

Esforços Eletromecânicos em Transformadores Devido às Falhas Simétricas e Assimétricas Pelo Método dos Elementos Finitos

Pedro H. A. Barra¹, Henrique J. Faria Neto², Arnaldo J. P. Rosentino Jr.³, Antônio C. Delaiba²

¹ Universidade de São Paulo – EESC USP, ² Universidade Federal de Uberlândia – UFU, ³ Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM

Resumo — Este artigo tem por objetivo contribuir na investigação das forças eletromagnéticas em transformadores ocasionadas pelas falhas simétricas e assimétricas. Adicionalmente, o comportamento da distribuição do fluxo magnético de dispersão serão também analisadas para as condições nominais e sob aquelas condições originadas pelas correntes transitórias. Esses estudos serão realizados através da modelagem de uma unidade trifásica, baseada no método dos elementos finitos (MEF). Tendo como referência as simulações computacionais realizadas para as diversas eventualidades, os estresses eletromecânicos, bem como os aspectos magnéticos serão apresentados, discutidos e comparados. O transformador sob estudo é um protótipo trifásico de 15 kVA – 220/220V - Y/Y.

Palavras-chaves — Transformadores, Esforços Eletromecânicos, Método dos Elementos Finitos, Simulações Computacionais, Falhas Simétricas e Assimétricas.

I. INTRODUÇÃO

TRANSFORMADORES são componentes essenciais dos sistemas elétricos, tendo em vista que estes possibilitam a utilização da energia elétrica de forma apropriada pelos consumidores nos diversos níveis de tensão disponíveis. Outrossim, estes permitem a transmissão de energia elétrica em grandes distâncias com perdas reduzidas. Tais características fazem com que os transformadores sejam um dos elementos de maior custo nos sistemas elétricos.

Sob outra perspectiva, cada aplicação/unidade consumidora possui suas particularidades, fazendo com que os transformadores sejam concebidos levando em consideração suas características. Neste sentido, é possível concluir que, caso haja necessidades de substituição, estes equipamentos dificilmente estarão disponíveis comercialmente em curto prazo. Por conseguinte, este equipamento sendo danificado por quaisquer tipos de falhas, implicará em elevados custos financeiros para sua substituição ou reparo, impacto em indicadores de qualidade do serviço (DEC, FEC, pagamentos de compensações devido às transgressões dos limites de continuidade etc.), perdas de faturamento com energia não suprida, desenergizações de setores produtivos, entre outras consequências contraproducentes.

No que tange às falhas em transformadores, estas podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, dielétricas, químicas e mecânicas [1]. Ressalta-se que as falhas de origens mecânicas e dielétricas são as mais ocorrentes, sendo que estas

falhas estão diretamente relacionadas com forças eletromagnéticas advindas de elevadas correntes transitórias circulantes nos enrolamentos dos transformadores [2].

Tratando-se de falhas com origens mecânicas, nota-se a atuação de vários pesquisadores no sentido de compreender, de forma qualitativa e quantitativa, as suas origens, isto é, os esforços eletromecânicos que atuam nos enrolamentos dos transformadores. Como exemplo investigativo, [3] aborda os efeitos das correntes transitórias de curto-circuito trifásico nos enrolamentos através de expressões analíticas para cálculo das forças eletromagnéticas radiais e axiais. Ainda referente aos efeitos da corrente de curto-circuito trifásico, análises são encontradas em [4]-[6]. Não obstante às correntes de curto-circuito trifásico, as forças eletromagnéticas causadas pelas correntes de *inrush* também são investigadas [7]-[10].

As implicações das falhas com origens mecânicas, normalmente ocorrem na parte ativa do transformador. Estas são frequentemente manifestadas sob forma de vibrações, deslocamentos e deformações em enrolamentos, que provocam, por sua vez, a degradação do isolamento, fadiga mecânica dos condutores e danos estruturais para o suporte físico do enrolamento, entre outros fenômenos [10]. Além disso, ressalta-se o fato de que as forças eletromagnéticas oriundas de quaisquer elevadas correntes transitórias, fazem com que a suportabilidade mecânica do transformador seja diminuída de forma gradativa e com isto, sua vida útil também seja diminuída [11].

Nesta conjuntura, observa-se que as pesquisas existentes são direcionadas para estudos atrelados aos curtos-circuitos trifásicos, isto é, falhas simétricas, inexistindo, portanto, investigações relacionadas com as falhas assimétricas. O motivo para tal fato é que a severidade das falhas simétricas, via de regra, é maior quando comparada com falhas assimétricas. Todavia, tendo em vista que quaisquer elevadas correntes transitórias, por mais que possuam magnitudes inferiores à corrente de curto-circuito trifásico, podem implicar na diminuição da suportabilidade mecânica do transformador, tomando-se que a incidência percentual de falhas assimétricas é predominantemente maior, Tabela I [12], e por fim que há algumas situações em que as falhas monofásicas são até maiores que as trifásicas [13]. Isto posto, torna-se necessário o estudo dos efeitos eletromecânicos causados, também, pelas falhas assimétricas.

TABELA I. PORCENTAGENS MÉDIAS DE OCORRÊNCIA DOS CURTOS-CIRCUITOS. FONTE: [12].

Tipos de Curtos-Circuitos	Ocorrência em %
Trifásico (3 ϕ)	06
Bifásico (2 ϕ)	15
Bifásico-Terra (2 ϕ T)	16
Monofásico-Terra (ϕ T)	63

Diante deste contexto, este artigo tem por objetivo dar sequência e complementar os estudos até então realizados, analisando os esforços eletromecânicos em um transformador quando submetido às faltas simétricas e, sobremaneira, assimétricas. Através dos resultados encontrados, análises comparativas por intermédio do conceito de distâncias Euclidianas serão inseridas, no sentido de evidenciar que os esforços eletromecânicos advindos das faltas assimétricas, que além de mais incidentes, também podem ser expressivos e contribuir para a redução da suportabilidade mecânica dos transformadores.

II. ESTRESSES ELETROMECAÑICOS E FALHAS DEVIDO ÀS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

A redução da suportabilidade mecânica do transformador é motivada pela ocorrência eventual de forças eletromagnéticas elevadas nos enrolamentos do transformador. De forma geral, estas forças podem ser matematizadas como em (1), fundamentada na expressão básica das forças de Lorentz [14].

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

Onde:

$\vec{F}$: Densidade volumétrica de força magnética [N/m³];

$\vec{j}$: Densidade superficial de corrente [A/m²];

$\vec{B}$: Densidade de fluxo de dispersão [T].

Equação (1) define, portanto, as forças eletromagnéticas como sendo origem da interação entre as componentes das densidades de fluxo de dispersão e a corrente que circula nos enrolamentos. Em meio a este processo, tem-se que a densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento, dando origem às forças radiais. Por outro lado, a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente origina as forças axiais.

Quando o transformador está operando em condições normais, as forças exercidas nos enrolamentos são muito pequenas, pois as correntes e os campos de dispersão são relativamente pequenos. Entretanto, sob ação de transitórios, tais como faltas simétricas e assimétricas, as correntes nos enrolamentos e o fluxo de dispersão aumentam, fazendo com que elevadas forças eletromagnéticas apareçam.

Tratando-se especificamente das forças eletromagnéticas radiais, para enrolamentos do tipo núcleo envolvido, estas forças tendem a tracionar os enrolamentos internos (estresses de tração) e a comprimir os enrolamentos externos (estresses de compressão), conforme é apresentado na Fig. 1.

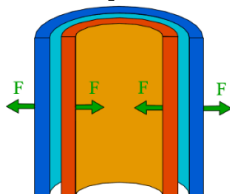


Fig. 1. Forças eletromagnéticas radiais no enrolamento externo e interno do transformador. Fonte: [15].

As consequências das deformações oriundas das forças eletromagnéticas radiais são [6, 15]:

- Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos, degradando de forma significativa o material isolante, reduzindo a suportabilidade mecânica e vida útil do transformador;
- Diminuição das distâncias da isolação entre núcleo e enrolamento interno, entre tanque e enrolamento externo e entre enrolamentos. Além da possível mudança na distribuição do fluxo magnético, partes do material isolante poderão estar expostas à maiores stresses elétricos fazendo com que a capacidade do transformador frente a surtos de tensão seja reduzida;
- Afrouxamento nas amarrações do enrolamento, permitindo mobilidade entre condutores. Com isto, as vibrações tornam-se mais intensas levando, em longo prazo, à fadiga do material isolante e das conexões.

Ainda tratando-se dos efeitos das forças eletromagnéticas, a Fig. 2 ilustra alguns tipos de deformações em enrolamentos de transformadores reais devido à ocorrência de forças radiais.

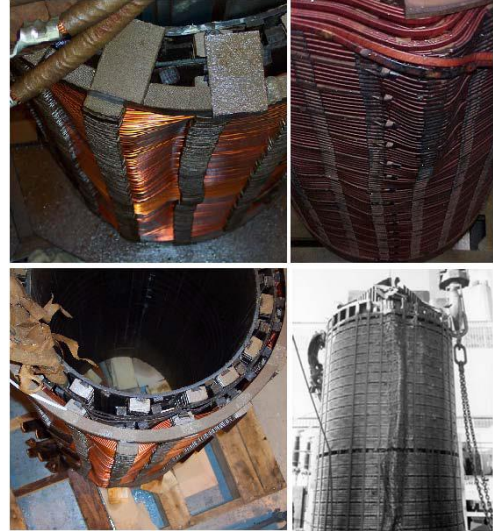


Fig. 2. Deformações em enrolamentos devido às forças eletromagnéticas radiais. Fonte: [16].

Por outro lado, as deformações axiais se configuram como apresentado na Fig. 3, onde é apresentado uma vista frontal dos enrolamentos de um transformador antes e depois da deformação.

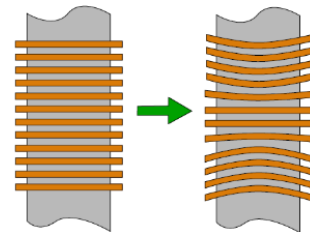


Fig. 3. Deformação axial em um enrolamento de transformador. Fonte: [15].

Um dos tipos de falhas devido à ação de forças axiais compressivas ocorre quando um enrolamento não está firmemente enrolado e amarrado, facilitando possíveis transposições dos condutores adjacentes. Adicionalmente, existem outros dois importantes tipos de falhas, quais sejam: *bending* e *tilting*. A Fig. 4 apresenta problemas relacionados com as forças eletromagnéticas axiais. Maiores detalhes sobre este item podem ser encontrados em [16].



Fig. 4. Deformações em enrolamentos devido às forças eletromagnéticas axiais. Fonte: [16].

III. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS UTILIZANDO-SE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)

A. Caracterização do Transformador sob Estudo e seu Modelo

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados obtidos nas simulações computacionais realizadas com um transformador trifásico com enrolamentos concêntricos. Esses estudos serão contemplados, utilizando-se a plataforma computacional conhecida como FEMM, baseada no método dos elementos finitos (MEF). As principais características geométrica, elétrica e magnética do transformador são apresentadas na Tabela II, sendo que mais detalhes são encontrados em [16].

TABELA II. CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS. FONTE: [16]

Potência do Transformador	15 kVA	
Número de Fases	3	
Impedância Percentual	3,47%	
Perdas Totais no Ferro	87,55 W	
	Enrol. Externo	Enrol. Interno
Tensão	220 V	220 V
Densidade de Corrente	$2,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$2,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Número de Espiras	66	66
Perdas em Curto	190 W	132 W
Resistência de Enrolamento	0,040 Ω	0,029 Ω
Diâmetro Externo	$151 \times 10^{-3} \text{ m}$	$106 \times 10^{-3} \text{ m}$
Diâmetro Interno	$132 \times 10^{-3} \text{ m}$	$87 \times 10^{-3} \text{ m}$
$I_{3\phi}$	2.192,14 A	2.191,88 A
$I_{2\phi}$	1.980,8 A	1.980,0 A
$I_{2\phi T}$	1.823,7 A	1.823,1 A
$I_{\phi T}$	1.777,3 A	1.776,8 A

A partir das características citadas e buscando-se uma precisão elevada, optou-se pela realização da modelagem dos enrolamentos do transformador, camada por camada e espira por espira. Diante do exposto, a Fig. 5 apresenta o resultado da modelagem no FEMM, onde nota-se através de um zoom em parte do enrolamento, o detalhamento dado em cada espira, enquanto que a Fig. 6, como parte da metodologia envolvendo elementos finitos, apresenta o resultado da geração das malhas para esta modelagem, que em seu processamento necessitou da geração de 444.407 nós.

No que tange às correntes elétricas empregadas, apresentadas na Tabela II, deve-se salientar que para todas as

situações operacionais estudadas, essas correntes foram obtidas através do ATP (*Alternative Transient Program*), observando as particularidades de cada situação. Destaca-se que o instante de tempo analisado, é aquele de pico máximo das correntes – valor assimétrico das correntes de curto e, de pico para situação nominal.

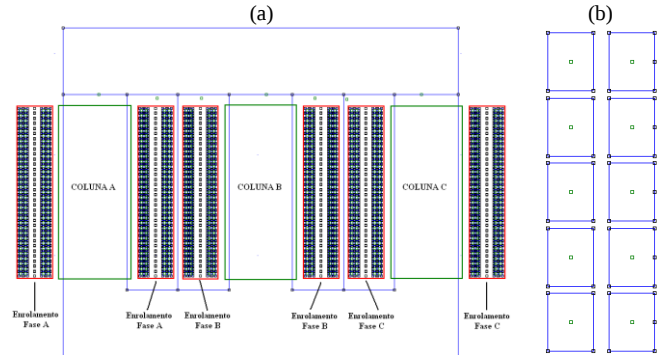


Fig. 5. (a) Modelagem do transformador no FEMM; (b) Parte do enrolamento ampliado para melhor visualização.

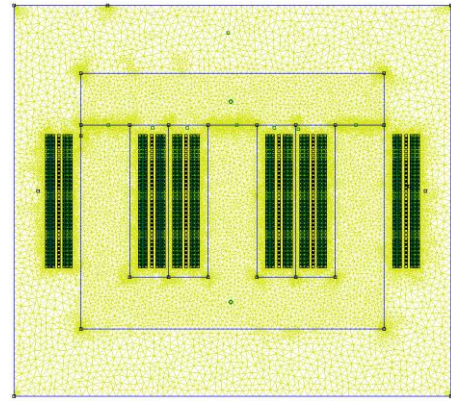


Fig. 6. Malhas geradas para o modelagem do transformador sob estudo.

B. Simulações Computacionais

A Fig. 7 ilustra a distribuição da densidade de fluxo magnético ($\vec{B}$) no interior do transformador frente às condições mencionadas. A Fig. 8 apresenta o gráfico de cores que indica as magnitudes de fluxo magnético apresentadas na Fig. 7.

As figuras mencionadas permitem uma série de análises referentes à característica da distribuição de fluxo magnético de dispersão, que muito dita o comportamento dos estresses eletromecânicos a serem experimentados pelos enrolamentos do transformador.

A Fig. 7(a) permite perceber que para as condições operacionais normais, a densidade de fluxo magnético (aproximadamente 1,55 [T]) é concentrada totalmente no material ferromagnético. Deve-se ressaltar que o valor de fluxo encontrado é condizente com o valor fornecido pelo fabricante.

Para situações onde o transformador está submetido a faltas simétricas, observa-se que grande parte da densidade de fluxo concentra-se entre os enrolamentos da fase B (aproximadamente 1,1 [T]), conforme Fig. 7(b). Desta forma, este elevado valor de fluxo de dispersão associado à uma elevada corrente de curto-circuito, implica em elevados esforços eletromecânicos. Por outro lado, constata-se uma redução significativa no fluxo magnético concentrado no núcleo.

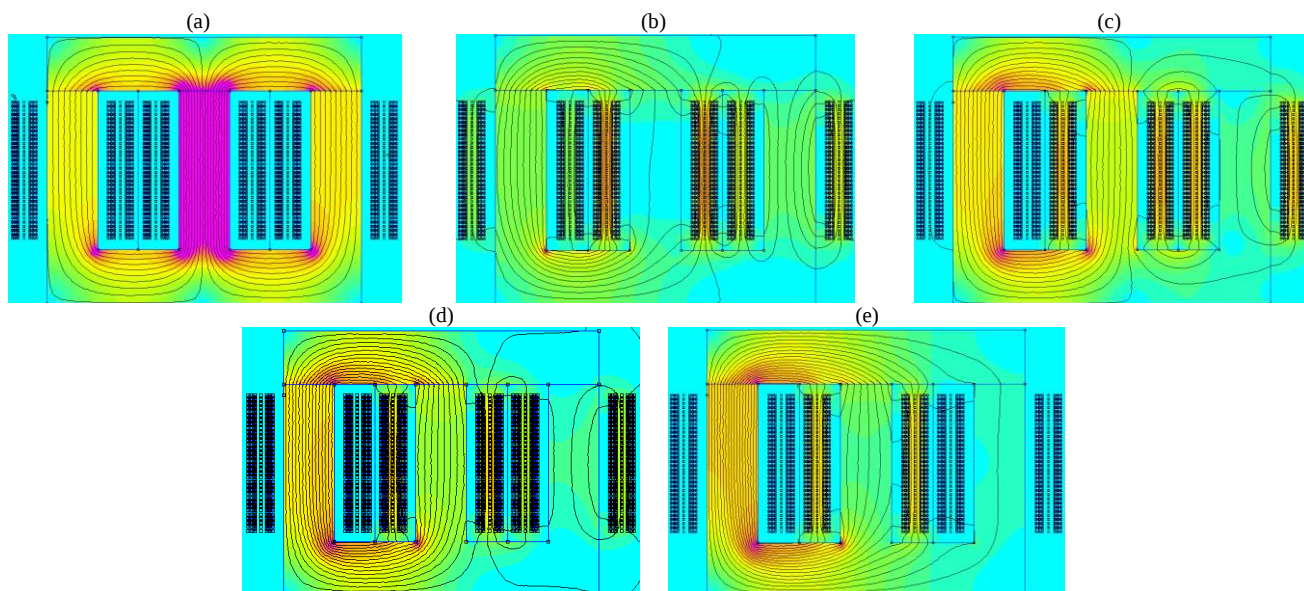


Fig. 7. Densidade de fluxo magnético obtida através do FEMM sob condições: (a) nominais; (b) curto-circuito trifásico; (c) curto-circuito bifásico; (d) curto-circuito bifásico envolvendo o terra; (e) curto-circuito monofásico envolvendo o terra.

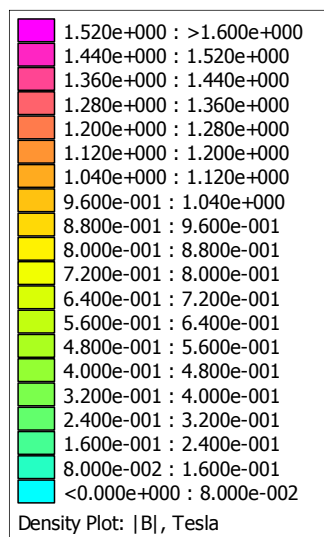


Fig. 8. Gráfico de cores representando os valores de fluxo magnético obtidos.

Em casos onde o transformador está exposto às faltas assimétricas, também são observados elevados valores de fluxos de dispersão entre enrolamentos. No caso da Fig. 7(c), onde tem-se um curto-circuito externo do tipo bifásico, nota-se que existe valores elevados (aproximadamente 0,92 [T]) de fluxo de dispersão entre os enrolamentos da fase B e também da fase C. Na Fig. 7(d), representando curtos-circuitos bifásicos envolvendo o terra, também constata-se fluxos de dispersão significativos entre as fases B (aproximadamente 0,89 [T]) e C (aproximadamente 0,53 [T]).

Por fim, tem-se a Fig. 7(e), que é o caso onde o transformador está submetido às correntes de curto-circuito monofásico. Verifica-se a existência, da mesma forma que no caso de faltas simétricas, de um elevado fluxo de dispersão entre os enrolamentos da fase B (aproximadamente 0,87 [T]), que associados com a corrente de curto-circuito monofásico pode acarretar em esforços eletromecânicos consideráveis nos enrolamentos do transformador.

Diante desta conjuntura, pode-se concluir que as faltas assimétricas possuem comportamentos semelhantes às faltas simétricas, no que tange à sua característica de surgimento de elevados fluxos de dispersão durante as faltas. Desta forma, faz-se necessário a existência de análises no contexto das forças eletromagnéticas atuantes nos enrolamentos dos transformadores, também, devido às faltas assimétricas.

No que diz respeito às forças eletromagnéticas radiais, a Tabela III apresenta, para as situações estudadas, os resultados obtidos através das simulações computacionais. Mostra-se os valores de forças radiais totais, forças radiais médias e forças radiais distribuídas para cada enrolamento. As extensas expressões para os cálculos podem ser encontradas em [16].

TABELA III. FORÇAS RADIAIS PARA AS VARIADAS SITUAÇÕES OPERACIONAIS.

Evento	Enrol.	Força Radial Total (F_r [N])	Força Radial Média (F_{rmed} [N])	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$ [N/mm])
I_n	Externo	20,9107	6,6561	0,0008
	Interno	14,1336	4,4989	0,0008
$I_{3\phi}$	Externo	$31,6814 \times 10^3$	$10,0845 \times 10^3$	1,0798
	Interno	$21,6806 \times 10^3$	$6,9012 \times 10^3$	1,0836
$I_{2\phi}$	Externo	$26,2003 \times 10^3$	$8,3398 \times 10^3$	0,8930
	Interno	$17,7261 \times 10^3$	$5,6424 \times 10^3$	0,8859
$I_{2\phi T}$	Externo	$22,0313 \times 10^3$	$7,0128 \times 10^3$	0,7509
	Interno	$14,9544 \times 10^3$	$4,7601 \times 10^3$	0,7474
$I_{\phi T}$	Externo	$20,6826 \times 10^3$	$6,5835 \times 10^3$	0,7049
	Interno	$14,2033 \times 10^3$	$4,5210 \times 10^3$	0,7099

A partir das forças radiais apresentadas na Tabela III, pode-se estimar o estresse radial médio que é o valor de referência no que tange à suportabilidade mecânica do material utilizado na concepção dos enrolamentos. Neste sentido, apresenta-se na Tabela IV o estresse radial médio para cada enrolamento e para cada situação analisada.

TABELA IV. ESTRESSE RADIAL MÉDIO NOS ENROLAMENTOS PARA AS VARIADAS SITUAÇÕES OPERACIONAIS.

Evento	Enrol.	Estresse Radial Médio no Enrolamento ($\sigma_{r-médio}$ [N/mm ²])
I_n	Externo	0,0032
	Interno	0,0022
$I_{3\phi}$	Externo	4,8507
	Interno	3,3195
$I_{2\phi}$	Externo	4,0115
	Interno	2,7140
$I_{2\phi T}$	Externo	3,3731
	Interno	2,2896
$I_{\phi T}$	Externo	3,1667
	Interno	2,1746

Salienta-se que os valores encontrados para os estresses radiais podem ser comparados com o valor de estresse admissível, fornecido pelo fabricante e conhecido na literatura por $\sigma_{0,2}$ [1]. Os valores de estresses radiais, via de regra, são sempre bem inferiores aos estresse admissível, o que de fato, é esperado. Contudo, pesquisas tem mostrado que, apesar dos estresses alcançados devido aos curtos-circuitos serem inferiores aos estresses admissíveis, a suportabilidade mecânica do transformador decresce ao decorrer dos variados eventos impostos ao equipamento [10, 11].

No que refere-se às forças eletromagnéticas axiais, apresenta-se na Tabela V os resultados obtidos a partir das simulações computacionais para as situações operacionais apresentadas, excetuando-se a operação normal, devido aos seus valores ainda mais inexpressivos que nas forças radiais. Mostra-se nesta tabela os valores de forças axiais compressivas totais, forças axiais compressivas por enrolamento e forças axiais nas extremidades dos enrolamentos.

TABELA V. FORÇAS AXIAIS PARA AS VARIADAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS.

Evento	Enrol.	Força Axial Extremidade (F_a [N])	Força Axial Compressiva (F_c [N])	Força Compressiva Total (F_{cT} [N])
$I_{3\phi}$	Externo	$0,56 \times 10^3$	$3,1434 \times 10^3$	$5,4899 \times 10^3$
	Interno	$0,3865 \times 10^3$	$2,3466 \times 10^3$	
$I_{2\phi}$	Externo	$0,5058 \times 10^3$	$2,5523 \times 10^3$	$4,4437 \times 10^3$
	Interno	$0,3024 \times 10^3$	$1,8915 \times 10^3$	
$I_{2\phi T}$	Externo	$0,3973 \times 10^3$	$1,9517 \times 10^3$	$3,6417 \times 10^3$
	Interno	$0,2628 \times 10^3$	$1,6900 \times 10^3$	
$I_{\phi T}$	Externo	$0,3337 \times 10^3$	$1,5512 \times 10^3$	$3,2656 \times 10^3$
	Interno	$0,2586 \times 10^3$	$1,7145 \times 10^3$	

C. Comparativo Através de Distâncias Euclidianas

Para fins comparativos, os valores de estresses radiais apresentados na Tabela 2.4 são normalizados e através destes, torna-se possível a aplicação simplificada do método da distância Euclidiana, fortemente empregado na avaliação de efeitos de afundamentos de tensão em motores de indução [17]. No contexto deste artigo, esta metodologia possibilita, de maneira simples, comparações diretas entre os estresses originados pelos variados eventos. Em um primeiro momento, compara-se os estresses radiais médios para os enrolamentos externo e interno.

Para a construção de uma matriz de distâncias Euclidianas para estresses radiais, faz-se necessário que, para cada enrolamento, seja determinado o estresse radial máximo observado entre os variados eventos estudados (σ_{rmax}). Este valor é definido em observância à Tabela IV. A partir disto, (2) é uma expressão normalizada da distância Euclidiana percentual entre estresses radiais $\sigma_{r\alpha}$ e $\sigma_{r\beta}$, sendo α e β eventos quaisquer.

$$d(\sigma_{r\alpha}, \sigma_{r\beta}) = \frac{D(\sigma_{r\alpha}, \sigma_{r\beta})}{MAX} 100 = \frac{100}{\sigma_{rmax}} \sqrt{(\sigma_{r\alpha} - \sigma_{r\beta})^2} \quad (2)$$

Logo, tomando-se (2) e a Tabela IV como base, para fins comparativos, apresenta-se a Tabela VI que mostra as distâncias Euclidianas entre estresses radiais ocorrentes no enrolamento externo (EE) e a Tabela VII que mostra as distâncias Euclidianas entre estresses radiais ocorrentes no enrolamento interno (EI).

TABELA VI. COMPARATIVO DE ESTRESSSES RADIAIS NO ENROLAMENTO EXTERNO ATRAVÉS DE DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EE)					
%	$\sigma_{r3\phi}$	$\sigma_{r2\phi}$	$\sigma_{r2\phi T}$	$\sigma_{r\phi T}$	σ_{rmax}
$\sigma_{r3\phi}$		17,30	30,46	34,72	0,00
$\sigma_{r2\phi}$	17,30		13,16	17,42	17,30
$\sigma_{r2\phi T}$	30,46	13,16		4,26	30,46
$\sigma_{r\phi T}$	34,72	17,42	4,26		34,72
σ_{rmax}	0,00	17,30	30,46	34,72	

TABELA VII. COMPARATIVO DE ESTRESSSES RADIAIS NO ENROLAMENTO INTERNO ATRAVÉS DE DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EI)					
%	$\sigma_{r3\phi}$	$\sigma_{r2\phi}$	$\sigma_{r2\phi T}$	$\sigma_{r\phi T}$	σ_{rmax}
$\sigma_{r3\phi}$		18,24	31,03	34,49	0,00
$\sigma_{r2\phi}$	18,24		12,79	16,25	18,24
$\sigma_{r2\phi T}$	31,03	12,79		3,46	31,03
$\sigma_{r\phi T}$	34,49	16,25	3,46		34,49
σ_{rmax}	0,00	18,24	31,03	34,49	

Tomando-se como base a Tabela VI e VII, observa-se que os estresses radiais devido aos curtos-circuitos monofásicos possuem a maior distância para os valores de estresse máximo ($d(\sigma_{r\phi T}, \sigma_{rmax}) = 34,72\%$ para o EE e $d(\sigma_{r\phi T}, \sigma_{rmax}) = 34,49\%$ para o EI). Por outro lado, observa-se que os estresses radiais devido à curtos-circuitos bifásicos possuem menor distância para os valores de estresse máximo ($d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{rmax}) = 17,30\%$ para o EE e $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{rmax}) = 18,24\%$ para o EI). As distâncias normalizadas permitem ainda comparativos entre eventos, por exemplo, os estresses radiais para o enrolamento externo devido à curtos-circuitos bifásicos e monofásicos possuem a distância entre eles de $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{r\phi T}) = 16,25\%$.

Através da Tabela VI e VII constata-se que as distâncias normalizadas dos estresses radiais para o EE pouco diferem-se das distâncias normalizadas dos estresses radiais para o EI. No entanto, pela Tabela IV já fora apresentado que os estresses radiais observados no EE possuem valores superiores aos observados no EI.

Na Tabela IV nota-se que os estresses radiais máximos observados, quer seja para o EE, quer seja para o EI, são

advindos de faltas simétricas, o que de certa forma, justifica que as pesquisas atreladas à esta temática se direcionem para estudos pertinentes à estas faltas. No entanto, verifica-se através do comparativo apresentado na Tabela VI e VII, que as distâncias Euclidianas entre faltas simétricas e assimétricas não são muito elevadas. Isto posto, aliado à maior ocorrência das faltas assimétricas justifica pesquisas direcionadas para análises dos esforços eletromecânicos advindos, também, destes eventos.

Sob outra perspectiva, a partir de modificações em (2), (3) é uma expressão normalizada de distância Euclidiana percentual aplicadas às forças axiais compressivas totais $F_{cT\alpha}$ e $F_{cT\beta}$, sendo α e β eventos quaisquer.

$$d(F_{cT\alpha}, F_{cT\beta}) = \frac{D(F_{cT\alpha}, F_{cT\beta})}{MAX} 100 = \frac{100}{F_{cTm\acute{a}x}} \sqrt{(F_{cT\alpha} - F_{cT\beta})^2} \quad (3)$$

Desta forma, da mesma maneira que fora realizado para os estresses radiais, apresenta-se na Tabela VIII as distâncias Euclidianas para as forças axiais compressivas totais (F_{cT}). Para forças axiais, dispensa-se maiores comparações além desta, pois as distâncias percentuais das outras modalidades de força apresentam valores semelhantes aos apresentadas na Tabela VIII.

TABELA VIII. COMPARATIVO DE FORÇAS COMPRESSIVAS TOTAIS ATRAVÉS DE DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS.

Distância Euclidiana – Força Compressiva Total					
%	$F_{cT3\phi}$	$F_{cT2\phi}$	$F_{cT2\phi T}$	$F_{cT\phi T}$	$F_{cTm\acute{a}x}$
$F_{cT3\phi}$		19,06	33,66	40,52	0,00
$F_{cT2\phi}$	19,09		14,61	21,46	19,06
$F_{cT2\phi T}$	33,66	14,60		6,86	33,66
$F_{cT\phi T}$	40,52	21,46	6,86		40,52
$F_{cTm\acute{a}x}$	0,00	19,06	33,66	40,52	

Observa-se para o caso das forças eletromagnéticas axiais uma maior preeminência em termos de severidade das forças axiais compressivas totais advindas de faltas simétricas. Adicionalmente, nota-se um maior distanciamento das forças axiais advindas de faltas simétricas e assimétricas, quando comparado com os distanciamentos obtidos para os estresses radiais.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a modelagem, baseada no método dos elementos finitos, para a obtenção de esforços eletromecânicos e aspectos magnéticos devido à faltas simétricas e assimétricas. Constatou-se que o fluxo magnético de dispersão possui valores elevados para faltas simétricas e assimétricas, quando comparados com a situação nominal. Por outro lado, no núcleo magnético os valores encontrados são mais elevados para a situação nominal em comparação com os transitórios.

Para todas as situações, foram apresentados os valores obtidos para forças radiais totais, forças radiais médias, forças radiais distribuídas, estresses radiais médios, forças axiais nas extremidades dos enrolamentos, forças axiais compressivas dos enrolamentos e por fim, forças axiais compressivas totais.

A partir da aplicação do conceito de distância Euclidiana,

apresentou-se um comparativo de estresses radiais e forças axiais compressivas totais entre faltas simétricas e os vários tipos de faltas assimétricas. Atesta-se através destes comparativos que as faltas assimétricas carecem de maior atenção no que tange aos esforços eletromecânicos, uma vez que possuem maior ocorrência e sua severidade pode não ser tão inferior aos esforços ocasionados por faltas simétrica, sendo que em alguns casos, o curto-circuito monofásico supera a intensidade das faltas simétricas.

V. REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE, Working Group 12.19, “The Short Circuit Performance of Power Transformers”, Brochure 209, 2002.
- [2] CIGRE, Groupe du Travail 12.05, “Enquête Internationale sur les Défaillances em Service des Transformateurs de Grande Puissance”, Brochure 209, 2002.
- [3] M. Waters, “The Short-Circuit Strength of Power Transformers”. 5. ed. London: MacDonald and Co., 1966.
- [4] F. L. M. Andrade, et al., “Forças Eletromagnéticas nos Enrolamentos de um Transformador: Modelagem Analítica versus Método dos Elementos Finitos”. In: IX Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – IX CBQEE, Cuiabá, 2011.
- [5] A. J. J. P. Rosentino, et al., “Modelagem e Análise dos Estresses Eletromecânicos em Transformadores Causados por Curtos-Circuitos”. In: XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – XI CBQEE, Araxá, 2015.
- [6] W. J. McNutt, W. M. Jhonson, R. A. Nelson, R. E. Ayers, “Power Transformer Short circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration”, *IEEE Trans. on Power Apparatus*, vol. 89, no. 6, pp. 1955- 1969, 1970.
- [7] W. Neves, et al., “A Comparative investigation of electromechanical stresses on transformers caused by inrush and short-circuit currents”. In: International Conference on Electrical Power Quality, Lisbon, 2011.
- [8] A. A. Adly, “Computation of Inrush Current Forces on Transformer Windings”, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 2855- 2857, 2001.
- [9] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, T. Noori, “Three and Two-Dimensional Finite-Element Computation of Inrush Current and Short-Circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three-Phase Core-Type Power Transformer”, *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 44, no. 5, pp. 590- 597, 2008.
- [10] R. Guimarães, A. C. Delaiba, J. C. Oliveira, E. Saraiva, A. J. J. P. Rosentino, “Electromechanical Forces in Transformers Caused by Inrush Currents: An Analytical, Numerical, Experimental Approach”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 836- 872, 2013.
- [11] R. Guimarães, A. J. J. P. Rosentino, V. F. Bossa, A. C. Delaiba “Suportabilidade Mecânica e Redução de Vida Útil de Transformadores Causado Pela Corrente de Curto-Circuito”. In: Workshop Internacional Sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais – VII Workspot, Rio de Janeiro, 2014.
- [12] G. Kindermann, “Curto-Circuito”. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.
- [13] F. Sato; W. Freitas, “Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica”. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- [14] T. Yun-Qiu, Q. Jing-Qiu, X. Zi-Hong, “Numerical Calculation of Short Circuit Electromagnetic Forces on the Transformer Winding”, *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 26, no. 2, pp. 1039- 1041, 1990.
- [15] E. R. Aguiar, “Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [16] A. J. J. P. Rosentino, “Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [17] L. Guasch, F. Córcoles, J. Pedra, “Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 774- 782, 2004.