



AVALIAÇÃO DOS DANOS ELETROMECÂNICOS CAUSADOS PELAS CORRENTES DE CURTOS CIRCUITOS “PASSANTES” EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBIENGE.2025.6128

Autores: ALAN FERNANDES SOARES DA SILVA, CÍCERO BARROS DA ROCHA, PAULL HANDREW MAXSUEL LIMA SILVA

Resumo: Este artigo documenta a aplicação do método utilizado para avaliação de danos eletromecânicos causados aos enrolamentos de um transformador de potência devido às correntes de curto-circuito “passantes”. Nesse sentido, a metodologia tem como objetivo estimar a vida útil dos enrolamentos com base no histórico de faltas e na aplicação das equações da norma IEEE 57.109-2018. Dessa forma, esse estudo visa auxiliar às equipes de manutenção, para que estas possam determinar o melhor momento para realizar manutenções programadas, evitando, assim, falhas totais, prejuízos financeiros e impactos sociais.

Palavras-chave: transformador de potência, curto-circuito, danos eletromecânicos

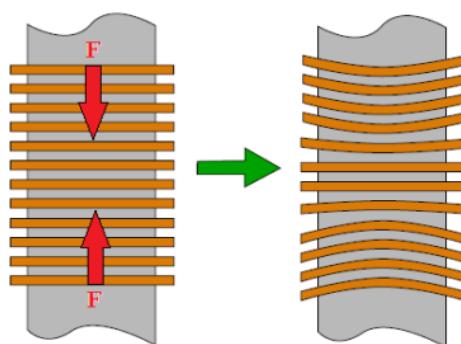
AVALIAÇÃO DOS DANOS ELETROMECÂNICOS CAUSADOS PELAS CORRENTES DE CURTOS CIRCUITOS “PASSANTES” EM UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

1 INTRODUÇÃO

Segundo Filho (2013), o transformador de potência é o elemento de maior responsabilidade dentre os demais empregados numa subestação. Sua função é alterar a amplitude da tensão elétrica de acordo com a situação para o qual foi empregado. O ajuste dos níveis de tensão elétrica é um artifício utilizado pela engenharia elétrica para reduzir as perdas durante o processo de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, os transformadores de potência são equipamentos de difícil substituição, tendo em vista as suas elevadas dimensões, massa e do alto custo de aquisição. Portanto, é imprescindível o monitoramento e a manutenção eficiente, visto que “Os transformadores de potência são equipamentos críticos, cuja a falha pode acarretar impactos financeiros significativos para concessionárias e consumidores (Gifalli, 2025).

Por outro lado, esses equipamentos estão sujeitos a curtos circuitos internos e externos. As falhas externas são mais recorrentes devido à rede elétrica estar exposta ao tempo, por esse fato os transformadores sofrem os impactos das correntes de curtos circuitos “passantes”. Essas são as correntes de alta magnitude provocadas pelo curto circuito que irão passar pelos enrolamentos do transformador até que a proteção atue. Por conseguinte, a corrente “passante” provoca forças de tração e compressão nas direções axiais e radiais dos enrolamentos seguindo a Lei de Lorentz, representadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

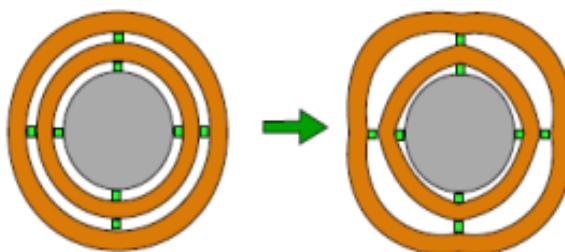
Figura 1 – Efeitos causados nos enrolamentos devido as forças axiais.



Fonte: Júnior, 2010.

15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025
CAMPINAS - SP

Figura 2 – Efeitos causados nos enrolamentos devido as forças radiais.



Fonte: Medeiros et. al. 2021.

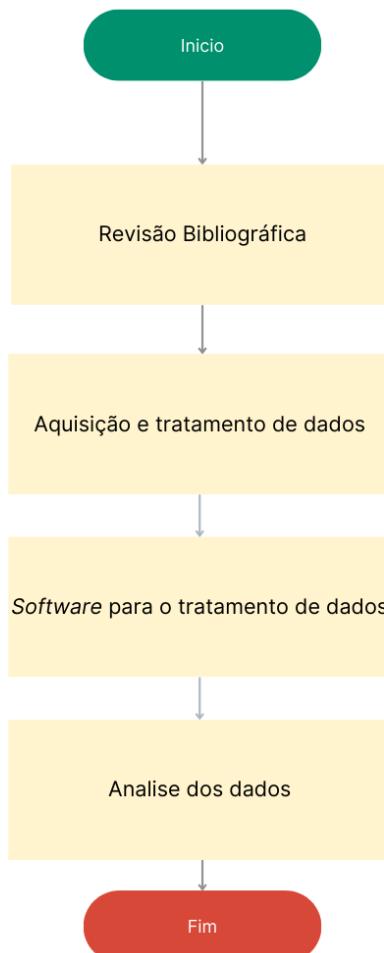
É natural o surgimento das forças de Lorentz com a passagem da corrente elétrica e por isso, os transformadores são projetados para suportar tais forças em condições nominais, porém segundo Cornelius (2023) os esforços eletromecânicos em transformadores de potência devido às correntes de curtos circuitos, as quais podem acarretar em deformações excessivas nos enrolamentos e falhas por ruptura da isolação dielétrica, por conseguinte levar o equipamento a falha. Embora a atuação dos dispositivos de proteção seja rápida e certifique que o transformador não terá falha com um único evento cada falta causará um pequeno dano que se acumula com os demais até causar uma falha total. Portanto, os danos eletromecânicos provocados pelas correntes de curtos circuitos “passantes” são cumulativos e podem ser quantificados através das equações presentes no “*IEEE Guide for Liquid- Immersed transformers through-fault-current duration*” – C57.109-2018.

Diante do exposto, se faz necessário as empresas de distribuição de energia analisar a perda da vida útil a cada ocorrência de passagem de corrente de curto circuito, para avaliar a integridade dos enrolamentos e evitar a perda total do equipamento.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma abordagem quantitativa dos impactos causados pelas correntes de curtos circuitos “passantes” nos transformadores de força. Além disso, é uma forma de monitoramento não invasivo para o sistema elétrico de potência. Dessa forma, por meio de software computacional é possível estimar a perda de vida útil dos enrolamentos do equipamento. Para atingir tal objetivo uma sequência de passos é executada, conforme o fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autor, 2025.

2.1 Revisão bibliográfica

A fundamentação teórica foi realizada por meio de livros, normas, artigos, teses e dissertações. Dentre as pesquisas realizadas, a IEEE 57.109-2018 rege o desenvolvimento deste trabalho. Ela apresenta os limites de suportabilidade dos transformadores de potência as correntes de curto circuito com base na magnitude e o tempo de exposição e conduz a analise sob os efeitos cumulativos. Os parâmetros levados considerações por essa norma refletem a Lei de Lorentz, veja as Equações 1.

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

Na Equação 1, \vec{F} é a densidade de força provocada pelo produto vetorial da densidade de corrente elétrica (\vec{J}) e a densidade de campo magnético (\vec{B}). Dessa forma, as forças produzidas são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica, visto que \vec{J} e \vec{B} são diretamente proporcionais a essa grandeza. Do mesmo modo, pode-se observar o mesmo fator de proporcionalidade na Equação 2, retirada da norma IEEE 57.109 - 2018.

Segundo Sari (2017), embora não explicitamente declarado nas normas da IEEE, esta degradação é prevista pela Equação 2.

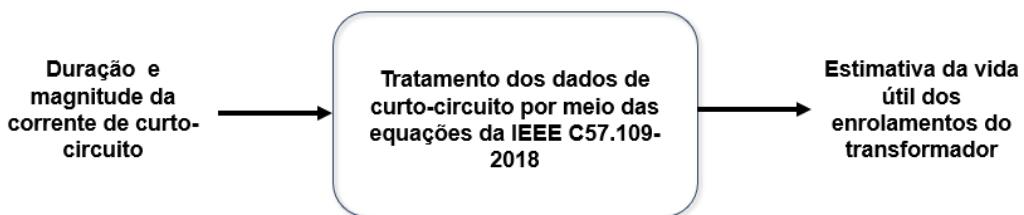
$$k = I^2 t \quad (2)$$

Onde k representa a degradação do enrolamento devido a corrente de curto circuito e corresponde ao produto do quadrado da corrente de falta e o tempo de duração. Além disso, de acordo com a IEEE 57.109-2018 o máximo valor de k ocorre para a máxima corrente de curto circuito em um tempo de dois segundos. Dessa forma, quando o somatório dos valores de k para as correntes de curtos circuitos com suas respectivas durações ultrapassar o valor máximo, isto é o limite da degradação admissível, indica alta possibilidade de falha do transformador de potência. Essa metodologia pode ser descrita pela Equação 3.

$$k_{\text{tot}} = \sum I^2 t < k \quad (3)$$

Portanto, a Equação 3 pode ser utilizada para calcular a degradação nos enrolamentos do transformador devidos os esforços eletromecânicos. A ilustração da Figura 4 representa o processo acima.

Figura 4 – Etapas do processo de estimar a vida útil dos enrolamentos do transformador.



Fonte: Autor, 2025.

2.2 Aquisição e tratamento de dados

O estudo de caso realizado neste trabalho utiliza dos dados fornecidos pela empresa parceira Equatorial Alagoas. A análise é feita com base nos dados do transformador de força da Figura 5, instalado na subestação da distribuidora, localizada no bairro Benedito Bentes na cidade de Maceió – Alagoas. Este transformador é do tipo imerso em óleo com dois modos de refrigeração, são eles: ar natural e ar forçado. Cada modo possui uma potência máxima de operação, são elas respectivamente: 20MVA e 25MVA. Para o presente estudo é considerado que o transformador opera com refrigeração a ar natural, logo a potência máxima corresponde a 20MVA que é adotada como potência de base para o sistema em PU.

REALIZAÇÃO



Associação Brasileira de Educação em Engenharia



ORGANIZAÇÃO



15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025 CAMPINAS - SP

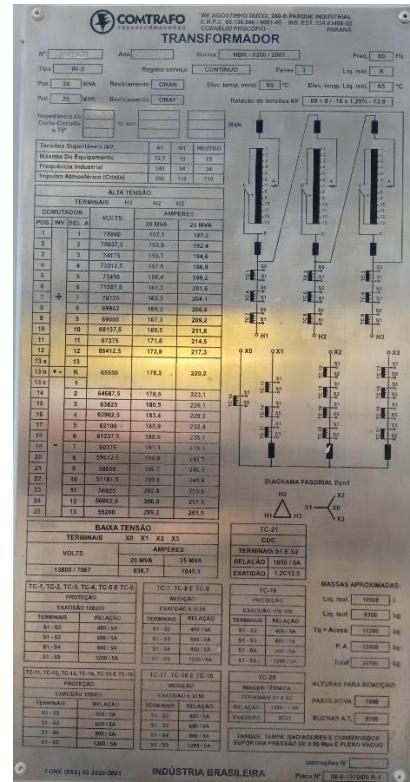
Figura 5 – Transformador analisado.



Fonte: Equatorial Alagoas, 2025.

Além disso, o transformador de força opera como transformador abaixador de tensão de 69kV para 13,8kV. Portanto, a tensão de 13,8kV é tomada como tensão de base para o presente estudo. Ademais, outras informações sobre o equipamento podem ser visualizadas pela placa fornecida pelo fabricante, presente na Figura 6.

Figura 6 – Placa do transformador analisado.



Fonte: Equatorial Alagoas, 2025.

As informações dos 34 curtos circuitos “passantes” ocorridos de 18 de agosto de 2022 até 22 de janeiro de 2025, também fornecidos pela Equatorial Alagoas, foram coletados por meio dos relés de proteção da fabricante SEL modelo 787. As principais grandezas foram listadas na Tabela 1. Entre os dados está a quantificação das faltas

REALIZAÇÃO



Associação Brasileira de Educação em Engenharia

ORGANIZAÇÃO



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA

15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025
CAMPINAS - SP

catalogadas conforme a data de ocorrência, bem como a duração de cada uma delas e as magnitudes das correntes de curtos circuitos em PU em cada fase. Conforme foi apresentado na Figura 4, essas duas últimas grandezas são as entradas para avaliação da perda da vida útil do transformador.

Tabela 1 – Base de dados para o estudo de danos causados ao transformador.

Nº Falta	Data	Duração (s)	I _A (PU)	I _B (PU)	I _C (PU)
1	22/01/2025	0,133	0,00	4,912	6,525
2	30/10/2024	0,171	6,227	6,609	6,896
3	04/10/2024	0,167	5,557	6,143	0,000
4	04/10/2024	0,058	5,223	5,904	0,000
5	23/09/2024	0,150	6,824	0,000	6,215
6	23/09/2024	0,158	0,000	6,334	6,979
7	15/08/2024	0,162	0,000	4,996	5,880
8	19/05/2024	0,133	0,000	0,000	4,888
9	12/02/2024	0,083	0,000	5,008	0,000
10	11/02/2024	0,138	5,079	4,888	5,079
11	04/02/2024	0,150	0,000	0,000	5,557
12	04/02/2024	0,033	0,000	0,000	5,235
13	28/02/2024	0,150	0,000	6,884	0,000
14	02/12/2023	0,154	5,665	7,625	5,533
15	08/11/2023	0,092	6,095	0,000	0,000
16	27/10/2023	0,142	4,924	5,988	0,000
17	21/09/2023	0,021	0,000	0,000	5,019
18	16/09/2023	0,667	0,000	6,143	0,000
19	13/07/2023	0,150	0,000	4,804	5,545
20	13/07/2023	0,146	0,000	4,757	5,509
21	21/06/2023	0,117	5,617	7,661	0,000
22	20/04/2023	0,154	0,000	5,581	6,824
23	04/04/2023	0,088	5,904	6,011	5,976
24	04/04/2023	0,088	0,000	5,760	6,657
25	04/04/2023	0,096	6,083	6,215	6,155
26	25/02/2023	0,133	6,071	7,458	0,000
27	25/02/2023	0,113	5,976	7,816	0,000
28	23/01/2023	0,058	0,000	0,000	4,888
29	05/12/2022	0,017	5,294	0,000	0,000
30	01/12/2022	0,088	0,000	5,545	6,537
31	30/11/2022	0,083	6,191	0,000	0,000
32	07/09/2022	0,088	5,366	5,940	0,000
33	18/08/2022	0,158	6,083	6,167	6,131
34	18/08/2022	0,162	6,203	6,250	5,844

Fonte: Equatorial Alagoas, 2025.

2.3 Software para o tratamento de dados

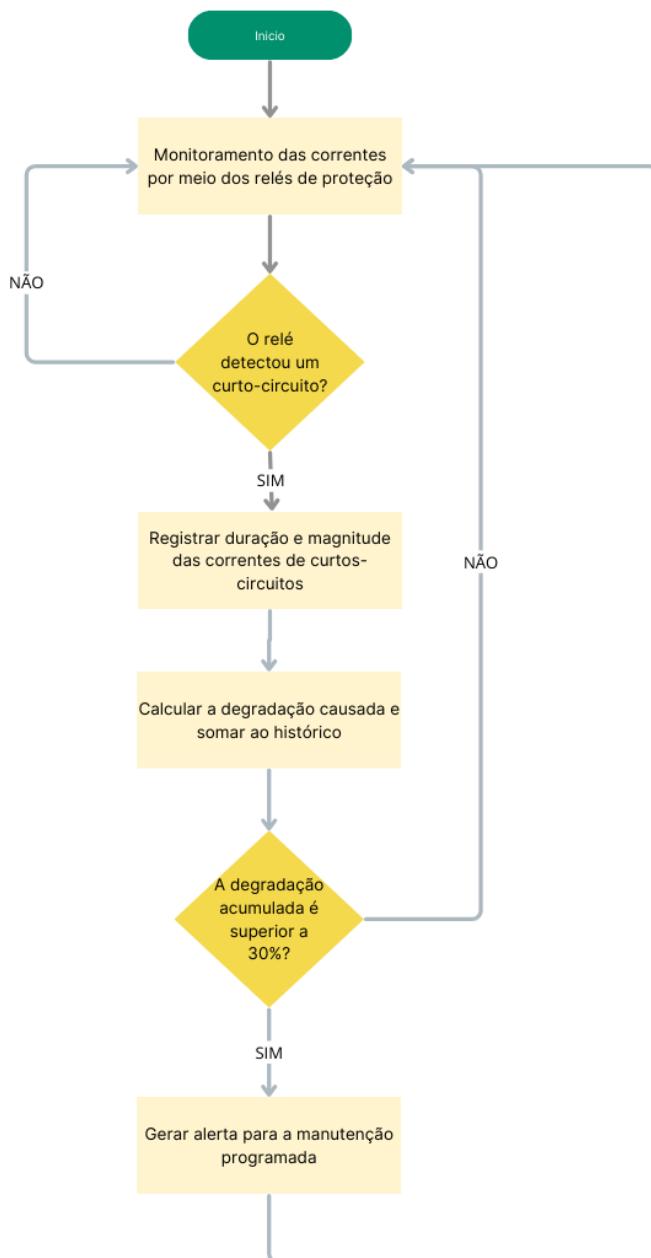
O software Excel foi utilizado no tratamento dos dados e para análise dos resultados obtidos por meio da aplicação das equações da IEEE 57.109-2018.

15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025
CAMPINAS - SP

2.4 Procedimento para análise dos dados

O monitoramento da corrente é feito por meio dos relés de sobrecorrente instantâneo e temporizado (50/51), responsáveis por detectar as correntes de curtos circuitos externas. Quando estes registram alguma ocorrência, os dados devem ser alimentados na planilha para que o percentual de degradação causado seja quantificado com as demais faltas. Portanto, quando o percentual da perda da vida útil ultrapassa os 30%, um alerta é gerado para a equipe de manutenção realizar às análises físico-químicas e cromatográficas do óleo. Diante disso, os procedimentos descritos podem ser resumidos pelo fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma dos procedimentos de análise da degradação dos enrolamentos do transformador.



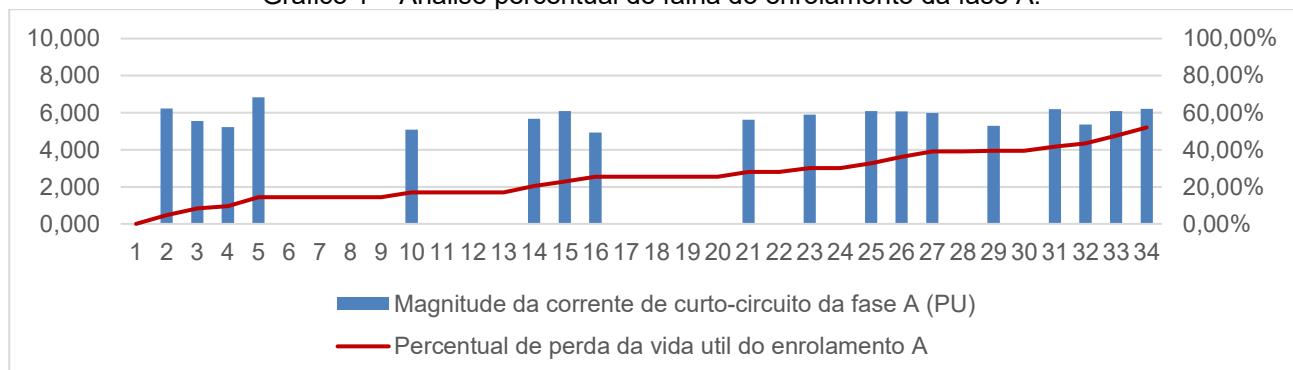
Fonte: Autor, 2025.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da metodologia aplicada, o foi utilizado o software Excel para plotar os gráficos das magnitudes das correntes de falta e o percentual de danos causados ao enrolamento em função das ocorrências dos curtos circuitos.

De acordo com o Gráfico 1, dentre as 34 faltas, apenas 18 causaram impacto no enrolamento da fase A, isso se deve a natureza do curto circuito. Além disso, é possível verificar no gráfico que a inclinação da curva de perda da vida útil do enrolamento é mais acentuada para correntes de maior magnitude, visto que as forças são proporcionais ao quadrado da corrente. Ademais, na falta de número de 23 o percentual de danos a vida útil do transformador ultrapassa os 30%, sendo assim de acordo com fluxograma da Figura 7 deve ser gerado um alerta para a equipe de manutenção inspecionar o equipamento.

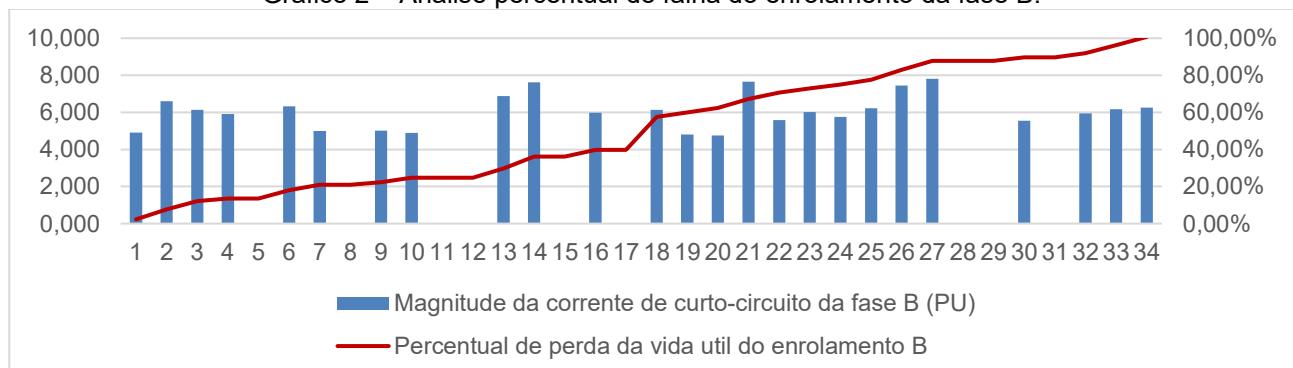
Gráfico 1 – Analise percentual de falha do enrolamento da fase A.



Fonte: Autor, 2025.

Por outro lado, pode-se inferir através no Gráfico 2 que a fase B sofreu com 25 das 34 faltas ocorridas no sistema. Além disso, a magnitude das correntes de curtos circuitos “passantes” são maiores, na ordem de sete vezes a corrente nominal, por conseguinte as forças produzidas nos enrolamentos são maiores quando comparado com a fase A. Vale ressaltar que no decimo quarto curto circuito o percentual de perda da vida útil do enrolamento B ultrapassou os 30% e atualmente chega a 100%. Portanto, a fase B está operando com risco iminente de falha.

Gráfico 2 – Analise percentual de falha do enrolamento da fase B.



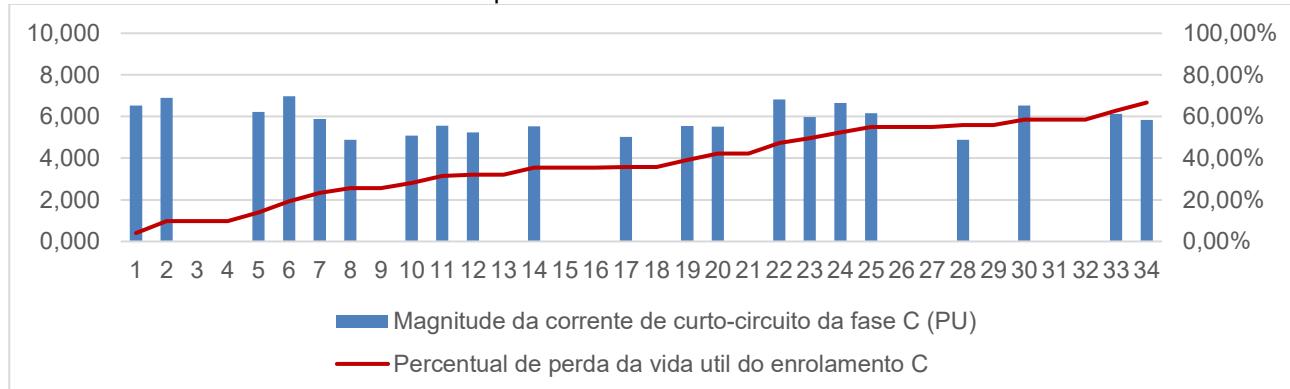
Fonte: Autor, 2025.

Por fim, o histórico de faltas e a curva de perdas do enrolamento C é apresentado no Gráfico 3. Embora a alta magnitude das faltas, assim como na fase B, o enrolamento C foi submetido a 21 das 34 correntes de alta magnitude. Diante disso, percentual de danos

15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025
CAMPINAS - SP

é inferior ao da fase B, porém assim como os demais enrolamentos o nível de alerta (30% de perda da vida útil) já foi ultrapassado. Diante disso, o alerta para ser inspeção é enviado para a manutenção.

Gráfico 3 – Analise percentual de falha do enrolamento da fase C.



Fonte: Autor, 2025.

4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, embora a rapidez da proteção seja eficiente, com tempos de atuação inferior a 0,2 segundos, as correntes de alta magnitude conseguem causar efeitos significativos nos enrolamentos. Dessa forma, com base na metodologia aplicada, constatou-se que o transformador analisado está operando com a fase B em risco iminente de falha, e as demais fases já ultrapassaram o limite de perda da vida útil, correspondente a 30%. Sendo assim, recomenda-se que a concessionária de energia elétrica acione imediatamente a equipe de manutenção, para agendar e realizar os procedimentos necessários para a aferição e possível reparação do equipamento.

Ressalta-se que a abordagem não invasiva proposta permite o monitoramento dos danos causados pelas correntes de curto-círcuito, fornecendo uma ferramenta para a manutenção preventiva, utilizando dados já coletados anteriormente, mas que não eram tratados para essa finalidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, ao orientador, professor Esp. Cícero Barros da Rocha e ao coorientador, professor Esp. Paull Handrew Maxsuel Lima Silva. Além disso, meus sinceros agradecimentos ao Instituto Federal de Alagoas – Campus Palmeira dos Índios, por seu papel transformador nas vidas das pessoas, e principalmente a Equatorial Alagoas por toda parceria firmada e compromisso com a pesquisa. Por fim, agradeço também a PRPPI/IFAL e a FAPEAL pelo incentivo e suporte a pesquisa.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Ana Claudia de. **Estresse eletromecânicos em transformadores causado por curtos circuitos “passantes” e corrente de energização.** 2007. Tese (Doutorado) – Curso de engenharia elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14359>. Acesso em: 20 de abril de 2025.

CORNELIUS, Richard Gonçalves. **Análise numérica dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores de potência sob curto circuito.** 2023. Dissertação (Mestrado) – Curso de engenharia elétrica. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/30313>. Acesso em: 22 de abril de 2025.

FILHO, João Mamede. **Proteção de Sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro: Editora: LTC, 2013.

GIFALLI, André. **Uma nova metodologia de criticidade para a gestão e priorização de transformadores de potência a partir de um método multicritério e analise multivariada.** 2025. Tese (Doutorado) – pós-graduação em engenharia elétrica. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/295424>. Acesso em: 30 de abril de 2025.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE 57.109:** Guide for Liquid-Immersed transformers through-fault-current duration. New York, 2018.

JÚNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. **Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto circuito trifásico.** 2010. Dissertação (Mestrado) – Curso de engenharia elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14437>. Acesso em: 15 de abril de 2025.

MEDEIROS, L. H.; MASCHIO, G.; KAMINSKI, A. M.; OLIVEIRA, M. M.; BUENO, D. M.; BENDER, V. C.; MARCHESAN, T. B. Análise do Impacto da Inserção de Geração Distribuída Sobre os Esforços Eletromecânicos em Transformadores. **Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos.** Santa Maria, v.1, n.1, 2021.

SARI, Ira Mardya; TRYOLLINNA, Azzahraminna; SUDIN, Anna Dwita Paulus; PERMATA, Dahlia Deka. **Through fault current effects on distribution transformer and prevention actions using backup protection: Case study of Kelapa Gading transformer.** IEEE, International Conference on High Voltage Engineering and Power System, Bali, 5 a 8 de outubro de 2017. Disponível em: [Through fault current effects on distribution transformer and prevention actions using backup protection : Case study of Kelapa Gading transformer | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8107070/). Acesso em: 22 de abril de 2025.

REALIZAÇÃO



Associação Brasileira de Educação em Engenharia



15 a 18 DE SETEMBRO DE 2025
CAMPINAS - SP

ORGANIZAÇÃO



PUC
CAMPINAS

PONTIFICAL UNIVERSIDADE CATÓLICA

EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL DAMAGE CAUSED BY “THROUGH” SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN A POWER TRANSFORMER

Abstract: This paper documents the method for assessing electromechanical damage caused to power transformer windings due to “through” short-circuit currents. In view of this, the methodology aims to estimate the useful life of the windings through the fault history and the application of the IEEE 57.109-2018 equations. Therefore, maintenance teams can determine the best time to perform scheduled maintenance, thus avoiding total failures, financial and social damages.

Keywords: Transformers, short-circuit, electromechanical damage.

REALIZAÇÃO



Associação Brasileira de Educação em Engenharia

ORGANIZAÇÃO



PUC
CAMPINAS

PONTIFICAL UNIVERSIDADE CATÓLICA

