



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL MENDONÇA ROCHA BARROS

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CAUSADOS POR  
CORRENTES DE *INRUSH* UTILIZANDO SIMULAÇÕES  
MULTIFÍSICAS

CAMPINA GRANDE  
2015

Rafael Mendonça Rocha Barros

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CAUSADOS POR  
CORRENTES DE *INRUSH* UTILIZANDO SIMULAÇÕES  
MULTIFÍSICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
ao Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:  
Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande  
2015

Rafael Mendonça Rocha Barros

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CAUSADOS POR  
CORRENTES DE *INRUSH* UTILIZANDO SIMULAÇÕES  
MULTIFÍSICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
ao Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em:     /     /

**Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

Dedico este trabalho à minha mãe, Eunice.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Sérgio e Eunice, por nunca terem descuidado da minha educação.

À minha namorada, Marcela, por compreender minha ausência e me dar forças durante todo o curso de graduação.

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da UFCG, Jalberth e Filipe, pela ajuda e apoio incondicional durante todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Tarso Vilela, pela orientação e disponibilidade irrestrita, não apenas no escopo deste trabalho, mas de muitos outros realizados ao longo da minha graduação.

Ao professor Edson Guedes, que apesar de não ter participado diretamente deste trabalho, tem sido meu orientador durante os últimos 4 anos, e contribuiu de maneira fundamental para minha formação acadêmica.

Ao professor Francisco das Chagas, pelos esclarecimentos a respeito da determinação dos valores de corrente de *Inrush* em transformadores de potência.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz ao longo do curso, por tornarem a caminhada até aqui mais suave e divertida.

*“O primeiro passo em direção ao sucesso é o conhecimento.”*

Nikola Tesla

## RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar os esforços eletromecânicos que atuam nos enrolamentos de um transformador de potência no momento da energização do equipamento. Métodos analíticos e computacionais foram utilizados para determinação dos esforços eletromecânicos em um transformador trifásico de 100 MVA. Pela análise dos resultados foi possível verificar que, apesar da corrente de energização, também conhecida como corrente de *Inrush*, possuir amplitude muito inferior a corrente de curto-circuito trifásico, ela é capaz de gerar forças no transformador de mesma ordem de grandeza daquelas geradas pelo curto-circuito. Além disso, também foi verificado que a utilização de simulações computacionais, baseadas no Método dos Elementos Finitos, é mais adequada, quando comparada com a modelagem analítica dos esforços eletromecânicos. Assim, neste trabalho é apresentada uma contribuição para um tema ainda escasso na literatura, bem como uma metodologia que permite a avaliação dos esforços eletromecânicos em transformadores, causados por correntes de energização, utilizando simulações multifísicas, a qual pode auxiliar na etapa de projeto do equipamento.

Palavras-chave: Correntes de Inrush. Esforços eletromecânicos. Transformadores de potência.  
Simulações Multifísicas.

## ABSTRACT

This study aims to investigate the electromechanical efforts acting in power transformer windings when the equipment is turned on. Analytical and computational methods were used to determine the electromechanical efforts in a three-phase 100 MVA transformer. By the results analyzing, it was observed that, despite the inrush current, has much lower amplitude than the three-phase short-circuit current, it was able to generate forces in the transformer of the same order of magnitude from those generated by the short circuit. Moreover, it was also verified that computer simulations, based on the Finite Element Method, are more suitable, when compared with the analytical modeling of electromechanical efforts. Thus, this work presents a contribution to a topic still scarce in the literature, as well as a methodology that allows the evaluation of electromechanical efforts in transformer windings, caused by inrush currents, utilizing multiphysics simulations. The methodology can assist in the equipment design stage.

Keywords: Electromechanical efforts. Inrush currents. Power transformers. Multiphysics Simulations.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_r$	Densidade de Fluxo Residual
$V_p$	Valor de pico da tensão senoidal aplicada
$\theta$	Ângulo de energização do transformador
$i_0$	Valor instantâneo da corrente de magnetização
$\phi_m$	Valor instantâneo do fluxo magnético no tempo $t$
$R_1$	Resistência do enrolamento primário
$N_1$	Número de espiras do enrolamento energizado
$\phi_r$	Fluxo magnético residual no núcleo
$\phi_{mp}$	Fluxo magnético máximo no núcleo em condições de operação nominal
$B_{mp}$	Densidade de fluxo magnético máxima em condições de operação nominal
$B_{sat}$	Densidade de fluxo magnético de saturação no material do núcleo
$i_{0max}$	Amplitude do primeiro pico da corrente de <i>inrush</i>
$A_c$	Área líquida da coluna do núcleo
$A_w$	Área média enlaçada por uma espira do enrolamento
$\vec{F}$	Vetor força de Lorentz
$I$	Corrente elétrica
$\vec{l}$	Vetor representando o comprimento e a direção do condutor
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético
$\alpha$	Ângulo entre os vetores $\vec{l}$ e $\vec{B}$
$B_{max}$	Densidade de fluxo de dispersão máxima
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo
$N$	Número de espiras do enrolamento
$I_{max}$	Valor de pico da corrente que circula no enrolamento
$h_w$	Altura do enrolamento
$F_{rad[N/m]}$	Força radial média por unidade de comprimento
$F_{rad}$	Força radial total atuando no enrolamento
$D_m$	Diâmetro médio enlaçado por uma espira do enrolamento
$\sigma_t$	Estresse tangencial médio
$e$	Espessura radial do enrolamento

$F_{axi}$	Força axial total
$d$	Espaçamento entre os dois enrolamentos
$e_1$	Espessura radial do enrolamento interno
$e_2$	Espessura radial do enrolamento externo
$K$	Fator de Rogowski
$I_{cc}$	Corrente máxima de curto circuito trifásico
$k$	Fator de assimetria do curto-circuito
$S$	Potência nominal do transformador
$V_1$	Tensão nominal do enrolamento primário
$Z$	Impedância percentual o transformador em p.u.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	CORRENTES DE INRUSH .....	14
2.1.1	Natureza da Corrente de Inrush .....	15
2.1.2	Estimação da Amplitude do Primeiro Pico.....	17
2.2	FORÇAS ELETROMECÂNICAS.....	18
2.2.1	Forças Radiais .....	20
2.2.2	Forças Axiais.....	21
2.3	FALHAS MECÂNICAS EM TRANSFORMADORES.....	22
2.3.1	Falhas Causadas por Forças Radiais .....	22
2.3.2	Falhas Causadas por Forças Axiais.....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1	TRANSFORMADOR DE 100 MVA.....	29
3.2	MÉTODO COMPUTACIONAL .....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
4.1	CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO A VAZIO.....	34
4.2	CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO.....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O transformador é um dos principais equipamentos nos sistemas de potência, uma das razões para isso é o custo de aquisição e manutenção elevado. Segundo NERC (2011), grandes unidades podem custar até US\$ 7.500.000,00. A função básica que o equipamento exerce no sistema é a de transferir energia elétrica de um circuito de entrada para um circuito de saída, elevando ou reduzindo os níveis de tensão e corrente, mantendo a frequência constante (COLTMAN, 2002).

Dessa forma, a indisponibilidade de um transformador representa uma perda na capacidade de transmissão de energia elétrica do sistema. A qual afeta o atendimento às cargas do setor produtivo, que por sua vez, influencia o desempenho econômico do país como um todo. Do ponto de vista das concessionárias, tal indisponibilidade afeta seus indicadores de qualidade, podendo acarretar em penalidades financeiras por parte dos órgãos reguladores.

A indisponibilidade do transformador pode ocorrer basicamente devido a manutenções programadas ou a ocorrência de falhas. No primeiro caso, é possível tomar providências que minimizam o impacto da saída de operação do equipamento no sistema. Já no caso da ocorrência de falhas, quase sempre o sistema é afetado de maneira indesejada, causando descontinuidade no fornecimento de energia para carga.

Dentre os fatores que podem levar à falha, e consequente indisponibilidade de um transformador, destacam-se aqueles associados a esforços eletromecânicos nos enrolamentos quando da circulação de sobrecorrentes. Segundo Hartley (2003), fatores mecânicos são a segunda causa de falhas em transformadores, atrás apenas de fatores associados à isolação do equipamento. Uma falha pode ocorrer devido a uma não conformidade no projeto ou nos materiais, em que a estrutura do transformador não suporta os esforços eletromecânicos decorrentes de sobrecorrentes a que o transformador pode ser submetido durante sua operação.

Tais defeitos se manifestam na forma de deformações e/ou deslocamentos dos enrolamentos, que além de danos estruturais, podem provocar o comprometimento da isolação do equipamento (GUIMARÃES, 2013). Isso ocorre devido a atuação de forças eletromagnéticas nos enrolamentos, associadas às altas amplitudes e assimetrias de sobrecorrentes que surgem em situações como curto-circuito e energização do transformador (ROSENTINO JR., 2010).

Segundo a literatura, fabricantes de transformadores utilizam, em geral, estimativas das forças eletromagnéticas provocadas por correntes de curto-circuito trifásico nos terminais do transformador para estabelecer os critérios de projeto, no que diz respeito à suportabilidade mecânica do equipamento (BERTAGNOLLI, 2007), uma vez que o curto-circuito trifásico, representa, em geral, a pior situação a que um transformador pode ser submetido, do ponto de vista das solicitações térmicas e mecânicas.

Entretanto, a energização de transformadores a vazio é uma situação que também representa uma condição de operação severa do equipamento, devido ao surgimento das correntes de *Inrush*. A magnitude dessas correntes pode variar de 3 a 10 vezes a corrente nominal, dependendo de vários fatores, como momento da energização, características construtivas do transformador, material do núcleo, etc. (CSANYI, 2012). Apesar de, em geral, possuir amplitude menor que a corrente de curto-circuito, a corrente de *Inrush* permanece acima da nominal durante um número maior de ciclos. Isso ocorre porque os dispositivos de proteção não são programados para atuarem durante a energização do equipamento, uma vez que esta é uma operação normal e frequente do transformador (GUERRA, 2011).

Dessa forma, fica claro que um estudo aprofundado dos esforços eletromecânicos, nos enrolamentos do transformador, causados por correntes de energização, também é justificável. Entretanto, trabalhos que busquem analisar falhas mecânicas causadas por essas correntes ainda são escassos na literatura (AZEVEDO, 2007).

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar os esforços eletromecânicos em transformadores de potência causados por correntes de *inrush*. Para tanto, serão utilizadas duas abordagens distintas: a primeira é a utilização de um método analítico aproximado já disponível na literatura, a segunda é a solução computacional do problema por meio de simulações baseadas no Método dos Elementos Finitos. Também é objetivo do trabalho a comparação entre os resultados obtidos pelas duas abordagens distintas e a determinação das vantagens e das dificuldades encontradas em cada uma. Pretende-se ainda realizar a comparação entre as forças eletromagnéticas atuantes no transformador na condição de energização com aquelas da condição de curto-circuito.

Dentre as contribuições deste trabalho está a apresentação de uma metodologia de simulação completa para a avaliação dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a condições severas de operação. Os resultados dessas simulações podem ser utilizados na fase de projeto dos transformadores, como auxílio na determinação dos critérios de dimensionamento das partes ativas e das estruturas de sustentação dos mesmos.

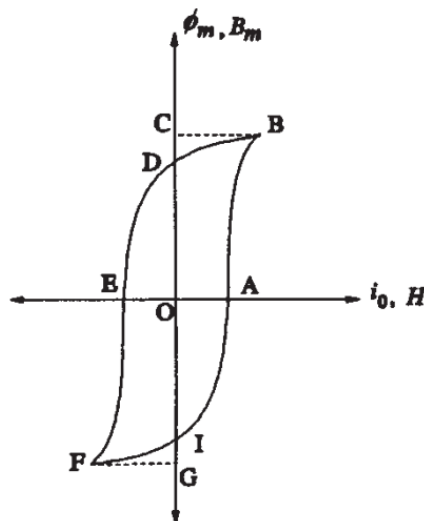
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os embasamentos teóricos que deram suporte ao estudo. O texto aqui apresentado é resultado de uma ampla revisão bibliográfica a respeito do tema.

### 2.1 CORRENTES DE INRUSH

Quando um transformador é desenergizado, a corrente de excitação tende a acompanhar a curva de histerese em direção ao valor zero, enquanto que o fluxo magnético muda para um valor diferente de zero,  $\phi_r$ . Esse valor é denominado de fluxo residual, e é uma característica do material ferromagnético que compõe núcleo do transformador. O comportamento fica evidenciado na curva de histerese apresentada na Figura 1, onde o ponto D representa o valor do fluxo residual (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Figura 1 – Curva de histerese típica de um material magnético.



Fonte: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Desse modo, no momento da reenergização do equipamento, o fluxo magnético imposto pela fonte será somado ao valor do fluxo residual. Caso o fluxo residual no núcleo apresente mesmo sinal do fluxo imposto pela fonte, o fluxo resultante pode induzir o núcleo a uma região de saturação profunda. Devido aos altos valores de fluxo magnético, surgirão

correntes de elevada amplitude nos enrolamentos do transformador, tais correntes são denominadas de correntes de *Inrush*. Os principais efeitos dessas correntes são: atuação indevida da proteção, afundamentos temporários de tensão, solicitações térmicas e mecânicas bruscas do transformador, dentre outros (GUERRA, 2011).

### 2.1.1 NATUREZA DA CORRENTE DE INRUSH

Segundo Kulkarni e Khaparde (2004), para uma tensão de alimentação senoidal aplicada no enrolamento primário, enquanto o secundário do transformador está aberto, a densidade de fluxo magnético pode ser obtida resolvendo a equação (1).

$$V_p \text{sen}(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m}{dt}. \quad (1)$$

Em que;  $V_p$  representa o valor de pico da tensão aplicada;  $\theta$  o ângulo de energização do transformador;  $i_0$  o valor instantâneo da corrente de magnetização;  $\phi_m$  o valor instantâneo do fluxo magnético no tempo  $t$ ;  $R_1$  a resistência do enrolamento primário e  $N_1$  simboliza o número de espiras do enrolamento energizado.

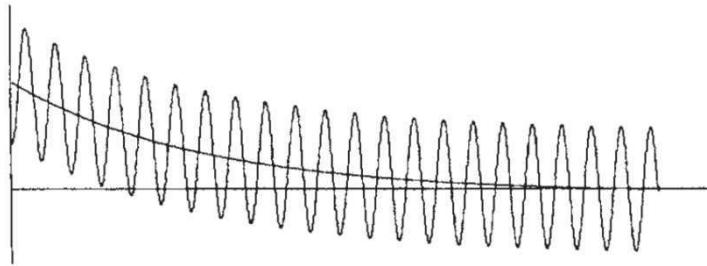
Considerando a curva de histerese do núcleo linearizada, a solução para as condições iniciais  $t = 0$  e  $\phi_m = \phi_r$ , é dada por (2), enquanto a forma de onda correspondente é mostrada na **Error! Reference source not found.**

$$\phi_m = (\phi_{mp} \cos \theta + \phi_r) e^{\frac{-R_1 t}{L_1}} - \phi_{mp} \cos(\omega t + \theta). \quad (2)$$

Em que;  $\phi_r$  simboliza o fluxo magnético residual no núcleo e  $\phi_{mp}$  o fluxo magnético máximo no núcleo em condições de operação nominal.

Nota-se que a forma de onda do fluxo magnético durante a energização do transformador é composta por uma componente contínua de decaimento exponencial, cuja taxa é determinada pela razão entre a resistência e a indutância do enrolamento energizado ( $R_1/L_1$ ), e uma componente alternada.

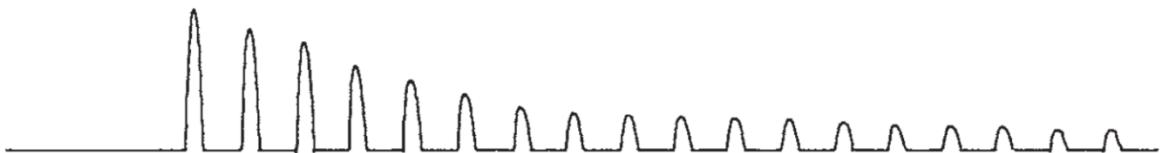
**Figura 2 – Forma de onda do fluxo magnético durante a energização do transformador.**



Fonte: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

A razão ( $R_1/L_1$ ), que representa a constante de tempo para o caso, não possui valor constante ao longo do tempo, porque o valor da indutância do enrolamento muda dependendo do nível de saturação do núcleo. Durante os primeiros ciclos, a saturação é profunda e, portanto,  $L_1$  é pequeno, logo o decaimento inicial é rápido. À medida que as perdas ôhmicas do transformador amortecem a corrente, a saturação diminui e a indutância aumenta tornando o decaimento mais lento. Portanto, a corrente de *inrush* possui uma alta taxa de decaimento inicial que se reduz progressivamente. Uma forma de onda típica, da corrente de *inrush*, é mostrada na Figura 3. Em geral, transformadores de grande porte apresentam baixas perdas (alta eficiência), de modo que as taxas de decaimento são mais lentas e a corrente de energização pode permanecer acima da nominal durante poucos segundos.

**Figura 3 – Forma de onda típica da corrente de *inrush*.**



Fonte: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Ao observar a Figura 3, nota-se que a corrente apresenta picos de meio ciclo. Isso é explicado pela forma de onda do fluxo magnético na Figura 2. Nos instantes em que o fluxo está abaixo do valor de saturação, a corrente é muito pequena, quando comparada às correntes que surgem com o núcleo saturado. Por isso, a corrente de *inrush* se apresenta na forma de meio ciclos. Isso faz com que a mesma apresente característica altamente simétrica com harmônico de segunda ordem predominante em torno de 63% (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).



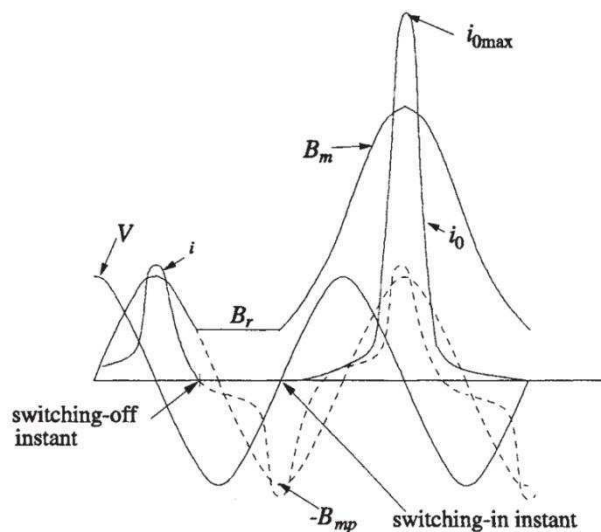
### 2.1.2 ESTIMAÇÃO DA AMPLITUDE DO PRIMEIRO PICO

A determinação precisa da corrente de *inrush* utiliza, em geral, modelos de circuito elétrico equivalente do transformador para simulação em *softwares* de transitórios eletromagnéticos (CHIESA, 2010). No entanto, esta não é uma tarefa trivial, e para um grande número de aplicações o conhecimento do valor máximo (primeiro pico) que a corrente de *inrush* pode assumir é suficiente. Kulkarni e Khaparde (2004) descrevem um procedimento analítico, que permite a estimação da amplitude máxima do primeiro pico da corrente de energização.

O procedimento considera o transformador conectado a um barramento infinito e que a energização ocorre pelo enrolamento primário de alta tensão (externo) enquanto o secundário está aberto. O pior instante para energização do transformador ocorre quando a onda de tensão está passando pelo zero, momento em que a corrente de magnetização é máxima, como ilustrado na Figura 4.

Ao observar a Figura 4, nota-se que após o instante de energização, a densidade de fluxo magnético atinge um patamar muito acima do nominal. A explicação vem da teoria do eletromagnetismo, pois o fluxo magnético não pode mudar abruptamente devido à natureza indutiva do circuito do transformador. Em outras palavras, ao invés da densidade de fluxo iniciar sua excursão do pico negativo ( $-B_{mp}$ ), iniciará do valor de densidade de fluxo residual ( $B_r$ ), alcançando o valor de pico de  $(B_r + 2B_{mp})$ , levando o núcleo à saturação.

**Figura 4 – Instante de chaveamento em que a corrente de inrush é máxima.**



Fonte: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

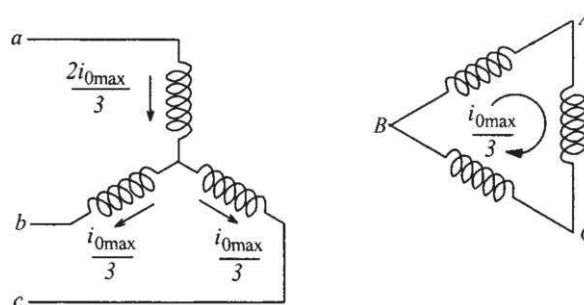
Dessa forma, a partir da equação (3), pode-se estimar a amplitude do primeiro pico da corrente de *inrush* ( $i_{0max}$ ) em um transformador monofásico, em que o enrolamento energizado (primário) possui  $N_1$  espiras e altura  $h_w$ .

$$i_{0max} = \frac{(2B_{mp} + B_r - B_{sat})A_c h_w}{\mu_0 A_w N_1}. \quad (3)$$

Em que;  $B_{sat}$  simboliza a densidade de fluxo magnético de saturação no material do núcleo;  $A_c$  a área líquida da coluna do núcleo;  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo e  $A_w$  representa a área média enlaçada por uma espira do enrolamento.

Para transformadores trifásicos a amplitude do primeiro pico em cada fase, pode ser determinada em termos de  $i_{0max}$ , a depender do tipo de conexão dos enrolamentos. Na Figura 5, pode ser visto como se dá a distribuição da corrente em cada enrolamento para conexões em estrela e delta.

Figura 5 – Corrente de inrush nos enrolamentos de um transformador trifásico.



Fonte: (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

## 2.2 FORÇAS ELETROMECÂNICAS

A circulação de corrente elétrica em um condutor, cria um campo magnético ao seu redor. A interação entre a corrente elétrica e campo magnético origina uma força, a qual o condutor fica submetido (HUGHES, 2005). Esta força é conhecida como força de Lorentz e para uma corrente constante,  $I$ , é dada pela equação (4).

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (4)$$

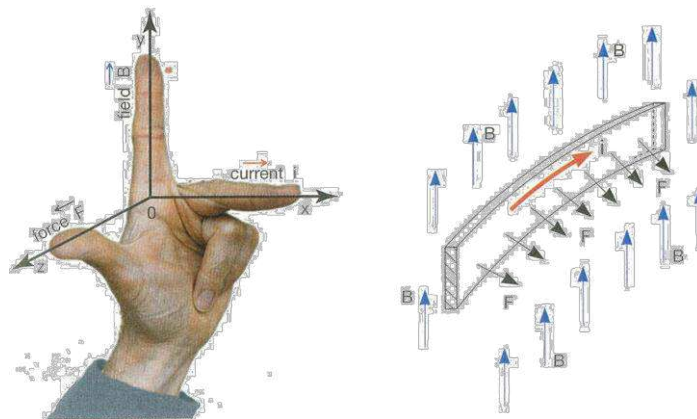
Em que;  $\vec{F}$  representa o vetor força de Lorentz;  $I$  a corrente circulando no condutor;  $\vec{l}$  o vetor representando o comprimento e a direção do condutor e  $\vec{B}$  simboliza o vetor densidade de fluxo magnético.

Para um condutor longo e retilíneo e um campo magnético uniforme, a magnitude da força de Lorentz pode ser expressa por (5).

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \text{sen } \alpha. \quad (5)$$

Em que;  $\alpha$  representa o ângulo entre os vetores  $\vec{l}$  e  $\vec{B}$ . A direção da força  $F$  é perpendicular ao plano contendo os vetores  $\vec{l}$  e  $\vec{B}$ , e sua orientação pode ser obtida com a regra da mão esquerda, como ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 – Orientação Espacial da Força de Lorentz, campo magnético e elemento de corrente.**



Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).

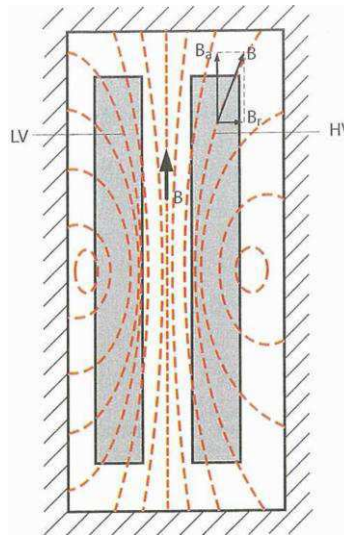
Em um transformador de potência, a corrente  $I$  é a que circula pelos enrolamentos e a densidade de fluxo magnético  $B$  é a densidade de fluxo de dispersão no equipamento. Portanto, conhecendo-se essas grandezas, bem como as características geométricas do enrolamento, é possível determinar analiticamente a amplitude das forças eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos do transformador.

Tais forças podem ser decompostas em duas componentes, uma na direção radial e outra na direção axial. As duas componentes podem ser consideradas independentes para efeito de cálculo. A seguir, serão descritos os procedimentos que levam a uma expressão analítica para cada uma das componentes, considerando um transformador do tipo núcleo envolvido.

### 2.2.1 FORÇAS RADIAIS

Em transformadores, as linhas de fluxo de dispersão se desenvolvem principalmente na direção axial, como ilustrado na Figura 7. Analisando a equação (5), é possível notar que a densidade de fluxo magnético na direção axial origina as forças eletromagnéticas na direção radial, e vice-versa. Portanto, em transformadores a componente radial da força atuante nos enrolamentos é predominante.

**Figura 7 – Distribuição típica do fluxo de dispersão em um transformador do tipo núcleo envolvido.**



Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).

Para um arranjo de dois enrolamentos concêntricos, o valor máximo do fluxo de dispersão ocorre no duto entre os enrolamentos, e sua magnitude pode ser estimada pela equação (6) (BERTAGNOLLI, 2007).

$$B_{max} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{max}}{h_w} \quad (6)$$

Em que;  $\mu_0$  representa a permeabilidade magnética do vácuo;  $N$  o número de espiras do enrolamento;  $I_{max}$  o valor de pico da corrente que circula no enrolamento e  $h_w$  simboliza a altura dos enrolamentos.

Considerando o valor de densidade de fluxo constante ao longo do enrolamento, a força radial total que atua no mesmo é dada pela equação (7).

$$F_{rad} = \frac{\mu_0 \cdot \pi D_m \cdot (N \cdot I_{max})^2}{2h_w} \quad (7)$$

Em que  $D_m$  representa o diâmetro médio enlaçado por uma espira do enrolamento.

A grandeza  $F_{rad}$  é uma força compressiva para o enrolamento interno e trativa para o enrolamento externo. Durante sobrecorrentes em transformadores de grande porte, a força radial total chegar a dezenas de  $MN$ . Apesar da amplitude extremamente elevada da força, os enrolamentos podem suportar os esforços, desde que suas estruturas sejam projetadas de maneira adequada.

Adicionalmente, Bertagnolli (2007) fornece uma expressão que permite estimar o estresse tangencial médio no enrolamento, devido às forças radiais, dada por (8).

$$\sigma_t = \frac{F_{rad}}{2\pi \cdot h_w \cdot e} \quad (8)$$

Em que,  $e$  representa a espessura radial do enrolamento.

### 2.2.2 FORÇAS AXIAIS

A componente axial da força é uma consequência da inclinação radial das linhas de fluxo de dispersão, que ocorre principalmente nas extremidades dos enrolamentos, como visto na Figura 7. Assim, os enrolamentos que possuem mesma altura, distribuição de fluxo uniforme e são radialmente alinhados, ficam submetidos a forças radiais compressivas, partindo das extremidades em direção ao centro. O enrolamento interno está sujeito a forças axiais de maior magnitude, devido a maior inclinação radial das linhas de fluxo nas proximidades do núcleo.

Como regra geral, a força axial total no par de enrolamentos é composta de 60% a 70% para o interno e de 30% a 40% para o enrolamento externo, dependendo de fatores geométricos. Uma equação apropriada para o cálculo da força axial total sobre o par de enrolamentos pode ser obtida seguindo os mesmos procedimentos realizados para a componente radial. A expressão resultante é a equação (9).

$$F_{axi} = \frac{\mu_0 \cdot \pi D_m \cdot (N \cdot I_{max})^2}{2h_w^2} \cdot \left( d + \frac{e_1 + e_2}{3} \right) \cdot (2K - 1). \quad (9)$$

Em que;  $d$  simboliza o espaçamento entre os dois enrolamentos;  $e_1$  a espessura radial do enrolamento interno;  $e_2$  a espessura radial do enrolamento externo e  $K$  representa o Fator de Rogowski do enrolamento, dado por  $K = 1 - \frac{d+e_1+e_2}{\pi \cdot H_w}$ .

Nota-se que a expressão para força axial total pode ser escrita como a força radial vezes um fator multiplicativo, o qual depende da geometria do transformador. A componente axial da força é, em geral, uma ordem de grandeza menor que a radial.

## 2.3 FALHAS MECÂNICAS EM TRANSFORMADORES

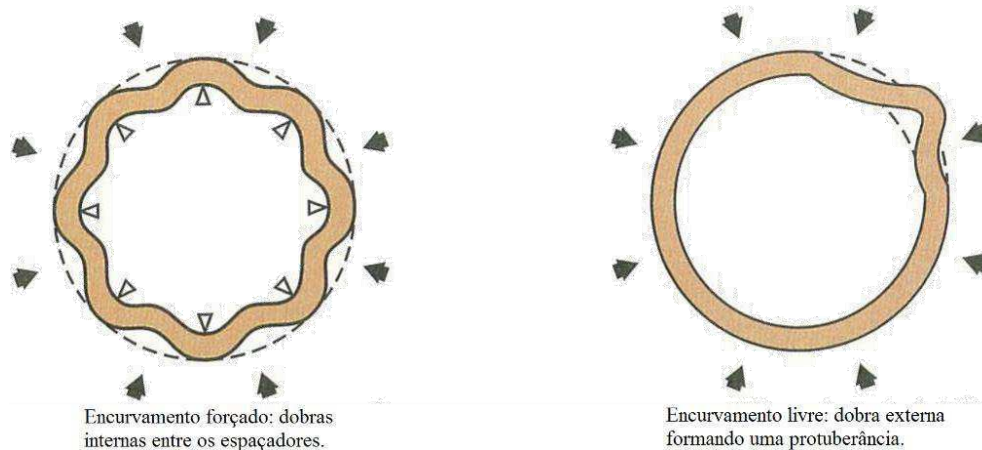
Como afirmado anteriormente, durante a passagem de sobrecorrentes, as forças que atuam nos enrolamentos dos transformadores, alcançam amplitudes muito elevadas. Portanto, caso as estruturas não sejam projetadas adequadamente, estes eventos podem causar avarias desastrosas nas partes ativas do equipamento. A experiência tem mostrado que, nesses casos, as falhas mecânicas seguem um padrão bem definido, e podem ser classificadas em modos de falha de acordo com a sua natureza (BERTAGNOLLI, 2007). A seguir são apresentados os principais tipos de falhas mecânicas em transformadores de potência.

### 2.3.1 FALHAS CAUSADAS POR FORÇAS RADIAIS

O efeito da componente radial sobre os condutores depende substancialmente se a força provoca um estresse trativo ou compressivo. No caso do estresse trativo, os condutores não apresentam tendência a mudar o formato circular do enrolamento. Nesse caso os critérios de projeto estão relacionados ao limite de elasticidade do material. Se o limite de elasticidade é excedido, uma falha plástica pode ocorrer devido ao alongamento do condutor. O que pode resultar na ruptura do material ou em instabilidade axial da bobina, devido a protuberâncias locais ao lado dos espaçadores.

No caso do estresse compressivo, o enrolamento pode atingir o colapso por encurvadura, que é um fenômeno de instabilidade elástica. O colapso ocorre para um estresse crítico que depende basicamente do módulo de elasticidade do material e da sua geometria. É importante observar que, nesse caso, o valor do estresse crítico pode estar muito abaixo do limite de elasticidade do material. O colapso da bobina pode ocorrer de acordo com dois padrões: o encurvamento forçado e o encurvamento livre, ambos ilustrados na Figura 8.

**Figura 8 – Modos de falha para estresses compressivos nos enrolamentos.**

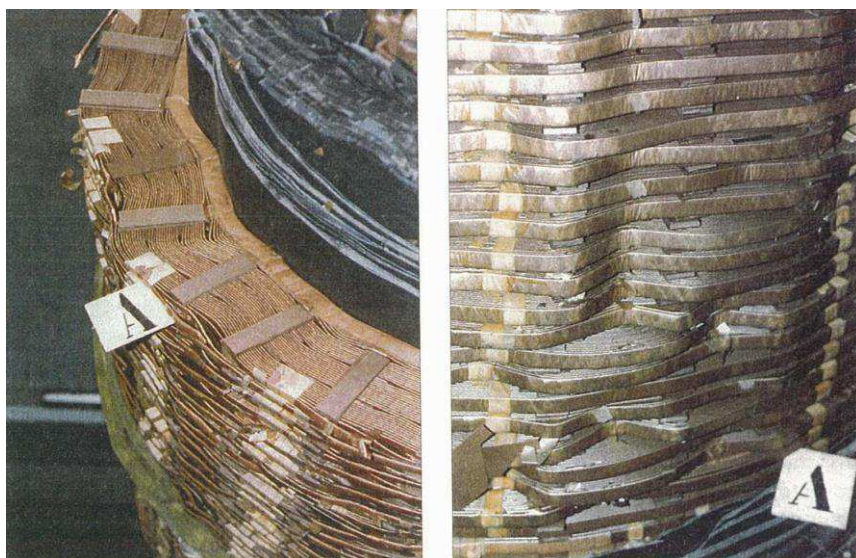


Fonte: Adaptado de (BERTAGNOLLI, 2007).

O encurvamento forçado ocorre quando o estresse excede o limite elástico do material e a sua ocorrência é menos frequente. Já o encurvamento livre, tem ocorrência bem mais frequente e ocorre para valores de estresse que são inferiores ao limite elástico do material. Nesse caso, podem surgir uma ou mais protuberâncias externas que se estende por toda a altura do enrolamento em pontos específicos.

Na Figura 9 e Figura 10, são mostrados enrolamentos de transformadores reais que foram retirados de serviço após a ocorrência de uma falha do tipo encurvamento forçado e encurvamento livre, respectivamente. É possível notar nas imagens que, além da deformação mecânica, houve também o comprometimento da isolamento do equipamento.

**Figura 9 – Encurvamento forçado no enrolamento comum de um autotransformador de 400 MVA - 400/230 kV. O enrolamento é do tipo disco, cada espira consiste de seis condutores individuais de cobre.**



Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).

**Figura 10 – Encurvamento livre ocorrido no enrolamento de baixa tensão de um transformador GSU. O enrolamento é do tipo camada com condutores continuamente transpostos.**



Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).

Outro modo de falha devido às forças radiais compressivas é conhecido como “*spiralling*”. Este modo de falha ocorre principalmente em enrolamentos do tipo helicoidal e do tipo disco com poucas voltas por disco. O enrolamento tende a apertar-se em direção a um diâmetro menor, fazendo com que os condutores sofram um deslocamento tangencial significativo, especialmente nas extremidades da bobina. Ocorre assim, um desvio no alinhamento dos espaçadores axiais, como pode ser visto na Figura 11.

**Figura 11 – *Espiralling* ocorrido na camada externa de um enrolamento helicoidal de dupla camada de um transformador de 350 MVA submetido a um teste de curto circuito.**



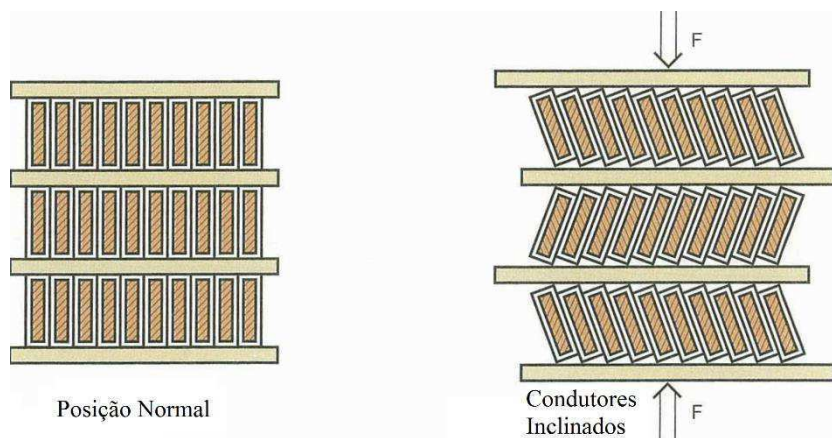
Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).



### 2.3.2 FALHAS CAUSADAS POR FORÇAS AXIAIS

Forças axiais dão origem a falhas que consistem, em geral, de uma torção da seção do condutor em torno do seu eixo de simetria axial. Esse modo de colapso, que tem o aspecto de uma inclinação, faz todo o conjunto de condutores radialmente adjacente torcer na mesma direção, de modo que o conjunto superior torce na direção oposta. O resultado é um padrão *zig-zag* assumido pelos condutores do enrolamento, como ilustrado na Figura 12. A inclinação pode resultar na destruição da isolação do condutor, como no caso mostrado na Figura 13.

**Figura 12 – Inclinação dos condutores devido as forças axiais.**



Fonte: Adaptado de (BERTAGNOLLI, 2007).

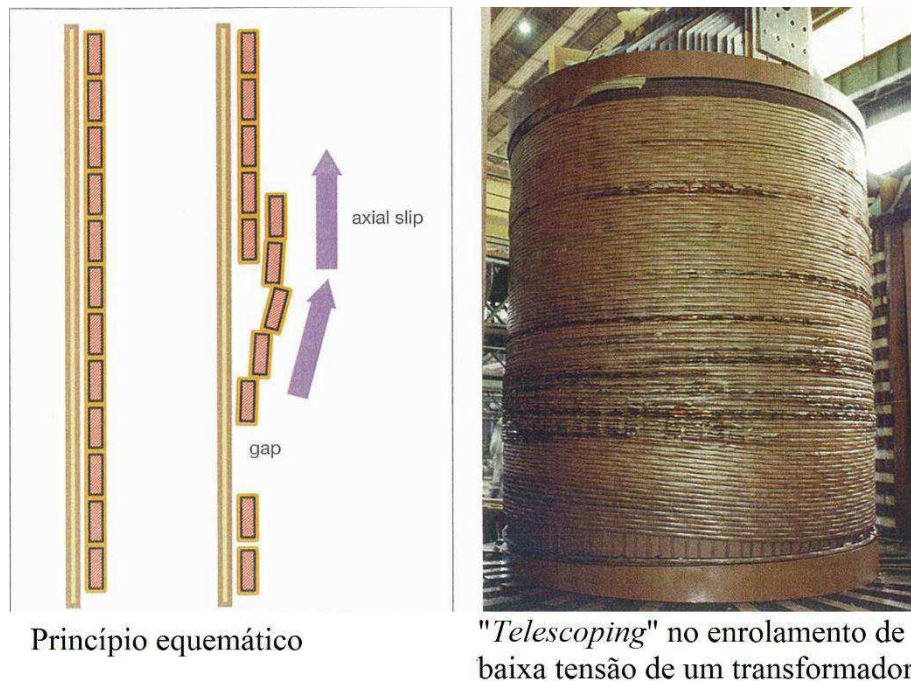
**Figura 13 – Condutores inclinados que, com a perda da isolação, causaram um curto-circuito entre os condutores individuais e consequente destruição do enrolamento em um transformador GSU.**



Fonte: (BERTAGNOLLI, 2007).

Outro tipo de falha causado por forças axiais é conhecido como “*telescoping*”. Essa falha acontece principalmente em enrolamentos de múltiplas camadas. A falha consiste no deslocamento axial dos condutores sobre condutores adjacente, como ilustrado na Figura 14. Isso ocorre devido à frouxidão radial das espiras após o alongamento dos condutores. O “*telescoping*” resulta em geral, na destruição do isolamento dos condutores, causando curto-circuito entre as espiras da estrutura.

**Figura 14 – Colapso axial devido ao efeito "telescoping".**



Princípio esquemático

"Telescoping" no enrolamento de baixa tensão de um transformador

Fonte: Adaptado de (BERTAGNOLLI, 2007).

A suportabilidade do transformador às forças axiais está relacionada a uma série de fatores, incluindo o formato da bobina, a isolação e as estruturas de suporte. De modo que, condutores finos, estão sujeitos a um risco maior de sofrer inclinação, especialmente em transformadores de grande porte.

Os mecanismos que levam um transformador à falha mecânica são fenômenos extremamente complexos, por conta da natureza dinâmica das forças e a composição da estrutura dos enrolamentos. Assim, métodos analíticos tornam-se ineficientes para uma análise precisa. Nesse caso, a solução mais viável, porém ainda pouco utilizada, é a utilização de simulações computacionais. Esse recurso torna possível uma análise completa do comportamento dinâmico do transformador submetido a várias situações de trabalho, de maneira precisa e metódica.

Uma das razões para o uso ainda pouco difundido de simulações, na análise dos esforços eletromecânicos em transformadores, é a necessidade de integrar pelo menos duas físicas diferentes na análise, a magnética e a mecânica. Existem poucos *softwares* capazes de simular o equipamento em um ambiente multifísico. Além disso, estes *softwares* demandam um elevado esforço computacional. Desse modo, ainda é predominante entre os fabricantes de transformadores, a utilização de métodos analíticos para definição dos critérios de projeto dos equipamentos (BERTAGNOLLI, 2007).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo específico de transformador foi utilizado, para determinação das forças atuantes no momento de energização do equipamento. Inicialmente determinou-se o valor máximo da corrente de *inrush* que pode estabelecer-se nos enrolamentos, por meio do procedimento apresentado na seção 2.1. Em seguida, utilizando as equações analíticas apresentadas na seção 2.2, determinou-se as amplitudes das componentes radial e axial da força total, assim como para o estresse tangencial nos enrolamentos. Na sequência foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics<sup>®1</sup> para a solução do mesmo problema de maneira computacional, por meio de simulação das físicas magnética e mecânica simultaneamente. Por fim, os resultados obtidos nas duas abordagens distintas são comparados.

Com o objetivo de obter-se um parâmetro de comparação para a amplitude das forças obtida na condição de energização, foram realizados os mesmos procedimentos anteriores para a condição de um curto-circuito trifásico nos terminais do enrolamento primário. A corrente máxima de curto-circuito foi obtida pela equação (10). Utilizou-se um fator de assimetria de 1,81, que é especificado na norma IEC 60076-5 para transformadores com potência entre 2,5 MVA e 100 MVA (IEC, 2006).

$$I_{cc} = k \frac{\sqrt{2} \cdot S}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot Z} \quad (10)$$

Em que  $k$  simboliza o fator de assimetria do curto-circuito;  $S$  simboliza a potência nominal do transformador;  $V_1$  refere-se à tensão nominal do enrolamento primário; e  $Z$  refere-se impedância percentual o transformador em p.u..

O curto-circuito trifásico é a condição mais apropriada para comparação, uma vez esta é considera a condição que mais solicita o transformador do ponto de vista mecânico, e é utilizada como critério de projeto dos equipamentos.

---

<sup>1</sup> COMSOL *Multiphysics* é uma marca registrada de COMSOL Inc.

### 3.1 TRANSFORMADOR DE 100 MVA

Para análise dos esforços eletromecânicos, foi escolhido um transformador trifásico do tipo abaixador de 100 MVA – 230/138 kV, com conexões do primário e do secundário em Y. O modelo foi retirado e adaptado de Azevedo (2007) e a sua escolha se deu devido à riqueza de detalhes fornecida pelo autor, os quais são necessários para construção do modelo computacional. Os dados de placa básicos do equipamento são apresentados na Tabela 1, enquanto sua topologia, juntamente com suas dimensões são apresentadas na Figura 15.

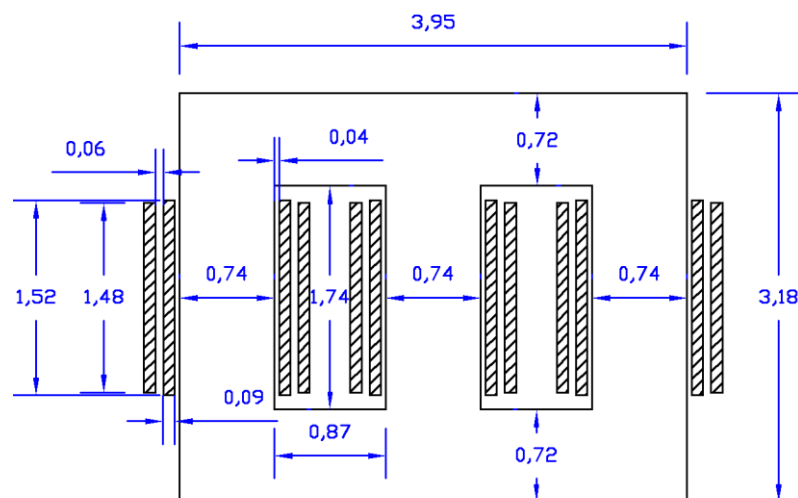
O material ferromagnético do núcleo foi considerado como tendo densidade de fluxo de saturação de 2,03 T, densidade de fluxo residual 1,288 T e densidade de fluxo nominal de 1,61 T. Estes são valores de magnetização típicos para aços de FeSi de grão-orientado laminado a frio (MAGWEB, 2015).

**Tabela 1 – Características do transformador utilizado no estudo.**

Característica	Valor
Potência nominal	100 MVA
Tensão nominal do enrolamento externo	230 kV
Tensão nominal do enrolamento interno	138 kV
Impedância percentual	9,32%
Número de espiras do enrolamento externo	750
Número de espiras do enrolamento interno	450
Área líquida da seção da coluna do núcleo	0,38 m <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de (AZEVEDO, 2007).

**Figura 15 – Dimensões do modelo de transformador utilizado no estudo.**



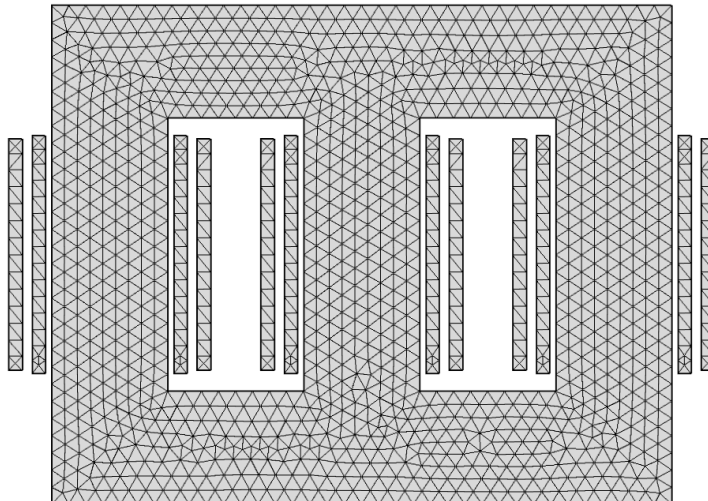
Nota: Dimensões em metros

Fonte: Autoria própria

## 3.2 MÉTODO COMPUTACIONAL

As simulações do transformador foram realizadas para um modelo 2D utilizando-se o *software* COMSOL Multiphysics®. O COMSOL é uma ferramenta para modelagem e análise de problemas físicos em um ambiente multifísico. O *software* é capaz de resolver diversos problemas modeláveis por equações diferenciais, em vários domínios físicos. Para solucionar o problema, o *software* divide a geometria em uma malha de elementos triangulares ou tetraédricos e encontra soluções aproximadas para as equações nos nós dessa malha por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). A malha gerada para o transformador em estudo possui 24102 elementos e pode ser visualizada parcialmente na Figura 16.

**Figura 16 – Malha gerada para modelar a geometria do transformador em estudo.**



Fonte: Autoria própria.

A modelagem no ambiente computacional consiste basicamente das seguintes etapas:

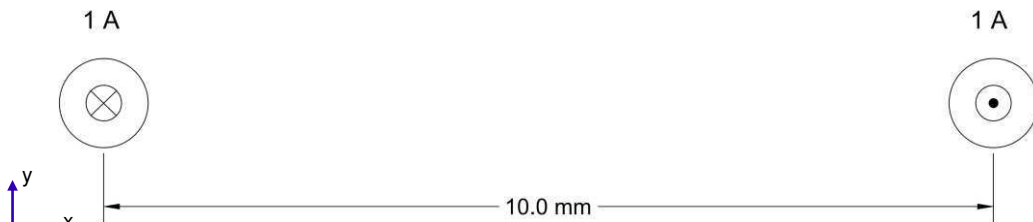
- Construção da geometria em estudo;
- Caracterização dos materiais que compõem o modelo. Isso é feito atribuindo as constantes físicas de cada material aos domínios correspondentes;
- Definição das condições de contorno que modelam o problema. É uma das etapas mais importantes, a qual consiste na definição das equações do eletromagnetismo e da mecânica que regem o fenômeno;
- Geração da malha;
- Solução do problema;
- Análise dos resultados.

Após a solução do problema, é possível visualizar os resultados de diversas maneiras: gráficos, mapa de cores, etc. Entre as vantagens associadas ao *software* está o fato de que o problema pode ser representado diretamente pela sua geometria, dispensando qualquer modelo elétrico ou matemático. Ele também possui um conjunto de “físicas” com equações de modelagem clássicas já predefinidas, além de possibilitar a modelagem com mais de uma física simultaneamente.

Com o objetivo de comprovar a precisão do *software*, um exemplo elementar envolvendo a força de Lorentz foi simulado e os resultados comparados com a solução exata do mesmo. Foi escolhido um exemplo resolvido do livro “*Electromagnetism for Electronic Engineers – Examples*” (CARTER, 2010), por se tratar de um exemplo clássico do eletromagnetismo, no qual é possível encontrar uma solução analítica exata para a força de Lorentz.

O problema, que está descrito na Figura 17, consiste em determinar o valor da força de Lorentz que atua em cada um dos dois condutores mostrados. Considera-se que os condutores têm comprimento infinito e são percorridos por uma corrente elétrica de 1 A em sentidos opostos.

**Figura 17 – Dois condutores paralelos, percorridos por uma corrente elétrica de mesma amplitude e sentidos opostos, separados por uma distância de 10 mm.**



Fonte: Adaptado de (CARTER, 2010).

A solução analítica do problema é simples e exata, consistindo apenas na substituição de valores diretamente na equação (11), a qual é uma simplificação da equação (4) apresentada na seção 2.2. O resultado mostra que uma força de  $20 \mu\text{N}/\text{m}$  atua em cada condutor.

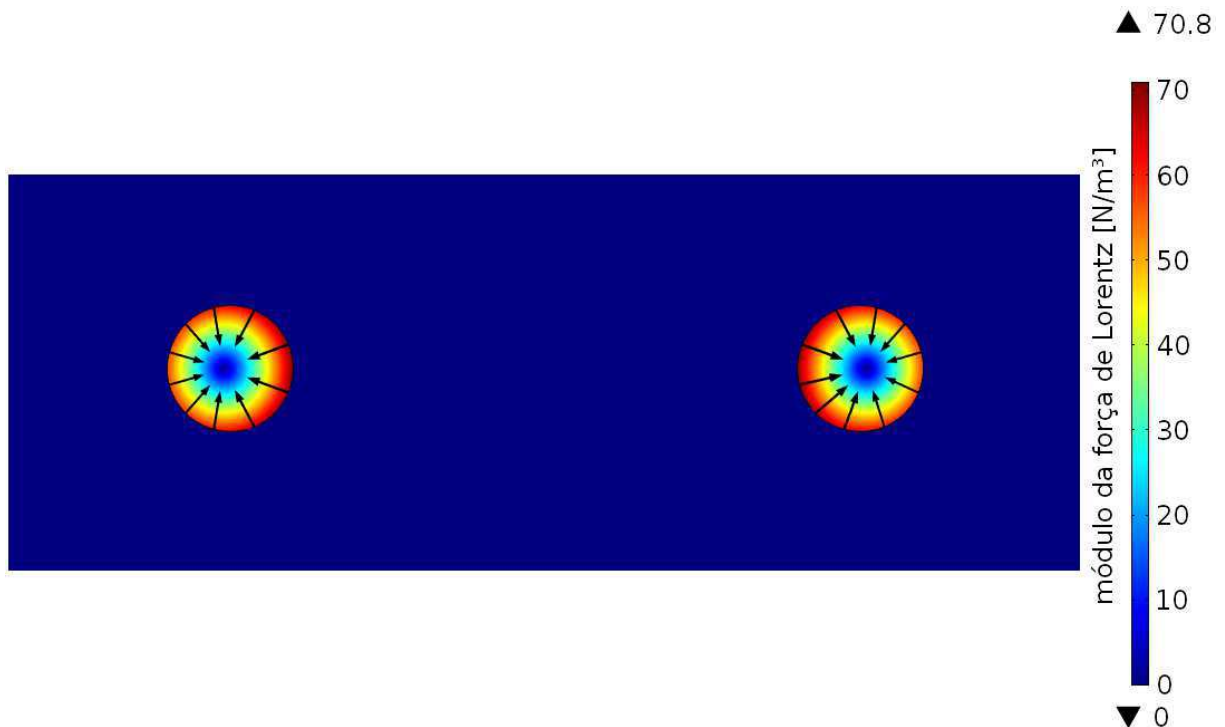
$$F = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1^2}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 20 \mu\text{N}/\text{m}. \quad (11)$$

Em ambos os condutores a força atua na direção x em relação ao eixo de referência da Figura 17. Como a corrente tem sentidos opostos nos condutores, as forças nos mesmos são

repulsivas. Portanto, a força que age no primeiro condutor é de  $-20 \mu\text{N}/\text{m}$ , e no segundo  $+20 \mu\text{N}/\text{m}$ .

Posteriormente, o problema foi resolvido no *software* de simulação e o resultado é apresentado na Figura 18. A distribuição da força na superfície dos condutores é mostrada na figura. Para se obter a força total por unidade de comprimento que age nos condutores é necessário integrar o valor da força na superfície dos mesmos. O resultado da integral de superfície é mostrado na Tabela 2, juntamente com a comparação com os resultados analíticos.

**Figura 18 – Distribuição do módulo da força de Lorentz em cada condutor.**



Fonte: Autoria própria.

**Tabela 2 – Comparação entre os resultados exatos e obtidos na simulação.**

	Força e Lorentz		Desvio
	Valor Exato	Simulação	
Condutor 1	$-20 \mu\text{N}$	$-19,991 \mu\text{N}$	0,045%
Condutor 2	$20 \mu\text{N}$	$19,992 \mu\text{N}$	0,04%

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 2 evidencia que o software de simulação é uma ferramenta extremamente precisa. Em que os resultados da simulação são praticamente idênticos aos exatos, contendo apenas um pequeno desvio inerente ao métodos numérico.

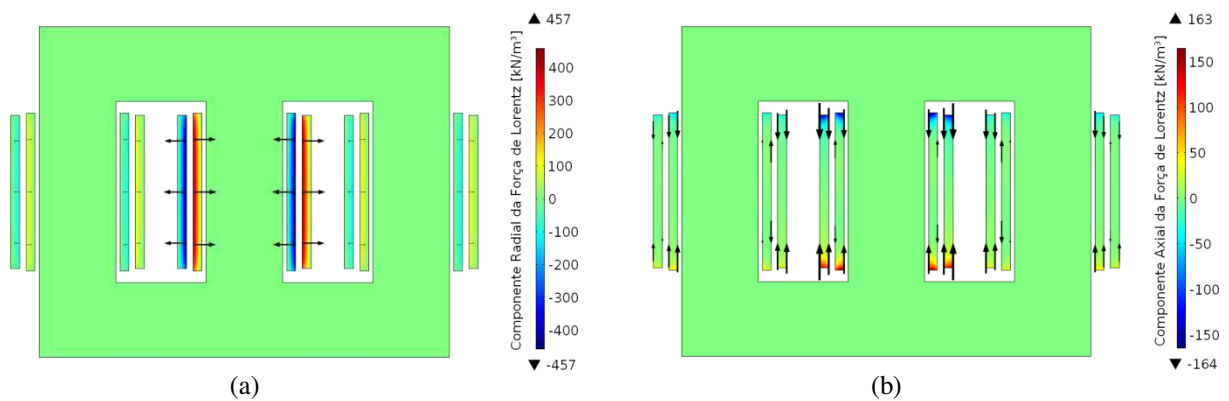


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções seguintes são apresentados os resultados obtidos pelo método analítico e via simulações computacionais para a condição de *inrush* e de curto-circuito trifásico, separadamente. As simulações permitiram a visualização da distribuição do fluxo magnético, das forças radiais e axiais e do estresse tangencial nos enrolamentos para as duas condições supracitadas. Durante a análise, os resultados analíticos são comparados com os obtidos via simulações computacionais e, em seguida, as amplitudes das forças eletromagnéticas causadas pela energização são comparadas com as causadas pelo curto-circuito trifásico.

Para verificar o nível das forças eletromagnéticas que normalmente atuam nos enrolamentos do transformador em condição de regime, foi realizada uma simulação para a condição nominal de operação. Considerou-se o instante em que a corrente é máxima na fase central. Os resultados para as componentes radial e axial da força, neste caso, são apresentados na Figura 19.

**Figura 19 – Distribuição da componente (a) radial e (b) axial da força de Lorentz para a condição de operação nominal.**



Fonte: Autoria própria.

Com a análise da Figura 19, verifica-se que as forças eletromagnéticas em condição de operação nominal são da ordem de  $kN$ .

#### 4.1 CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO A VAZIO

As amplitudes máximas da corrente de *inrush* em cada enrolamento, calculada para o pior instante de energização, são apresentadas na Tabela 3. Para o transformador considerado, a corrente de *inrush* tem aproximadamente 2,5 vezes a amplitude da corrente nominal.

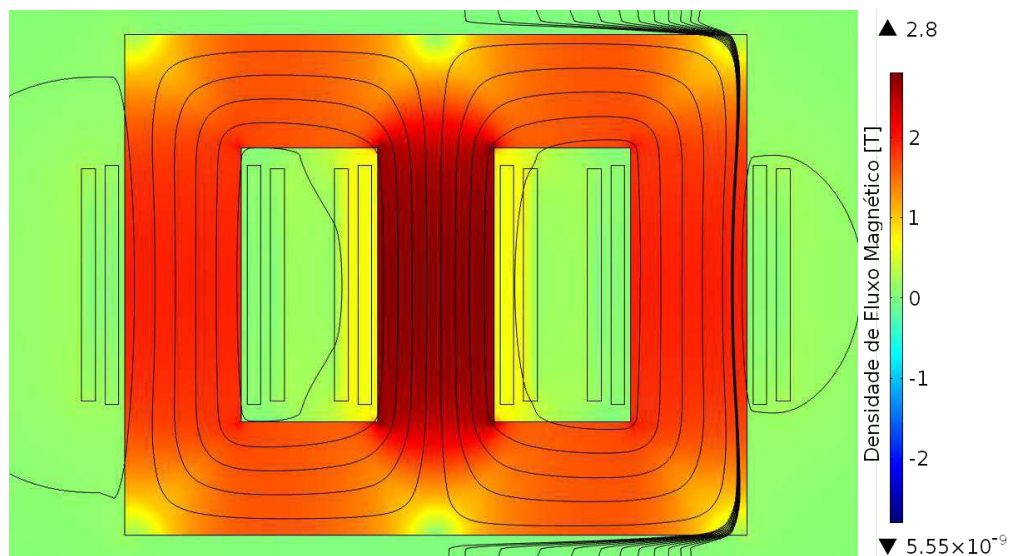
**Tabela 3 – Pico da corrente de inrush calculado em cada enrolamento para o pior momento de energização.**

Fase	Enrolamento Externo	Enrolamento Interno
a	-433.6193 A	0 A
b	867.2387 A	0 A
c	-433.6193 A	0 A

Fonte: Autoria própria.

A distribuição das linhas de fluxo no transformador é apresentada na Figura 20, no instante em que ocorre o pico da corrente de *inrush* calculada. Com a análise da figura, é possível notar que a maior parte do fluxo de dispersão concentrasse nos enrolamentos da fase central (fase b). Isso deve-se ao fato de que a amplitude da corrente na fase b é maior que nas demais. Portanto, é esperado que o enrolamento externo da fase b experimente forças de maior amplitude. É também evidente que, os enrolamentos internos (secundário) não sofrem nenhum tipo de esforço nesta condição, uma vez que não há corrente circulando por eles durante a energização a vazio do transformador.

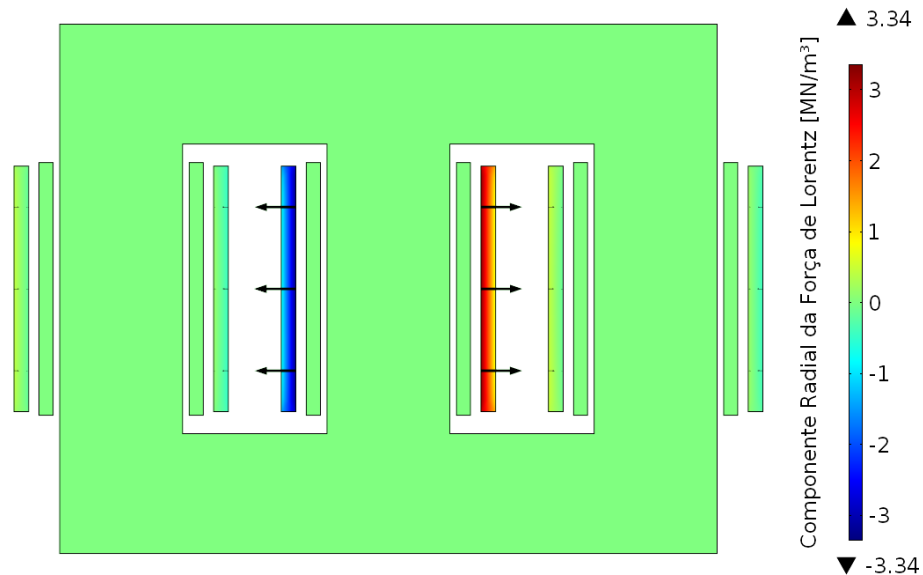
**Figura 20 – Distribuição do fluxo magnético no transformador para condição de *inrush*.**



Fonte: Autoria própria.

A distribuição da componente radial da força de Lorentz é mostrada na Figura 21. Analisando a figura, é possível verificar que as forças radiais provocam um estresse de tração nos enrolamentos externos, o que era esperado, conforme análise da seção 2.2.

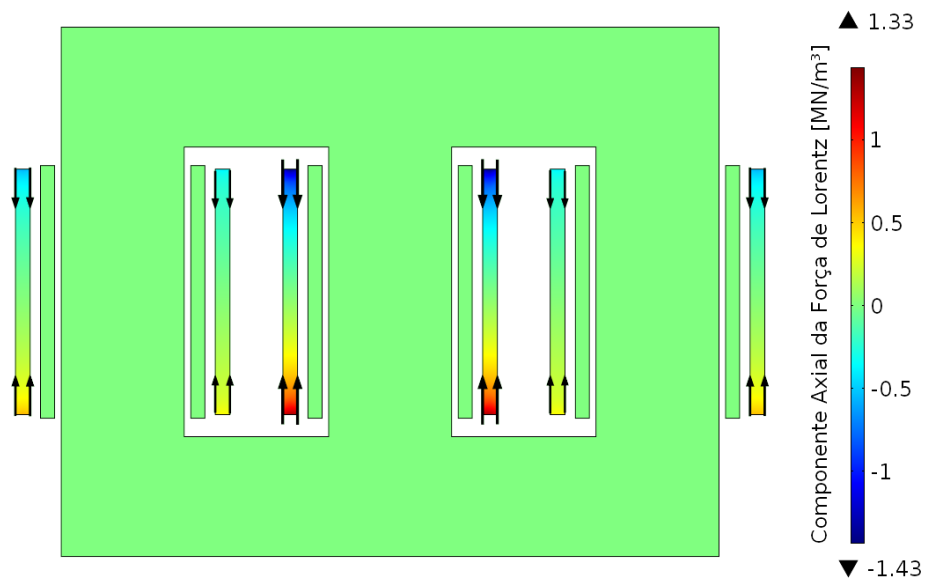
**Figura 21 – Distribuição da componente radial da força de Lorentz para condição de *inrush*.**



Fonte: Autoria própria

A distribuição da componente axial da força de Lorentz sobre os enrolamentos é mostrada na Figura 22. Com a análise da figura, nota-se que, neste caso as forças são do tipo compressivas e as extremidades dos enrolamentos sofrem os maiores esforços. Este comportamento também era esperado, conforme a análise feita na seção 2.2.

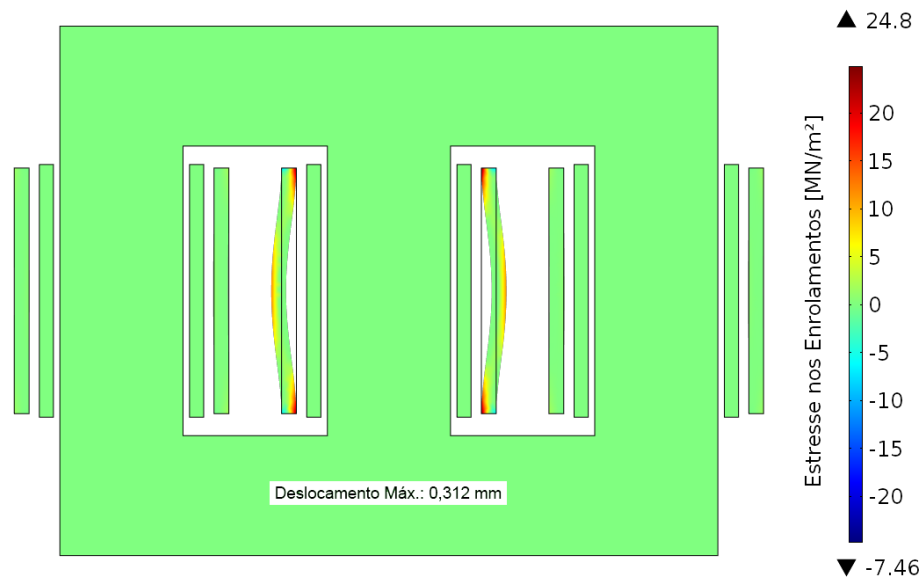
**Figura 22 – Distribuição da componente axial da força de Lorentz para condição de *inrush*.**



Fonte: Autoria própria.

De maneira complementar, a distribuição do estresse tangencial sobre os enrolamentos é apresentada na Figura 23, assim como o deslocamento que estes sofrem em relação a sua posição original. O máximo deslocamento é de 0,312 mm e ocorre na metade da altura do enrolamento. Tal valor seria imperceptível na figura, assim, para que fosse possível a visualização do deslocamento, este foi ampliado 200 vezes.

**Figura 23 – Deslocamento dos enrolamentos ampliado 200X e distribuição do estresse tangencial nos mesmos para condição de *inrush*.**



Fonte: Autoria própria.

Por fim, as amplitudes das grandezas obtidas pela abordagem analítica e computacional são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Magnitude das forças obtidas pelos métodos analítico e computacional para condição de *inrush*.**

Parâmetro	Enrolamento	Método Analítico	Simulação	Desvio
Força radial (MN)	Externo	1,3599	1,0036	26,20%
	Interno	0	0	0
Força axial (kN)	Externo	87,040	80,547	7,46%
	Interno	0	0	0
Estresse tangencial (MN/m <sup>2</sup> )	Externo	1,6487	1,2995	21,18%
	Interno	0	0	0
Deslocamento máximo (mm)	Externo	-	0,312	-
	Interno	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que existe uma discrepância considerável entre as duas abordagens. Isto era esperado, uma vez que o método analítico é um método aproximado utilizado apenas para estimação das amplitudes das forças nos casos em que existe corrente estabelecida em ambos os enrolamentos, interno e externo. Observa-se ainda que todos os valores obtidos analiticamente são maiores que aqueles obtidos na simulação, evidenciando a característica conservadora do método.

## 4.2 CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

As amplitudes máximas da corrente de curto-circuito em cada enrolamento são apresentadas na Tabela 5. Para o transformador considerado, a corrente de curto-circuito tem aproximadamente 8 vezes a amplitude da corrente de *inrush*.

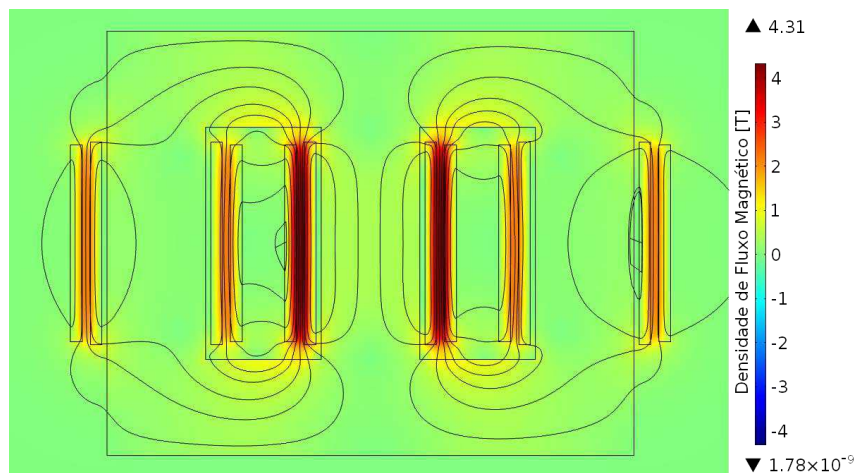
**Tabela 5 – Pico da corrente de curto-circuito trifásico calculado em cada enrolamento.**

Fase	Enrolamento Externo	Enrolamento Interno
a	-3,4471 kA	-5,7452 kA
b	6,8943 kA	11,4900 kA
c	-3,4471 kA	-5,7452 kA

Fonte: Autoria própria.

A distribuição das linhas de fluxo no transformador para condição de curto-circuito é apresentada na Figura 24.

**Figura 24 – Distribuição do fluxo magnético no transformador para condição de curto-circuito.**

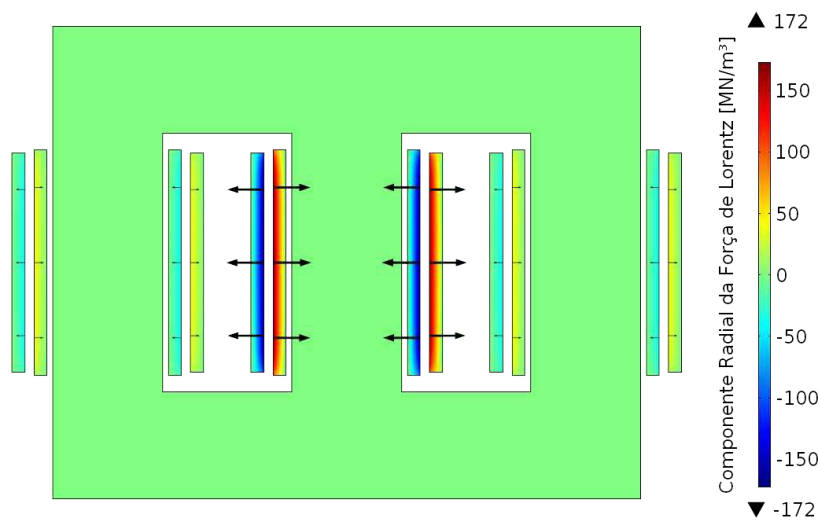


Fonte: Autoria própria.

A análise da Figura 24 mostra que, nessa condição o fluxo de dispersão é bastante intenso, possuindo amplitude maior até mesmo que o fluxo concatenado. Logo, espera-se que as amplitudes das forças sejam bastante elevadas.

A distribuição da componente radial da força de Lorentz é mostrada na Figura 25. A análise da figura mostra que as forças radiais provocam um estresse de tração nos enrolamentos externos, e um estresse compressivo nos enrolamentos internos. Tal comportamento era esperado, conforme análise da seção 2.2.

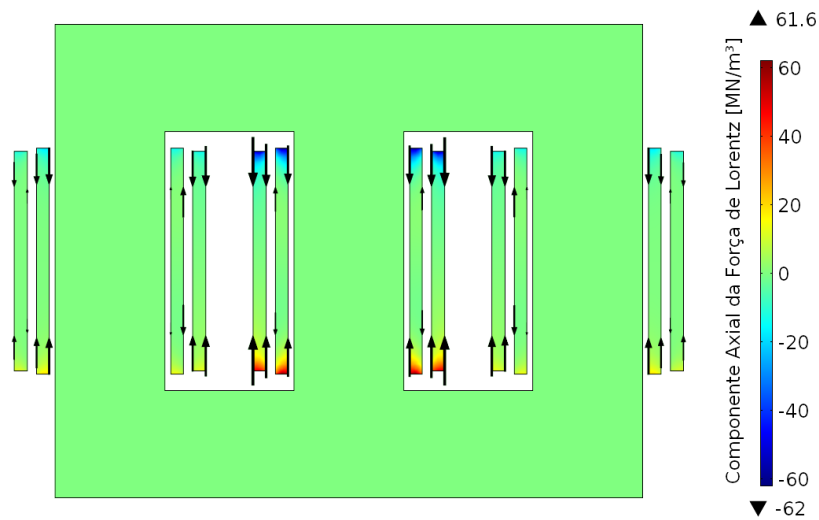
**Figura 25 – Distribuição da componente radial da força de Lorentz para condição de curto-circuito.**



Fonte: Autoria própria

A distribuição da componente axial da força de Lorentz sobre os enrolamentos é apresentada na Figura 26. Com a análise da figura é possível notar que neste caso as forças são do tipo compressivas em ambos os enrolamentos e as extremidades sofrem os maiores esforços. Nota-se ainda que a intensidade da força sobre enrolamento externo é maior que no interno, contrariando a análise feita na seção 2.2. Isto ocorre porque o transformador em questão possui enrolamentos com alturas diferentes. A equação (9) evidencia que a força axial cresce de maneira proporcional ao quadrado da redução da altura do enrolamento. Além disso, pelo enrolamento de baixa tensão há uma corrente de maior amplitude. Assim, o comportamento da simulação é o esperado.

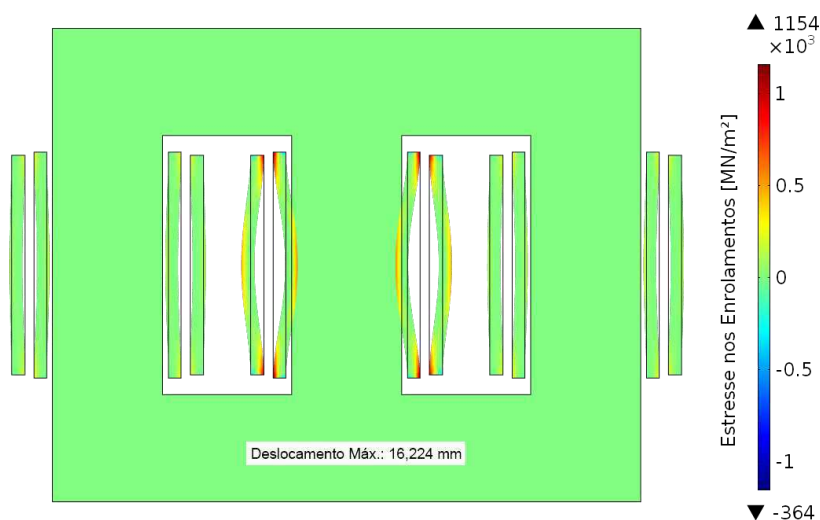
**Figura 26 – Distribuição da componente axial da força de Lorentz para condição de curto-circuito.**



Fonte: Autoria própria.

De maneira complementar, a distribuição do estresse tangencial sobre os enrolamentos é apresentada na Figura 27, assim como o deslocamento que estes sofrem em relação a sua posição original. O máximo deslocamento neste caso é de 16,224 mm e ocorre na metade da altura do enrolamento interno. Para melhorar a visualização do deslocamento, este foi ampliado 5 vezes.

**Figura 27 – Deslocamento dos enrolamentos ampliado 5X e distribuição do estresse tangencial nos mesmos para condição de curto-circuito.**



Fonte: Autoria própria.

Por fim, as magnitudes das grandezas obtidas pela abordagem analítica e computacional são apresentadas na Tabela 6. Nota-se que neste caso a discrepância entre as duas abordagens é bem menor que no caso do *inrush*. Isto evidencia que o método analítico é

mais apropriado para situações onde existe corrente circulando em ambos os enrolamentos, externo e interno.

**Tabela 6 – Magnitude das forças obtidas pelos métodos analítico e computacional para condição de curto-circuito.**

Parâmetro	Enrolamento	Método Analítico	Simulação	Desvio
Força radial (MN)	Externo	42,972	38,773	9,77%
	Interno	31,394	29,382	6,41%
Força axial (MN)	Externo	1,4439	1,355	6,16%
	Interno	1,1723	1,1198	4,48%
Estresse tangencial (MN/m <sup>2</sup> )	Externo	52,098	52,937	1,61%
	Interno	38,724	40,617	4,89%
Deslocamento máximo (mm)	Externo	-	12,738	-
	Interno	-	16,224	-

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, pode-se afirmar que o método computacional apresenta resultados mais precisos em relação ao método analítico, e pode ser aplicado em qualquer situação de operação sem restrições, diferentemente do segundo. No entanto, o método analítico é um método conservador, ou seja, fornece amplitudes de forças maiores que as obtidas por métodos mais realistas. Portanto, sua utilização no projeto de transformadores não compromete a segurança do equipamento. Todavia, a utilização de simulações poderia auxiliar de maneira positiva o projeto, uma vez que permite uma análise muito mais detalhada do fenômeno relacionado aos esforços eletromecânicos nos enrolamentos. Sendo possível, inclusive, prever qual será o deslocamento dos condutores para cada condição de operação do transformador.

Ao final da análise das duas situações de sobrecorrente, nota-se que, apesar da corrente de *inrush* possuir amplitude 8 vezes menor que a de curto-circuito, a primeira provoca no transformador, forças de mesma ordem de grandeza. Isto não era esperado, uma vez que as forças são proporcionais ao quadrado da corrente, conforme demonstrado na seção 2.2.

A explicação para tal fato é que, no curto-circuito, as correntes nos enrolamentos interno e externo têm sentidos opostos, de modo que uma atenua o fluxo magnético gerado pela outra. Já na energização a vazio do transformador, durante um breve período, só existe



corrente no enrolamento primário, e o fluxo magnético gerado não sofre atenuação, provocando assim forças de elevada amplitude.

Um fator agravante é que a energização é considerada uma operação normal do transformador, de modo que o sistema de proteção não é programado para atuar durante a ocorrência das correntes de *inrush*. Isso faz com que ela permaneça circulando por vários ciclos nos enrolamentos do equipamento. Assim, o efeito cumulativo dos estresses causados pode contribuir para redução da vida útil do transformador. É possível que os estresses de energização levem o transformador à falha por fadiga mais rapidamente que os estresses de curto-circuito, uma vez que o primeiro evento tem duração maior e é muito mais frequente ao longo da vida útil do equipamento.

Portanto, seria prudente que a análise da suportabilidade mecânica de transformadores levasse em conta a situação de energização do equipamento. Um estudo sobre o efeito cumulativo dos estresses causados nesta situação poderia esclarecer o impacto que a energização tem na redução de vida útil do equipamento.

## 5 CONCLUSÃO

O comportamento de um transformador de potência do ponto de vista mecânico foi quantitativamente e qualitativamente avaliado, quando da ocorrência dos dois principais tipos de sobrecorrente, a de energização e a de curto-circuito. As forças causadas pela circulação das sobrecorrentes foi determinada analiticamente e por meio de simulações computacionais. Adicionalmente, também foram determinados os deslocamentos sofridos pelos condutores devido às forças atuantes nas suas estruturas.

Os resultados demonstraram que apesar da corrente de *inrush* possuir amplitude 8 vezes menor que a de curto-circuito, ela causa estresses de mesma ordem de grandeza no transformador. Isso está associado ao fato de que no instante de energização, só há corrente no enrolamento primário, de modo que o fluxo magnético gerado não sofre atenuação do enrolamento secundário, como acontece no curto-circuito.

Como a sobrecorrente de energização tem duração maior e é muito mais frequente na vida útil do equipamento, é possível que este evento leve o transformador à falha por fadiga mais rapidamente que o curto-circuito.

Portanto recomenda-se que a energização seja levada em consideração no projeto e na análise da suportabilidade mecânica de transformadores.

Como trabalho futuro, é sugerido que seja realizado um estudo sobre o efeito cumulativo dos estresses causados pela energização, no sentido de determinar o tempo que estes levariam para causar a falha por fadiga do transformador. Recomenda-se ainda que seja utilizado uma ferramenta de análise de transitórios eletromagnéticos para determinação da corrente de energização. Dessa forma, é possível se obter valores mais precisos, além de possibilitar uma análise temporal do evento por completo, e não apenas do pior instante.

Também é sugerido que em trabalhos futuros se procure avaliar o comportamento dinâmico das forças eletromecânicas e que seja utilizado um modelo tridimensional para o transformador, pois isto poderia levar a resultados mais precisos e de interpretação visual mais simples e rica.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causados por Curtos-Circuitos "Passantes" e Correntes de Energização.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 111. 2007.
- BERTAGNOLLI, G. **The ABB approach to short-circuit duty of power transformers.** 3rd. ed. Zurich: ABB, 2007.
- CARTER, R. G. **Electromagnetism for Electronic Engineers - Examples.** Frederiksberg: Ventus Publishing, 2010.
- CHIESA, N. **Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation.** Doctoral Theses. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, p. 226. 2010.
- COLTMAN, J. W. The Transformer [Historical Overview]. **IEEE Industry Applications Magazine**, Piscataway, v. 8, p. 8-15, Jan.-Feb. 2002. ISSN 10.1109/2943.974352.
- CSANYI, E. Importance of Transformer Inrush Current. **Electrical Engineering Portal**, 2012. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/importance-of-transformer-inrush-current>>. Acesso em: 17 de abril de 2015.
- GUERRA, F. D. C. F. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos.** Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2011.
- GUIMARÃES, R. **Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Correntes de Energização e de Curto Circuito.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 192. 2013.
- HARTLEY, W. H. **Analysis of Transformer Failures.** 36th Annual Conference of the International Association of Engineering Insurers. Stockholm: [s.n.]. 2003. p. 1-12.
- HUGHES, S. **Magnetic Fields and Forces.** Department of Physics. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, p. 97. 2005.
- IEC. **IEC 60076-5 - Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit.** International Electrotechnical Commission. Geneva, p. 71. 2006. (IEC 60076-5:2006).
- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice.** New York: Marcel Dekker, 2004.
- MAGWEB. **Electrial Steel (GO).** **MagWeb Web site**, 2015. Disponível em: <<http://magweb.us/product/electrical-steel-go/>>. Acesso em: 12 de julho de 2015.
- NERC. **Special Report: Spare Equipment Database System.** North American Electric Reliability Corporation. Atlanta, p. 32. 2011.

ROSENTINO JR., A. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-circuito Trifásico**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 200. 2010.