Metodologia de Simulação de Transformadores a Seco para Diagnóstico do seu Estado Operativo

Marília N. e Silva * **Mateus Caruso** * **Flávio G. R. Martins** *
Guilherme G. Sotelo * **Bruno W. França** *

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, RJ (e-mail: mariliamello@id.uff.br)*

Abstract: Monitoring and diagnostic systems for dry-type transformers are particularly important in the oil and gas industry, where power supply is more susceptible to disruptions due to failures in these equipment. During their operation, transformers face electrical, thermal, mechanical, and environmental stresses, which accelerate the degradation of insulation materials, especially in the windings. Identifying these defects early potentially reduces the severity of failures and minimizes operation and maintenance costs. This study proposes a modeling approach for dry-type transformers to train algorithms for detecting interturn short-circuits based on machine learning. This article presents the 2D modeling of a transformer implemented using the finite element method to obtain data on interturn short-circuit conditions and its experimental validation.

Resumo: Sistemas de monitoramento e diagnóstico de transformadores a seco são particularmente importantes na indústria de óleo e gás, onde o fornecimento de energia é mais suscetível a interrupções pelas falhas nestes equipamentos. Durante sua operação, os transformadores enfrentam estresses elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais, que aceleram a degradação dos materiais isolantes, especialmente nos enrolamentos. Identificar estes defeitos de forma precoce reduz potencialmente a gravidade das falhas e minimiza custos de operação e manutenção. Este trabalho propõe uma modelagem de transformadores a seco para treinamento de algoritmos de detecção de curtos-circuitos entre espiras baseados em aprendizado de máquina. São apresentados o modelo 2D de transformador implementado pelo método dos elementos finitos para obtenção de dados de curtos-circuitos entre espiras e sua validação experimental.

Keywords: Power Transformers Modelling; Finite Element Method; Training Dataset; Inter-turn Short Circuit.

Palavras-chaves: Modelagem de Transformadores de Potência; Método dos Elementos Finitos; Base de Treinamento; Curto-circuito entre Espiras.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são equipamentos essenciais nos sistemas de potência, conectando diferentes partes do sistema e garantindo uma transmissão eficiente de energia em diferentes níveis de tensão. Esses equipamentos estão sujeitos a uma variedade de falhas que podem causar distúrbios no sistema e interrupções imprevistas no fornecimento de energia elétrica. Essas falhas podem acarretar perdas financeiras significativas devido à interrupção do fornecimento de energia, danos a outros equipamentos e a necessidade de substituição ou manutenção do transformador com defeito (Murugan and Ramasamy (2015); Aj et al. (2018)).

Na indústria de óleo e gás, onde as condições operacionais podem ser desafiadoras e a segurança é uma prioridade, os transformadores a seco são frequentemente considerados os mais indicados. Isso se deve, em parte, à capacidade desses transformadores de lidar com as demandas operacionais específicas desse tipo de ambiente. Utilizando o ar ambiente para isolamento e refrigeração, eles reduzem os riscos de incêndio e proporcionam maior confiabilidade e segurança para as instalações, aspectos críticos para as operações dessa indústria (Kumar and Verma).

Neste contexto, a capacidade de monitoramento do estado de operação desses transformadores torna-se uma ferramenta estratégica para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, sua robustez e segurança. Ao identificar precocemente quaisquer problemas potenciais, é possível realizar intervenções de manutenção preventiva de forma mais eficaz, potencialmente reduzindo os custos totais de manutenção e aumentando a disponibilidade operacional da instalação.

Quanto às origens e consequências dos defeitos nos transformadores, estes podem ser atribuídos a danos no processo de fabricação e aos estresses elétricos, mecânicos, térmicos e ambientais aos quais estão sujeitos durante a operação (R. de Oliveira (2001)). As principais fontes de esforços elétricos que contribuem para o surgimento de defeitos são as sobretensões e os curtos-circuitos, que acele-

⋆ Este estudo foi financiado pela PETROBRAS por meio da ANP P&D 2021/00088-1.

ram a degradação dos materiais isolantes, reduzindo a vida útil dos transformadores. Persistindo essas condições, as falhas podem se agravar, resultando na perda de regulação e queda no rendimento do equipamento, e eventualmente levando o transformador a sofrer um curto-circuito interno, resultando em danos severos aos seus enrolamentos.

Em Kavanagh et al. (2021), um efeito que pode ser observado com a degradação do isolamento de equipamentos de alta e média tensão é a ocorrência de Descargas Parciais (DPs). Conforme definido pela norma internacional IEC60270 (2000), as descargas parciais são eventos de descargas elétricas localizadas que ocorrem em um material isolante entre dois condutores, resultando em um curto-circuito parcial, podendo ou não estar adjacente a um dos condutores. A ocorrência de DPs está diretamente relacionada com a degradação do isolamento dos condutores que compõem as espiras dos enrolamentos dos transformadores (Metwally (2011)).

Com o passar do tempo, a ocorrência das DPs se intensifica e essa degradação pode se desenvolver em um curto local, chamado de Curto-circuito entre Espiras (CEE) (Hongxin Ji et al. (2012); Zheng et al. (2010); Hongxin Ji et al. (2012); Zheng et al. (2010)). Com a intensificação do CEE, surgem pontos quentes nos enrolamentos, conhecidos como *Hot spots*, que podem indicar a necessidade de retirada de operação e manutenção do transformador (Oleg and Oleksii (2021)). Caso o transformador, nessas condições, não seja retirado de operação, o defeito pode progredir, causando uma falta grave e a destruição do equipamento.

Métodos de diagnóstico que possam ser aplicados com o transformador em serviço e quantificar a severidade do defeito podem auxiliar na prevenção de falhas em transformadores (Leal et al. (2020); Meira et al. (2018)). Existem diferentes estratégias aplicadas na detecção online de curto-circuito entre espiras que monitoram grandezas elétricas (Kang et al. (2010, 2004); Zhao et al. (2020); Chenguo Yao et al. (2014)). Algoritmos de detecção de CEE podem utilizar esses métodos em conjunto com modelos de aprendizado de máquina para identificar padrões anômalos indicativos de CEE.

Algoritmos de aprendizado de máquina demandam um banco de dados de treinamento robusto para aprender a reconhecer padrões e realizar previsões precisas. No entanto, adquirir esse banco de dados de forma experimental demonstra ser uma tarefa demorada e dispendiosa, devido à necessidade de replicar diversas condições operacionais e defeitos potenciais. Neste sentido, estratégias alternativas, como simulações computacionais, podem ser utilizadas para complementar ou mesmo substituir a coleta de dados experimentais. Isso pode oferecer uma maneira mais eficiente e econômica de obter dados de treinamento para os algoritmos de diagnóstico, reduzindo a dependência de ensaios experimentais extensivos. Além disso, essa modelagem pode ser realizada para diferentes tipos de transformadores, facilitando a implementação do sistema de diagnóstico pela indústria e permitindo a manutenção preditiva em larga escala.

Neste trabalho, os dados para treinamento do algoritmo de detecção de curtos-circuitos entre espiras em transformadores de potência foram obtidos por meio de simulações baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). O banco de dados sintéticos foi gerado a partir de simulações do transformador, considerando diferentes casos e níveis de curto-circuito em uma variedade de condições de operação.

Este artigo aborda a modelagem do transformador de potência pelo MEF no software COMSOL Multiphysics para geração de uma base de dados sintéticos para algoritmos de diagnóstico de CEE. Além disso, é apresentada a validação experimental do modelo de transformador proposto.

2. METODOLOGIA

Esta seção descreve a modelagem do transformador de potência no software de elementos finitos COMSOL e introduz o método do Vetor de Park utilizado na detecção de CEE, destacando sua utilidade em algoritmos de detecção baseados em aprendizado de máquina.

2.1 Modelo em Elementos Finitos para Curto-circuito Entre Espiras em Transformadores

Como a base de dados de treinamento precisa de uma quantidade substancial de dados, o modelo foi feito em 2D (Figura 1) para reduzir o esforço computacional das simulações e, consequentemente, os tempos de simulação.

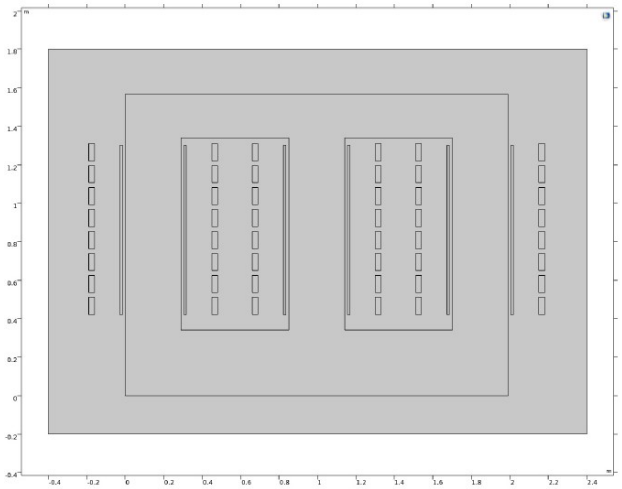


Figura 1. Geometria do transformador sadio.

Os enrolamentos do transformador foram modelados usando a configuração multivolta homogeneizada do COMSOL, onde as bobinas foram representadas graficamente por retângulos. Dentro desses retângulos, o software considera o enrolamento com a quantidade de espiras e área de seção transversal do condutor especificadas. A quantidade de espiras do primário e do secundário foi definida com base na relação de transformação do transformador.

Os enrolamentos de baixa tensão (enrolamentos internos) foram modelados na geometria como apenas um conjunto multivolta. Já os enrolamentos de alta tensão de cada fase, onde serão aplicados os casos de curto, foram modelados como 8 conjuntos multivolta, devido ao formato em disco desses enrolamentos.

Para incorporar a característica de laminação do núcleo, a condutividade na direção do eixo z, perpendicular às

lâminas, foi definida como nula. Além disso, visando reduzir o tempo de simulação, a permeabilidade do núcleo foi tratada como constante.

A discretização da malha foi realizada com a configuração *´fine'*, utilizando o modo *´physics controlled mesh'* do *software*. A malha está ilustrada na Figura 2. Essa abordagem foi considerada adequada para capturar as características da geometria simulada de forma precisa. Em particular, nos enrolamentos de baixa tensão, que possuem dimensões menores, a malha foi refinada o suficiente para garantir que os detalhes da geometria fossem devidamente representados.

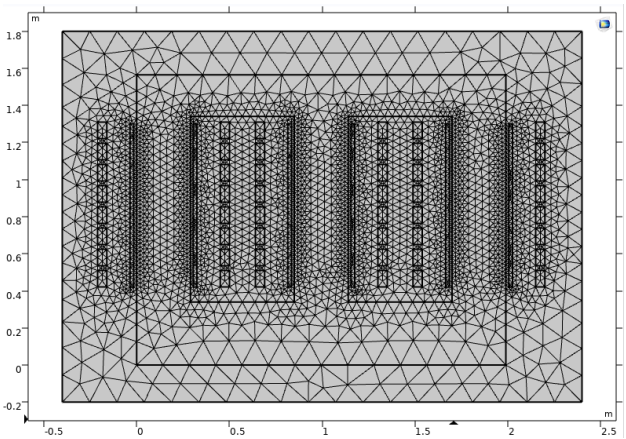


Figura 2. Geometria do transformador sadio.

Para simular os cenários de curto-circuito entre espiras, foi realizada uma subdivisão do retângulo correspondente a aplicação do defeito, com uma área equivalente à quantidade de espiras em curto. A Figura 3 mostra a geometria do transformador para o caso de curto entre espiras no primeiro disco do enrolamento primário da fase A.

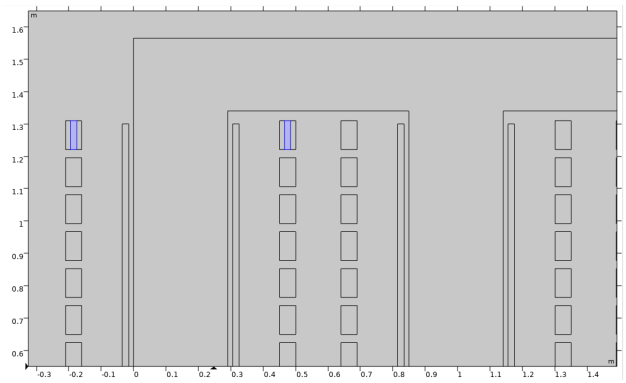


Figura 3. Subdivisão do enrolamento para aplicação de curto-circuito na bobina A1.

Com essa subdivisão, o disco é dividido em três bobinas, que são conectadas em série. Para simular o curto-circuito, uma das bobinas é conectada em paralelo com uma resistência de curto R_c. Essa resistência R_c é introduzida para representar a resistência do curto-circuito. Devido ao valor muito baixo dessa resistência, a bobina em curto-circuito suporta uma corrente induzida extremamente alta por causa do fluxo presente no núcleo do transformador. Essa corrente induzida resulta na geração de um fluxo magnético adicional, modificando o fluxo total naquela coluna do núcleo. Como resultado, a corrente no primário daquela fase aumenta. Além disso, a relação de transformação do enrolamento é alterada devido à presença do curto-circuito. O enrolamento defeituoso opera como um autotransformador, em que o secundário consiste das espiras em curto, e a resistência de curto R_c é a carga.

2.2 Parametrização pelo Vetor de Park

O método do Vetor de Park consiste na parametrização das correntes de linha do primário e do secundário do transformador trifásico em uma única elipse. Isso é realizado por meio do cálculo das correntes diferenciais do transformador. O cálculo dessas correntes varia de acordo com as conexões dos enrolamentos.

Considerando que os enrolamentos primário e secundário estão conectados na configuração Δ-Y, as correntes de linha do primário (I_A, I_B e I_C) podem ser expressas em termos das correntes de linha do secundário (I_a, I_b e I_c) usando a relação de transformação do transformador para esse caso, conforme as equações 1, 2 e 3. Nesse contexto, as correntes do primário calculadas com base nas correntes do secundário são denotadas como (I'_A, I'_B e I'_C).

$$I'_A = \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_a - I_c) \tag{1}$$

$$I'_B = \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_b - I_a) \tag{2}$$

$$I'_C = \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_c - I_b) \tag{3}$$

As correntes diferenciais do sistema (I_{dA}, I_{dB} e I_{dC}), definidas como a diferença entre as correntes de linha do primário e as correntes de linha do primário obtidas a partir das correntes do secundário referidas ao primário, são calculadas conforme mostrado nas equações 4, 5 e 6.

$$I_{dA} = I_A - \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_a - I_b) \tag{4}$$

$$I_{dB} = I_B - \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_b - I_c) \tag{5}$$

$$I_{dC} = I_C - \frac{V_{sec}}{\sqrt{3}V_{prim}}(I_c - I_a) \tag{6}$$

As correntes diferenciais não são nulas em um transformador real devido à presença da corrente de excitação, que é necessária para magnetizar o núcleo do transformador e estabelecer o fluxo magnético para a transferência de energia. Após o cálculo das correntes diferenciais, podemos determinar as correntes de eixo direto (I_D) e de quadratura (I_Q) de acordo com as equações 7 e 8. Essas correntes são então utilizadas para gerar gráficos de I_Q em função de I_D.

$$I_D = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}I_{dA} - \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{6}}I_{dB} - \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{6}}I_{dC} \tag{7}$$

$$I_Q = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{2}} I_{dB} - \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{2}} I_{dC} \tag{8}$$

Nos casos de um transformador ideal em boas condições de funcionamento, esses gráficos assumem uma forma circular. No entanto, para um transformador com defeito, a forma é elíptica. Os parâmetros dessa elipse, como o raio principal (a), o raio secundário (b) e o ângulo de rotação (θ), ilustrados na Figura 4, variam de acordo com o nível do curto-circuito, a carga aplicada no secundário e a fase afetada, respectivamente.

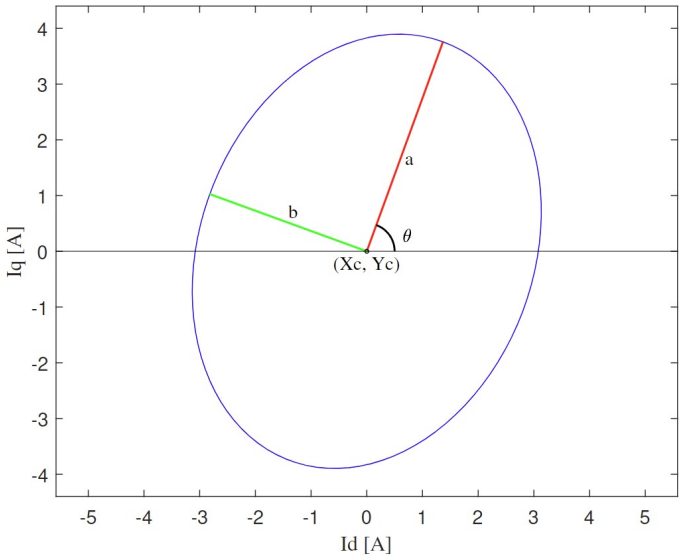


Figura 4. Exemplo de uma elipse parametrizada.

Essa técnica de diagnóstico, baseada na Transformada de Park e na criação de elipses, apresenta características úteis para algoritmos de diagnóstico baseados em aprendizado de máquina. A capacidade de representar as condições de funcionamento de um transformador por meio de elipses oferece uma abordagem visual e quantitativa para entender o estado do transformador. Essa representação possibilita a identificação de padrões associados a diferentes condições de operação e níveis de curto-circuito entre espiras nos transformadores.

3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Para validar o modelo 2D do transformador usado na metodologia de geração do banco de dados sintéticos, foi construído um protótipo de transformador trifásico, conforme mostrado na Figura 5. Os enrolamentos primários e secundários foram feitos com 205 e 102 espiras, respectivamente. Em um dos enrolamentos primários, localizado na coluna direita do transformador da Figura 5, foram adicionados taps para facilitar a aplicação de curtos-circuitos.

O núcleo utilizado no protótipo é desmontável, permitindo a aplicação de defeitos em diferentes fases. Para isso, os enrolamentos podem ser movidos entre as colunas, posicionando o enrolamento com tap na coluna correspondente à fase em que o curto-circuito será aplicado.

Foram escolhidos taps de modo a possibilitar a aplicação de diferentes casos de defeitos. Os testes foram realizados para os casos sadio e de 1, 3, 7, 12, 17 e 20 espiras em curto

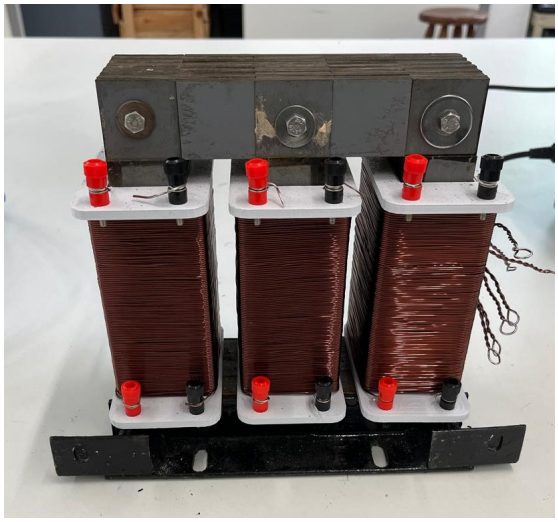


Figura 5. Transformador trifásico construído.

na fase C do transformador. O primário do transformador foi conectado em delta, enquanto o secundário em estrela aterrada. Uma fonte trifásica em estrela alimentou o primário, enquanto o secundário foi conectado a uma carga em estrela. Para medição e aquisição de dados, empregou-se o oscilógrafo Yokogawa DL850EV. Foram registradas as correntes do primário e do secundário do transformador para a aplicação do método de Vetor de Park. O arranjo experimental pode ser observado na Figura 6.

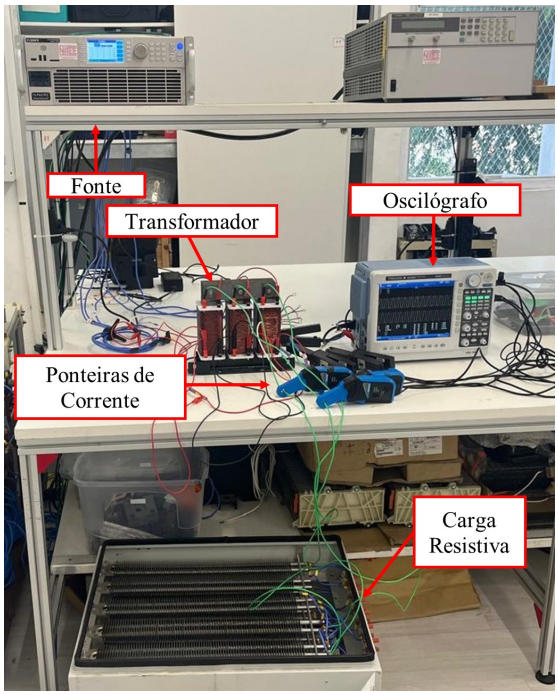


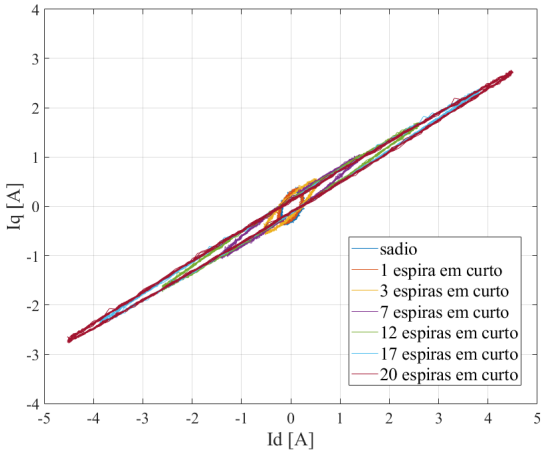
Figura 6. Arranjo experimental.

4. RESULTADOS

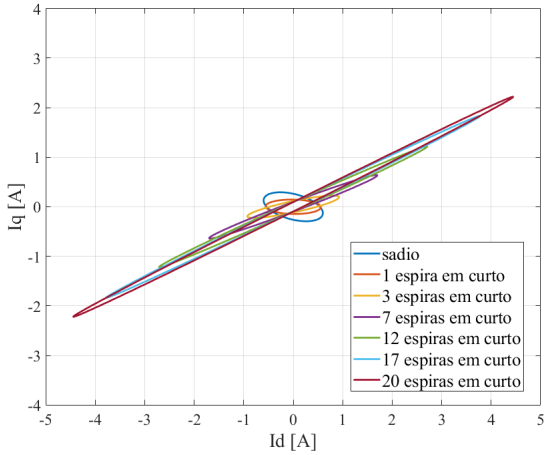
Esta seção apresenta a comparação entre os resultados simulados e experimentais obtidos para o protótipo de transformador trifásico empregados na validação do modelo proposto. Para os testes experimentais, o transformador foi conectado na configuração delta-estrela aterrado. No

primário, uma fonte em estrela foi empregada, aplicando-se uma tensão de fase eficaz de 30 V. O secundário foi conectado a uma carga em estrela com 15 Ω por fase. Foram obtidas as amostras de correntes primárias e secundárias para os casos sadio e de 1, 3, 7, 12, 17 e 20 espiras em curto na fase C.

A Figura 7 mostra as elipses obtidas tanto experimentalmente quanto por simulação através da aplicação do método do Vetor de Park para esses casos. Os resultados experimentais e simulados exibem comportamentos semelhantes para os casos analisados. No entanto, ao comparar os parâmetros das elipses experimentais e simuladas para cada caso, são observadas algumas diferenças.



(a)



(b)

Figura 7. Elipses obtidas para os casos sadio e com 1, 3, 7, 12, 17 e 20 espiras em curto na fase C. (a) Elipses obtidas experimentalmente; (b) Elipses sintéticas simuladas.

A Tabela 1 apresenta os valores e as diferenças percentuais dos parâmetros raio principal *(a)* e raio secundário *(b)* das elipses obtidas experimentalmente [E] e por simulação [S] para cada caso analisado. Nesta tabela, a coluna CEE representa o número de espiras envolvidas no curto.

Na análise do raio principal, é possível observar que a diferença percentual diminui à medida que o nível de CEE aumenta. Isto ocorre porque quanto maior o curto, maior a influência da corrente de curto nas correntes diferenciais do transformador. Nos casos de níveis de curto entre espiras mais baixos, as correntes de excitação do transformador exercem uma influência significativa nas correntes diferenciais. Assim, uma forma de melhorar a precisão do modelo é fazer representação mais precisa das correntes de excitação do transformador. Já para o raio secundário, observa-se que a diferença percentual entre os casos experimentais e simulados com relação ao raio secundário varia entre 27,05% e 34,75%. O raio secundário é influenciado principalmente pela permeabilidade magnética e a condutividade do núcleo. Desta forma, para aprimorar o modelo, é possível ajustar esses parâmetros.

Tabela 1. Comparação do raio principal (a) e secundário (b) entre os casos simulados [S] e experimentais [E].

CEE	a [E]	a [S]	Erro	b [E]	b [S]	Erro
0	0,355	0,615	73,0%	0,355	0,255	27,98%
1	0,383	0,557	45,5%	0,189	0,255	34,75 %
3	0,727	0,947	30,0%	0,165	0,112	31,58 %
7	1,682	1,814	8,0%	0,136	0,092	32,79%
12	2,970	2,973	1,2%	0,125	0,085	31,50%
17	4,509	4,200	6,84%	0,116	0,084	27,05%
20	4,925	4,969	0,8%	0,122	0,084	30,94%

5. CONCLUSÕES

O modelo 2D em elementos finitos do transformador foi empregado para criar uma base de dados sintéticos, utilizada no treinamento do algoritmo de detecção de curto-circuitos entre espiras. Essa abordagem simplifica a obtenção dos dados de treinamento, garantindo a consideração das características físicas e construtivas do equipamento. Ao aplicar o método do Vetor de Park aos dados obtidos por simulação, constatou-se que as simulações reproduziram satisfatoriamente, em termos qualitativos, os resultados esperados para o transformador saudável e defeituoso. A análise das elipses permitiu identificar padrões associados a diferentes condições de operação e curto-circuito entre espiras.

Os resultados derivados da validação experimental do modelo mostraram que os resultados experimentais e simulados apresentam a mesma tendência. No entanto, para minimizar as diferenças encontradas entre os resultados experimentais e simulados, é possível realizar ajustes nos parâmetros do modelo. Por exemplo, as características do núcleo do transformador, como sua curva de saturação, podem ser obtidas e incorporadas ao modelo para melhorar sua precisão. Além disso, é possível ajustar a condutividade do núcleo e considerar a variação da resistência do enrolamento com a temperatura. Desta forma, a modelagem demonstrou que uma análise mais detalhada do modelo pode permitir a identificação de quais parâmetros influenciam de forma mais significativa os resultados e como suas variações podem ser ajustadas para obter um modelo mais preciso e representativo do comportamento real do transformador. Além disso, embora o modelo tenha sido validado para o protótipo desenvolvido, no futuro, essa modelagem pode ser estendida e validada para transformadores de média tensão, a fim de verificar sua aplicabilidade em larga escala.

Considerando que o propósito dessa modelagem é gerar dados sintéticos para treinar um algoritmo de aprendizado de

máquina, onde esses dados devem representar os padrões associados a diferentes casos de curto-circuito analisados, o modelo atual demonstra potencial para esta aplicação.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela PETROBRAS por meio da ANP R&D 2021/00088-1 intitulada "Sistema de Monitoramento e Diagnóstico para Transformadores a Seco com Invólucro de Proteção IP 23". Os autores agradecem a fabricante BRVAL Electrical pela disponibilização do espaço e equipamentos para validação. Foi financiado, em parte, pelas agências brasileiras Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (cod. 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, CNPq-INCT INERGE e a Rede Temática 723RT0150·RIBIERSE-CYTED.

REFERÊNCIAS

Aj, C., Salam, M., Rahman, Q., Wen, F., Ang, S., and Voon, W. (2018). Causes of transformer failures and diagnostic methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1442–1456. doi:10.1016/j.rser.2017.05.165. URL `https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117307967`.

Chenguo Yao, Zhongyong Zhao, Yu Chen, Xiaohan Chen, Chengxiang Li, Wei Li, and Jian Wang (2014). Detection of internal winding faults in power transformers based on graphical characteristics of voltage and current. In *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 1–4. IEEE, Poznan, Poland. doi:10.1109/ICHVE.2014.7035475. URL `http://ieeexplore.ieee.org/document/7035475/`.

Hongxin Ji, Yangchun Cheng, Chengrong Li, Kai Chen, Chun Deng, and Shaoyu Liu (2012). The developing rules of partial discharge in the inter-turn insulation of transformers under constant AC voltage. In *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 219–224. IEEE, Shanghai, China. doi:10.1109/ICHVE.2012.6357025. URL `http://ieeexplore.ieee.org/document/6357025/`.

IEC60270, I.E.C. (2000). IEC60270 high-voltage test techniques – partial discharge measurements. (IEC 60270).

Kang, Y.C., Lee, B.E., Zheng, T.Y., Kim, Y.H., and Crossley, P. (2010). Protection, faulted phase and winding identification for the three-winding transformer using the increments of flux linkages. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4(9), 1060. doi:10.1049/iet-gtd.2010.0094. URL `https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2010.0094`.

Kang, Y., Lee, B., Kang, S., and Crossley, P. (2004). Transformer protection based on the increment of flux linkages. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 151(4), 548. doi:10.1049/ip-gtd:20040378. URL `https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd_20040378`.

Kavanagh, D.F., Gyftakis, K.N., and McCulloch, M.D. (2021). Thermal Degradation Phenomena of Polymer Film on Magnet Wire for Electromagnetic Coils. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 458–467. doi:10.1109/TIA.2020.3040201. URL `https://ieeexplore.ieee.org/document/9269421/`.

Kumar, P. and Verma, P. (????). Review Paper on Diagnostics Study of Dry Transformer. Technical report.

Leal, G., Meira, M., Bossio, G., Alvarez, R., and Verucchi, C. (2020). Detection of Inter-turn Short Circuits in Power Transformers Windings:State of the Art. In *2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON)*, 1–8. IEEE, Resistencia, Argentina. doi:10.1109/ARGENCON49523.2020.9505462. URL `https://ieeexplore.ieee.org/document/9505462/`.

Meira, M., Ruschetti, C.R., Álvarez, R.E., and Verucchi, C.J. (2018). Power transformers monitoring based on electrical measurements: state of the art. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(12), 2805–2815. doi:10.1049/iet-gtd.2017.2086. URL `https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-gtd.2017.2086`.

Metwally, I. (2011). Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers. *IEEE Potentials*, 30(3), 36–43. doi:10.1109/MPOT.2011.940233. URL `http://ieeexplore.ieee.org/document/5764361/`.

Murugan, R. and Ramasamy, R. (2015). Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*, 55, 182–192. doi:10.1016/j.engfailanal.2015.06.002. URL `https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630715001843`.

Oleg, S. and Oleksii, K. (2021). Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. In *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 1–6. IEEE, Kremenchuk, Ukraine. doi:10.1109/MEES52427.2021.9598575. URL `https://ieeexplore.ieee.org/document/9598575/`.

R. de Oliveira, L.M. (2001). *DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA O ESTUDO DE AVARIAS NOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

Zhao, X., Yao, C., Zhou, Z., Li, C., Wang, X., Zhu, T., and Abu-Siada, A. (2020). Experimental Evaluation of Transformer Internal Fault Detection Based on $V-I$ Characteristics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(5), 4108–4119. doi:10.1109/TIE.2019.2917368. URL `https://ieeexplore.ieee.org/document/8730484/`.

Zheng, Z., Yang, Y., Li, C., Liu, S., and Ma, J. (2010). Characteristics of partial discharge during its evolution in transformer winding. In *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1–4. IEEE, San Diego, CA, USA. doi:10.1109/ELINSL.2010.5549837. URL `http://ieeexplore.ieee.org/document/5549837/`.