

A VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS EM RESINA EPÓXI

MARCO ANTONIO FERREIRA FINOCCHIO¹, LUCAS DE OLIVEIRA ANTUNES²

¹ Professor Pesquisador LABMATEE/LABAT, UTFPR-CP, Cornélio Procópio-PR, mafinocchio@utfpr.edu.br;

² Acadêmico de Engenharia Elétrica, UTFPR-CP, Cornélio Procópio-PR, lucasantunes@alunos.utfpr.edu.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este trabalho realiza uma investigação sobre evolução da vida útil de transformadores a seco. Fundamentada na elevação de temperatura do enrolamento do transformador. A simulação ocorreu pela análise da degradação térmica dos materiais orgânicos e inorgânicos do transformador. Esta avaliação apoiou-se na equação da taxa de reação de Arrhenius, no tratamento dos materiais isolantes do mesmo. O que possibilitou uma estimativa da sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: Transformadores de energia, temperatura, material isolante.

THE LIFE OF ELECTRIC TRANSFORMERS IN EPOXY RESIN

ABSTRACT: This work carries out an investigation on the evolution of the service life of dry transformers. Based on the temperature rise of the transformer winding. The simulation occurred by analyzing the thermal degradation of the transformer's organic and inorganic materials. This evaluation was based on the Arrhenius reaction rate equation, in the treatment of its insulating materials. This made it possible to estimate its useful life.

KEYWORDS: Transformers for power, temperature, insulating material.

INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos elétricos estáticos que, por indução eletromagnética, transformam níveis diferentes de tensão e de corrente alternada existentes nos enrolamentos isolados eletricamente, com a mesma frequência (Finocchio, 2010). Uma de suas principais aplicações é reduzir ou elevar o nível de tensão nos sistemas de energia.

Considerando que o transformador é um equipamento importante no sistema elétrico, e que o mesmo está entre os sistemas de energia e as cargas, este dispositivo pode ter seu comportamento elétrico, térmico e sua vida útil afetado.

Os efeitos podem ser justificados pelo fato que a operação com tensão e/ou correntes irá resultar em um aumento de perdas totais e, conseqüentemente, haverá uma elevação de temperatura do transformador acima de seu limite térmico, o que pode acarretar na redução de sua vida útil.

O transformador a seco aberto foi introduzido em 1930, com a classe de isolamento B, satisfazendo a exigência para transformadores em recinto fechado resistentes ao fogo (Pierce, 1994).

Desde a década de 90, os transformadores a óleo vêm sendo substituídos por transformadores a seco ventilados, nos mais diversos tipos de instalações (Sen, 2003).

Com o desenvolvimento atingido, milhares de transformadores foram entregues por indústrias de confecção de transformadores a seco, com alta confiabilidade, sem restrições ambientais.

O projeto e construção dos transformadores a seco devem atender às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as prescrições para transformadores e reatores, bem como, atender às normas internacionais da *International Electrotechnical Commission* (IEC 76), além dos níveis de tensões de ensaio como os transformadores em óleo, segundo ABNT.

Os transformadores em resina epóxi apresentam benefícios para a distribuição de energia elétrica, por serem econômicos, seguros confiáveis, menores, sem de manutenção, ambientalmente corretos, seguros, versáteis quanto às conexões e aumento de potência devido a ventilação forçada.

Quanto mais perto a fonte de energia do consumo, e quanto maior for a tensão, menor serão as perdas no transporte da energia e mais simples a rede elétrica. Sua instalação não precisa de portas corta-fogo, poços de recolhimento de fluídos e sistemas de combate a incêndios, podendo ser colocado praticamente em qualquer lugar.

O dimensionamento térmico favorável dos transformadores a seco, e a resistência ao envelhecimento dos materiais isolantes usados, a sua vida útil estimada é superior à dos transformadores tradicionais. O cálculo da ventilação natural ou forçada, necessária para o posto de transformação, é idêntico ao do transformador em líquido isolante.

Sem ultrapassar as elevações máximas de temperatura, os transformadores a seco podem ser submetidos a sobrecargas quando, antes da mesma, operavam em carga parcial e/ou a temperatura máxima ambiente inferior a 40°C. De qualquer maneira, a sobrecarga deve ser interrompida quando atingida a temperatura máxima permitida ao isolamento.

O ponto mais sensível do transformador quanto à temperatura é seu enrolamento. A temperatura do enrolamento não pode exceder o valor da classe de isolamento do seu material isolante.

MATERIAL E MÉTODOS

A essência de um sistema isolante depende, do tempo e da temperatura que o mesmo está exposto. A conexão entre tempo e temperatura e seus efeitos na isolação é estudado a décadas. Segundo Montsinger (1913), a vida útil do sistema isolante se reduz à metade para cada aumento de 10°C da temperatura da isolação.

A vida útil dos materiais isolantes é fornecida pela teoria "*Arrhenius-Darkin*", que afirma estar a vida útil da isolação ligada à temperatura de serviço, e ao tempo de exposição da mesma. O fenômeno de deterioração do isolante baseia-se num processo químico, onde uma oxidação lenta e gradual causa o endurecimento do verniz isolante. Tornando-se quebradiço, levando à perda da rigidez dielétrica e da flexibilidade mecânica.

Isto retrata o envelhecimento gradativo do isolante no tempo, que vai perdendo suas propriedades isolantes (Finocchio, 2010), até não mais suporta a tensão aplicada e ocorrer um curto-circuito entre as partes energizadas.

Segundo (Pacheco, 2002), a degradação térmica de materiais orgânicos e inorgânicos de um equipamento elétrico, pode ser avaliada pela taxa de reação de *Arrhenius*, dada pela equação (1):

$$\frac{dE_{vu}}{dt} = A \cdot e^{\frac{-E}{k \cdot T}} \quad (1)$$

$\frac{dE_{vu}}{dt}$: taxa de redução da vida útil em relação ao tempo;

E_{vu} : vida útil do isolamento do enrolamento;

t : tempo de vida em anos;

A : constante do material;

k : constante de Boltzmann igual a $0,8617 \cdot 10^{-4}$ [eV];

T : temperatura absoluta do ponto mais quente em graus Celsius;

E : energia de ativação da reação de envelhecimento [eV].

A equação (1) fornece valores absolutos da vida útil de certo sistema isolante. Reconhece-se que o cálculo da vida útil a partir da temperatura de operação da isolação é trabalhoso. O motivo disto está na necessidade de se aguardar um longo período de tempo, até que a isolação sofra a primeira degradação, para poder avaliar o tempo de vida da mesma.

Conhecendo tais aspectos, são empregados métodos que possibilitam expressar a vida útil da isolação do transformador, como uma porcentagem de um valor conhecido. Tal regra consiste na vida útil nominal do isolante, associada a temperatura nominal da sua classe de isolamento.

Para apreciar o que foi anteriormente visto, é preciso alterar a equação (1), de onde aparece a expressão matemática que gera a "curva de Arrhenius". Para tanto, integrando-se a equação (1) e aplicando logaritmo em ambos os lados, obtêm-se,

$$\ln E_{Vu} = \left(\frac{E}{k}\right) \frac{1}{T} + A, \quad (2)$$

A equação (2) mostra que o tempo de vida da isolação é função da energia de ativação específica do material, e da temperatura da isolação, tomada como constante ao longo de toda sua vida útil. As curvas de Arrhenius são traçadas a partir de $\ln(E_{Vu})$ versus $1/T$, cuja inclinação é E/k .

Tendo-se dois pontos, EVu_1 e EVu_2 , pertencentes à curva de Arrhenius, e suas temperaturas, T_1 e T_2 e utilizando a equação (2), obtêm-se,

$$\ln E_{Vu1} - \ln E_{Vu2} = \left(\frac{E}{k}\right) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right), \quad (3)$$

Com a equação (3) pode-se observar a redução da vida útil do material isolante numa certa condição operacional em função de valores conhecidos. Assim, o tempo de vida da isolação deve ser obtido em função de parâmetros conhecidos, que estão relacionados às condições nominais de funcionamento do equipamento. Considerando desta forma que o tempo de vida útil nominal da isolação seja igual a EVu_2 , a uma temperatura nominal T_2 , quando a temperatura de operação sofre um acréscimo ΔT , ou seja, quando T_1 é igual a $T_2 + \Delta T$ e substituindo o valor de T_1 na equação (3), tem-se:

$$E_{Vu} = E_{Vunom} \cdot e^{-\left(\frac{E}{k}\right) \left(\frac{\Delta T}{T_{nom}(T_{nom} + \Delta T)}\right)}, \quad (4)$$

E_{Vu} : tempo de vida útil do transformador para $T = T_{nom} + \Delta T$;

E_{Vunom} : tempo de vida útil nominal do transformador para $T = T_{nom}$;

ΔT : acréscimo de temperatura em relação a T_{nom} em graus °C;

T_{nom} : temperatura nominal do transformador em graus Kelvin.

Para uso da equação (4), é preciso conhecer a classe de isolamento do transformador, sua vida útil nominal, e a temperatura de isolação do enrolamento do transformador em análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação da perda de vida útil, é primordial conhecer os aspectos relacionados ao aumento da temperatura em pontos estratégicos dentro dos transformadores.

Portanto, a região mais crítica a ser analisada esta na isolação do enrolamento de baixa tensão, uma vez que este sofre de forma direta os efeitos do acréscimo de temperatura. Para determinar os acréscimos de temperatura que está submetido, fazendo medições em campo ou estimar através de modelos térmicos do transformador.

Ainda, devem-se fixar valores nominais para a vida útil do isolante, e sua temperatura de referência. É necessário salientar que a escolha é subjetiva. A bibliografia mostra que não há um consenso sobre o tempo de vida nominal dos transformadores, sejam a óleo ou a seco.

O trabalho de (Da Silva; Rossi, 2005) considerou que a vida útil da isolação, quando trabalhando na temperatura nominal, é da ordem de 65.000 horas (7,42 anos). Outras literaturas admitem, de forma conservativa, uma vida útil da ordem de 180.000 horas (20,54 anos). É importante entender, que este limite está associado às seguintes condições de serviço: a tensões de alimentação senoidais, equilibradas e simétricas; ao carregamento nominal e senoidal; e ao funcionamento contínuo.

Assim, para qualquer situação operacional que não às citadas, podem diminuir a vida útil do transformador. Como exemplo, faz-se, a seguir uma aplicação numérica envolvendo os conceitos já citados. Tomando um transformador a seco cujas características são dadas a seguir:

- Tempo de vida útil nominal da isolação: $E_{Vunom} = 20$ anos;
- Energia de ativação: $E = 1,1$ eV;
- Temperatura ambiente: 40°C

- Temperatura do ponto mais quente: $T_2 = 85^\circ\text{C}$;

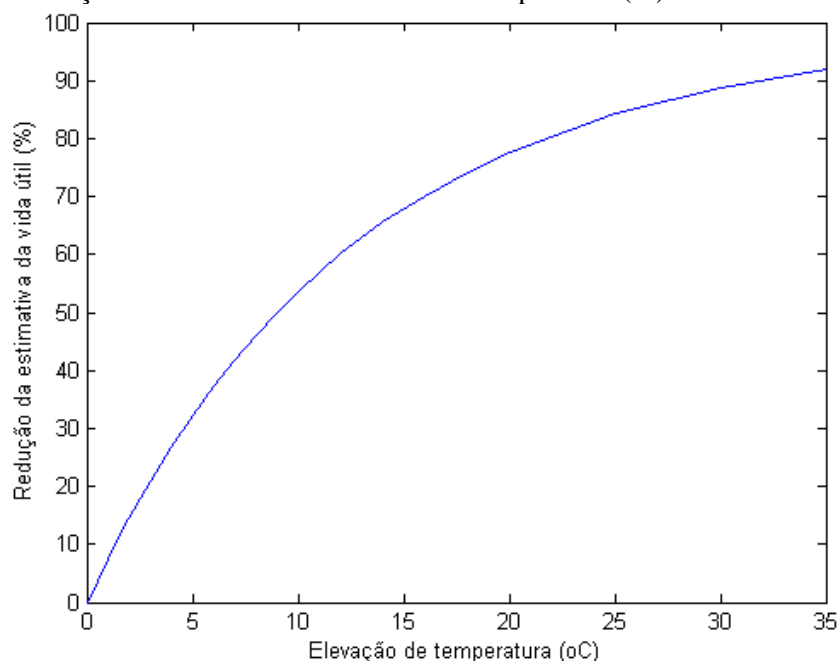
A Tabela 1 apresenta o comportamento da vida útil do transformador devido aos acréscimos de temperatura do equipamento. Esta tabela foi construída a partir da equação (4) e dos dados acima. A elevação de temperatura ΔT expressa o aumento adicional ao valor nominal.

Tabela 1. Redução de Vida Útil com Adicional de Temperatura.

Elevação de Temperatura $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	E_{Vu} (anos)	E_{Vu} (pu)	Redução da E_{Vu} (%)
0	20	1	0
1	18,50	0,93	7,54
3	15,83	0,79	20,86
5	13,56	0,68	32,17
7	11,65	0,58	41,77
9	10,01	0,50	49,95
35	1,59	0,08	92,04

A linha marcada mostra a redução da vida útil do transformador, para a condição de serviço em que a mesma é reduzida pela metade. O que representa o resultado de uma elevação de temperatura de aproximadamente 9°C acima da temperatura nominal, que está associada à classe de isolamento do transformador. A Figura 1 sintetiza a Tabela 1.

Figura 1. Diminuição de vida útil com adicional de temperatura (%).



A temperatura ambiente é um fator essencial na avaliação da vida do transformador, uma vez que as elevações de temperatura para qualquer condição de serviço devem ser somadas à temperatura ambiente, para determinar as temperaturas dos transformadores.

Sempre que houver acompanhamento da temperatura ambiente, deve-se obter a média no período de 24 horas para, então, avaliar a temperatura de serviço do transformador (Pacheco, 2002).

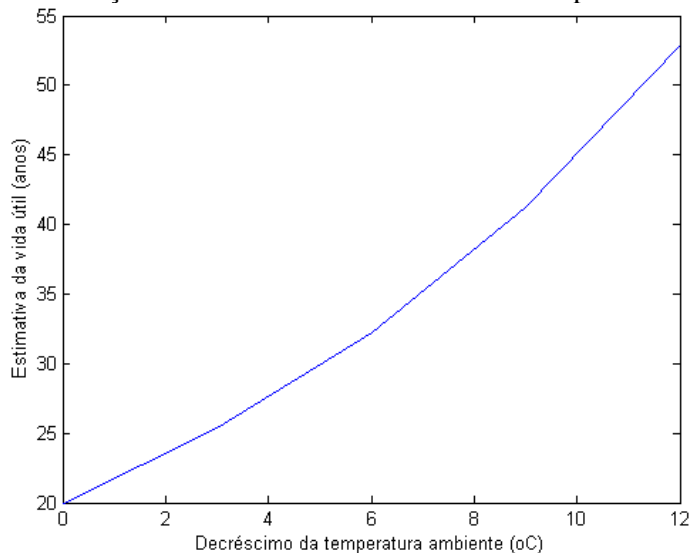
Assumindo novamente a equação (4) e as mesmas condições anteriores, a Tabela 2 e a Figura 2 correspondente, fornecem a elevação da vida útil em função da redução da temperatura ambiente.

Tabela 2. Elevação da vida útil em função da redução da temperatura.

Decréscimo na Temperatura Ambiente $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	E_{Vu} (anos)	E_{Vu} (pu)	Elevação da E_{Vu} (%)
---	-----------------------------------	---------------------------------	--

0	20,00	1,00	0,00
3	25,36	1,27	26,81
6	32,28	1,61	61,40
9	41,23	2,06	106,17
12	52,87	2,64	164,36

Figura 2. Elevação de vida útil com decréscimo de temperatura ambiente.



A observação da tabela permite concluir, como seria a variação associada à temperatura ambiente exercendo uma influência essencial na vida útil da isolação do transformador a seco.

Da Tabela 2 pode-se observar que para uma redução de 12°C na temperatura ambiente, a vida útil nominal de 20 anos do transformador aumenta para aproximadamente 53 anos Figura 2.

CONCLUSÃO

Este artigo formulou uma síntese do transformador encapsulado a seco. Com seus enrolamentos isolados em resina epóxi na sua fase construtiva. Realizando uma análise da vida útil do transformador e sua redução com um aumento adicional de temperatura da bobina e da temperatura ambiente. Através da teoria de *Arrhenius-Darkin*, foi possível simular acréscimos de temperatura e construir gráficos que apresentam a expectativa de vida da isolação, quando ultrapassa o valor de referência de sua classe de isolação.

REFERÊNCIAS

- Da Silva, D. G. T.; Rossi, E J. C.. Um Estudo sobre a perda de vida útil em transformadores de distribuição quando alimentam cargas não lineares. VI SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Belém, 2005.
- Finocchio, M. A. F.. Determinação da Temperatura de Enrolamentos de transformadores a Seco e de suas Perdas Totais Baseado em Redes Neurais Artificiais. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2010.
- Montsinger, V. M.. Loading Transformers by Temperature. AIEE Transaction, vol. 32, 1913.
- Pacheco, C. R.. Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Cabos Elétricos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Tese de Doutorado. Uberlândia: UFU, Abril/2002.
- Pierce, L. W.. Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, no 4, July/August 1994.
- Sen, P.K.. Application Guidelines for Dry-Type Distribution Power Transformers. IEEE, 2003.