



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

REGELII SUASSUNA DE ANDRADE FERREIRA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇAS  
ELETROMAGNÉTICAS NOS ENTREFERROS DE  
TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO**

Campina Grande, Paraíba.  
Dezembro de 2017

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇAS ELETROMAGNETICAS NOS  
ENTREFERROS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO

*Dissertação apresentada à Coordenadoria do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências  
do Programa de Mestrado em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

*Área de concentração: Processamento de energia*

*Regelii Suassuna de Andrade Ferreira*  
Orientanda

*Edson Guedes da Costa, D. Sc.*  
Orientador

*Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.*  
Orientador

Campina Grande, Paraíba.  
Dezembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- F383a      Ferreira, Regeli Suassuna de Andrade.  
Avaliação da influência das forças eletromagnéticas nos entreferros de transformadores de corrente de proteção / Regeli Suassuna de Andrade Ferreira. – Campina Grande, 2017.  
61 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Francisco das Chagas Fernandes Guerra".  
Referências.
1. Curto-Circuito. 2. Deformação. 3. Deslocamentos. 4. Eletromecânica. 5. Entreferros. 6. Força Eletromagnética. 7. Método dos Elementos Finitos. 8. Simulação Multifísica. 9. Transformador de Corrente de Proteção. I. Costa, Edson Guedes da. II. Guerra, Francisco das Chagas Fernandes. III. Título.

CDU 621.3.064.1(043)

**"AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS NOS  
ENTREFERROS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO"**

**REGELII SUASSUNA DE ANDRADE FERREIRA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/12/2017**



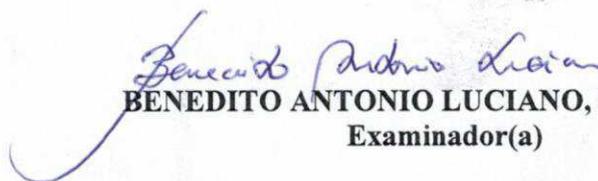
**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



**FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)



**BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFS**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*“Sempre parece impossível até que seja feito.”*

Nelson Mandela

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me dado a coragem para lidar com os desafios.

Agradeço aos meus pais por estarem presentes nos principais momentos da minha trajetória e por me incentivarem sempre na dedicação aos estudos.

Agradeço aos meus irmãos pela companhia, pelas risadas e por me escutarem, mesmo quando não me entendiam, agradeço a eles por estarem sempre de braços abertos para compartilhar dos meus sonhos.

Agradeço ao meu namorado, por acreditar que eu seria capaz, até quando eu duvidei, por me apoiar nas minhas dificuldades e por me ouvir.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Professor Edson Guedes da Costa e Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, por acreditarem neste trabalho e no meu potencial para desenvolvê-lo.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho Filipe Lucena e Professor Jalberth Fernandes de Araujo por terem me ajudado em cada uma das etapas no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todo o pessoal do Laboratório de Alta Tensão pelo auxílio nas pesquisas que desenvolvemos juntos, pela companhia e pelas conversas distraídas nos corredores.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Elétrica que me forneceram muito mais que os conhecimentos para minha formação.

Agradeço ao colega Luís Pereira pela disponibilidade para sanar dúvidas a respeito do *software COMSOL Multiphysics*<sup>®</sup>.

Agradeço à COPELE e ao CNPq pelo suporte na realização deste mestrado.

Por fim, agradeço aos meus amigos que se fazem presentes na minha vida, me apoiando no desenvolvimento deste sonho, em especial: Thales Albuquerque, Filipe Lucena, Jalberth Fernandes, Mariana Camurça, Ramon Dias, Felipe Fideles, Maria Juliana, Ilthon Lucas e Jéssica Suassuna.

# RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma avaliação da influência das forças eletromagnéticas nos entreferros de transformadores de corrente de proteção. A avaliação é desenvolvida a partir da verificação da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção, considerando os deslocamentos nos entreferros provocados pelas forças eletromagnéticas. Para tanto, foi avaliada a influência das forças eletromagnéticas no núcleo de transformadores de corrente com 8 mm, 16 mm e 24 mm, de comprimento efetivo do entreferro e em seguida, com diferentes distribuições de entreferros no núcleo. A partir do desenvolvimento de simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos, foi possível determinar as forças eletromagnéticas e os deslocamentos nos entreferros. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que as forças eletromagnéticas que atuam nos entreferros de transformadores de corrente de proteção, em condições de regime permanente e curto-circuito, não influenciam a resposta do transformador de corrente para nenhum dos casos avaliados.

Palavras-chave: Curto-circuito, deformação, deslocamentos, eletromecânica, entreferros, força eletromagnética, método dos elementos finitos, simulação multifísica, transformador de corrente de proteção.

# ABSTRACT

The evaluation of the influence of electromagnetic forces in the gaps of protective current transformers is presented in this work. The evaluation is developed from the verification of the transient response of protective current transformers, considering the displacements in the gaps caused by the electromagnetic forces. Therefore, it was evaluated the influence of the electromagnetic forces for protective current transformers with 8 mm, 16 mm and 24 mm gap length, and then, with different gap distributions in the core. The development of computational simulations based on the Finite Element Method, made it possible to determine the electromagnetic forces and the displacements in the gaps. According to the results obtained in this research, it was concluded that the electromagnetic forces acting on the protective current transformer gaps, under conditions of permanent regime and short circuit, do not influence the current transformer response for any of the cases evaluated.

Keywords: Deformation, displacement, electromagnetic force, electromechanics, finite element method, gaps, multiphysics simulation, protective current transformer, short circuit.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhes de um TC de 245 kV.....	1
Figura 2 - Circuito elétrico equivalente para um TC.....	7
Figura 3 - Representação do sistema primário para estudo em regime transitório.....	7
Figura 4 - Circuito elétrico equivalente para estudo de TC com entreferro.....	8
Figura 5 - Forma de onda típica de uma corrente de curto-circuito. ....	14
Figura 6 - Diagrama de blocos dos procedimentos para desenvolvimento da metodologia. ....	30
Figura 7 - Corrente primária utilizada como entrada para o TC de proteção.....	33
Figura 8 - Laço de histerese para o núcleo ferromagnético do TC de proteção.....	33
Figura 9 - Resposta para os TC de proteção com entreferros de comprimento efetivo (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm. ....	34
Figura 10 - Modelo gráfico geral em 3D para o TC de proteção com dois entreferros. ....	36
Figura 11 - Corte transversal do modelo gráfico para TC de proteção com comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm.....	36
Figura 12 - Corte transversal do modelo gráfico para TC de proteção com comprimento total do entreferro de 16 mm e com as variações a quantidade de entreferros de: (a) um entreferro e (b) quatro entreferros.....	37
Figura 13 - Contribuições de forças eletromagnéticas no entreferro do TC de proteção com 8 mm de entreferro. ....	41
Figura 14 - Contribuições das forças eletromagnéticas por unidade de área no entreferro do TC de proteção com dois entreferros e comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm. ....	42
Figura 15 - Deslocamento nos entreferros do TC de proteção com 8 mm de entreferro. ....	44
Figura 16 - Deslocamento nos entreferros do TC de proteção com dois entreferros e comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm. ....	45
Figura 17 - Resposta do TC de proteção com dois entreferros e comprimento do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm, considerando os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas.....	48
Figura 18 - Contribuições de forças eletromagnéticas no entreferro do TC de proteção para (a) um entreferro, (b) quatro entreferros forças no eixo y e (c) quatro entreferros forças no eixo x, para um comprimento total do entreferro de 16 mm. ....	50
Figura 19 - Deslocamento nos entreferros do TC de proteção com (a) um entreferro, (b) quatro entreferros deslocamento no eixo y e (c) quatro entreferros deslocamento no eixo x.....	52
Figura 20 - Resposta do TC de proteção com (a) um e (b) quatro entreferros e comprimento do entreferro de 16 mm, considerando os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuições das pesquisas.....	29
Tabela 2 - Características do sistema conectado ao primário do TC.....	31
Tabela 3 - Constantes do modelo de Jiles-Atherton.....	31
Tabela 4 - Características construtivas do TC modelado.....	32
Tabela 5 - Propriedades físicas dos materiais utilizados.....	38

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	viii
1 Introdução .....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Estrutura do trabalho.....	4
2 Fundamentação Teórica.....	6
2.1 Resposta do transformadores de corrente de proteção.....	6
2.2 Modelo de histerese Jiles-Atherton.....	10
2.3 Corrente de curto-circuito.....	13
2.4 Forças eletromagnéticas.....	15
2.5 Deformações Mecânicas .....	16
2.6 Método dos elementos finitos .....	17
3 Revisão Bibliográfica.....	19
4 Metodologia .....	30
5 Resultados .....	40
5.1 Transformadores de corrente com 8, 16 e 24 mm de entreferro.....	40
5.1.1Forças eletromagnéticas em TC de proteção com dois entreferros .....	40
5.1.2Deslocamentos nos entreferros em TC de proteção com dois entreferros.....	44
5.1.3Nova resposta para TC de proteção com dois entreferros .....	48
5.2 Transformadores de corrente com um, dois e quatro entreferros .....	49
5.2.1Forças eletromagnéticas em TC de proteção com um e quatro entreferro .....	50
5.2.2Deslocamentos nos entreferros em TC de proteção com um e quatro entreferros .....	52
5.2.3Nova resposta para TC de proteção com um e quatro entreferros .....	54
6 Conclusão.....	56
Trabalhos Futuros .....	57
Referências .....	58
ANEXO .....	61

# 1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de corrente (TC) são equipamentos essenciais nos sistemas elétricos. Eles têm como principal função reproduzir com exatidão a corrente de um circuito de entrada (corrente primária) para um circuito de saída. Os circuitos instalados na saída do TC, que recebem como entrada a corrente secundária, são formados por instrumentos de medição, proteção e controle do sistema. Os instrumentos instalados no secundário devem receber a corrente suficientemente reduzida e isolada do circuito primário. Para melhor visualização dos aspectos de um TC, na Figura 1 são apresentados alguns detalhes construtivos para um TC de 245 kV.

Figura 1 - Detalhes de um TC de 245 kV.



Fonte: Adaptado de Catálogo ARTECHE Transformadores de Corrente.

Para que o TC desempenhe a sua função de forma adequada, a corrente secundária deve ter a mesma forma de onda da corrente primária. Apesar de terem a mesma forma de onda, a amplitude da corrente secundária é uma proporção reduzida da corrente primária do TC.

Nos projetos dos TC, a amplitude da corrente secundária não deve ultrapassar os valores de 1 A, 2 A ou 5 A, em regime permanente (NBR 6856, 2015). Isso é válido para

as duas aplicações de TC existentes, tanto para os TC aplicados na medição (TC de medição), quanto para os aplicados na proteção (TC de proteção). Contudo, para situações em que ocorre um evento transitório, as considerações que são utilizadas no projeto dos TC dependem da sua aplicação.

Normalmente, os TC de medição são projetados para que seu núcleo venha a saturar com valores até 5 vezes a corrente nominal do TC, oferecendo proteção aos instrumentos de medição conectados ao seu secundário. Com isso, os TC de medição não são estudados em situações transitórias.

Ao contrário dos TC de medição, os TC de proteção são projetados para operar principalmente em regime transitório, de forma a garantir que instrumentos instalados em seu secundário operem adequadamente quando da ocorrência de sobrecorrentes. Para que os instrumentos operem adequadamente, o TC de proteção é projetado de modo que seu núcleo ferromagnético não sature, garantindo uma melhor reprodução da corrente primária. Para que não ocorra saturação do núcleo em regime permanente, os TC de proteção são projetados para operar com fatores de sobrecorrente<sup>1</sup> de até 20 vezes a sua corrente nominal. No entanto, o fator de sobrecorrente não impede a saturação do núcleo em regime transitório. A saturação do núcleo ferromagnético em regime transitório pode ocasionar o surgimento de distorções na corrente secundária, o que resultará em erros na resposta dos instrumentos de proteção. Um fator que pode agravar o nível de saturação do núcleo ferromagnético é a presença de fluxo residual no núcleo quando ocorrer interrupção da sobrecorrente. Nesse caso, o fluxo residual presente no núcleo pode levar a níveis mais intensos de saturação na ocorrência de novas sobrecorrentes.

Para minimização da ocorrência da saturação e para redução do fluxo residual no núcleo ferromagnético, uma das soluções que pode ser aplicada é o desenvolvimento de um projeto que contemple a introdução de entreferros ao núcleo ferromagnético do TC de proteção. Com relação à presença de entreferros em seu núcleo, os TC de proteção podem ser classificados em dois tipos principais: TC de proteção classe P (proteção), que é desenvolvido para proteção em condições de regime permanente; e TC de proteção classe TP (*transient performance* - desempenho transitório), que é desenvolvido para proteção em condições transitórias.

---

<sup>1</sup> O fator de sobrecorrente é a relação entre a corrente simétrica máxima à qual o TC de proteção pode ser submetido e a corrente primária nominal (NBR 6856:2015). Usualmente, o fator de sobrecorrente é igual a 20. Um fator de sobrecorrente é aplicado para que o núcleo do TC não sature em regime permanente.

A principal diferença entre as classes dos TC de proteção é quanto à presença de entreferros em seu núcleo. Os TC de proteção de classe P não são projetados com entreferros em seu núcleo, enquanto os TC de proteção de classe TP são projetados com um ou mais entreferros em seu núcleo. Os TC de proteção de classe TP, são ainda subdivididos em duas outras classes: TPY e TPZ (IEC 60044/2003). O TC de proteção de classe TPY possui um pequeno entreferro, que garante a redução do fluxo residual para 10% do fluxo residual em relação ao núcleo fechado. Já o TC de proteção de classe TPZ, é projetado com um entreferro de tamanho maior, em relação ao entreferro da classe TPY, ou vários pequenos entreferros. O projeto do TPZ com um tamanho de entreferro maior possibilita um fluxo residual no núcleo desprezível, quando comparado ao fluxo residual de um TC de classe P.

Apesar de possuir fluxo residual desprezível e minimização dos níveis de saturação, características desvantajosas à utilização do TC de proteção com entreferros podem ser destacadas. Segundo Vanderleck e outros (1976) e Bozoki e outros (1990), algumas das desvantagens dos TC de proteção com entreferro são: aumento da corrente de excitação; ocorrência de corrente de subsidência<sup>2</sup> no secundário e fragilidade mecânica do núcleo ferromagnético. As desvantagens impactam nos erros de relação de transformação do TC, influenciando principalmente a resposta do TC de proteção.

Para contornar desvantagens tais como o aumento dos erros de relação, diversos estudos na literatura discutem diferentes técnicas de correção para a corrente secundária do TC, algumas técnicas são apresentadas nos trabalhos de Santos (2011), Shi e outros (2013) e Pereira e outros (2014 e 2016). Entretanto, não existem estudos que constatem a fragilidade mecânica em TC com entreferros. Para verificar se o TC de proteção com entreferros é mecanicamente mais frágil, é necessário avaliar as forças eletromagnéticas ocasionadas pelas elevadas correntes transitórias. Uma das principais correntes transitórias é a corrente de curto-circuito. Devido às elevadas solicitações de corrente dos curtos-circuitos, eles são também responsáveis pelas piores solicitações mecânicas.

É sabido que a resposta do TC é diretamente influenciada pelo comprimento efetivo do entreferro. Sendo assim, as elevadas forças eletromagnéticas ocasionadas por sobrecorrentes transitórias podem provocar deslocamentos nos entreferros de maneira a alterar seu comprimento efetivo. Para estudar a fragilidade mecânica em TC de proteção, neste trabalho é avaliada a influência das forças eletromagnéticas nos entreferros, para

---

<sup>2</sup> Corrente de subsidência é a corrente no secundário do TC de proteção após a interrupção da corrente primária.

tanto, são verificados os deslocamentos causados pelas forças eletromagnéticas em condições de curto-circuito na resposta dos TC. A partir da avaliação das forças eletromagnéticas, é possível determinar se o TC de proteção é mecanicamente frágil.

Para atingir os resultados e determinar se as forças influenciam a resposta do TC de proteção com entreferros é proposta a utilização de simulações computacionais empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Dadas as dificuldades e os altos custos associados à implementação de estudos mecânicos em TC de proteção, e a necessidade de ensaios destrutivos, tem-se verificado que o MEF é uma ferramenta adequada para prever o comportamento do TC de proteção sob condições de regime permanente e curto-circuito.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência das forças eletromagnéticas na resposta transitória do TC de proteção com entreferros. Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos devem ser realizados:

- i. Determinar as forças eletromagnéticas nos entreferros do TC de proteção para a condição de curto-circuito;
- ii. Determinar os deslocamentos nos entreferros do TC de proteção a partir das forças eletromagnéticas verificadas;
- iii. Obter a resposta para o TC de proteção considerando os deslocamentos;
- iv. Determinar se os deslocamentos influenciaram a resposta do TC de proteção.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em sete capítulos organizados conforme é apresentado nos parágrafos seguintes.

No capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre: resposta do TC de proteção; modelo de Jiles-Atherton; corrente de curto-circuito, forças eletromagnéticas, deformações mecânicas e método dos elementos finitos.

No capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica sobre as principais pesquisas que relatam estudos sobre resposta transitória, problemas mecânicos e simulações computacionais para TC de proteção.

No capítulo 4 é descrita a metodologia empregada para alcançar o objetivo deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentadas as análises e discussões acerca dos resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos e perspectivas de trabalhos futuros sobre o tema.

Em seguida, são apresentadas as referências utilizadas para desenvolvimento deste trabalho.

Em anexo, são apresentados os artigos relacionados a esta pesquisa que foram publicados e submetidos para publicação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento da metodologia e análise dos resultados obtidos. Os conceitos fundamentais discutidos são: resposta do TC de proteção; modelo de Jiles-Atherton; corrente de curto-circuito, forças eletromagnéticas e deformações mecânicas.

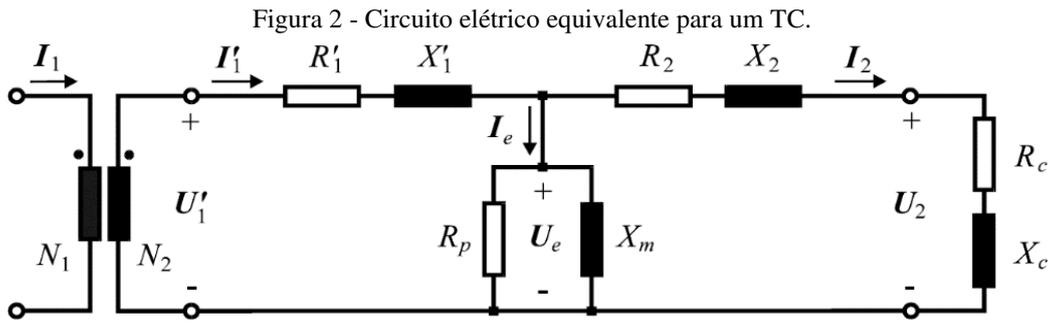
### 2.1 RESPOSTA DO TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO

Os TC de proteção são equipamentos desenvolvidos para transformar as elevadas correntes dos sistemas de potência em valores adequados para alimentar instrumentos de proteção. Eles são projetados para operar principalmente em condições transitórias, de forma a garantir que instrumentos instalados em seu secundário operem adequadamente quando da ocorrência de sobrecorrentes.

As sobrecorrentes típicas do sistema elétrico possuem duas componentes: uma senoidal e uma não pulsante com decaimento exponencial. Devido à sua assimetria, a componente não pulsante da sobrecorrente pode direcionar o núcleo do TC a um elevado grau de saturação.

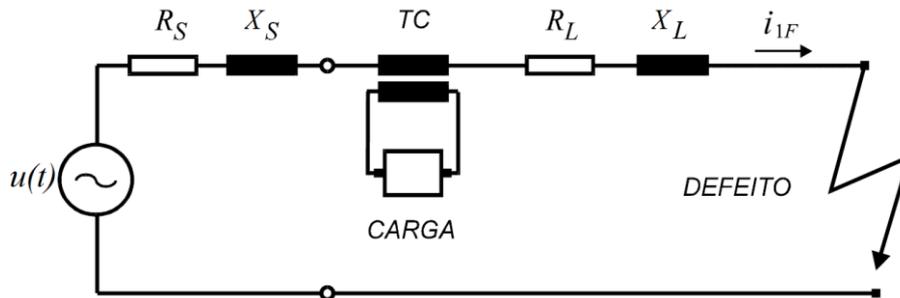
A saturação do núcleo pode provocar distorções na forma de onda da corrente secundária. Com a corrente secundária distorcida, os relés de proteção podem atuar de forma incorreta e o sistema elétrico pode ser desligado indevidamente (IEEE PSRC, 1976). Para evitar atuações indevidas do sistema de proteção, que podem ser ocasionados por uma corrente secundária distorcida, é necessário projetar a resposta do TC de proteção de modo a evitar que o núcleo ferromagnético sature.

O projeto adequado da resposta transitória de um TC de proteção é realizado por meio da análise dos circuitos elétricos equivalentes do TC e do sistema elétrico conectado ao primário do TC e da característica não linear do núcleo do TC. Na Figura 2 e na Figura 3 são apresentadas as representações dos circuitos elétricos equivalentes do TC de proteção e do sistema elétrico conectado ao primário do TC, respectivamente.



Fonte: Adaptado de GUERRA, 2007.

Figura 3 - Representação do sistema primário para estudo em regime transitório.



Fonte: Adaptado de GUERRA, 2007.

Na representação da Figura 2, todos os elementos estão referidos ao secundário do TC:  $R'_1$  e  $X'_1$  são, respectivamente, a resistência e reatância de dispersão do enrolamento primário;  $R_2$  e  $X_2$  são a resistência e reatância de dispersão do enrolamento secundário;  $R_p$  é a resistência representativa das perdas do núcleo;  $X_m$  a reatância de magnetização do núcleo;  $R_c$  e  $X_c$  são a resistência e a reatância da carga conectada ao secundário;  $N_1$  é o número de voltas do enrolamento primário; e  $N_2$  é o número de voltas do enrolamento secundário.

Na Figura 3 estão apresentados: a resistência ( $R_S$ ) e a reatância ( $X_S$ ) equivalentes da barra a qual a fonte de tensão é conectada,  $u(t)$ ; a resistência ( $R_L$ ) e reatância ( $X_L$ ) da linha de transmissão na qual o TC é conectado; a corrente de defeito ( $i_F$ ) representando a característica transitória da resposta do TC; e a fonte de tensão  $u(t)$  que pode ser representada pela expressão (1).

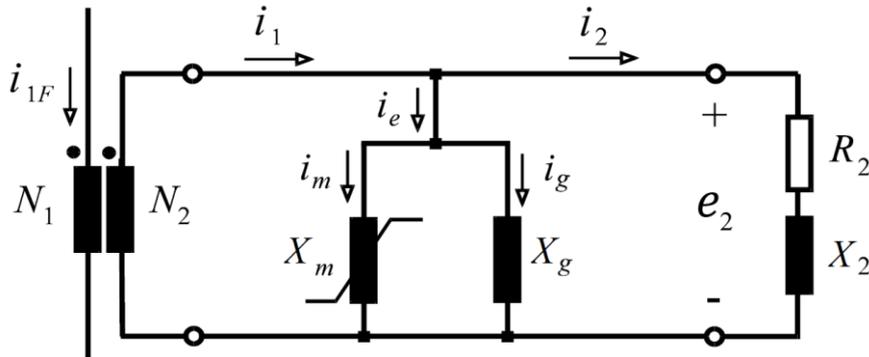
$$u(t) = U_m \text{sen}(\omega t + \theta), \quad (1)$$

em que  $U_m$  é o valor de pico da tensão da fonte de alimentação;  $\omega$  é a frequência angular de operação da fonte ( $\omega = 2\pi f$ ); e  $\theta$  é o ângulo inicial da tensão.

Ademais, para que os efeitos do entreferro possam ser considerados na resposta do TC, o circuito elétrico apresentado na Figura 2 deve ser modificado para incluir a reatância do entreferro.

Para tanto, a reatância ( $X_g$ ) é adicionada em paralelo à reatância de magnetização do núcleo ( $X_m$ ) para representar o entreferro, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Circuito elétrico equivalente para estudo de TC com entreferro.



Fonte: Adaptado de SLEMON, 1974.

Para calcular a reatância do entreferro,  $X_g$ , a expressão (5) pode ser obtida a partir do desenvolvimento a seguir (SLEMON, 1974).

$$X_g = 2\pi f L_g, \quad (2)$$

em que

$$L_g = \frac{N_2^2 \mu A}{x} \quad (3)$$

e

$$\omega = 2\pi f, \quad (4)$$

logo

$$X_g = \omega \mu \frac{N_2^2 A}{x}. \quad (5)$$

Nas expressões apresentadas, têm-se que  $L_g$  é a indutância representativa do entreferro, adicionada em paralelo à indutância de magnetização no circuito elétrico equivalente do TC com entreferro,  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material utilizado para preencher o entreferro;  $x$  é o comprimento médio do entreferro, ou a soma dos comprimentos médios no caso de TC com mais de um entreferro; e  $A$  é a área de seção transversal do núcleo ferromagnético.

Após o cálculo de  $X_g$  e analisando o circuito apresentado na Figura 3, as seguintes expressões podem ser obtidas para a tensão do secundário ( $e_2$ ).

$$e_2 = \frac{d\lambda}{dt}, \quad (6)$$

em que 
$$\frac{d\lambda}{dt} = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

e 
$$\frac{d\phi}{dt} = A \frac{dB}{dt}, \quad (8)$$

ou seja, 
$$e_2 = N_2 A \frac{dB}{dt}. \quad (9)$$

A tensão  $e_2$  também pode ser descrita pela expressão em (10).

$$e_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (10)$$

Então, 
$$N_2 A \frac{dB}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (11)$$

Para determinar a indução magnética ( $B$ ), que se apresenta na expressão (11), é necessário considerar também outras características do núcleo ferromagnético, tais como, intensidade de campo magnético ( $H$ ) e magnetização ( $M$ ). A relação entre indução magnética, campo magnético e magnetização é dada pela expressão (12). Além disso, a lei de Ampère, expressa por (13) e desenvolvida em (14), deve ser utilizada para determinação das características do núcleo ferromagnético.

$$B = \mu(H + M), \quad (12)$$

$$Hl + \frac{B}{\mu} x = \mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2 \text{ (Lei de Ampère)}, \quad (13)$$

$$Hl + \frac{B}{\mu} x = N_1 i_1 - N_2 i_2, \quad (14)$$

em que  $\mathcal{F}_1$  é a força magnetomotriz do primário (efeito magnetizante),  $\mathcal{F}_2$  é a força magnetomotriz do secundário (efeito desmagnetizante),  $l$  é o comprimento médio do núcleo ferromagnético,  $i_1$  e  $i_2$  são as correntes primária e secundária respectivamente.

Após algumas manipulações e combinações das equações, (12), (13) e (14), é possível obter as equações (15), (16), (17) e (18).

$$\frac{dH}{dB} = \frac{1}{\mu(1 + dM/dH)}, \quad (15)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} i_1 - \frac{1}{N_2} H - \frac{x}{\mu N_2} B \right) + L_2 \frac{N_1}{N_2} \frac{di_1}{dt}}{N_2 A + \frac{L_2}{N_2} \left( l \frac{dH}{dB} + \frac{x}{\mu} \right)}, \quad (16)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dH}{dB} \frac{dB}{dt}, \quad (17)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\mu} \frac{dB}{dt} - \frac{dH}{dt}. \quad (18)$$

Para que o sistema de equações representado pelas expressões em (15), (16), (17) e (18) possa ser solucionado, é necessário conhecer a relação entre as grandezas  $B$  e  $H$ . A relação caracteriza o fenômeno de histerese dos materiais ferromagnéticos e ela pode ser obtida utilizando o modelo proposto por Jiles e Atherton (1986). O modelo está apresentado na seção a seguir.

## 2.2 MODELO DE HISTERESE JILES-ATHERTON

O modelo de Jiles-Atherton consiste na modelagem matemática do fenômeno da histerese apresentada em materiais ferromagnéticos. Para o desenvolvimento de seu modelo, Jiles e Atherton tiveram como base os estudos sobre ferromagnetismo desenvolvidos por Maxwell, que tratam da interação mútua entre os domínios ferromagnéticos; os estudos de Weidemann acerca dos dipolos magnéticos moleculares; o trabalho de Ewing sobre a interação mútua entre momentos magnéticos; o trabalho de Langevin, que trata da teoria magnética do paramagnetismo; e também, os estudos de

Weiss, que estudou a interação entre os domínios magnéticos e o conceito de campo magnético efetivo (JILES, ATHERTON, 1983).

A partir dos estudos citados, Jiles e Atherton desenvolveram seu trabalho estudando os movimentos de flexão e translação das paredes dos domínios magnéticos encontrados nos materiais magnéticos (JILES, ATHERTON, 1986). O modelo Jiles e Atherton foi desenvolvido para materiais isotrópicos. No entanto, tem-se estudado formas para que o modelo de Jiles-Atherton possa ser aplicável a materiais anisotrópicos a partir de sua versão vetorial (PINHEIROS, 2016).

Para desenvolvimento de seu modelo, Jiles e Atherton consideraram uma distribuição uniforme dos domínios no material ferromagnético. A consideração foi feita sem contemplar as imperfeições, ou impurezas, que o material pudesse ter (JILES, ATHERTON, 1986). Além da consideração, eles constataram uma relação entre a magnetização ( $M$ ) e a intensidade de campo magnético ( $H$ ). A relação está representada na expressão (19) (ANNAKAGE *et al.*, 2000):

$$M = M_s \cdot f(H_e), \quad (19)$$

em que  $H_e = H + \alpha M$  é o campo magnético efetivo,  $\alpha$  é a constante de interações entre domínios e  $M_s$  é a magnetização do ponto em que o material satura.

A magnetização ( $M$ ) possui duas componentes:  $M_i$  e  $M_r$ . A relação entre elas é dada pela expressão (20) (ANNAKAGE *et al.*, 2000).

$$M = M_r + M_i. \quad (20)$$

A componente  $M_r$  representa a magnetização reversível que ocorre devido à flexão das paredes dos domínios e interações reversíveis dos momentos magnéticos. Enquanto a componente  $M_i$  representa a magnetização irreversível que ocorre devido ao movimento de translação das paredes dos domínios. A magnetização irreversível está relacionada à energia dos processos irreversíveis, tais como os deslocamentos através de ancoragem e as rotações irreversíveis dos domínios. A energia utilizada pelos processos irreversíveis constitui as perdas por histerese.

Também foi estabelecido, nos estudos de Jiles e Atherton que para flexões moderadas, a componente de magnetização reversível ( $M_r$ ) varia linearmente com a diferença entre a magnetização anisterética ( $M_a$ ) e a magnetização irreversível ( $M_i$ ),

conforme apresentado na expressão (21). Na expressão (21),  $c$  é a constante adimensional de flexão das paredes dos domínios.

$$M_r = c(M_a - M_i). \quad (21)$$

A partir das expressões (19), (20) e (21), os autores conseguiram determinar uma expressão para calcular a susceptibilidade magnética diferencial  $\left(\frac{dM}{dH}\right)$ . A expressão desenvolvida está representada (22), em que o parâmetro  $\alpha$  [A/m] está relacionado aos momentos dos domínios magnéticos.

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1 - c) \frac{dM_i}{dH_e} + c \frac{dM_a}{dH_e}}{1 - \alpha c \frac{dM_a}{dH_e} - \alpha(1 - c) \frac{dM_i}{dH_e}}. \quad (22)$$

A susceptibilidade magnética representada pela expressão (22) pode assumir valores negativos, deixando-as sem ter sentido físico. Os autores acrescentaram, então, uma nova formulação para a expressão (22), dada pelas expressões (23) e (24) (JILES *et al.*, 1992).

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1 - c) \frac{dM_i}{dH_e} + c \frac{dM_a}{dH_e}}{1 - \alpha c \frac{dM_a}{dH_e} - \alpha(1 - c) \frac{dM_i}{dH_e}}, \quad \delta(M_a - M) \geq 0 \quad (23)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{c \frac{dM_a}{dH_e}}{1 - \alpha c \frac{dM_a}{dH_e}}, \quad \delta(M_a - M) < 0, \quad (24)$$

em que  $\delta$  é o coeficiente auxiliar para indicação da trajetória de  $\left(\frac{dH}{dt}\right)$ , ou seja, para  $\delta = -1$  e  $\frac{dH}{dt} < 0$  a trajetória é considerada descendente e para  $\delta = +1$  e  $\frac{dH}{dt} \geq 0$  a trajetória é considerada ascendente (JILES *et al.*, 1992).

Portanto, com  $\frac{dM}{dH}$  pode ser construída a curva chamada anisterética, que relaciona a magnetização ( $M$ ) com a intensidade de campo magnético ( $H$ ). Com a curva, a característica não linear do núcleo pode ser representada.

Em alguns casos, quando a intensidade de campo magnético ( $H$ ) não é conhecida, o modelo inverso de Jiles-Atherton pode ser empregado. O modelo inverso de Jiles-Atherton (SADOWSKI *et al.*, 2002) pode ser usado para resolução de problemas

eletromagnéticos mediante a utilização do MEF, sendo mais adequado para situações onde  $B(t)$  é definido. Nesses casos, as expressões utilizadas para o modelo inverso de Jiles-Atherton estão apresentadas em (25), (26) e (27).

$$\frac{dM}{dB} = \frac{(1-c) \frac{dM_i}{dB_e} + \frac{c}{\mu_0} \frac{dM_a}{dH_e}}{1 + c(1-\alpha) \frac{dM_a}{dH_e} + \mu_0(1-\alpha)(1-c) \frac{dM_i}{dB_e}}, \quad (25)$$

em que

$$\frac{dM_i}{dB_e} = \frac{M_a - M_i}{\mu_0 k \delta} \quad (26)$$

e

$$B_e = \mu_0 H_e. \quad (27)$$

Além da fundamentação acerca da resposta do TC de proteção e do modelo de Jiles-Atherton, para se ter uma fundamentação teórica completa sobre a metodologia e análise dos resultados, é necessário o entendimento também das correntes de curto-circuito. O curto-circuito é um evento transitório em que as correntes atingem valores extremamente altos, em relação à corrente nominal do sistema, sendo assim, afetando a resposta do TC de proteção. Sabendo dessa necessidade, na próxima seção será apresentada a fundamentação teórica a respeito da corrente de curto-circuito.

### 2.3 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

O curto-circuito em sistemas elétricos é um distúrbio que conecta uma parte energizada do sistema diretamente à terra ou à outra parte energizada do sistema. Ele provoca uma queda brusca da impedância do sistema, originando uma elevada corrente. A elevada corrente é chamada de corrente de curto-circuito. Pode-se empregar a expressão (28) para calcular o valor da corrente de curto-circuito (RAO, 1979).

$$i_F(t) = \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(wt + \theta - \phi_1) + \left[ I_o - \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\theta - \phi_1) \right] e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (28)$$

em que  $\phi_1$  é o ângulo de incidência do defeito,  $Z_1$  é a impedância primária do sistema representada por  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$  e  $T_1$  é dado pela relação  $\frac{L_1}{R_1}$  e é denominado constante de tempo primária.

Analisando a expressão (28), é possível constatar que a expressão pode ser decomposta em duas componentes: uma componente senoidal, representada pelo termo (29) e uma componente não pulsante com decaimento exponencial, representada pelo termo (30).

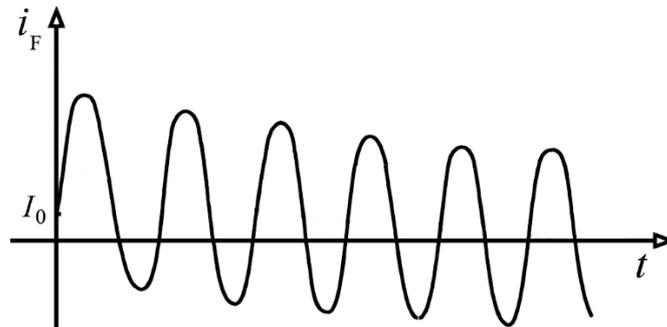
$$\frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(wt + \theta - \phi_1), \quad (29)$$

$$\left[ I_0 - \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\theta - \phi_1) \right] e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (30)$$

Além disso, na expressão (28) tem-se que a corrente assume seu valor máximo quando  $\theta - \phi_1 = -\pi/2$ . Neste ângulo, então, tem-se o pior caso para a condição de curto-circuito.

Ainda analisando a expressão (28), pode-se construir o gráfico da corrente de curto-circuito com relação ao tempo. O gráfico mostrando a forma de onda típica da corrente está apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Forma de onda típica de uma corrente de curto-circuito.



Fonte: Adaptado de GUERRA, 2007.

Com a fundamentação da resposta transitória, do modelo de Jiles-Atherton e da corrente de curto-circuito, pode-se descrever o comportamento do TC de proteção, tanto sem entreferro, quanto com entreferro.

Entretanto, para a verificação da fragilidade mecânica do TC de proteção com entreferros, é necessário avaliar a influência das forças eletromagnéticas na resposta do TC. Para tanto, a fundamentação a respeito das forças eletromagnéticas está apresentada na seção a seguir.

## 2.4 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Conforme mencionado, uma das maiores solicitações mecânicas no TC de proteção é ocasionada devido à ocorrência de curtos-circuitos no sistema elétrico. As solicitações podem ser avaliadas por meio do cálculo das forças eletromagnéticas originadas pela circulação de correntes de curto-circuito nos enrolamentos do TC. Sabendo disso, as forças eletromagnéticas podem ser calculadas por meio da expressão (31):

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (31)$$

em que  $\mathbf{F}$  representa o vetor força de Lorentz e  $\mathbf{J}$  é o vetor densidade superficial de corrente nos enrolamentos.

A corrente nos enrolamentos do TC também provoca o surgimento de forças no núcleo. As forças no núcleo, ou nos materiais ferromagnéticos, possuem uma maior complexidade de cálculo e têm uma grande dependência com a distribuição de fluxo magnético por todo o material (FITZGERALD, 2002). De maneira geral, as forças eletromagnéticas atuantes no núcleo ferromagnético do TC podem ser calculadas por meio da manipulação da expressão (31).

A manipulação é feita por meio do emprego da expressão (32), que é a lei de Ampère, e da expressão (33), que é o tensor de Maxwell.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \mathbf{J} + \mu_o \epsilon_o \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (32)$$

$$\vec{\mathbf{T}} = [T_{ij}] = \epsilon_o \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_o} \left( B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right). \quad (33)$$

Nas expressões (32) e (33), os índices  $i$  e  $j$  referem-se as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ ; o delta de Kronecker,  $\delta_{ij}$ , é igual a 1 para  $i = j$  e zero caso contrário;  $\epsilon_o$  é a permissividade elétrica do vácuo; e  $E$  é o campo elétrico resultante.

O emprego das expressões (32) e (33) faz com que a densidade de corrente na expressão (31) possa ser eliminada (GRIFFITHS, 1999). Com a eliminação da densidade de corrente na expressão(31), pode-se obter a expressão (34), que pode ser utilizada para o cálculo das forças no núcleo e nos enrolamentos do TC.

$$\mathbf{F} = \nabla \cdot \vec{\mathbf{T}} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (34)$$

em que  $S$  é o vetor de *Poynting*, representando a densidade direcional do fluxo de energia de um campo eletromagnético, dado em W/m<sup>2</sup> (GRIFFITHS, 1999).

Após a análise das forças eletromagnéticas nos entreferros do TC de proteção, para determinar a influência das forças na resposta do TC são avaliadas as deformações mecânicas nos entreferros causadas pelas forças eletromagnéticas. Portanto, a seção a seguir trata da teoria sobre deformações mecânicas.

## 2.5 DEFORMAÇÕES MECÂNICAS

A deformação mecânica a qual uma estrutura é submetida depende do estresse mecânico ( $\sigma$ ) aplicado à estrutura e da área de seção reta ( $A$ ) à qual o estresse é aplicado. Para então obter as deformações mecânicas, é necessário inicialmente calcular os estresses aos quais a estrutura a ser deformada é submetida. Sendo assim, tem-se que o estresse mecânico em um objeto é definido conforme a expressão (35).

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (35)$$

em que  $F$  é a força instantânea aplicada ao objeto.

A deformação mecânica, por sua vez, é definida como a variação relativa na dimensão à qual o estresse é aplicado (CALLISTER JUNIOR, 1994). Para materiais submetidos a baixos níveis de estresse, as deformações mecânicas são proporcionais e relacionadas conforme a lei de Hooke, apresentada na expressão (36).

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (36)$$

em que  $E$  é a propriedade do material denominada de módulo de Young<sup>3</sup>, ou módulo de elasticidade.

As deformações mecânicas podem ainda ser classificadas em: deformação elástica e deformação plástica. A deformação elástica é uma deformação linear e não permanente, quando a força ( $F$ ) é retirada, o material retoma sua dimensão inicial. Para a região de

---

<sup>3</sup> Quanto maior o valor do módulo de Young mais rígido será o material (CALLISTER JUNIOR, 1994).

deformação elástica a expressão (36) pode ser utilizada. A deformação plástica possui caráter permanente e portanto a expressão em (36) não pode ser utilizada.

Os deslocamentos que ocorrem devido à ação das forças eletromagnéticas em um material são diretamente proporcionais às deformações provocadas pelas forças. Portanto, para determinar os deslocamentos em uma dada superfície do material, é calculada a deformação causada pela ação das forças e em seguida, os deslocamentos podem ser obtidos de forma direta.

Dada a complexidade das expressões apresentadas, principalmente no que diz respeito ao cálculo das forças eletromagnéticas, e com o aumento da capacidade de processamento das máquinas computacionais, as simulações computacionais, baseadas em métodos numéricos, tem se tornado uma alternativa economicamente viável para estudos do comportamento de equipamentos quando submetidos a diversas condições de funcionamento.

As simulações computacionais podem ser utilizadas para prever o comportamento das forças eletromagnéticas nos entreferros, assim como dos deslocamentos provocados pelas forças. Um dos métodos mais utilizados em simulações computacionais para solução de problemas envolvendo equações diferenciais é o MEF (SADIKU, 2012). A seguir, é apresentada uma breve discussão acerca do MEF.

## 2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos métodos numéricos mais empregados na solução de problemas de engenharia. A análise de problemas por meio do MEF envolve basicamente cinco passos: discretização, equacionamento, junção dos elementos, solução do sistema e visualização (SADIKU, 2012; FERREIRA, 2007).

A discretização consiste na representação abstrata da região que se deseja analisar e na subdivisão dessa representação em um número finito de elementos. A geometria dos elementos tem sua forma geralmente definida por polígonos simples. Os polígonos que definem a geometria da região a ser estudada compõem a malha de simulação.

O equacionamento dos elementos os define fisicamente. O modelo de equações escolhido para dimensionar o problema varia de acordo com o que deve ser resolvido. Após a definição das equações a serem empregadas no modelo, são construídas as

matrizes de coeficientes para cada um dos elementos. A partir das matrizes, são determinadas as equações matriciais baseadas no modelo físico desejado.

A junção dos elementos consiste na definição de uma matriz global que relacione o acoplamento entre quaisquer dois nós da malha. Portanto, o sistema de equações terá tantas equações quantos forem os graus de liberdade presentes nos nós do sistema analisado. Todavia, o sistema de equações ainda não é solucionável, por possuir mais incógnitas do que equações. Para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno. Alguns dos nós têm grandezas físicas conhecidas e constantes, e os valores numéricos correspondentes a essas grandezas devem ser alocados na matriz de coeficientes global.

A solução do sistema fornecerá os valores numéricos correspondentes a cada um dos nós. No caso particular desta pesquisa, para os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, a solução é encontrada por meio dos vetores potencial magnético e estresse mecânico em cada nó da malha, a partir dos quais é possível determinar as forças eletromagnéticas e os deslocamentos mecânicos no interior dos elementos finitos.

Por fim, a visualização dos ambientes computacionais de simulação baseados no MEF deve dispor de ferramentas visuais e numéricas de representação, permitindo identificar todas as implicações da análise. Estas implicações apontam as regiões críticas onde podem existir fragilidades mecânicas, concentrações de campo e outros aspectos importantes ao caso em estudo.

Apesar de apresentar soluções aproximadas, o MEF pode ser melhorado com o refinamento da malha adotada. No entanto, há um limite para o número de elementos, a partir do qual, os erros de arredondamento se acumulam de tal forma que um aumento dos elementos não traz uma melhora na exatidão dos resultados.

O COMSOL *Multiphysics*® é um dos diversos *softwares* que são baseados no MEF. A vantagem associada ao seu uso está na construção, ou importação, do modelo do objeto a ser analisado. O seu uso permite atribuir grandezas e constantes físicas sem a necessidade da construção das equações do MEF ou escrever rotinas de solução.

Assim, é finalizada a fundamentação teórica acerca dos temas necessários ao entendimento da metodologia e à análise dos resultados deste trabalho. A fundamentação permitiu ainda o entendimento de outros estudos realizados em pesquisas da mesma linha que este trabalho. No capítulo seguinte, os estudos relacionados à linha de pesquisa que trata o presente trabalho são apresentados na forma de uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas desenvolvidas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas diversas pesquisas que foram desenvolvidas ao longo dos anos que tratam da resposta de TC com entreferro em seu núcleo. A partir da análise das pesquisas foi possível identificar as principais contribuições e também desenvolver uma metodologia para avaliar a influência das forças eletromagnéticas nos TC de proteção com entreferro, que é o objetivo principal deste trabalho.

No trabalho de Bruce e Wright (1966), os autores estudaram a presença de fluxo residual no núcleo de TC analisando seus métodos de medição. Os métodos utilizados para avaliar o fluxo residual permitiram o estudo do decaimento de fluxo quando reestabelecido o regime permanente após a ocorrência de uma sobrecorrente de defeito. Os autores concluíram que a melhor forma de medição do fluxo residual envolve a condução do fluxo a intensas regiões de saturação e a medição de suas variações utilizando um fluxômetro.

Conner, Greb e Wentz (1972) estudaram a influência do fluxo residual na resposta transitória do TC. Os autores incluíram em seus estudos a avaliação da resposta do TC em medidores e relés de proteção. O estudo desenvolvido teve como objetivo permitir aos fabricantes de relés de proteção saber a qualidade do TC em relação ao fluxo residual que ele possui. Além disso, os autores discutiram métodos para o controle do fluxo residual em TC, avaliando métodos que obtenham fluxo residual efetivo inferior a 10%. Com base nos estudos realizados, foi possível propor especificações para TC que considerem o controle do fluxo residual. Os autores concluíram que o controle do fluxo residual pode ser alcançado com a introdução de um entreferro no núcleo dos TC ou com o aumento da área de seção do núcleo ferromagnético do TC.

No trabalho de Vanderlek e outros (1977), os autores constataram que a resposta transitória do TC é influenciada pelo tempo em que o núcleo ferromagnético atinge a saturação. Os autores também verificaram que o tempo de saturação é influenciado pelo fluxo residual. Com isso, para diminuir substancialmente o fluxo residual do núcleo ferromagnético, os autores sugerem a adição de entreferro ao núcleo do TC.

Em seu trabalho, Wu (1985) propôs meios para estimação da resposta transitória em TC. Com o objetivo de estudar a resposta do TC, o autor desenvolveu expressões para estimativa do tempo de saturação e do tempo de dessaturação em condições de elevada saturação. O autor comentou ainda sobre os diversos fatores que podem influenciar a

resposta do TC, tais como: amplitude da corrente de curto-circuito, constante de tempo primária, constante de tempo secundária, carga conectada ao secundário, fluxo residual, entre outros. No texto, foram apresentadas algumas sugestões de tópicos que devem ser considerados na seleção do projeto adequado de TC. Como conclusão, o autor destaca a importância de se projetar um TC de proteção que não sature, pelo menos, nos dois primeiros ciclos após o início de uma sobrecorrente de defeito.

Poljak e Kolibas (1988) estudaram o desempenho de TC e os erros que podem apresentar quando submetidos a condições de curto-circuito. Análises a partir de métodos numéricos são utilizadas no trabalho para determinar o desempenho de TC e os resultados obtidos foram comparados a testes desenvolvidos em laboratório. Os resultados obtidos a partir de métodos numéricos foram satisfatórios e os autores concluíram que o método desenvolvido pode ser utilizado na substituição dos testes laboratoriais propostos pelo documento IEC 38 (Central Office) 78.

Bozoki e outros (1990) discutiram sobre as características e o desempenho de transformadores de corrente com entreferros pequenos, resultando em um fluxo residual de até 10 % do fluxo residual para o mesmo núcleo sem entreferro. Também foram estudados os efeitos do fluxo residual, e a utilização de pequenos entreferros para controle do fluxo magnético. Os autores concluíram que TC com entreferro no núcleo possuem as seguintes vantagens: redução do tamanho físico do núcleo ferromagnético e, portanto, vantagem econômica; melhoria na resposta transitória do TC dada pela redução da remanescência. Quanto à desvantagem, os autores apontaram que TC com entreferros preenchidos por ar, ou outro material não magnético, podem ser mecanicamente mais frágeis em relação àqueles com núcleo fechado. Apesar de ter apontado a desvantagem mecânica, os autores não realizaram nenhum estudo que comprovasse a sua afirmativa. Além disso, o trabalho de Bozoki e outros (1990) foi o primeiro trabalho a mencionar desvantagens mecânicas dos TC com entreferro.

Yun-Qiu e outros (1990) utilizaram de cálculo numérico para determinação das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador de potência. Para tanto, foram obtidas as expressões das forças eletromagnéticas a partir das expressões de cálculo da corrente de curto circuito. Além disso, os autores destacaram que as forças eletromagnéticas provocadas pela circulação de correntes de curto circuito possuem três componentes, uma componente contínua, uma componente na frequência fundamental e uma componente de segunda harmônica. Os valores das forças eletromagnéticas obtidas a partir da utilização do MEF foram comparados aos valores obtidos analiticamente. Os

autores concluíram que as forças eletromagnéticas, obtidos por meio da modelagem analítica, são suficientemente próximas às forças eletromagnéticas obtidas por formulação numérica.

Kezunovic e outros (1994) estudaram modelos digitais desenvolvidos no *software* EMTP para analisar o desempenho da resposta transitória de TC de proteção. Foi apresentada uma comparação entre as respostas transitórias de TC de proteção, obtidas a partir de ensaios em laboratórios de alta tensão, e as respostas transitórias obtidas a partir dos modelos desenvolvidos no EMTP. Com o estudo desenvolvido, os autores concluíram que os modelos obtidos no EMTP são convenientes para simulação em casos de curto-circuito. No entanto, de acordo com os autores, em casos quando a inclinação da região saturada do laço de histerese é acentuada, os resultados das simulações podem não representar a resposta transitória do TC de forma satisfatória.

Tran-Quoc e Pierrat (1995) estudaram a influência do ângulo de incidência de defeito e do fluxo residual no núcleo como variáveis aleatórias na resposta transitória de TC. Os autores propuseram um método para determinação das características da magnetização em TC. O método considera os valores RMS de tensão, corrente e perdas no núcleo. Análises numéricas são utilizadas para o cálculo do fluxo e para determinação das formas de onda da corrente secundária. A partir da aplicação do método podem ser investigadas as distorções de amplitude e fase na corrente secundária do TC dada a aplicação de uma corrente de curto-circuito. No momento da ocorrência do curto-circuito aplicado, o ângulo de incidência e o fluxo residual no núcleo não são conhecidos, tais parâmetros são considerados aleatórios. No trabalho foram avaliadas a influência das variáveis aleatórias nas distorções da corrente secundária utilizando técnicas de simulação pelo método Monte-Carlo. Os autores mostraram por meio dos resultados obtidos que o método é eficiente para a análise do comportamento de TC sob diversas condições transitórias. A influência das variáveis aleatórias foi avaliada e os resultados apresentados têm alto valor crítico, pois variações uniformes do ângulo de incidência e do fluxo residual abrangem toda a gama de fatores de influência.

Najdenkoski e Manov (1998) utilizaram o MEF para determinar as forças eletromagnéticas atuantes em um transformador de potência na condição de curto circuito trifásico. Os autores consideraram apenas o primeiro pico da corrente de curto circuito e verificaram que as forças no enrolamento interno são compressivas e no enrolamento externo são trativas. Adicionalmente, foi destacado que o desalinhamento dos enrolamentos influencia nos valores das forças eletromagnéticas.

No trabalho de Dampé e Arrojo (1999) foi desenvolvido um método alternativo para testes da resposta transitória em TC de proteção. O trabalho teve sua motivação principal baseada na dificuldade de laboratórios desenvolverem testes em transformadores de corrente de acordo com os padrões de normas internacionais, devido ao aumento das constantes de tempo envolvidas nos testes para equipamentos de alta tensão. O método apresentado pelos autores se baseia em cálculos e verificações diretas de técnicas matemáticas bem conhecidas. No método é proposto a excitação do TC a partir do seu enrolamento primário com valor de corrente nominal, no entanto com uma constante de tempo inferior àquela prevista em norma. A constante de tempo reduzida pode ser alcançada com a adição de uma corrente contínua no enrolamento secundário do transformador para que o equipamento possa operar com fluxo magnético nominal no núcleo. Com o objetivo de verificar os cálculos desenvolvidos, foram realizados testes em laboratório. Os testes foram realizados em laboratório, em baixa tensão, com a aplicação de uma corrente de 9 kA ao enrolamento primário de um TC do tipo TPX com relação de transformação 2000/5 A. Os autores concluíram que o método obteve sucesso uma vez que permite laboratórios de média potência desenvolver ensaios antes limitados a laboratórios de alta potência.

Em seu trabalho, Muthumuni e outros (2001) desenvolveram um modelo matemático para simulação de transformadores de corrente com entreferro. Para a caracterização do modelo, os autores utilizaram equações para fluxo residual e histerese derivadas da teoria de histerese ferromagnética. O entreferro foi considerado preenchido por ar e foi associado em série com o núcleo ferromagnético. O modelo desenvolvido nesta publicação foi validado a partir da comparação das curvas resultantes com curvas previamente fornecidas por fabricantes. Os autores concluíram que a saturação e a remanescência do núcleo de ferro foram modelados com precisão. Ainda nesse trabalho, os autores destacaram a falta de publicações na área de estudos abordando o equipamento TC.

Luxenhurger, Schegner e Igel (2004) estudaram um modelo para simulação em *software* ATP/EMTP de transformadores de corrente classe P, tipos TPX, TPY e TPZ. O principal foco do trabalho foi a simulação dos equipamentos de proteção baseado em modelos e características preestabelecidos para transformadores de corrente classe P. O modelo é implementado a partir de simulação em *software* ATP/EMTP, considerando o fluxo remanescente e histerese para calcular o comportamento físico do TC. Os autores concluíram que, apesar de terem sido considerados apenas parâmetros nominais do TC

para o modelo, outros parâmetros podem ser facilmente adicionados ao modelo desenvolvido. No entanto, uma das vantagens do método utilizado é a não necessidade de parâmetros adicionais. Os autores salientam ainda que a exatidão apresentada pelo modelo estudado é suficiente para que ele venha a ser utilizado em testes de dispositivos de proteção.

Kang e outros (2008) apresentaram em seu estudo um algoritmo para compensação da corrente de excitação em TC com entreferro. A compensação proposta é feita medindo a corrente secundária e calculando o fluxo no núcleo a partir da corrente medida durante a condição de falta e em regime permanente. O fluxo calculado é inserido no laço de histerese para estimação da corrente de excitação. A corrente de excitação estimada é então somada à corrente medida no secundário, a partir dessa soma a corrente real é obtida. O estudo foi baseado no modelo de TC do *software* EMTP. Para verificação dos resultados obtidos, os algoritmos foram implementados ao sistema elétrico de transmissão da Coréia do Sul. Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo estima corretamente a corrente primária em situações de falta e em regime permanente. Apesar dos resultados apresentados por Kang e outros, o tema não é dado como solucionado definitivamente. Outros autores têm estudado diversos métodos para correção da corrente secundária utilizando técnicas distintas, como pode ser verificado nos trabalhos de Santos (2011), Shi e outros (2013) e Pereira e outros (2016), discutido mais adiante.

Wiszniewski, Rebizant e Schiel (2008) apresentaram em seu trabalho meios para detecção do instante em que o núcleo ferromagnético satura e do instante em que ele sai da região de saturação. Além disso, foram apresentados meios para prever até três amostras da corrente primária após a saturação do núcleo. No estudo desenvolvido pelos autores foi mostrado que quatro amostras consecutivas da corrente secundária, obtidas na região de não saturação do núcleo, são suficientes para calcular a corrente de curto-circuito a partir da amplitude do sinal na frequência fundamental e da componente com decaimento exponencial. Os autores concluíram que a alta exatidão foi alcançada para os casos em que a corrente primária do TC não possui componentes de segundo harmônico. A presença do segundo harmônico na corrente de curto-circuito não afetou a detecção do ponto em que o núcleo ferromagnético entra em saturação. No entanto, a presença de componentes harmônicas na corrente de curto-circuito aumentaram significativamente os erros na reprodução da corrente primária.

No estudo de Lesniewska e Jalmuzny (2009) foi apresentada uma aplicação de análise de campo magnético para estimar a influência do tipo de construção do núcleo

nos erros de transformação em transformadores de corrente do tipo TPZ. Análises da resposta transitória, assim como de regime permanente, foram feitas utilizando simulações computacionais a partir do método *field-and-circuit*. No desenvolvimento do trabalho foram estudadas a resposta do TC a partir de modelagens 3D de transformadores de corrente com 2, 4 e 8 pequenos entreferros. Os autores destacaram ainda que mesmo o comprimento efetivo dos entreferros se apresentando menor que o comprimento real, a diferença pode ser reduzida com a utilização de vários entreferros de mesmo comprimento. Para prova de conceito dos resultados obtidos nas simulações computacionais, pesquisas em laboratório foram feitas em núcleos de TC nas mesmas condições de transitório e regime permanente aplicadas à análise do método *field-and-circuit*. Os resultados do estudo mostraram que as propriedades dos núcleos analisados, em regime permanente e transitório, são diferentes quando o núcleo possui diferentes quantidades de entreferros, embora o comprimento total do entreferro seja o mesmo. Os autores concluíram que a aplicação do método oferece aos projetistas a possibilidade de determinar com exatidão o comprimento efetivo do entreferro e os erros de transformação previamente à construção física do transformador de corrente.

Rafajdus e outros (2010) fizeram uma análise detalhada da resposta transitória de um TC. Em sua análise, os autores desenvolveram um modelo matemático para o TC e o aplicaram na realização de simulações utilizando o MEF, estudando diferentes condições transitórias e regime permanente. Para a verificação dos resultados, as formas de onda obtidas nas simulações foram comparadas com os gráficos registrados por um relé de proteção durante a ocorrência de curto-circuito. Os autores julgaram que as formas de onda comparadas não apresentaram discordância significativa de valores.

Em 2011, Ajaei e outros apresentaram um modelo para representação dos efeitos da saturação do núcleo de TC utilizados para alimentar relés de proteção digitais. Para o desenvolvimento do modelo foram realizadas simulações em plataforma PSCAD/EMTDC. Os efeitos da saturação foram avaliados de acordo com a medição do fasor de corrente secundária. Também foi proposto pelos autores um novo algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados (LES) para detecção e compensação dos efeitos da saturação de TC. O algoritmo proposto no trabalho é independente dos parâmetros do TC, da carga conectada ao seu secundário e do sistema ao qual está conectado. A partir dos estudos realizados, para o modelo apresentado, foi possível mostrar que a forma de onda da corrente foi reconstruída com precisão em várias condições de saturação do núcleo do TC.

Santos (2011) avaliou o desempenho de alguns métodos de detecção e correção das distorções na corrente secundária em TC. As distorções na corrente secundária ocorrem devido à saturação do núcleo ferromagnético em TC. Os métodos foram testados para diversos sinais de corrente gerados a partir de simulações computacionais. O autor avaliou os métodos de detecção e correção a partir da capacidade de reconhecimento dos intervalos de saturação, da velocidade de resposta que cada um apresentou, da exatidão na compensação e do tempo de processamento. Como resultado, o autor destacou o método de correção por Mínimos Quadrados com boa exatidão na correção dos sinais distorcidos.

Em sua dissertação, Schettino (2012) propôs um método para compensação dos efeitos causados pela saturação do núcleo de TC aplicados a proteção. O trabalho foi dividido em duas etapas principais: detecção e compensação da saturação. Para detectar a saturação, foi idealizado um método baseado na função primeira diferença do filtro de Lanczos. Para compensação da saturação, o autor utilizou um método de estimação de modelos lineares implementado utilizando o *software Matlab*®. Por fim, detecção e compensação da saturação foram associadas em um único algoritmo. Os resultados do trabalho indicaram um excelente desempenho, com um algoritmo robusto e independente de fatores externos.

Em 2014 Schettino e outros publicaram uma continuação para o trabalho desenvolvido em 2012, os autores realizaram testes utilizando correntes secundárias distorcidas a partir de simuladores digitais em tempo real e corrompidas por diversos níveis de ruído Gaussiano. Com os resultados do trabalho publicado em 2014, os autores demonstraram uma capacidade de detecção de saturação, a partir da corrente secundária, maior que 95%. A capacidade de detecção não depende das características do TC, da carga conectada ao seu secundário e das características da corrente de falta. Um dos destaques apontados nesse trabalho é a consideração da influência do ruído proveniente dos sistemas elétricos e a interferências eletromagnéticas no circuito secundário do TC. Outra vantagem do método desenvolvido é a utilização de apenas seis amostras para identificação da corrente de saturação, utilizando operações aritméticas simples, usando baixo esforço computacional e hábil para ser utilizado em aplicações de processamento em tempo real.

Hyun-Mo e outros (2012) realizaram simulações computacionais em 3D para a determinação das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos nos enrolamentos de um transformador de potência. As forças eletromagnéticas obtidas a partir da física

eletromagnética, foram os dados de entrada para a física mecânica. Com a utilização da física mecânica foram obtidos os resultados para o estresse, as deformações e os deslocamentos nos enrolamentos, na ocorrência de um curto circuito. Os autores destacaram ainda que a utilização do MEF é adequada para a fase de projeto do transformador de potência, e pode ser utilizado com o intuito de evitar que falhas mecânicas ocorram no equipamento.

Shi e outros (2013) propuseram em seu trabalho um modelo para representação das características não lineares de TC na correção da corrente secundária. Para o desenvolvimento do modelo, ambas as porções, saturada e não saturada, da corrente secundária, são utilizadas. O modelo proposto utiliza de regressão não linear na obtenção de parâmetros para reconstrução da corrente secundária. Para avaliar o modelo, testes foram executados e analisados, comparando os dados gerados a partir de simulações em PSCAD/EMTDC a resultados fornecidos por fabricantes de TC. Os autores concluíram que o modelo proposto é capaz de fornecer dados confiáveis para entrada de dispositivos de proteção em sistemas de potência.

No trabalho de Pereira e outros (2014) é apresentado um método para correção de distorções na corrente secundária em um TC com entreferro no núcleo. A técnica adotada no trabalho diz respeito à correção numérica da corrente no secundário a partir de estimação da corrente de excitação, quando somadas, as correntes refletem o valor da corrente primária. A estimação da corrente de excitação é feita a partir da integração da tensão em um enrolamento terciário do TC. Como complemento da pesquisa, Pereira e outros (2016) implementaram uma plataforma com *Digital Signal Controllers* (DSC) para realizar os estudos do comportamento de transformadores de corrente com entreferro em tempo real. Os autores concluíram afirmando que o método desenvolvido corrige de forma apropriada os erros de relação e de fase e as distorções identificadas na corrente secundária. Para verificação do método diversos casos foram estudados e os resultados indicaram que o método é efetivo, melhorando a resposta do transformador de corrente em sistemas de proteção.

Batista (2015) apresentou um estudo teórico e experimental acerca da aplicação de ligas nanocristalinas em núcleos toroidais de TC. Com o intuito de desenvolver um TC que pudesse ser aplicado aos serviços de medição e proteção simultaneamente, foi avaliado um TC com núcleo misto composto de liga nanocristalina e liga Ferrosilício (FeSi). Os resultados obtidos demonstraram que ao empregar o TC com núcleo o misto, o mesmo apresentou propriedades de liga nanocristalina quando a

densidade de fluxo magnético é relativamente baixa, sendo portanto ideal para utilização como TC de medição. Quando submetido a uma alta densidade de fluxo magnético, as características da liga FeSi se sobressaem no TC de núcleo misto, portanto sendo ideal à aplicação como TC de proteção. Com isso, foi constatado que o TC de núcleo misto pode ser utilizado para serviços de medição e proteção.

Qi e outros (2015) analisaram em seu trabalho as características da saturação em TC na ocorrência de transitórios. Os autores apresentaram uma plataforma de simulação para análise das características transitórias dos TC. A plataforma de simulações foi desenvolvida baseada no *software* EMTDC e em rotinas VB.NET. Como resultado da pesquisa os autores relataram que as análises e avaliações das características transitórias de TC, e a análise de operações indevidas da proteção foram executadas com eficiência pela plataforma apresentada.

O trabalho de Kaczmarek (2015) explica o fenômeno que ocorre na resposta do TC quando há variações na corrente primária causadas por afundamentos e interrupções da tensão primária. Para estimar a exatidão da transformação do TC na ocorrência desses transitórios foi feita uma comparação entre as correntes primária e secundária utilizando algoritmos da transformada rápida de Fourier (FFT). Como resultado de seu trabalho, os autores concluíram que as rápidas alterações na corrente primária do TC causam sobretensões que podem danificar instrumentos de medição conectados aos terminais secundários do TC. De acordo com os autores, esse fenômeno é resultado de um rápido aumento na força eletromotriz induzida nos enrolamentos do TC. No entanto, a energia armazenada no campo magnético durante a ocorrência do fenômeno é rapidamente dissipada, evitando distorções na resposta do TC.

Hajipour e outros (2016) desenvolveram um dispositivo eletrônico de baixo custo, utilizado para desmagnetizar o núcleo ferromagnético do TC durante o intervalo morto antes de um religamento automático do sistema. O dispositivo opera independente dos parâmetros do TC e pode ser instalado em novos TC a serem usados no sistema elétrico ou como um dispositivo compensador a um TC que já esteja em serviço. Para demonstrar a capacidade do dispositivo desenvolvido, os autores apresentaram simulações utilizando um modelo apropriado para o TC que inclui a descrição das características de histerese do núcleo ferromagnético a partir do método de Jiles-Atherton. Em seguida, os autores testaram o dispositivo a partir de ensaios em laboratório em três TC de proteção diferentes. Como conclusão, os autores apontam que a partir da aplicação do dispositivo,

é possível haver uma redução em até 40% das dimensões do núcleo ferromagnético, tornando o projeto do TC de proteção mais econômico e confiável.

Hong e outros (2017) propuseram um novo esquema para detecção e avaliação do nível de saturação do núcleo ferromagnético de um TC. Para avaliar o desempenho do esquema proposto, os autores desenvolveram várias simulações utilizando PSCAD/EMTDC. Os resultados das simulações mostraram que o esquema proposto possui bom desempenho em detectar se o núcleo do TC está saturado e avaliar o nível de saturação. O esquema operou bem com a utilização de correntes geradas a partir de geradores de sinal em laboratório. Os autores concluíram a partir dos resultados satisfatórios para as simulações, que o esquema possui características favoráveis a sua implementação em tempo real.

Em seu trabalho Hajipour, Vakilian e Sanaye-Pasand (2017) propuseram um dispositivo eletrônico de baixo custo que pode prevenir os efeitos da saturação do núcleo ferromagnético na resposta do TC de proteção. O dispositivo é inserido em série com os instrumentos de proteção instalados no secundário do TC. O dispositivo apresentado atua como um regulador de tensão que cancela a tensão sobre carga do TC. Os autores demonstraram que apesar de sua simplicidade, o dispositivo desenvolvido é capaz de compensar correntes de falta, correntes de *inrush* e outras correntes que possam ocorrer durante transitórios do sistema elétrico. A eficácia do compensador proposto foi verificado através do desenvolvimento de simulação e ensaios experimentais puderam comprovar o desempenho que foi obtido a partir das simulações.

A partir da revisão bibliográfica apresentada, é possível constatar que as conclusões das principais pesquisas estão relacionadas a aprimoramentos dos métodos empregados para análise da resposta transitória. Nas conclusões, é possível verificar que existe uma tendência de se estudar os efeitos de fenômenos elétricos na resposta transitória. Entretanto, como a resposta transitória do TC é influenciada, principalmente, pela circulação de correntes de curto-circuito nos enrolamentos, os fenômenos mecânicos ocasionados por essas correntes também devem ser considerados. Sabendo disso, ao analisar, de forma conjunta, os efeitos dos fenômenos elétricos e mecânicos na resposta do TC, é possível realizar análises mais aprofundadas a respeito do seu comportamento, além de impulsionar uma nova linha de pesquisa.

A fim de sintetizar as contribuições dos trabalhos citados, a seguir é apresentada uma tabela com as principais referências e contribuições abordadas na revisão bibliográfica. Na Tabela 1 também é destacada a contribuição desta pesquisa.

Tabela 1 - Contribuições das pesquisas.

Pesquisadores	Contribuições				
	FR, RT <sup>1</sup>	PM <sup>2</sup>	SIM. 2D/3D <sup>3</sup>	MEF <sup>4</sup>	A. PM <sup>5</sup>
Bruce e Wright (1966)	X				
Conner, Greb e Wentz (1972)	X				
Vanderlek e outros (1977)	X				
Wu (1985)	X				
Poljak e Kolibas (1988)	X				
Bozoki e outros (1990)	X	X			
Yun-Qiu e outros (1990)				X	
Kezunovic e outros (1994)	X		X		
Tran-Quoc e Pierrat (1995)	X				
Najdenkoski e Manov (1998)				X	
Dampé e Arrojo (1999)	X				
Muthumuni e outros (2001)			X		
Luxenhurger, Schegner e Igel (2004)			X		
Kang e outros (2008)	X		X		
Wiszniewski, Rebizant e Schiel (2008)	X				
Lesniewska e Jalmuzny (2009)	X		X		
Rafajdus e outros (2010)	X		X		
Ajaei e outros (2011)	X		X		
Santos (2011)	X				
Schettino (2012)	X				
Hyun-Mo e outros (2012)				X	
Shi e outros (2013)	X				
Schettino e outros (2014)	X				
Pereira e outros (2014 e 2016)	X				
Batista (2015)	X				
Qi e outros (2015)	X		X		
Kaczmarek (2015)	X				
Hajipour, e outros (2016)	X		X		
Hong e outros (2017)	X				
Hajipour, Vakilian e Sanaye-Pasand (2017)	X				
Esta pesquisa	X	X	X	X	X

1. Destacaram a importância do estudo do fluxo residual em TC de proteção e estudaram a resposta transitória em TC com e sem entreferro (FR, RT);
2. Destacaram os problemas mecânicos associados a TC com entreferros (PM);
3. Realizaram simulações computacionais para estudo de TC (SIM. 2D/3D);
4. Utilizaram o MEF para cálculo de forças eletromagnéticas (MEF);
5. Analisaram problemas mecânicos em TC de proteção com entreferros (A. PM).

Fonte: Autora.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos que devem ser utilizados para que o objetivo principal da pesquisa seja alcançado. Os procedimentos estão descritos a seguir e são também apresentados na Figura 6 na forma de diagrama de blocos.

- Determinação da corrente primária, do laço de histerese para o núcleo ferromagnético e da resposta do TC de proteção. Para determinar a corrente primária, o laço de histerese e a resposta do TC de proteção foi utilizada uma rotina desenvolvida no software Matlab®;
- Construção da representação gráfica do TC utilizando ferramenta baseada em Computer Aided Design (CAD). Para a construção da representação gráfica foi utilizado o software AutoCAD®;
- Determinação das forças eletromagnéticas e dos deslocamentos no entreferro do TC de proteção a partir de simulações computacionais realizadas no *software Comsol Multiphysics*®;
- Obtenção da nova resposta do TC de proteção, considerando os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas.

Figura 6 - Diagrama de blocos dos procedimentos para desenvolvimento da metodologia.



Fonte: Autora.

Inicialmente, para determinar a corrente primária, a resposta transitória e o laço de histerese do núcleo ferromagnético do TC, deve ser desenvolvida uma rotina no *software Matlab®*, empregando as expressões (15), (16), (17), (18), (23), (24) e (28), a Tabela 3 e a Tabela 4

A partir da expressão (28) e utilizando os dados fornecidos na Tabela 2, é possível determinar a corrente primária do TC de proteção. Em seguida, utilizando as expressões (23) e (24) e os dados apresentados na Tabela 3, é possível determinar o laço de histerese para o núcleo ferromagnético. Por fim, a partir das expressões (15), (16), (17) e (18) e os dados da Tabela 4, é possível determinar a resposta do TC de proteção.

Na rotina, é necessário informar as características do sistema conectado ao primário do TC apresentadas na Tabela 2, as constantes do modelo de Jiles-Atherton apresentadas na Tabela 3 e as características construtivas do TC apresentadas na Tabela 4. Portanto, a partir da rotina desenvolvida no *software Matlab®* podem ser obtidos: a corrente primária, a resposta do TC de proteção e o laço de histerese do núcleo ferromagnético do TC.

Tabela 2 - Características do sistema conectado ao primário do TC.

<b>Tensão nominal do sistema (kV)</b>	230
<b>Corrente nominal (A)</b>	800
<b>Comprimento da linha (km)</b>	85
<b>Resistência em série da linha - <math>R_L(\Omega/\text{km})</math></b>	0,0319
<b>Reatância em série da linha - <math>X_L(\Omega/\text{km})</math></b>	0,3311
<b>Resistência da barra de 230 kV - <math>R_s(\Omega)</math></b>	0,56
<b>Reatância da barra de 230 kV - <math>X_s(\Omega)</math></b>	7,35

Tabela 3 - Constantes do modelo de Jiles-Atherton.

<b><math>M_s</math> (A/m)</b>	1,72 x 10 <sup>6</sup>	<b><math>k</math> (A/m)</b>	39,2
<b><math>\alpha</math></b>	1,32 x 10 <sup>-5</sup>	<b><math>n</math></b>	2
<b><math>c</math></b>	0,1	<b><math>\eta</math></b>	0,96

Fonte: ANNAKAGE *et al.*, 2000.

Tabela 4 - Características construtivas do TC modelado.

<b>Corrente primária nominal (A)</b>		900
<b>Corrente secundária nominal (A)</b>		5
<b>Número de espiras</b>	Enrolamento primário	1
	Enrolamento secundário	180
<b>Comprimento médio do núcleo (m)</b>		0,5
<b>Comprimento médio do entreferro (mm)</b>		8 mm   16 mm   24 mm
<b>Área de seção reta do núcleo (m<sup>2</sup>)</b>		$1,91 \times 10^{-3}$
<b>Largura da seção reta do núcleo (mm)</b>		40,7
<b>Altura da seção reta do núcleo (mm)</b>		40,7
<b>Resistência dos enrolamentos (<math>\Omega</math>)</b>		0,25
<b>Reatância dos enrolamentos</b>		Desprezível
<b>Fator de sobrecarga</b>		20
<b>Diâmetro da seção transversal do fio de cobre (mm)</b>	Enrolamento primário	27,6
	Enrolamento secundário	2,3

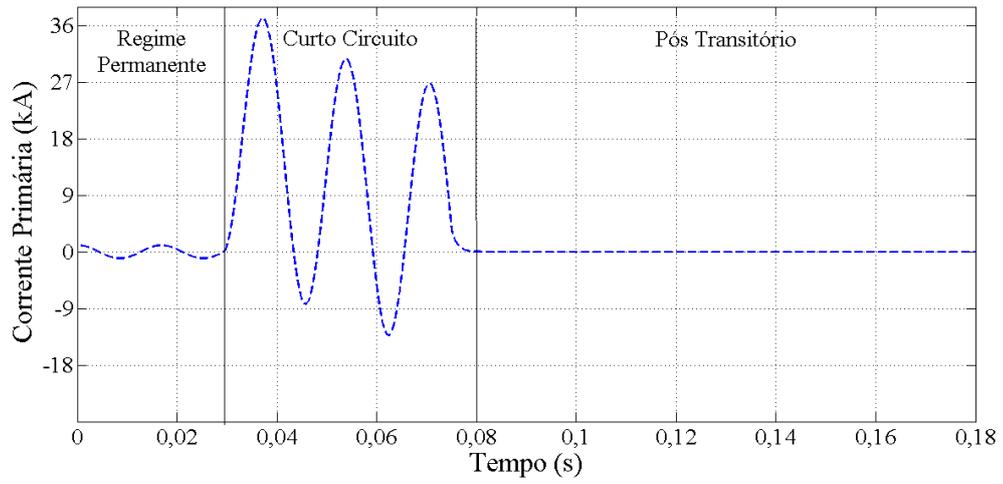
Fonte: TZIOUVARAS *et al.*, 2000.

Na construção da corrente de curto-circuito, apresentada na Figura 7, foi considerado a ocorrência de um curto-circuito entre a fase à qual o TC de proteção é conectado e a terra. O curto-circuito ocorre a 5 km de distância do equipamento em estudo e sua duração foi adotada arbitrariamente. Apesar de os sistemas de proteção usualmente interromperem curtos-circuitos antes de três ciclos, a duração de 2,75 ciclos para o curto-circuito utilizado foi determinada com o intuito de maximizar os efeitos da corrente transitória estudada.

A corrente primária do sistema, assim como o laço de histerese do material ferromagnético, apresentado na Figura 8, são comuns a todas as distribuições de entreferro estudadas. No entanto, a resposta do TC de proteção<sup>4</sup>, apresentada na Figura 9, depende do comprimento efetivo do entreferro. Portanto, cada um dos comprimentos estudados: 8 mm, 16 mm e 24 mm, possui uma resposta distinta. Além disso, na Figura 9 foram acrescentados aos gráficos a forma de onda da corrente primária referenciada ao secundário, para que seja possível avaliar visualmente a relação de transformação em cada um dos casos.

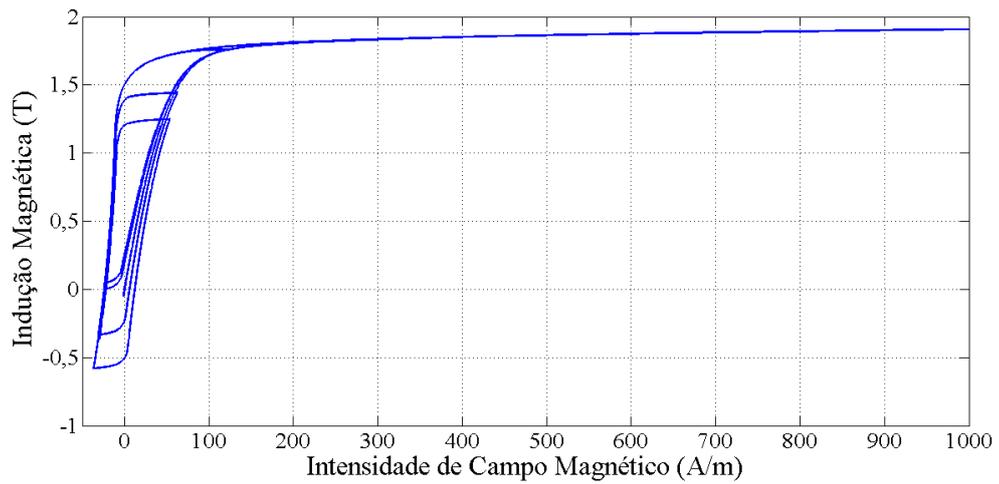
<sup>4</sup> A resposta do TC de proteção e a corrente secundária são, neste contexto, a mesma corrente.

Figura 7 - Corrente primária utilizada como entrada para o TC de proteção.



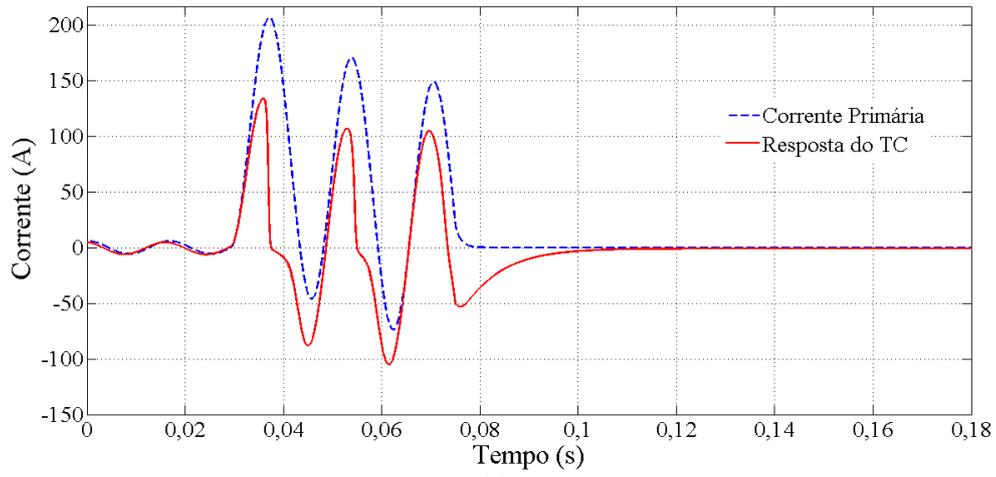
Fonte: Autora.

Figura 8 - Laço de histerese para o núcleo ferromagnético do TC de proteção.

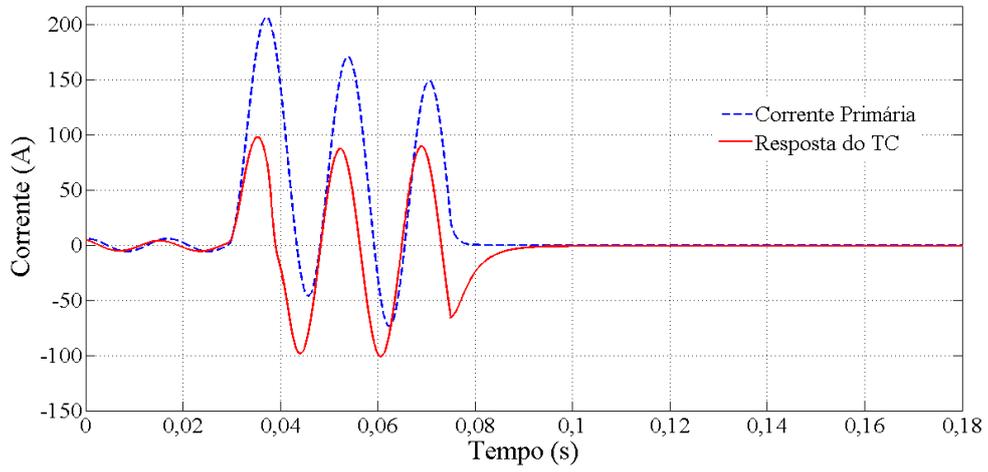


Fonte: Autora.

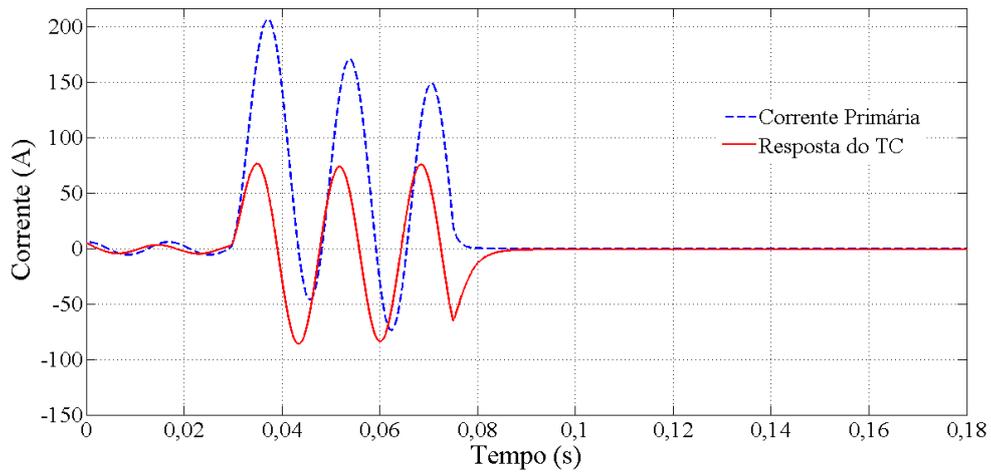
Figura 9 - Resposta para os TC de proteção com entreferros de comprimento efetivo (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora.

Na Figura 7, podem ser verificadas três regiões de operação para o TC de proteção que serão utilizadas para avaliar os resultados das simulações seguintes a partir de três regiões distintas: regime permanente, curto-circuito e pós curto-circuito. A condição de regime permanente é usada para observar o comportamento das forças e dos deslocamentos no estado normal de funcionamento do sistema. A região de regime permanente é importante principalmente para que as forças eletromagnéticas e os deslocamentos possam ser estimados anteriormente à condição transitória.

A região de curto-circuito, é utilizada para determinar as alterações ocorridas nas forças eletromagnéticas após o início do curto-circuito. Na região de curto-circuito estuda-se a pior condição de operação para o TC de proteção. Finalmente, a região de pós transitório é utilizada para determinar o comportamento após a interrupção do curto-circuito.

Para o gráfico da resposta do TC com 8 mm de entreferro, Figura 9.a, é possível observar que há indícios de saturação na corrente secundária do TC, o que prejudica a operação de dispositivos conectados ao secundário devido a erros na interpretação da resposta do TC.

Na Figura 9.b é apresentada a resposta para o TC de proteção com 16 mm de comprimento efetivo do entreferro no TC. Para o gráfico da resposta do TC com 16 mm de entreferro, é possível observar que a forma de onda da corrente secundária não possui indícios de saturação, como observado no gráfico da Figura 9.a. Constata-se também que a relação de transformação, principalmente na região de curto-circuito, foi afetada e possui maior erro em relação ao TC com 8 mm de entreferro.

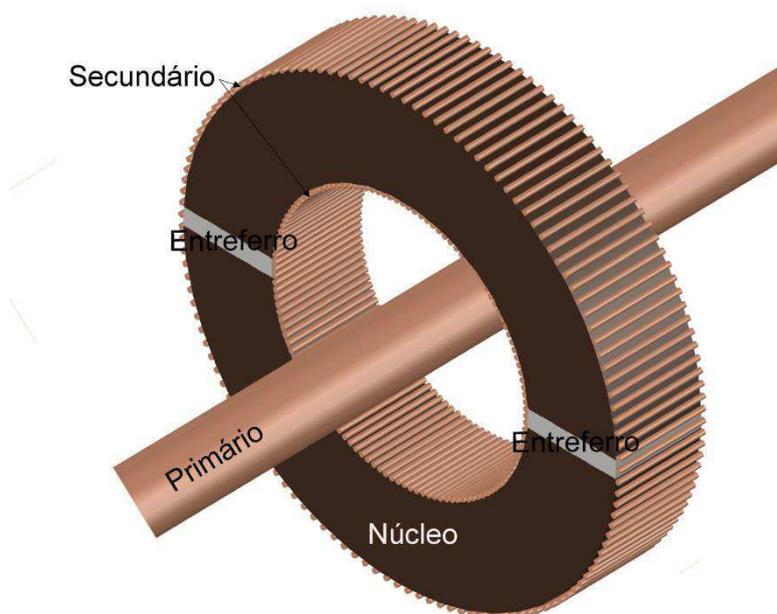
Na Figura 9.c é apresentada a resposta para o TC de proteção com 24 mm de comprimento efetivo do entreferro no TC. Para o gráfico da resposta do TC com 24 mm de entreferro, é possível observar que a forma de onda da corrente secundária também não possui indícios de saturação na corrente secundária. Constata-se que a relação de transformação, principalmente na região de curto-circuito, foi afetada e possui o maior erro em relação aos casos anteriores.

Após a obtenção da corrente primária, do laço de histerese e da resposta do TC de proteção, devem ser construídas as representações gráficas do TC de proteção com base nos dados apresentados na Tabela 4. Inicialmente, as representações gráficas para os TC de proteção com dois entreferros, variando o comprimento efetivo do entreferro em 8 mm, 16 mm e 24 mm são construídas. Em seguida, as representações gráficas para os TC

de proteção com diferentes distribuições de entreferro, mantendo o comprimento efetivo do entreferro em 16 mm, são construídas.

Na Figura 10 é apresentada a representação gráfica geral em 3D para o TC de proteção com dois entreferros. Para a representação gráfica apresentada na Figura 10 foi suprimida a parte frontal do enrolamento secundário com o intuito de promover uma melhor visualização do núcleo e entreferros do TC.

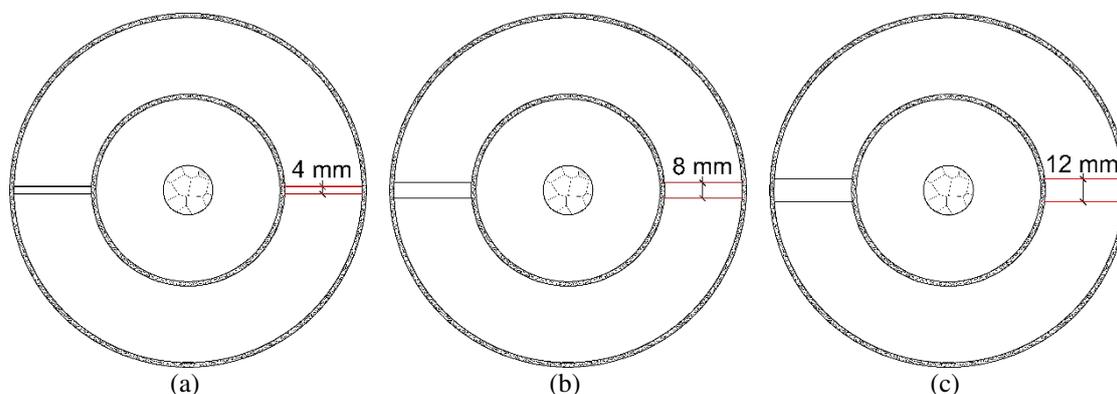
Figura 10 - Modelo gráfico geral em 3D para o TC de proteção com dois entreferros.



Fonte: Autora.

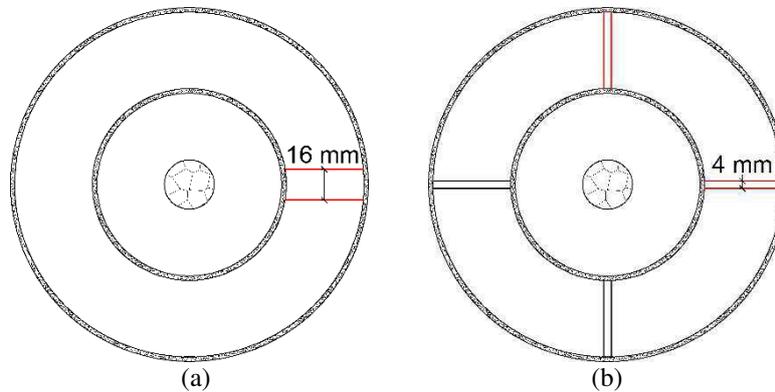
Os cortes transversais para cada um dos TC de proteção construídos estão apresentados na Figura 11 e na Figura 12.

Figura 11 - Corte transversal do modelo gráfico para TC de proteção com comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm.



Fonte: Autora.

Figura 12 - Corte transversal do modelo gráfico para TC de proteção com comprimento total do entreferro de 16 mm e com as variações a quantidade de entreferros de: (a) um entreferro e (b) quatro entreferros.



Fonte: Autora.

Inicialmente, devem ser observadas as forças eletromagnéticas e os deslocamentos nos entreferros a partir da variação do comprimento total do entreferro. Para o desenvolvimento desta etapa do trabalho, é necessário construir três representações gráficas para o TC de proteção com dois entreferros, as variações do comprimento do entreferro devem ser de 8 mm, 16 mm e 24 mm, como pode ser observado na Figura 11.

Na Figura 11 estão apresentados cortes transversais para as representações gráficas construídas. Observa-se que o TC de proteção com 8 mm de entreferro deve ser construído com dois entreferros de 4 mm, portanto com comprimento total do entreferro de 8 mm. Da mesma forma, o TC de proteção com 16 mm de entreferro possui dois entreferros de 8 mm, enquanto o TC de proteção com 24 mm de entreferro, possui dois entreferros de 12 mm.

Em seguida, devem ser construídas duas novas representações gráficas para que seja possível analisar as forças eletromagnéticas e os deslocamentos nos entreferros em diferentes distribuições de entreferro. As novas representações gráficas possuem um e quatro entreferros distribuídos simetricamente no núcleo ferromagnético e mantendo o comprimento total do entreferro em 16 mm. O comprimento total do entreferro de 16 mm, será estudado por apresentar menor nível de saturação, quando comparado ao TC com 8 mm de entreferro e por apresentar menor erro de amplitude e ângulo, quando comparado ao TC com 24 mm de entreferro. Um corte transversal para cada um dos TC de proteção construídos está apresentado na Figura 12.

Após a obtenção das correntes, do laço de histerese e a construção das representações gráficas, deve ser realizada a simulação computacional baseada no MEF no *software Comsol Multiphysics®* para determinação das forças eletromagnéticas e dos deslocamentos nos entreferros dos TC. Na realização das simulações computacionais, devem ser importadas no *software Comsol Multiphysics®*, as representações gráficas, as correntes primária e secundária e a curva de histerese para o núcleo ferromagnético do TC.

É fundamental que sejam desenvolvidas cinco simulações computacionais, uma para cada variação de entreferro. A primeira simulação é desenvolvida para o TC de proteção com dois entreferros e 8 mm de comprimento do entreferro. A segunda simulação é desenvolvida para o TC de proteção com dois entreferros e 16 mm de comprimento total do entreferro. A terceira simulação é desenvolvida para o TC com dois entreferros e 24 mm de comprimento total do entreferro. A quarta simulação é desenvolvida para o TC com um entreferro de 16 mm de comprimento. A última simulação é desenvolvida para o TC com quatro entreferros e 16 mm de comprimento total do entreferro.

As simulações devem ser efetuadas em três etapas bem definidas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, é necessário informar ao *software* as condições de contorno, as propriedades dos materiais e as físicas envolvidas para solucionar o problema. Na Tabela 5 são elencados os materiais, assim como suas propriedades, que devem ser utilizados. Os materiais são: cobre para os enrolamentos, ferro silício de grãos orientados 3% para o núcleo, nylon para os entreferros do TC e ar para o ambiente externo ao TC. Para o núcleo ferro magnético, é necessário utilizar o laço de histerese obtido na etapa anterior para caracterizar o material do núcleo.

Tabela 5 - Propriedades físicas dos materiais utilizados.

Material	Permissividade Elétrica	Condutividade Elétrica (S/m)	Permeabilidade Magnética	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Razão de Poisson
Cobre	1	6x10 <sup>7</sup>	1	8700	110	0,34
Ferro Silício GO	1	1,7x10 <sup>6</sup>	-	7659	211	0,25
Nylon	4	10	1	1150	2	0.4
Ar	1	10	1	-	-	-

Fonte: Comsol Multiphysics®, Beer e Dewolf (2011) e Branco (1985).

Ainda na etapa de pré-processamento, deve-se empregar as físicas: eletromagnética e mecânica. Para o correto emprego da física eletromagnética, são fornecidos como dados de entrada: as formas de onda das correntes primária e secundária, o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário e a dimensão do cobre utilizado nos enrolamentos. Já para a física mecânica, devem ser fornecidos como dados de entrada os pontos de fixação do TC, que representam os pontos de referência onde o deslocamento será zero. Para fixação do TC de proteção, foram selecionadas as bordas externas ao enrolamento secundário.

Após as definições das condições de contorno, das propriedades dos materiais e das físicas envolvidas, o *software* começa sua etapa de processamento. Nela, o *software* desenvolve os cálculos de acordo com os procedimentos e as condições de contorno pré-estabelecidas. Para a física magnética, as variáveis de saída obtidas nesta etapa da simulação são as distribuições das forças eletromagnéticas. Para a física mecânica, as variáveis de saída são as deformações e os deslocamentos ocasionados pela ação das forças eletromagnéticas nos entreferros do TC de proteção.

Terminada a etapa de processamento, os resultados para a determinação das forças eletromagnéticas e dos deslocamentos devem ser obtidos na etapa de pós-processamento. Os deslocamentos obtidos na etapa de pós-processamento devem ser utilizados como variável de entrada na rotina desenvolvida utilizando o *software Matlab*®.

A rotina desenvolvida no *software Matlab*® é novamente utilizada. No entanto, nesta etapa da metodologia, não é considerado o comprimento fixo do entreferro em 8, 16 ou 24 mm. Considera-se a forma de onda obtida nos deslocamentos para a composição do comprimento do entreferro. Por fim, as respostas transitórias obtidas com e sem considerar os deslocamentos podem ser comparadas graficamente.

A partir da comparação das respostas transitórias dos TC, é possível avaliar a influência das forças eletromagnéticas na resposta transitória dos TC. Com a descrição dos procedimentos e com a apresentação da fundamentação teórica é possível analisar e discutir os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita, assim como a análise e discussão dos resultados, estão apresentados no capítulo a seguir.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. São apresentados e comparados os resultados das simulações para cada um dos TC estudados.

### 5.1 TRANSFORMADORES DE CORRENTE COM 8, 16 E 24 MM DE ENTREFERRO

Os resultados obtidos para as forças eletromagnéticas, os deslocamentos e a nova resposta para os TC de proteção com dois entreferos e comprimento total do entreferro de 8, 16 e 24 mm são apresentados a seguir.

#### 5.1.1 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TC DE PROTEÇÃO COM DOIS ENTREFERROS

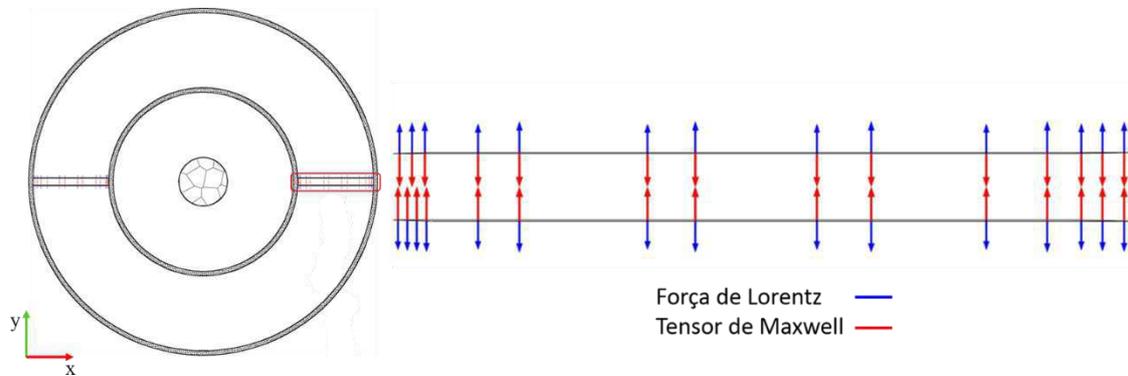
Para determinação das forças eletromagnéticas, força de Lorentz e tensor de Maxwell, nas bordas dos entreferos destacadas na Figura 11, foi utilizado o *software Comsol Multiphysics*®. A partir das representações gráficas, da corrente primária (Figura 7), do laço de histerese (Figura 8) e das respostas do TC obtidas para cada um dos TC de proteção foi possível determinar as forças eletromagnéticas nos entreferos dos TC.

As forças eletromagnéticas nas bordas do entreferro do TC de proteção com dois entreferos são apresentadas na Figura 13. Para melhor visualização das forças que atuam nas bordas dos entreferos é apresentado uma ampliação da região do entreferro destacada. Além disso, para identificação das forças, as forças de Lorentz são apresentadas em azul, enquanto o tensor de Maxwell é apresentado em vermelho.

Para a análise das forças eletromagnéticas foram consideradas as forças eletromagnéticas que atuam na direção do eixo de coordenadas  $y$ , uma vez que o comprimento do entreferro é alterado quando há variação na posição das bordas do entreferro no eixo  $y$ . Também foram verificados as componentes no eixo  $x$ , no entanto, as

componentes no eixo  $x$  não contribuem efetivamente na alteração do comprimento do entreferro.

Figura 13 - Contribuições de forças eletromagnéticas no entreferro do TC de proteção com 8 mm de entreferro.



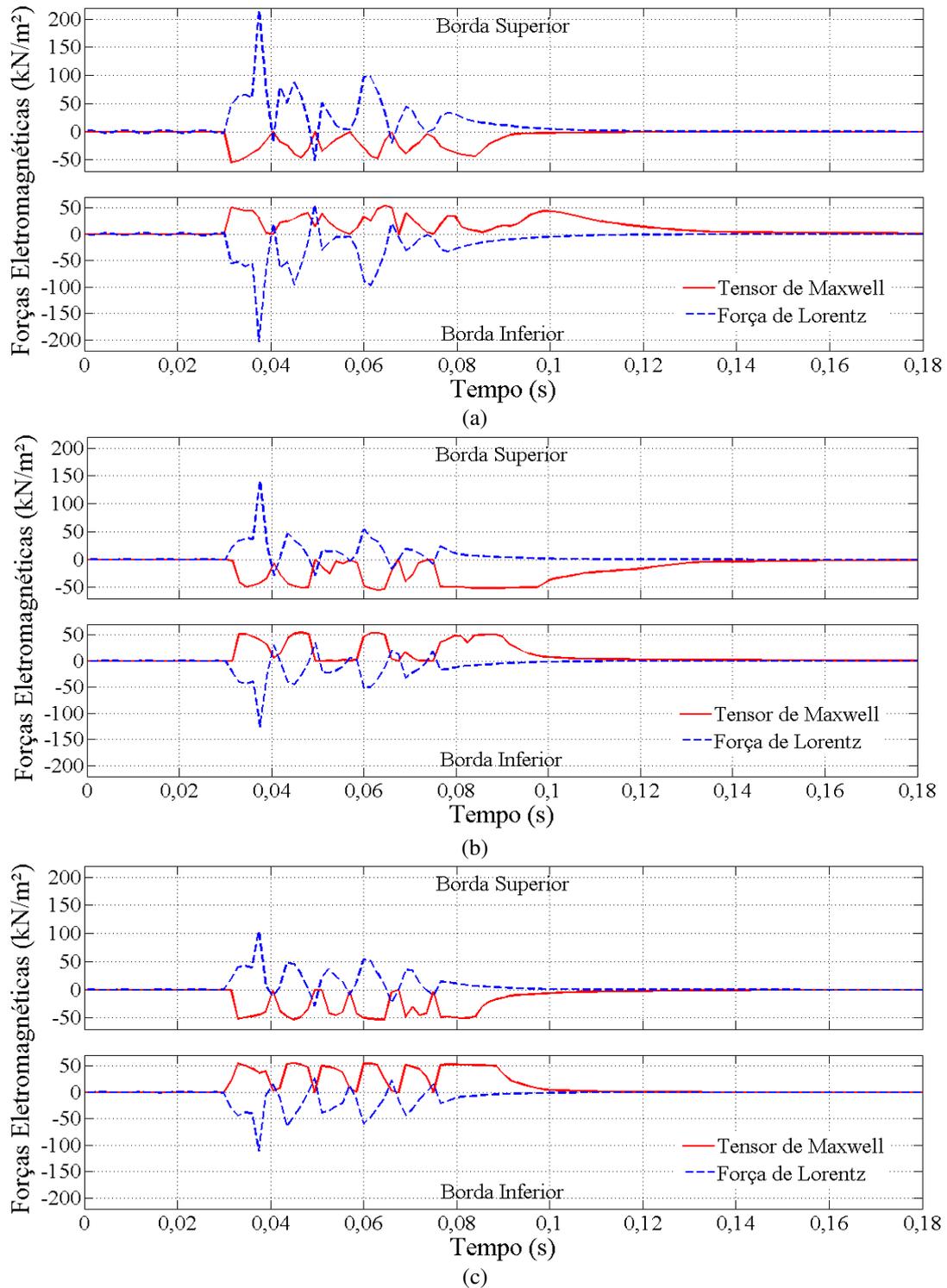
Fonte: Autora.

Na Figura 13 é possível observar as forças eletromagnéticas que atuam nos entreferros do TC de proteção com 8 mm de entreferro. As forças eletromagnéticas que atuam nos entreferros dos TC de proteção com 16 e 24 mm de entreferro não são apresentadas devido à similaridade com o resultado da Figura 13.

Observando as forças eletromagnéticas apresentadas na Figura 13, é possível constatar que a força de Lorentz ocorre no sentido positivo para a borda superior e no sentido negativo para a borda inferior. O comportamento oposto é verificado para o tensor de Maxwell, que tem sentido negativo na borda superior e sentido positivo na borda inferior. Portanto, a partir da Figura 13 é possível concluir que as forças de Lorentz contribuem para o afastamento das bordas do entreferro e o tensor de Maxwell contribui para a aproximação das bordas do entreferro no TC de proteção.

Para melhor visualização das forças eletromagnéticas para os TC de proteção, as forças em função do tempo de simulação são apresentadas na Figura 14. As forças eletromagnéticas são ainda separadas em: forças que atuam na borda superior do entreferro e forças que atuam na borda inferior do entreferro.

Figura 14 - Contribuições das forças eletromagnéticas por unidade de área no entreferro do TC de proteção com dois entreferros e comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm.



Fonte: Autora.

Na Figura 14, durante a região de regime permanente, a amplitude da força de Lorentz por unidade de área é de aproximadamente 2 kN/m<sup>2</sup>, enquanto a amplitude do tensor de Maxwell por unidade de área é de aproximadamente 1 kN/m<sup>2</sup>, em todos os casos

estudados. É importante destacar estes valores para que possa ser verificado o aumento da amplitude das forças eletromagnéticas devido à corrente de curto-circuito, na região de transitório.

Na região de transitório há uma grande variação do pico forças em relação ao regime permanente. As variações observadas foram de aproximadamente 100 vezes para o pico de amplitude das forças de Lorentz em ambas as bordas do TC de proteção com 8 mm de entreferro. Para o TC de proteção com 16 mm de entreferro, a variação das forças de Lorentz foi de 75 vezes. Enquanto para o TC de proteção com 24 mm de entreferro a variação foi de 50 vezes para as forças de Lorentz. Observou-se também variações de até 50 vezes o valor de pico em regime transitório para o tensor de Maxwell, quando comparado ao regime permanente, em todos os casos estudados.

Na região de pós transitório, é importante destacar que as forças eletromagnéticas não se extinguem imediatamente após a interrupção da corrente de curto-circuito, isso se deve, principalmente, à densidade de fluxo magnético que decai lentamente após a interrupção do curto-circuito.

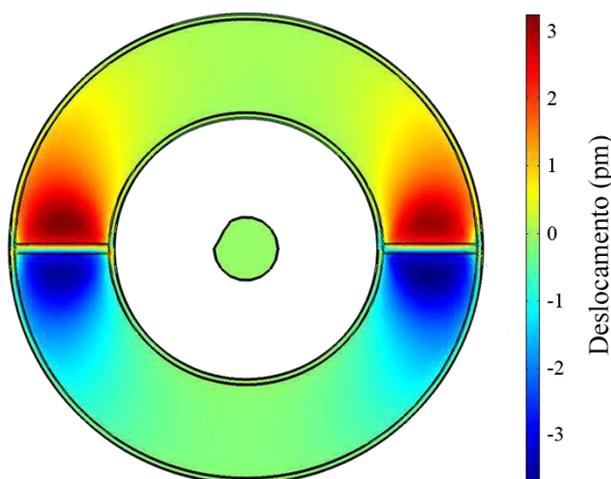
Considerando ambas as forças, observa-se que as forças de Lorentz possuem maior amplitude em relação ao tensor de Maxwell. Conseqüentemente, espera-se que os deslocamentos resultantes no entreferro possuam a direção das forças de Lorentz. Pois, os deslocamentos serão determinados a partir da ação das forças de Lorentz em conjunto com o tensor de Maxwell.

Para se verificar a influência das forças eletromagnéticas na resposta do TC de proteção, são estudadas então as deformações causadas ao entreferro devido à ação das forças eletromagnéticas. Para verificar as deformações no entreferro, torna-se necessário verificar os deslocamentos a partir da simulação utilizando a física mecânica. Os deslocamentos do entreferro que ocorrem devido à ação das forças eletromagnéticas são apresentados a seguir.

## 5.1.2 DESLOCAMENTOS NOS ENTREFERROS EM TC DE PROTEÇÃO COM DOIS ENTREFERROS

Os deslocamentos nos entreferros causados pela ação das forças eletromagnéticas apresentadas na seção anterior foram estudados. Na Figura 15 é apresentada a distribuição dos deslocamentos no TC de proteção com 8 mm de entreferro. Os demais casos foram suprimidos dada similaridade do comportamento entre os resultados. Os demais TC de proteção, com 16 e 24 mm de entreferro, tiveram deslocamentos com as mesmas direções, mas amplitudes diferentes. Por isso, os gráficos com os deslocamentos para todos os casos estudados são apresentados mais a diante.

Figura 15 - Deslocamento nos entreferros do TC de proteção com 8 mm de entreferro.



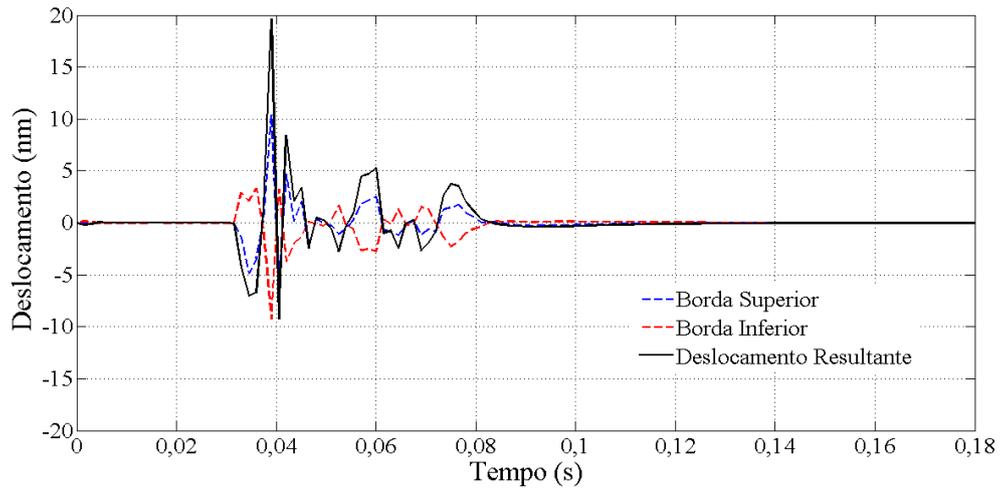
Fonte: Autora.

Ao observar o gráfico da Figura 15 é importante concluir que os deslocamentos resultaram em um aumento no comprimento do entreferro quando a borda superior se deslocar positivamente no eixo  $y$  e/ou quando a borda inferior se deslocar negativamente no eixo  $y$ . Além disso, para que o deslocamento resulte em uma diminuição no comprimento do entreferro, a borda superior deve se deslocar negativamente e/ou a borda inferior deve se deslocar positivamente.

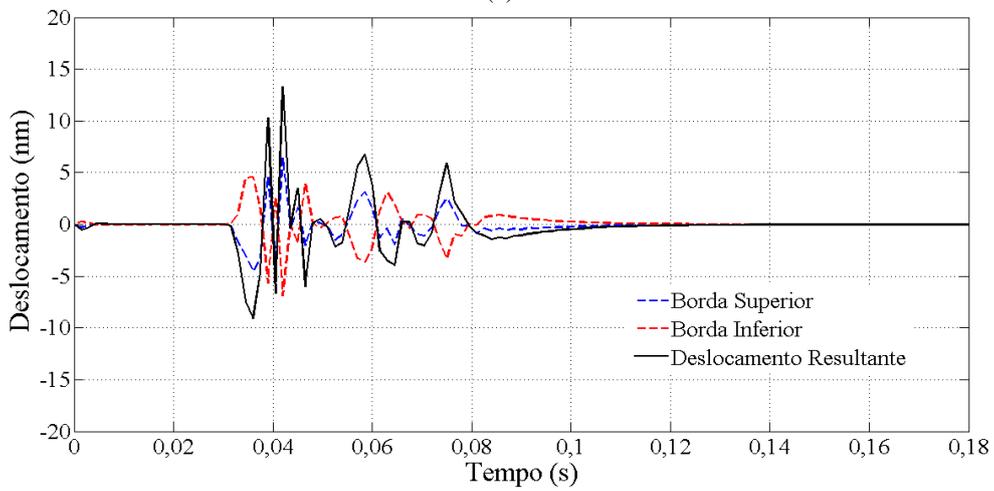
Na Figura 15, os deslocamentos nos entreferros ocorridos a partir das forças eletromagnéticas foram apresentados. Pode-se constatar que os deslocamentos ocorreram de forma a aumentar o comprimento total do entreferro, pois a borda superior do entreferro se deslocou positivamente, enquanto a borda inferior se deslocou

negativamente, resultando em um aumento do comprimento total do entreferro. Para determinar os valores das variações do comprimento do entreferro em função do tempo de simulação, os gráficos de deslocamento em função do tempo, para cada TC estudado, são apresentados na Figura 16.

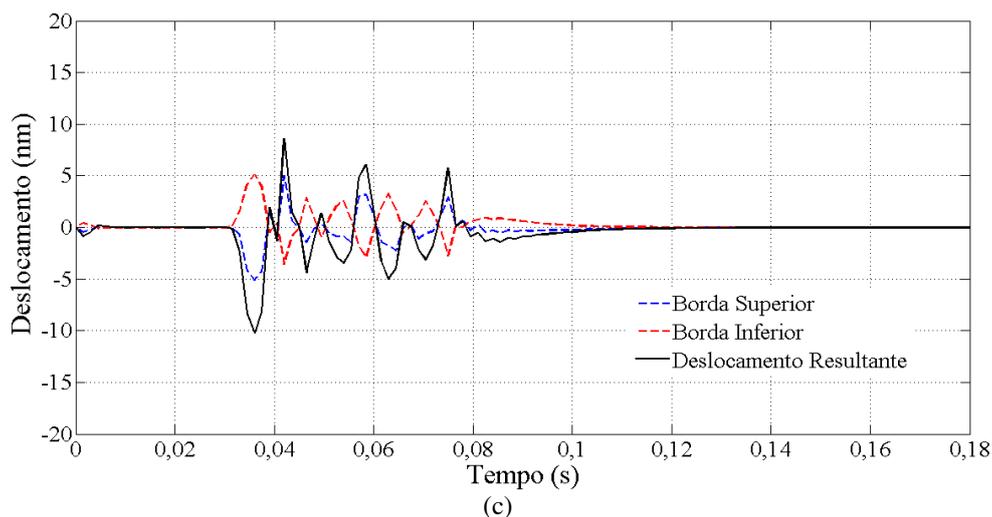
Figura 16 - Deslocamento nos entreferos do TC de proteção com dois entreferos e comprimento total do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm.



(a)



(b)



Fonte: Autora.

Observando os gráficos da Figura 16, é possível verificar que não houve deslocamentos consideráveis para a região de regime permanente. Os deslocamentos que aparecem no início da região de regime permanente são decorrentes da energização do TC de proteção. Pode-se verificar que os deslocamentos em regime permanente, quando comparados aos deslocamentos na região de curto-circuito, são desprezíveis.

Para a região de curto-circuito, observa-se uma grande variação dos deslocamentos. Os deslocamentos ocorreram para os três TC avaliados aumentando e diminuindo o comprimento do entreferro. Para que fosse possível identificar o aumento e a diminuição dos entreferros, foi adicionado aos gráficos da Figura 16 a forma de onda para o deslocamento resultante. No cálculo do deslocamento resultante foi levado em consideração o sentido dos deslocamentos em ambas as bordas do entreferro, assim como a amplitude dos deslocamentos, da seguinte forma: quando as bordas superior e inferior se deslocam no mesmo sentido, o deslocamento resultante é a subtração dos valores de amplitude dos deslocamentos de cada borda; quando as bordas superior e inferior se deslocam em sentido oposto, o deslocamento resultante é dado pela soma de amplitude dos deslocamentos de cada borda.

Para os casos avaliados na Figura 16, foram obtidos deslocamentos que tendem a fechar e a abrir o entreferro. O fechamento e abertura do entreferro ocorre devido à variação das forças eletromagnéticas nas bordas do entreferro. Verifica-se na Figura 16.a que o pico de deslocamento para o TC de proteção com 8 mm de entreferro foi positivo e igual a aproximadamente 20 nm. Na Figura 16.b, observa-se que o pico de deslocamento foi positivo e de aproximadamente 14 nm. E para a Figura 16.c, o pico de deslocamento foi de aproximadamente 10 nm, no entanto o deslocamento foi negativo.

De forma geral, os deslocamentos no entreferro foram proporcionais às variações das forças eletromagnéticas que os motivam. Comparando os resultados dos deslocamentos em alguns pontos do gráfico, constata-se que nos instantes de picos das forças de Lorentz, os deslocamentos foram positivos, enquanto nos instantes de decaimento das forças de Lorentz os deslocamentos tendem a ser negativos. Por exemplo, se comparado os instantes onde ocorreram os máximos para as forças de Lorentz, ou seja, para o TC com 8 mm de entreferro, a força máxima por unidade de área foi de aproximadamente 200 N/m<sup>2</sup>; para o TC com 16 mm de entreferro, a força máxima por unidade de área foi de aproximadamente 150 N/m<sup>2</sup>; enquanto para o TC com 24 mm de entreferro a força máxima por unidade de área foi de aproximadamente 100 N/m<sup>2</sup>. Para os instantes onde as forças de Lorentz por unidade de área foram máximas, observa-se que para o TC com 8 mm de entreferros os deslocamentos foram de aproximadamente 20 nm; enquanto para o TC com 16 mm de entreferro os deslocamentos foram de 10 nm; por último, para o TC com 24 mm de entreferro os deslocamentos foram de aproximadamente 2 nm. Logo, os deslocamentos foram aproximadamente lineares com a diminuição das forças eletromagnéticas. Era esperado que os deslocamentos se comportassem de forma linear dada a região de deformação na qual se encontram, é possível concluir que os deslocamentos não foram suficientes para atingir a região de deformação plástica.

Por fim, levando em consideração que o TC de proteção utilizado possui dois entreferros e que ambos se deslocaram de forma semelhante, pode-se extrapolar os resultados para os deslocamentos resultantes obtidos para um entreferro ao outro e assim, a variação total no comprimento do entreferro será duas vezes os deslocamentos resultantes apresentados.

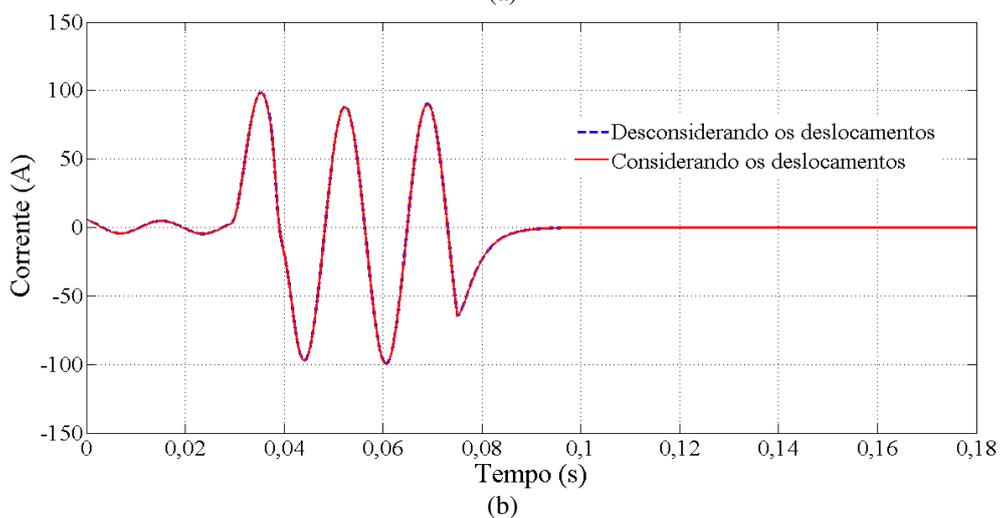
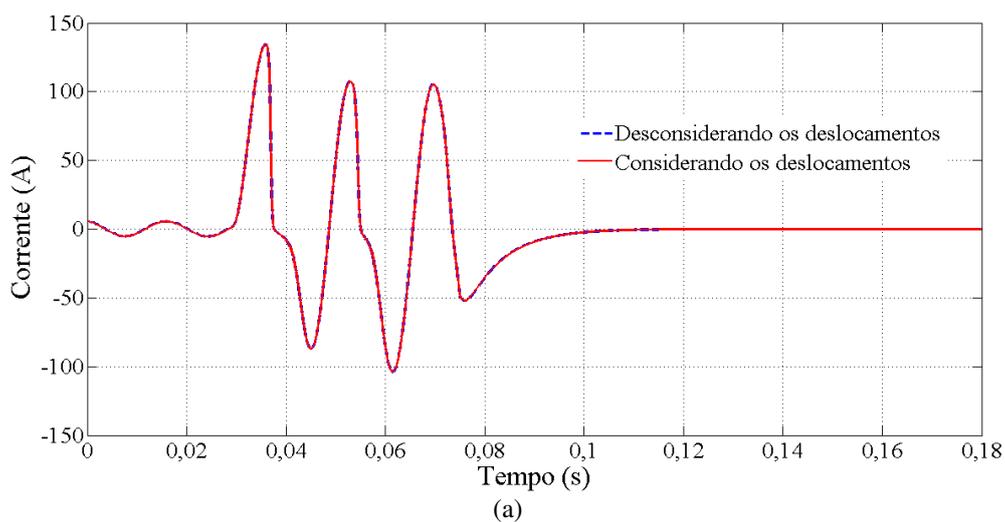
Para então avaliar a influência das forças eletromagnéticas é então calculada uma nova resposta para o TC de proteção, considerando os deslocamentos resultantes obtidos no cálculo do comprimento do entreferro. As novas respostas para os TC de proteção estudados estão apresentadas na seção seguinte.

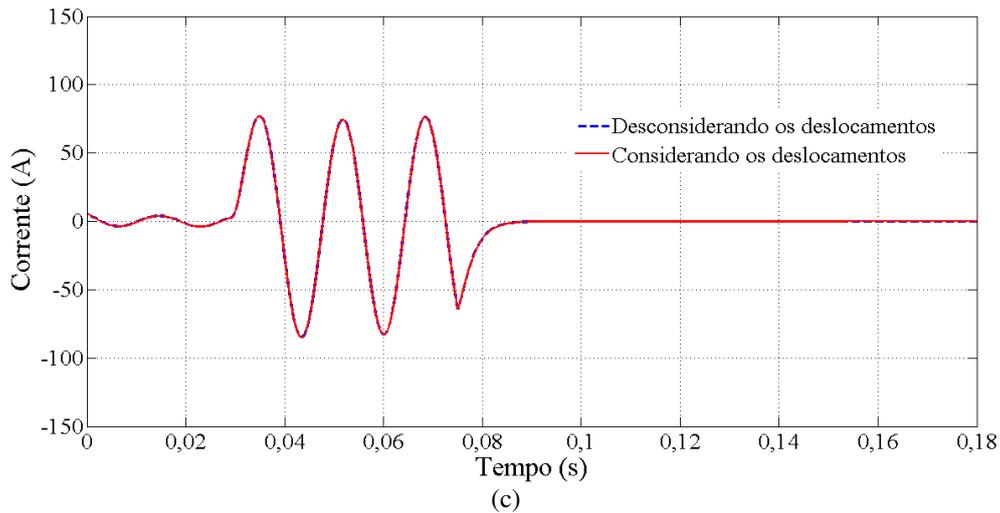
### 5.1.3 NOVA RESPOSTA PARA TC DE PROTEÇÃO COM DOIS

#### ENTREFERROS

Para obtenção das novas respostas para os TC de proteção com dois entreferros foram considerados os deslocamentos resultantes apresentados na Figura 16, os quais foram ocasionados pelas forças eletromagnéticas. Para o cálculo do comprimento do entreferro, foi considerada a curva do deslocamento resultante, que foi somada ao comprimento do entreferro. A nova resposta do TC é então comparada à resposta obtida na Figura 9. As novas respostas do TC de proteção são apresentadas na Figura 17.

Figura 17 - Resposta do TC de proteção com dois entreferros e comprimento do entreferro de (a) 8 mm, (b) 16 mm e (c) 24 mm, considerando os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas.





Fonte: Autora.

Conforme pode ser observado na Figura 17, os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas atuando nas bordas dos entreferros do TC de proteção, com dois entreferros, não influenciaram a resposta do TC de proteção em nenhum dos casos avaliados. É possível constatar que as formas de onda das novas respostas estão sobrepostas completamente à resposta apresentada na Figura 9. A sobreposição dos resultados na Figura 17 deve-se principalmente à ordem de comprimento dos deslocamentos obtidos. Os deslocamentos na ordem de nm não foram suficientes para afetar a resposta do TC de proteção.

A seguir, a comparação dos deslocamentos entre os TC de proteção, com diferentes distribuições de entreferros ao longo do núcleo ferromagnético, será apresentada. Como também, serão avaliados os TC de proteção com um, dois e quatro entreferros mantendo o comprimento total do entreferro em 16 mm.

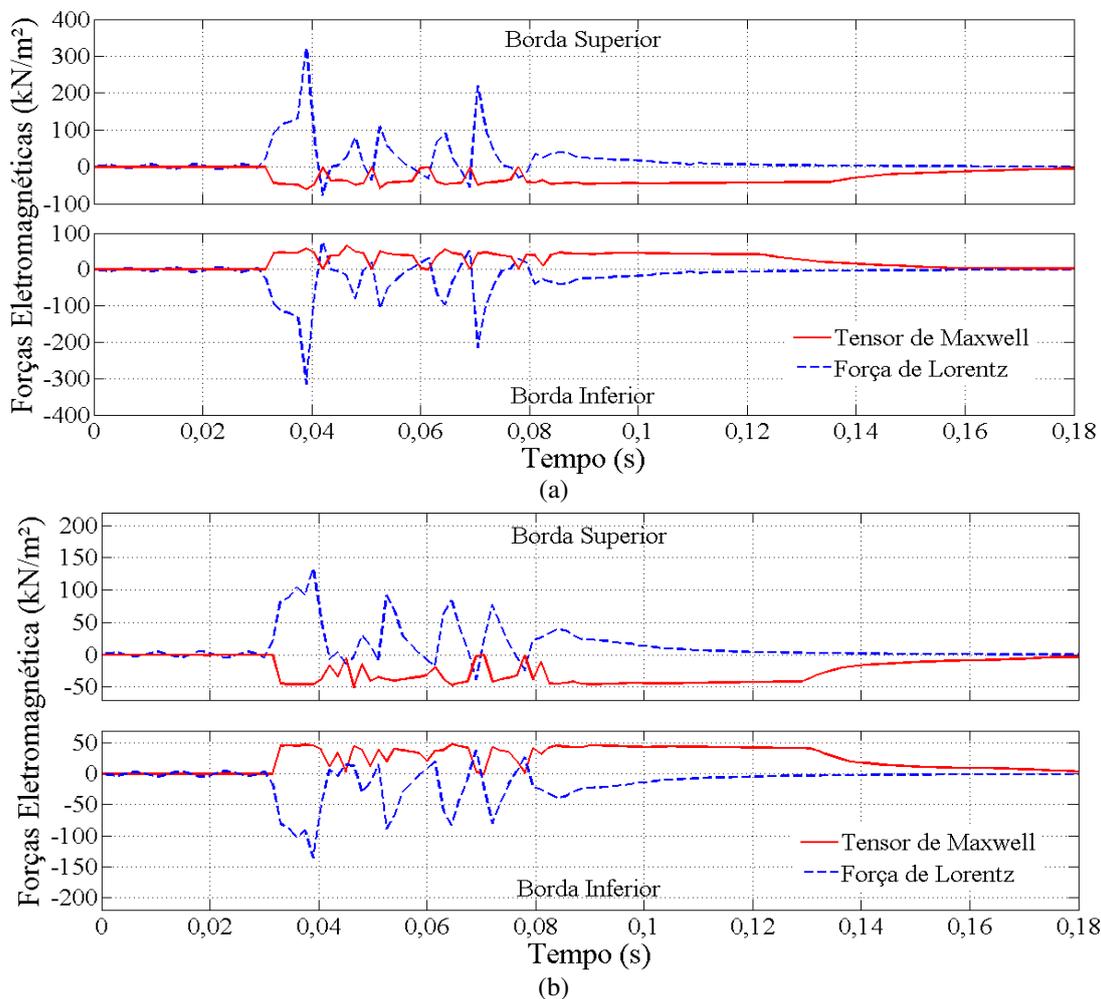
## 5.2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE COM UM, DOIS E QUATRO ENTREFERROS

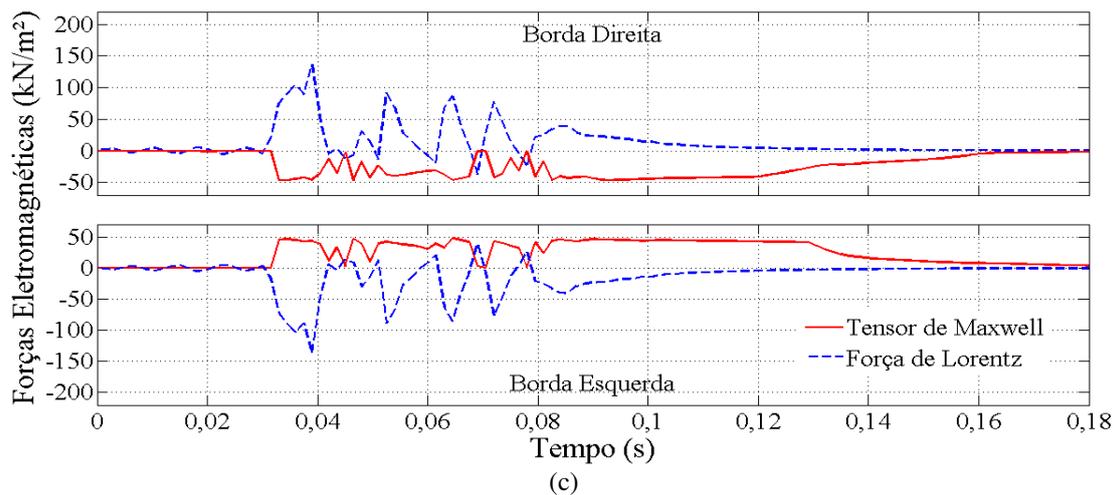
As análises são apresentadas para TC de proteção com um e quatro entreferros com comprimento total de 16 mm. Também é feita a comparação dos resultados com o TC de proteção com dois entreferros e comprimento de 16 mm do entreferro, já apresentado.

## 5.2.1 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TC DE PROTEÇÃO COM UM E QUATRO ENTREFERRO

Seguindo a mesma metodologia apresentada na seção 5.1, as forças eletromagnéticas nas bordas do entreferro do TC de proteção com um e quatro entreferros função do tempo de simulação são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Contribuições de forças eletromagnéticas no entreferro do TC de proteção para (a) um entreferro, (b) quatro entreferros forças no eixo y e (c) quatro entreferros forças no eixo x, para um comprimento total do entreferro de 16 mm.





Fonte: Autora.

Para a análise das forças eletromagnéticas no TC de proteção com quatro entreferros, além das forças eletromagnéticas que atuam na direção do eixo de coordenadas  $y$ , também foram avaliadas as forças eletromagnéticas na direção do eixo  $x$  para o entreferro com orientação vertical, uma vez que o comprimento do entreferro vertical é alterado quando há variação na posição das bordas do entreferro no eixo  $x$ .

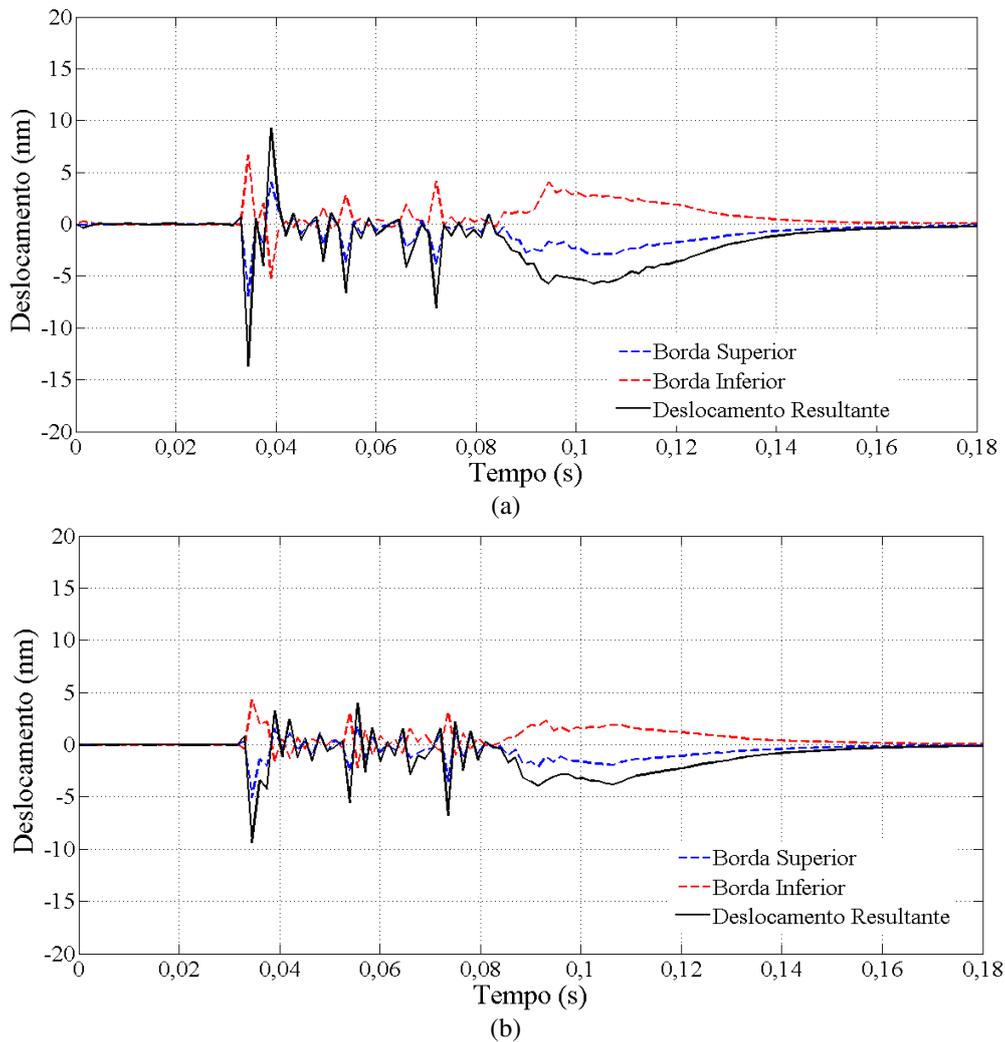
Para os gráficos apresentados na Figura 18, assim como nos casos anteriores, nos primeiros instantes na região de regime permanente, a força de Lorentz possui amplitude em torno de  $2 \text{ kN/m}^2$ , enquanto o tensor de Maxwell possui amplitude em torno de  $1 \text{ kN/m}^2$ . Na região de transitório, as variações observadas foram de aproximadamente 150 vezes para o pico de amplitude das forças de Lorentz em ambas as bordas do TC de proteção com um entreferro. Para o TC de proteção com quatro entreferros, a variação das forças de Lorentz foi de 70 vezes nos dois entreferros avaliados. O tensor de Maxwell apresentou variações de até 50 vezes o valor do pico da amplitude em regime transitório, quando comparado ao regime permanente para todos os casos apresentados.

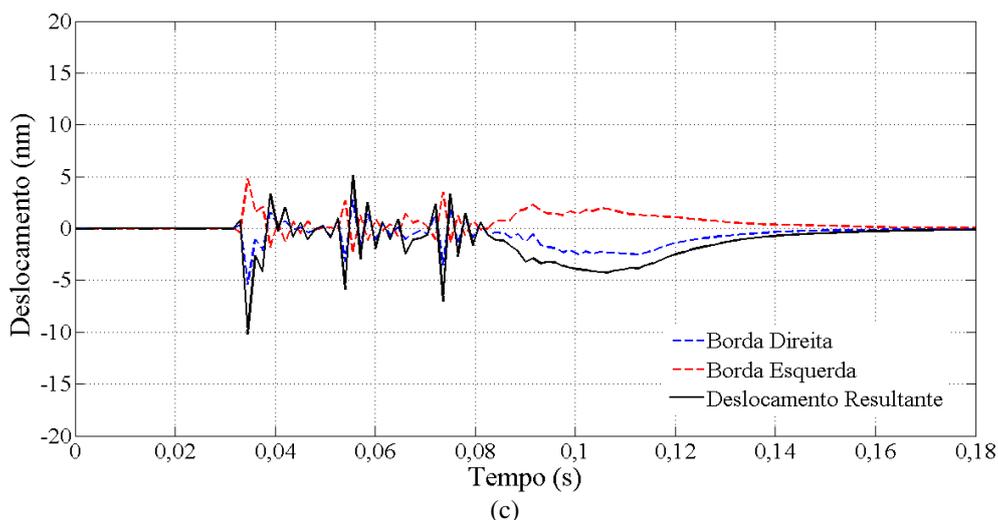
Para verificar a contribuição das forças estudadas na deformação do entreferro, serão apresentados, a seguir, os deslocamentos causados pela ação das forças eletromagnéticas.

## 5.2.2 DESLOCAMENTOS NOS ENTREFERROS EM TC DE PROTEÇÃO COM UM E QUATRO ENTREFERROS

Os deslocamentos obtidos para os entreferrros do TC de proteção com um e quatro entreferrros são apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Deslocamento nos entreferrros do TC de proteção com (a) um entreferro, (b) quatro entreferrros deslocamento no eixo y e (c) quatro entreferrros deslocamento no eixo x.





Fonte: Autora.

Observando os gráficos da Figura 19, é possível verificar que para a região de regime permanente, não houve deslocamentos consideráveis. Os deslocamentos que aparecem no início da região de regime permanente são decorrentes da energização do TC de proteção. Pode ser verificado que, para a região de regime permanente, os deslocamentos decorrentes da energização do TC de proteção aumentaram com o aumento do comprimento individual do entreferro, pois, o TC com um entreferro de 16 mm se deslocou minimamente na energização do TC, porém o TC com quatro entreferros não se deslocou. Era esperado que o TC com um entreferro apresentasse os menores deslocamentos, pois a assimetria na sua geometria o impede de apresentar deslocamentos maiores.

Para os casos avaliados na Figura 19, foram obtidos deslocamentos que tendem a fechar e a abrir o entreferro, esse comportamento dá-se principalmente devido à variação das forças eletromagnéticas nas bordas do entreferro. Na Figura 19.a, é possível constatar que o pico de deslocamento para o TC de proteção com um entreferro foi negativo e igual a aproximadamente 13 nm. Na Figura 19.b constata-se que o pico de deslocamento para o entreferro com direção horizontal foi também negativo e de aproximadamente 10 nm. Assim como, na Figura 19.c, o pico de deslocamento para o entreferro com direção vertical foi negativo e de aproximadamente 10nm.

Novamente, conclui-se que os deslocamentos foram aproximadamente lineares com a diminuição das forças eletromagnéticas. Por fim, considerando que o TC de proteção utilizado possui quatro entreferros e que os deslocamentos para os entreferros não apresentados foram semelhantes aos deslocamentos apresentados na Figura 19.b e Figura 19.c, pode-se extrapolar os resultados para os deslocamentos resultantes obtidos

para os demais entreferros, então a variação total no comprimento do entreferro será duas vezes os deslocamentos resultantes apresentados.

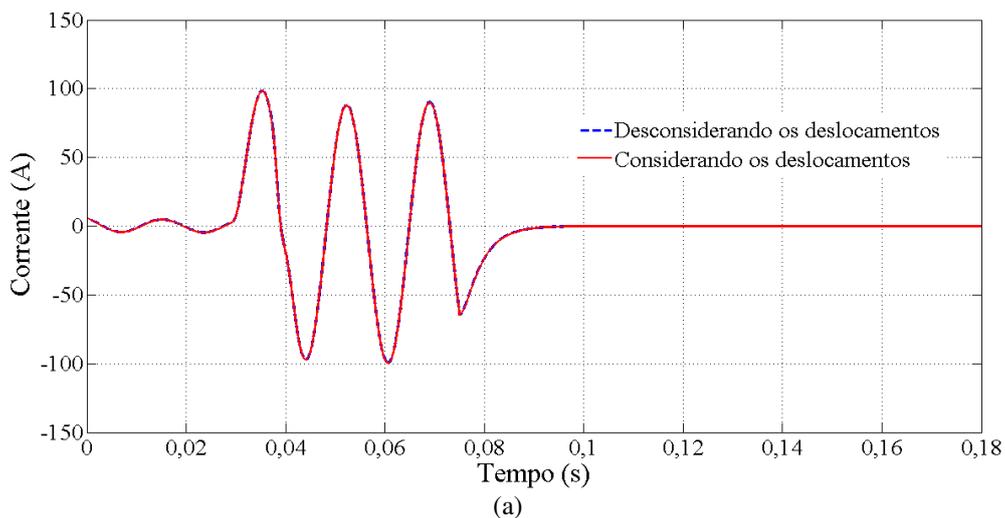
Para então avaliar a influência das forças eletromagnéticas na resposta do TC de proteção com um e quatro entreferros, é então calculada uma nova resposta para o TC de proteção, considerando os deslocamentos resultantes obtidos no cálculo do comprimento do entreferro. As novas respostas para os TC de proteção estudados serão apresentadas a seguir.

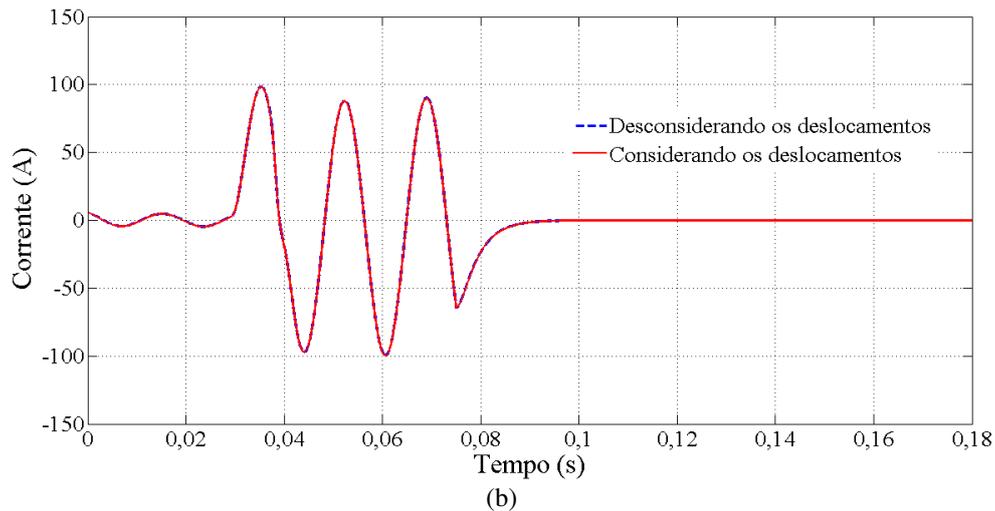
### 5.2.3 NOVA RESPOSTA PARA TC DE PROTEÇÃO COM UM E

#### QUATRO ENTREFERROS

Da mesma forma como avaliado para a seção 5.1.3, as novas respostas para os TC de proteção, com um e quatro entreferros, consideram os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas no cálculo do comprimento do entreferro. A nova resposta do TC é então comparada à resposta obtida na primeira etapa dos resultados, para cada um dos casos e as formas são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Resposta do TC de proteção com (a) um e (b) quatro entreferros e comprimento do entreferro de 16 mm, considerando os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas.





Fonte: Autora.

Conforme pode ser observado, os deslocamentos ocasionados pelas forças eletromagnéticas, atuando nas bordas dos entreferros do TC de proteção, com um e quatro entreferros, não influenciaram a resposta do TC de proteção em nenhum dos casos avaliados. É possível constatar que as formas de onda das novas respostas estão sobrepostas completamente à resposta apresentada na Figura 9.b. A sobreposição dos resultados deve-se principalmente à ordem de comprimento dos deslocamentos encontrados. Os deslocamentos na ordem de nm não foram suficientes para afetar a resposta do TC de proteção.

A partir dos resultados apresentados, constatou-se que as forças eletromagnéticas, que atuam nos entreferros dos TC de proteção avaliados, não causaram deslocamentos no entreferro que pudessem alterar significativamente o comprimento do entreferro, afim de modificar a resposta do TC de proteção, para as condições de regime permanente e curto-circuito estudadas. Portanto, é possível concluir que as forças eletromagnéticas não provocaram deslocamentos nos entreferros que influenciariam a resposta do TC de proteção.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a avaliação da influência das forças eletromagnéticas nos entreferros de TC de proteção. Para obtenção dos resultados desta pesquisa foram utilizadas simulações computacionais baseadas no MEF. A avaliação da influência das forças eletromagnéticas foi desenvolvida a partir da obtenção das forças eletromagnéticas nos entreferros de TC de proteção e da obtenção dos deslocamentos provocados por essas forças nas bordas dos entreferros, sendo verificadas as variações no comprimento dos entreferros a partir dos deslocamentos.

Com os resultados obtidos, pôde-se:

- determinar as forças eletromagnéticas nos entreferros de TC de proteção, com comprimento total do entreferro de 8 mm, 16 mm e 24 mm e com um, dois e quatro entreferros;
- determinar os deslocamentos nos entreferros de TC de proteção, com comprimento total do entreferro de 8 mm, 16 mm e 24 mm e com um, dois e quatro entreferros;
- obter novas respostas para os TC de proteção considerando os deslocamentos;
- determinar a influência das forças eletromagnéticas na resposta do TC de proteção.

Em análises mais específicas dos resultados, pôde-se concluir que:

- com o aumento do comprimento do entreferro, as forças eletromagnéticas diminuíram sua amplitude máxima para as forças de Lorentz, enquanto o tensor de Maxwell manteve a mesma amplitude;
- os deslocamentos, por sua vez, diminuíram, resultando em um menor aumento no comprimento efetivo do entreferro;
- com o aumento da quantidade de entreferros distribuídos no núcleo do TC de proteção, as forças eletromagnéticas foram melhor distribuídas ao longo do núcleo e com isso a amplitude máxima das forças de Lorentz diminuiu;
- Os deslocamentos, por sua vez, aumentaram em valor absoluto, diminuído o comprimento do entreferro com o aumento do número de entreferros no núcleo;

- finalmente, foi observado que as forças eletromagnéticas que atuam no entreferro em um TC de proteção não influenciaram a resposta do TC para a condição de curto-circuito avaliada.

Os resultados obtidos ajudam a fortalecer a utilização de TC com entreferros nos sistemas elétricos e vai mais adiante no estudo da fragilidade mecânica abordada no trabalho de Bozoki e outros de 1990.

Além disso, pelo que foi exposto neste trabalho, as simulações computacionais são uma ótima ferramenta para as investigações das características eletromecânicas do TC com entreferro em regime transitório de operação.

## TRABALHOS FUTUROS

Algumas linhas de investigação que podem ser seguidas a partir dos estudos apresentados neste trabalho estão listadas abaixo:

- Avaliar a influência dos componentes harmônicos da corrente de curto-circuito na resposta do TC de proteção;
- Avaliar as forças eletromagnéticas nos enrolamentos do TC de proteção;
- Avaliar a influência das forças eletromagnéticas presentes nos enrolamentos e nos entreferros na fragilidade mecânica do TC de proteção.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 6856:2015 Transformador de Corrente - Especificação e Ensaios. *Norma Técnica*.
- Ajaei, F. B., Sanaye-Passand, M., Davarpanah, M., Rezaei-Zare, A., & Iravani, R. (October de 2011). Compensation of the Current-Transformer Saturation Effects for Digital Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26.
- Annakkage, U. D., McLaren, P. G., Dirks, E., Jayasinghe, V., & Parker, A. D. (2000). A Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Arteche. (s.d.). *Transformadores de Corrente de Alta Tensão, Catálogo Comercial*. Acesso em dezembro de 2017, disponível em Grupo Arteche: <https://www.artech.com/pt/produtos/transformadores-de-corrente>
- Batista, T. d. (2015). Transformadores de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina Utilizados para Serviços de Medição e Proteção em Sistemas Elétricos. Campina Grande, PB: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande.
- Beer, F. P., & Dewolf, J. T. (2011). *Mecânica dos Materiais* (5ª ed.). Porto Alegre: Amgh.
- Bozoki, B., Calhoun, H. J., Gadsden, C. M., Berdy, J., Hunt, F. B., Wentz, E. C., . . . Walton, J. W. (November de 1990). Gapped Core Current Transformer Characteristics and Performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5.
- Branco, C. A. (1985). *Mecânica dos Materiais*. Porto: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Callister Junior, W. (1994). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (3 ed.). John Wiley & Sons.
- Conner, E. E., Greb, R. G., & Wentz, E. C. (1972). Control of Residual Flux in Current Transformers. *IEEE PES Winter Meeting*. New York, NY: Power System Relaying Committee of IEEE Power Engineering Society.
- Dampé, J. L., & Arrojo, C. D. (1999). An Alternative Method for Testing Tansient Response of Protective Current Transformers. *Transmission and Distribution Conference*. IEEE.
- Ferreira, T. V. (2007). Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos. *Dissertação de Mestrado*. Campina Grande, PB: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande.
- FEYZI, M. R., & SABAH, M. (2008). Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*.
- Fitzgerald, A. E., Umans, S. D., & Kingsley Jr, C. (2002). *Electric Machinery* (6th Edition ed.). New York, NY, United States: Mc Graw Hill.
- Fonseca, J. S., Luciano, G., & Toledo, G. L. (1985). *Estatística Aplicada*. São Paulo, SP: Atlas.

- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Upper Saddle River, NJ, United States: Prentice Hall.
- Guerra, F. C. (2007). Modelos de Transformador de Corrente para Estudos em Baixas Frequências. *Tese de Doutorado*. Campina Grande, PB, Brasil: Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande.
- Hyun-Mo, A., Lee, B. J., Kim, C., Shin, H., & Hahn, S. (2012). Finite element modeling of power transformer for short-circuit electromagnetic force analysis. *International Conference on Electrical Machines and Systems*.
- IEEE Power System Relaying Committee. (1976). *Transient Response of Current Transformers*. IEEE Publication 76CH 130-4 PWR.
- Jiles, D. C., & Atherton, D. L. (1986). Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 61, p. 48.
- Jiles, D. C., Atherton, J. B., & Devine, M. K. (1992). Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*.
- Jiles, D., & Atherton, D. (1983). Ferromagnetic hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 19(5), 2183 - 2185.
- Kang, Y. C., Park, J. Y., Lee, B. E., Jang, S. I., & Kim, Y. G. (2008). Compensation of an Air Gapped Current Transformer Considering the Hysteresis Characteristics of the Core. *Developments in Power System Protection*. IEEE.
- Kezunovic, M., Fromen, C., & Phillips, F. (1994). Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9.
- Korponay, N. E. (April de 1978). Nongapped Cores, Antiremanence gapped Cores or Linear Cores for Current Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97.
- Lesniewska, E., & Jalmuzny, W. (2008). Influence of the Number of Core Air Gaps on Transient State Parameters of TPZ Class Protective Current Transformers. *IET Science, Measurement and Technology*.
- Luxenhurger, R., Schegner, P., & Igel, M. (2004). ATP/EMTP Model of TPX, TPY and TPZ Current Transformers for Realistic Testing of Protection Devices. *Developments in Power System Protection*. IEEE.
- Muthumuni, D., McLaren, P. G., Chandrasena, W., & Parker, A. (2001). Simulation Model of an Air Gapped Current Transformer. *Power Engineering Society Winter Meeting*. IEEE.
- Najdenkoski, K., & Manov, D. (1998). Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuit. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 17.
- Pereira, F. A. (2012). Modelagem de Transformadores de Corrente e Correção de Correntes Distorcidas no Enrolamento Secundário. *Dissertação de Mestrado*. Campina Grande, PB: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande.

- Pereira, F. A., Guerra, F. C., Costa, E. G., & Souza, B. A. (June de 2014). A Method for Correcting Distorted Current Waveforms at Air-Gapped Current Transformers. *IEEE Latin America Transactions*.
- Pereira, F. A., Guerra, F. F., Sousa, B. A., Santos, E. A., Brito, N. D., & Carmo, U. A. (2016). Real Time Compensation Algorithm for Air-Gapped Current Transformers Saturation Effects. *Electric Power Systems Research*.
- Pinheiro, M. (Novembro de 2016). Caracterização e Modelagem da Histerese e das Perdas Magnéticas em Aços Elétricos Através do SCaMMa. *Dissertação de Mestrado*. Goiânia, GO, Brazil: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.
- Rafajdus, P., Bracini, P., Hrabovcova, V., Saitz, J., & Kankula, L. (2010). Current Transformer Analysis under Transient Conditions. *XIX International Conference on Electrical Machines*. Roma: IEEE.
- Rao, T. (1979). *Power System Protection: Static Relays*. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill.
- Sadiku, M. N. (2012). *Elementos de Eletromagnetismo* (5 ed.). (J. Lisboa, & L. Loder, Trads.) Porto Alegre: Bookman.
- Sadowski, N., Batistela, N. J., Bastos, J. P., & Lajoie-Mazenc, M. (2002). An inverse Jiles–Atherton model to take into account hysteresis in time–stepping finite-element calculations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2), 797 - 800.
- Santos, E. M. (2011). Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção. *Dissertação de Mestrado*. Santa Maria, RS, Brasil: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria.
- Schettino, B. M. (2012). Uma Proposta para Detecção e Compensação dos Efeitos Causados pela Saturação dos Núcleos dos Transformadores de Corrente Utilizados em Circuitos de Proteção. *Dissertação de Mestrado*. Juiz de Fora: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Silva, T. L., Luciano, B. A., Freire, R. C., & Albuquerque, T. C. (2016). Estudos Analítico e Computacional de Sensores de Corrente Elétrica com Núcleos Toroidais. *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Natal.
- Slemon, G. R. (1974). *Equipamentos Magnetelétricos - Transdutores, Transformadores e Máquinas - Vol. 1*. São Paulo: LTC.
- Tran-Quoc, T., & Pierrat, L. (1995). Influence of Random Variables on Protective Current Transformers Transient Performance. *Conference on Digital Power System Simulators - ICDS '95*. Texas.
- Tziouvaras, D., McLaren, P., Alexander, G., Dawson, D., Ezstergalyos, J., Fromen, C., . . . Zocholl, S. (2000). Mathematical models for current, voltage and coupling capacitor voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Vanderleck, J. M., Allen, D. W., Berdy, J., Burke, C. F., Hayden, S. R., Kotheimer, W. C., . . . Woods, C. A. (1977). *Transient Response of Current Transformers*. IEEE.
- Yun-Qiu, T., Jing-Qiu, & Zi-Hong, X. (1990). Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26.

# ANEXO

Até o presente momento e durante o desenvolvimento da pesquisa, alguns artigos relacionados à pesquisa apresentada foram publicados ou submetidos para publicação. Os artigos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 6 - Artigos publicados e submetidos para publicação.

Artigos	Autores	Título	Congresso ou Revista	Ano
Publicado em anais de congresso	<b>FERREIRA, R. S. A.</b> COSTA, E. G. ARAUJO, J. F. ANDRADE, F. L. M. GUERRA, F. C. F.	Electromagnetic forces behavior in the air gaps of a protective current transformer	ISH	2017
Submetido para publicação em revista	<b>FERREIRA, R. S. A.</b> COSTA, E. G. ARAUJO, J. F. ANDRADE, F. L. M. GUERRA, F. C. F.	Influence of electromagnetic forces in the gaps of a protective current transformer	IET Science, Measurement & Technology	2017

Fonte: Autor.

Ainda relacionado aos trabalhos publicados no âmbito desta dissertação, destaca-se o trabalho publicado nos anais do *20<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering*, ISH 2017, que foi premiado com o prêmio de melhor artigo estudantil na área de estudos relacionados a campos eletromagnéticos.