

ANÁLISE DE ESFORÇOS DE CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADORES EMPREGANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

G. Maschio, L. H. Medeiros, V. Bender, T. B. Marchesan
Laboratório de Ensaio de Média Tensão – INRI
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
maschio@ieee.org

Resumo— Neste artigo, é proposto uma análise em elementos finitos do fluxo disperso e de forças magnéticas em condições de operação nominal e em casos de curto-circuito. O estudo é desenvolvido de acordo com a disposição real dos componentes de um transformador trifásico de potência de 75 kVA e tensões de 220 V/ 13,8 kV. Os esforços internos que surgem são decompostos e analisados em duas direções: axial e radial. A força axial é responsável pelas forças de compressão das espiras internas enquanto a força radial é a responsável pela repulsão dos enrolamentos internos. Ambas as componentes dessas forças são potencialmente destrutíveis para o equipamento, seja na isolação, nos suportes ou nos condutores em si e devem ser estudadas cuidadosamente.

Palavras-chave — Corrente de curto-circuito, fluxo disperso, forças magnéticas, método de elementos finitos, transformadores.

I. INTRODUÇÃO

Dada a crescente expansão do sistema elétrico de potência para atender a demanda dos consumidores, a capacidade de curto-circuito do sistema também se torna cada vez maior, levando os equipamentos do sistema à condições cada vez mais extremas e preocupantes [1].

Os transformadores, caracterizados como um dos equipamentos mais importantes do sistema, merecem uma atenção especial quando sujeitos a eventos de curto-circuito, uma vez que as correntes que circulam por seus condutores se tornam bastante elevadas e prejudiciais. Dessa forma, estudos que proporcionam maior confiabilidade e expansão da vida útil destes equipamentos são de fundamental importância.

Nesse contexto é proposta uma análise em elementos finitos de um transformador real em operação, onde será feita uma comparação entre a operação nominal do equipamento e sob curto-circuito do mesmo. As principais variáveis de análise serão o fluxo disperso causado pelas elevadas correntes, e as forças magnéticas nos condutores que surgem devido a esse fluxo disperso.

As forças devem ser analisadas de forma a proporcionar um bom panorama para projeto, onde os componentes internos possam ser corretamente dimensionados. Para tal, os esforços internos serão decompostos em duas direções, de forma a facilitar a compreensão dos resultados.

II. ESFORÇOS DE CURTO-CIRCUITO

Dada a relevância dos transformadores elétricos nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, é necessário conhecer os fatores que levam esses equipamentos a falhar. Estudando tais fatores é possível projetar transformadores cada vez mais confiáveis para o sistema. Os esforços de curto-circuito são um dos principais motivos de falha de transformadores em operação [1]–[4].

O conceito de esforços de curto-circuito se refere às forças magnéticas que surgem nos enrolamentos dos transformadores, a partir de faltas no sistema elétrico em que estão inseridos. Para entender como surgem e seu comportamento, é preciso analisar alguns conceitos como a Lei de Ampère, fluxo disperso e força magnética, que são tratados a seguir.

A. Lei de Ampère

A Lei de Ampère possibilita o cálculo do campo magnético a partir da presença de uma corrente (\vec{I}) ou densidade de corrente (\vec{J}). A Lei é um aperfeiçoamento da Lei de Biot Savart, que fornece o campo magnético para uma corrente elétrica constante no tempo. A Lei de Ampère entra no eletromagnetismo como ferramenta para calcular o campo magnético resultante tanto de correntes constantes como de correntes alternadas [5].

Dessa forma, a Lei de Ampère diz que quando um condutor é circulado por corrente elétrica, surge em seu entorno um campo magnético, proporcional ao valor da corrente circulante. Esse campo depende dos valores de permeabilidade magnética (μ), característica intrínseca dos materiais do meio em que o condutor está inserido [5].

Tomando os conceitos da Lei de Ampère, para o caso mais simples de um condutor imerso em vácuo, sem outro material em sua vizinhança, o campo magnético \vec{B} gerado pela corrente \vec{I} é expresso por (1), onde aparece a constante μ_0 (permeabilidade magnética do vácuo). A integral é sobre um caminho fechado arbitrário e \vec{I}_{env} é a corrente envolvida por este caminho [5].

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \vec{I}_{env} \quad (1)$$

Tratando-se de componentes vetoriais, é de essencial importância que se conheça a direção da densidade de fluxo magnético expresso por (1). Essa componente tem sua direção explicada pela Regra de Fleming, onde o campo magnético \vec{B} surge no sentido dos dedos da mão dada uma corrente no sentido do polegar [5], conforme ilustra a Fig. 1.

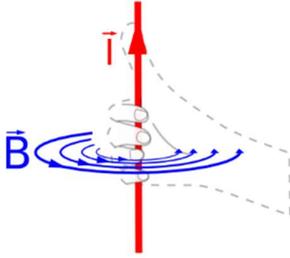


Fig. 1. Regra de Fleming.

B. Fluxo Disperso em Transformadores

Seguindo o mesmo raciocínio de campo magnético nas proximidades de condutores, no caso de um transformador não ideal, os enrolamentos, apesar de bastante eficientes, não conseguem fazer com que todo o fluxo magnético gerado pelas correntes de fase nos enrolamentos seja concatenado no núcleo do equipamento (permeabilidade não infinita) [6]. Algumas dessas linhas de campo magnético são dispersas e causam o surgimento de algumas regiões de elevada densidade de fluxo. Tais regiões são determinadas dada a geometria específica de cada caso e as características dos materiais no entorno.

Tratando-se de um transformador com dois enrolamentos sobrepostos, de baixa tensão (BT) e de alta tensão (AT), o fluxo disperso gerado por um enrolamento acaba por atingir o outro. Em outras palavras, as espiras do lado de BT ficam imersas no fluxo disperso das espiras da AT, assim como o contrário também é válido.

Uma vez que se tem um condutor percorrido por uma corrente elétrica imerso em um campo magnético, surgem forças magnéticas, que são tratadas na subseção seguinte.

C. Força Magnética

A força magnética surge a partir do movimento de cargas em um condutor imerso em um campo magnético (\vec{B}). Para questões de equacionamento, é suposto um condutor com essas características, e a força aparece devido à movimentação de cargas no campo \vec{B} , tal força pode ser expressa por (2) que relaciona a velocidade (v) dessas cargas (diretamente proporcional à corrente elétrica \vec{I}) com o campo \vec{B} e a quantidade de carga (q) de cada partícula em movimento [5], [7].

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Uma análise superficial de (2) traz que a força magnética no condutor é diretamente proporcional ao campo em que está imerso e à corrente que circula por ele. Dados os conceitos anteriores, o fluxo disperso dos enrolamentos de um

transformador causa um campo magnético \vec{B} disperso no meio em que estes mesmos enrolamentos estão imersos. Conclui-se então que quanto maior for o fluxo não concatenado no núcleo, maior o campo \vec{B} disperso e, portanto, maior é a força que surge nos enrolamentos.

D. Força entre Dois Condutores

Antes de uma análise mais completa para o caso específico de transformadores, pode-se analisar o comportamento de forças entre dois condutores que conduzem correntes em sentidos opostos. Conforme mostra a Fig. 2 e os conceitos já tratados, a corrente I_A resulta em um campo \vec{B}_A e a corrente I_B resulta em um campo \vec{B}_B .

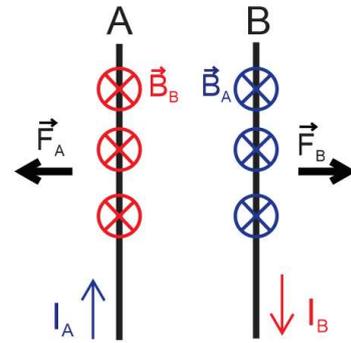


Fig. 2. Força entre dois condutores.

Como ambos os condutores estão imersos no fluxo do condutor vizinho, a direção da força em cada um deles pode ser analisada através da direção do produto vetorial entre a corrente \vec{I} e o campo \vec{B} . Dessa forma, a força entre dois condutores conduzindo correntes em sentidos opostos é de repulsão, sendo \vec{F}_A proporcional à corrente \vec{I}_A e ao campo \vec{B}_B , e \vec{F}_B proporcional à \vec{I}_B e \vec{B}_A . Vale notar que se as duas correntes fluíssem no mesmo sentido, a força entre os dois condutores seria de atração.

E. Situação de Curto-Circuito

Para uma situação de falta no sistema elétrico, onde os transformadores estão sujeitos à elevadas correntes, característica das situações de curto-circuito, o fluxo disperso tende a crescer e deixar os condutores dos enrolamentos imersos em um campo \vec{B} consideravelmente grande.

Nessa situação, a força magnética que surge devido à circulação de corrente e ao fluxo disperso de curto-circuito pode atingir amplitudes elevadas a ponto de danificar o equipamento. Sendo assim, faz-se necessário o estudo do comportamento dos esforços de curto-circuito em um transformador [1].

As forças que surgem nos enrolamentos são separadas em dois tipos: as radiais (F_R), que devido às correntes circulantes em sentidos opostos são de repulsão; e as axiais (F_A), que surgem devido às componentes não perpendiculares do campo magnético \vec{B} . A Fig. 3 ilustra a disposição dessas forças [1], [2], [4].

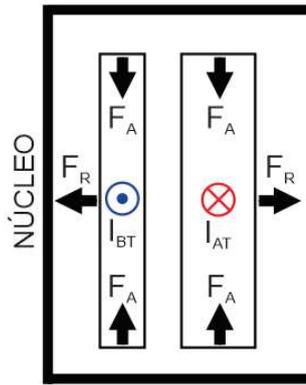


Fig. 3. Forças nos enrolamentos.

Tanto as forças radiais quanto as axiais são compostas de uma parcela contínua (CC), exercida sempre na mesma direção, e uma parcela alternada (AC), que oscila sua direção no dobro da frequência de excitação dos enrolamentos. Ambas as parcelas possuem aproximadamente o mesmo módulo, essa combinação faz com que as forças radial e axial resultantes alternem entre um valor máximo correspondente ao dobro, aproximadamente, da parcela CC e um valor mínimo, próximo de zero. Essa alternância leva a uma característica vibratória dos enrolamentos. Uma vez que a parte ativa não seja projetada adequadamente do ponto de vista mecânico, essa vibração pode danificar os componentes envolvidos e, conseqüentemente, o transformador [3].

III. SIMULAÇÕES EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS

Com o objetivo de dimensionar e estudar as forças internas de um transformador real em condição de curto-circuito, foram realizadas análises por meio de simulações computacionais empregando o método de elementos finitos.

A. Equipamento Estudado

A análise desenvolvida tomou como caso de estudo um transformador trifásico de potência igual a 75 kVA e tensões iguais a 220 V/13,8 kV. As dimensões construtivas usadas nas simulações são reais, mas seus valores não são apresentados por motivos de confidencialidade.

A análise foi feita através de uma modelagem 2D do equipamento no *software* Maxwell®. Para tal é desenhado um corte horizontal no centro da sua parte ativa (núcleo e enrolamentos), conforme Fig. 4.

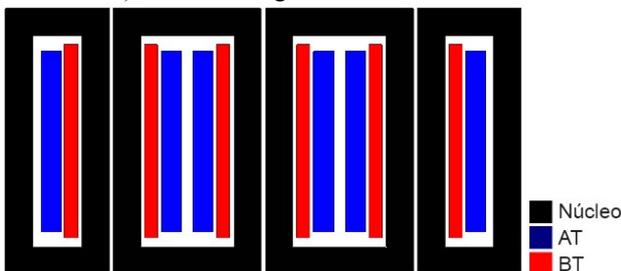


Fig. 4. Corte horizontal do transformador trifásico completo.

B. Simplificações do Desenho

Um dos primeiros pontos importantes do processo de simulação é a simplificação do desenho para que se obtenha certa redução de tempo computacional. Nesse sentido é feita a simulação do fluxo disperso (principal causa das forças) para o desenho 2D completo (Fig. 4) e para o desenho simplificado proposto na Fig. 5. Notou-se que a magnitude do fluxo disperso é aproximadamente a mesma em ambos os casos, o que valida a simplificação, já que o principal elemento de estudo não altera significativamente.

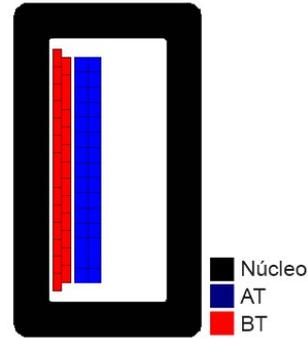


Fig. 5. Corte horizontal simplificado.

C. Particionamento dos Enrolamentos

Para melhor visualização do comportamento das forças em cada ponto dos enrolamentos, é proposto o particionamento da BT em 27 blocos, nomeados BT0 – BT26, e da AT em 30 blocos nomeados AT1 – AT30. O resultado desse particionamento pode ser visualizado na Fig. 5. Importante notar que a AT e a BT se dividem em duas “camadas” de blocos, essa disposição influenciará na futura interpretação dos gráficos das forças.

D. Simulação para Operação Nominal

A primeira análise é realizada para o transformador em condições nominais de operação, onde não há nenhuma falta ou distúrbio no sistema. Para tal, necessita-se conhecer as correntes que circulam em cada enrolamento nessa condição, tanto no lado de AT como no lado de BT [8]. Assim, através de (3) encontram-se as correntes de operação como indica a TABELA I.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (3)$$

TABELA I. CORRENTES PARA OPERAÇÃO NOMINAL

Lado de Alta Tensão	$I_{AT} = 3.1378 \text{ A}$
Lado de Baixa Tensão	$I_{BT} = 196.8239 \text{ A}$

As correntes nominais do transformador circulam em cada espira do enrolamento, isto é, a corrente de excitação que precisa ser inserida nos blocos do programa (particionamento) deve obedecer ao número de espiras de cada enrolamento e as respectivas divisões, seguindo o valor da corrente equivalente que gera o fluxo.

Através da análise da Lei de Faraday, é definido que as correntes nos enrolamentos de AT e BT do transformador circulam em sentidos opostos [5]. Essa disposição é explicada pelo princípio da ação e reação, uma vez que a corrente I_{BT} está disposta em tal sentido que seu fluxo gerado tende a anular o fluxo gerado pela I_{AT} .

Configuradas as condições de contorno e excitação do modelo trabalhado, é possível iniciar a etapa da simulação em si. O *software* retorna como resultado de campo \vec{B} na região a Fig. 6.

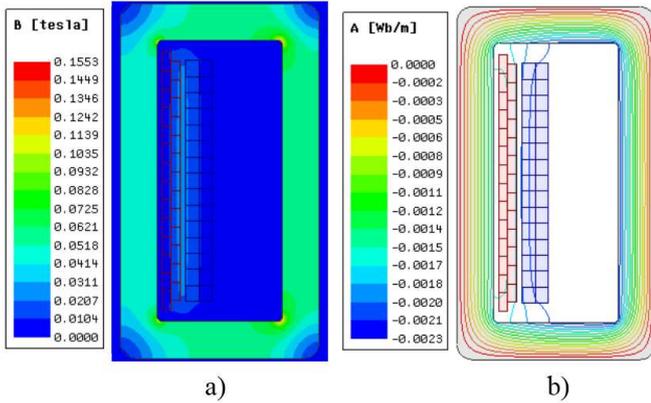


Fig. 6. a) Campo \vec{B} para corrente nominal. b) Linhas de fluxo para corrente nominal.

A primeira e mais simples observação é que a densidade de fluxo é maior no núcleo. Existe também um campo mais intenso no espaço entre os enrolamentos de AT e BT, tal componente é a principal responsável pelas forças que surgem nos enrolamentos, conforme seção II.C.

E. Simulação para Condição de Curto-Circuito

Observado o comportamento do fluxo disperso sob condições nominais de operação, analisou-se a situação de curto-circuito. Conforme supracitado, durante um curto-circuito as intensidades das correntes e dos fluxos são elevadas, levando a esforços mecânicos intensos que podem levar à avaria do equipamento.

Tal como no caso de operação nominal, surgem as forças axiais e radiais (Fig. 3) de maior módulo, dadas às correntes de excitação maiores. A parcela vibratória (AC), que é senoidal e no dobro da frequência de excitação do equipamento também aparece e é de intensidade preocupantemente maior, pois leva o equipamento mais facilmente à avaria.

F. Determinação da Corrente de Curto-Circuito

Para determinar as correntes de falta do sistema, toma-se como evento o curto-circuito trifásico nos terminais de um transformador com operação nominal. Esse evento descrito é o caso em que se apresentam as maiores correntes nos enrolamentos [8]. Então é determinado o módulo dessas correntes por (4), onde V_{pu} representa as tensões nominais e Z_1 a impedância de sequência positiva do transformador [8]. Para esse cálculo, é também considerado que não existe nenhuma outra impedância limitando a corrente de curto (gerador ou linhas), somente a do transformador.

$$I = \frac{V_{pu}}{Z_1} \quad (4)$$

Dessa maneira, os módulos das correntes de falta trifásica são apresentados na TABELA II.

TABELA II. CORRENTES PARA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

Lado de Alta Tensão	$I_{AT} = 98.226 A$
Lado de Baixa Tensão	$I_{BT} = 6161.4 A$

Dadas as correntes de excitação, a simulação é realizada. Como primeiro resultado observa-se a densidade de fluxo \vec{B} distribuída na região (Fig. 7).

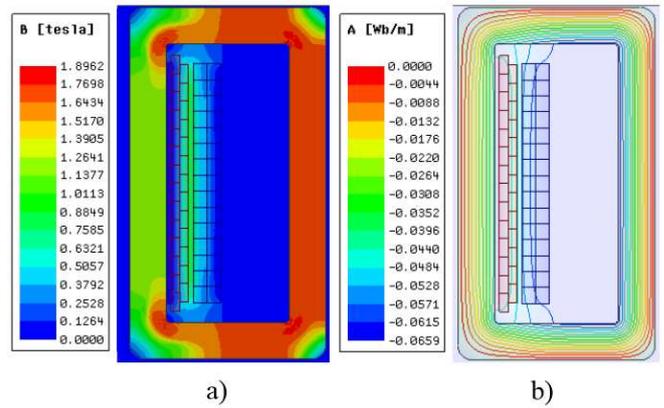


Fig. 7. a) Campo \vec{B} para corrente de curto-circuito. b) Linhas de fluxo para corrente de curto-circuito.

Novamente o fluxo disperso tem uma maior intensidade no espaço entre os enrolamentos de AT e BT. Dessa vez, porém, o fluxo disperso apresenta uma intensidade bastante superior (25 vezes) àquela apresentada na Fig. 6 e como estudado, essa condição implica em esforços magnéticos maiores nos condutores.

G. Comparação entre as Forças Resultantes

De forma a comparar as simulações para as excitações em condições nominais e em curto-circuito (SC), é feita uma análise das forças resultantes radiais (F_R) e axiais (F_A) conforme mostra a TABELA III.

TABELA III. FORÇAS RESULTANTES NOS ENROLAMENTOS

Forças Resultantes	BT ^a Nominal (N)	BT ^a SC (N)	AT ^a Nominal (N)	AT ^a SC (N)
Radial Máx	65,98	64623	65,98	64304
Axial Máx	0,01057	10,35	0,0086	8,42

^a Forças resultantes no enrolamento inteiro

As forças resultantes para a condição nominal são pequenas e seguem as direções estudadas na seção II.E. O esquemático que mostra as direções das forças é o apresentado na Fig. 3, onde F_A representa a componente resultante das forças axiais e F_R simboliza a resultante das componentes radiais. Como se tratam de correntes em sentidos opostos, as forças que surgem são de repulsão e de compressão.

Para a condição de curto-circuito, as forças apresentadas seguem as mesmas direções daquelas para o caso nominal, porém são significativamente maiores. Como os esforços para este caso são mais preocupantes, é interessante que se faça um estudo mais detalhado do comportamento dessas forças em cada bloco dos enrolamentos, definindo os gráficos de compressão dos condutores e as curvas das forças radiais.

H. Detalhamento das Forças em Situação de Curto-Circuito

Enfatizando o estudo das forças para o caso específico de curto-circuito, é mostrado com mais detalhes as forças em cada elemento, tanto da AT quanto da BT. A Fig. 8 mostra as forças radiais (F_R) na bobina de BT enquanto a Fig. 9 mostra as forças radiais na bobina de AT (os valores apresentados nessas figuras são os módulos, as direções são as apresentadas na Fig. 3, obedecendo a disposição de repulsão).

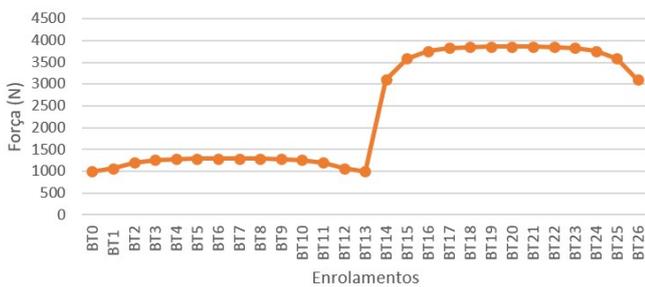


Fig. 8. Módulo de F_R no enrolamento de BT.



Fig. 9. Módulo de F_R no enrolamento de AT.

Claramente pode ser observado que a intensidade da força é maior nas espiras internas aos enrolamentos, e menor nas bobinas externas, tal fato pode ser explicado pela análise da Fig. 7, que mostra que a densidade de fluxo disperso é maior sobre os condutores posicionados na parte interna. Os condutores mais externos continuam tendo força sobre eles, porém de menor intensidade, já que estão imersos em um campo \vec{B} de menor valor.

Para a análise das componentes das forças no sentido axial dos enrolamentos (F_A). As Fig. 10 e Fig. 11 apresentam os esforços nas bobinas de BT e de AT, respectivamente (dessa vez os valores não estão em módulo, e seu sinal representa as direções das forças, simbolizando a compressão dos enrolamentos).

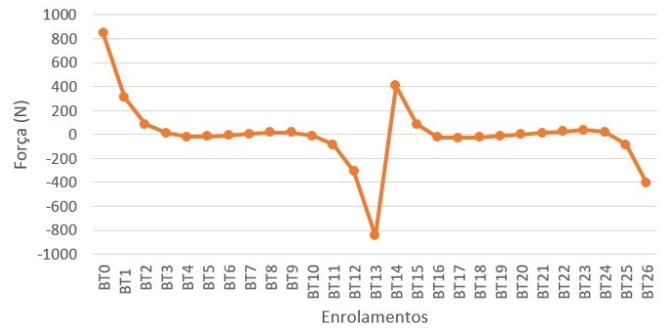


Fig. 10. Forças axiais (F_A) no enrolamento de BT.

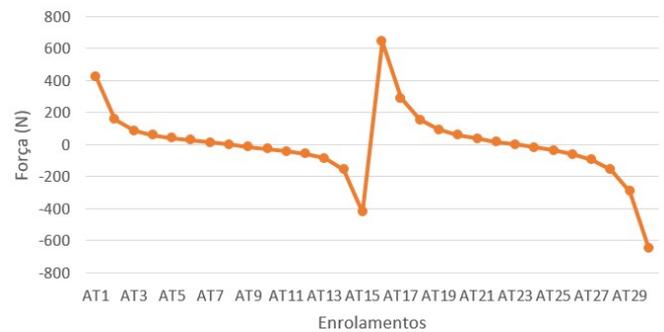


Fig. 11. Forças axiais (F_A) no enrolamento de AT.

Com a análise dos gráficos das forças axiais é possível notar que as forças nas primeiras espiras do topo (AT11 – AT15) tem a direção negativa (para baixo) e as últimas espiras inferiores (AT1 – AT5) tem direção positiva (para cima). Nesse caso, existe uma força de compressão que pode ser grande nas espiras centrais já que os esforços mecânicos se propagam de condutor para condutor e se acumulam nas espiras centrais, causando a compressão [2], [4].

Dessa forma, é feita uma análise para conhecer quais são os esforços de compressão máxima nas espiras centrais, uma vez que valores muito altos podem ocasionar o rompimento de isolações ou até mesmo dos condutores. Para tal, as Fig. 12 e Fig. 13 mostram os gráficos de compressão na BT e AT, respectivamente, que nada mais são do que a soma das forças axiais em cada bloco.



Fig. 12. Compressão no enrolamento de BT.

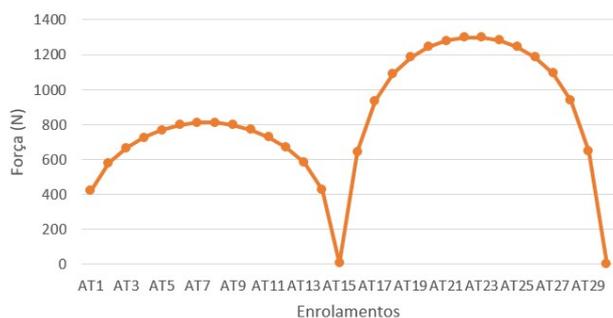


Fig. 13. Compressão no enrolamento de AT.

Dados os gráficos de compressão encontrados, é concluído que os maiores valores de compressão estão nos condutores exteriores, ou seja, os mais externos à concentração de linhas de fluxo no meio dos enrolamentos. Tal fato pode ser explicado pela presença de uma maior componente radial do fluxo disperso quando decomposto, como exemplifica a Fig. 14. A componente radial do fluxo é a responsável pelos esforços axiais nos enrolamentos.

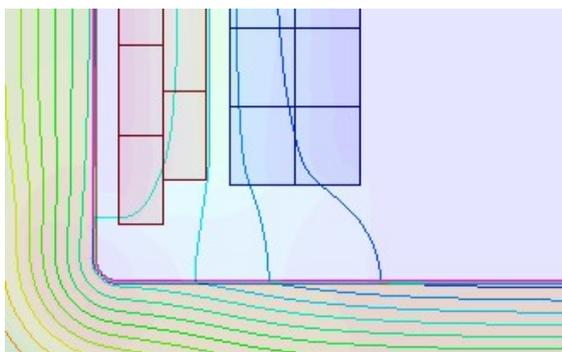


Fig. 14. Detalhe das componentes radiais do fluxo disperso.

- Pontos de máximos esforços

A TABELA IV. apresenta algumas observações de alguns pontos onde os esforços foram mais críticos, dando destaque para valores elevados, na ordem de grandeza de kN.

TABELA IV. PONTOS DE ESFORÇOS CRÍTICOS

Descrição	Valor (N)	Localização (bloco)
Força máxima radial BT	3864	BT20
Força máxima radial AT	3453	AT08
Força máxima axial BT	846	BT13
Força máxima axial AT	643	AT30
Compressão máxima BT	1250	BT03
Compressão máxima AT	1298	AT23

IV. CONCLUSÕES

Desenvolvidas as análises, foi possível observar e entender o comportamento de cada espira nos enrolamentos dos transformadores sob condições críticas originadas de faltas no sistema. Dada a capacidade destrutiva dos eventos de curto-circuito, o estudo desenvolvido proporciona um panorama de como ficam dispostas as forças na parte ativa dos transformadores, possibilitando o projeto de equipamentos

dimensionados corretamente, com suportes mecânicos, isolantes e condutores dimensionados para suportarem até os piores casos de esforços de curto-circuito.

Conforme supracitado, a parcela vibratória da força, no dobro da frequência de excitação, pode causar uma vibração mecânica intensa que pode danificar permanentemente os componentes sujeitos à ela. Apesar dos episódios de curto-circuito acontecerem em pequenos intervalos de tempo, as forças surgem bruscamente e em grande intensidade.

Dessa forma, as forças internas radiais tendem a aproximar os enrolamentos de BT do núcleo enquanto forçam o enrolamento de AT em direção ao tanque. As forças axiais comprimem as espiras e causam uma grande pressão nas espiras centrais. Ambas as componentes devem ser levadas em conta no dimensionamento do equipamento, evitando danos aos componentes internos e prolongando a vida útil do transformador como um todo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCT-GD e ao PPGEU da UFSM pelo suporte neste trabalho e aos órgãos financiadores CNPq, CAPES e FAPERGS.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Ahn, B. Lee, C. Kim, H. Shin, and S. Hahn, "Finite Element Modeling of Power Transformer for Short-circuit Electromagnetic Force Analysis," no. 4, pp. 5–8.
- [2] D. Bhalla, R. K. Bansal, and H. O. Gupta, "Analyzing short circuit forces in transformer for double layer helical LV winding using FEM," *Int. J. Performability Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 425–433, 2018.
- [3] S. Wang, H. Zhang, S. Wang, H. Li, and D. Yuan, "Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic – Structural Coupling Model," *Ieee Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 0–5, 2016.
- [4] A. Sinha and S. Kaur, "Analysis of short circuit electromagnetic forces in transformer with asymmetrically placed windings using Finite Element Method," 2nd IEEE Int. Conf. Innov. Appl. Comput. Intell. Power, Energy Control. with their Impact Humanit. CIPECH 2016, pp. 101–105, 2017.
- [5] Matthew N. O. Sadiku, *Elementos do Eletromagnetismo*, 3rd ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed., vol. 319, no. 4. Mc Graw Hill, 2003.
- [7] J. E. Villate, *Eletricidade e Magnetismo*, no. Item 10. Portugal, 2012.
- [8] W. D. Grainger, J. J., and Stevenson, *Power System Analysis*. North Carolina, 1994.