

Depreciação dos Transformadores em Função do Envelhecimento Causado pelas Distorções Harmônicas de Corrente

Fábio de Oliveira Carvalho* André Nunes de Souza** Se Un Ahn***
Shigeaki Leite de Lima**** Danilo Sinkiti Gastaldello† André Giffalli‡

* *Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (fabio.o.carvalho@unesp.br).*

** *Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (andre.souza@unesp.br)*

*** *Aplicação e Inovação Tecnológica em QEE (Appitec) - Jundiaí (seunster@gmail.com)*

**** *Diretoria de Gestão da Inovação e Serviços Tecnológicos - UFMA - São Luis (shigeaki.lima@ufma.br).*

† *Dep. de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas - UNISAGRADO - Bauru (danilo.gastaldello@unisagrado.edu.br)*

‡ *Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (andregiffalli@gmail.com)*

Abstract:

This paper presents a case that consists of an A4 (13,8 kV) consumer category, which uses a distribution transformer to connect their installations to the distribution power system. Some measurements were done, and a nonsinusoidal load currents is verified. An analysis was carried out based on the concepts in the IEEE std 57.110/2018 and IEEE std 57.91/2011 standards, with the objective of quantifying the harmful phenomena that occurs in the distribution transformer, and the depreciation provided in this property in function of harmonic currents. The results obtained demonstrate that there may be a loss in the life expectancy of the transformer, accelerating the depreciation of the assets, negatively interfering in the costs of that company.

Resumo:

Neste trabalho apresenta-se um estudo de caso de um acessante da categoria A4 (13,8 kV), que utiliza um transformador de distribuição na conexão de suas instalações ao sistema elétrico de distribuição. Através de medições constata-se a existência de distorções harmônicas de corrente provenientes de possíveis cargas não-lineares. Utilizando as informações obtidas realizou-se uma análise com base nas normas IEEE std 57.110/2018 e IEEE std 57.91/2011, com o objetivo de quantificar os fenômenos nocivos que ocorrem no transformador de distribuição e a depreciação proporcionada neste patrimônio em função das distorções harmônicas de corrente. Os resultados obtidos demonstram que pode ocorrer uma perda na expectativa de vida do transformador interferindo negativamente nos custos da empresa.

Keywords: Distribution transformer; Harmonic Current Distortions; Transformer Total Losses; Transformer Temperature; Loss Life.

Palavras-chaves: Transformador de distribuição; Distorções Harmônicas de Corrente; Perdas Totais do Transformadores; Temperatura do Transformador; Perda de Vida.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, existem em torno de 4.522.983 acessantes industriais ligados na categoria A4 - 2,3 kV a 25 kV (EPE, 2021). O acesso destes clientes ao Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) deve ser feito utilizando um transformador de distribuição como acoplamento (ANEEL, 2017). A quantidade de transformadores de acoplamento instalados nas SDMT particulares é um número desconhecido, no entanto, sabe-se que é equivalente ou maior ao número de acessantes, pois há acessantes que possuem mais de um transformador em sua instalação.

A construção de um transformador não mudou muito desde o primeiro lote fabricado no século passado (He-

athcote, 1998). Este equipamento foi objeto de inúmeras pesquisas que demonstraram ser um dos mais eficientes e confiáveis do sistema elétrico.

No entanto, nos últimos observa-se uma significativa mudança nos tipos de cargas conectadas ao sistema elétrico, como o aumento das cargas não-lineares. Destaca-se também o aumento de inversores fotovoltaicos. Ambos podem causar o aumento das distorções harmônicas neste sistema.

Os transformadores não possuem boa tolerância à distorções harmônicas e, ao analisar a normatização vigente nota-se uma inconsistência em relação aos limites estipulados. Por exemplo, o limite para distorções harmônicas totais de corrente (DHT_i) para transformadores contido na norma NBR 5356/2010 é de 5% (ABNT, 2010). Por outro

lado, a norma IEEE std 519/2014 estabelece limites para $DHTi$ de acordo com o nível de curto-circuito do ponto de conexão, variando entre 5% e 20% (IEEE, 2014). Nos pontos onde o nível de curto-circuito é maior, é permitido que a $DHTi$ seja superiores que 5%, entretanto, valores superiores a 5% não são permitidos para transformadores.

As $DHTis$ desencadeiam uma sequência de fenômenos internos no transformador que ocasionam perdas de potência, aumento da temperatura de trabalho e redução da vida útil; culminando no aumento da depreciação do patrimônio da empresa. Isso pode ser significativo, pois o transformador possui um custo relativamente alto, e sua expectativa de vida é de aproximadamente 20 anos (IEEE, 2012).

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o aumento da depreciação do transformador de distribuição em função das distorções harmônicas de corrente provenientes das cargas não-lineares de uma instalação industrial.

2. SEQUÊNCIA DOS FENÔMENOS QUE OCASIONAM A PERDA DE VIDA DO TRANSFORMADOR

A avaria de um transformador pode ocorrer por diversos motivos, como, vazamento de óleo, curto-circuito na baixa tensão, sobrecarga, instalação fora dos padrões e fim da vida útil (Medeiros et al., 2013). A ocorrência de $DHTi$ reduz a vida útil do transformador (Delaiba et al., 1995), pois dá início a uma sequência de fenômenos (Figura 1) que aceleram o envelhecimento da isolamento de celulose dos enrolamentos primário e secundário (IEEE, 2012).

O levantamento do conteúdo harmônico de forma precisa é realizado através de medidores específicos, sendo que, o acompanhamento da operação do transformador considerando apenas as grandezas medidas na frequência fundamental insuficientes para a verificação da situação em que se encontra esse equipamento (Teixeira, 2009).

Mediante as informações obtidas nas medições observa-se a ocorrência de fenômenos nocivos, como:

- o aumento das Perdas Totais de Potência em função das distorções harmônicas (P_{PTH}) (IEEE, 2018), tendo em vista a dificuldade que o transformador possui em operar em altas frequências (Taci, M.S. [et al.], 2004) (Mclyman, 2004).
- a dissipação da P_{PTH} convertida em calor, aumentando a temperatura nos componentes do transformador (IEEE, 2018).
- a deterioração da celulose isolante encontrada nos enrolamentos do transformador.

3. PERDAS TOTAIS NOS TRANSFORMADORES EM FUNÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A estimativa das perdas totais ocorridas em um transformador submetido às distorções harmônicas de corrente pode ser feita utilizando (1) (IEEE, 2018).

$$P_{PTH} = P_J + F_{HCP}P_{CP} + F_{ps}P_s \quad (1)$$

Onde:

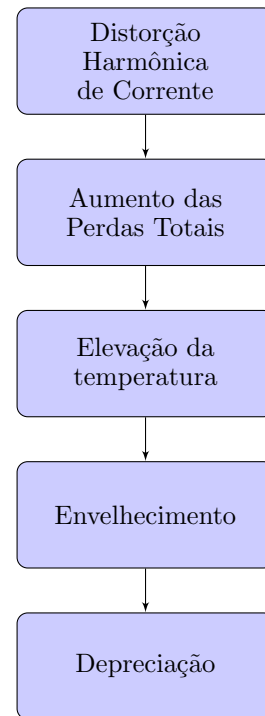


Figura 1. Mecanismo da perda de vida do transformador

- P_{PTH} : perda de potência total do transformador sob distorção harmônica (W);
- P_J : perda Joule (RI^2) ocorrida nos enrolamentos em condições nominais (W);
- F_{HCP} : fator de perda nos enrolamentos do transformador ocasionado por correntes parasitas sob distorções harmônicas;
- P_{CP} : perda de potência ocorrida nos enrolamentos de um transformador ocasionada por correntes parasitas sob condições nominais (W);
- F_{ps} : fator de perdas suplementares sob distorção harmônica; e
- P_s : perdas suplementares em condições nominais (W).

As Perdas Suplementares (P_s) ou Perdas por dispersão, são aquelas ocasionadas pelo fluxo eletromagnético disperso nos enrolamentos, núcleo, braçadeiras de núcleo, blindagens magnéticas, paredes do gabinete ou do tanque, e outros componentes metálicos utilizados na montagem (IEEE, 2018) (Jordão, R. G., 2008), e podem ser calculadas conforme (2) (IEEE, 2018).

$$P_s = P_{TN} - K \left[R_p (I_p)^2 + R_s (I_s)^2 \right] \quad (2)$$

Onde:

- P_s : perdas suplementares (W);
- P_{TN} : perda total nominal de potência sob condições nominais (W)(conforme projeto do transformador);
- K : 1,0 para transformadores monofásicos, e 1,5 para transformadores trifásicos;
- R_p : resistência elétrica medida entre os terminais do enrolamento primário do transformador (Ω);
- I_p : corrente elétrica no enrolamento primário do transformador (A);
- R_s : resistência elétrica medida entre os terminais do enrolamento secundário do transformador (Ω); e

- I_s : corrente elétrica no enrolamento secundário do transformador (A).

Utilizando-se os valores obtidos em ensaios realizados em conformidade com as normas IEEE std C57.12.00 e IEEE std C57.12.91, apresentados na Tabela 1, é possível estimar o percentual de perdas nos enrolamentos de baixa tensão, de perdas nos enrolamentos de alta tensão e das perdas suplementares em função da capacidade (kVA) dos transformadores.

Tabela 1. Distribuição das perdas em transformadores imersos em líquido isolante (IEEE, 2018)

kVA	Perdas nos enrolamentos por correntes parasitas (P_{CP})		Perdas Suplementares (P_S) (%)
	Enrolamento BT (%)	Enrolamento AT (%)	
≤ 300	55	5	40
> 300 ≤ 1000	40	10	50
> 1000 ≤ 3000	20	10	70
> 3000	25	15	60

O fator F_{HCP} representa a influência das distorções harmônicas de corrente sobre as perdas por correntes parasitas, conforme (3) (IEEE, 2018):

$$F_{HCP} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} \quad (3)$$

Onde:

- F_{HCP} : fator de perda harmônico para perdas por correntes parasitas;
- h : ordem harmônica; e
- I_h : valor eficaz da corrente elétrica harmônica (A).

O fator F_{ps} representa a influência das distorções harmônicas de corrente sobre as perdas suplementares, conforme (4) (IEEE, 2018):

$$F_{ps} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2} \quad (4)$$

Onde:

- F_{ps} : fator de perdas suplementares sob distorção harmônica;
- h : ordem harmônica;
- I_h : valor eficaz da corrente elétrica harmônica (A); e
- I : valor eficaz da corrente elétrica (A).

De forma geral, a carga de um transformador varia ao longo do tempo. A variação da potência aparente (S) na frequência fundamental é obtida a partir de uma medição dessa grandeza, e com isso, consegue-se o Perfil de Carga no ponto de medição. O valor ponderado da carga, ou a potência equivalente S_{eq} pode ser encontrada empregando (5) (IEEE, 2012).

$$S_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N S_n^2 t_n}{\sum_{n=1}^N t_n}} \quad (5)$$

Onde:

- S_{eq} : Potência aparente equivalente (kVA);
- S_n : Potência aparente em um período (kVA);
- t_n : Período para S_n (s)

4. ESTIMATIVA DO PONTO MAIS QUENTE DO TRANSFORMADOR OPERANDO SOB DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE

A estimativa da temperatura no ponto mais quente do transformador (Θ_H) é a soma das temperaturas em três regiões específicas: a temperatura ambiente; a variação da temperatura do enrolamento do transformador em função da corrente elétrica; e a variação da temperatura do topo do óleo isolante em função das perdas totais no transformador. Essa grandeza pode ser obtida aplicando-se (6) (IEEE, 2012) (IEEE, 2018).

$$\Theta_H = \Theta_A + \Theta_{TO} + \Theta_g \quad (6)$$

Onde:

- Θ_H - Máxima temperatura do enrolamento (°C);
- Θ_A - Temperatura ambiente (°C);
- Θ_{TO} - Variação da temperatura do topo do óleo em relação a temperatura ambiente (°C); e
- Θ_g - Variação da temperatura entre o ponto mais quente do enrolamento e a temperatura do topo do óleo (°C).

A variação da temperatura do topo do óleo em relação a temperatura ambiente (Θ_{TO}) pode ser obtida utilizando-se (7) (IEEE, 2018).

$$\Theta_{TO} = \Theta_{SLI} \left(\frac{P_{PTH} + P_V}{P_{TN} + P_V} \right)^{0,8} \quad (7)$$

Onde:

- Θ_{TO} : Variação da temperatura do topo do óleo em relação a temperatura ambiente (°C);
- Θ_{SLI} : temperatura da superfície do líquido isolante do transformador sob condições nominais (°C);
- P_{PTH} : perda de potência total do transformador sob distorção harmônica (W);
- P_{TN} : perda total nominal de potência sob condições nominais (W) (conforme projeto do transformador) (W); e
- P_V : perda à vazio (W).

A elevação da temperatura no ponto mais quente do enrolamento (Θ_H) pode ser obtida utilizando-se (8) (IEEE, 2018).

$$\Theta_H = \Theta_{HN} \left(\frac{P_{PTH}}{P_{TN}} \right)^{0,8} \quad (8)$$

Onde:

- Θ_H : Máxima temperatura do enrolamento (°C);

- Θ_{HN} : Máxima temperatura do enrolamento sob condições nominais ($^{\circ}\text{C}$);
- P_{PTH} : perda de potência total do transformador sob distorção harmônica (W); e
- P_{TN} : perda total nominal de potência sob condições nominais (W) (valores definidos na NBR 5356/2010).

5. ENVELHECIMENTO PRECOCE DO ISOLAMENTO DE CELULOSE EM FUNÇÃO DE TEMPERATURA.

A Θ_H é a principal variável no envelhecimento do isolamento de celulose que fica em contato com os enrolamentos dos transformadores. Com isso, é possível relacionar Θ_H com a vida útil do transformador conforme (9) (IEEE, 2012).

$$F_{AE} = e^{\left(\frac{15.000}{383} - \frac{15.000}{\Theta_H + 273}\right)} \quad (9)$$

Onde:

- F_{AE} : Fator de aceleração do envelhecimento (pu); e
- Θ_H : Máxima temperatura do enrolamento ($^{\circ}\text{C}$).

O F_{AE} expressa o envelhecimento pontual, ou instantâneo, sendo que, para conhecer o envelhecimento ao longo do tempo utiliza-se (10) (IEEE, 2012).

$$F_{AEeq} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AE,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (10)$$

Onde:

- F_{AEeq} : Fator de aceleração do envelhecimento equivalente (pu);
- F_{AE} : Fator de aceleração do envelhecimento (pu); e
- Δt_n : Período em que o transformador foi exposto a condição de envelhecimento.

De acordo com a norma IEEE Std C57.12.00-2010, a expectativa mínima de vida útil do isolamento de celulose em condições nominais é de 180.000 horas. Portanto, a estimativa de Perda de Vida Útil (PDV) (%) expressa a perda de horas em função do sobreaquecimento do transformador, conforme (11) (IEEE, 2012).

$$PDV = \frac{F_{AEeq} \times t \times 100}{180.000} \quad (11)$$

Onde:

- PDV : Perda de Vida (%);
- t Período em que a temperatura do transformador permaneceu acima do limite (s); e
- F_{AEeq} : Fator de aceleração do envelhecimento equivalente (pu).

6. ANÁLISE DA DEPRECIACÃO DO TRANSFORMADOR.

A análise do impacto no patrimônio causado pela envelhecimento do transformador pode ser feita utilizando-se o Valor Presente Líquido (VPL), conforme (12) (Urtado, Edson Silva [et al.], 2009).

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (12)$$

Onde:

- VPL - Valor presente líquido;
- FC_n - Fluxo de caixa a cada unidade de tempo;
- i - Taxa de juros proporcional a unidade de tempo; e
- N - Período de análise.

7. ESTUDO DE CASO

Neste estudo realizou-se uma análise no sistema elétrico apresentado na Figura 2.

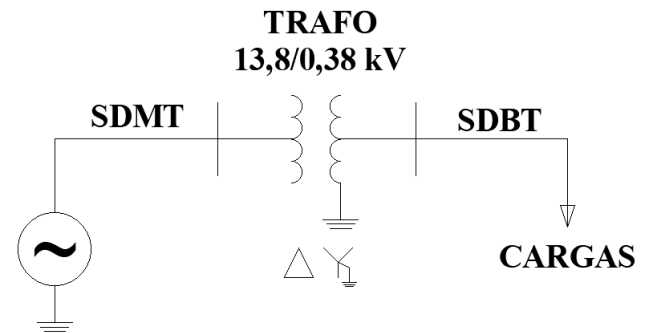


Figura 2. Diagrama Elétrico.

Trata-se de uma entrada de serviço particular de alta tensão que alimenta uma indústria. Nesta entrada de serviço encontra-se um transformador de distribuição trifásico. Os dados do transformador são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do Transformador.

Potência nominal (kVA)	500
Tensão primária (V)	13.800
Tensão secundária (V)	380
Perdas à vazio (kW)	1,1
Perdas em carga (kW)	9,8
Perdas Totais (P_{TN}) (kW)	10,9
Resistência do primário a 75°C (Ω)	19,09
Resistência do secundário a 75°C (Ω)	0,0039

Realizou-se uma medição no lado de alta tensão deste transformador em um período de aproximadamente 5 dias, com o objetivo de realizar um levantamento das condições de trabalho deste equipamento. As amostras foram registradas a cada 10 minutos, totalizando 779 medidas. O medidor utilizado é classe A, aprovado pela ONS/ANEEL para campanhas de medição de qualidade de energia. O perfil de carga obtido esta apresentado na Figura 3.

Juntamente com o levantamento do Perfil de Carga, realizou-se um levantamento dos valores da Corrente Elétrica desde a magnitude na frequência fundamental, bem como as Distorções Harmônicas de Corrente ($DHTi$). O resultado das medições esta na Figura 4.

Utilizando-se os resultados apresentados das Figura 3 e Figura 4 estima-se a P_{PTH} , a Θ_H e a PDV do transformador. Utilizando-se a PDV obtida, estimou-se a Depreciação linear para o transformador tanto para a operação sob condições nominais, como para a operação sob distorções

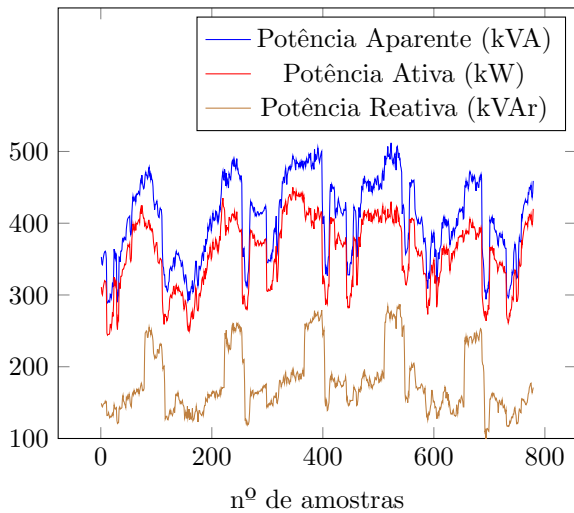


Figura 3. Perfil de Carga obtido através de medições no Transformador.

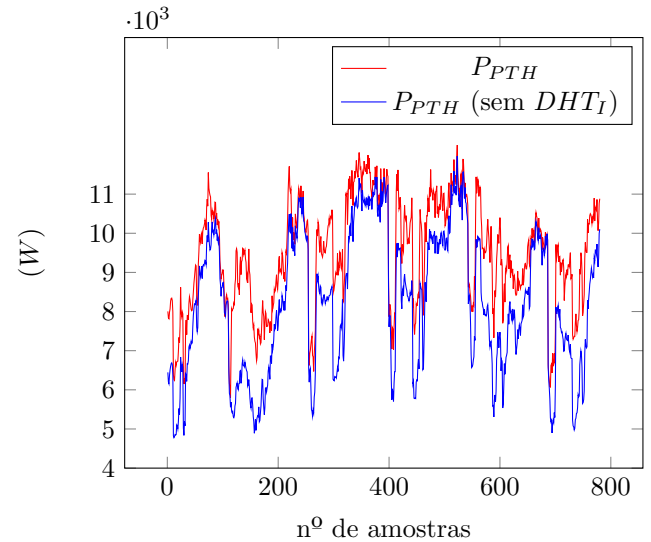


Figura 5. Perdas no Transformador.

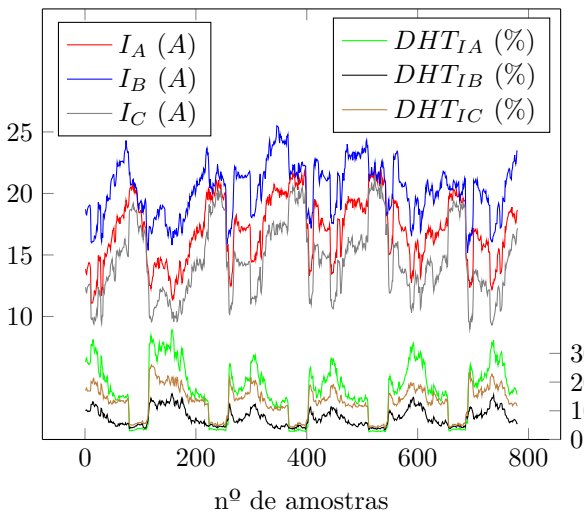


Figura 4. Levantamento da Corrente Elétrica (A) e da DHT_I .

harmônicas. Considerou-se o valor de \$ 20.000,00. A taxa anual de depreciação foi utilizada como fluxo da caixa para o cálculo do VPL .

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Perdas Totais no Transformador (P_{PTH}) resultam do Perfil de Carga e das DHT_I s medidas associadas a (1), (2), (3) e (4). Os valores obtidos estão apontados na Figura 5.

Considerando o ponto de vista da Figura 5 faz-se necessário o esclarecimento de que as P_{PTH} (azul) são os valores de perdas em função somente da carga e sem considerar as DHT_I , onde F_{HCP} e F_{PS} são unitários. Para as P_{PTH} (em vermelho) os fatores F_{HCP} e F_{PS} não são unitários, e recebem influência dos parâmetros h , I_h e I conforme (3) e (4). Quando P_{PTH} (em vermelho) está próximo a P_{PTH} (azul) significa que os fatores F_{HCP} e F_{PS} estão próximos de “1”, caso contrário, significa que são superiores. Portanto, indica-se a forte influência das distorções harmônicas nas perdas dos transformadores, e que dependendo da ordem

harmônica, esta pode ter uma influência tão grande como a carga.

Os valores obtidos de Θ_H são apresentados na Figura 6.

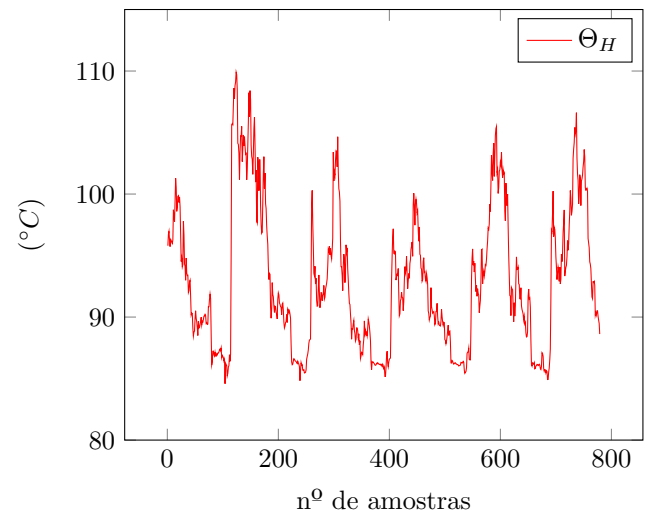


Figura 6. Temperatura do ponto mais quente do condutor dos enrolamentos do transformador.

Nota-se que, a curva de Θ_H possui influência tanto do perfil de carga quanto das DHT_I , sendo que em alguns momentos sobressai um ou outra dependendo da magnitude de cada uma.

Os valores obtidos de PDV (%) são apresentados na Figura 7.

Sob a perspectiva da Figura 7 faz-se necessário lembrar que em conformidade com a norma IEEE std 57.91/2011 a expectativa de vida de projeto para um transformador (azul) é de 180.000 h (250 meses). Os valores obtidos para PDV (vermelho) apresentam uma antecipação do fim da vida útil em 42 meses.

Para avaliação do impacto financeiro das DHT_I s no envelhecimento do transformador, utilizou-se das informações da Figura 8.

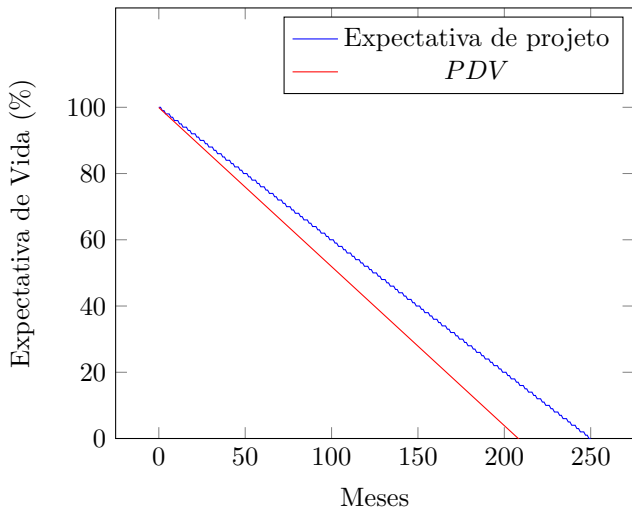


Figura 7. Perda de Vida do Transformador em função das $DHTis$.

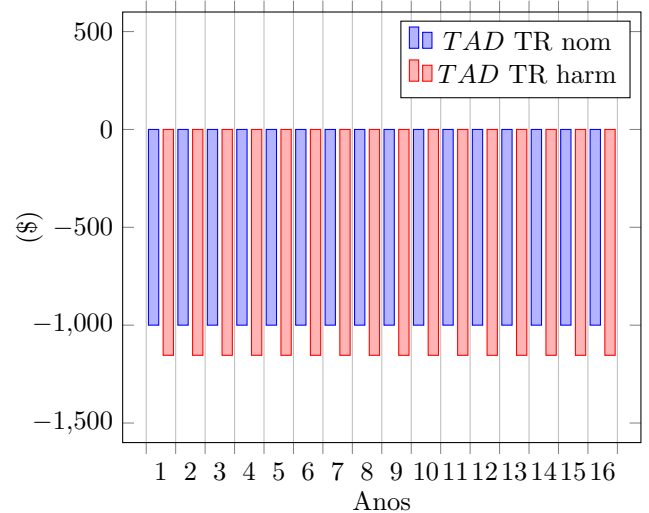


Figura 9. Taxa de depreciação do transformador.

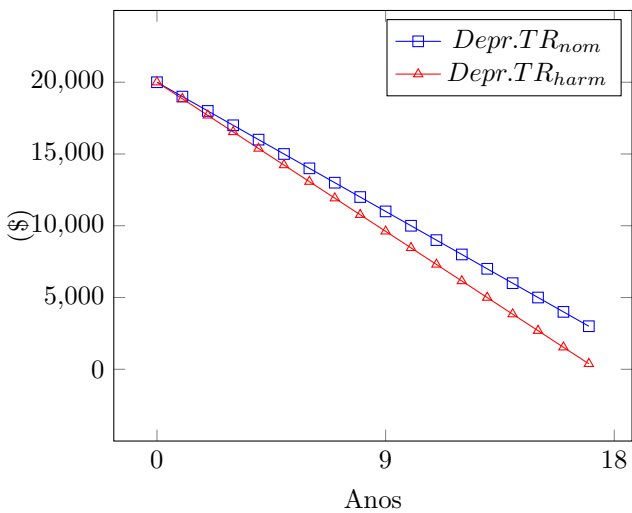


Figura 8. Depreciação do transformador.

Em análise a Figura 8 nota-se que o período utilizado foi de 17 anos. Isto se faz necessário porque a vida do equipamento chega supostamente ao fim neste período, tornando impossível obter-se valores de PDV para períodos maiores que este. O resultado $Depr. TR_{nom}$ (azul) representa a depreciação do transformador no período adotado pelo estudo (250 meses). Nota-se que o transformador inicia a operação com o valor de \$ 20.000,00 e encerra o período com o valor de \$ 3.000,00. Por outro lado, o resultado $Depr. TR_{harm}$ (vermelho) o valor do transformador inicia igualmente com \$ 20.000,00 e encerra com o valor de \$ 380,84.

A Taxa Anual de Depreciação (TAD) esta apresentada na Figura 9.

Observa-se que, em condições nominais o transformador deprecia a uma TAD de \$ -1.000,00 ao ano, e operando nas condições apresentadas nas medições, a TAD será de \$ -1.154,07.

Utilizando as $TADs$ como fluxo de caixa, e aplicando a (12) obtém-se os resultados contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valor Presente Líquido.

VPL1(\$)	-6,428,53
VPL2(\$)	-8,092,39
Diferença(\$)	-1,663,86
Aumento no custo do transformador (%)	25,88

Percebe-se que, em termos de valores presente líquido, a depreciação do transformador que opera nas condições descritas neste trabalho se torna 25,88 % maior que um transformador que opere sob condições nominais.

9. CONCLUSÃO

Neste trabalho utilizou-se os conhecimentos contidos nas normas IEEE std C57.110/2018 e IEEE std C57.91/2011 para avaliar o impacto financeiro que as distorções harmônicas de corrente podem causar, pois desencadeia uma sequencia de fenômenos (Figura 1) que culmina na perda de vida útil do transformador.

As distorções harmônicas de corrente são causadas por cargas não-lineares e geradores fotovoltaicos, sendo que nos últimos anos, vem ocorrendo o aumento desses equipamentos no sistema de potência, portanto observa-se o aumento das distorções harmônicas de corrente. Por outro lado, os transformadores de potência são equipamentos projetados para operar em condições próximas a senoidais. Caso contrário, pode ocorrer efeitos indesejados como aumento das perdas e envelhecimento. Isso pode acontecer mesmo se o carregamento do transformador esteja abaixo da potência nominal. É possível observar este fenômeno no estudo de caso realizado neste trabalho, onde o carregamento ficou abaixo da potência nominal do transformador de 500 kVA (Tabela 2), porém as perdas totais ficaram acima do valor de projeto do transformador (Figura 5).

Para a estimativa da temperatura de trabalho do transformador, as variáveis que interferem são a temperatura ambiente e as perdas totais. A primeira, não tem relação com as distorções harmônicas de corrente, dependendo principalmente das condições climáticas. A segunda, esta diretamente ligada as distorções harmônicas de corrente, conforme (1), (2), (3) e (4). Nesse caso, podemos conside-

rar as perdas totais como a variável mais importante na estimativa da temperatura de trabalho conforme (6), (7) e (8).

Em conformidade com (9) o envelhecimento da isolação de celulose do transformador ocorre exponencialmente em relação ao aumento da temperatura dos enrolamentos, e juntando-se (10) e (11), obtém-se a perda de expectativa de vida do transformador (204 meses) em relação a expectativa de vida de projeto (250 meses), ou seja, espera-se a redução da vida útil do transformador em 42 meses.

Em termos contábeis, a redução da vida útil do transformador, tido com ativo de uma empresa, acelera também a sua depreciação. Considerando um horizonte de 17 anos, é possível estabelecer um fluxo de caixa utilizando-se as taxas anuais de depreciação. Esse fluxo de caixa aplicado (12) serve como indicador da depreciação do equipamento. Os resultados obtidos na Tabela 3 demonstra que o transformador do caso em estudo depreciou 25,88 % mais que o mesmo transformador operando em condições nominais.

Diante disso, conclui-se a necessidade de se investigar a presença de distorções harmônicas nas instalações elétricas e o estudo profundo da sua interferência na operação de componentes como o transformador, não sendo mais suficiente para a gestão da operação do sistema elétrico, as grandezas fundamentais como tensão, corrente e potência.

Outras análises e conclusões podem ser realizadas a respeito deste tema para aperfeiçoamento das técnicas envolvidas.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru e ao Laboratório de Sistemas de Potência e Técnicas Inteligentes (LSISPOTI) da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

REFERÊNCIAS

- ABNT (2010). *NBR 5356/2010 - Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades*. ABNT, Rio de Janeiro.
- ANEEL (2017). *PRODIST - Módulo 03 - Acesso ao Sistema de Distribuição*. Brasília. URL <https://www.aneel.gov.br/documents/>.
- Delaiba, A., de Oliveira, J., Vilaca, A., and Cardoso, J. (1995). The effect of harmonics on power transformers loss of life. In *38th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Proceedings*, volume 2, 933–936 vol.2. doi: 10.1109/MWSCAS.1995.510243. ISSN: null.
- EPE (2021). *Dados Abertos do Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Brasília. URL <https://www.epe.gov.br/>.
- Heathcote, M.J. (1998). *The J P transformer book : a practical technology of the power transformer*. Newnes, Boston, 12. ed. - edition.
- IEEE (2012). *IEEE std C57.91/2011 - Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*. Nova York. URL <https://ieeexplore-ieee-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/>.
- IEEE (2014). *IEEE std 519/2014 - Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York. URL

- <https://ieeexplore-ieee-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/>.
- IEEE (2018). *IEEE std C57.110/2008 - Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. Nova York. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8546832.
- Jordão, R. G. (2008). *Transformadores: Teoria e Ensaios*. Edgard Blucher, São Paulo.
- Mclyman, C.W. (2004). *Transformer and Inductor Design Handbook*. CRC Press, Idyllwild.
- Medeiros, A.M., Lessa, F.A.S., Megna, D.S.L., and Monteiro, L.F. (2013). Aplicação das ferramentas da qualidade na identificação das avarias relacionadas com a queima de transformadores: estudo de caso realizado em uma empresa de distribuição de energia elétrica no estado de Sergipe. URL <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/8622>. Accepted: 2018-07-17T22:37:08Z Publisher: ABEPRO.
- Taci, M.S. [et al.] (2004). *The effects of linear and non-linear operation modes in transformers*. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, NY.
- Teixeira, D.A. (2009). Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial. URL <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CJHGU>. Accepted: 2019-08-13T07:57:33Z Publisher: Universidade Federal de Minas Gerais.
- Urtado, Edson Silva [et al.] (2009). *Aplicação do Método do Valor Presente Líquido (VPL) na Análise da Viabilidade Econômica de Projetos na Indústria Metal Mecânica: Um Estudo de Caso*. IX Encontro Latino-americano de Pós-Graduação, São José dos Campos. URL http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/0732_0960_01.pdf.