando a vazio, um transformador consumirá uma corrente I_0 (medida em A) para manter ativo o fluxo magnético e suprir perdas a vazio (correntes parasitas por exemplo). Desse modo, essa corrente geralmente é dividida em uma parte ativa (I_{P0} [A]) e outra reativa (I_{Q0} [A]) (UPADHYAY, 2008, apud MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018), sendo I_0 a raiz da soma dos quadrados, de acordo com as equações 25, 25 e 25:

$$I_0 = \sqrt{(I_{P0})^2 + (I_{Q0})^2} \quad (11)$$

$$I_{P0} = \frac{P_0}{3V_{FBT}} \quad (12)$$

$$I_{Q0} = \frac{f_{em}}{N_{BT}} \quad (13)$$

$$femm = atc + atj \quad (14)$$

Onde:

$femm$: força magnetomotriz no núcleo [Ae/m];

$femmc$: força magnetomotriz na coluna [Ae/m];

$femmj$: força magnetomotriz no jugo [Ae/m].

2.5 Perdas nos Enrolamentos

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, 1982). Assim, essas perdas, dadas em *Watts* [W], podem ser definidas como:

$$P_{J3} = 3(r_{BT}I_{BT}^2 + r_{AT}I_{AT}^2) \quad (15)$$

Onde $R = \rho/l/A$, tanto para a BT quanto para a AT, sendo ρ a resistividade do material [Ωm], l o comprimento do material [m] e A é a área da seção reta [m^2].

2.6 Perdas Adicionais

A construção do transformador, como todo equipamento real, tem lacunas nos parâmetros construtivos que acabam por incorrer em reduções na eficiência de operação, resultado de mais perdas. Aqui, essas perdas serão consideradas como perdas adicionais.

Tais perdas vêm da compressão do material do núcleo, isolamento não-perfeita, contatos elétricos, ferragens, cabeça de bobina, dentre outros aspectos dessa natureza, sendo aproximadamente 20% das perdas de magnetização P_0 (KOSOW, 1982):

$$P_{adc} = 0,2 \times P_0 \quad (16)$$

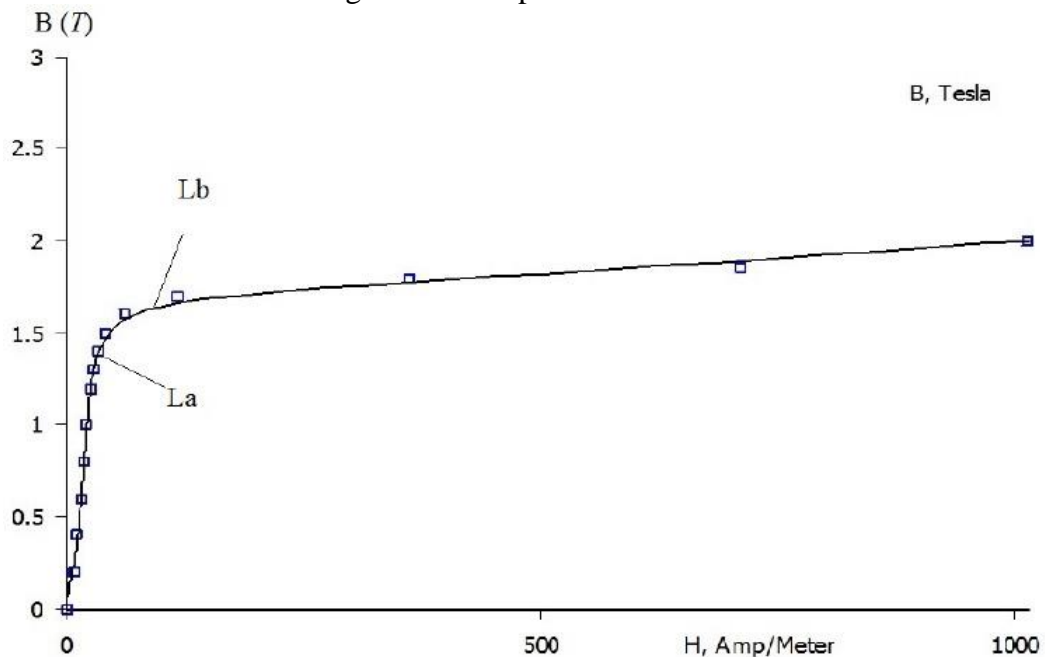
2.7 Corrente *Inrush*

A corrente *inrush* ocorre na energização do transformador. Sua magnitude pode ser maior ou igual a 3 a 10 vezes a corrente nominal, em um tempo de aproximadamente 100ms, atingindo o valor máximo no instante em que uma das tensões passa pelo valor 0 (zero) da forma de onda (instante de maior variação de fluxo), interferindo por exemplo nos ajustes da proteção do transformador.

A corrente de energização tem sua determinação feita de maneira polida, visto que fatores como ângulo de fase de cada uma das fases de alimentação de um transformador trifásico influenciam na magnitude desse transitório.

Para a determinação da corrente de magnetização, é necessário determinar a indutância nas regiões saturadas e não saturadas do núcleo, através da Curva BH do material (MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018), indicada na Figura 4:

Figura 4: Exemplo de Curva BH



Fonte: Maximiano Sobrinho et al. (2018).

Onde:

La : indutância na região não-saturada [H];

Lbs : indutância na região saturada [H] (indicado por Lb no gráfico acima).

O intervalo de tempo em que a corrente atinge seu valor máximo é dado pela 28 (MAXIMIANO SOBRINHO et al., 2018):

$$t_1 = \cos^{-1} \left[\frac{(\Phi_r - \Phi_s) \times \omega + 1}{V_{max2}} \right] \quad (17)$$

Onde:

Φ_r : fluxo magnético residual do núcleo [Wb];

Φ_s : fluxo magnético de saturação do núcleo [Wb];

V_{max2} : tensão máxima no secundário [V];

ω : velocidade angular.

Segundo Jazebi; Leon; WU (2015), apud Maximiano Sobrinho et al. (2018), o valor de pico da corrente de energização (I_p) (dado em A) pode ser dado pela 28:

$$I_p = \frac{(ibt \times bb \times V_{max2} \times r_2) \times (cc \times bb - \cos(\omega \times tpk))}{(r_2)^2 + (\omega \times Ls)^2} \quad (18)$$

$$bb = e^{\left(-\frac{r_2 \times (tpk - t_1)}{Ls}\right)} \quad (19)$$

$$cc = \sin(\omega \times tpk) - \sin(\omega \times t_1) \quad (20)$$

Onde:

ibt : valor da corrente de saturação do núcleo [A];

Ls : soma da indutância na região saturada e da indutância de curto-circuito da rede [H];

tpk : instante em que a corrente *inrush* atinge o pico [s];

bb : parte da equação dividida devido ao tamanho;

cc : parte da equação dividida devido ao tamanho.

Assim, para se obter a simulação da pior situação possível da corrente de energização (I_p), objetiva-se tomar o momento em que uma das tensões passe pelo ponto zero, onde se teria a pior condição da corrente *inrush*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como anteriormente descrito, este estudo lançará mão de cálculos matemáticos para dimensionamento do transformador, bem como de simulações via *ATP* e *FEMM*. Para uma melhor perspectiva de projeto, este capítulo está dividido em três seções, representando os cálculos via *OCTAVE*, simulações no *ATP* e *FEMM*, respectivamente. No início de cada seção será descrito como foram feitos os cálculos ou simulações, dispondo capturas de tela dos programas, onde será possível entender a dinâmica dos trabalhos feitos.

Mostrados os procedimentos, ao final de cada seção serão expostos os resultados, sendo feitos comentários pertinentes à proposta do trabalho, analisando pontos convenientes e possibilidades gerais.

3.1 Cálculos no *OCTAVE*

Uma vez determinada a potência do transformador, bem como níveis de tensão e isolamento, foram definidos os valores de algumas constantes presentes nas equações que seguiram, tal como segue na Quadro 1:

Quadro 1: Constantes de Entrada para o Cálculo no *OCTAVE*

Variável	Valor	Unidade	Significado
Q	150	kVA	Potência de entrada
Q_f	50	kVA	Potência de entrada de fase
V_1	380	V	Tensão de linha no primário
V_2	13,8	kV	Tensão de linha no secundário
V_{1f}	220	V	Tensão de fase no primário
V_{2f}	13,8	kV	Tensão de fase no secundário
J_1	1,50	A/mm^2	Densidade de corrente no primário
J_2	1,50	A/mm^2	Densidade de corrente no secundário
ρ	0,02857	Ω/m	Resistividade dos condutores das bobinas (alumínio)
B_m	1,55	T	Densidade de fluxo magnético do núcleo
K_{sw}	8,0	-	Variável para o cálculo de K_w
R_{jan}	3,40	-	Relação entre a altura e largura da janela
rel	1,20	-	Relação entre as áreas brutas da coluna e culatra

k	0,505	-	Constante relacionada ao número de degraus do núcleo
kt	0,55	-	Constante da relação de espiras
Ku	0,907	-	Fator de utilização em relação ao número de degraus
Ke	0,945	-	Constante de empilhamento
Bs	1,90	T	Densidade na região saturada
Br	1,20	T	Densidade remanescente
Dfe	7650	kg/m^3	Densidade do aço silício do núcleo
f	60	Hz	Frequência de operação

Fonte: Autor.

No APÊNDICE A – CÓDIGO DE EQUACIONAMENTO NO *OCTAVE*, contido neste trabalho, é possível visualizar o código utilizado no *OCTAVE* para o equacionamento do projeto do transformador. No código estão descritas todas as variáveis e constantes utilizadas, e os fatores que levaram à escolha dos respectivos valores. O material escolhido para o núcleo foi do tipo aço-silício, grão orientado M-27, cujos dados de Curva BH são fornecidos pelos fabricantes. No presente projeto foi utilizado a curva do fabricante *Aperan*, disponível para consulta com o fabricante. Desse modo, obteve-se os resultados dos parâmetros construtivos do transformador, bem como as perdas no equipamento, corrente *inrush* dentre outros valores calculados.

3.1.1 Parâmetros Construtivos e Magnéticos do Núcleo

Dentre as dimensões calculadas, é válido observar algumas das principais, listadas no Quadro 2.

Quadro 2: Principais Dimensões do Núcleo

Variável	Valor	Unidade	Significado
H	887,51	mm	Altura do núcleo
W	800,73	mm	Largura do núcleo
wc	147,89	mm	Largura da coluna
ww	178,53	mm	Largura da janela
hw	607,01	mm	Altura da janela
hj	140,25	mm	Altura da culatra (jugo)
Ac	16313	mm^2	Área efetiva da seção da coluna

A_j	19576	mm^2	Área da culatra (jugo)
$prof$	147,85	mm	Profundidade do núcleo
MT	467,09	kg	Massa do núcleo
X_b	0,0269	Ω	Reatância na BT
X_A	105,20	Ω	Reatância na AT
L_b	0,0714	mH	Indutância na BT
L_A	279,05	mH	Indutância na AT
F_{magb}	0,82	Wb	Fluxo de magnetização na BT
F_{magA}	51,80	Wb	Fluxo de magnetização na AT
R_{magb}	104,78	Ω	Resistência de magnetização na BT
R_{magA}	414570	Ω	Resistência de magnetização na AT

Fonte: Autor.

Comparando os valores calculados com transformadores de mercado, observa-se que a metodologia aplicada nos cálculos obteve bom desempenho, de modo que as dimensões calculadas ficaram próximas de um equipamento real. Para tal, observa-se abaixo o Quadro 3, com dimensões de um transformador comercial de 150kVA, 13,8kV/380V, isolação à óleo, da fabricante ITAIPU:

Quadro 3: Dimensões Externas de um Transformador Comercial

Dimensão	Valor	Unidade
<i>Altura</i>	1130	<i>mm</i>
<i>Largura</i>	1280	<i>mm</i>
<i>Profundidade</i>	870	<i>mm</i>

Fonte: Adaptado de Transformadores (2019).

Considerando que as medidas calculadas no *software* são internas, ou seja, referidas apenas ao núcleo, sem levar em conta as bobinas e a carcaça do equipamento (tal como é considerado nas medidas do modelo comercial da tabela acima), percebe-se a coerência de tamanho com os dados de projeto.

3.1.2 Parâmetros Construtivos e Elétricos das Bobinas

Dando sequência aos resultados, serão explanados nessa subseção os valores referentes às medidas das bobinas, tais como seção dos fios, correntes nominais, à vazio, dentre outros parâmetros, de acordo com o Quadro 4: Parâmetros das Bobinas:

Quadro 4: Parâmetros das Bobinas

Variável	Valor	Unidade	Significado
$I1$	227,9	A	Corrente nominal de fase na BT
$I2$	3,62	A	Corrente nominal de fase na AT
I_0	4,4	A	Corrente de magnetização quando energizada a BT
$N1$	33	e	Número de espiras na BT
$N2$	2049	e	Número de espiras na AT
$Fc1$	151,93	mm^2	Seção reta do condutor de BT
$Fc2$	2,78	mm^2	Seção reta do condutor de AT
$diametro_b$	13,91	mm	Diâmetro do condutor de BT
$diametro_A$	1,88	mm	Diâmetro do condutor de AT
$L_{mbtfemm}$	604,63	mm	Comprimento da seção circunscrita das bobinas de BT
$L_{mATfemm}$	1036,7	mm	Comprimento da seção circunscrita das bobinas de AT
$R1$	0,0037	Ω	Resistência do enrolamento de BT
$R2$	21,84	Ω	Resistência do enrolamento de AT

Fonte: Autor.

Analisando as seções retas dos condutores de baixa e alta tensão, na escolha de condutores comerciais para a BT, poderiam ser usados fios de $150mm^2$, cuja corrente máxima aproximada é 250A, visto que a corrente nominal na BT é 227,9A. Para a AT, um condutor de $4mm^2$ caberia com folga, visto sua corrente máxima aproximada ser de 28A, ante os 3,62A de corrente nominal calculados para alta.

3.1.3 Perdas

As perdas no transformador foram calculadas tal como descrito nas seções 2.3, 2.5 e 2.6. Além dos valores finais das perdas, foram calculados também valores intermediários, afim de se acompanhar e gerar dados de análise. Dentre esses valores intermediários, têm-se as perdas no enrolamento de alta e de baixa, individualmente. Assim, segue no Quadro 5: Dados das Perdas do Transformador, os valores calculados:


Quadro 5: Dados das Perdas do Transformador

Variável	Valor	Unidade	Significado
<i>Wic</i>	256,58	<i>W</i>	Perdas a vazio nas colunas
<i>Wij</i>	180,92	<i>W</i>	Perdas a vazio nas culatras (jugo)
<i>Po</i>	459,37	<i>W</i>	Perdas a vazio no núcleo (colunas e culatras)
<i>PJ1</i>	577,00	<i>W</i>	Perdas nos enrolamentos de BT
<i>PJ2</i>	860,3	<i>W</i>	Perdas nos enrolamentos de AT
<i>Pj</i>	1437,3	<i>W</i>	Perdas nos enrolamentos de AT e BT
<i>Padc</i>	91,87	<i>W</i>	Perdas adicionais
<i>PerdasTT</i>	1988,54	<i>W</i>	Perdas totais calculadas

Fonte: Autor.

Afim de se promover comparações, a Figura 5: Dados de um Transformador *WEG* mostra os dados referentes a um transformador *WEG* com as mesmas especificações do equipamento aqui projetado:

Figura 5: Dados de um Transformador WEG

	FOLHA DE DADOS	Data : 10 / mar / 2019
Linha de Produto: Transformadores de Distribuição		
Características		
Potência: 150 kVA Norma de Fabricação: NBR 5440 Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6 kV Tensão Secundária: 380/220 V Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30°	Frequência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos 60° C no topo do óleo Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6,5 Perdas em vazio (perdas no ferro): 485 W Perdas totais: 2335 W Corrente de excitação: 2,3 % Impedância a 75° C: 4,0 % Comprimento (C) : Consultar Vendas T&D Largura (L) : Consultar Vendas T&D Altura (A) : Consultar Vendas T&D Peso: Consultar Vendas T&D Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão	

Fonte: Adaptado de (WEG TRANSFORMADORES, 2019).

Analisando os dados do transformador comercial, percebe-se que os parâmetros calculados estiveram dentro do esperado. Comparando as perdas no núcleo houve uma diferença de apenas 5,28% ($P_o = 459,37W$ ante 485W do transformador comercial).

Tomando as perdas totais, a diferença entre o calculado e o real foi de 14,83%. Levando em conta que a diferença nas perdas do núcleo foi ainda menor, a diferença nas perdas totais cresce devido à fatores não explanados no catálogo do fabricante em questão. Dentre esses fatores poder-se-ia citar, principalmente, o tipo de condutor utilizado nos enrolamentos, e seus variados parâmetros, como resistividade, seção, material, etc.

Considerando ainda o fato de que o projeto proposto não é uma reprodução do transformador comercial, conclui-se que os cálculos das perdas se mostram confiáveis para futuras utilizações em outros projetos.

3.1.4 Corrente de Energização

Nas bibliografias especializadas, são apresentadas várias maneiras de se calcular a corrente de energização de um transformador, a saber, autores como Zirka et al. (2012) e Jazebi; Leon; WU (2015). Nesse projeto, afim de se obter uma margem de segurança, foi utilizada mais de uma proposta de cálculo.

O Quadro 6 apresenta alguns resultados calculados da corrente de energização para o pior caso possível, onde uma das fases passa no ponto 0 (zero) do gráfico da forma de onda.

Quadro 6: Valores Máximos das Correntes *Inrush* Calculadas

Variável	Valor	Unidade	Referência Bibliográfica
<i>Imaximooa</i>	725,36	A	(JAZEBI; LEON; WU, 2015)
<i>Imaxzirka1</i>	719,74	A	(ZIRKA et al.,2012)

Fonte: Autor.

Como previsto, a corrente de energização é bem maior que a corrente nominal do transformador, chegando a ser o dobro da magnitude. Afim de facilitar a leitura desse estudo, é conveniente citar que a variável *Imaximooa* presente na tabela acima é a mesma corrente de energização de pico I_p presente na 28, porém citada com outro nome.

Assim, nesta seção de cálculos foram apresentados os principais parâmetros de projeto do transformador. As próximas seções, 3.2 e 3.3 trarão os métodos e resultados das simulações, onde serão feitas comparações com os resultados aqui calculados.

3.2 Simulação no ATP

Para as simulações no ATP, foram usados parâmetros calculados na seção 3.1, além de dado de pré-projeto. A simulação consistiu em representar um transformador não-ideal, saturável, no *software*, simulando uma situação onde o equipamento seria ligado à uma rede elevadora, sendo o primário a BT e o secundário a AT.

Ligado ao primário, foi inserida uma fonte de tensão trifásica, cuja tensão é igual a tensão de fase da BT do transformador. Após a fonte, foi inserida uma chave automática temporizada, para simular o momento em que um transformador real é ligado à rede já energizada. Nessa chave foi escolhido um tempo ($t = 0,00139s$) de fechamento tal que uma das fases da fonte trifásica estivesse passando pelo ponto de 0 (zero) da forma de onda, fazendo com que se tenha mais um fator de aumento da corrente *inrush*, permitindo assim simular a pior situação possível dessa corrente.

Após a chave e antes do trafo, foram inseridos amperímetros para a medição da corrente, bem como voltmímetros para se ter uma segurança maior no acompanhamento dos dados. Por fim, foi inserido um transformador trifásico saturável de características mais próximas possíveis do projetado, ou seja, um transformador não-ideal, permitindo considerar algumas perdas na simulação. A Figura 6 mostra como foi feita a modelagem:

Figura 6: Dados de Entrada do Transformador

Component: SATTRAFO.sup

Attributes Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	0.22	13.8
R [ohm]	0.0037	21.8447
L [mH,ohm]	0.0714	279.0548

Coupling: Y D
Phase shift: 30

I(0)= 6.2258 Rm= 104.781 3-leg core
F(0)= 0.8235 R0= 0.5 RMS 3-winding

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide Lock

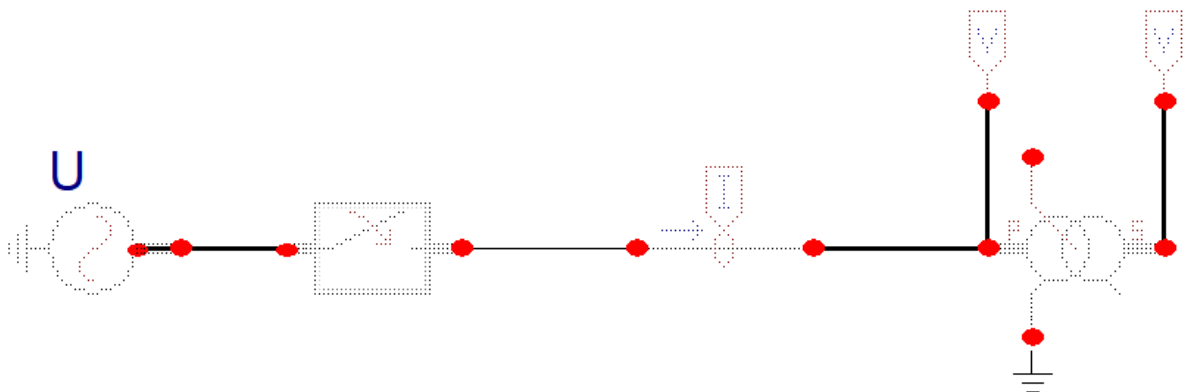
NODE	PHASE	NAME
P	ABC	X0019
S	ABC	X0023
Sat	ABC	X0003
P-N	1	

OK Cancel Help

Fonte: Autor.

Assim, obtêm-se o circuito desenhado na Figura 7:

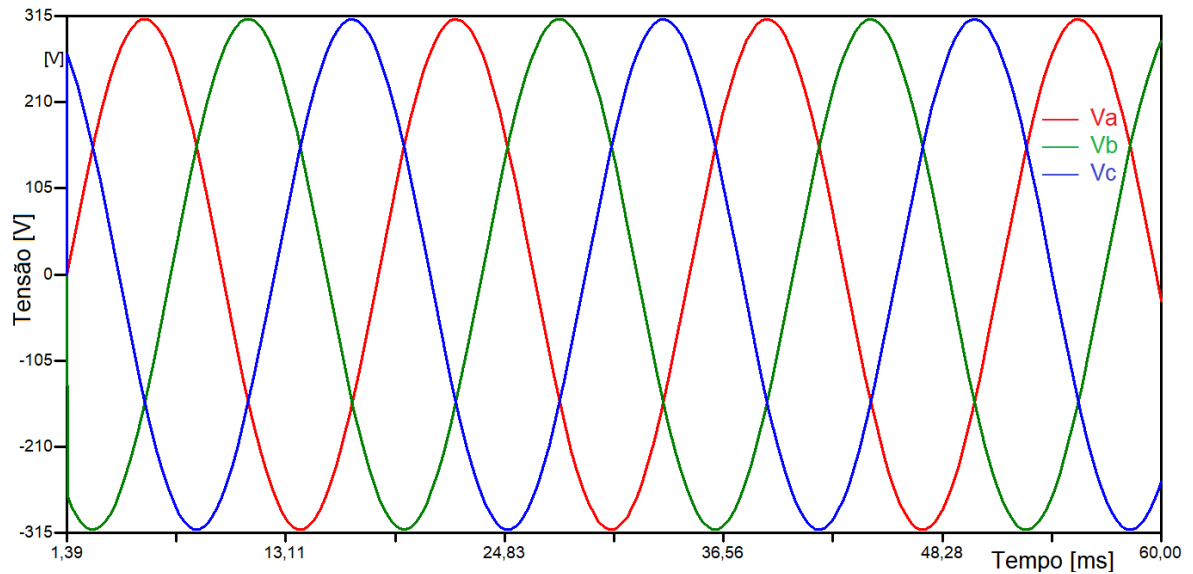
Figura 7: Circuito Montado no ATP



Fonte: Autor.

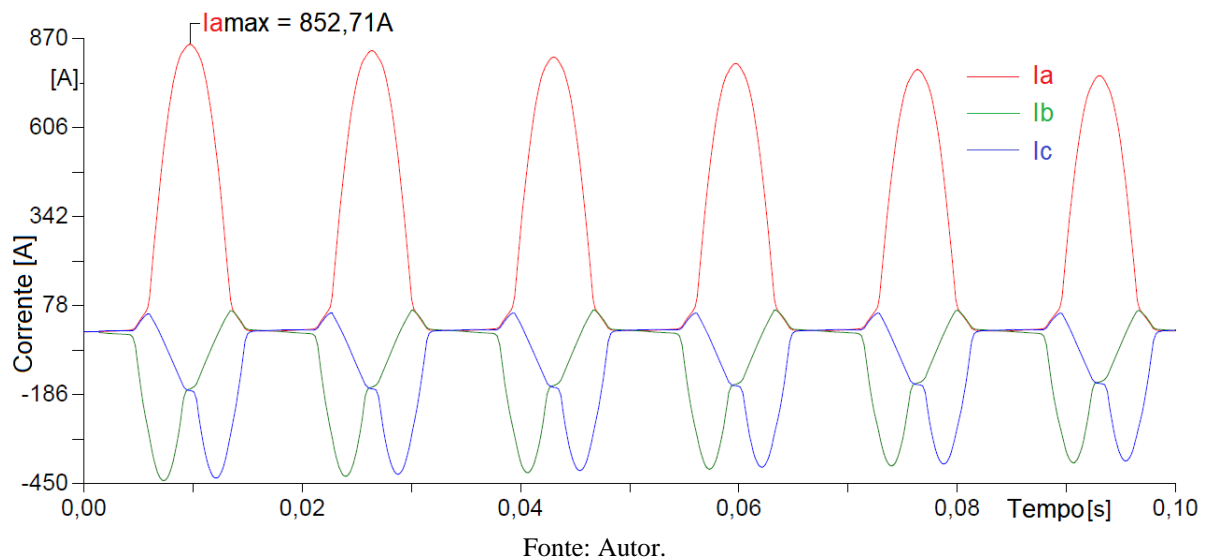
Tendo o circuito montado como acima, foi feita a simulação, cujos resultados podem ser vistos nas Figura 8: Tensão na BT e Figura 9: Corrente *Inrush*:

Figura 8: Tensão na BT



Fonte: Autor.

Observando o gráfico acima, percebe-se que as tensões nas três fases obedecem ao valor proposto em projeto ($V_a = V_b = V_c = 220 \times \sqrt{2}$). Nota-se também que a tensão V_a passa pelo ponto de 0 (zero) no momento que é fechada a chave ($t = 1,39\text{ms}$), fazendo assim com que a corrente de energização, que será mostrada na Figura 9, possua o maior valor, conforme proposto no projeto.

Figura 9: Corrente *Inrush*

Fonte: Autor.

Analisando o gráfico da Figura 9, percebe-se o valor máximo da corrente *Inrush* = 852,71A. Se tomarmos o maior valor calculado no Quadro 6: Valores Máximos das Correntes *Inrush* Calculadas, comparando com o simulado teremos uma diferença de 14,93%. Essa

diferença pode ser considerada razoavelmente pequena, uma vez tomados os fatores usados nos cálculos e simulações. Como se pôde perceber, os dados de entrada do *ATP* não contemplam alguns dos fatores calculados, o que faz com que, juntamente com os diversos métodos existentes de cálculos e simulações, ocorram essas diferenças.

Todavia, os valores simulados e calculados para a corrente de magnetização mostram um elevado valor máximo. Se forem levados em conta a corrente nominal de pico na baixa tensão $I_l = 227,9 \times \sqrt{2} = 322,3A$ e o menor valor calculado/simulado, $I_{maxzirka1} = 719,14A$, será possível perceber que a corrente de energização máxima é no mínimo 2,23 vezes maior que a máxima corrente nominal, situação que só ocorrerá com máxima carga no transformador.

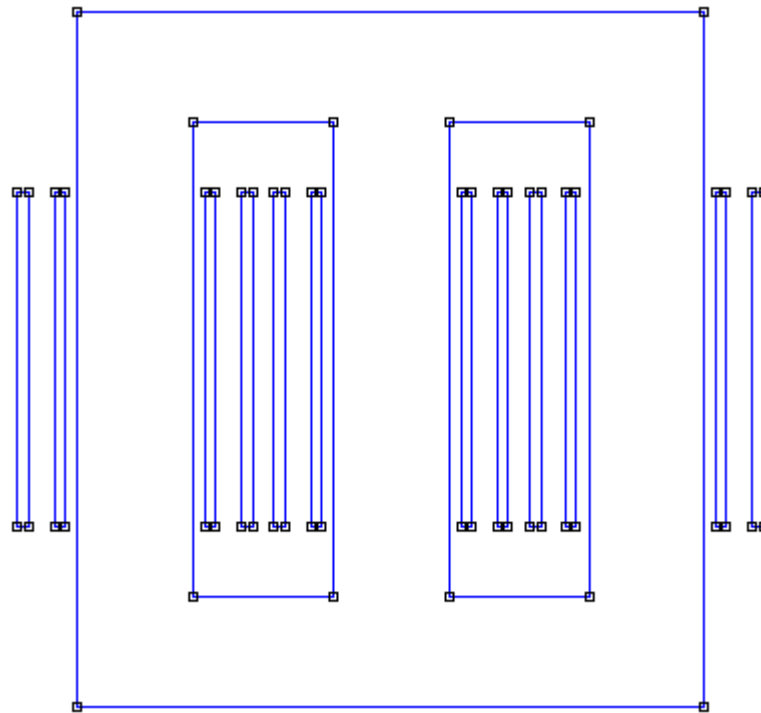
Considerando a corrente simulada no *ATP*, a diferença será ainda maior, sendo a corrente *inrush* 2,65 vezes maior que a corrente nominal para situação de máxima carga no transformador.

3.3 Simulação no *FEMM*

A simulação no programa *FEMM* teve por finalidade obter o fluxo magnético no núcleo do transformador, além de simular as perdas no equipamento, através de ensaios a vazio e de curto-circuito.

3.3.1 Desenho e Materiais

A primeira etapa foi desenhar o núcleo e bobinas no programa. O desenho consistiu de um esboço em 2D, tomando as medidas (em largura e altura) apresentadas no Quadro 2: Principais Dimensões do Núcleo, além de um corte no que seriam as bobinas circundando as colunas do núcleo, cujos parâmetros foram apresentados no Quadro 4: Parâmetros das Bobinas. Desse modo, a Figura 10: Núcleo e Bobinas do Transformador no *FEMM* mostra o resultado:

Figura 10: Núcleo e Bobinas do Transformador no *FEMM*

Fonte: Autor.

Desenhado o núcleo, foram descritos os materiais que seriam utilizados na composição deste, além de bobinas e isolamento para a simulação. Para as bobinas, foram utilizados a condutância do alumínio e os diâmetros dos condutores calculados, tanto para a BT quanto para a AT, conforme mostram as Figura 11: Dados de Entrada Para o Condutor de BT e Figura 12: Dados de Entrada Para o Condutor de AT:

Figura 11: Dados de Entrada Para o Condutor de BT

Name	BT		
B-H Curve	Linear B-H Relationship		
Linear Material Properties			
Relative μ_x	1	Relative μ_y	1
ϕ_{hx} , deg	0	ϕ_{hy} , deg	0
Nonlinear Material Properties			
Edit B-H Curve		ϕ_{hmax} , deg	0
Coercivity		Electrical Conductivity	
H_c , A/m	0	σ , MS/m	35
Source Current Density			
J, MA/m ²	0		
Special Attributes: Lamination & Wire Type			
Magnet wire			
Lam thickness, mm	0	Lam fill factor	1
Number of strands	1	Strand dia, mm	13.91

Fonte: Autor.

Figura 12: Dados de Entrada Para o Condutor de AT

Name	AT		
B-H Curve	Linear B-H Relationship		
Linear Material Properties			
Relative μ_x	1	Relative μ_y	1
ϕ_{hx} , deg	0	ϕ_{hy} , deg	0
Nonlinear Material Properties			
Edit B-H Curve		ϕ_{hmax} , deg	0
Coercivity		Electrical Conductivity	
H_c , A/m	0	σ , MS/m	35
Source Current Density			
J, MA/m ²	0		
Special Attributes: Lamination & Wire Type			
Magnet wire			
Lam thickness, mm	0	Lam fill factor	1
Number of strands	1	Strand dia, mm	1.88

Fonte: Autor.

Nas caixas de diálogo das figuras acima, foram definidos “BT” e “AT” para nomear os materiais que foram inseridos nos condutores de baixa-tensão e alta-tensão, respectivamente, seguindo assim o padrão do projeto. Os diâmetros dos condutores foram inseridos nas lacunas de “*Strand dia, mm*”, e a condutividade do alumínio em “*Electrical Conductivity*”.

No material ferromagnético do núcleo foram utilizados os dados da mesma Curva BH utilizado nas outras seções do projeto, inseridos na caixa “*Edit B-H Curve*”, além da constante de empilhamento ($Ke = 0,945$), na caixa “*Lam fill factor*”, conforme indica a Figura 13:

Figura 13: Dados do Material Utilizado no Núcleo

Name	M-27	
B-H Curve	Nonlinear B-H Curve	
Linear Material Properties		
Relative μ_x	12138	Relative μ_y 12138
ϕ_{hx} , deg	0	ϕ_{hy} , deg 0
Nonlinear Material Properties		
Edit B-H Curve		ϕ_{hmax} , deg 0
Coercivity		Electrical Conductivity
H_c , A/m	0	σ , MS/m 3
Source Current Density		
J, MA/m ² 0		
Special Attributes: Lamination & Wire Type		
Laminated in-plane		
Lam thickness, mm	0.635	Lam fill factor 0.945
Number of strands	0	Strand dia, mm 0

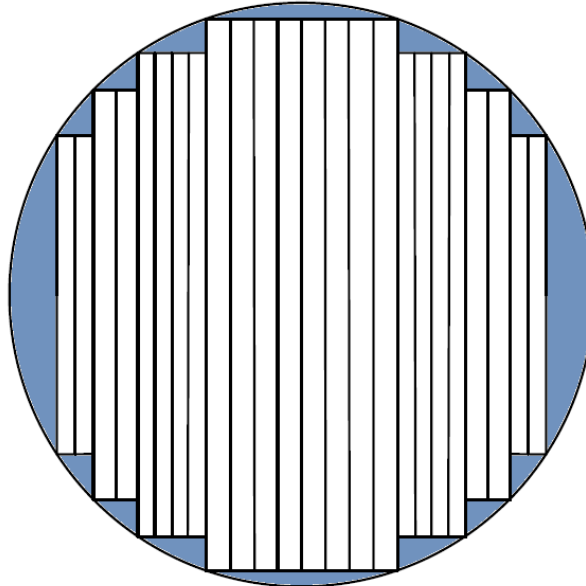
Fonte: Autor.

Na caixa de diálogo “*Electrical Conductivity*” da Figura 13 foi representada uma condutividade elétrica do núcleo. Esse parâmetro foi mantido para simular as perdas por correntes parasitas no núcleo do transformador, de modo que com essa condutividade (baixa) é possível simular essas pequenas correntes.

A constante de empilhamento do núcleo foi inserida levando em conta o fato de que existem os degraus no núcleo laminado. Dado o volume cúbico do núcleo, que é o que se espera inserindo os parâmetros de altura, largura e profundidade (este mais a frente será citado), o fator Ke vem a corrigir esses espaços “não usados” do volume calculado (incluindo os espaços entre as chapas do núcleo laminado). Para um melhor entendimento, a Figura 14 traz a seção reta de

uma das colunas do núcleo, onde é possível verificar que as partes pintadas em azul e as linhas pretas na vertical são os espaços do volume cúbico calculado não ocupados pelo ferro:

Figura 14: Exemplo da Seção Reta de um Núcleo Laminado

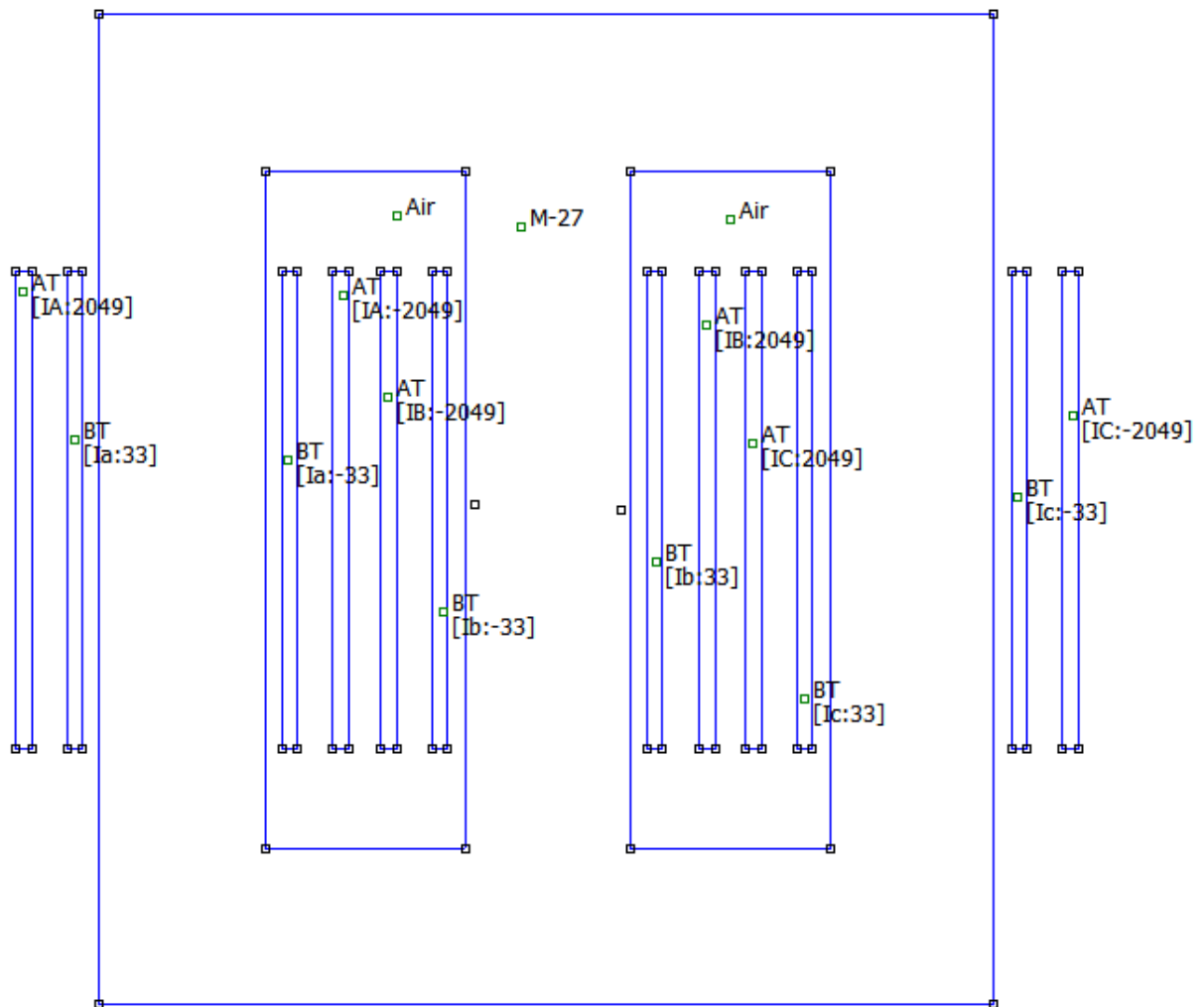


Fonte: Autor.

Para a isolação do núcleo foi definido o ar como material. Apesar de no projeto ser considerado óleo como isolante do núcleo, para a simulação no *FEMM* a escolha entre ar e óleo é indiferente. Isso se deve ao fato de que no programa não há parâmetros que permitem simular e conseqüentemente distinguir o óleo isolante do ar.

Foram designados também 6 (seis) circuitos, sendo eles *IA*, *IB*, *IC*, *Ia*, *Ib*, e *Ic*, representando as três fases da AT e BT, respectivamente. O sentido de passagem das correntes nas bobinas foi respeitado, de modo que o fluxo magnético no núcleo tivesse o sentido padrão, subindo nas colunas das laterais e descendo na coluna central do núcleo. Ainda, foi definida uma região de contorno ao redor do transformador, de modo que a simulação se limitasse a região, e não todo o plano de desenho do *FEMM*. Assim, os materiais foram aplicados no núcleo, conforme a Figura 15:

Figura 15: Aplicação dos Materiais no Núcleo e Bobinas



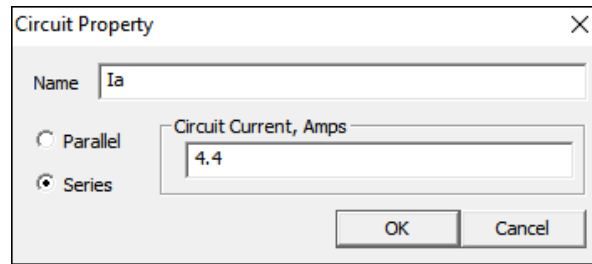
Fonte: Autor.

Conforme se pode observar, a aplicação dos materiais nas bobinas passou pela inserção do número de espiras, apresentados anteriormente no Quadro 4. Para inserir os sentidos das correntes anteriormente citado, foram considerados lados negativos dos enrolamentos, de modo que o sinal negativo acompanhando o número de espiras (“[Ib:-2049]”, por exemplo) representa a corrente entrando no plano.

3.3.2 Ensaio a Vazio

O ensaio foi feito com o objetivo de se obter o fluxo magnético no núcleo, bem como as perdas a vazio no equipamento. Para tal, considerando o trafo sendo alimentado na BT, foi inserido o valor da corrente $I_o = 4,4A$ nos valores das correntes I_a , I_b , e I_c . Na Figura 16, é possível ver um exemplo da inserção desse parâmetro na corrente I_a :

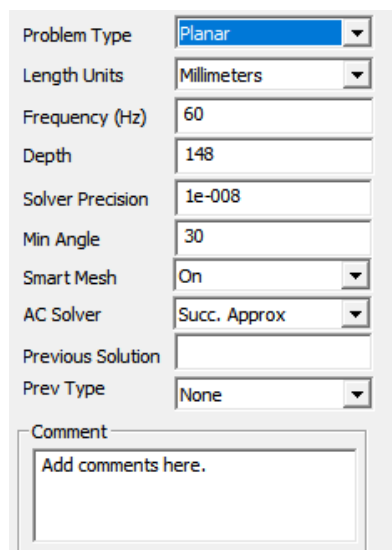
Figura 16: Inserção da Corrente a Vazio em I_a



Fonte: Autor.

Como o desenho foi feito em 2D, para simular um núcleo real, foi necessário inserir a profundidade. Porém, esse parâmetro dará a profundidade a todo o desenho, incluindo as bobinas. Devido a isso, as simulações no *FEMM* foram divididas em vazio e curto-circuito, onde os ensaios em curto-circuito foram divididos em mais duas etapas, totalizando três arquivos “.*FEMM*”. Assim, aqui nessa seção foi inserido o parâmetro *Depth* (profundidade) do núcleo (valor arredondado), apresentada no Quadro 2: Principais Dimensões do Núcleo, conforme mostra a Figura 17:

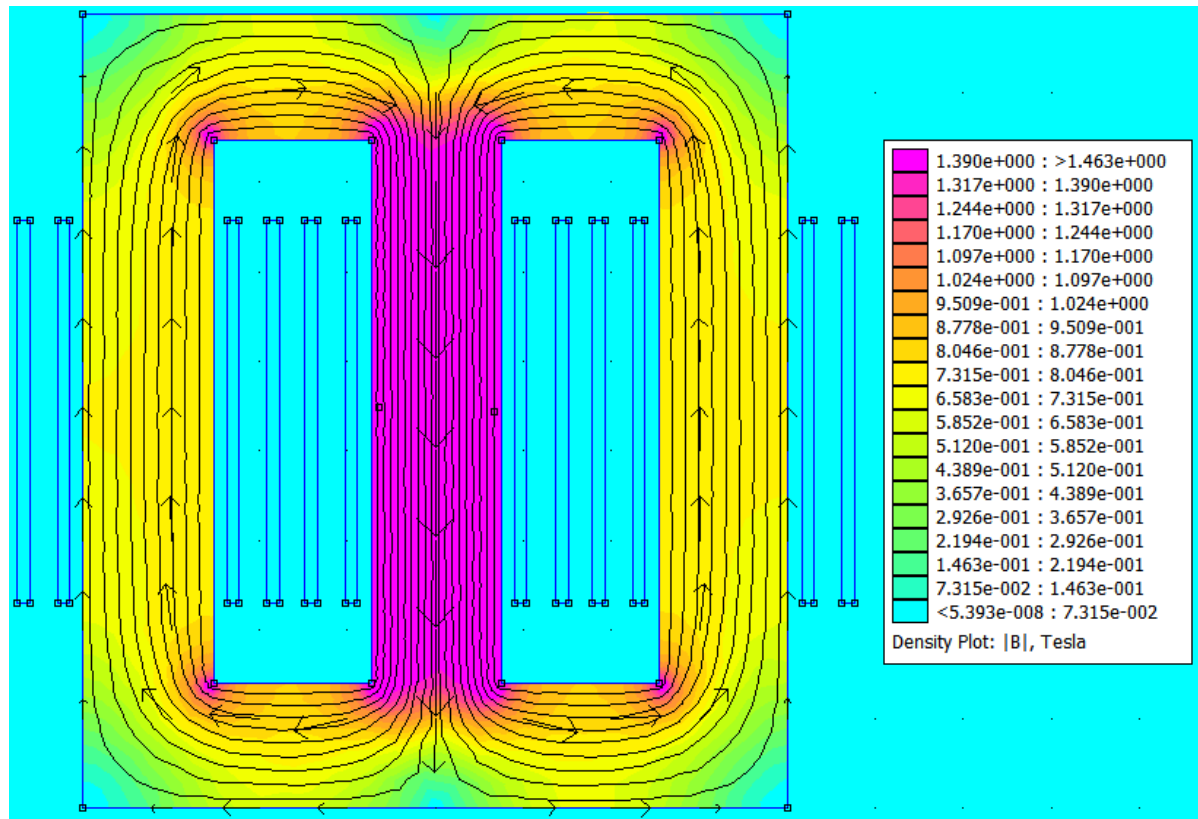
Figura 17: Profundidade do Núcleo



Fonte: Autor.

Após isso, foi simulada a situação descrita. Como resultado, obteve-se o fluxo magnético da Figura 18:

Figura 18: Fluxo Magnético no Núcleo Simulado no *FEMM*

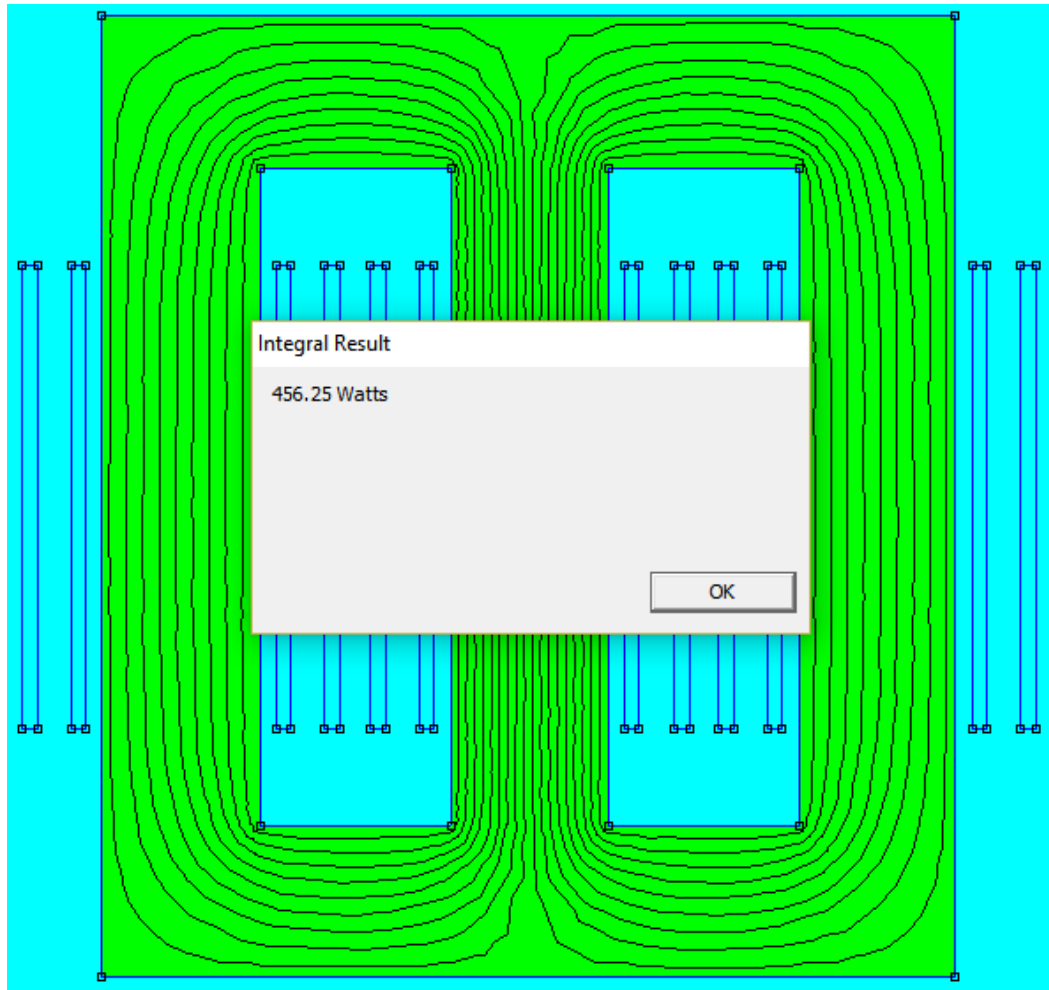


Fonte: Autor.

Observando a figura acima, é possível ver que o fluxo magnético máximo para a situação do transformador operar a vazio é de $1,463T$, onde os vetores indicam o sentido do fluxo. Considerando o valor do fluxo inserido no início do projeto, na seção 3.1, onde $B_m = 1,55T$, foi encontrada uma diferença entre o simulado e o calculado de apenas 5,61%, mostrando que as metodologias de cálculo adotadas, bem como os parâmetros de pré-projeto considerados apresentam coerência entre si.

Ainda nesse mesmo ensaio, foi possível achar as perdas a vazio, tal como segue na Figura 19:

Figura 19: Perdas a Vazio



Fonte: Autor.

Conforme indica a imagem, as perdas a vazio simuladas resultaram em 456,25W. Tomando o valor de P_o apresentados no Quadro 5, observa-se que não há diferença prática (0,68%) entre o calculado e o simulado, indicando novamente coerência da metodologia.

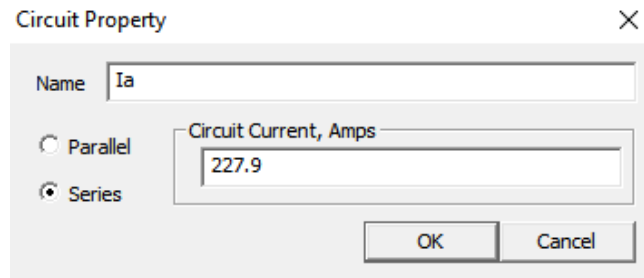
Cabe também comparação com o transformador *WEG* já apresentado nesse trabalho, na Figura 5: Dados de um Transformador *WEG*. Nesse caso, a ficha indica perdas a vazio de 485W. Comparando com o simulado, têm-se 5,93% de diferença, indicando que o transformador projetado segue com padrões bem referenciados em relação a modelos comerciais.

3.3.3 Ensaio em Curto-Circuito

Afim de se estudar as perdas no cobre foi feito um ensaio em curto-circuito no transformador. Devido a inserção do parâmetro *Depth* nas bobinas, o ensaio foi feito em duas partes. Primeiramente, foi ensaiada a BT, onde foi inserida a corrente nominal I_l nas correntes

I_a , I_b , e I_c , e 0 (zero) nas correntes de AT. A Figura 20 mostra a inserção das correntes para o ensaio:

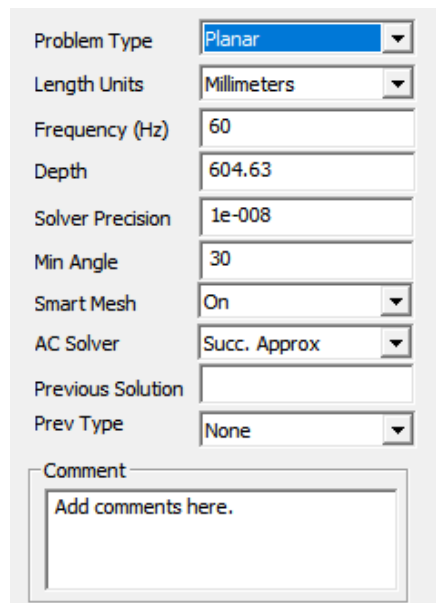
Figura 20: Corrente Nominal I_l em I_a



Fonte: Autor.

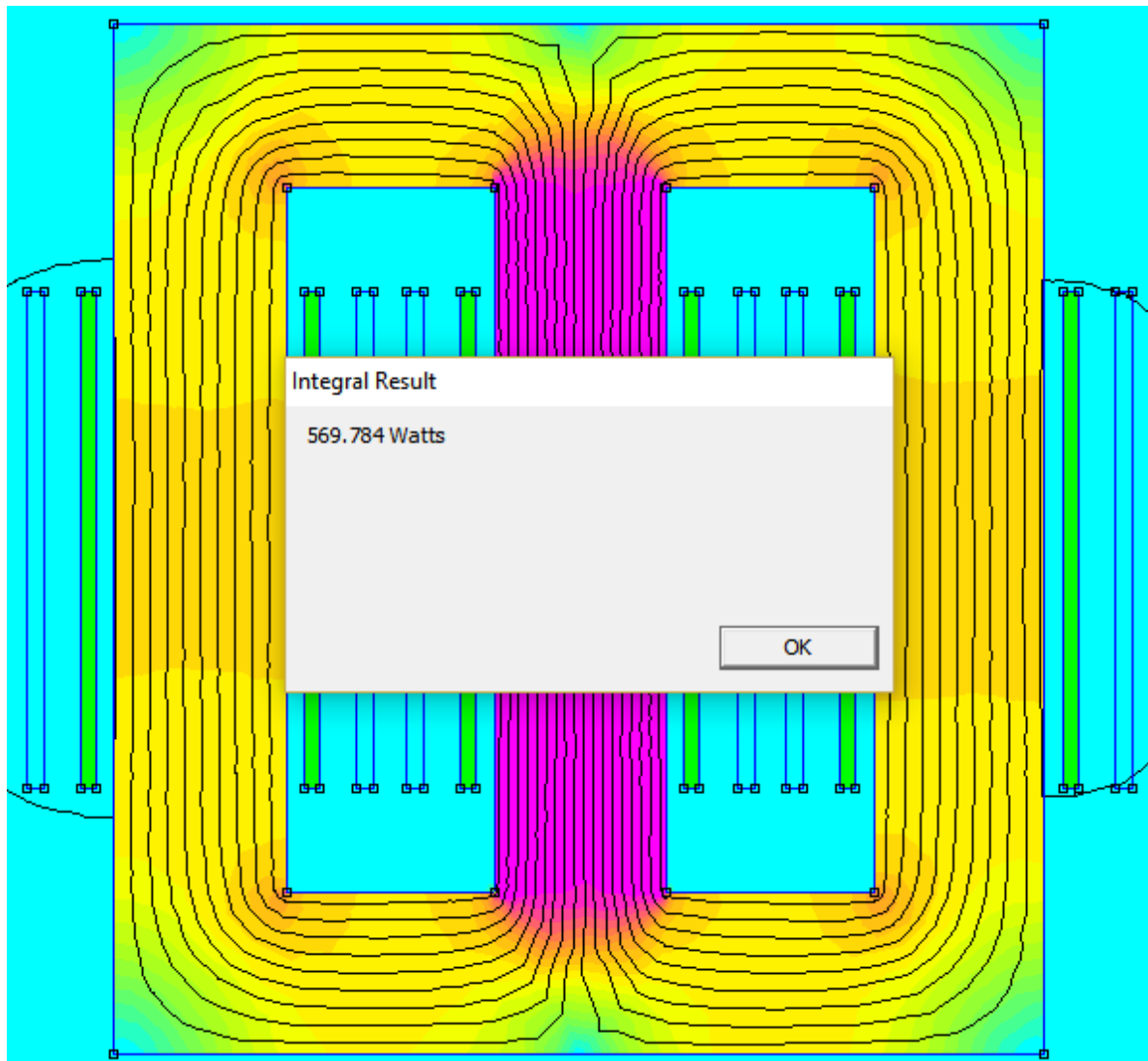
Após isso, foi inserida a profundidade das bobinas de BT, apresentada no Quadro 4 como $L_{mbtfemm} = 604,63mm$, tal como segue na Figura 21:

Figura 21: Profundidade das Bobinas de BT



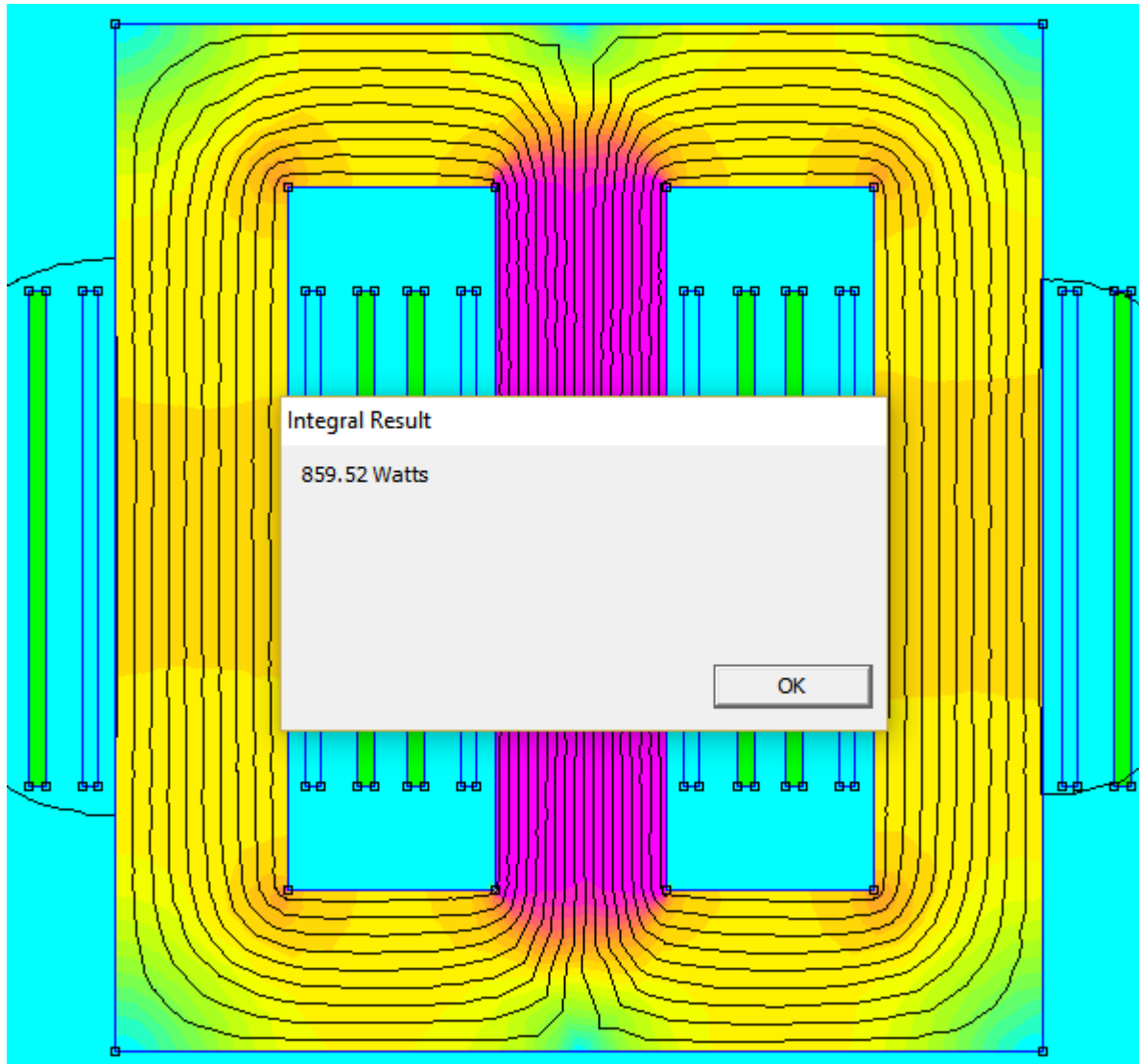
Fonte: Autor.

Enfim, pôde ser simulada a situação para perdas nos enrolamentos de baixa tensão, cujo resultado pode ser visto na Figura 22: Perdas P_{JI} :

Figura 22: Perdas P_{JI} 

Fonte: Autor.

Comparando com as perdas P_{JI} apresentadas no Quadro 5, tem-se uma diferença de 1,25%. Para a simulação das perdas na AT, foram seguidos os mesmos passos. Foi inserido $I_2 = 3,62A$ nas correntes I_A , I_B , e I_C e 0 (zero) nas correntes de baixa tensão. A profundidade ($Depth$) foi de $1036,7mm$ (parâmetro $L_{mATfemm}$ do Quadro 4). Assim, como resultado obteve-se as perdas mostradas na Figura 23:

Figura 23: Perdas P_{J2} 

Fonte: Autor.

Afim de se ter uma visão geral, o Quadro 7 mostra todos os dados de perdas obtidas comparando-as com os parâmetros da ABNT (2014) e do Transformador *WEG* já citado.

Quadro 7: Comparação Final das Perdas

Parâmetro	Cálculo	Simulação	Diferença	Trafo <i>WEG</i>	ABNT	Classe
P_o [W]	459,37	456,25	0,68%	485	245 – 485	E
I_o [A]	4,4	-	-	5,24	5,24 – 5,24	-
P_j [W]	1437,3	1429,3	0,57%	1753	1206 – 1753	C
P_{adc} [W]	91,87	91,25	0,67%	97	49 – 97	E
$Perdas_{TT}$ [W]	1988,54	1976,8	0,59%	2335	1500 – 2335	D

Fonte: Autor.

Somando as perdas P_{J1} e P_{J2} calculadas e comparando com as simuladas, têm-se uma diferença irrisória de 0,57%. Somando as perdas totais simuladas no *FEMM* com as perdas adicionais em cima do valor das perdas a vazio também simuladas (P_{adc} sendo 20% de P_o simulada), têm-se o valor total das perdas simuladas de 1976,8W.

Novamente, comparando com as perdas totais calculadas ($Perdas_{TT} = 1988,54W$), a diferença final entre as perdas totais calculadas foi de irrelevantes 0,59%. Assim, conclui-se que as perdas calculadas e simuladas apresentam um alto grau de confiabilidade, visto que, como é possível analisar ao longo do projeto, os dados inseridos tanto para os cálculos quanto para as simulações são valores reais e possíveis, a citar alguns: resistividade dos condutores, dados do material do núcleo (cujos valores são fornecidos por fabricantes das chapas de aço-silício), dentre outros parâmetros extraídos de bibliografias consagradas na área.

Um outro ponto que cabe destaque são as perdas calculadas e simuladas. Na Figura 5, é mostrada a ficha comercial de um transformador *WEG* com especificações semelhantes ao equipamento aqui projetado. Analisando os dados de perdas, além das já faladas diferenças pequenas entre os valores estudados e o do trafo comercial em questão, é válido falar que essas perdas, sejam a vazio ou no cobre, sempre foram menores no projeto. Esse ponto demonstra boa perspectiva em relação ao estudo aqui desenvolvido como um todo, onde sempre houve coerência entre os valores projetados e reais, e, conforme a ABNT (2014), os resultados obtidos sempre estiveram dentro dos parâmetros exigidos pela norma.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do projeto, nas fases de levantamento de dados, definição de constantes de pré-projeto, foi possível identificar que há fatores que merecem uma maior atenção na determinação dos valores. Dados como fator de espaçamento do núcleo, tipo de material escolhido para as chapas, bobinas, dentre outros, modificaram consideravelmente os resultados finais, tanto dos cálculos como das simulações.

As simulações se mostraram uma boa fonte de parâmetros para os cálculos, visto que os valores encontrados sempre estiveram de acordo com os parâmetros exigidos pela norma ABNT vigente (ABNT NBR 5440:2014 Corrigida). Um ponto a favor dos cálculos é o fato de que usar mais de uma forma de se obter um determinado parâmetro é de certa forma simples, visto que basta o conhecimento do equacionamento utilizado nas mais diferentes bibliografias, enquanto nas simulações, a metodologia é característica intrínseca de cada *software* utilizado.

De acordo com os modelos comerciais analisados e expostos ao longo do projeto, as principais características dos equipamentos, tais como dimensões físicas, perdas, e níveis de corrente calculados e simulados apresentaram uma variação pequena, principalmente as perdas do equipamento.

Os cálculos e simulações da corrente *inrush*, onde mesmo se utilizando de três formas de estudo a margem de diferença ficou em torno dos 15%. Admite-se que este seria um limite razoável de margem para alguns parâmetros específicos (a corrente de energização por exemplo), que dependem de muitas variáveis e apresentam várias maneiras de ser calculadas, fato que pode ser observado no próprio projeto, onde são apresentados dois valores calculados de formas diferentes para a corrente de energização.

Para estudos futuros em cima desse projeto fica como proposta um aprofundamento em alguns parâmetros de pré-projeto, tal, fatores de isolação, determinação do número de degraus, metodologias de cálculos da corrente *inrush*, entre outros, que podem mudar de maneira considerável os principais dados construtivos do transformador.

Por fim, cita-se que o uso dos *softwares ATP e FEMM* neste trabalho de conclusão de curso como base para a modelagem de transformadores, traz consigo um estímulo à futuros trabalhos e pesquisas na área no âmbito do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins. Espera-se que o presente trabalho com transformadores nos *softwares* citados possa despertar interesse em futuros estudos na mesma linha, a saber, as já citadas sugestões de pesquisas no aprofundamento de parâmetros de pré-projeto e cálculos da corrente *inrush*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440:2014 VERSÃO CORRIGIDA: 2014**: Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos. 2014. 52 p.
- CARNEIRO, Mariana; VETTORAZZO, Lucas. PIB indica estagnação econômica na eleição. **Folha de São Paulo**. São Paulo, p. 1-1. 1 set. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/09/pib-indica-estagnacao-economica-na-eleicao.shtml>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- EDMINISTER, Joseph A.. **Circuitos Elétricos**: Reedição da Edição Clássica: Resumo da Teoria, 350 Problemas Resolvidos, 493 Problemas Propostos. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, Inc., 1991.
- JAZEBI, S.; LEON, F. de; WU, N. Enhanced analytical method for the calculation of the maximum inrush currents of single-phase power transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 30, n. 6, p. 2590–2599, 2015.
- KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Porto Alegre: Globo, 1982. 667 p.
- MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991. 307 p.
- MAXIMIANO SOBRINHO, Adelicio et al. Optimization of Losses in a Three-Phase Transformer Design with Inrush Current Analysis. **Jornal of Control, Automation and Eletrical Systems**, São Paulo, v. 29, n. 1, p.778-795, 31 ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40313-018-0413-8>>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**.2015. Disponível em: <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2018.
- REIS, Alex et al. **Curso de ATPDraw**. Uberlândia: Ufu, 2012. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/326804728/Apostila-Do-Curso-de-ATPDraw>>. Acesso em: 01 set. 2018.
- REITZ, John R.; MILFORD, Frederick J.; CHRISTY, Robert W.. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Câmpus Ltda., 1982.
- TRANSFORMADORES, Itaipu. **Tabela Trifásicos**. Itápolis: Catálogo, 2019. 1 p. Disponível em: <<https://www.itaiputransformadores.com.br/assets/.../TABELA%20TRIFÁSICO.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2019.
- UPADHYAY, K G. Constructional Features and Designe Procedure of Transformers. In: UPADHYAY, K G. **Designe of Electrical Machines**. New Age International (p) Ltd, 2018. Cap. 8. p. 335-387.
- WEG TRANSFORMADORES (Ed.). **Folha de Dados**. Brasil: Weg, 2019. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_transf_ficha.asp>. Acesso em: 10 mar. 2019.

ZIRKA, S. et al. Topology-correct reversible transformer model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 27, n. 4, p. 2037–2045, 2012.

APÊNDICE A – CÓDIGO DE EQUACIONAMENTO NO *OCTAVE*

Afim de se esclarecer como algumas constantes e variáveis foram determinadas, segue abaixo um esboço do código utilizado no para o equacionamento do projeto do transformador de distribuição trifásico.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%*****%TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO (ESTRELA-DELTA)%*****
Q=150;
% Potencia [kVA] - Definido pelo usuário.
Qf=Q/3;
%Potencia de fase do transformador [kVA].
V1=0.380;
%Tensão no primário [kV] - Conforme tensão da Energisa - TO.
V2=13.80;
%Tensão no secundário [kV] - Conforme tensão da Energisa - TO.
V1f=V1/sqrt(3);
%Tensão de fase no primário [kV].
V2f=V2;
%Tensão de fase no secundário [kV].
J1=1.50;
%Densidade de corrente no primário [A/mm2] - Pag 348 de Upadhyay (2008).
J2=1.50;
%Densidade de corrente no secundário [A/mm2] - Pag 348 de Upadhyay (2008).
Bm=1.55;
%Fluxo magnético no núcleo [T] - Pag 348 de Upadhyay (2008).
Ksw=8;
%Variável para o cálculo de Kw - Maximiano Sobrinho (2018) e Upadhyay
(2008).
Kw=Ksw/(30+V2f);
%Fator de espaçamento do núcleo - Maximiano Sobrinho (2018).
Rjan=3.40;
%Relação entre altura e largura da janela - Pag 353 de Upadhyay (2008).
rel=1.20;
%Relação entre as áreas brutas da coluna e culatra - Pag 353 de Upadhyay
(2008).
k=0.505;
%Constante relacionada ao número de degraus do núcleo - Pag 342 de Upadhyay
(2008).
kt=0.55;
%Constante da relação de espiras.
Ku=0.907;
%Fator de utilização em relação ao número de degraus - Maximiano Sobrinho
(2018).
Ke=0.945;
%Constante de empilhamento - Fornecido pelo fabricante das chapas.
Bs=1.90;
%Densidade na região saturada [T] - Upadhyay (2008).
Br=1.20;
%Densidade remanescente [T] - Upadhyay (2008).
Dfe=7650;
%Densidade do aço silício do núcleo [kg/m^3] - Fornecido pelo fabricante
das chapas.
f=60;
%Frequencia [Hz].

```

```

Et=(kt)*(sqrt(Q));
%Tensão por volta [V/e].
N1=(V1f*10^3)/Et;
%Número de espiras no primário [e].
N2=(V2f*10^3)/Et
%Número de espiras no secundário [e].
Ac=(Et/(4.44*f*Bm))*10^6;
%Área efetiva da coluna do núcleo [mm^2]
Abc=Ac/Ke;
%Área bruta da coluna [mm^2].
So=Abc/Ku;
%Seção circular circunscrita da coluna [mm^2].
dc=2*(sqrt(So/pi));
%diâmetro da coluna do núcleo [mm].

L1=dc*0.95;
L2=dc*0.846;
L3=dc*0.707;
L4=dc*0.534;
L5=dc*0.313;
teta1=acos(0.95);
teta2=acos(0.846);
teta3=acos(0.707);
teta4=acos(0.534);
teta5=acos(0.313);
e1=sin(teta1)*(dc/2);
e2=(sin(teta2)*(dc/2))-e1;
e3=(sin(teta3)*(dc/2))-e1-e2;
e4=(sin(teta4)*(dc/2))-e1-e2-e3;
e5=(sin(teta5)*(dc/2))-e1-e2-e3-e4;

Prof=(e1+e2+e3+e4+e5)*2;
%Profundidade do núcleo [mm].

d=sqrt(Ac/k);
%Diâmetro interno do enrolamento [mm].
wc=L1;
%Largura da coluna [mm].
a=(d-wc)/2;
b=a;
Aw=(Q/(3.33*Ac*f*Bm*Kw*J1))*10^9
Q=3.33*f*Ac*Bm*J1*Kw*Aw*10^-9;
%Potência trifásica [kVA].
ww=sqrt(Aw/Rjan);
%Largura da janela [mm].
hw=Aw/ww;
%Alura da janela [mm].
D=ww+wc;
W=2*D+wc;
%Largura do núcleo [mm].
Aj=rel*Ac;
%Área da culatra [mm^2].
Abj=rel*Abc;
%Área bruta da culatra [mm^2].
hy=Abj/Prof;
%Altura da culatra [mm].
By=Bm*(Ac/Aj);
%Densidade de fluxo no jugo [T].
H=hw+2*hy;
%Altura do núcleo [mm].
Vferc=3*hw*Ac;

```



```

%Volume de ferro nas colunas [mm^3].
Bfe=Dfe*10^-9;
%Densidade do aço silício [kg/mm^3].
Mc=Bfe*Vferc;
%Massa nas colunas [kg].
Pic=(peso_especifico(Bm,0));
Wic=(Pic*Mc);
%Perda específica nas colunas [W].

Vferj=Aj*W*2;
%Volume do ferro nas culatras [mm^3].
Mj=(Vferj)*Bfe;
%Massa nas culatras [kg].
MT=Mc+Mj;
%Massa total do núcleo [kg].
Pij=(peso_especifico(By,0));
Wij=(Pij*Mj);
%Perda específica nas culatras [W].

PesoTT=(Mc+Mj);
%Peso total do núcleo [kg].
Po=(Wic+Wij)*1.05;
%Perdas a vazio no núcleo [W].

hhc=curva_BH(Bm,0);
HHc=(3*hw*hhc);
%Força magnetomotriz nas colunas [Ae].
hhj=curva_BH(By,0);
HHj=(2*W*hhj);
%Força magnetomotriz nas culatras [Ae].
HHcj=HHc+HHj;
%Força magnetomotriz total [Ae].
Ip=(Po/(3*V1f))*10^-3;
%Componente ativa[A] da corrente a vazio.
Iq=(HHcj/(N1))*10^-3;
%Componente reativa [A] da corrente a vazio.
Io=sqrt(Ip^2+Iq^2);
%Corrente a vazio [A].

I1=(Qf/V1f);
%Corrente nominal de fase no primário.
Fc1=I1/J1;
%Seção do condutor [mm^2] no primário.

Swind1=Fc1*N1;
z=(hw*Kw)*2;
hb=((hw-z))*1.11;
tbt1=(Swind1/(hb))*1.10;
tbt2=tbt1*2;

Dextbt=tbt2+(d);
dmbt=(Dextbt+d)/2;
Lmbt=(3.1416*dmbt);
Lmbtfemm=(3.1416*dmbt);
%Comprimento para o parâmetro Depth do FEMM (na BT).
I2=(Qf/V2f);
Fc2=I2/J2;
%Seção do condutor [mm^2] no secundário.

SwindAT=(Fc2*N2);

```

```

tAT1=(SwindAT/(hb))*1.10;
Laxju=hw-((hw*Kw)/2);
tAT2=tAT1*2;
dintAT=(Dextbt+6*a);
DextAT=(dintAT+2*tAT2);
dMAT=(dintAT+DextAT)/2;
LmAT=(pi*dMAT);
LmATfemm=(pi*dMAT);
%Comprimento para o parâmetro Depth do FEMM (na AT).

R1=(0.02857)*((Lmbt*N1*10^-3)/(Fc1));
%Resistência do enrolamento primário [ohm].
R2=(0.02857)*((LmAT*N2*10^-3)/(Fc2));
%Resistência do enrolamento secundário [ohm].

PJ1=(R1*((I1)^2)*3);
%Perdas por efeito Joule no primário [W].
PJ2=(R2*((I2)^2)*3);
%Perdas por efeito Joule no secundário [W].
PJ=PJ1+PJ2;
%Perdas por efeito Joule totais [W].
diametrob=sqrt((Fc1*4)/pi);
%Diâmetro do condutor na BT [mm^2].
diametroA=sqrt((Fc2*4)/pi);
%Diâmetro do condutor na AT [[mm^2].
Padc=0.2*Po;
%Perdas adicionais [W].
PerdasTT=(Po+PJ+Padc);
%Perdas totais no transformador [W].

Wa=2*pi*f;
%Frequência angular [rad/s].
Pfo=Po/3;
%Potência a vazio por fase [W].
Rm=Pfo/(Io^2);
%Resistência de magnetização [ohm]
Zm=Vlf*1000/Io;
%Impedância de magnetização [ohm].
Xmo=sqrt(Zm^2-Rm^2);
%Reatância de magnetização [ohm].
Mo=4*pi*10^-7;
L=(Mo*(N1^2)*So)/(hb-0.45*dc)
XL=(Wa*L)/1000;
ktrafo=(V2f/V1f)*1000;
XA=XL*(ktrafo^2);
%Reatância na AT [ohm].
ZA=sqrt(R2^2+XA^2);
%Impedância na AT [ohm].
Zb=ZA/ktrafo^2;
%Impedância na BT [ohm].
Xb=sqrt(Zb^2-R1^2);
%Reatância na BT [ohm].
LA=(XA/Wa)*1000;
%Indutância na AT [mH].
Lb=(Xb/Wa)*1000;
%Indutância na BT [mH].
RmagA=(V2*1000)^2/Po;
%Resistência de magnetização na AT [ohm].
Rmagb=(V1f)^2/Po;
%Resistência de magnetização na BT [ohm].
FmagA=V2*1000/(4.44*60);

```

```

%Fluxo de magnetização na AT [Wb].
Fmagb=V1f/(4.44*60);
%Fluxo de magnetização na BT [Wb].

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vm=(V1f*1000)*sqrt(2);
Limb=(Mo*(N1^2)*So)/(hb);
Lsatu=(V1^2)/Q;

Imaxzirkal=(Vm/(Wa*(Lsatu+Limb)))*[2-((Wa*(Br-Bs))*N1*So)/Vm]/10000;
%Corrente inrush [A] segundo Zirka et al. (2012).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vma=Vm*cos(0);
Vmb=Vm*cos(0+(2*pi)/3);
Yr=N1*Br*Ac;
Ys=N1*Bb*Ac;
t1=(acos(((Yr-Ys)*Wa)/Vm)+1)/Wa;
xb=((Vmb/Vmb)+(abs(Vmb+Vma)/3)/Vmb);
tpk=0.0083;
fluxo1=Bm*Ac;
fluxo2=Bs*Ac;
Ln=(hw)*10^-3;
Hs=curva_BH(Bs,0);
Hns=curva_BH(Bm,0);
F1=Hns*Ln;
F2=Hs*Ln;
La=N1^2*fluxo1/F1;
Lbsatu=N1^2*((fluxo2-fluxo1)/(F2-F1));
Ls=Lbsatu+Lsatu;
alfa=(2*pi)/3;
Lma=L*1.01;
Ibta=((Vma*(R1*sin(Wa*t1)-Wa*Lma*cos(Wa*t1)+Wa*Lma*exp(-(R1*t1)/Lma)))/(R1^2+(Wa*Lma)^2))*xb;

Inrusha=(Ibta.*(exp(-R1.*(tpk-t1))/Ls))+((Vma*R1).*[sin(Wa.*tpk)-sin(Wa*t1)*exp((-R1.*(tpk-t1))/Ls)]+(Vma*Wa*Ls).*[cos(Wa*t1).*exp((-R1.*(tpk-t1))/Ls)-cos(Wa.*tpk)]))/ (R1^2+(Wa*Ls)^2);
Imaximoa=Inrusha;
%Corrente inrush segundo Jazeki; Leon; WU (2015).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% S A Í D A %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Q=Q
Qf=Qf
V1=V1
V2=V2
V1f=V1f
V2f=V2f
I1=I1
I2=I2
If1=I1
If2=I2/(sqrt(3))
f=f
Bm=Bm
Bs=Bs
Br=Br
J1=J1
J2=J2
Ksw=Ksw
Kw=Kw

```

k=k
kt=kt
Ku=Ku
Ke=Ke
Rjan=Rjan
rel=rel

Et=Et
N1=N1
N2=N2

Abc=Abc
Ac=Ac
Abj=Abj
Aj=Aj
Aw=Aw
So=So

H=H
W=W
Prof=Prof
D=D
a=a
b=b

d=d
dc=dc
wc=wc
ww=ww
hw=hw
hy=hy

Vferc=Vferc
Vferj=Vferj

Mc=Mc
Mj=Mj

Wic=Wic
Wij=Wij

MT=MT
Po=Po
Padc=Padc
hhc=hhc
hhj=hhj

HHc=HHc
By=By
HHj=HHj

HHcj=HHcj

Fc1=Fc1
Fc2=Fc2
diametrob=diametrob
diametroA=diametroA
Lmbtfemm=Lmbtfemm
LmATfemm=LmATfemm

R1=R1
R2=R2

PJ1=PJ1
PJ2=PJ2
PJ=PJ

LA=LA
Lb=Lb
XA=XA
Xb=Xb

FmagA=FmagA
Fmagb=Fmagb
RmagA=RmagA
Rmagb=Rmagb

Ip=Ip
Iq=Iq
Io=Io

PerdasTT=PerdasTT
PerdasTT=PerdasTT

Imaximoa=Imaximoa
Imaxzirka1=Imaxzirka1