

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Maschio

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS**

Santa Maria, RS
2019

Guilherme Maschio

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS
FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng.

Santa Maria, RS

2019

© 2019

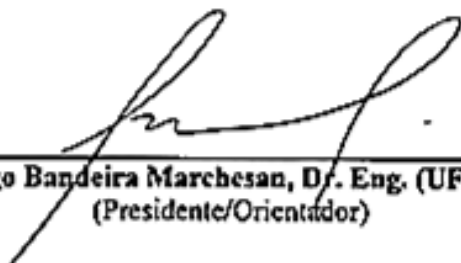
Todos os direitos autorais reservados a Guilherme Maschio. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Rua João Goulart, nº 673, apto 203B, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-220. Fone (+55) 55 99687-6933; E-mail: guimaschio97@gmail.com.

Guilherme Maschio

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS
FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS), como requisito parcial para obtenção do
grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 01 de julho de 2019:



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Leonardo Hautrive Medeiros, Eng. (UFSM)



Rafael Concatto Belframe, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente meus pais, Zilmar e Loreni, pelo apoio incondicional em todas as situações, financeiramente e psicologicamente. Voltar pra casa sempre foi meu porto seguro, o carregador das minhas baterias, sem isso seria muito mais difícil enfrentar os 5 anos de engenharia. Muito obrigado por todos os ensinamentos e valores que me ensinaram, obrigado por me guiar pelos bons caminhos, nem sempre os mais fáceis, obrigado por sempre acreditar em mim e por sempre batalhar juntos pelo melhor, obrigado por fazer tudo o que fizeram e obrigado pelo que ainda vão fazer, sem vocês os obstáculos seriam maiores e mais frequentes. Por último e mais importante, obrigado por me ensinar o sentido da vida, amo vocês.

À Mirella, minha namorada, porque sem você meus dias seriam mais “cinzas”. Obrigado por fazer os momentos estressantes mais felizes, obrigado por compartilhar teu bom humor e alegria sempre que eu chegava em casa, pode ter certeza que você foi fundamental no meu desenvolvimento como aluno e como pessoa. Obrigado por me incentivar a ser sempre uma pessoa melhor e a corrigir os meus defeitos, obrigado por ser tudo o que eu precisava no fim de muitos dias.

Ao meu orientador Tiago Marchesan, muito obrigado por sempre dar conselhos pertinentes, viabilizando o desenvolvimento deste trabalho. À banca do trabalho, meus agradecimentos pelas sábias contribuições e inevitáveis críticas, tudo faz parte do processo de aprendizado.

Ao meu segundo orientador, Leonardo Medeiros, que muitas vezes foi a peça que faltava na solução de problemas impossíveis. Obrigado por guiar não somente nossa pesquisa, mas por incentivar meu crescimento pessoal e profissional. Obrigado por ser a chave que abriu valiosas portas para meu futuro e obrigado pela amizade incondicional.

Ao grupo GEDRE e ao INRI, em especial ao pessoal do LabSim e ao LabMT, por proporcionarem toda a infraestrutura e conhecimento necessários para o desenvolvimento não só deste trabalho, mas de toda a minha formação acadêmica.

Aos meus colegas Afonso, Giancarlo, João e Pedro, do grupo “Mate nosso de cada dia”, e toda a galera do “O grupo do 6,2”, muito obrigado, porque sem o apoio de vocês a maior nota da turma seria sempre 6,2. Obrigado por essa relação de amizade, fazendo da turma um grupo único e colaborativo, porque ninguém se forma sozinho, não é mesmo?

Aos amigos do “3-733-3 – Meia Tonelada” e do “Engradou”, obrigado pelos incontáveis bons momentos e boas histórias, todos ficarão pra sempre guardados no fundo do peito.

“The hardest choices require the strongest wills”

The Mad Titan

RESUMO

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: GUILHERME MASCHIO

ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Devido à crescente demanda de energia elétrica no sistema elétrico de potência, os níveis de curto-circuito se tornam cada vez maiores, levando os equipamentos conectados ao sistema à condições cada vez mais críticas. Isso afeta também os transformadores, que ficam sujeitos à altas correntes circulantes. Essas correntes ocasionam esforços eletromagnéticos elevados nos enrolamentos dos transformadores, podendo levar estes equipamentos à falha, trazendo grandes prejuízos e redução significativa da confiabilidade do sistema. De modo a evitar a avaria recorrente desses equipamentos, é necessário que estudos sejam desenvolvidos na fase de projeto, de modo a verificar a suportabilidade do equipamento quanto aos esforços mecânicos e desenvolver um projeto correto e adequado. Em decorrência da inviabilidade dos ensaios de curto-circuito, devido ao alto custo e capacidade destrutiva dos mesmos, este trabalho propõe um método de simulação dos esforços eletromagnéticos, empregando o método de elementos finitos, viabilizando a análise do comportamento das forças nos enrolamentos. Para validar o método proposto, este trabalho apresenta a modelagem e simulação de um modelo de transformador real, comparando os resultados obtidos com os valores disponibilizados pelo fabricante. Conclui-se, ao final do processo de validação, que é possível empregar o método de simulação proposto de maneira confiável no estudo dos esforços eletromagnéticos, já que os resultados de simulação são satisfatórios diante dos valores reais do fabricante.

Palavras-chave: Esforços Eletromagnéticos. Método de Simulação em Elementos Finitos. Transformadores.

ABSTRACT

SIMULATION AND ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL EFFORTS IN ELECTRICAL TRANSFORMERS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

**AUTHOR: GUILHERME MASCHIO
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN**

Due the increasing demand of electrical energy in the power electric system, the short-circuit level become larger each day, taking the equipment connected to the system to critical conditions. These conditions affect also the transformers, which are subject to high circulating currents. These currents cause high electromagnetic efforts in the transformer's windings, which can lead the equipment to failure, representing large financial loss and significant reduction of the system reliability. In a way of avoiding the recurrent damage of these equipment, studies need to be developed in the project phase, in order to ensure the mechanical supportability of the equipment and to develop an optimal and adequate design. As a result of the inviability of short-circuit tests, due their high financial cost and destructive capacity, this work proposes a simulation routine of the electromagnetic efforts using the finite element method, enabling the analysis of the force behavior in transformer's windings. To validate the proposed method, this work presents the modeling and simulation of a real transformer, comparing the obtained results with the values provided by the manufacturer. It is concluded, after the validation process, that it is possible to use the proposed simulation method in a reliable way in order to analyse eletromechanical efforts, since the simulation results are satisfying against the real values provided by the manufacturer.

Keywords: Eletromagnetic Efforts, Finite Element Method, Transformers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transformador de potência.....	15
Figura 2 – Transformador de distribuição	16
Figura 3 – Circuito eletromagnético simplificado	17
Figura 4 – Esquema típico de construção da parte ativa.....	19
Figura 5 – Tipos fundamentais de bobinas: a) Helicoidal e b) Em disco	20
Figura 6 – Intensidade de campo magnético no ponto	25
Figura 7 – Orientações: a) Regra da mão direita, b) Convenção e c) Representação...26	
Figura 8 – Força magnética sobre cargas em condução	27
Figura 9 – Direção do produto vetorial (regra de Fleming).....	28
Figura 10 – Força de atração	29
Figura 11 – Força de repulsão	29
Figura 12 – Principais formas de onda (corrente e força).....	31
Figura 13 – Fluxo disperso: a) na teoria e b) em simulação	33
Figura 14 – Direção das forças: a) Radiais e b) Axiais	34
Figura 15 – Disposição geral das forças nos enrolamentos	35
Figura 16 – Exemplo de uma malha (corte transversal)	38
Figura 17 – Fluxograma do processo de simulação.....	39
Figura 18 – Parte ativa de um transformador real	40
Figura 19 – Desenho 3φ e 3D do Modelo A.....	41
Figura 20 – Desenho simplificado 1φ e 2D do Modelo A.....	42
Figura 21 – Tipos de simulação: a) Profundidade e b) <i>About Z</i>	43
Figura 22 – Criação da condição de contorno	45
Figura 23 – Comparação da corrente nos modos: a) <i>solid</i> e b) <i>stranded</i>	46
Figura 24 – Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico (normalizada).....	47
Figura 25 – Criação da excitação.....	48
Figura 26 – Criação da malha	49
Figura 27 – Criação do parâmetro	51
Figura 28 – Criação do controle simulacional	52
Figura 29 – Malha para a geometria modelada	53
Figura 30 – Forma de onda das correntes genéricas simuladas (AT e BT).....	55
Figura 31 – Exemplo de linhas de fluxo magnético	56
Figura 32 – Exemplo de densidade de fluxo magnético.....	57

Figura 33 – Forças máximas simuladas nos enrolamentos (vetores)	58
Figura 34 – Janela <i>Results</i> : a) Componente Contínua e b) Componente Alternada.....	59
Figura 35 – Curvas de força contínua, alternada e instantânea total	60
Figura 36 – Divisão dos enrolamentos (3D).....	62
Figura 37 – Direção das forças radiais: a) pontualmente e b) no parâmetro	63
Figura 38 – Formas de onda instantânea da força radial (parâmetro F_01)	64
Figura 39 – Formas de onda instantânea da força axial (parâmetro F_top e F_bot)	66
Figura 40 – Forças radiais ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y)	67
Figura 41 – Forças axiais ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y).....	67
Figura 42 – Força de compressão ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y).....	68
Figura 43 – Forças radiais ao longo da direção radial (parâmetro F_01_Z).....	69
Figura 44 – Distribuição do fluxo magnético na direção radial dos enrolamentos	69
Figura 45 – Forma de onda instantânea da força radial (parâmetro F_X_Z)	70
Figura 46 – Geometria simplificada (2D).....	72
Figura 47 – Direção de giro (2D – <i>About Z</i>).....	74
Figura 48 – Configuração das forças (2D – <i>About Z</i>).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Forças fornecidas pelo Fabricante A	61
Tabela 2 – Especificação das divisões do enrolamento (3D)	61
Tabela 3 – Força radial (3D).....	63
Tabela 4 – Força axial de compressão (3D)	65
Tabela 5 – Força radial (modelo 2D – profundidade)	73
Tabela 6 – Força axial (modelo 2D – profundidade).....	73
Tabela 7 – Força axial (modelo 2D – <i>About Z</i>)	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2	MOTIVAÇÃO	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	TRANSFORMADORES ELÉTRICOS	15
2.1	TEORIA DE FUNCIONAMENTO	16
2.2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	18
2.2.1	Enrolamentos	18
2.2.2	Núcleo	20
2.2.3	Isolação dielétrica	21
2.2.4	Sistema de refrigeração	22
2.2.5	Sustentação mecânica	23
3	ESTUDO ELETROMAGNÉTICO	24
3.1	PRINCÍPIOS ELEMENTARES	25
3.1.1	Lei de Biot-Savart	25
3.1.2	Lei de Ampère	26
3.1.3	Força magnética	27
3.1.4	Forças entre dois condutores retilíneos	28
3.2	ELETROMAGNETISMO NOS TRANSFORMADORES	32
3.2.1	Fluxo disperso	32
3.2.2	Disposição das forças	33
3.2.3	Situações críticas	36
4	SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	37
4.1	1ª ETAPA: MODELAGEM	39
4.1.1	Desenho Trifásico (3 ϕ) - 3D	40
4.1.2	Modelo Monofásico (1 ϕ) - 2D	42
4.1.3	Simulação 2D no Maxwell®	43
4.2	2ª ETAPA: SETUP	44
4.2.1	Condições de contorno	44
4.2.2	Excitação	45
4.3	3ª ETAPA: SIMULAÇÃO	48
4.3.1	Malha	49
4.3.2	Parâmetros	50
4.3.3	Critérios de convergência	51
4.4	4ª ETAPA: RESULTADOS	52
4.4.1	Malha	52
4.4.2	Correntes	54
4.4.3	Fluxo	55
4.4.4	Força	57
5	VALIDAÇÃO DO MÉTODO	61
5.1	SIMULAÇÃO 3D	61
5.1.1	Força radial (3D)	62
5.1.2	Força axial – compressão (3D)	65
5.1.3	Análise detalhada no enrolamento (3D)	66
5.2	SIMULAÇÃO 2D – PROFUNDIDADE	70
5.2.1	Modelagem e configuração de parâmetros	71
5.2.2	Força radial (2D – Profundidade)	72

5.2.3	Força axial (2D – Profundidade)	73
5.3	SIMULAÇÃO 2D – ABOUT Z.....	73
5.3.1	Modelagem e configuração de parâmetros	74
5.3.2	Força radial (2D – About Z)	75
5.3.3	Força axial (2D – About Z).....	75
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os transformadores elétricos estão entre os maiores e mais custosos equipamentos do sistema elétrico de potência. Dessa forma, é muito importante que existam métodos de controle e monitoramento de tais dispositivos, visando evitar ou reduzir quaisquer tipos de falhas ou prejuízos, sejam graves ou não. Considerando o preço e a importância dos transformadores no sistema, é fundamental que se tenham estudos visando sua integridade física e funcional, como estudos direcionados às questões eletromagnéticas, focados em analisar as forças que surgem devido à altas correntes, como em casos curtos-circuitos, correntes de *inrush* ou conexão fora de sequência de fase.

1.2 MOTIVAÇÃO

Dentre todas as falhas que um transformador está sujeito durante sua operação, aquelas que levam à circulação de altas correntes representam um grande potencial destrutivo, visto que as forças magnéticas que surgem devido a essas correntes podem danificar as estruturas essenciais ao funcionamento do equipamento. Tais correntes podem surgir devido à situações de curto-circuito, correntes de magnetização (*inrush*) ou até mesmo a conexão com sequência de fase invertida. Essas forças, quando aplicadas aos enrolamentos dos transformadores com alta intensidade, podem vir a deformar as espiras de diversas maneiras, prejudicando os aspectos construtivos do equipamento, principalmente a isolação e a integridade física do núcleo, dos enrolamentos e dos suportes mecânicos.

Devido ao potencial destrutivo de tais forças originadas das altas correntes, ensaios em transformadores reais muitas vezes não são viáveis. Nesse contexto, surgem as simulações computacionais empregando o método de elementos finitos, no sentido de economizar recursos financeiros tanto em relação à fabricação do equipamento quanto aos custos relacionados ao ensaio, além de permitir a análise de um projeto sem que haja o risco de avaria do equipamento testado.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um método de análise, baseado em simulações em elementos finitos, da característica eletromecânica dos transformadores

elétricos. Para validar a rotina de simulação proposta, os resultados fornecidos pelo *software* serão comparados com os dados fornecidos pelo fabricante.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em seis capítulos, sendo este primeiro a Introdução, que apresenta os objetivos e a motivação do trabalho.

No Capítulo 2, Transformadores Elétricos, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os transformadores elétricos, abordando seu princípio de funcionamento e suas características construtivas, tais como: enrolamentos, núcleo magnético, isolamento dielétrica, sistema de refrigeração e sustentação mecânica.

No Capítulo 3, Estudo Eletromagnético, é feita uma abordagem dos aspectos eletromagnéticos dos transformadores e das leis que regem seu funcionamento, assim como as consequências das não idealidades e características funcionais do equipamento.

No Capítulo 4, Simulação Eletromagnética, é proposta uma forma de simulação das características eletromagnéticas do transformador, abordando os métodos de simplificação que podem ser aplicados sobre o modelo real do dispositivo, de forma a diminuir o tempo de simulação computacional. Ao final do capítulo são mostrados quais os principais aspectos e resultados que devem ser observados quando o foco é o estudo das forças.

No Capítulo 5, Validação do Método, desenvolve-se uma simulação do modelo e das suas simplificações conforme proposto no capítulo anterior, fazendo a comparação dos resultados medidos pelo fabricante com os resultados encontrados nas simulações. Neste capítulo, é desenvolvida uma simulação completa que demanda um tempo computacional elevado e duas simulações simplificadas.

Por fim, o Capítulo 6, Conclusão e Trabalhos Futuros, discorre sobre as conclusões obtidas e sugestões de possíveis trabalhos futuros, ideias estas que foram observadas durante o desenvolvimento deste trabalho, para dar tanto continuidade quanto complementação ao estudo realizado.

2 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

O transformador elétrico, segundo a norma (IEC 60076-1, 2000), é um equipamento estático, que por indução magnética, transforma tensões e correntes alternadas em valores diferentes de tensão e corrente, sem a mudança da frequência.

Os transformadores atuam no sistema elétrico de potência adequando o nível de tensão para viabilizar a transmissão e o fornecimento da energia elétrica e, dada sua função, são de grande importância para o sistema (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011). Para melhor se adequar às suas funcionalidades, os transformadores são posicionados de forma estratégica, já que são responsáveis pela interconexão dos circuitos (VIENA, 2010).

Os transformadores de maior porte, conhecidos como transformadores de potência, são responsáveis por elevar a tensão da geração para níveis adequados de forma a transmitir a energia elétrica por longas distâncias com menores perdas ao longo da linha de transmissão. Também são responsáveis por rebaixar essa mesma tensão quando se adentra no sistema de distribuição, de modo que se adeque à característica de cada consumidor (FEIL, 2015) (MEDEIROS, 2017). A Figura 1 mostra um exemplo de transformador de potência de 83 MVA em uma subestação.

Figura 1 – Transformador de potência

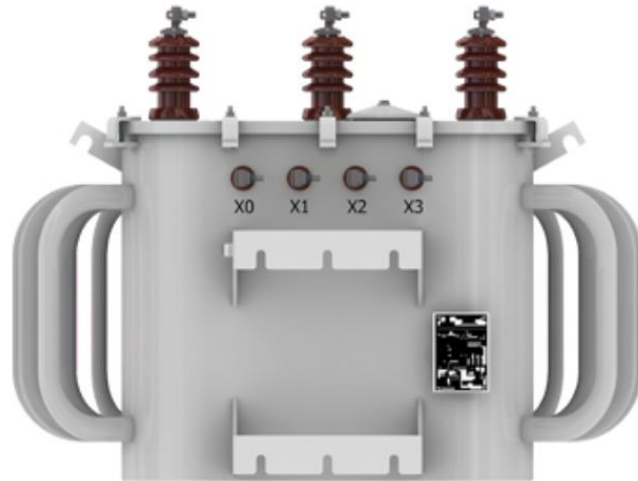


Fonte: (MEDEIROS, 2017).

Os transformadores de distribuição, mais numerosos no sistema, atuam rebaixando ainda mais a tensão entregue pelos transformadores de potência, sendo então possível atender todos os tipos de consumidores em baixa tensão, urbanos e rurais. A Figura 2 mostra um transformador de distribuição trifásico. Como ambos os transformadores, de potência e de distribuição, são de grande importância para o sistema em suas devidas atribuições, é indispensável que tenham um alto grau de confiabilidade, evitando perdas materiais e

monetárias por parte das concessionárias (FEIL, 2015) (MEDEIROS, 2017) (IARONKA, 2014).

Figura 2 – Transformador de distribuição



Fonte: (ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A, 2019).

Os transformadores de potência, por operarem em maiores níveis de tensão e processarem grandes valores de potência, são fisicamente maiores, mais caros e necessitam de mais aparatos de proteção e manutenção à sua volta do que os transformadores de distribuição. Todas essas características provocam grande interesse quanto a estudos a cerca da integridade e operabilidade destes equipamentos.

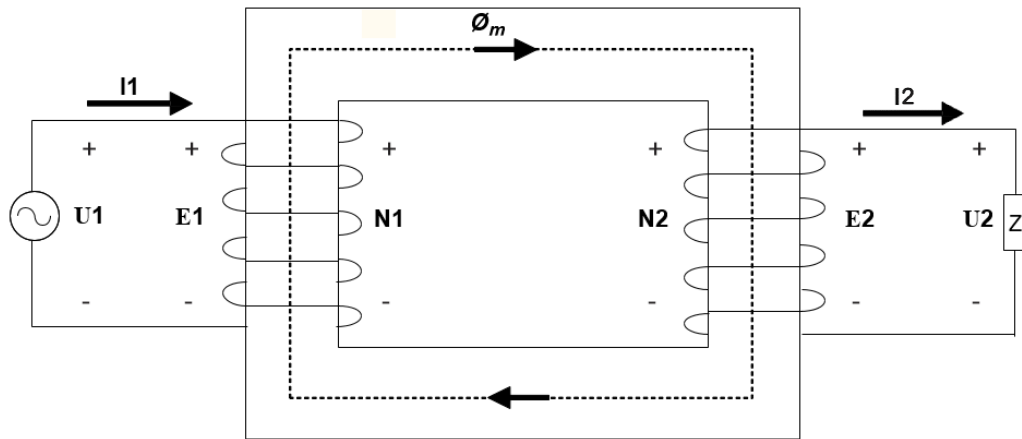
2.1 TEORIA DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento dos transformadores elétricos se baseia no acoplamento eletromagnético entre dois enrolamentos por meio de um circuito magnético. Tal acoplamento normalmente é feito por meio de um material ferromagnético, com o intuito de aumentar o fluxo concatenado entre as duas bobinas e conseqüentemente a eficiência do dispositivo (RIES, 2007) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

O transformador é constituído, principalmente, por um enrolamento primário, que recebe a energia do sistema e a transforma em fluxo magnético; por um núcleo ferromagnético, que fornece um caminho de permeabilidade magnética elevada para este fluxo; e por um enrolamento secundário, que transforma o fluxo concatenado em tensão e corrente, podendo ser diferente ou não do enrolamento primário. Após esse processamento, o enrolamento secundário é responsável por fornecer a energia, em forma de tensão e corrente, à carga (RIES, 2007) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). O circuito eletromagnético responsável

por este processo de transformação da energia é mostrado na Figura 3, simplificado para o caso de um transformador monofásico.

Figura 3 – Circuito eletromagnético simplificado



Fonte: Adaptado de (FEIL, 2015).

Como supracitado, a excitação do enrolamento primário pela fonte de tensão alternada U_1 causa a circulação da corrente alternada I_1 pelo enrolamento N_1 , que por sua vez provoca a magnetização do material ferromagnético. A variação do fluxo magnético alternado através do enrolamento primário faz surgir uma força eletromotriz E_1 neste mesmo enrolamento (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014) (NUNES, 2011).

O fluxo magnético gerado pela corrente equivalente $N_1 \cdot I_1$ é conduzido pelo núcleo até o enrolamento N_2 , onde é transformado em uma força eletromotriz E_2 . Essa tensão surge nos terminais do secundário do transformador e, caso haja alguma carga conectada à este, uma corrente I_2 circulará pelo enrolamento. Tal corrente surge no sentido de gerar um fluxo magnético alternado oposto àquele presente no núcleo do dispositivo, com o objetivo de reduzi-lo. Porém, a redução do fluxo é controlada pelo fluxo de compensação originado pela passagem do fluxo magnético, oriundo do enrolamento secundário, pelo enrolamento primário, e o equilíbrio entre os fluxos do primário e secundário é o fluxo mútuo ϕ_m . Dessa forma, a relação da corrente circulante pelo enrolamento primário e pelo secundário são diretamente proporcionais ao número de espiras de cada um destes enrolamentos. Uma observação importante é que a corrente que circula pelo enrolamento primário tem direção oposta daquela que circula no enrolamento secundário, devido às forças eletromotrizes e o equilíbrio do fluxo magnético (RIES, 2007) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014) (NUNES, 2011) (MONIZ, 2007) (FEIL, 2015).

Nesse contexto, para um transformador ideal (sem resistência nos enrolamentos, sem fluxo disperso e sem perdas), a relação entre as tensões e correntes nos enrolamentos primário e secundário, bem como o número de espiras de cada bobina é dado pela Equação 1 (RIES, 2007) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Onde:

U_1 → tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento primário (V);

U_2 → tensão eficaz medida nos terminais do enrolamento secundário (V);

E_1 → tensão induzida eficaz no enrolamento primário (V);

E_2 → tensão induzida eficaz no enrolamento secundário (V);

N_1 → número de espiras do enrolamento primário;

N_2 → número de espiras do enrolamento secundário;

I_1 → valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento primário (A);

I_2 → valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento secundário (A);

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A fase de construção e montagem dos transformadores é uma das mais importantes, já que cada fabricante possui seus próprios métodos de construção. Por mais variadas que possam ser as diretrizes de cada equipamento, alguns componentes básicos estão presentes, já que são a parte mais fundamental que constitui o funcionamento do transformador (FEIL, 2015).

As principais partes construtivas de um transformador são, essencialmente, o tanque, o sistema de refrigeração, o fluido isolante, as sustentações mecânicas e a parte ativa, esta última subdividida basicamente em núcleo e enrolamentos primário e secundário. Os enrolamentos têm a função de conduzir a corrente responsável por gerar o fluxo magnético. O núcleo deve conduzir este fluxo por um caminho de alta permeabilidade magnética, realizando o acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário. O tanque é responsável por abrigar o fluido isolante, que, por sua vez, tem função tanto de isolar as partes ativas quanto de fazer a refrigeração do equipamento (IARONKA, 2014) (FEIL, 2015) (RIES, 2007).

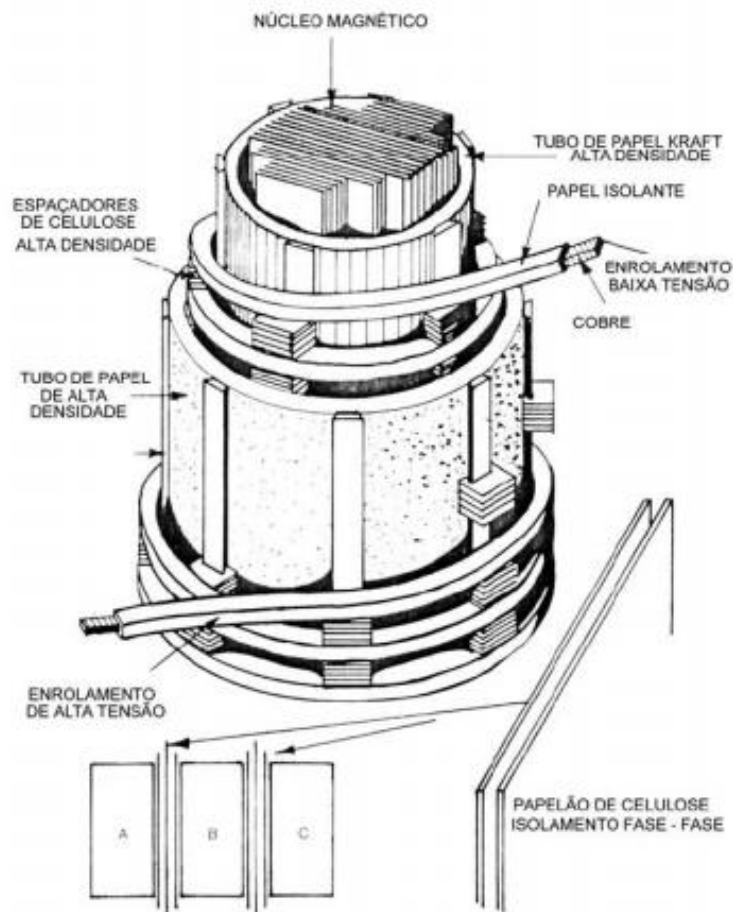
2.2.1 Enrolamentos

Os enrolamentos, ou bobinas, constituem a parte ativa do transformador, sendo responsáveis por fornecer caminho para a corrente elétrica. Podem também ser considerados a

parte mais importante do transformador, já que a vida útil do equipamento está ligada diretamente à integridade e operabilidade dos enrolamentos. Além da suportabilidade térmica e dielétrica que estes enrolamentos devem suportar, eles devem suportar também esforços mecânicos intensos e vibratórios, que podem ser provenientes de episódios de curto-circuito ou da corrente de energização do transformador (RIES, 2007) (IARONKA, 2014) (FEIL, 2015).

As bobinas são formadas por condutores isolados, que podem ser de cobre ou de alumínio, enrolados no núcleo do transformador, criando o circuito magnético necessário ao funcionamento. Apesar do alumínio ser mais leve e mais barato que o cobre, sua capacidade de condução é consideravelmente menor do que uma mesma seção de cobre (HARLOW, 2004) (NOGUEIRA; ALVES, 2009). A Figura 4 mostra um exemplo típico da construção da parte ativa de um transformador, exemplificando a isolação e enrolação dos condutores em torno do núcleo. Pode ser observado na figura a presença de espaçadores entre uma espira e outra, além de materiais isolantes entre o enrolamento de baixa tensão e o núcleo, entre a baixa tensão e a alta tensão e entre as fases.

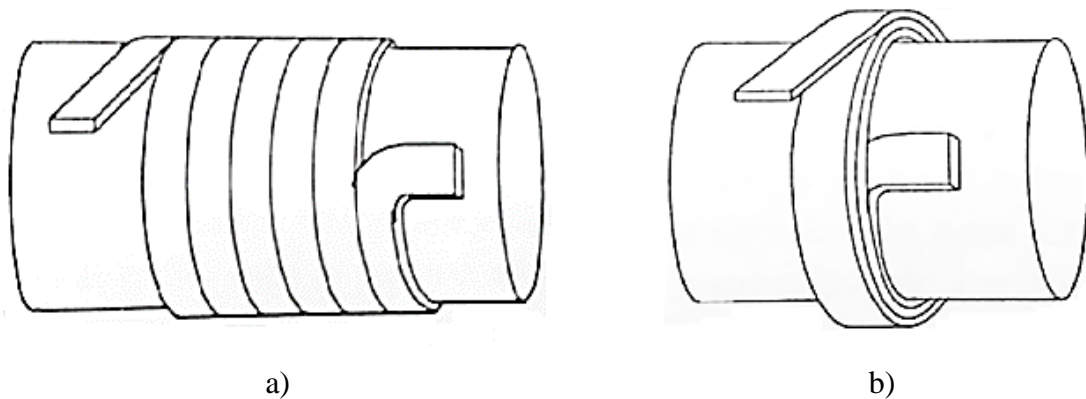
Figura 4 – Esquema típico de construção da parte ativa



Fonte: (PORTELLA, 2010).

Existem, fundamentalmente, dois tipos de bobinas, a helicoidal e a em disco, que podem ser dispostas de forma concêntrica ou intercalada (RIES, 2007). A Figura 5 exemplifica os dois tipos fundamentais de bobinas. Alguns fatores devem ser levados em conta no momento de escolha do tipo de bobina, dentre eles: distribuição de tensão ao longo do enrolamento, perdas, disposição geométrica (a fim de facilitar a construção e a ligação das bobinas), o custo de fabricação e, por fim, mas não menos importante, a rigidez mecânica, já que os condutores deverão suportar esforços mecânicos oriundos de altas correntes circulantes (FEIL, 2015) (HARLOW, 2004).

Figura 5 – Tipos fundamentais de bobinas: a) Helicoidal e b) Em disco



Fonte: (RIES, 2007).

2.2.2 Núcleo

A principal função do núcleo é estabelecer um caminho de alta permeabilidade magnética, idealmente infinita, para o fluxo magnético criado pelas correntes circulantes nos enrolamentos. Para tal, faz-se o uso de materiais ferromagnéticos, que conseguem transferir eletromagneticamente a energia de um enrolamento para o outro com menores perdas no processo. Apesar da alta proporção fluxo mútuo/fluxo disperso que este tipo de material propicia, inevitavelmente vai haver fluxo disperso associado à não idealidade do caminho magnético fornecido pelo núcleo (RIES, 2007) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014) (IARONKA, 2014) (FEIL, 2015).

Outro importante aspecto que deve ser considerado na escolha do material do núcleo é a alta resistividade elétrica, a fim de evitar correntes parasitas, ou de *Foucault*, associadas às perdas do equipamento. Uma forma de mitigar essas correntes é a adição de silício nas ligas de ferro que constituem o núcleo, outra possibilidade é a utilização de chapas finas isoladas entre si na construção do núcleo, dificultando a circulação das correntes (SALUSTIANO, 2012)

(IARONKA, 2014). Pode ser observado na Figura 4 que o núcleo magnético é constituído por finas chapas de material ferromagnético.

Construtivamente, os núcleos recebem classificações. Segundo (HARLOW, 2004) os núcleos dos transformadores podem ser de dois tipos: núcleo envolvido ou núcleo envolvente. No núcleo envolvido existe só um caminho para a circulação do fluxo magnético, enquanto o núcleo envolvente disponibiliza mais de um caminho para o fluxo, com as bobinas sendo envolvidas pelo núcleo (HARLOW, 2004) (FEIL, 2015) (SALUSTIANO, 2012).

Os materiais magnéticos mais utilizados na construção de máquinas elétricas são os chamados *aços elétricos*, que se dividem em, basicamente, três grupos: aços de baixo carbono, aços de grão não orientado (GNO) e aços de grão orientado (GO), sendo estes dois últimos os mais utilizados em transformadores, sendo também conhecidos como aços silícios (IARONKA, 2014) (FEIL, 2015).

Ao final de 1970 foi descoberto um novo material promissor no ramo de materiais ferromagnéticos, o metal amorfo, que tem características de vidro mesmo sendo um metal (FEIL, 2015). Diversos países têm utilizado este novo material na construção de núcleos para transformadores, mostrando às concessionárias e distribuidoras a possibilidade de substituição do aço silício pelo metal amorfo. Apesar do metal amorfo diminuir significativamente as perdas a vazio do transformador, o custo de fabricação aumenta significativamente uma vez que a espessura das lâminas chega a ser dez vezes menor que as lâminas de aço-silício. Os núcleos de metal amorfo também possuem um ponto de saturação cerca de 20% menor que os aços silícios, requisitando um núcleo com seção maior e mais custoso para que mantenha a mesma capacidade de condução (MAURÍCIO, 2014) (PRONTO, 2010).

Os metais amorfos apresentam características favoráveis ao estabelecimento da indução magnética, além de possuir um ciclo de histerese estreito e alta permeabilidade magnética, apresentando menores perdas por histerese e por correntes de *Foucault* (SALUSTIANO, 2012). Essa redução de perdas pode chegar a níveis entre 60% e 90%, que mostra a grande vantagem na utilização deste material em núcleos de transformadores (HASEGAWA; PRUESS, 2001).

2.2.3 Isolação dielétrica

A isolação dielétrica dos transformadores é constituída basicamente de dois tipos fundamentais, a isolação líquida e a isolação sólida. A isolação líquida deve atuar, além de sua função principal de evitar curto-circuitos na parte ativa, na refrigeração do equipamento, fazendo a transferência de calor entre a parte ativa e o meio externo. A isolação sólida é

requisitada no sentido de suportabilidade mecânica e estabilidade química dentro de níveis que garantam suas atribuições de material isolante (MORAIS, 2004) (FEIL, 2015).

A isolação sólida, como pode ser observado na Figura 4, atua diretamente em contato com os condutores e entre enrolamentos e núcleo e, conforme mencionado, podem vir à suportar intensos esforços mecânicos que são prejudiciais à sua integridade física. Devido ao processo de polimerização com o tempo e às elevadas temperaturas, a resistência mecânica do material diminui, deixando-o frágil e quebradiço, justificando, além de estudos dielétricos, estudos mais aprofundados nas questões eletromecânicas do transformador (RIES, 2007) (FEIL, 2015) (MORAIS, 2004).

A isolação dielétrica é uma das partes mais importantes e que mais requer atenção na etapa de projeto de transformadores. Como é formado basicamente por um fluído isolante e por uma isolação sólida (a base de papel *Kraft*) (FILHO, 2008) (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010), o sistema de isolação é o principal item afetado com o aquecimento do transformador e, portanto, responsável por sua vida útil (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010). O papel isolante é posicionado de forma a evitar o contato direto entre os condutores evitando o curto-circuito enquanto o fluído isolante isola os enrolamentos e dissipa o calor gerado pela parte ativa do transformador (NOGUEIRA; ALVES, 2009). O papel isolante, diferentemente do óleo isolante, não pode ser substituído ou regenerado ao longo da operação do transformador pois é inserido entre as bobinas no momento da fabricação, dessa forma, na maioria dos casos, é ele que irá definir a vida útil do equipamento (FEIL, 2015) (PORTELLA, 2010).

Como qualquer equipamento elétrico, o sistema de isolação fica sujeito a uma série de desgastes e processos de envelhecimento, dessa forma o monitoramento constante, juntamente com manutenção preventiva e preditiva, ajuda a evitar paradas no funcionamento da máquina, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico e a durabilidade do transformador (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010).

2.2.4 Sistema de refrigeração

Nos transformadores, assim como todo dispositivo elétrico, nem toda a potência de entrada consegue ser repassada à saída do sistema, pois uma parte dela é convertida em calor no processo, oriundo da perda de energia. Essa perda no interior do transformador ocasiona o aumento na temperatura em várias partes do equipamento (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (MCLYMAN, 2004). As principais fontes de geração de calor são os enrolamentos e o núcleo,

sendo a última de valor fixo e a primeira dependente da potência processada pelo transformador (MCLYMAN, 2004).

Nesse contexto, o calor que surge das perdas internas deve ser expelido a fim de manter uma temperatura de operação que não supere os limites pré-estabelecidos e cause a deterioração da isolamento, e a conseqüente diminuição da vida útil do equipamento (MCLYMAN, 2004) (RIES, 2007). A fim de aumentar a eficiência da troca de calor entre a parte ativa e o ambiente externo, são usados alguns dispositivos facilitadores, como trocadores de calor, radiadores, moto ventiladores e moto bombas (ROSENTINO, 2010) (IARONKA, 2014).

A transferência de calor é feita pelos modos: condução, convecção e radiação. Na condução, o fluxo de calor acontece a partir do núcleo e dos enrolamentos para suas superfícies externas que estão em contato com o meio de arrefecimento. No processo de convecção, o calor é transferido das superfícies externas do núcleo e dos enrolamentos, por exemplo, para o fluido isolante e refrigerante (normalmente o óleo). Quando isso ocorre, a temperatura do fluido aumenta e a sua densidade diminui, provocando o efeito termosifão que move o óleo. Com a movimentação do fluido, o calor é transferido do fluido para as paredes internas do tanque e dos radiadores, que são formados por conjunto de aletas facilitadoras da refrigeração. Com esta troca térmica, o fluido sofre uma redução da temperatura e o aumento de sua densidade, permitindo assim, a continuação da movimentação do fluido. Por fim, o processo de transferência de calor por radiação ocorre das paredes externas do tanque e dos radiadores ao ar, bem como das superfícies externa do núcleo e dos enrolamentos para o fluido isolante (FEIL, 2015) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (RIES, 2007) (INCROPERA; DEWITT, 2007).

2.2.5 Sustentação mecânica

A sustentação mecânica dos transformadores tem como função primária a sustentação da parte ativa em sua devida posição de projeto. Tanto o núcleo como os enrolamentos devem estar bem fixados para evitar quaisquer tipos de movimentação que comprometa a isolamento elétrica e a suportabilidade mecânica da estrutura (RIES, 2007).

Especificamente em condições em que altas correntes circulam pelo equipamento, forças eletromagnéticas de grande intensidade podem vir a surgir nos enrolamentos, tensionando os mesmos contra seus suportes mecânicos. É indispensável que toda a sustentação mecânica consiga suportar esses esforços sem nenhum comprometimento da estrutura, já que qualquer deslocamento compromete tanto a vida útil quanto a funcionalidade do transformador (RIES, 2007).

3 ESTUDO ELETROMAGNÉTICO

As falhas que atingem o sistema elétrico de potência normalmente prolongam seus efeitos sobre os equipamentos dispostos no sistema, levando os transformadores, por exemplo, a situações fora da nominal, as quais este deve suportar. Apesar dos sistemas de proteção empregados serem bastante eficientes, ainda é importante que se tenham medidas adicionais com o objetivo de minimizar a frequência, duração e gravidade das interrupções devido a falhas no sistema. Essas questões aparecem fortemente relacionadas com aspectos tanto financeiros como de segurança, além de garantirem a confiabilidade mínima ao sistema em que o dispositivo está conectado. Outra importante questão a ser observada diz respeito à velocidade de atuação dos equipamentos de proteção, cujo tempo de resposta não impede que os equipamentos sofram efeitos transitórios oriundos de faltas no sistema elétrico, aumentando, por consequência, os riscos de falhas (AZEVEDO, 2007).

Essas falhas decorrem de diferentes causas e condições, que podem ser de instalação ou operativas e podem ser classificadas, de modo geral, quanto às suas origens: elétrica, mecânica e térmica. Algumas causas típicas de falhas em transformadores são: deterioração do sistema isolante, sobreaquecimento, umidade, descargas parciais, ressonância nos enrolamentos, descargas atmosféricas, falhas no sistema (curto-circuito) e operação de chaveamento (AZEVEDO, 2007).

Pesquisas mostram que um percentual bastante significativo dos transformadores de potência falham devido à deformação nos enrolamentos e consequente falha dielétrica (BJERKAN, 2005). Segundo (RIBEIRO et al., 2003) a maior causa de falha em transformadores de distribuição é devido à falhas externas, nesse caso, curtos-circuitos. Tais informações não deixam dúvidas quanto à importância da resistência mecânica dos enrolamentos de forma a garantir a integridade da estrutura, o que justifica estudos a respeito dos esforços eletromagnéticos e suas origens nestes equipamentos, principalmente os esforços mais severos e danosos derivados de eventos de curto-circuito (AZEVEDO, 2007).

De forma a iniciar o estudo das questões eletromagnéticas visando compreender a operação e as peculiaridades dos transformadores, este capítulo discrimina as principais leis e teoremas que regem o funcionamento destes equipamentos. Primeiramente, serão apresentados alguns conceitos gerais que podem ser aplicados a qualquer circuito elétrico com tais características. Na segunda seção, um enfoque maior será dado a estes mesmos conceitos quando aplicados aos circuitos dos transformadores, culminando no objetivo principal do

trabalho, que consiste no estudo das forças eletromagnéticas que surgem nos enrolamentos internos dos transformadores.

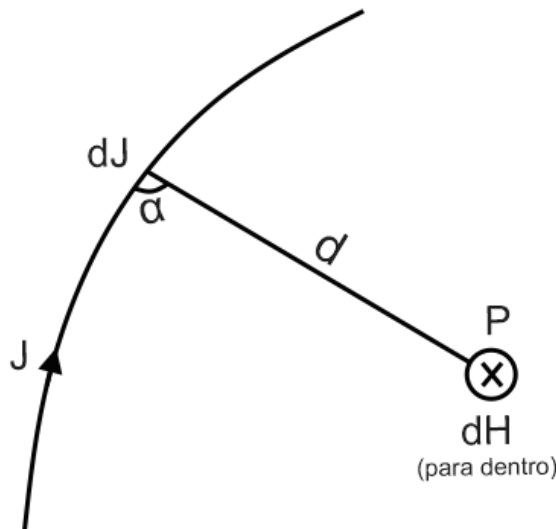
3.1 PRINCÍPIOS ELEMENTARES

Visando a compreensão das características das forças eletromagnéticas do transformador, nesse capítulo são apresentadas as leis mais fundamentais que discorrem sobre o surgimento do campo magnético devido à circulação de uma corrente e como a interação entre este campo e a corrente ocasiona o surgimento de forças eletromagnéticas. Outro ponto abordado neste capítulo é como se comportam as forças no caso de dois condutores retilíneos próximos conduzindo corrente e gerando seus respectivos campos magnéticos.

3.1.1 Lei de Biot-Savart

Segundo (SADIKU, 2004), a Lei de Biot-Savart estabelece que a intensidade do campo magnético dH gerada em um ponto qualquer P , conforme Figura 6, por um elemento diferencial de corrente $J \cdot dv$ é dada pela Equação (2), onde d é a distância entre o ponto P e o elemento de corrente (SADIKU, 2004).

Figura 6 – Intensidade de campo magnético no ponto



Fonte: Adaptado de (SADIKU, 2004).

$$H = \int_v \frac{J \cdot dv}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \vec{a}_r \quad (2)$$

Onde:

$H \rightarrow$ Intensidade do campo magnético (A/m);

$J \rightarrow$ Densidade de corrente em um volume (A/m^2);

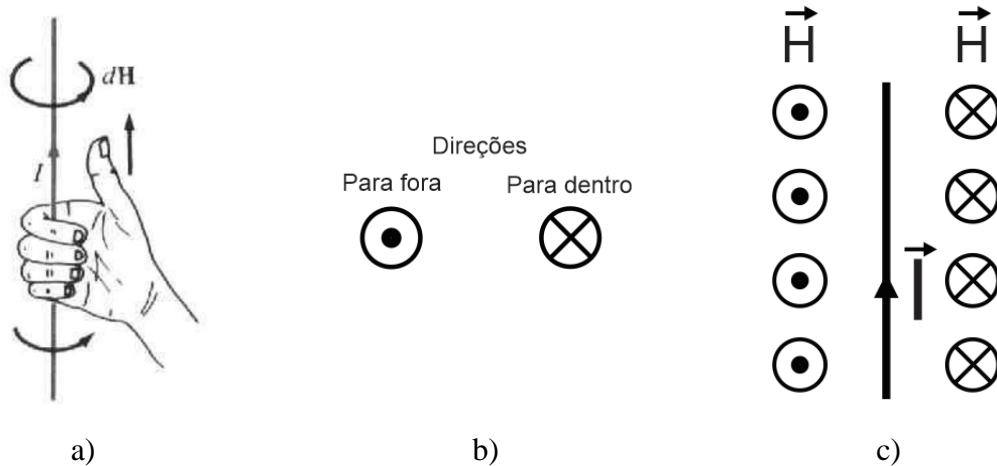
$dv \rightarrow$ Elemento diferencial de volume (m^3);

$d \rightarrow$ Distância (m);

$\vec{a}_r \rightarrow$ Vetor unitário adimensional;

A orientação da intensidade do campo magnético \vec{H} pode ser determinada pela regra da mão direita, com o polegar apontando na direção da corrente, os dedos dobrados em torno do fio indicam a orientação de \vec{H} . A direção do campo \vec{H} pode ser representada convencionalmente de modo a se tornar mais simples a observação. Observa-se na Figura 7 uma forma de facilitar a visualização de tais convenções.

Figura 7 – Orientações: a) Regra da mão direita, b) Convenção e c) Representação



Fonte: Adaptado de (SADIKU, 2004).

3.1.2 Lei de Ampère

A Lei de Ampère, segundo (SADIKU, 2004), em sua forma mais fundamental, estabelece que a integral da componente tangencial de \vec{H} em torno de um caminho fechado é igual à corrente líquida envolvida (I_{env}) pelo caminho, como pode ser observado pela Equação (3). Esta equação surge de modo a propiciar uma forma mais fácil e compreensível de se obter a intensidade de campo magnético, já que é um caso especial da Lei de Biot-Savart apresentada na subseção 3.1.1 (SADIKU, 2004) (VILLATE, 2012).

$$\oint H \cdot dl = I_{env} \quad (3)$$

A densidade de fluxo magnético (\vec{B}) é uma grandeza importante que se relaciona com a intensidade do campo magnético (\vec{H}) e com o material em que está situado. A Equação (4)

mostra essa relação considerando campo magnético no vácuo. Caso o campo esteja situado em um material com outra permeabilidade magnética, a densidade será diferente devido às características próprias do material (SADIKU, 2004).

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (4)$$

Onde:

μ_0 → Permeabilidade do espaço livre (H/m);

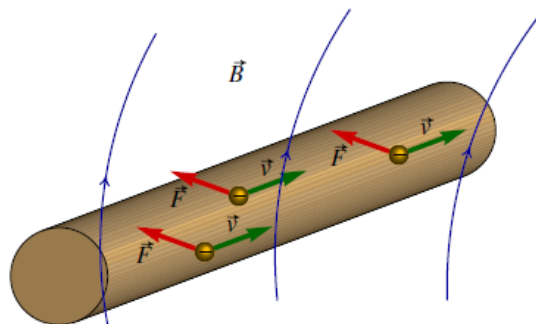
B → Densidade de fluxo magnético (Wb/m² ou T);

H → Intensidade do campo magnético (A/m);

3.1.3 Força magnética

A força magnética surge quando existe a circulação de corrente em um condutor imerso em campo magnético. A força também depende da orientação do fio em relação à orientação do campo magnético, caso paralelas, a força é nula e, caso perpendiculares, a força terá seu módulo máximo. Como a força age sobre cada carga em movimento, ela também é proporcional ao comprimento do condutor (VILLATE, 2012) (SADIKU, 2004). Uma condição típica do comportamento da força em um condutor imerso em campo magnético pode ser contemplada na Figura 8.

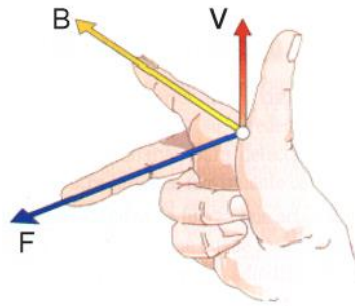
Figura 8 – Força magnética sobre cargas em condução



Fonte: (VILLATE, 2012).

A direção da força será sempre perpendicular tanto ao campo magnético quanto à direção de movimento das cargas, ou seja, à direção do fio (VILLATE, 2012) (SADIKU, 2004). O sentido da força segue a regra do produto vetorial, mas também pode ser encontrado pela regra de Fleming, ou regra da mão direita, como exemplifica a Figura 9, onde \vec{v} é a velocidade de movimentação das cargas, na mesma direção da corrente elétrica.

Figura 9 – Direção do produto vetorial (regra de Fleming)



Fonte: Adaptado de (VILLATE, 2012).

Quando a corrente é nula, não existe movimentação de cargas, portanto a força reproduzida também é nula. Quando a corrente aumenta no condutor, a velocidade das cargas aumenta em proporção direta à corrente e a força sobre cada carga também aumenta na mesma intensidade. De forma geral, a força magnética sobre qualquer partícula com carga q em movimento é dada pela Equação (5) (VILLATE, 2012). Uma outra forma de descrever essa equação da força magnética leva em conta a densidade de corrente (\vec{J}) ao invés da carga (q) e da velocidade (\vec{v}), conforme apresentado na Equação (6) (WATERS, 1966) (SINHA; KAUR, 2017) (BARRA, 2017).

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (6)$$

Onde:

\vec{F} → Força magnética (N);

q → Carga da partícula (C);

\vec{v} → Velocidade média da partícula (m/s);

\vec{J} → Densidade de corrente (A/m²);

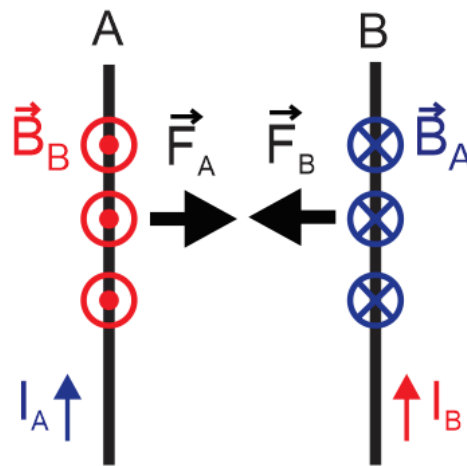
\vec{B} → Densidade de fluxo magnético no ponto (Wb/m² ou T);

3.1.4 Forças entre dois condutores retilíneos

Quando um condutor conduz corrente ele necessariamente gera um campo magnético em seu entorno, como estabelece a Lei de Ampère, e esse campo tem direção definida pela regra da mão direita apresentada na Figura 9. Caso existam dois condutores próximos conduzindo correntes, ambos estarão imersos no campo magnético de seu vizinho, e então, de acordo com seção 3.1.3, uma força surgirá em cada condutor (VILLATE, 2012) (SADIKU, 2004).

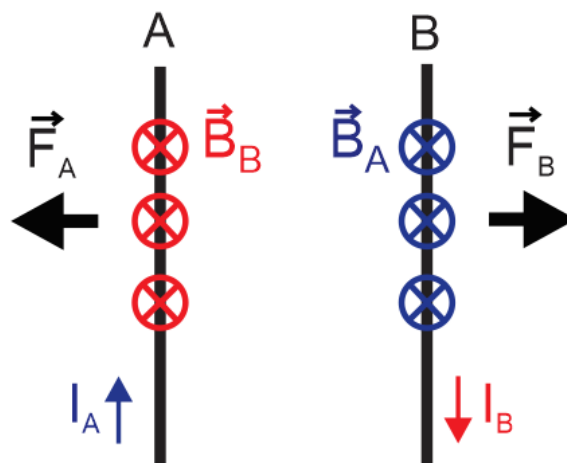
A força entre os dois condutores dependerá da direção em que as correntes estão circulando. Para tal análise, dividem-se em duas situações: correntes em mesmo sentido e, correntes em sentidos opostos. A disposição dos campos magnéticos de cada condutor é apresentada diferenciando-se pelas cores, conforme mostram as respectivas legendas. A Figura 10 mostra a interação entre dois condutores com correntes na mesma direção. Aplicando a regra da mão direita, nota-se que para essa disposição a força entre os condutores é de atração. Uma análise similar pode ser feita para a segunda situação, agora com correntes em sentidos opostos, desta vez a força entre os condutores é de repulsão, conforme mostra a Figura 11.

Figura 10 – Força de atração



Fonte: Autor.

Figura 11 – Força de repulsão



Fonte: Autor.

Outro ponto a ser observado é que no caso de correntes alternadas as regras continuam as mesmas, porém, agora existirá também as frequências que devem ser consideradas. Para

tanto, pode ser descrito que o campo magnético criado pelo condutor A no ponto onde o condutor B está localizado pode ser descrito pela Equação (10), onde os condutores A e B estão sendo excitados pelas correntes mostradas em (7) e (8) e “d” representa a distância entre esses condutores.

$$I_A = I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

$$I_B = I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + 180^\circ) \quad (8)$$

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 \cdot I_A}{2 \cdot d} \quad (9)$$

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 \cdot I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t)}{2 \cdot d} \quad (10)$$

Como a corrente circulante pelo condutor B também é alternada, conforme a Equação (8), a frequência da força entre eles, seja de atração ou de repulsão será o dobro da frequência de excitação de cada condutor, conforme discriminado de (11) à (14). Para melhor entendimento, é reproduzido graficamente as principais formas de onda desta dedução, conforme mostra a Figura 12, considerando amplitudes unitárias.

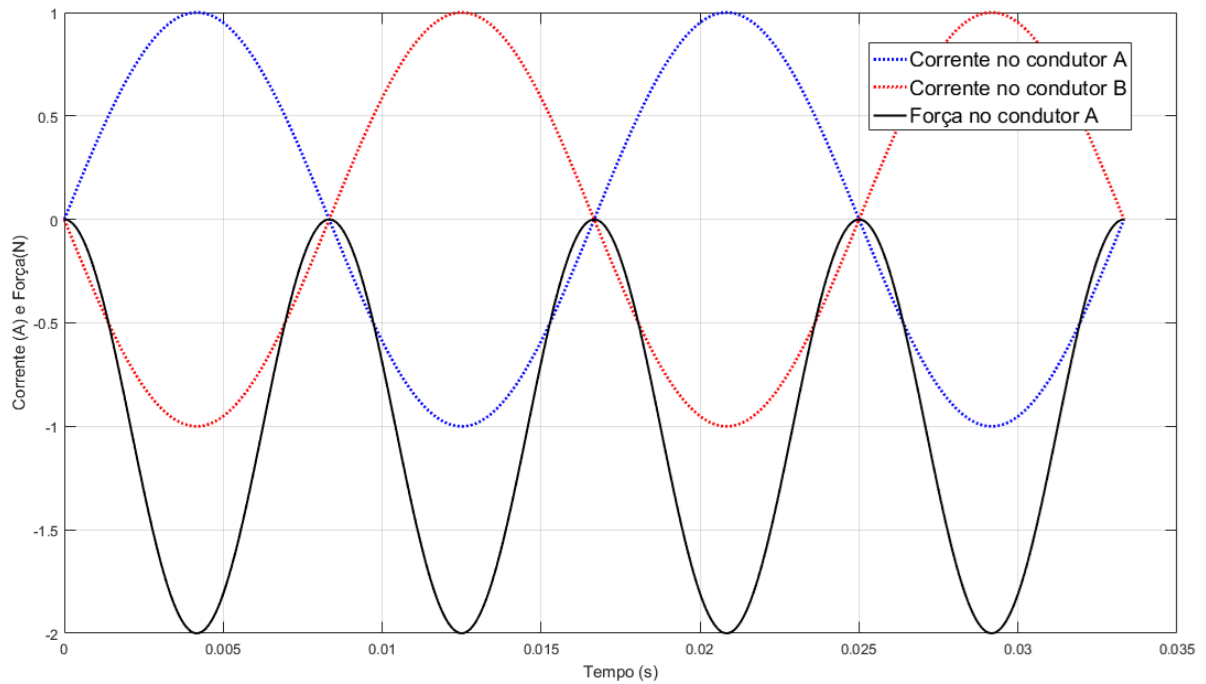
$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (11)$$

$$\vec{F} = I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + 180^\circ) \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t)}{2 \cdot d} \quad (12)$$

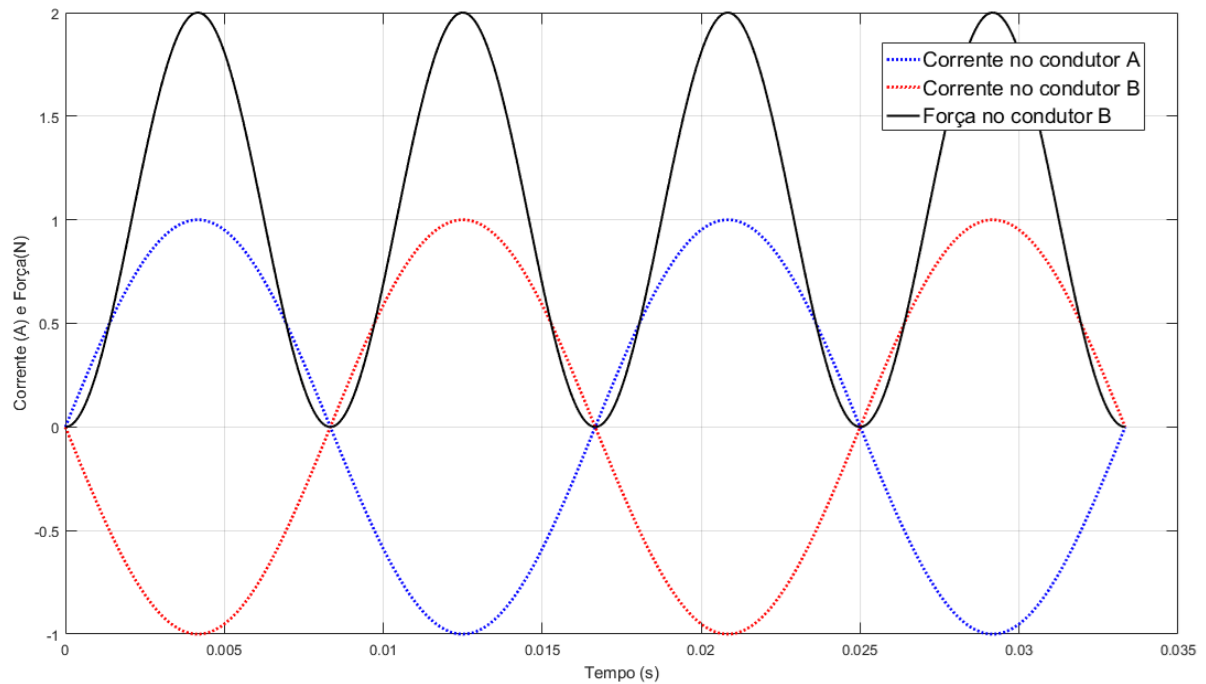
$$\vec{F} = -\frac{K}{2} \cdot (1 + \cos(2 \cdot \omega t + 180^\circ)) \quad (13)$$

$$K = \frac{\mu_0 \cdot I_{m\acute{a}x}^2}{2 \cdot d} \quad (14)$$

Figura 12 – Principais formas de onda (corrente e força)



a)



b)

Fonte: Autor.

As principais características que podem ser observadas das formas de onda apresentadas Figura 12 são: a força que surge nos condutores é senoidal e no dobro da frequência de excitação dos condutores; a força contém um valor contínuo associado, ou seja, a senoide não é centrada em 0 N e a força varia de nula até seu valor de pico, nunca mudando a direção.

Uma dedução muito similar pode ser feita para encontrar a força no condutor B. Partindo do campo magnético gerado pelo condutor A multiplicado pela corrente no condutor B, chega-se nas mesmas equações e formas de onda apresentadas nesta seção. A forma de onda da força no condutor B pode ser visualizada na Figura 12 b), onde se observa a repulsão entre os dois condutores conduzindo correntes em sentidos opostos.

3.2 ELETROMAGNETISMO NOS TRANSFORMADORES

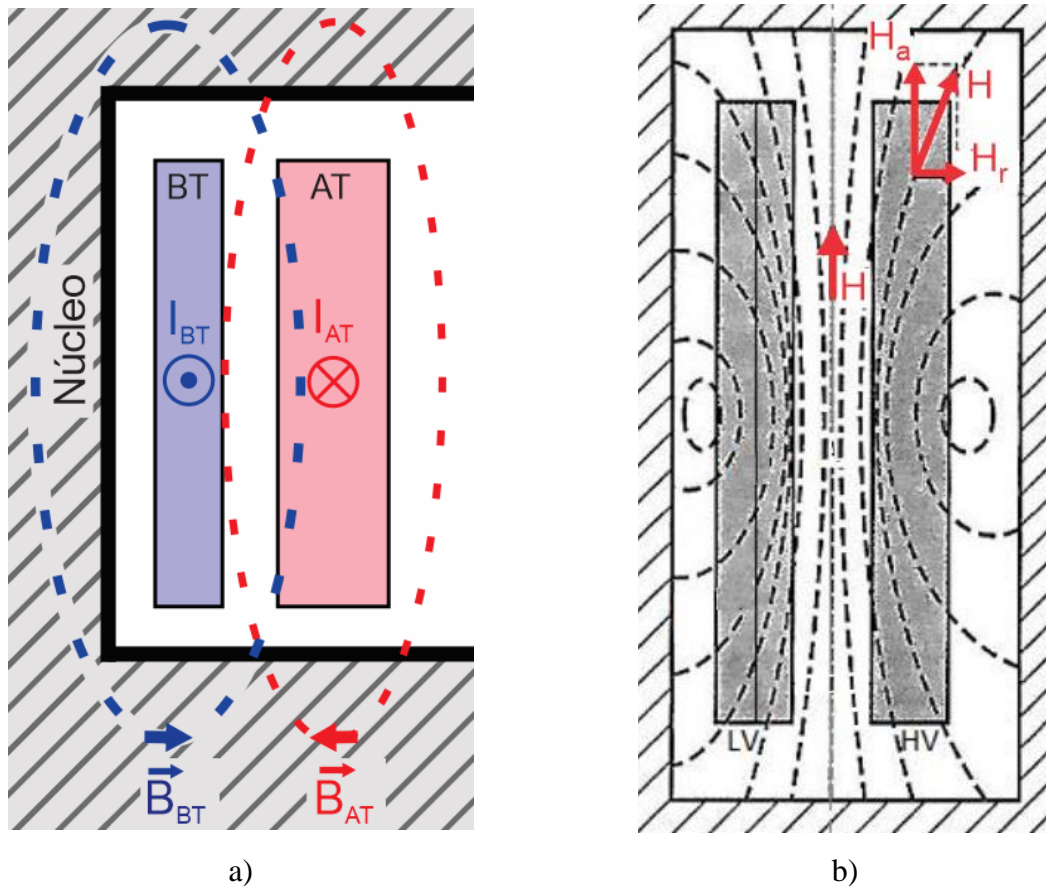
Conforme mencionado no início deste capítulo, o estudo eletromagnético dos transformadores é de suma importância para se conhecer corretamente o comportamento das características elétricas e mecânicas em episódios de faltas críticas que, apesar de raramente ocorrerem no sistema de potência, são altamente danosas aos equipamentos sujeitos às correntes associadas.

Nesse contexto, para compreender o comportamento dos esforços mecânicos na parte ativa dos transformadores, é indispensável uma compreensão ampla das características eletromagnéticas em seu interior e, para tal, os conceitos abordados na seção 3.1 devem ser aplicados na topologia construtiva desses equipamentos. Essa seção, conforme a proposta do trabalho, dá uma abordagem maior às questões eletromagnéticas e, por conseguinte, às forças eletromagnéticas e suas disposições na parte ativa do transformador.

3.2.1 Fluxo disperso

As forças eletromagnéticas que afetam os transformadores surgem da interação entre uma corrente circulante imersa em campo magnético e, neste caso, o campo magnético em questão é devido ao fluxo magnético disperso, ou apenas fluxo disperso. Por consequência da não idealidade do núcleo magnético que, por não ter permeabilidade infinita, não consegue conduzir todo o fluxo magnético gerado pelas correntes, uma pequena parte do fluxo percorre um caminho magnético de maior relutância que passa por entre os enrolamentos e sobre estes, criando o supracitado fluxo disperso (WATERS, 1966) (RIES, 2007) (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019). A Figura 13 mostra as linhas de fluxo disperso na teoria (a), e em simulação eletromagnética (b), de forma a ilustrar seu comportamento.

Figura 13 – Fluxo disperso: a) na teoria e b) em simulação



Fonte: a) Autor e b) Adaptado de (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019).

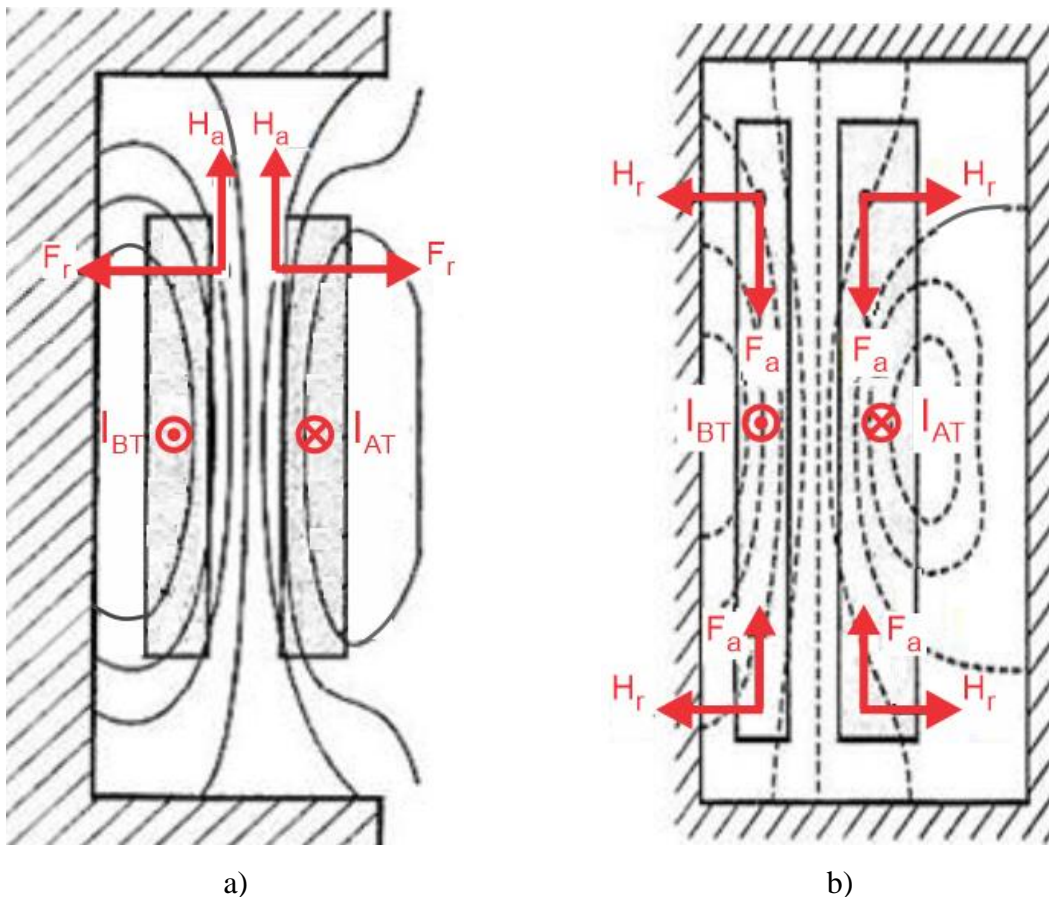
Pode ser observado que as linhas de fluxo magnético estão dispostas em sua maioria na direção axial para o desenho apresentado, com excessão da região das cabeceiras, onde as linhas tomam uma trajetória mais oblíqua devido à mudança no caminho magnético, conforme detalhe na Figura 13 b). Decompondo o vetor de intensidade de campo magnético \vec{H} nas direções axial (\vec{H}_a) e radial (\vec{H}_r), pode-se dizer que nas cabeceiras a componente radial do campo magnético toma proporções maiores.

3.2.2 Disposição das forças

Estudando os tópicos abordados na seção 3.1 e na seção 3.2.1 podem ser feitas algumas conclusões quanto à característica geral das forças eletromagnéticas e sua disposição no interior dos transformadores, mais especificamente focando nos enrolamentos de baixa tensão e de alta tensão. Na seção anterior foi discutido e demonstrado na Figura 13 que a intensidade do campo magnético (\vec{H}) pode ser decomposta em duas componentes principais: axial e radial. Observe-se que ao longo da maior parte dos enrolamentos, o campo magnético é majoritariamente axial,

exceto na região das cabeceiras, onde a direção radial do campo magnético aparece com mais intensidade (RIES, 2007) (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019) (WATERS, 1966). Para compreender a direção que as forças têm devido à interação desse campo magnético com a corrente que circula por ambos os enrolamentos, a Regra de Fleming pode ser aplicada em cada caso, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Direção das forças: a) Radiais e b) Axiais



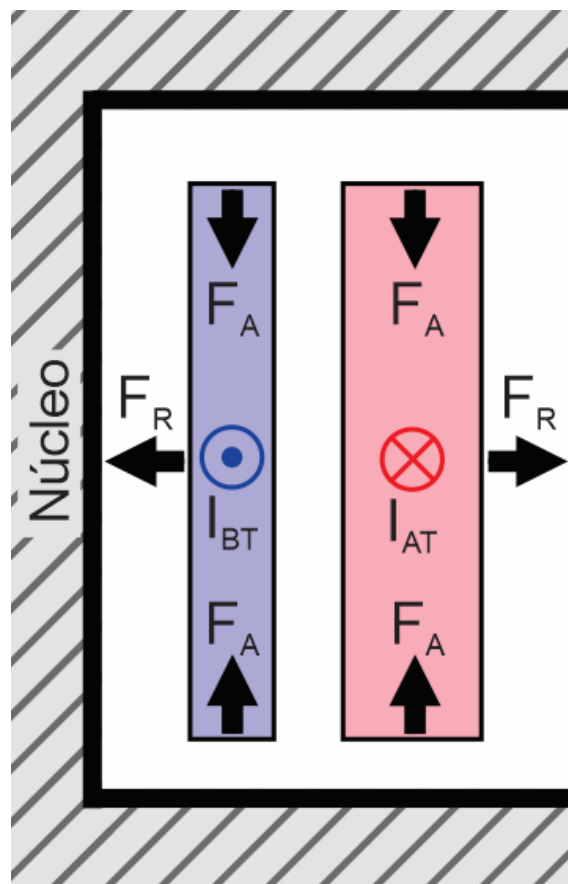
Fonte: Adaptado de (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019).

Este exercício formata uma disposição bastante característica das forças no interior dos enrolamentos e, para melhor compreensão, estas forças são divididas em duas direções: axial e radial. A força radial que aparece na bobina de baixa tensão, pela Regra de Fleming, é no sentido de aproximar esse enrolamento do núcleo, ou seja, de comprimir a bobina, enquanto a força radial na bobina de alta tensão força os condutores na direção do tanque, no sentido de expandir o enrolamento (RIES, 2007) (WATERS, 1966) (SINHA; KAUR, 2017) (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019). Fazendo uma comparação direta com o caso de dois condutores conduzindo correntes em sentidos opostos (situação típica dos transformadores), os condutores e, por consequência, as bobinas de baixa tensão e de alta tensão se repelem entre si.

Uma análise semelhante pode ser feita para o campo magnético na direção axial, presente mais significativamente nas cabeceiras dos enrolamentos. As forças axiais em ambos os enrolamentos (BT e AT) comprimem os condutores do enrolamento uns sobre os outros, já que a força nas espiras inferiores tem direção positiva (para cima) e a força nas espiras superiores tem direção negativa (para baixo). Essa disposição das forças cria um ponto de compressão máxima que, para casos de bobinas de mesma altura e sem *taps*, acontece no centro do enrolamento (WATERS, 1953) (RIES, 2007).

De forma geral e resumida, as forças aparecem nos enrolamentos dos transformadores conforme ilustra a Figura 15, onde a força radial surge repelindo a BT da AT e a força axial comprimindo ambos os enrolamentos. É importante reiterar que essa disposição de forças é exatamente a mesma caso as correntes dos enrolamentos sejam consideradas em direções opostas, ou seja, BT entrando e AT saindo.

Figura 15 – Disposição geral das forças nos enrolamentos



Fonte: Autor.

Como a excitação nos enrolamentos dos transformadores é senoidal, o campo magnético também tem essa característica e, portanto, conforme comentado na seção 3.1.4, todas as forças

envolvidas no processo além de ter uma frequência no dobro da frequência de excitação, tem um valor contínuo associado, conforme exemplificado na Figura 12.

3.2.3 Situações críticas

Os eventos de curto circuito são as causas mais frequentes de falhas em transformadores e ainda são os que apresentam o maior potencial destrutivo. Os efeitos das correntes de curto-circuito são agrupados em efeitos mecânicos e efeitos térmicos. Os efeitos mecânicos oriundos dos episódios de curto-circuito são mais predominantes no caso de transformadores de potência, afetando a parte ativa e as estruturas de sustentação mecânica. Já nos transformadores de distribuição, os efeitos térmicos são os mais limitantes na operação do equipamento (AZEVEDO, 2007).

Nesse contexto, a capacidade de um transformador de suportar eventos de curto-circuito é considerada essencial para garantir a confiabilidade e segurança do sistema. Para que isso aconteça, os enrolamentos devem ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças eletromagnéticas produzidas pelas correntes circulantes, sem se danificar ou alterar a disposição física da estrutura. Desta forma, é essencial conhecer e estudar o comportamento das questões térmicas e mecânicas para projetar corretamente as estruturas internas dos transformadores (AZEVEDO, 2007).

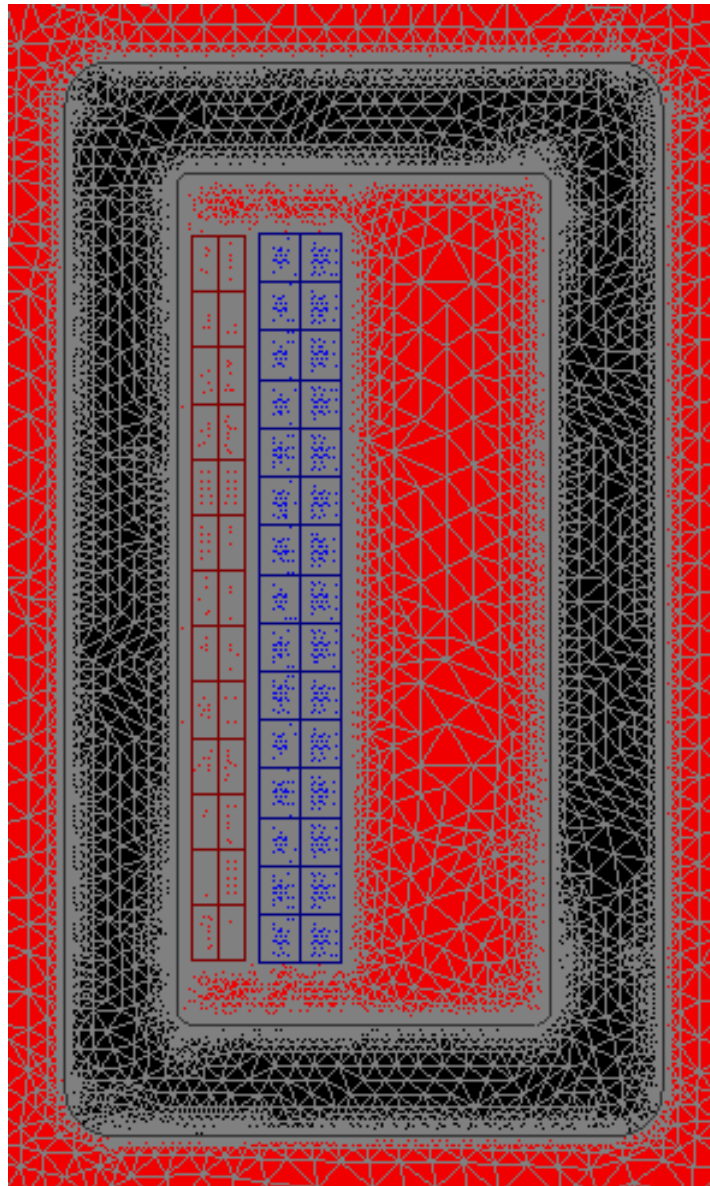
O sistema elétrico de potência está constantemente sujeito à ocorrência de faltas e, em muitas destas, as correntes circulantes não chegam a atingir os valores máximos admissíveis. Somente em alguns raros casos o transformador é submetido à condição mais crítica daquela conexão, que ocorre em episódios de faltas trifásicas. Estas faltas, apesar de raramente ocorrerem no sistema elétrico de potência, são as mais severas, já que apresentam os maiores picos de correntes e, dessa forma, é comum os transformadores serem projetados para suportar tais condições (WATERS, 1966) (AZEVEDO, 2007).

4 SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

No desenvolvimento deste trabalho pôde ser observado que o estudo das características eletromagnéticas e, por consequência, das forças presentes nos enrolamentos dos transformadores são indispensáveis, uma vez que garantem segurança e confiabilidade no projeto e na operação dos equipamentos. Os ensaios de curto-circuito em transformadores de pequeno ou de grande porte são extremamente custosos, inviabilizando seu desenvolvimento. Assim, a maneira mais difundida na indústria para se realizarem estudos aprofundados de transformadores são as simulações em elementos finitos, que consistem na modelagem do equipamento a ser simulado em *software* específico, a fim de estudar determinada característica.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos que mantêm as mesmas propriedades do meio original (MEDEIROS, 2017). Cada elemento é descrito por equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno e condições iniciais (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014). Os elementos finitos são conectados entre si por pontos denominados nós, e seu conjunto chama-se, usualmente, malha de elementos finitos. A quantidade e tamanho dos elementos em que o meio original é particionado são fatores determinantes na precisão do método, uma vez que estão diretamente associados com a convergência da simulação (MEDEIROS, 2017) (SOUZA, 2003). A Figura 16 mostra um exemplo de uma malha característica em duas dimensões (2D) gerada pelo *software* Maxwell®.

Figura 16 – Exemplo de uma malha (corte transversal)



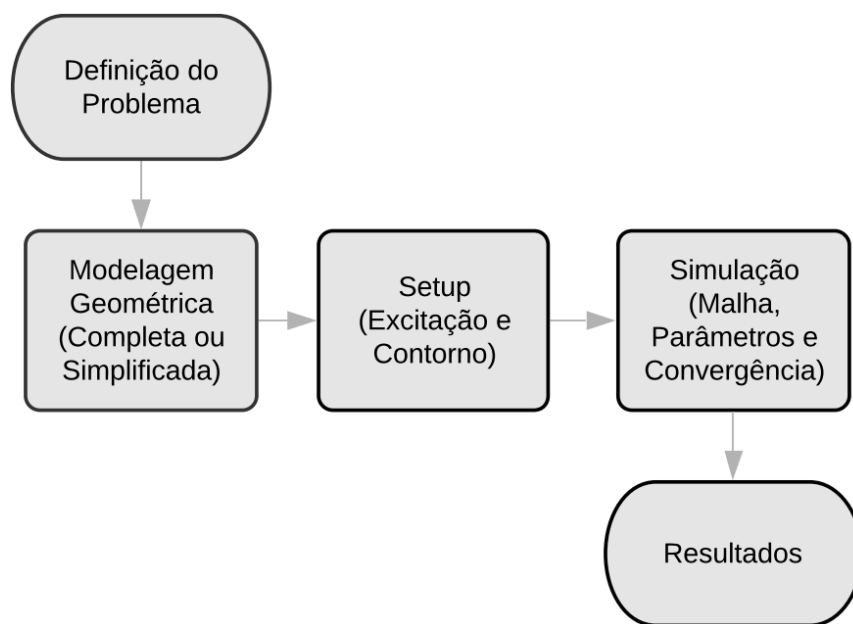
Fonte: Autor.

O ANSYS Maxwell[®] é um *software* de simulação em duas dimensões (2D) e em três dimensões (3D) de campos eletromagnéticos, que abrange o projeto de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos, como motores, atuadores, transformadores, sensores e bobinas. Esse programa emprega o Método de Elementos Finitos para resolver simulações magnéticas (magnetostática, correntes parasitas, transientes) e elétricas (eletrostáticas, condução CC, transiente elétrico) (ANSYS, 2010).

Tendo em vista o desenvolvimento de simulações eletromagnéticas de transformadores, este capítulo traz uma discriminação das diversas etapas que o processo se fundamenta, conforme pode ser observado pelo fluxograma simplificado da Figura 17. O processo começa

com a definição do problema para a então modelagem geométrica do equipamento, que pode ser feita de maneira completa ou simplificada. O próximo passo é a definição do *setup*, que compreende as características de excitação e de contorno da condição estudada. O *setup* é seguido pela etapa de definição das características simulacionais, onde se definem os critérios da malha, convergência e parâmetros a serem calculados. Por fim, obtêm-se os resultados da simulação que, neste trabalho, serão discutidos brevemente a fim de caracterizar o comportamento eletromagnético dos transformadores.

Figura 17 – Fluxograma do processo de simulação



Fonte: Autor.

4.1 1ª ETAPA: MODELAGEM

Após definir o problema a ser estudado, o primeiro passo para dar início ao processo de simulação pelo MEF é a modelagem do dispositivo, que consiste no desenho de sua geometria e na definição dos materiais de cada domínio. A modelagem completa e fiel do dispositivo traz resultados que seguem mais precisamente as características reais de operação, porém com o custo de um alto tempo de processamento computacional. Isso justifica, em alguns casos, a simplificação do modelo, seja excluindo objetos que não influenciam significativamente na simulação proposta, ou ainda desenhando o modelo 2D do corte transversal do dispositivo. Essas situações e suas simplificações serão discutidas nesta seção, abordando a modelagem construtiva de um transformador do “Fabricante A” como base para o estudo de suas características eletromagnéticas. Para fins de nomenclatura, o modelo deste transformador será

chamado de “Modelo A” porém, esse capítulo tem uma postura genérica de simulação, sendo que qualquer especificação de transformador pode ser utilizada sem maiores problemas.

4.1.1 Desenho Trifásico (3 ϕ) - 3D

Conforme discutido na seção 2.2, a construção detalhada de um transformador é complexa, abrangendo desde os enrolamentos primário e secundário até os suportes mecânicos e espaçadores entre espiras. De forma a modelar esses equipamentos em *software*, são feitas algumas escolhas que ajudam na simplificação do desenho, e tais simplificações não alteram o estudo que virá a ser desenvolvido. Visualiza-se o modelo construtivo da parte ativa de um transformador trifásico real na Figura 18, onde se observa a complexidade das estruturas.

Figura 18 – Parte ativa de um transformador real

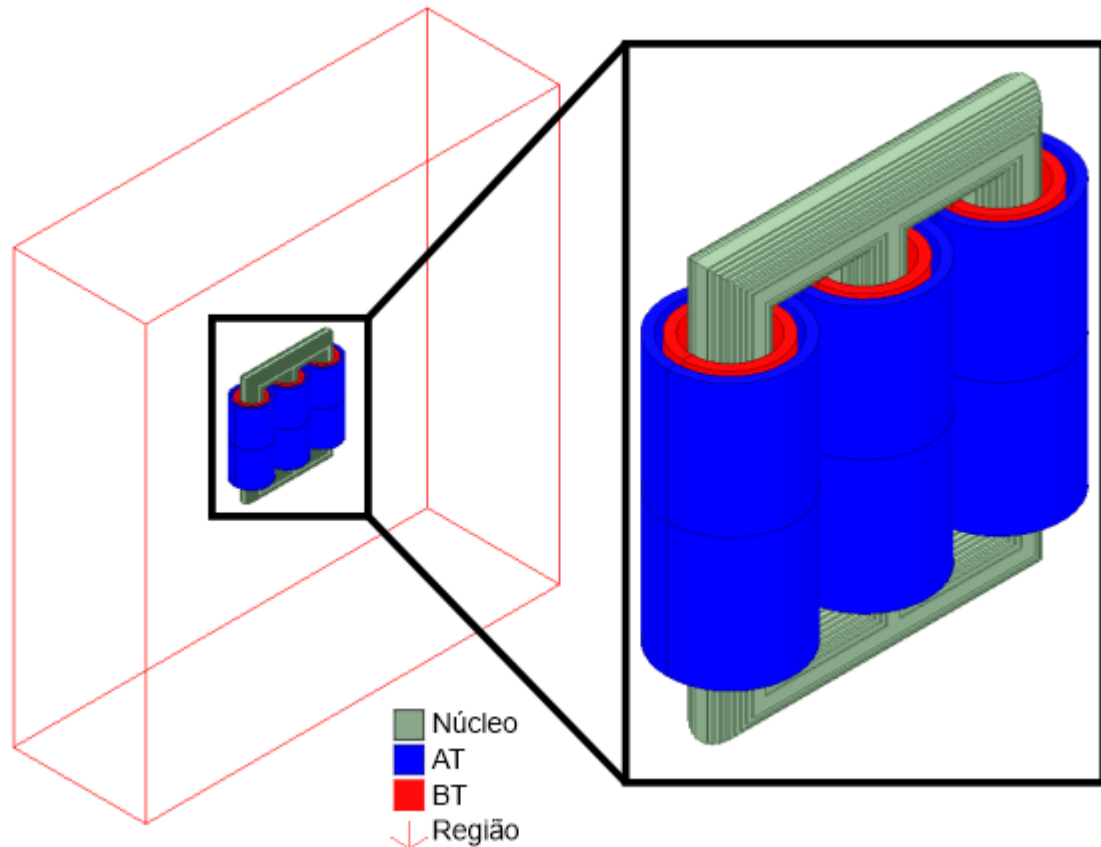


Fonte: (BALDIN, 2018).

Para questões simulacionais, somente a parte ativa (enrolamentos e núcleo) é modelada, pois o tanque e aletas servem a outros propósitos que não influenciam significativamente nas dinâmicas eletromagnéticas (WATERS, 1966) (RIES, 2007). Na modelagem para estudos eletromagnéticos também é comum omitir os suportes mecânicos e as isolações dos enrolamentos. As bobinas também são simplificadas quando desenhadas em blocos, não detalhando cada condutor. Sendo assim, o desenho completo no Maxwell® de um

transformador de núcleo envolvido trifásico (Modelo A) é apresentado na Figura 19, que difere, pelas simplificações supracitadas, do modelo real mostrado na Figura 18.

Figura 19 – Desenho 3φ e 3D do Modelo A



Fonte: Autor.

Além do desenho das geometrias é importante que se tenha a correta caracterização dos materiais de cada domínio, como cobre para os enrolamentos e material magnético no núcleo, além de tudo ser imerso em uma “região”, que pode ser óleo isolante ou ar, no caso de transformadores a seco.

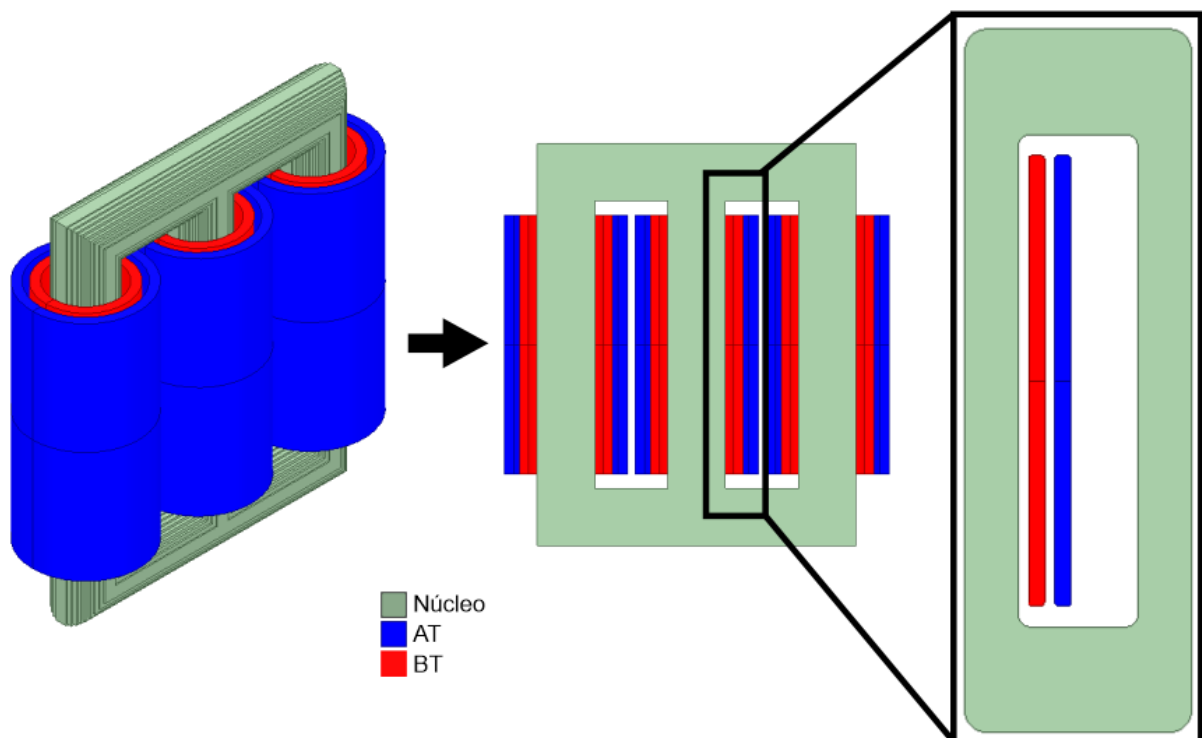
O desenho completo apresentado na Figura 19 pode ser simulado com alta fidelidade ao modelo real, porém com um custo computacional relativamente grande. Nesse contexto, a literatura traz análises em modelos simplificados, que representam satisfatoriamente o comportamento das forças e características eletromagnéticas no interior dos transformadores (SATHYA; SAVADAMUTHU, 2019) (MORADNOURI et al., 2015) (SINHA; KAUR, 2017).

4.1.2 Modelo Monofásico (1 ϕ) - 2D

A análise 2D da parte ativa dos transformadores é difundida na literatura por requisitar um tempo computacional significativamente menor, que possibilita o estudo de um maior número de possibilidades no mesmo tempo de processamento. Uma técnica que pode ser empregada a fim de economizar tempo computacional mantendo a precisão e fidelidade da simulação do modelo completo 3D é o desenvolvimento de simulações simplificadas até serem definidos os parâmetros de projeto e, então, depois de conhecer o projeto final, realiza-se a simulação do modelo completo 3D.

De acordo com (WATERS, 1953) e (BILLIG, 1946), a fase central do transformador pode ser estudada individualmente sem grandes perdas ao estudo de forças, já que é a fase que apresenta as condições mais críticas. Além disso, por simetria, somente um lado da fase pode ser simulado, já que o outro lado terá os mesmos resultados de forma espelhada, conforme aplicado em (AHN et al., 2012). Dessa forma, a simplificação que mais reduz tempo computacional é o modelo 2D do equipamento com somente meia fase central modelada, conforme mostra a Figura 20, desenhada seguindo o Modelo A. Novamente, os materiais e suas propriedades para cada domínio devem ser respeitadas.

Figura 20 – Desenho simplificado 1 ϕ e 2D do Modelo A

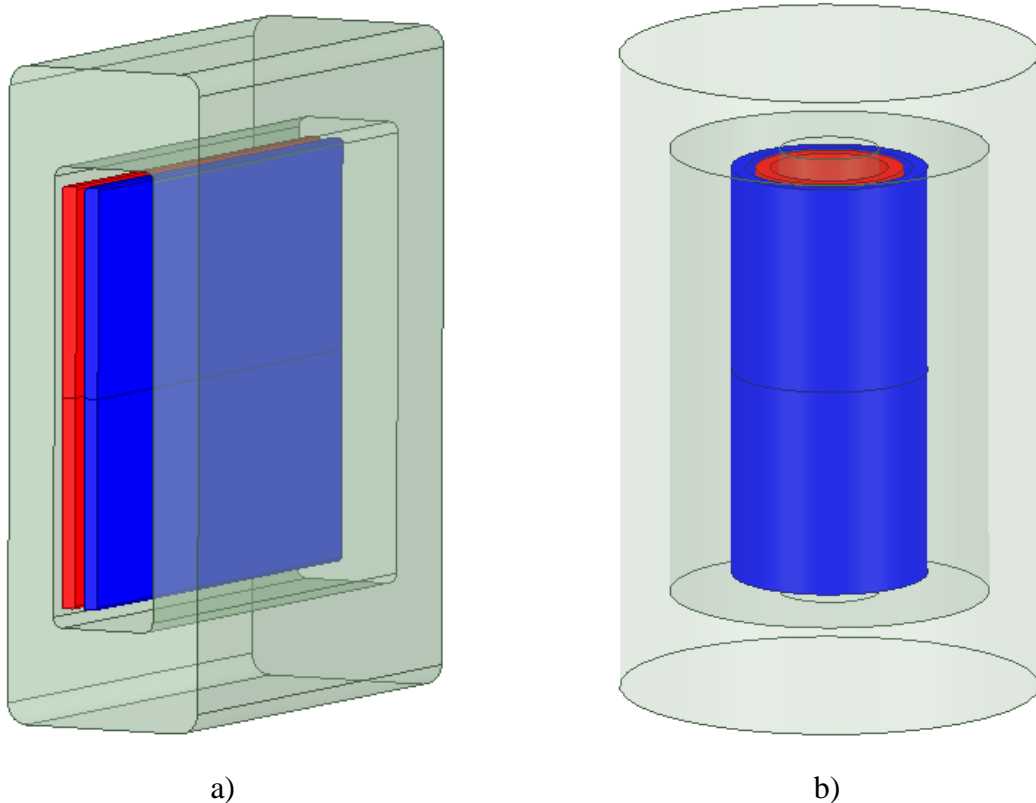


Fonte: Autor.

4.1.3 Simulação 2D no Maxwell®

As simulações 2D no Maxwell® podem ser realizadas de dois tipos diferentes: simulação cartesiana XY (profundidade) ou simulação *About Z*. Ambas as análises são válidas e trazem resultados diferentes já que consideram uma disposição distinta, dessa forma é necessário entender o que cada tipo de simulação considera para determinar como os transformadores devem ser simulados e analisados. As simulações cartesianas, ou de profundidade, consideram que o desenho 2D é prolongado no eixo Z por uma unidade de distância, dessa forma os resultados apresentados são dados para uma profundidade unitária (1 metro). O modo *About Z* considera que o desenho 2D é rotacionado ao redor do eixo Z, e seus resultados são dados para as geometrias circulares (ANSYS, 2010). Ambos os tipos de simulações 2D são ilustradas pela Figura 21, onde o modelo original 2D visualizado no *software* é aquele apresentado na Figura 20.

Figura 21 – Tipos de simulação: a) Profundidade e b) *About Z*



Fonte: Autor.

Nota-se, pelas geometrias da Figura 21, que nenhum dos tipos de simulações representa fielmente o desenho real do transformador (Figura 19), mas cada uma gera resultados distintos

que podem ser interpretados de modo a aproximar os resultados de simulação das características de um transformador real.

4.2 2ª ETAPA: SETUP

O *software* Maxwell[®] pode realizar simulações com abordagens diferentes, tanto na perspectiva magnética como na elétrica e, dentro dessas possibilidades de simulação, destacam-se as simulações magnetostáticas, de correntes parasitas (*eddy current*), de transiente, eletrostáticas, dentre outras. Para o estudo das forças eletromagnéticas providas da interação entre correntes e campos magnéticos variáveis é necessário selecionar o tipo de simulação como *eddy current*, já que o princípio básico de funcionamento dos transformadores é a indução de campo magnético devido à corrente alternada circulante nos enrolamentos e é nesse tipo de simulação que o *software* realiza o cálculo dessas forças (ANSYS, 2019).

Após definido o modelo a ser simulado, é necessário ajustar as condições de operação nas quais se deseja conhecer os efeitos. Para tanto, configura-se as condições de contorno e de excitação, que devem representar o ponto de operação a ser estudado da maneira mais fiel possível. O funcionamento, em questões eletromagnéticas, de um transformador é definido por basicamente duas condições características: as correntes que circulam em direções opostas nos enrolamentos e a quantidade de fluxo magnético que sai do domínio modelado.

4.2.1 Condições de contorno

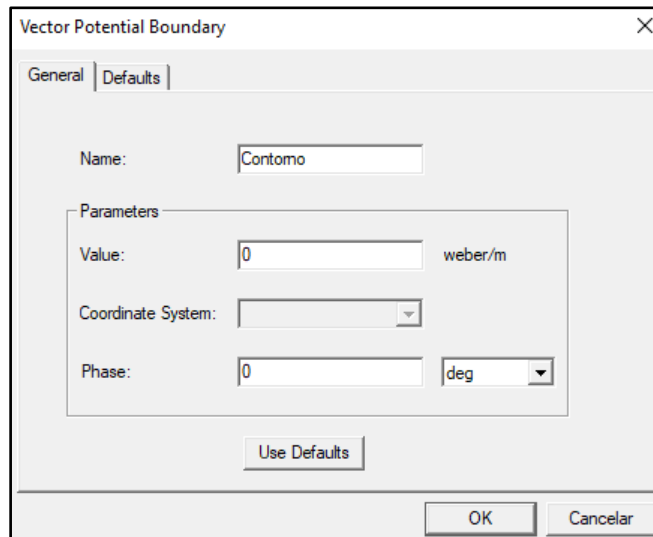
As condições de contorno, ou *Boundaries*, definem como a parcela não modelada geometricamente influencia o sistema simulado ou, em outras palavras, fornecem as características da fronteira entre o que está sendo simulado e o que foi ignorado pelo projetista. Nas simulações em elementos finitos, o que está sendo simulado é limitado pela região de simulação, e é nas fronteiras desta que normalmente são definidas as condições de contorno.

As condições de contorno são definidas de acordo com o que está sendo simulado: se a simulação for térmica, por exemplo, as condições de contorno devem compreender a temperatura exterior onde o modelo está inserido, a pressão ambiente, o fluxo de ar, entre outras características. Para simulações eletromagnéticas, a única condição de contorno necessária é a quantidade de fluxo que “escapa” do domínio definido pela região.

Nestes estudos eletromagnéticos, a região é considerada grande, para que então nenhum fluxo magnético escape do domínio simulado, portanto, a condição de contorno para simulações

eletromagnéticas é definida nas extremidades da região de simulação como 0 Wb/m, conforme exemplo da Figura 22.

Figura 22 – Criação da condição de contorno



Fonte: Autor.

4.2.2 Excitação

As excitações, ou *excitations*, devem caracterizar as condições de operação da geometria modelada, ou seja, onde existe circulação de corrente e qual suas características principais como magnitude, direção, frequência, fase, entre outras. Na operação normal dos transformadores, ou até mesmo sob curto-circuito, desprezando descargas internas, as correntes circulam somente pelos condutores dos enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão.

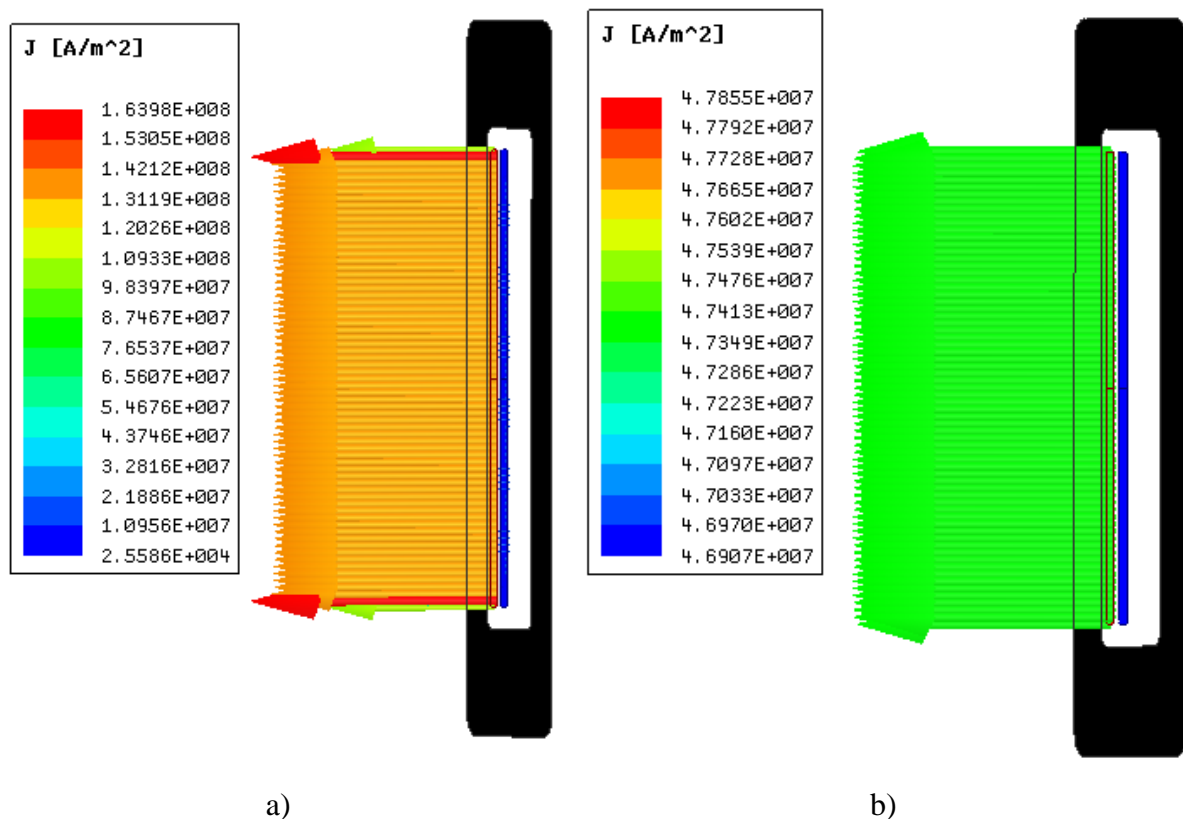
Ainda, conforme descrito na seção 2.1, as correntes que circulam na BT e na AT têm sentidos opostos devido às forças eletromotrizes e o equilíbrio do fluxo magnético. Sabe-se também, pela equação (1), que o produto espira vezes corrente ($N_1 \cdot I_1$) do mesmo enrolamento é igual em ambas as bobinas. Por exemplo, para o modelo simplificado apresentado na Figura 20, onde cada enrolamentos é representado por $x = 2$ blocos (superior e inferior), a intensidade da corrente que é colocada em cada bloco deve ser $\left(\frac{N_1 \cdot I_1}{2}\right)$, de modo que a corrente total na bobina seja $N_1 \cdot I_1$.

Outra importante questão que deve ser cuidadosamente configurada é o tipo de corrente, que pode ser do modo *solid* ou *stranded*. No modo *stranded*, a corrente será igualmente distribuída em todos os pontos do bloco ao qual ela está referenciada, característica de múltiplos condutores paralelos. No modo *solid*, o *software* interpreta como se o bloco modelado fosse

um condutor único de metal e então, a corrente elétrica em seu interior não se distribui igualmente, criando alguns pontos do bloco em que a magnitude da corrente é mais elevada ou menos elevada (efeito pelicular).

Outra questão que envolve a discussão *solid vs stranded* é a disposição do fluxo magnético, uma vez que na configuração *stranded* o fluxo tem mais facilidade para passar “por dentro” da bobina, enquanto no *solid*, por se tratar de um condutor único, não. A fim de compreender algumas das diferenças entre o modo *solid* e o modo *stranded*, uma comparação entre eles é ilustrada na Figura 23, sendo que uma corrente de mesma magnitude é configurada no mesmo bloco. Nota-se uma diferença no tamanho dos vetores da parte a) dessa figura, enquanto na parte b) isso não ocorre.

Figura 23 – Comparação da corrente nos modos: a) *solid* e b) *stranded*



Fonte: Autor.

Conforme discriminado na seção 2.2.1, as bobinas dos transformadores são constituídas por diversos condutores enrolados ao redor do núcleo e, ainda que o modelo geométrico não considere essa disposição detalhada, a corrente (I) que passa por cada enrolamento circula por cada condutor (N), criando uma característica de distribuição linear de intensidade ($N \cdot I$). Então, a fim de simulação, o modo que mais se aproxima do funcionamento característico dos transformadores é o modo *Stranded*.

De forma a visar o estudo dos esforços eletromagnéticos em transformadores sujeitos ao pior caso de curto-circuito (trifásico), deve-se configurar na simulação a maior corrente que circulará pelos enrolamentos (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Nesse sentido, precisa-se entender qual é a característica da forma de onda do curto-circuito trifásico e qual o maior valor de corrente que poderá surgir nos enrolamentos. Nesse tipo de curto-circuito (trifásico), por consequência da característica indutiva do sistema, a forma de onda da corrente apresenta um valor contínuo decrescente, de forma que o valor de máxima corrente acontece nos primeiros ciclos após a falta. A forma de onda mencionada é descrita pela equação (15), que depende das características do sistema onde acontece a falta, e pode ser visualizada na Figura 24, considerando que o evento de curto-circuito acontece em 0,5 s (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

$$i_{CC}(t) = \frac{Vmáx}{|Z|} \cdot \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{Rt}{L}} \cdot \sin(\alpha - \theta) \right] \quad (15)$$

Onde:

$i_{CC}(t)$ → Corrente de curto-circuito (A);

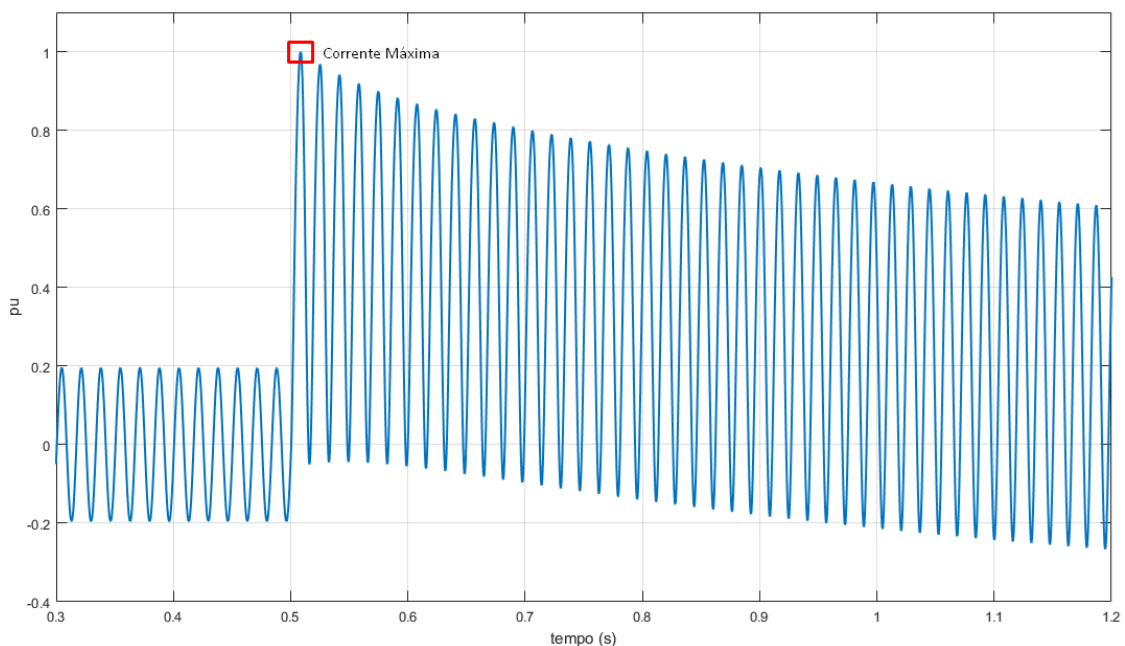
$Vmáx$ → Tensão máxima (V);

$\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ → Ângulo da impedância (°);

$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ → Módulo da impedância (Ω);

α → Defasagem da tensão no momento do curto (°);

Figura 24 – Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico (normalizada)

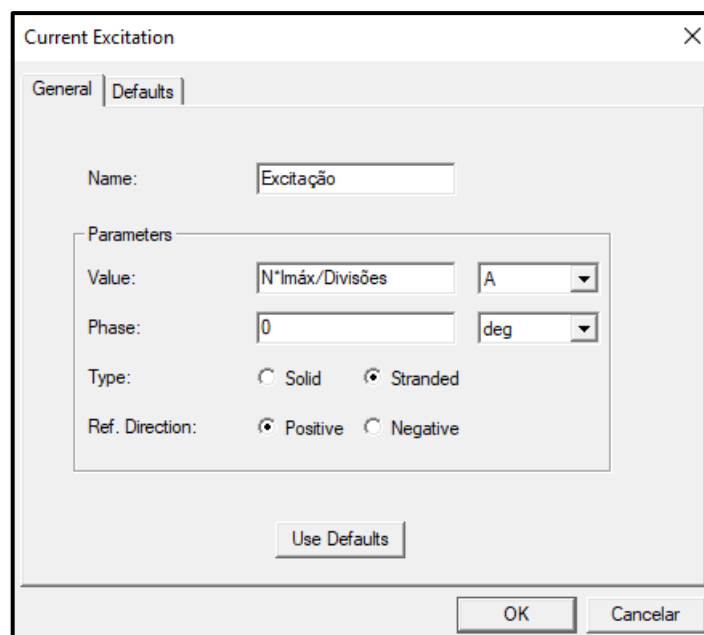


Fonte: Autor.

Conforme mencionado, a corrente que deve ser configurada na simulação deve ser a corrente máxima da forma de onda, de modo que a força simulada seja, também, a maior. Na Figura 24, o ponto de máxima corrente é destacado e ele sempre ocorrerá nos primeiros ciclos depois da falta. Devido à característica de proteção do sistema em geral, existe um tempo necessário para a detecção da falta e a abertura do circuito. Na perspectiva da corrente, pela Figura 24 sabe-se que os primeiros instantes depois da falta são os mais críticos, levando os equipamentos à pior condição.

Para finalizar o processo de configuração das excitações, a Figura 25 ilustra a tela mostrada pelo *software* com os campos que devem ser preenchidos, dando destaque à direção da corrente (positiva ou negativa) que deve seguir o funcionamento do transformador, onde AT e BT têm correntes com sentidos opostos.

Figura 25 – Criação da excitação



Fonte: Autor.

4.3 3ª ETAPA: SIMULAÇÃO

Após ajustadas as etapas anteriores é necessário regular o processo de simulação e como ele irá transcorrer, partindo para uma visão mais simulacional e menos geométrica/operacional. Para tanto, é necessário definir quais cálculos o *software* deverá executar (parâmetros), quais os critérios de convergência utilizados, sejam eles rígidos ou não e, por fim, qual o tamanho da malha, ou seja, o número máximo de elementos que deverá conter. Todos esses aspectos devem

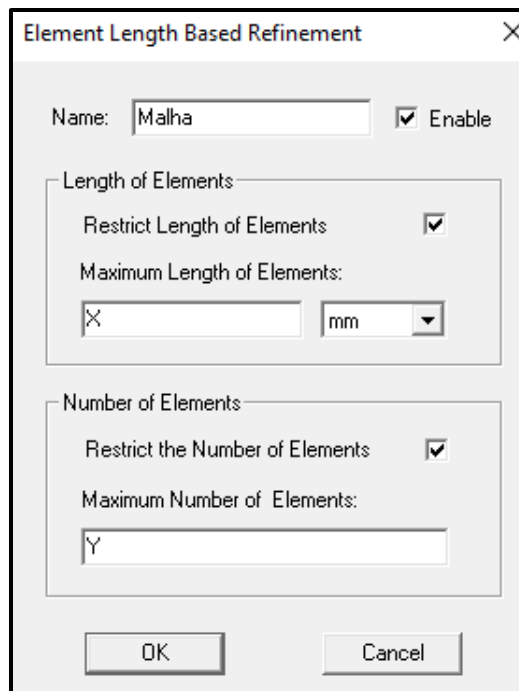
ser ajustados levando em conta o balanço entre o tempo de processamento que deseja ser gasto e a precisão necessária dos resultados, portanto, é de inteira escolha do projetista.

4.3.1 Malha

A característica mais notável do método de simulação por elementos finitos é a divisão de uma geometria complexa em diversos pequenos elementos de operação simples. Para tanto, o *software* Maxwell® faz a criação dos elementos seguindo seu próprio algoritmo de divisão, que podem variar em tamanho e em número dependendo da complexidade da estrutura modelada.

Normalmente, quanto maior o número de elementos em que uma geometria é dividida, melhor será a convergência e precisão da simulação, porém, maior será o tempo computacional requerido (ANSYS, 2019). No *software* usado neste trabalho, a malha pode ter seu tamanho controlado por duas maneiras: pelo tamanho máximo de elementos, ou pelo número máximo de elementos, conforme a janela de controle da malha observada na Figura 26. A escolha do tamanho da malha varia de acordo com a complexidade do caso a ser modelado, do tempo computacional que pode ser gasto e da precisão que se busca os resultados.

Figura 26 – Criação da malha



Fonte: Autor.

É importante destacar que o método de elementos finitos pode se aproximar bastante dos resultados reais, mas é indispensável manter em mente que erros de até 10%, mesmo com

uma malha perfeita, são inerentes ao modo que o método resolve as equações diferenciais do sistema (ANSYS, 2019).

4.3.2 Parâmetros

Nas simulações necessárias para estudo das forças eletromagnéticas, o *software* Maxwell[®] calcula, em seus processos primários, somente a densidade de corrente (\vec{J}) e o campo magnético (\vec{B}) (ANSYS, 2019). Qualquer outro parâmetro que se deseja conhecer deve ser “solicitado” ao *software* através da criação de parâmetros, como as forças eletromagnéticas, que só então são calculadas por um processo secundário.

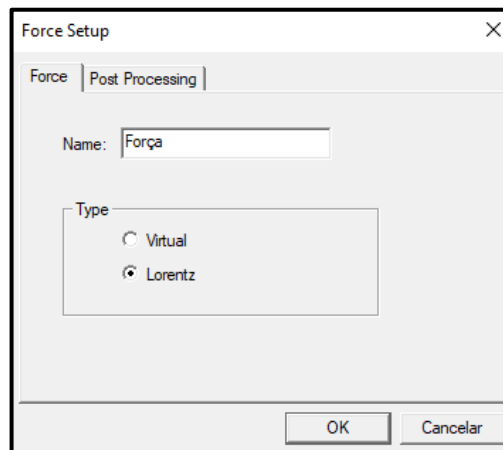
A força eletromagnética não é uma grandeza pontual, portanto ela sempre dependerá da sua associação com uma área ou volume. O Maxwell[®] faz essa associação através da criação dos parâmetros e portanto, a força que aparecerá nos resultados será a força total calculada sobre a geometria no qual o parâmetro foi criado.

Para o caso de simulações 3D, existem dois métodos que o *software* utiliza para cálculo das forças: o método *Virtual Force* e o *Lorentz Force*. Cada método calcula a força de uma perspectiva diferente, sendo que no *Virtual* ela é calculada pela derivada da energia, conforme equação (16). Já no *Lorentz*, a força é calculada pelo produto entre corrente e densidade de campo magnético, conforme equação (17), sendo que este é o mais condizente com o equacionamento desenvolvido na seção 3.1.3 (ANSYS, 2019). A janela que o *software* apresenta para a criação desses parâmetros é apresentada na Figura 27, sendo possível escolher entre os métodos de cálculo mencionados.

$$F_{plate} = \left. \frac{dW(s, i)}{ds} \right|_{i=constant} \quad (16)$$

$$F = \int_{Vol} J \times B \, dVol \quad (17)$$

Figura 27 – Criação do parâmetro



Fonte: Autor.

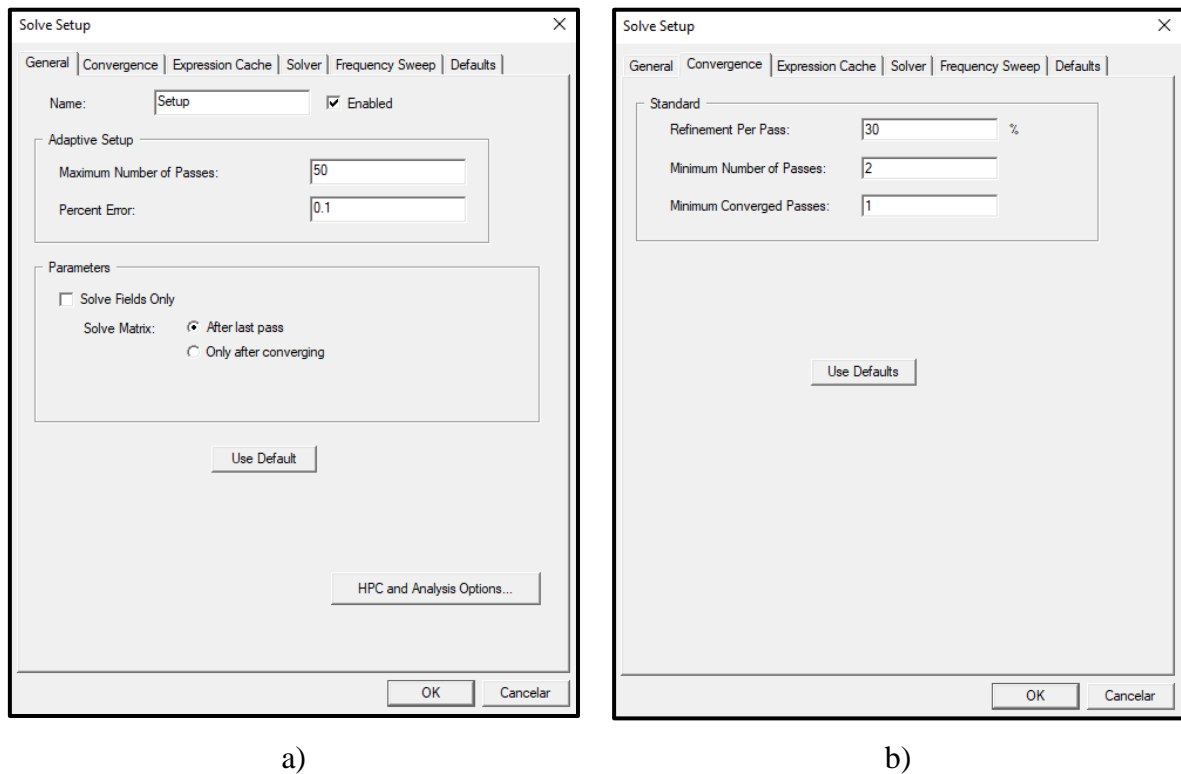
4.3.3 Critérios de convergência

A última configuração necessária antes de rodar a simulação é o ajuste dos critérios de convergência, que, em outras palavras, representam quantas iterações, ou passos, serão necessários e a partir de qual percentagem de erro entre uma iteração e outra a simulação será considerada como convergida. Esta etapa configura indiretamente quanto tempo computacional será gasto na simulação e qual será a precisão apresentada nos resultados. É importante destacar que essa precisão não necessariamente tem relação com o modelo real, mas sim com a convergência das equações diferenciais que representam o projeto modelado.

As opções que o Maxwell[®] fornece contam com: controle do número máximo de passos que a simulação pode rodar, que serve como limitador de tempo de processamento caso a simulação não convirja; número mínimo de passos após a convergência ser detectada; percentagem de erro, que controla quão precisa será a simulação; e por fim a percentagem de refinamento a cada passo, que controla quão bruscamente a malha será refinada a cada passo executado.

A janela apresentada na Figura 28 a) e b) mostra uma configuração básica para a simulação de um problema como o proposto neste trabalho. O número mínimo de passos necessários até a convergência varia de acordo com a complexidade da geometria que se deseja simular, portanto, normalmente é configurado um número de passos grande para que a simulação termine somente quando atingir o erro especificado, e não pelo limite de passos máximos. Já o erro depende da precisão com que se quer os resultados, normalmente para o estudo de esforços de curto-circuito, valores na casa de 0,1% são razoáveis, dadas as simplificações já aplicadas.

Figura 28 – Criação do controle simulacional



Fonte: Autor.

4.4 4ª ETAPA: RESULTADOS

A etapa dos resultados é a última etapa do processo de simulação e acontece após todos os cálculos serem efetuados pelo processador e a convergência ter sido atingida dentro dos critérios programados. É neste momento que os resultados da simulação são apresentados ao usuário, e cabe a ele interpretá-los e decidir se estão razoavelmente de acordo com o esperado.

Diversas variáveis podem ser investigadas nesta etapa para checar se a física do problema segue, pelo menos, as leis básicas que regem a dinâmica estudada; nessa simples análise pode ser observado se nenhum erro grosseiro foi cometido nas etapas anteriores. Algumas variáveis essenciais que devem ser estudadas no pós-processamento são apresentadas e discutidas nas subseções a seguir.

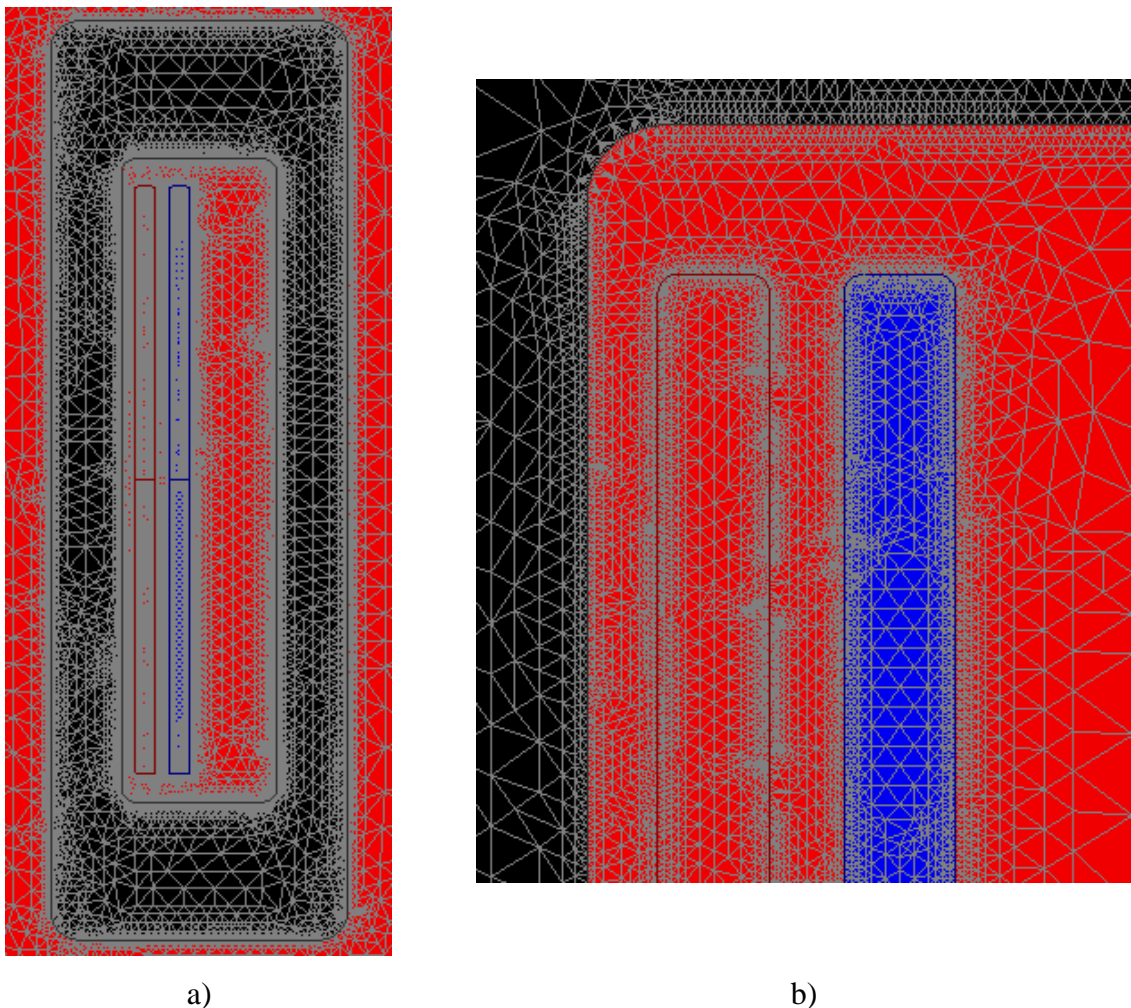
4.4.1 Malha

A primeira coisa que deve ser observada após a convergência da simulação é se a malha configurada está bem refinada, dentro dos padrões esperados e sem nenhuma região de elementos muito grandes, principalmente nos locais onde serão efetuados os cálculos específicos do estudo.

No caso de análise de forças eletromagnéticas nos enrolamentos, é importante que a malha seja bem refinada, ou seja, de elementos pequenos, nos blocos dos enrolamentos, bem como nos canais de óleo entre os enrolamentos de AT e de BT e entre a BT e o núcleo, de forma que o cálculo do campo magnético seja preciso nessas localizações. É importante que se tenha uma malha bem refinada nas regiões de cálculo da força pois, como a força é um resultado secundário no Maxwell®, o erro carregado da solução primária (\vec{J} e \vec{B}) é multiplicado no cálculo secundário da força ($\vec{F} \sim \vec{J} \times \vec{B}$).

A malha obtida para o caso modelado deve se parecer com a apresentada na Figura 29, onde se observa a alta concentração de elementos na região dos enrolamentos bem como nos canais de óleo próximos aos enrolamentos onde estará localizado o campo magnético disperso. É importante que os elementos no restante da geometria também sejam pequenos, de forma a garantir o mínimo de precisão.

Figura 29 – Malha para a geometria modelada



Fonte: Autor.

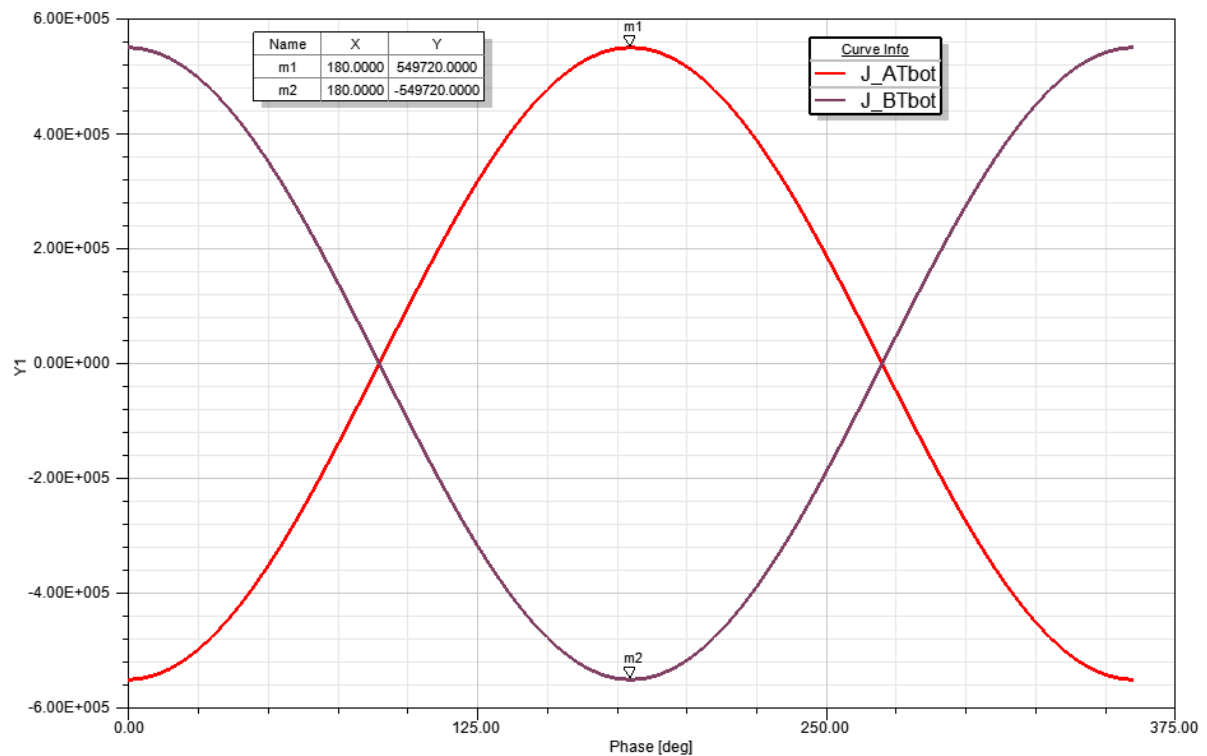
4.4.2 Correntes

Para garantir que o ponto de operação simulado foi aquele configurado na etapa de *setup*, é imprescindível que a leitura das correntes seja feita, tanto no enrolamento de BT como no de AT, ou seja, deseja-se checar se as configurações de amplitude, direção e fase foram corretamente ajustadas. Nesse ponto também pode ser observado se o modo *stranded* foi marcado em ambas as excitações.

A forma mais óbvia de se observar as correntes nos enrolamentos é pelo traçado, ou *plot*, dos vetores que as representam nos condutores. Porém, nessas condições, as amplitudes dos vetores serão dadas sobre uma área, e a visualização direta de valores se torna complicada. Nesse passo pode ser verificada a distribuição uniforme ou não da corrente e, o resultado obtido nesta etapa é similar ao da Figura 23 b), onde a característica do *stranded* é facilmente visualizada.

Uma segunda maneira, mais precisa, de observar principalmente o valor de amplitude e de fase da corrente em cada bobina é efetuar a integral da densidade de corrente (\vec{J}) sobre os condutores nos quais deseja-se conhecer a corrente. Tal operação é feita pela calculadora interna do *software* e o resultado pode ser plotado conforme a Figura 30, onde é observado, além das amplitudes, a defasagem entre AT e BT. Outra constatação importante pode ser feita com a análise dessa figura: o valor de pico da corrente deve ser exatamente o valor da corrente configurado previamente ($N \cdot I_{m\acute{a}x}$), confirmando que o valor inserido na etapa de *setup* não é o valor eficaz, mas sim o valor de pico da forma de onda.

Figura 30 – Forma de onda das correntes genéricas simuladas (AT e BT)



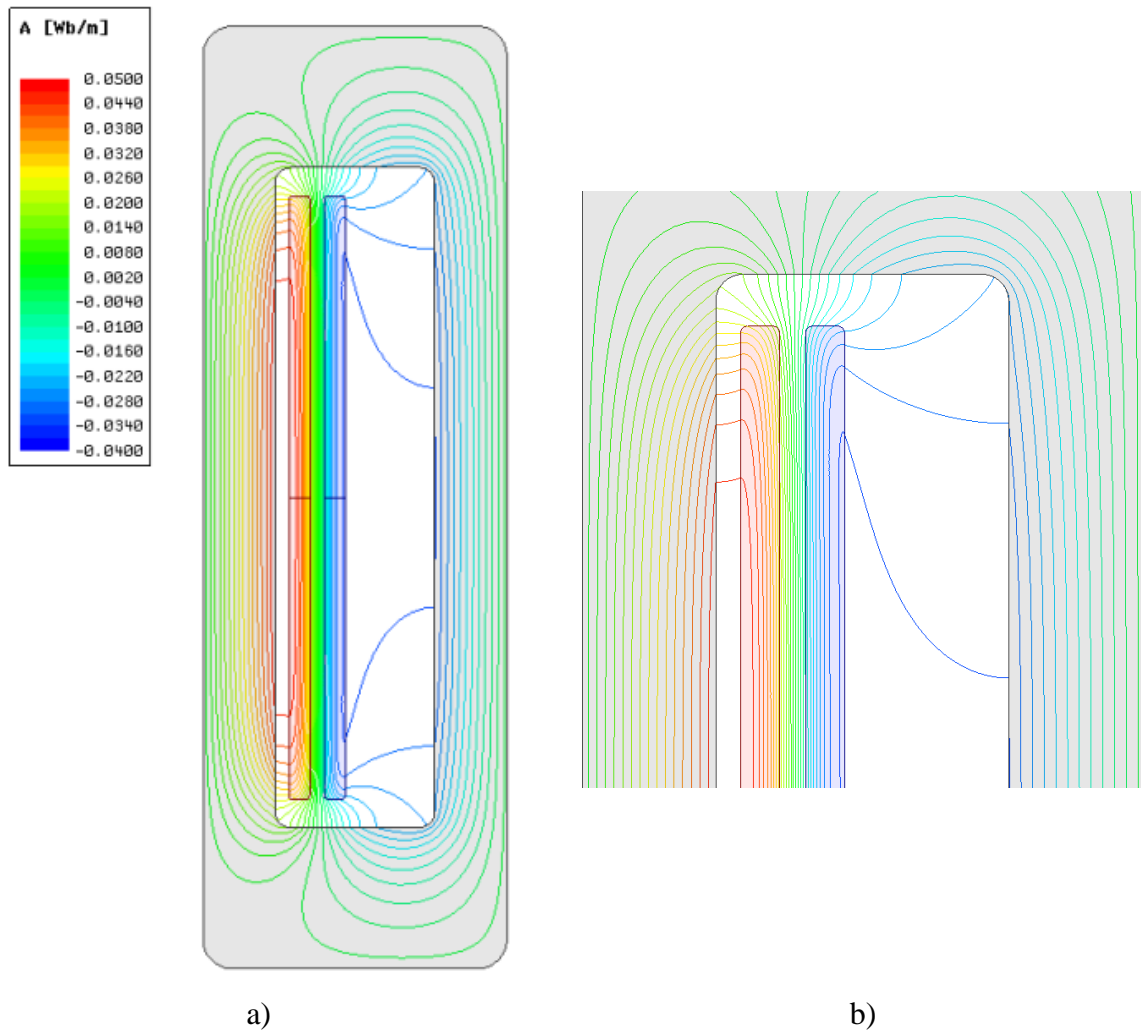
Fonte: Autor.

4.4.3 Fluxo

Após verificada a consistência da malha e a correta caracterização do ponto de operação simulado conforme descrito nas subseções anteriores, pode-se partir para uma análise do ponto de vista eletromagnético, visualizando as linhas de fluxo magnético e a densidade de campo magnético, principalmente. Posteriormente, as características visualizadas nesta seção serão tratadas em conjunto com as forças eletromagnéticas, objetivo final deste trabalho.

De forma a observar as linhas de fluxo magnético, é necessário que se faça um *plot* dessa variável sobre as geometrias de interesse, conforme pode ser visto na Figura 31 a). Nota-se que existe uma concentração de linhas de fluxo magnético no núcleo devido à sua permeabilidade magnética elevada, mas também, existe uma segunda concentração entre os enrolamentos de AT e BT, no canal de óleo, que surge devido às características de funcionamento dos transformadores. Tal disposição do fluxo entre os enrolamentos é imprescindível para o surgimento das forças eletromagnéticas já que, conforme discutido na seção 3.1.3, a circulação de corrente em um condutor imerso em campo magnético causa, inevitavelmente, forças magnéticas.

Figura 31 – Exemplo de linhas de fluxo magnético

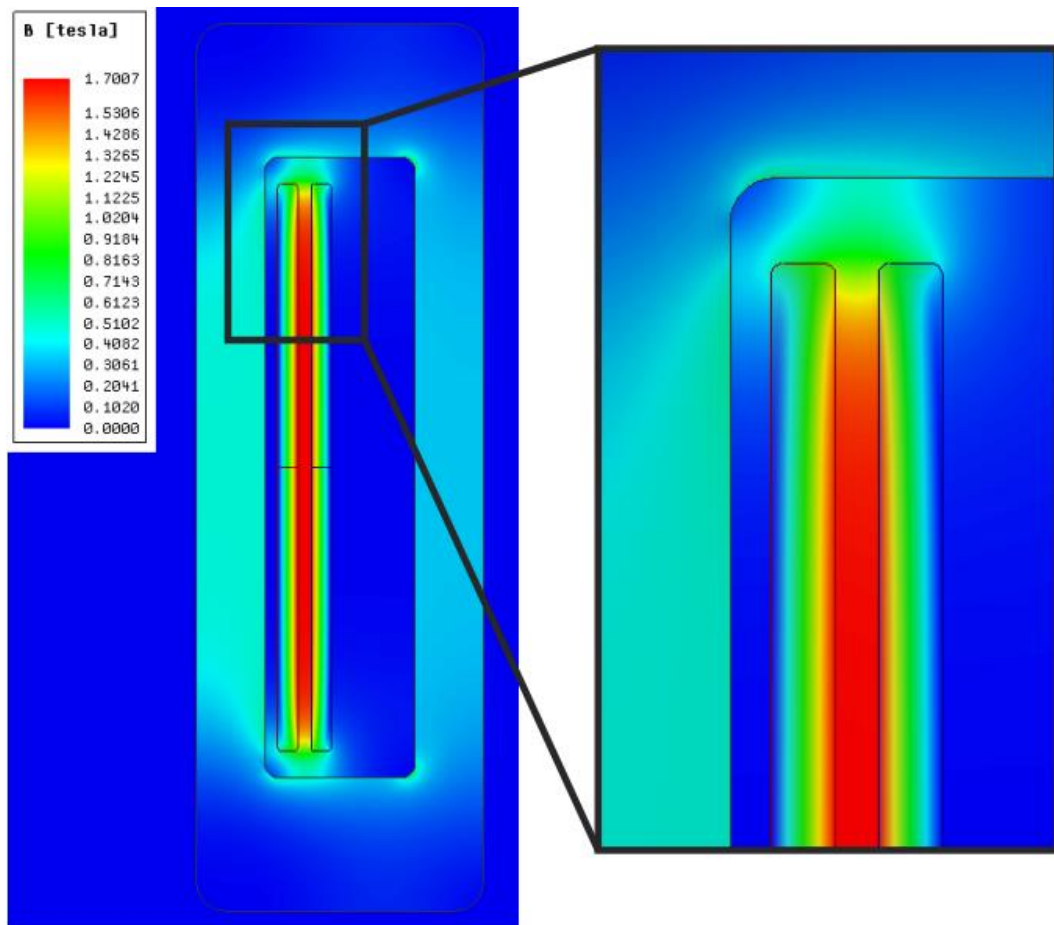


Fonte: Autor.

No mesmo contexto, pode ser visto que as linhas de fluxo magnético sofrem uma curvatura radial nas cabeceiras dos enrolamentos, tanto nas superiores quanto nas inferiores, essa característica pode ser mais facilmente observada pelo *zoom* mostrado na Figura 31 b). Tal padrão comportamental causa as forças axiais compressivas, conforme discutido na seção 3.2.2, onde foi explicitado, pelo produto vetorial entre fluxo e corrente, que essa componente radial do fluxo nas cabeceiras causa as forças axiais.

A transcrição dessas linhas de fluxo magnético na forma de densidade de fluxo magnético, que representa a concentração dessas linhas, é apresentada na Figura 32, onde se confirma novamente a densidade elevada de fluxo magnético entre as bobinas de AT e de BT.

Figura 32 – Exemplo de densidade de fluxo magnético



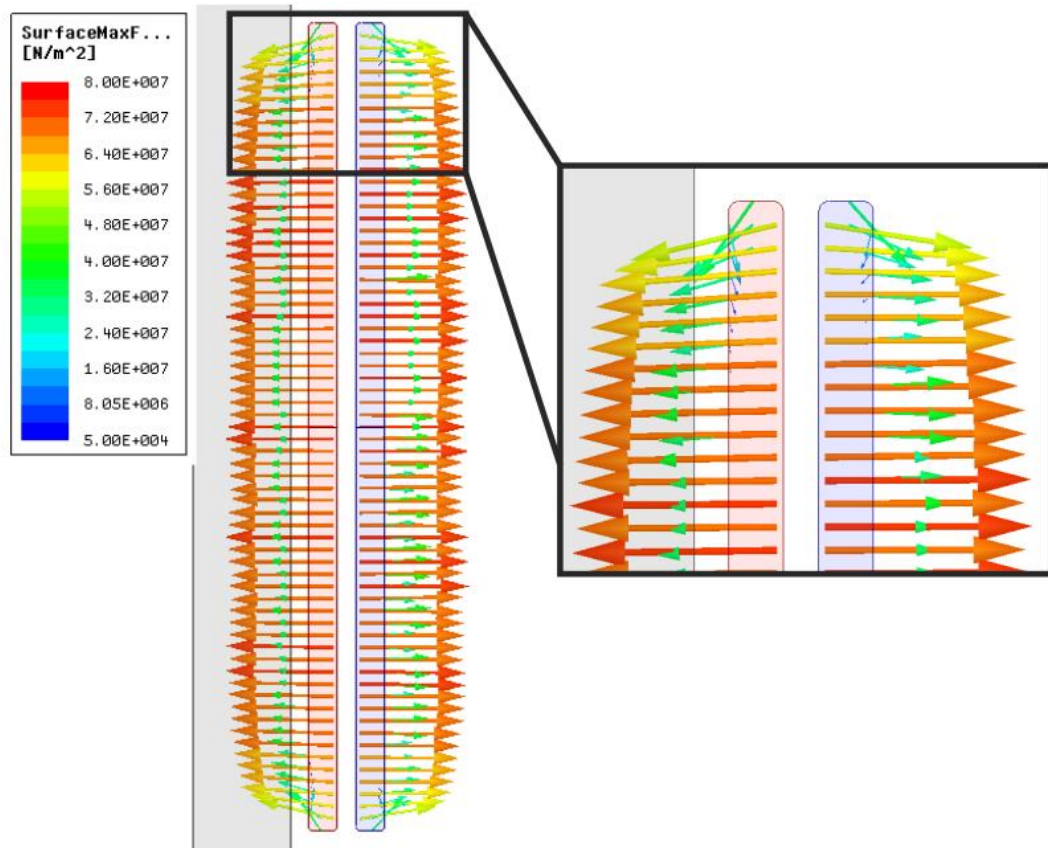
Fonte: Autor.

4.4.4 Força

Finalmente, dá-se início ao estudo das forças eletromagnéticas calculadas na simulação, motivação do processo apresentado neste trabalho. Alguns aspectos principais devem ser observados nessa análise, tal como a direção e magnitude das forças nos enrolamentos, a frequência de oscilação dessas forças, a intensidade das forças axiais e a questão do aspecto 3D da simulação em profundidade.

Existem duas maneiras principais de levantar dados sobre as forças magnéticas: a primeira delas, mais fácil e menos precisa, mostra a disposição das forças e pode ser feita com o *plot* dos vetores de força máxima sobre as geometrias de interesse, nesse caso os enrolamentos, conforme Figura 33. Nesse tipo de traçado é difícil conhecer os valores reais das forças sobre cada condutor, já que a magnitude dos vetores plotados depende da associação com uma área que não é conhecida.

Figura 33 – Forças máximas simuladas nos enrolamentos (vetores)



Fonte: Autor.

Observa-se em um primeiro momento que existe repulsão entre o enrolamento de BT e o de AT, sendo que, em uma perspectiva tridimensional, o enrolamento de BT sofre compressão enquanto o de AT sofre expansão. Ainda na mesma figura, existem vetores de força de magnitude menor que contêm componentes na direção axial, estas componentes têm direção negativa na extremidade superior e direção positiva na extremidade inferior, configurando a compressão dos condutores em ambos os enrolamentos. Essas forças axiais surgem devido à curvatura do fluxo nas cabeceiras dos enrolamentos (Figura 31 b), tornando maior a magnitude radial desse fluxo e por consequência tornando maior a magnitude da força axial.

A segunda e mais importante maneira de observar os resultados simulacionais é a interpretação dos valores de força sobre os parâmetros criados na seção 4.3.2. Essas informações são apresentadas na aba *Results* e disponibilizam um resultado preciso da força em cada geometria na qual o parâmetro foi criado. A interpretação desses resultados é responsabilidade do usuário, mas as principais informações que podem ser extraídas são: a distribuição da força radial, o comportamento das forças axiais e a compressão máxima.

É necessário fazer uma interpretação em cima do resultado que é fornecido, pois a força é entregue decomposta nas direções x, y e z correspondentes aos eixos nos quais a geometria foi desenhada. Além disso, as forças são apresentadas com duas componentes: contínua e alternada, já que, de acordo com (ANSYS, 2010) e com a teoria estudada na seção 3.1.4, a força eletromagnética que surge nos enrolamentos pode ser decomposta por um valor contínuo (DC) somado com uma senoide (AC). A janela *Results* é mostrada na Figura 34, onde pode ser observado como o resultado é disponibilizado ao usuário.

Figura 34 – Janela *Results*: a) Componente Contínua e b) Componente Alternada

Parameter:	FAT_top_1	Type:	DC	Export Solution...
Pass:	7	Force Unit:	newton	
Freq:	60Hz			
	F(x)	F(y)	F(z)	Mag(F)
Total	11.236	-53128	-1413.3	53147

a)

Parameter:	FAT_top_1	Type:	AC<Mag, Phase>	Export Solution...			
Pass:	7	Force Unit:	newton				
Freq:	60Hz	Phase Unit:	deg				
	F(x) Mag	F(x) Phase	F(y) Mag	F(y) Phase	F(z) Mag	F(z) Phase	Mag(F)
Total	11.236	0	53128	180	1413.3	180	53147

b)

Fonte: Autor.

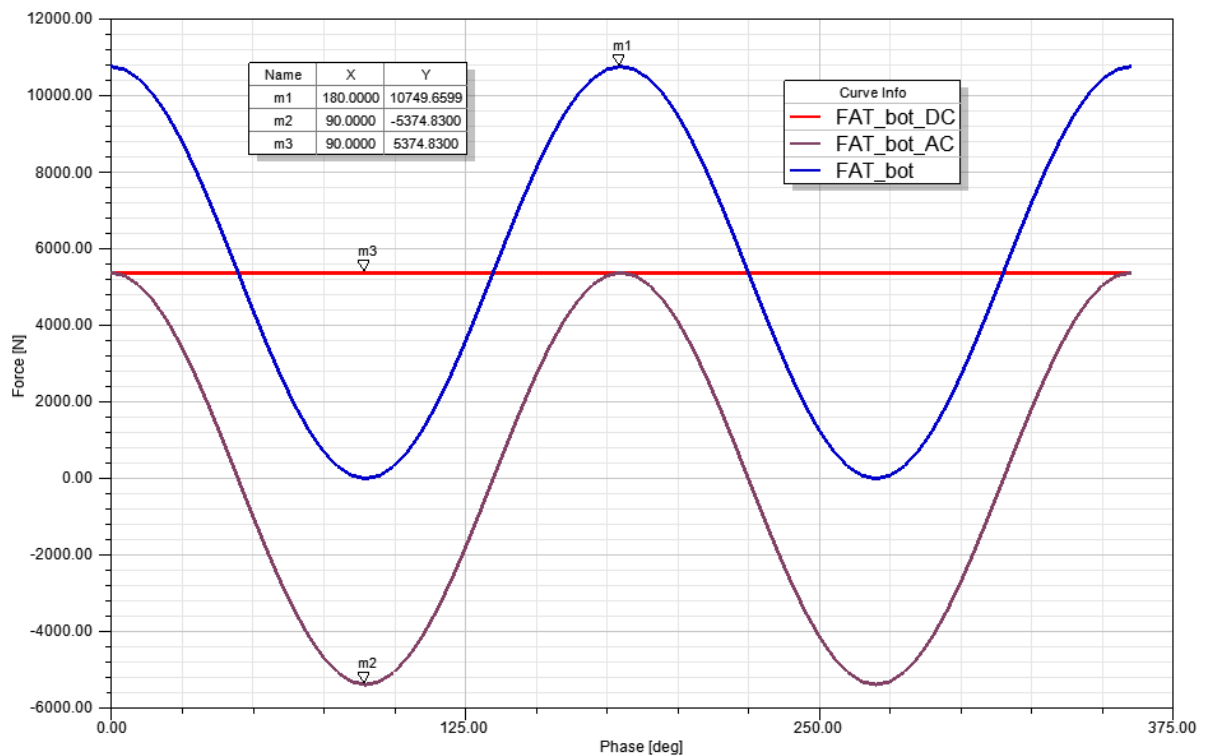
O *software* calcula as componentes contínua e alternada da força por equações distintas e esse é o motivo principal pelo qual ele apresenta os resultados de forma separada. A componente contínua é calculada de acordo com a equação (18), enquanto a componente alternada é calculada pela equação (19) e a força instantânea total pela equação (20) (ANSYS, 2010). A Figura 35 apresenta a força instantânea, a componente contínua e a componente alternada em um parâmetro.

$$F_{DC} = \frac{1}{2} \int \text{Re} \{ \bar{J} \times \bar{B}^* \} dV \quad (18)$$

$$F_{AC} = \frac{1}{2} \int | \bar{J} \times \bar{B} | dV \quad (19)$$

$$F_{INST} = F_{DC} + F_{AC} \quad (20)$$

Figura 35 – Curvas de força contínua, alternada e instantânea total



Fonte: Autor.

Pela análise da força instantânea no parâmetro apresentada pela Figura 35, observa-se que o módulo do valor de pico da força será a soma do módulo do valor contínuo com o módulo do valor de pico da senoide. Além disso, pode ser notado que a frequência da força é o dobro da frequência de excitação dos enrolamentos (conforme equacionado na seção 3.1.4), e a força sempre varia de um valor máximo até próximo de zero, nunca invertendo sua direção.

Como a força que aparece nos resultados é dada sobre um parâmetro de tamanho específico escolhido pelo projetista, para entender mais precisamente o comportamento e disposição dessas forças é necessário que se tenham parâmetros suficientemente pequenos, chegando até o ponto de um parâmetro representar a geometria exata de um condutor, onde teria-se como resultado a força exata em cada condutor. Porém, tal distribuição de parâmetros se torna inviável se for considerado que os enrolamentos são formados por centenas de espiras e, nesse sentido, os enrolamentos podem ser divididos até um valor viável que apresente resultados satisfatórios.

5 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

De forma a realizar um estudo completo que mostre o comportamento das forças nos diversos pontos do enrolamento, é proposto neste capítulo que seja feita uma simulação em elementos finitos do Modelo A, conferindo os valores das forças simuladas com os cálculos disponibilizados pelo Fabricante. O objetivo secundário deste capítulo é mostrar as peculiaridades da simulação 3D além de onde as simulações 2D podem ser utilizadas (profundidade e *about Z*) e como estas se comportam na análise das forças radiais e axiais.

Duas forças principais são analisadas pelo Fabricante A para o estudo das forças eletromagnéticas do modelo proposto. A primeira análise apresentada neste capítulo é a força radial total nos enrolamentos de AT e de BT, sendo que estes enrolamentos possuem forças radiais diferentes devido ao seu diâmetro. A segunda análise fala sobre a força de compressão total, que é a soma da compressão na AT com a compressão na BT. Os valores calculados pelo Fabricante, para um transformador de potência de 140 kVA, são apresentados na Tabela 1 e devem ser comparados com os obtidos em simulação para a validação do método simulacional.

Tabela 1 – Forças fornecidas pelo Fabricante A

Grandeza	Abreviação	Valor de pico (kN)
Força radial BT	F_{r_BT}	770,1
Força radial AT	F_{r_AT}	1050
Compressão Total	F_c	42,38

Fonte: Autor.

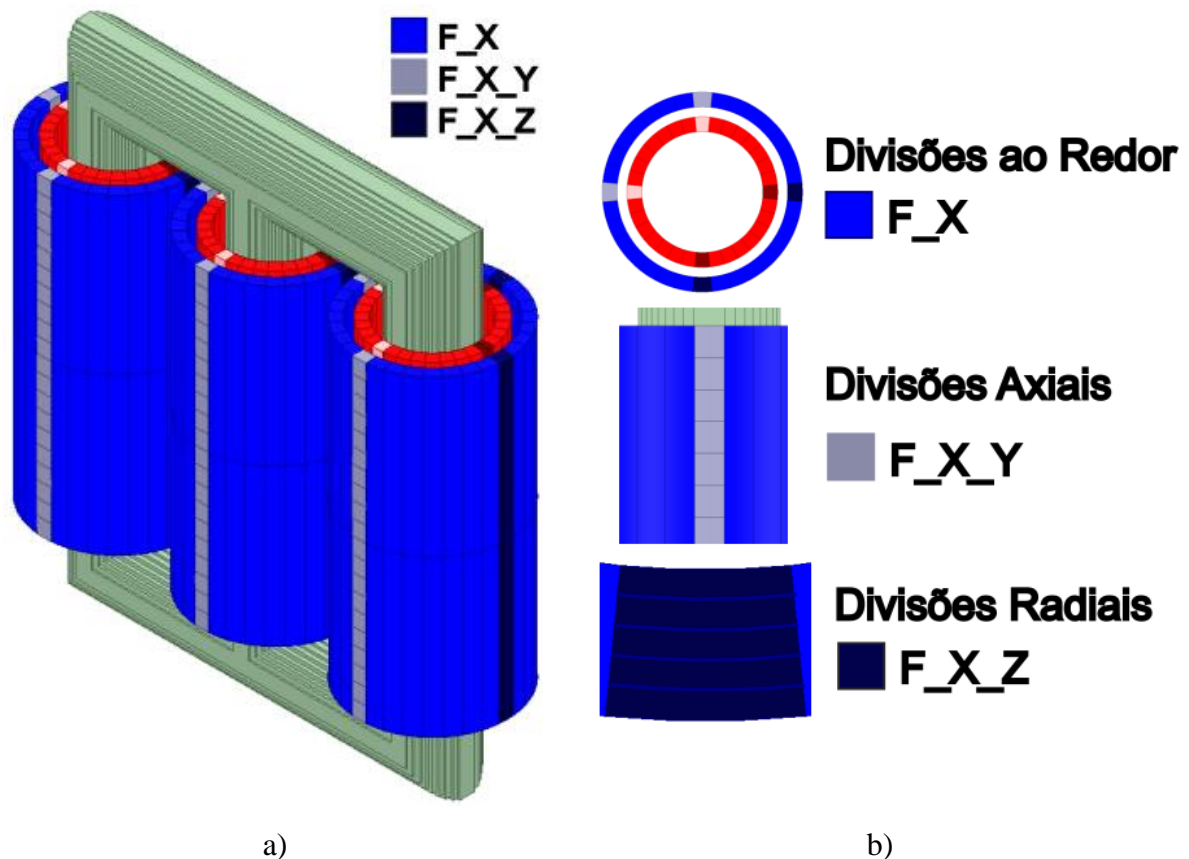
5.1 SIMULAÇÃO 3D

A primeira simulação desenvolvida, que representa o transformador real de modo mais fiel, é a 3D completa e trifásica. Para entender a distribuição das forças ao redor do enrolamento (360°), bem como ao longo de suas direções axial (altura) e radial (espessura), o enrolamento é dividido em blocos de tamanhos satisfatórios para tal análise. Nesse contexto, os enrolamentos são divididos conforme especificado pela Tabela 2 e ilustrado na Figura 36, onde a variável “h” representa a altura total e “t” representa a espessura total do enrolamento.

Tabela 2 – Especificação das divisões do enrolamento (3D)

Direção	Divisões	Parâmetro	X,Y,Z
Ao redor (360°)	32 (11,25°)	F_X	X: 01-32
Axial (Altura)	20 (h/20)	F_X_Y	Y: 01-20
Radial (Espessura)	5 (t/5)	F_X_Z	Z: 01-05

Figura 36 – Divisão dos enrolamentos (3D)



Fonte: Autor.

Após a criação de todos os parâmetros, as forças podem ser analisadas nas diversas divisões criadas. Para conferir a precisão da simulação, os resultados obtidos devem ser comparados com aqueles mostrados na Tabela 1, sendo considerados corretos e satisfatórios quando apresentarem um erro de até 10% entre método de simulação e cálculo.

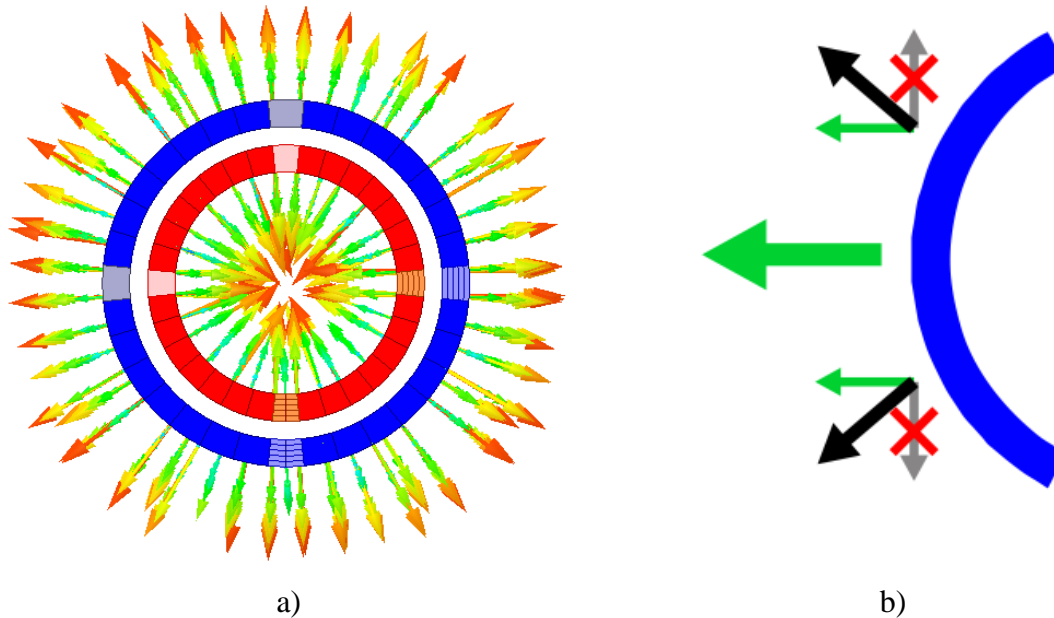
5.1.1 Força radial (3D)

As forças radiais simuladas devem ser interpretadas e trabalhadas de forma a representar corretamente a força radial total. Isso deve ser feito pois a força simulada é apresentada sobre cada parâmetro configurado, ou seja, a força radial simulada total do enrolamento será a soma das forças radiais de cada bloco (F_X) criado ao redor do enrolamento.

Além disso, como a força sempre é calculada pelo *software* sobre um parâmetro, quanto menor o número de divisões, maior será o erro inserido no cálculo. Isso é inevitável pois a força ao redor de cada ponto do enrolamento é na direção perpendicular ao condutor (Figura 37 a) e, se essa perpendicularidade for decomposta em um parâmetro considerado “grande demais”, alguns componentes (em cinza) se anularão entre si (Figura 37 b), fazendo com que a força

radial total calculada do parâmetro (verde) não seja exatamente a soma de todos os componentes perpendiculares (preto), característica que introduz um erro associado ao número de divisões.

Figura 37 – Direção das forças radiais: a) pontualmente e b) no parâmetro



Fonte: Autor.

A progressão do erro devido ao tamanho dos blocos foi estudada neste trabalho conforme mostra a Tabela 3, onde nota-se que quanto maior o número de divisões, menor o erro, já que as parcelas que se anulam dentro do parâmetro se tornam cada vez menores. O modelo com 32 divisões foi escolhido como modelo base deste modelo de simulação pois apresenta erro radial menor que 10%, ou seja, os resultados obtidos em simulação estão em concordância com os disponibilizados pelo Fabricante, confirmando que o método de simulação de forças radiais apresenta bons resultados.

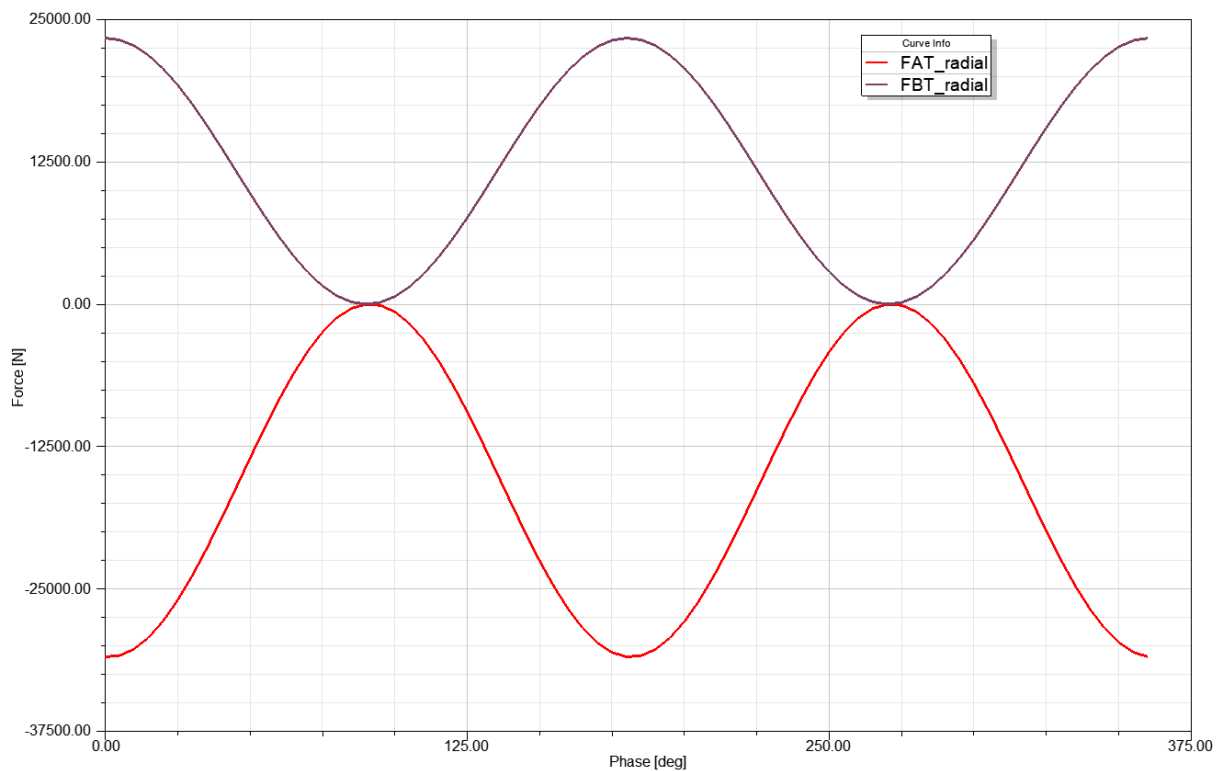
Tabela 3 – Força radial (3D)

Força Real (kN)	Divisões (F_X)	Força simulada (kN)	Erro (%)
$F_{r_AT} = 1050$	4	605,99	42,27
$F_{r_AT} = 1050$	8	856,44	18,42
$F_{r_AT} = 1050$	16	945,11	9,97
$F_{r_AT} = 1050$	32	949,89	9,51
$F_{r_BT} = 770,1$	4	476,64	38,11
$F_{r_BT} = 770,1$	8	673,73	12,52
$F_{r_BT} = 770,1$	16	743,43	3,47
$F_{r_BT} = 770,1$	32	747,32	2,96

Fonte: Autor.

De modo a facilitar a visualização do comportamento da força nos enrolamentos de AT e de BT, a Figura 40 mostra as formas de onda instantâneas de um parâmetro (F_01) da BT e de um da AT lado a lado, destacando a característica de repulsão entre os enrolamentos, uma vez que apresentam seus picos de força com direção diferente. Destaca-se que a quantidade “Força simulada” apresentada na Tabela 3 é a soma de todos os parâmetros ao redor dos enrolamentos e não somente a força de um parâmetro como mostra a Figura 40, o que explica a discrepância na magnitude dos valores. Outra questão que deve ser observada na extração dos resultados simulacionais é que o valor apresentado na Tabela 1 é o valor de pico da força.

Figura 38 – Formas de onda instantânea da força radial (parâmetro F_01)



Fonte: Autor.

Devido à disposição das forças nos enrolamentos de AT e de BT, a bobina de baixa tensão sofrerá uma compressão enquanto a de alta tensão sofrerá uma expansão. Tal característica é prejudicial aos suportes mecânicos desses condutores, que devem estar preparados para esse esforço. Como a força está presente em todo o condutor, o valor calculado ou simulado pode ser transformado para uma quantidade unitária, por exemplo o milímetro, de forma que a força seja expressa em N/mm e diretamente aplicável ao esforço em cada suporte, de acordo com o espaçamento entre eles. Esse valor (N/mm) é igual tanto para o enrolamento de BT como para o de AT, mas como seus perímetros são diferentes, o enrolamento de alta tensão terá uma força radial total maior que o de baixa tensão.

5.1.2 Força axial – compressão (3D)

Da mesma forma que para as forças radiais, as forças axiais devem ser interpretadas de forma a comparar os resultados simulacionais com os apresentados por (WATERS, 1953). Por definição, a força axial de compressão é a força que os blocos da metade superior exercem sobre a metade inferior, ou vice-versa. Então, a compressão total simulada será a soma das forças na direção axial da parte superior, ou inferior, de cada divisão ao longo do enrolamento. A Tabela 4 apresenta o erro devido às divisões em parâmetros, mostrando que não existe uma progressão do erro, já que na direção axial não existe componentes de forças se anulando. Além disso, observa-se que os erros são todos menores que os 10% estipulados, retratando os bons resultados proporcionados por este método de simulação.

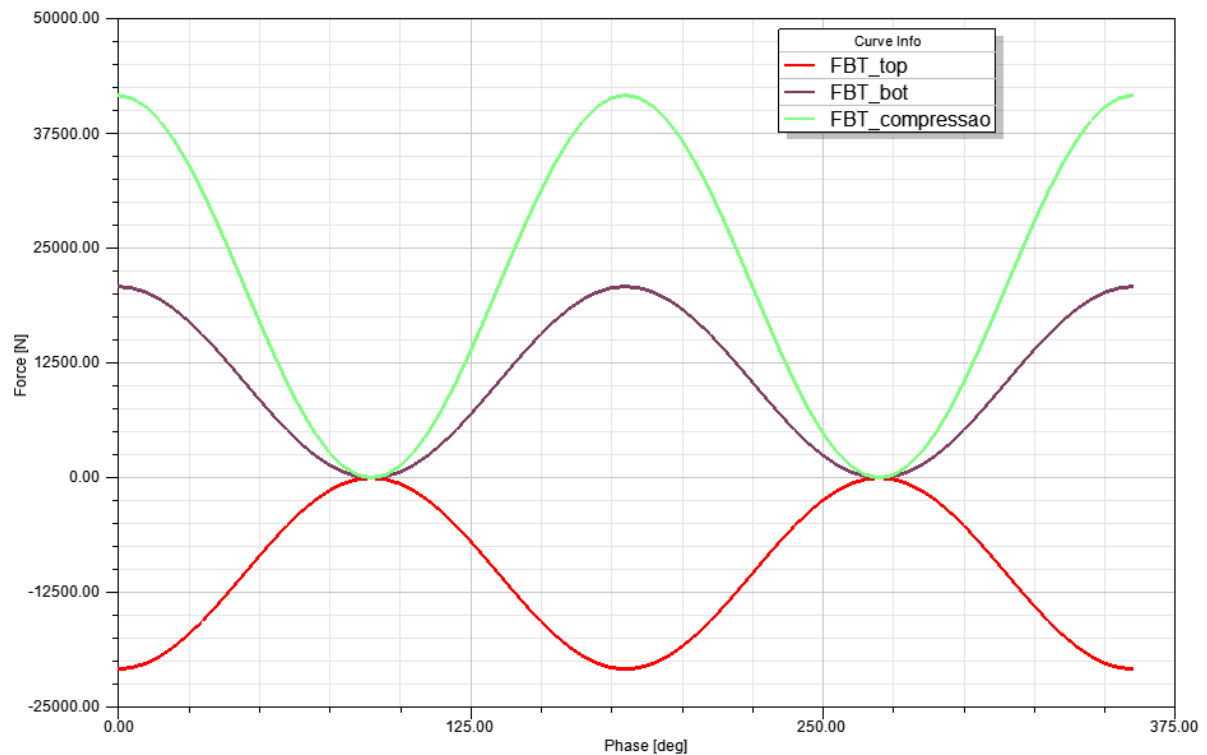
Tabela 4 – Força axial de compressão (3D)

Força Real (kN)	Divisões (F_X)	Força simulada (kN)	Erro (%)
$F_c = 42,38$	4	40,41	4,66
$F_c = 42,38$	8	40,19	5,10
$F_c = 42,38$	32	40,24	5,05

Fonte: Autor.

De modo a facilitar a visualização do comportamento da força nos enrolamentos superiores e inferiores, a Figura 39 mostra as formas de onda instantâneas de um parâmetro da parte superior (F_top) e de um parâmetro da parte inferior (F_bot), destacando a característica de compressão dos enrolamentos, já que o inferior tem pico positivo enquanto o superior tem pico negativo. Detaca-se, também, que o pico de força da parte superior acontece no mesmo instante que o pico da parte inferior, o que solicita um esforço intenso dos espaçadores entre as espiras, no dobro do valor de compressão máxima. Da mesma forma que para forças radiais, a compressão também pode ser decomposta em um valor unitário N/mm, que traduz de maneira mais compreensível quanta força cada espaçador irá suportar.

Figura 39 – Formas de onda instantânea da força axial (parâmetro F_top e F_bot)

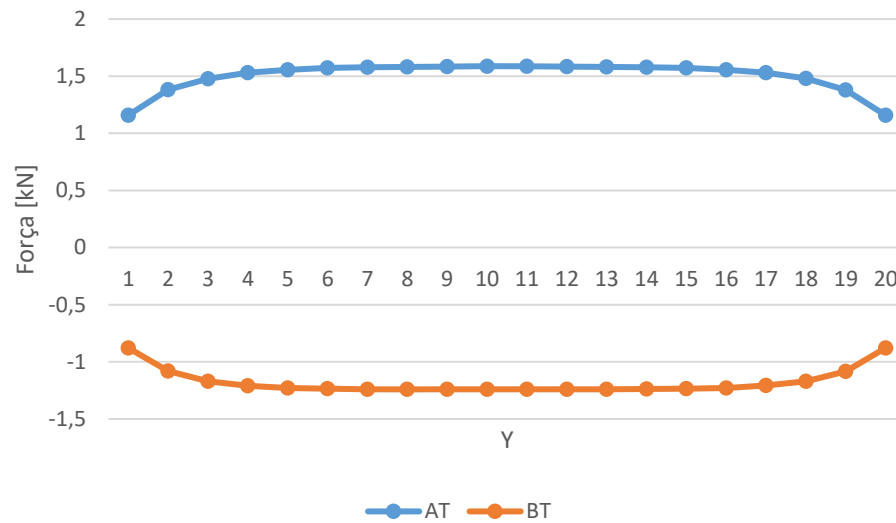


Fonte: Autor.

5.1.3 Análise detalhada no enrolamento (3D)

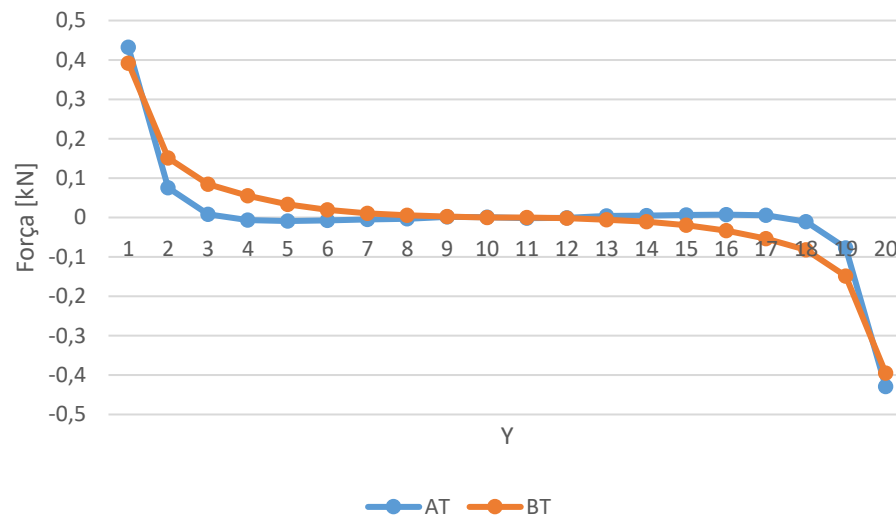
Agora que foi comprovado que o método de simulação representa, dentro dos 10% de erro estipulado, fielmente o transformador modelado, pode ser iniciado um estudo mais abrangente sobre o comportamento das forças radiais e axiais nos pontos específicos do enrolamento. Para tanto, é proposto em um primeiro momento o traçado das forças em cada bloco do enrolamento na direção axial (F_{X_Y}) da coluna $X=01$, delineando como as forças radiais e axiais se comportam nas respectivas alturas dos enrolamentos. A Figura 40 mostra o comportamento das forças radiais enquanto a Figura 41 mostra, nos mesmos blocos, a força axial.

Figura 40 – Forças radiais ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y)



Fonte: Autor.

Figura 41 – Forças axiais ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y)



Fonte: Autor.

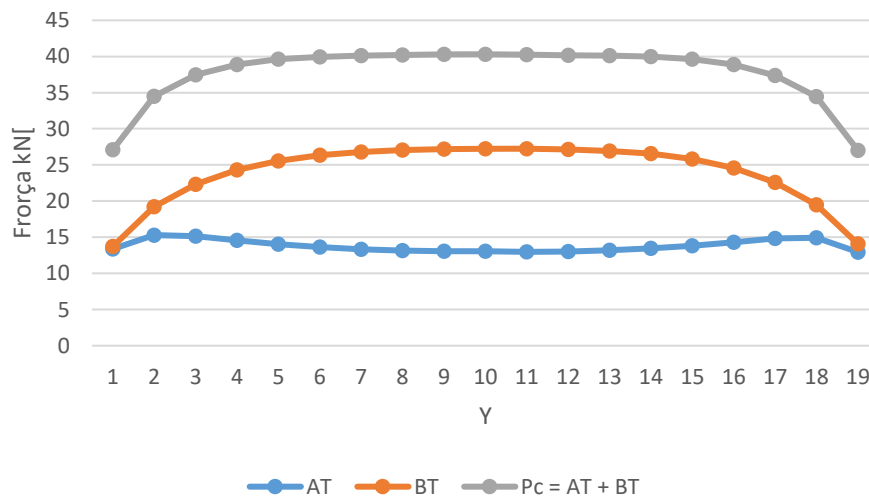
Pela análise da Figura 40, pode ser observado que as forças radiais nas cabeceiras dos enrolamentos (blocos superiores e inferiores) são menores que as dos blocos centrais. Para explicar tal constatação é necessário lembrar dois conceitos: o primeiro deles é que, no estudo da seção 3.2.2, mostrou-se que as forças radiais surgem devido ao fluxo disperso axial; o segundo conceito chave vem da análise das linhas de campo para o caso simulado, onde observa-se que a componente axial do fluxo magnético diminui nas cabeceiras, dando espaço para a componente radial tomar proporções maiores. A junção desses dois conceitos explica

porque as forças são menores nas cabeceiras dos enrolamentos, que se resume no fato de que o fluxo axial é menor nessa região.

Seguindo o mesmo princípio de análise, nota-se, pela Figura 41, que as forças axiais são grandes nas cabeceiras dos enrolamentos e quase nulas nos blocos centrais. Tal afirmação é explicada de forma complementar à explicação das forças radiais, uma vez que, se o fluxo axial diminui e o fluxo radial aumenta nas cabeceiras, e as forças axiais serão maiores por consequência. Além disso, observa-se que nos blocos inferiores, tanto da AT como da BT, a força axial é positiva, enquanto nos blocos superiores a força axial é negativa, caracterizando a compressão dos enrolamentos, já observada em outros momentos deste trabalho.

Como os enrolamentos são, fisicamente, condutores de metal, sabe-se que os esforços mecânicos na mesma direção se somam causando uma compressão maior no bloco seguinte. Nesse contexto, um gráfico mostrando essa característica para as forças axiais é apresentado na Figura 42, onde o valor de compressão P_c apresentado pelo Fabricante é o valor de compressão máxima destacado na figura e está presente entre a maioria dos condutores centrais, solicitando que os espaçadores suportem tal força.

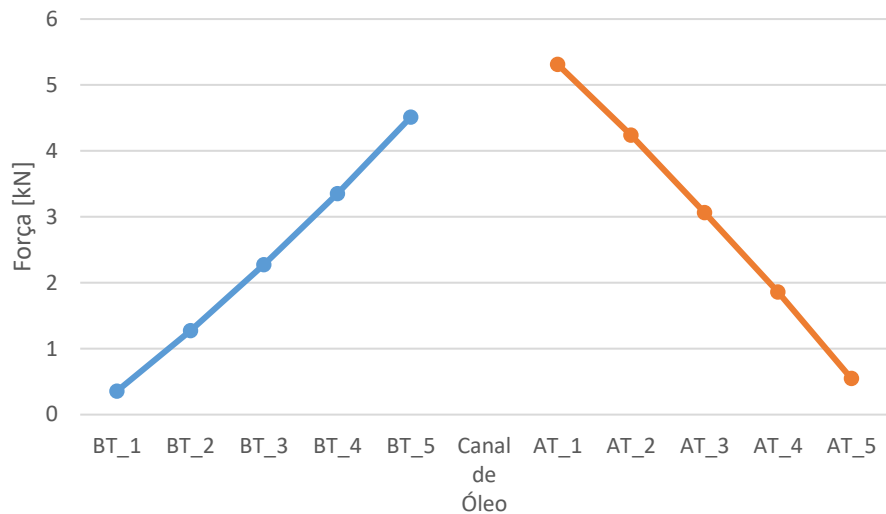
Figura 42 – Força de compressão ao longo da direção axial (parâmetro F_01_Y)



Fonte: Autor.

Após concluída a análise na direção axial, uma análise por uma perspectiva diferente pode ser desenvolvida, observando as forças nas camadas da direção radial (F_01_Z). Realiza-se, de modo similar aos gráficos já desenvolvidos, o traçado das forças radiais nas divisões ao longo do sentido radial, onde pode ser observado a linearidade do comportamento da força, conforme explicitado pela Figura 43.

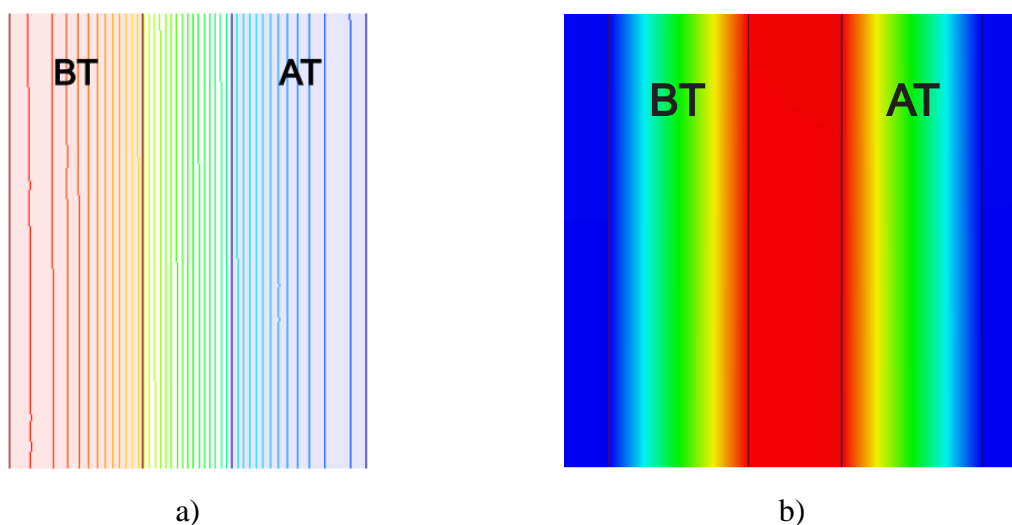
Figura 43 – Forças radiais ao longo da direção radial (parâmetro F_01_Z)



Fonte: Autor.

Pode ser observado o comportamento decrescente da força conforme as camadas ficam mais distantes da concentração de fluxo disperso no canal de óleo entre AT e BT, chegando próximo de 0 N nas camadas mais externas. De acordo com (MORADNOURI et al., 2015), a densidade de fluxo magnético é distribuída de forma que seja constante no canal de óleo e decrescente até zero ao percorrer os enrolamentos, caracterizando uma distribuição muito similar a da Figura 44, que mostra essa característica decrescente na densidade do fluxo. Uma vez que essa densidade está diretamente ligada com a força, a curva de distribuição de força ao longo da direção radial apresentada na Figura 43 está de acordo com a encontrada na literatura e discutida neste trabalho.

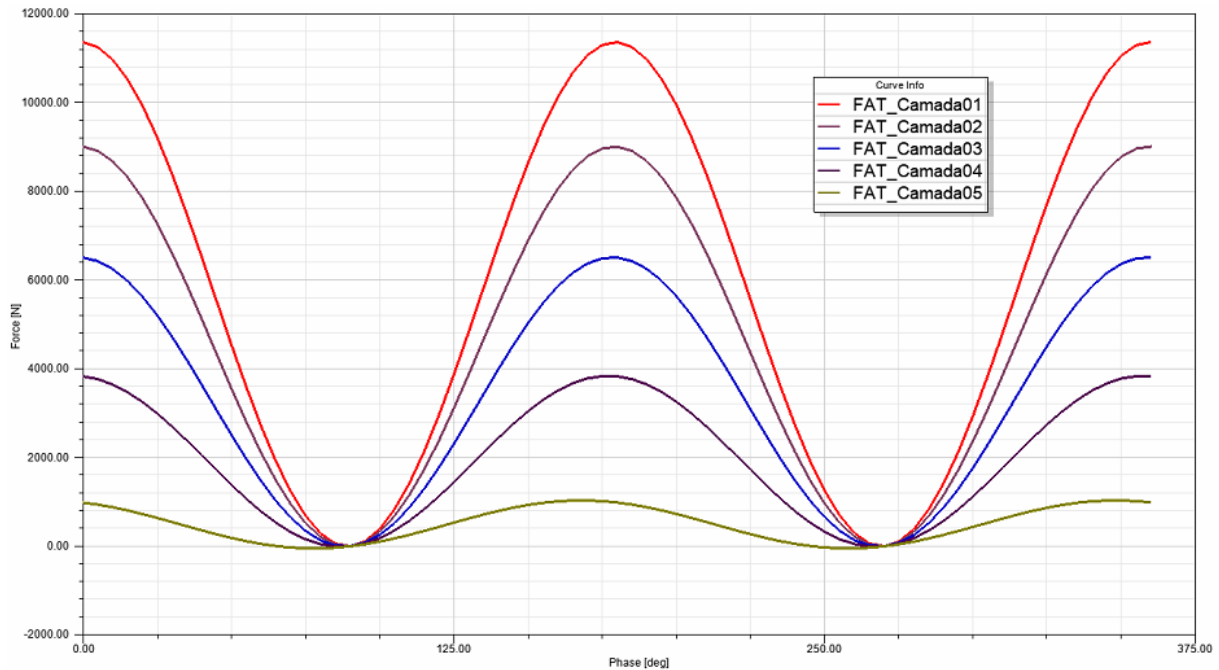
Figura 44 – Distribuição do fluxo magnético na direção radial dos enrolamentos



Fonte: Autor.

A Figura 45 mostra que a força nas camadas do enrolamento (F_{01_Z}) estão em fase, sendo que as camadas mais distantes do canal de óleo têm forças cada vez menores. A força radial total da coluna (F_{01}) será a soma das forças sobre cada camada, uma vez que as forças estão no mesmo sentido e, portanto, se somam.

Figura 45 – Forma de onda instantânea da força radial (parâmetro F_{X_Z})



Fonte: Autor.

5.2 SIMULAÇÃO 2D – PROFUNDIDADE

Conforme mencionado no início do capítulo 4, a simulação 3D completa de um transformador pode demandar um tempo computacional elevado para determinadas aplicações. Nesse sentido, algumas simplificações podem ser feitas de modo a diminuir o tempo de simulação e proporcionar mais velocidade na análise de determinados parâmetros, em troca de um resultado menos coerente com a realidade, porém satisfatoriamente próximo.

Uma simplificação difundida na literatura mostra que os transformadores podem ser modelados por apenas metade da fase central, conforme descrito na seção 4.1.2. Isso se confirma uma vez que o fluxo disperso entre os enrolamentos, principal causa das forças eletromagnéticas no caso de transformadores com bobinas de mesma altura, não sofre influência significativa das fases adjacentes. Essa observação pôde ser confirmada comparando as forças radiais e de compressão das três fases do modelo 3D trifásico com o modelo 3D monofásico, onde apresentaram valores muito próximos.

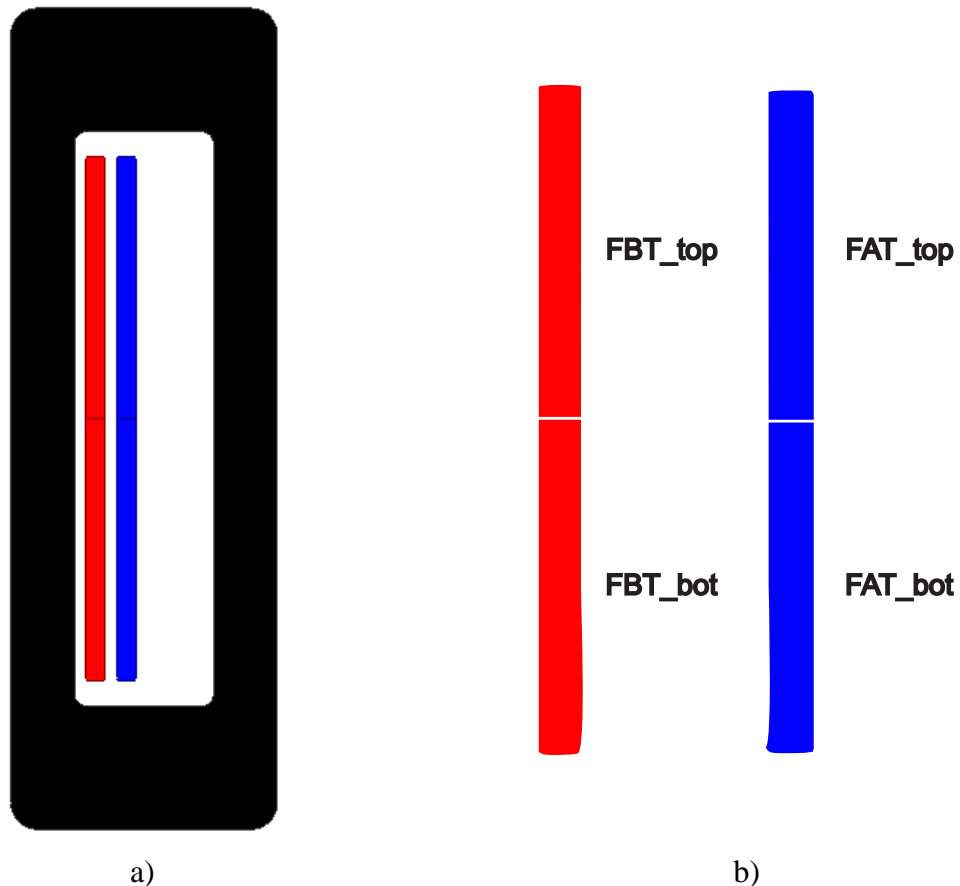
Nesse contexto, o transformador real pode ser simplificado por um modelo 2D monofásico que resultará, aproximadamente, nas mesmas forças simuladas do modelo completo. A fim de comprovação, nesta seção é proposta a simulação de um modelo 2D monofásico no modo de profundidade e posterior comparação dos resultados simulados com os resultados disponibilizados pelo Fabricante.

5.2.1 Modelagem e configuração de parâmetros

De forma muito similar à seção anterior, é necessário fazer a modelagem e criação de parâmetros para esse caso, porém, como o estudo detalhado já foi desenvolvido no modelo completo 3D, esta seção focará mais no sentido de comprovar a validade da simulação simplificada. Nesse sentido, para comprovar os resultados dessa simulação, é necessário fazer a comparação das forças com os apresentados na Tabela 1, tanto os valores radiais como nos valores de compressão.

Para esse estudo, os enrolamentos do transformador são modelados somente em dois blocos, um superior (top) e um inferior (bot), de modo que se criem parâmetros que possam disponibilizar o valor de compressão de cada enrolamento. A geometria simplificada 2D atribuída ao transformador modelado neste capítulo é apresentada na Figura 46 a), onde os parâmetros são nomeados conforme Figura 46 b).

Figura 46 – Geometria simplificada (2D)



Fonte: Autor.

5.2.2 Força radial (2D – Profundidade)

Após desenvolvida a simulação, é necessário comparar as forças radiais de forma a conferir a validade da simulação, porém, uma comparação direta não pode ser feita. O valor apresentado na Tabela 1 é a força radial total ao redor de todo o enrolamento, e o valor extraído da simulação 2D profundidade é dado em uma unidade de profundidade (1 metro), o que impede a comparação direta dos valores.

Nessas condições, para corretamente comparar o resultado simulacional com o resultado informado pela literatura, é necessário fazer a transformação de ambos os valores para a unidade N/mm, que não depende do diâmetro do enrolamento. Outra possibilidade é fazer a transformação do valor encontrado na simulação 2D profundidade para que represente a força na circunferência de cada enrolamento, essa transformação é feita multiplicando o valor em N/mm por $\pi \cdot D_m$, onde D_m é o diâmetro médio em milímetros de cada bobina. A Tabela 5 mostra os resultados disponibilizados pelo Fabricante, em kN e em N/mm, e os resultados simulados, em N/mm e em kN.

Tabela 5 – Força radial (modelo 2D – profundidade)

Bobina	Força Real (kN)	Força Real (N/mm)	Força Simulada (N/mm)	Força Simulada (kN)	Erro (%)
AT	1050,0	934,414	887,72	997,3	5
BT	770,1	934,414	892,96	736,0	4,44

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, os resultados simulacionais para a força radial tanto da bobina de alta tensão como de baixa tensão geraram porcentagens satisfatórias, ainda melhores que aquelas apresentadas para o modelo completo. Dessa forma é possível confirmar a funcionalidade da simulação simplificada, chegando em valores adequados para as forças radiais.

5.2.3 Força axial (2D – Profundidade)

Tal qual as forças radiais, as axiais de compressão também necessitam ser estudadas para conferir a funcionalidade da simulação 2D simplificada. Da mesma forma que anteriormente, a força de compressão deve ser trazida para N/mm a fim de comparação direta entre simulação e cálculo, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Força axial (modelo 2D – profundidade)

Bobina	Força Real (kN)	Força Real (N/mm)	Força Simulada (N/mm)	Força Simulada (kN)	Erro (%)
AT + BT	42,38	43,80	37,55	36,33	14,28

Fonte: Autor.

Dessa vez o erro entre o valor calculado e o valor simulado foi maior que os 10% de teto estipulado, o que traz dúvidas a respeito da simulação de forças axiais pelo modelo 2D profundidade, apesar da força radial ter retornado erro aceitável. Relembrando o modelo construtivo do transformador, a simulação 2D profundidade (Figura 21 a) não representa a característica real dos enrolamentos, mas sim uma aproximação com o intuito de aumentar a velocidade de processamento. Essa aproximação pode ser a variável responsável pelo erro elevado nas forças axiais, uma vez que na simulação 3D os valores encontrados foram compatíveis.

5.3 SIMULAÇÃO 2D – ABOUT Z

No sentido de encontrar uma simulação simplificada, com baixo tempo de processamento, que seja válida na análise das forças axiais, foi modelado o outro método de

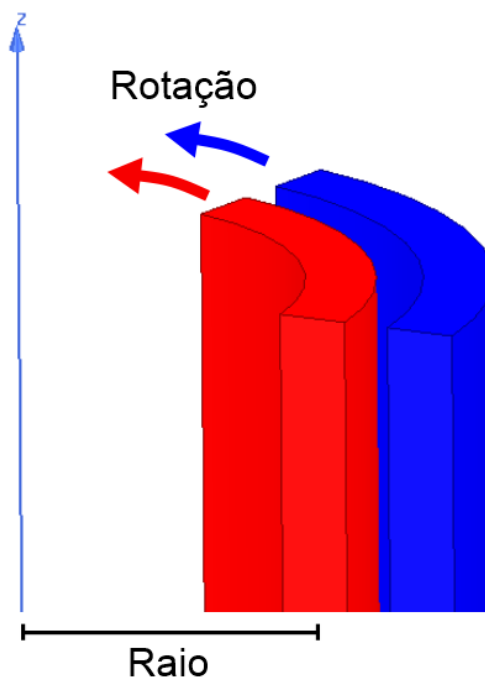
simulação em duas dimensões oferecido pelo Maxwell®, que faz a interpretação física do problema de maneira diferente, onde ao invés da simulação por profundidade unitária, o *software* realiza a simulação *About Z*, que chega mais próximo à característica construtiva do transformador, uma vez que trata os enrolamentos de forma circular (Figura 21 b).

5.3.1 Modelagem e configuração de parâmetros

A modelagem dessa simulação é feita exatamente da mesma forma que a modelagem da simulação 2D – profundidade, como apresentado pela Figura 46. A única grande diferença que aparece nesse tipo de simulação é na interpretação do valor de força apresentado na aba *Results*, uma vez que anteriormente a força era dada sobre uma profundidade e agora o *software* faz a rotação do modelo 2D no eixo Z, conseqüentemente alterando a interpretação dos resultados fornecidos pelo programa.

Outro ponto que deve ser levado em conta na criação desse modelo é a distância do centro do enrolamento até a origem do eixo z, uma vez que essa distância é o raio de giro que o *software* simula no *About Z* e portanto será o raio do enrolamento em questão, conforme Figura 47. Nesse sentido, é preciso fazer a modelagem geométrica de forma que os enrolamentos estejam localizados a uma distância tal que, após o giro ao redor de Z, tenham seu diâmetro igual ao valor do transformador real.

Figura 47 – Direção de giro (2D – *About Z*)

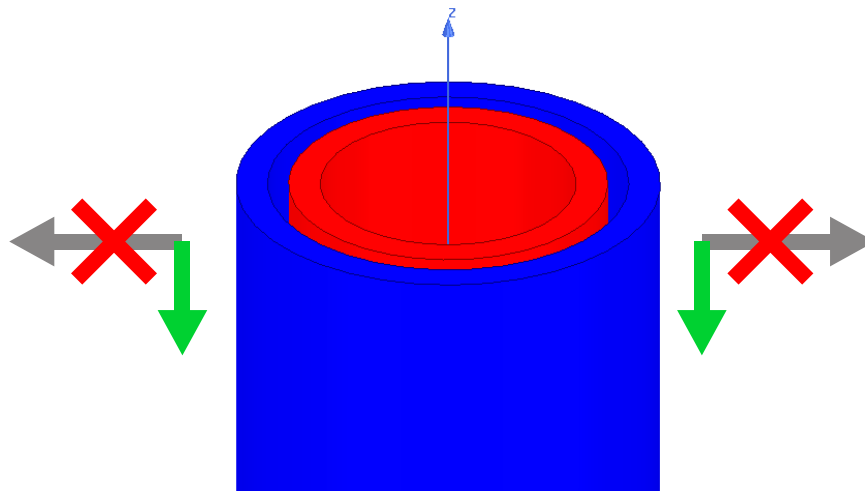


Fonte: Autor.

5.3.2 Força radial (2D – About Z)

A extração das força radial por esse método de simulação não pode ser feita pois, como o modelo 2D é rotacionado 360°, as forças na direção radial que apareceriam no parâmetro criado são anuladas com as forças espelhadas do outro lado do eixo Z, como ilustrado pela Figura 48. Na aba *Results* as forças na direção radial sequer aparecem como nulas, indicando que o *software* já interpreta previamente o espelhamento das forças nessa direção e não efetua cálculo algum, otimizando o tempo de processamento.

Figura 48 – Configuração das forças (2D – About Z)



a)

Parameter:	Fo_top	Type:	DC	Export Solution...
Pass:	2	Force Unit:	newton	
Freq:	50Hz			
	F(z)			
Total	-7596.3			

b)

Fonte: Autor.

5.3.3 Força axial (2D – About Z)

Diferentemente das forças radiais, as axiais não são anuladas pela rotação ao redor do eixo Z, ao invés disso, a força disponibilizada na aba *Results* será exatamente a força sobre a bobina total, uma vez que o diâmetro da rotação é ajustado para ser o diâmetro dos

enrolamentos. Dessa forma, pode ser feita uma comparação direta do valor disponibilizado na Tabela 1 com o valor apresentado na aba *Results*, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Força axial (modelo 2D – *About Z*)

Bobina	Força Real (kN)	Força Real (N/mm)	Força Simulada (N/mm)	Força Simulada (kN)	Erro (%)
AT + BT	42,38	43,80	36	37,21	15,05

Fonte: Autor.

Observa-se, novamente, que o erro calculado para as forças axiais é maior que os 10% estipulados como aceitáveis. Nesse sentido, as simulações do tipo *About Z* não podem ser utilizadas para a simulação da força axial, pois não apresentam resultados satisfatórios.

A inexatidão desse tipo de simulação para forças axiais, bem como as simulações em profundidade, se dá pela aproximação grosseira que necessariamente deve ser feita para possibilitar simulações em duas dimensões. Dessa forma, as simulações para estudos de força axial devem ser tridimensionais, já que são as que apresentaram erros dentro do limite aceitável.

6 CONCLUSÃO

Devido ao alto custo e importância dos transformadores no sistema elétrico de potência, associados com o crescente aumento dos níveis de curto-circuito devido ao aumento das cargas, as forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores, provindas de episódios de falta se tornaram cada vez mais danosas e preocupantes. Nesse sentido, assumindo a inviabilidade de ensaios reais de curto-circuito, o trabalho apresentou um método de análise de esforços eletromecânicos em transformadores empregando o método de elementos finitos.

O *software* de elementos finitos Maxwell[®] se mostrou uma ótima ferramenta para a solução de problemas da engenharia de diversas áreas. Com o Método de Elementos Finitos é possível construir e simular modelos de equipamentos sem necessitar a construção de protótipos ou realização de ensaios custosos para verificar seu funcionamento, gerando uma grande economia para as indústrias, principalmente na etapa de projeto.

Este trabalho teve um capítulo dedicado exclusivamente a descrever detalhadamente o processo de simulação em elementos finitos como um todo, desde a criação da geometria até a interpretação dos resultados. Todo esse processo foi feito baseando-se no *software* Maxwell[®], que se mostrou uma excelente ferramenta para o estudo de forças eletromagnéticas, uma vez que é possível desenvolver projetos em duas ou em três dimensões, representado de forma mais fiel a característica real dos transformadores.

Após estabelecida a rotina de simulação, um modelo de transformador foi simulado nas diferentes topologias construtivas, simplificadas ou não, de forma a validar o processo pré-estabelecido. Nesse trabalho foi possível confirmar a precisão das simulações 3D, já que apresentaram erros pequenos e aceitáveis em relação aos valores disponibilizados pelo fabricante. Esse tipo de simulação pode ser aplicado na indústria de forma a aprimorar o projeto de novos equipamentos e prever, com alguma segurança, o comportamento das forças eletromagnética em condições críticas.

Dentre as duas simulações simplificadas, alguns resultados obtiveram erros satisfatórios, já outros não chegaram a atingir esses mesmos critérios. As simulações em 2D – profundidade apresentaram bons resultados para o estudo das forças radiais e maus resultados no estudo das axiais. Analisando a geometria que o *software* simula por profundidade, pode ser facilmente observado que é uma aproximação grosseira do modelo 3D, que é a maior causa da discrepância entre o valor simulado das forças axiais e o valor disponibilizado pelo fabricante.

A simulação 2D – *About Z* foi desenvolvida de modo a alterar a aproximação grosseira observada anteriormente, porém, esse novo modo de simulação não trata a geometria

perfeitamente igual ao modelo 3D, e assim, novamente, resultados insatisfatórios para as forças axiais foram observados. Um breve estudo desenvolvido no decorrer deste trabalho mostrou que as forças radiais e axiais mudam devido à posição dentro do núcleo ou fora do núcleo, o que pode ser a explicação mais plausível para a simulação 3D ter apresentado erros baixos enquanto as 2D não.

De modo geral, o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, uma vez que a rotina de simulação proposta apresentou resultados satisfatórios nas simulações, mostrando que os valores encontrados pelo *software* são próximos aos valores reais calculados pelo fabricante. Em posse dos valores e disposições dessas forças eletromagnéticas nos casos críticos, é possível que este trabalho contribua com o projeto de transformadores no sentido de dimensionar corretamente suportes mecânicos, isoladores dielétricos e espaçadores que suportem até as forças nos casos mais críticos.

Para prosseguir o estudo das forças eletromagnéticas nos transformadores e aperfeiçoar os estudos desenvolvidos neste trabalho, alguns trabalhos futuros são propostos. Alguns destes são continuações diretas do estudo proposto neste trabalho e outros são novas linhas de pesquisa paralela no tópico forças eletromagnéticas.

- Estudo das forças eletromagnéticas axiais e radiais na perspectiva ao redor do enrolamento, viabilizando a interpretação do comportamento dentro e fora da janela do núcleo;
- Desenvolver a rotina de simulação e análise para outras topologias de transformadores, por exemplo em enrolamentos com taps superiores, centrais ou demais configurações existentes na indústria;
- Fazer a conexão entre a simulação de forças eletromagnéticas nos enrolamentos com um *software* de deformações mecânicas, permitindo aprimorar o estudo dos esforços suportados pela isolação e pelos suportes mecânicos;
- Estudar o comportamento das forças frente à diferentes níveis e disposição das correntes, como, por exemplo, correntes de *inrush* ou conexão de transformadores fora da sequência de fase.

REFERÊNCIAS

AHN, H. et al. Finite element modeling of power transformer for short-circuit electromagnetic force analysis. [s. l.], n. 4, p. 5–8, 2012.

ANSYS. **User's Guide - Maxwell 3D**. Cannonsburg.

ANSYS. **Help ANSYS Electronics**. 2019. Disponível em: <<https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/Electronics/v180/home.htm%23../Subsystems/Maxwell/Content/VirtualForce.htm%3FTocPath%3DMaxwell%7CMaxwell%2520Help%7CMaxwell%25203D%2520Technical%2520Notes%7CMagnetostatic%2520Field%2520C>>. Acesso em: 22 maio. 2019.

AZEVEDO, A. C. De. **Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos “passantes” e correntes de energização**. 2007. Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2007.

BALDIN. **Bobinas e Parte Ativa**. 2018. Disponível em: <<http://www.baldintransformadores.com.br/?pg=servicos&acao=ok&pg2=servico05>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

BARRA, P. H. A. **Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos: uma abordagem analítica e computacional**. 2017. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

BILLIG, E. Mechanical stresses in transformer windings. **British Electrical and Allied Industries Research Association**, [s. l.], p. 17, 1946.

BJERKAN, E. **High frequency modeling of power transformers**. 2005. Tese (Doutorado) - Norwegian University of Science and Technology, [s. l.], 2005.

FEIL, D. L. P. **Desenvolvimento de Transformador de Distribuição de Elevada Eficiência e Reduzida Relação Peso/Potência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

FILHO, F. D. A. **Avaliação da Formação e Migração do Sulfeto de Cobre em Papel Isolante Utilizado em Equipamentos Elétricos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2014.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. North Carolina: Mc Graw Hill, 1994.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. Florida: CRC Press, 2004.

HASEGAWA, R.; PRUESS, D. C. **Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution**. 2001. Power Engineering Society Summer Meeting. p. 1820-1823, [s. 1.], 2001.

IARONKA, O. **Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração de Elevada Eficiência com o Método de Elementos Finitos para Transformadores de Distribuição**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

IEC 60076-1. **IEC 60076-1: 2000: Power Transformers Part 1: General**. 2000. IEC International Electrotechnical Commission, [s. 1.], 2000.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2007.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering Design and Practise**. New York: Marcel Dekker, 2004.

MAURÍCIO, A. F. D. S. **Construção e Caracterização de um Transformador de 562,5 VA com Núcleo de Ferro Amorfo**. 2014. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2004.

MEDEIROS, L. H. **Desenvolvimento de um Programa Computacional para Análise Dielétrica de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa

Maria, Santa Maria, 2017.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

MORADNOURI, A. et al. Introduction of dimensional approach to evaluation of distribution transformer short circuit forces. **23rd Iranian Conference on Electrical Engineering**, [s. l.], p. 1539–1544, 2015.

MORAIS, D. R. **Ferramenta Inteligente para a Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NOGUEIRA, D. D. S.; ALVES, D. P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação de Tópicos Essenciais**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NUNES, A. A. **Uma Contribuição para Projeto de Transformadores Monofásicos de Média Tensão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

PORTELLA, M. D. G. **Avaliação da Presença de Indicadores de Oxidação do Papel Isolante Termoestabilizado em Equipamentos de Subestação**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PRONTO, A. M. G. **Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura**. 2010. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

RIBEIRO, C. F. et al. Contribuição ao Estudo e Aplicação de Transformadores de Distribuição no Sistema Elétrico da COELBA. **II Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica**, [s. l.], p. 117–123, 2003.

RIES, W. **Transformadores: Fundamentos para o Projeto e Cálculo**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

Romagnole Produtos Elétricos S.A. 2019. Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/produtos/transformadores-de-distribuicao/transformador-distribuicao-trifasico>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

ROSENTINO, A. J. P. J. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para Redes de Média Tensão**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SATHYA, A. M.; SAVADAMUTHU, U. Electromagnetic Force and Deformation in Transformer Winding. **International Journal of Applied Engineering Research**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 790–796, 2019.

SINHA, A.; KAUR, S. **Analysis of short circuit electromagnetic forces in transformer with asymmetrically placed windings using Finite Element Method**. 2017. [s. l.], 2017.

SOUZA, R. M. D. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003.

VIENA, L. B. **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferrorressonância**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

VILLATE, J. E. **Eletricidade e Magnetismo**. 1. ed. Porto: Creative Commons, 2012.

WATERS, M. The measurement and calculation of axial electromagnetic forces in concentric transformer windings. **British Electrical and Allied Industries Research Association**, [s. l.], n. 1587, p. 12, 1953.

WATERS, M. **The Short-Circuit Strength of Power Transformers**. 5. ed. London: Macdonald & Co., 1966.