

Análise do Impacto da Inserção de Geração Distribuída Sobre os Esforços Eletromecânicos em Transformadores

Leonardo H. Medeiros*. Guilherme Maschio*. Antônio M. Kaminski*. Micael M. Oliveira*. Daniela M. Bueno*. Vitor C. Bender*. Tiago B. Marchesan*

**Instituto de Redes Inteligentes, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
(e-mail: leohm.29@gmail.com).*

Abstract: The insertion of new energy generation units on the present distributed generation (DG) scenario provides benefits to the electric power industry, but also some risks, such as an increase of the system short-circuit level, resulting in an increase of electromechanical forces applied on transformers windings during short-circuit events. If a transformer is subjected to forces greater than its supported limits, it is subject to internal failures or even destruction, leading to technical and financial losses. This paper analyzes the DG insertion impact on electromechanical forces in transformers and how harmful the increase of short-circuit level can be to these equipment. Short-circuit simulations were performed on a proposed system, with and without DG, verifying the current levels. Through simulations employing the finite element method, the maximum currents were used to determinate the electromechanical forces and its effects on transformer.

Resumo: A inserção de novas unidades geradoras de energia no atual cenário de geração distribuída (GD) traz, além de benefícios, riscos para o setor elétrico, como a elevação do nível de curto-circuito dos sistemas, resultando em uma elevação dos esforços eletromecânicos submetidos aos enrolamentos dos transformadores durante eventos de curtos-circuitos. Se um transformador é submetido a esforços maiores que seus limites suportados, está sujeito a falhas internas ou até mesmo destruição, levando a prejuízos técnico e financeiro. Este trabalho analisa o impacto da inserção de GD nos esforços eletromecânicos sobre os transformadores, e como pode ser prejudicial para estes equipamentos um aumento do nível de curto-circuito do sistema. Foram realizadas simulações de curtos-circuitos de um sistema elétrico proposto, com e sem GD, verificando os níveis de correntes. Através de simulações empregando o método dos elementos finitos, as máximas correntes foram utilizadas para determinar os esforços e seus efeitos no transformador.

Keywords: Electromechanical Forces; Distributed Generation, Finite Element Method, Short Circuit Level, Power Electric System, Transformers.

Palavras-chaves: Esforços Eletromecânicos; Geração Distribuída; Método dos Elementos Finitos, Nível de Curto-Circuito, Sistema Elétrico de Potência; Transformadores.

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico está sob mudanças no atual cenário das redes inteligentes, desde a geração de energia até a automação residencial. A partir disso, uma das principais questões é a utilização de Geração Distribuída (GD), inserindo novas unidades geradoras no Sistemas Elétricos de Potência (SEP) a partir de potenciais de geração de diferentes regiões. Aplica-se ao uso de energia solar, eólica e hidráulica. Assim, a GD contribui para suprir demandas de carga, mas seu crescente uso também gera riscos ao sistema (Jenkins, 2010).

As condições para as quais o atual sistema elétrico foi projetado são diferentes das que está enfrentando. Com poucas fontes de geração centralizadas, o sistema de distribuição era unidirecional. Agora, operando de forma também ativa com unidades geradoras descentralizadas, há bidirecionalidade de fluxo. Tais mudanças podem trazer riscos ao sistema e seus equipamentos, que devem se adequar à nova realidade,

principalmente os transformadores, responsáveis pela integração do sistema e adequação dos níveis de tensão (Geidl, 2005).

A inserção de novas unidades geradoras auxilia no suprimento da demanda de carga e flexibiliza os pontos de geração. Contudo, afeta o comportamento do fluxo de energia, o nível de curto-circuito e as correntes do sistema, questões críticas aos transformadores nele inseridos. Dependendo da característica do SEP, a alocação de GD eleva o nível de curto-circuito em determinados locais (Geidl, 2005).

Em outras palavras, ao passo que se aumenta o número de unidades geradoras de energia no sistema, aumenta-se o número de ativos que contribuem para curtos-circuitos no sistema. Com a GD conectada ao sistema, a impedância de falta diminui devido aos circuitos em paralelo, aumentando o nível de corrente de curto-circuito que afetará o sistema e, conseqüentemente, os transformadores envolvidos. Sendo assim, a inserção de GD em um sistema impacta na amplitude,

direção e duração de faltas de curto-circuito (Geidl, 2005; Barra, 2017; Luiz, 2012).

Com um nível de curto-circuito maior, as correntes passantes pelos transformadores podem aumentar e acarretar em maiores esforços eletromecânicos, seja durante a operação normal ou em condições de curto-circuito. Uma vez que os esforços solicitados são maiores que aqueles suportados pelo projeto, o equipamento está sujeito à falhas. O prejuízo pode ser incalculável em termos de perda de equipamentos e cortes de energia, justificando, assim, o estudo acerca da relação entre o uso de GD e esforços eletromecânicos em transformadores.

O presente artigo tem como objetivo mostrar os impactos do uso de GD nas correntes e níveis de curto-circuito de um SEP e, conseqüentemente, sobre os esforços eletromecânicos solicitados aos transformadores. Foram realizadas simulações de um SEP base, sem e com GD, no software PowerFactory. Assim, foram verificadas as correntes de operação e de curto-circuito em cada caso nos transformadores do SEP, que foram modelados e os esforços eletromecânicos simulados utilizando o software ANSYS Maxwell, versão 18, que emprega o método dos elementos finitos (MEF).

2. ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS

A interação entre as correntes circulantes nas bobinas primária e secundária e o fluxo magnético disperso de um transformador, conforme a Lei de Lorentz, origina forças eletromagnéticas atuantes nas bobinas, expressa em (1), com \vec{J} sendo a densidade de corrente (A/m²) e \vec{B} a densidade de fluxo magnético (T) (Waters, 1966).

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

O fluxo disperso se concentra na região entre bobinas e pode ser decomposto em axial e radial. Sua parcela axial resulta em forças radiais, enquanto a radial origina forças axiais. Na maior parte central da bobina, o fluxo é axial, já nas cabeceiras, existe uma alta concentração de componentes radiais. A Fig. 1 ilustra o comportamento da densidade de fluxo e das linhas de campo magnético em um corte 2D simplificado de um transformador.

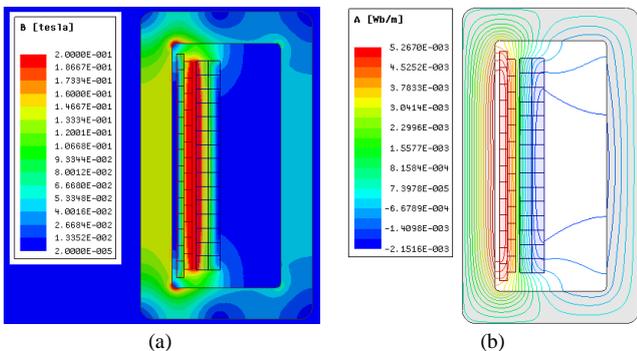


Fig. 1 Exemplo de (a) densidade de fluxo magnético disperso e (b) linhas de campo magnético disperso.

As forças radiais que surgem nas bobinas de baixa tensão (BT), interna, e alta tensão (AT), externa, do transformador, em virtude da componente axial do fluxo disperso, são de repulsão, comprimindo a BT em direção ao núcleo e expandindo a AT. Já as forças axiais, devido ao fluxo disperso

radial, agem em ambas bobinas de maneira a comprimir as espiras umas sobre as outras, resultando em um ponto de máxima compressão no centro das bobinas. Esses esforços levam os enrolamentos à deformações que comprometem sua isolamento (Waters, 1966; Ries, 2007; Rosentino, 2016). As forças radiais e axiais, F_R e F_A , respectivamente, nas bobinas de AT e BT de um transformador estão ilustradas na Fig. 2.

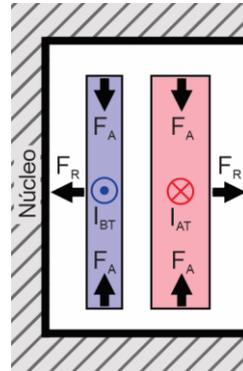


Fig. 2 Comportamento dos esforços eletromecânicos.

O cálculo das forças radiais, em newtons, é feito por (2), dependendo do número de espiras do enrolamento analisado n , do valor de pico de corrente I em ampères, da altura do enrolamento h e do diâmetro médio do enrolamento D_m , ambos em metros. Já as forças axiais podem ser calculadas através de (3), em que d_0 é a espessura do duto e t_1 e t_2 as espessuras das bobinas, em metros (Waters, 1966).

$$F_R = \frac{2\pi^2(n.I)^2 D_m}{10^{-11}.h} \quad (2)$$

$$F_A = \frac{2\pi^2(n.I)^2.D_m}{10^{11}.h^2} \cdot \left(d_0 + \frac{t_1 + t_2}{3}\right) \quad (3)$$

Em transformadores com enrolamentos concêntricos, simétricos e de mesma altura, as resultantes axiais atuam somente na compressão das bobinas. Arranjos mais complexos, como em caso de bobinas desalinhadas ou com presença de taps, possuem esforços diferentes, onde as resultantes axiais atuam no sentido de aumentar o desalinhamento ou o tamanho do tap existente (Waters, 1966; Ries, 2007).

Por (2) e (3), tem-se que as forças são proporcionais ao quadrado da corrente circulante no enrolamento, evidenciando o grande impacto de uma elevação nos valores das correntes de curto-circuito, principalmente. Portanto, são necessários estudos sobre o impacto no nível de curto-circuito e nos transformadores pela inserção de GD no sistema.

Uma vez em operação, o transformador tem corrente circulando e fluxo disperso sobre suas bobinas, de modo que, desde a sua entrada em operação, está sujeito à esforços eletromecânicos. Seu projeto deve garantir, portanto, que suporte os esforços durante operação sob condições nominais, sem apresentar danos e falhas. O projeto mecânico deve prever também a operação durante curtos-circuitos, em que as correntes são maiores que as nominais, e suas forças decorrentes mais elevadas. Assim, o transformador deve

suportar os esforços de curto-circuito até a atuação da proteção do sistema (Ries, 2007; Rosentino, 2016).

Contudo, existem situações de curto-circuito em que as correntes e os esforços solicitados podem ultrapassar os limites de projeto. Caso os transformadores não suportem tais esforços, podem haver danos parciais ou até mesmo a destruição do equipamento, comprometendo a operação do sistema. Ainda que curtos-circuitos monofásicos-terra sejam mais frequentes, os trifásicos são, na sua maioria, os que levam à correntes mais elevadas, sendo, portanto, utilizados para os cálculos de esforços (Ries, 2007).

A Fig. 3 mostra um comparativo das formas de ondas das correntes nominal e durante um curto-circuito trifásico em um transformador genérico, e seus respectivos esforços. Nota-se a elevação da intensidade da corrente durante a falta e a grande elevação do esforço decorrente.

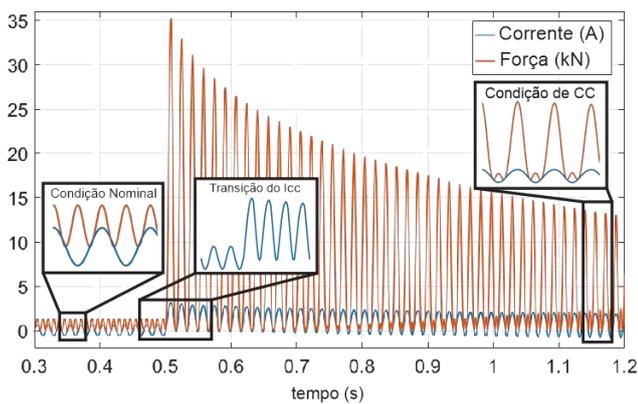


Fig. 3 Relação entre esforços e correntes nominal e de curto-circuito.

Os esforços eletromecânicos danificam o transformador afetando os enrolamentos e o isolamento do mesmo. Os enrolamentos sofrem deformações que comprometem o isolamento dielétrico do equipamento e modificam o canal de passagem do óleo refrigerante, podendo levar a curtos-circuitos internos e/ou sobreaquecimentos. Essas consequências podem levá-lo a indisponibilidade. Devido à pressão contra os espaçadores e fixadores, podem surgir ondulações nos enrolamentos nos sentidos radial e axial, como ilustra a Fig. 4 (Aguiar, 2007; Azevedo, 2007; Barra, 2017; Ries, 2007; Rosentino, 2016).

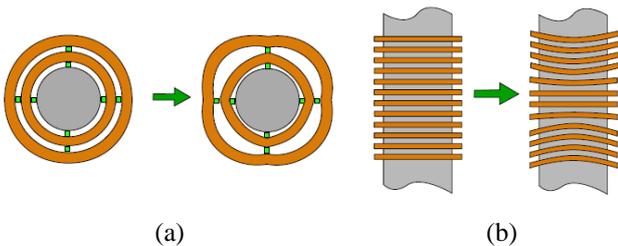


Fig. 4 Exemplos de deformações (a) radial e (b) axial da bobina.

3. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PROPOSTO

Para analisar a influência e impactos do uso de geração distribuída no nível de curto-circuito e nos esforços eletromecânicos de um sistema elétrico, foi simulado e analisado o SEP proposto ilustrado na Fig. 5. Consiste em um sistema adaptado a partir do modelo 5 barras da IEEE.

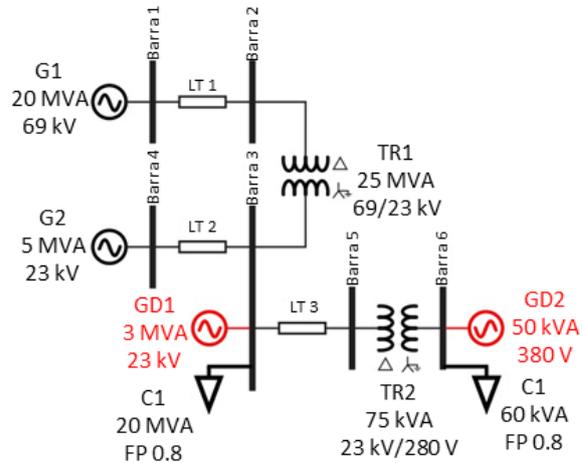


Fig. 5 Sistema elétrico proposto.

O sistema base possui dois geradores que alimentam duas cargas por meio de três linhas e dois transformadores que integram três níveis de tensão. Posteriormente, foram adicionadas duas unidades de GD, destacadas em vermelho, alocadas em média e baixa tensão, para uma análise mais completa. As principais características do SEP são:

- Gerador 1 (G1) – 20 MVA, 69 kV.
- Gerador 2 (G2) – 5 MVA, 23 kV.
- Carga 1 (C1) – 20 MVA.
- Carga 2 (C2) – 60 kVA.
- Transformador 1 (TR1) – 25 MVA, 69/23 kV.
- Transformador 2 (TR2) – 75 kVA, 23000/380 V.
- Geração Distribuída 1 (GD1) – 3 MVA, 23 kVA.
- Geração Distribuída 2 (GD2) – 50 kVA, 380 V.

4. MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES

Conforme a Fig. 5, o SEP opera em três níveis de tensão, utilizando dois transformadores de portes diferentes, ilustrados na Fig. 6. O primeiro é um transformador de potência, chamado de transformador 1 - TR1, enquanto o segundo é um de distribuição, transformador 2 - TR2.



Fig. 6 (a) Transformador de potência TR1 e (b) transformador de distribuição TR2.

4.1 Transformador 1 (TR1) – Potência

O transformador 1 representa um equipamento de grande porte, com potência de 25 MVA, interligando a alta tensão de 69 kV com a média de 23 kV. Para analisar os esforços eletromecânicos sobre seus enrolamentos, foi modelado no software ANSYS Maxwell o projeto de um transformador real com características típicas desta faixa de potência. Os enrolamentos de BT, em vermelho, e de AT, em azul, foram particionados em 20 blocos que representam suas espiras, conforme ilustra a Fig. 7. Com esse particionamento é possível analisar as forças mais detalhadamente ao longo do enrolamento.

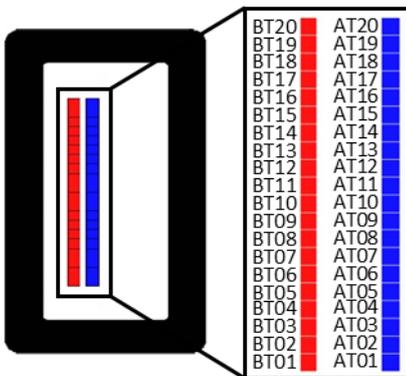


Fig. 7 Modelagem das bobinas de BT e AT do TR1.

4.2 Transformador 2 (TR2) – Distribuição

O transformador 2 representa um equipamento de menor porte, de distribuição, com potência de 75 kVA, interligando a média tensão de 23 kV com a baixa de 380 V. Também foi modelado o projeto real de um transformador com essas características, com os enrolamentos particionados, conforme a Fig. 8. A BT, em vermelho, possui 27 blocos, enquanto a AT, em azul, 30 blocos, ambas separadas em duas camadas.

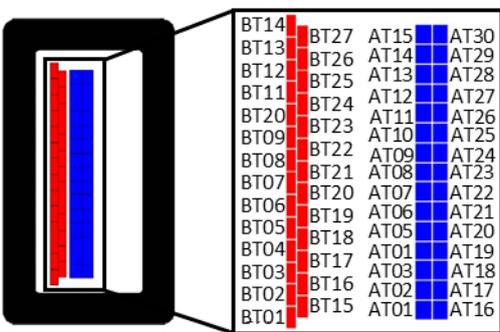


Fig. 8 Modelagem das bobinas de BT e AT do TR2.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para analisar o comportamento do SEP e o impacto da GD nas correntes do sistema, foram realizadas simulações com o software PowerFactory. Foram simulados quatro casos, sendo um base, sem GD, e outros três com GD. Em cada caso foram analisados quatro cenários: fluxo normal de operação e curtos-circuitos trifásicos nas barras 2, 3 e 6. Após, foram simulados

os esforços nos transformadores em elementos finitos com as correntes obtidas anteriormente, considerando os valores do primeiro pico da forma de onda.

5.1 Caso Base – Sem GD

O caso base consiste no SEP apresentado na Fig. 6 sem GD, apenas com seus dois geradores originais. A Tabela 1 mostra as correntes de curto-circuito e circulantes nos dois transformadores durante o fluxo normal do caso base e nos três cenários de curtos-circuitos.

Tabela 1. Correntes do Caso Base

Cenário	I_{cc} (A)	$I_{TR 1}$ (A)		$I_{TR 2}$ (A)	
		I_{AT}	I_{BT}	I_{AT}	I_{BT}
Fluxo	-	145	435	1,59	96
CC - 2	1790	370	1110	-	-
CC - 3	4490	1093,3	3280	-	-
CC - 6	2200	145	435	36,35	2200

Nota-se que os dois transformadores sofrem de maneiras diferentes quando em condições de curtos-circuitos. Para faltas nas barras 2 e 3 não há contribuição passando pelo TR2 e, portanto, não é solicitado nenhum esforço, diferente do TR1 que sofre os maiores esforços com faltas na barra 3. Já para faltas na barra 6 há contribuição passando pelo TR2, cenário em que o TR1 não apresenta diferenças em relação ao fluxo normal.

5.2 Com GD

Duas fontes de GD foram inseridas, uma na barra 3 e outra na 6, próximas às cargas, conforme a Fig. 5, para analisar como seu uso afeta as correntes de curto-circuito. As alternativas de conexão são então divididas em três casos, onde:

- Caso 1: GD 1 conectada ao sistema na barra 3.
- Caso 2: GD 2 conectada ao sistema na barra 6.
- Caso 3: GD 1 e GD 2 conectadas nas barras 3 e 6, respectivamente.

Os resultados das correntes de curto-circuito e circulantes pelos transformadores foram obtidos para as simulações de fluxo normal e curto-circuito de cada caso com GD e são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2. Correntes do Caso 1

Cenário	I_{cc} (A)	$I_{TR 1}$ (A)		$I_{TR 2}$ (A)	
		I_{AT}	I_{BT}	I_{AT}	I_{BT}
Fluxo	-	130	390	1,59	96
CC - 2	2040	650	1950	-	-
CC - 3	5520	1076,7	3230	-	-
CC - 6	2200	130	390	36,35	2200

Pela Tabela 2 nota-se que, assim como no caso base, só há contribuição de corrente pelo TR2 com faltas na barra 6. Já o

TR1 sofre com correntes para faltas somente nas barras 2 e 3, sendo nesta última o pior cenário. Analisando a inserção da GD1, as correntes em operação normal e de curto-circuito na barra 3 reduziram, mas aumentaram significativamente no cenário de curto na barra 2. Para curto-circuito na barra 6, as correntes que circulam pelo TR2 não se alteram com a inserção da GD1.

Tabela 3. Correntes do Caso 2

Cenário	I_{CC} (A)	I_{TR1} (A)		I_{TR2} (A)	
		I_{AT}	I_{BT}	I_{AT}	I_{BT}
Fluxo	-	144	432	0,59	36
CC - 2	1800	370	1110	9,91	600
CC - 3	4500	1093,3	3280	11,56	700
CC - 6	3340	144	432	36,51	2210

Analisando a Tabela 3, percebe-se que a inserção da GD2 na barra 6 reduz as correntes de operação normal em ambos transformadores, mais significativamente no TR2, e mantém o mesmo nível para faltas na barra 6. Já para curtos-circuitos nas barras 2 e 3, a corrente circulante pelo TR1 é a mesma sem GD, porém, agora, surgem contribuições circulando pelo TR2, o que não acontece no caso base.

Tabela 4. Correntes do Caso 3

Cenário	I_{CC} (A)	I_{TR1} (A)		I_{TR2} (A)	
		I_{AT}	I_{BT}	I_{AT}	I_{BT}
Fluxo	-	130	390	0,59	36
CC - 2	2040	650	1950	9,91	600
CC - 3	5530	1076,7	3230	11,56	700
CC - 6	3370	130	390	36,84	2230

Por fim, pela Tabela 4, com as duas GDs simultaneamente, tem-se uma mescla de resultados dos casos 1 e 2. As correntes de operação normal novamente apresentaram queda, assim como as de curto-circuito na barra 6 mantiveram o mesmo nível. Para faltas nas barras 2 e 3, o TR2 passa a ter contribuições circulantes, já o TR1 sofre um aumento durante faltas na barra 2.

É importante observar que, pelas tabelas anteriores, as correntes de curto-circuito I_{CC} aumentam com a inserção de GD. Isso está atrelado ao aumento do nível de curto-circuito com novas fontes de geração.

Analisando as correntes obtidas, foram simulados os esforços eletromecânicos sobre os transformadores. A Tabela 5 apresenta os resultados dos esforços para as principais faixas de correntes observadas. Nota-se que os menores esforços acontecem na ausência de faltas no sistema.

Durante os curtos-circuitos sem GD, o TR1 sofre uma maior solicitação para uma falta na barra 3, cerca de 200 kN de força radial e 7,7 kN de compressão axial na AT. Já o TR2 sofre o maior esforço para uma falta na barra 6, com 8 kN de força radial e uma compressão de 535 N na BT.

Tabela 5. Principais Esforços Eletromecânicos

	I_{BT} (A)	$F_{R_{AT}}$ (N)	$F_{R_{BT}}$ (N)	$F_{A_{AT}}$ (N)	$F_{A_{BT}}$ (N)
TR1	435	-3518	3512	135,3	99,15
	1110	-22912	22870	882,1	645,38
	1950	-70711	70581	2722,5	1991,7
	3280	-199583	199215	7684	5622
TR2	96	-15,65	15,56	0,825	0,984
	600	-612,83	609,75	31,26	39,67
	700	-834,12	829,95	42,55	53,99
	2200	-8240,60	8199,6	419,3	534,51

Com a inserção das GDs, nota-se o aumento das correntes do TR2 para faltas nas barras 2 e 3, devido à contribuição da GD2, provocando um aumento da solicitação mecânica radial nos enrolamentos na faixa de 600 à 800 N, aproximadamente. Observa-se também o aumento do esforço no TR1 para uma falta na barra 2, devido à inserção da GD1, que passa de, aproximadamente, 22 kN para 70 kN na direção radial e de 0,88 kN para 2,7 kN na compressão máxima da AT.

Para uma melhor compreensão do comportamento das forças em cada enrolamento, foram plotados gráficos das forças radiais e axiais para o caso de maior esforço eletromecânico do TR1, Fig. 9 e Fig. 10, e do TR2, Fig. 11 e Fig. 12, respectivamente.

Observa-se que os esforços radiais afastam a AT da BT, de maneira constante nos seus centros, enquanto os esforços axiais comprimem ambos enrolamentos, com forças elevadas nas cabeceiras e que tendem a zero na região central. Além destes fatos, é importante observar que, para o TR2, a camada externa do enrolamento de BT e a camada interna do enrolamento de AT sofrem esforços radiais consideravelmente maiores que as outras camadas, conforme Fig. 11. Nota-se um comportamento semelhante nos esforços axiais, uma vez que são maiores nas espiras mais internas da BT e mais externas da AT, conforme Fig. 12. Tais observações são explicadas pela densidade e direção do fluxo disperso, como exemplifica a Fig. 1.

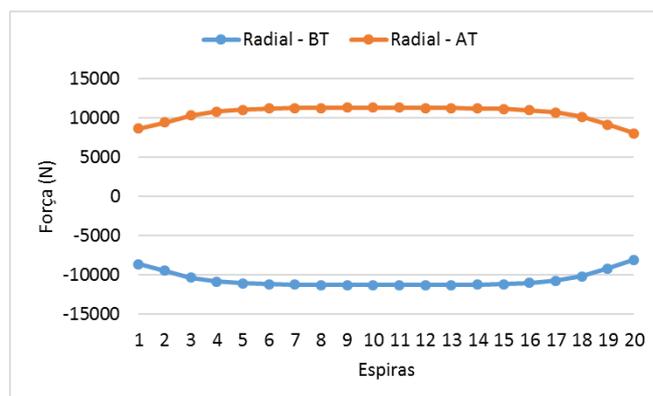


Fig. 9. Forças radiais no Transformador 1.

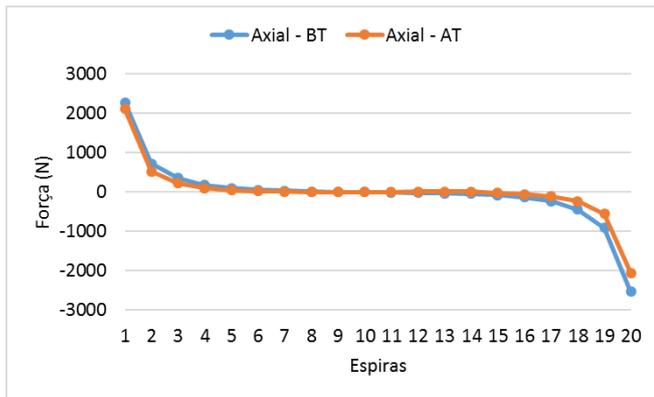


Fig. 10. Forças axiais de compressão no Transformador 1.

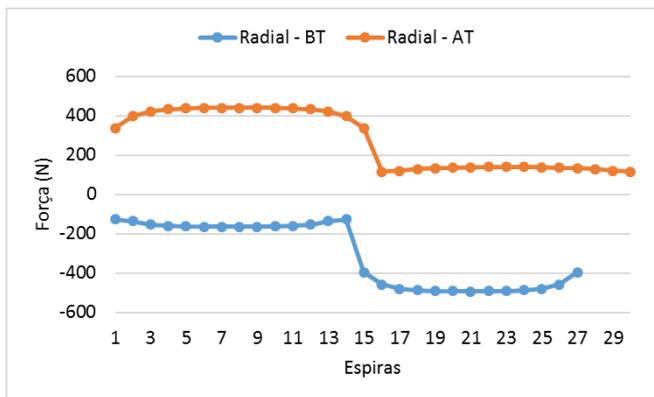


Fig. 11. Forças radiais no Transformador 2.

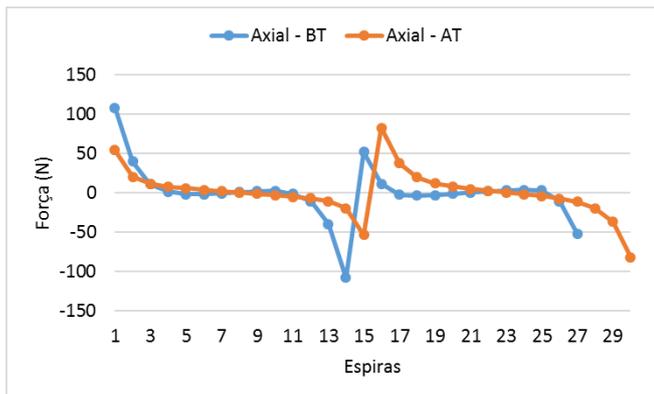


Fig 12. Forças axiais de compressão no Transformador 2.

6. CONCLUSÕES

Mostrou-se que o uso de geração distribuída e a inserção de novas unidades geradoras no sistema elétrico traz, além de vantagens, riscos e impactos, como a mudança do nível e das correntes de curto-circuito. Uma elevação das correntes leva os transformadores à maiores esforços eletromecânicos, podendo levá-los a falhas que prejudicam o sistema.

Foram analisados diferentes casos sem e com GD de um SEP proposto com simulações nos softwares PowerFactory e ANSYS Maxwell. Verificou-se que o comportamento do fluxo e de curto-circuito é alterado a cada GD inserida. Em alguns casos os transformadores não apresentaram maiores esforços, até diminuíram, contudo, em outros, os esforços solicitados

são bem superiores às condições sem GD, o que comprometeria o equipamento e o SEP.

As modificações no comportamento do fluxo e das correntes que passam pelos transformadores mostram que estudos prévios de curto-circuito e alocação de GD são essenciais. Dessa maneira é possível verificar se os transformadores já instalados suportam os esforços que podem ser solicitados ou se é necessária uma substituição, evitando falhas de equipamentos e cortes de energia.

Como sugestões para trabalhos futuros, observa-se a questão das elevadas correntes de inrush, em situações de energização dos transformadores, e as conexões de GD fora de sincronia. Ambas situações também impactam nos esforços eletromecânicos dos transformadores.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer o apoio técnico e financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, E. R. (2007). Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Azevedo, A. C. (2007). Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos “passantes” e correntes de energização. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Barra, P. H. A. (2017). Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos: uma abordagem analítica e computacional. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Geidl, M. (2005). Protection of power systems with distributed generation: state of the art. Power System Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Swiss.
- Jenkins, N.; Ekanayake, B; Strbac, G. (2010). *Distributed Generation*. London: The Institute of Engineering and Technology.
- Luiz, C. M. (2012). Avaliação dos impactos da geração distribuída para proteção do sistema elétrico. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Ries, W. (2007). *Transformadores fundamentos para o projeto e cálculo*. 1ª edição, Ed. Porto Alegre Edipucrs.
- Rosentino, A. J. P., Jr., Delaiba, A. C., Prévost, J.-P. L. (2016), A proposal of a qualitative index for mechanical withstand safety margin analysis of transformers, *Int Trans Electr Energ Syst*, doi: 10.1002/etep.2305.
- Waters, M. (1966). *The short circuit strength of power transformers*. London: Macdonald and Co.