

# ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS NO TRANSFORMADOR SUBMETIDO A CURTO – CIRCUITO TRIFÁSICO

**Rodolfo Moises Rodrigues Bisneto<sup>1</sup> (EG)**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

## Área do Conhecimento: Engenharias.

*Transformadores de potência são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos, quando eles se danificam ou apresentam algum tipo de falha o seu reparo ou até mesmo a sua substituição demanda altos custos financeiros. Muitas falhas deste equipamento ocorre pela redução da resistência da isolação dos enrolamentos, que pode ser causado pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante sua operação normal, ou seja, em regime permanente, pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto circuito. A atuação dos sistemas de proteção, cujo tempo de resposta, via de regra, não impede que os transformadores sejam submetidos aos indesejáveis efeitos transitórios. Nessa perspectiva este artigo tem por meta apresentar uma metodologia analítica para estimar as forças radial e axial nos enrolamentos do transformador de força da subestação do IFG – Campus Itumbiara quando submetido a um curto circuito trifásico. Assim, os valores dessas forças em curto foram comparados com os de forças quando o transformador está sob carga nominal operando em regime permanente. Diante dos resultados obtidos pode-se observar o quão é elevado as forças radial e axial se o transformador for submetido a um curto circuito trifásico. Além disso, se esses valores fosse comparados com os suportados pelo condutor do enrolamento poderia saber se eles são inferiores ao limite de ruptura admissível, o que seria o ideal.*

**Palavras-chave:** Transformador de Potência; Forças Eletromagnéticas; Forças Eletromecânicas; Forças Axial; Forças Radial.

## Introdução

Transformadores de potência são equipamentos essenciais para operação de sistemas elétricos de potência e tem um alto custo financeiro na instalação, na manutenção e na substituição. Defeitos provocados pelos esforços eletromagnéticos nos enrolamentos resultantes de correntes de curto circuito podem reduzir a vida útil ou até mesmo provocar a perda total do equipamento.

A atuação dos sistemas de proteção, cujo tempo de resposta, via de regra, não impede que os transformadores sejam submetidos aos indesejáveis efeitos transitórios, aumentando assim os riscos de falhas em decorrência dos esforços, assim espera-se que um transformador experimente e suporte um determinado número de curto-circuito durante seu tempo de vida útil. Porém percebe-se que cada evento poderá provocar pequenos deslocamentos nos enrolamentos, os quais podem aumentar simultaneamente, reduzindo desta forma a vida útil do equipamento. Neste contexto, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação, de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas.

Outro fator determinante na ocorrência de falhas diz respeito a deterioração, ao longo de sua vida útil, das características mecânicas e elétricas, dos materiais utilizados na fabricação dos transformadores. Com o envelhecimento, as características internas do transformador tendem a se degradar o que aumenta as possibilidades de falhas. Assim um transformador novo tem melhores condições elétricas e mecânicas para resistir as condições adversas naturais ou de operação, tais como, descargas atmosféricas, transitórios de chaveamento, curtos-circuitos, dentre outros.

Apesar desse assunto ser uma preocupação dos projetistas e fabricantes de transformadores, também dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia

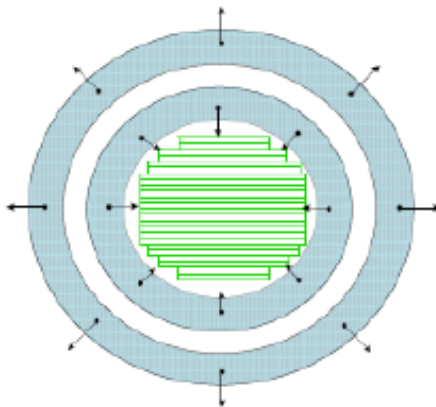
elétrica, há uma certa carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos desses esforços decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre estes equipamentos.

Este artigo tem por objetivo apresentar a metodologia analítica, os cálculos e análises das forças axial e radial que o transformador de força da subestação do IFG – Campus Itumbiara apresenta quando submetido a um curto circuito trifásico.

## Material e Métodos

As componentes das forças radiais agindo em enrolamentos concêntricos de um transformador são calculadas de maneiras fáceis e precisa por métodos elementares. A Figura 1 mostra o sentido das forças em ambos os enrolamentos a partir de uma vista em planta superior.

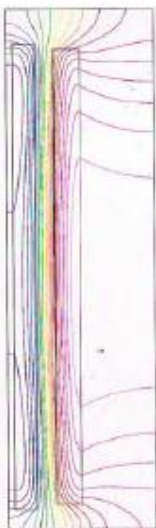
Figura 1: Forças produzindo estresse de tração nos enrolamentos externos e estresses compressivos no enrolamento interno.



Fonte: JUNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010, pg. 96.

Destaca-se que as forças radiais são levemente menores no final dos enrolamentos devido a uma curvatura do fluxo magnético, o qual pode ser visto pela figura 2.

Figura 1: Detalhe da Curvatura do Fluxo Magnético.



Fonte: JUNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010, pg. 96.

Do conceito de produto vetorial sabe-se que a força resultante é perpendicular ao plano formado pelos vetor  $\vec{dl}$  e  $\vec{B}$ , cujo o modulo e obtido pela Expressão (1):

$$dF = B \cdot I_S \cdot dl \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Onde,  $\theta$  é o ângulo formado pelos vetores  $\vec{dl}$  e  $\vec{B}$ . A partir da equação anterior, estabelecem-se as forças eletromagnéticas agindo em uma enrolamento de  $n$  espiras, percorridas por uma corrente de curto-circuito  $I_S$ , lembrando que  $\theta=90^\circ$ . Dessa forma, integrando-se a equação, o modulo da força que atua nos enrolamentos do transformador e considerando que o comprimento de uma espira circular e igual a  $L=\pi * D_m$  pode ser obtido pela Equação (2):

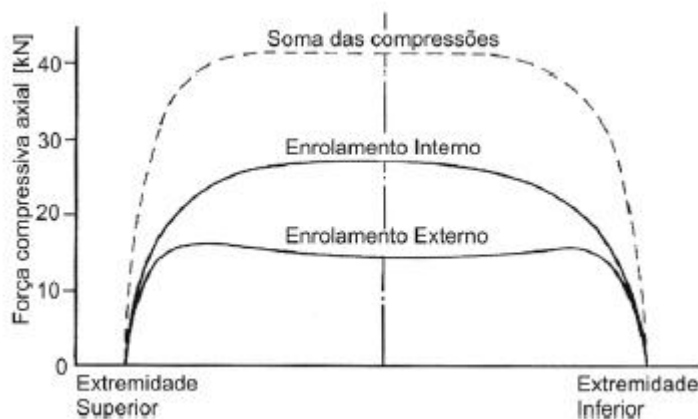
$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (n \cdot I_S)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

Onde,  $h$  é a altura do enrolamento [m] e o  $D_m$  é diâmetro médio do enrolamento [m].

Para o cálculo das componentes das forças axiais do transformador considera-se enrolamentos concêntricos de tamanho igual e sem derivações e sem desalinhamento axial (caso Ideal). Em transformadores que tem distribuição uniforme de forças magnetomotrizes, ou seja, enrolamentos concêntricos de igual comprimento, que não apresentam nenhum tipo de derivação ou desalinhamento de eixo entre o enrolamento interno e externo, as forças axiais que ocorrem devido aos campos radiais nas duas extremidades dos enrolamentos estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos.

As curvas de compressão total para este caso, que pode ser considerado ideal, podem ser visualizadas na figura 3. Neste exemplo foram analisadas as forças compressivas no enrolamento externo e interno. A curva pontilhada mostra a soma das compressões, ela apresenta valor constante ao longo da maior parte do enrolamento.

Figura 2: Curvas de compressão axial para enrolamentos concêntricos sem tape.



Fonte: JUNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010, pg. 108.

Analisando as curvas das forças compressivas nos enrolamentos externo e interno, e assumindo um fator de impulso  $f_i$ , tem-se um valor máximo fornecido pela Expressão (3):

$$F_a = \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi \cdot 10^5}{Z\% \cdot f \cdot h} \quad (3)$$

Onde,  $f_i$  é um fator de impulso com valor máximo (1,8),  $S_\phi$  é a potência aparente por fase em MVA,  $Z_{\%}$  é a impedância por unidade do transformador e  $f$  é a frequência em ciclos por segundo. Para transformadores maiores, na ausência de uma análise mais detalhada, pode-se considerar cerca de 2/3 a 3/4 desta força aplicada no enrolamento interno e o restante aplicada no enrolamento externo.  $f_i$

## Resultados e Discussão ou Relato de Caso

A tabela 1 apresenta-se as características elétrica do transformador de força da subestação do IFG – Campus Itumbiara. Além disto, o valor assimétrico da corrente de curto – circuito foi estimado considerando um fator de impulso igual a 1,8.

Tabela 1: Característica do Transformador de 500KV

Potência do Transformador (KVA)	500
Número de Fases	3
Tensão de Alta (V)	13800
Tensão de Baixa (V)	380
Impedância percentual	4,50%
Perdas no Ferro (W)	6000
Frequência (Hz)	60

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando os dados apresentados, foram realizados os cálculos das forças axiais e radiais com o transformador operando em regime permanente e quando submetido a um curto circuito trifásico na saída.

A tabela 2 apresenta os resultados da força radial do transformador para as duas situações.

Tabela 2: Força Radial

Enrolamento	Força Radial	
	Regime Permanente [N]	Curto - Circuito [KN]
Interno	93,45	46,143
Externo	118,32	58,422

Fonte: Elaborada pelo autor

A tabela 3 apresenta os resultados da força radial do transformador para as duas situações.

Tabela 3: Força Axial

Enrolamento	Força Axial	
	Regime Permanente [N]	Curto - Circuito [N]
Interno	97,04	174,68
Externo	48,53	87,35

Fonte: Elaborada pelo autor

De posse dos resultados apresentados nas tabelas 2 e 3 observa-se o quanto são elevadas as forças nos enrolamentos quando o transformador for submetido a um curto circuito trifásico, principalmente da força radial que aumentou cerca de 490 vezes. Essas forças podem provocar o deslocamentos dos enrolamentos e assim diminuir a sua vida útil ou até mesmo provocar a sua perda total. O ideal seria comparar essas forças com o limite de ruptura admissível do condutor do enrolamento para saber quantos fenômenos de curto circuito ele consegue suportar e calcular o quanto esses enrolamentos podem deslocar quando ocorrer um curto circuito trifásico sem comprometer as tensões de saída.

## Conclusões

Quando se falam de falhas em transformadores imaginam-se aquelas que estão associadas principalmente aos efeitos térmicos, dielétricos, e químicos. Porém algumas pesquisas veem mostrando que algumas falhas estão relacionadas aos fenômenos eletromagnéticos, além de existir falhas que não se sabem a origem por limitação de conhecimento dos pesquisadores.

Mesmo com toda tecnologia empregada na construção dos transformadores, ainda não se sabe quantos curtos circuitos o equipamento e capaz de suportar sem que o seu enrolamento seja danificado. Além disso os esforços produzidos pela corrente de curto circuito podem não ser suficientes para causar as falhas eletromagnéticas, mas podem contribuir para vários outros tipos de falhas.

O ideal seria retirar os transformadores de operação para averiguar as possíveis deformações, antes que eles causassem danos de grandes proporções no equipamento e interrompa o fornecimento de energia elétrica. Além de se desenvolver equipamentos, ensaios, e critérios para acompanhar a vida útil dos transformadores.

## Agradecimentos

À Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

Ao meu orientador Prof. Dr. Claudio Roberto Pacheco pela orientação, apoio e confiança.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Ana Claudia. Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-circuitos "Passantes" e Correntes de Energização. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Fevereiro de 2007.

JUNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010.