Apoio
CLAMPER
MEGABARRE BRASIL

Capítulo VIII

Desempenho termodinâmico de transformadores

*Por Erminio Cesar Belvedere, Marcos Roberto Gouvea, Ernesto João Robba, José Simões Moreira, Plácido Brunheroto e Rafael Ferreira Costa**

O objetivo deste trabalho é determinar a máxima temperatura do óleo e da câmara para obter a perda de vida do transformador em diversas circunstâncias de operação, isto é, com ou sem ventilação forçada, dimensões diferentes da câmara e com curvas de carga diária propostas. Ao invés de obter diversas curvas de carga diária, optou–se por executar a simulação por um conjunto de resistências instalado no tanque do transformador que é fornecido por uma fonte externa de 220 V. A experiência foi feita em um transformador de 500 kVA, trifásico de 13.8 kv/220 V, com perdas no ferro de 1.200 W, perdas do cobre de 5300 W. As perdas no ferro foram simuladas por uma resistência de 1.200 W em 220 V e as perdas do cobre foram simuladas por seis resistências de 1.070 W. Usando esse conjunto de resistências, podem se obter diferentes condições de carregamento. A câmara transformadora foi construída de acordo com o padrão da AES Eletropaulo. Sua altura é de 2,70 m e a largura e o comprimento iniciais eram de 4,68 m e 2,30 m. A fim de variar as dimensões da largura e do comprimento, foram construídas paredes internas na câmara. A Tabela 1 mostra as dimensões da câmara para cada tamanho.

Tabela 1 – Dimensão das câmaras transformadoras

Tamanho	Comprimento (m)	Largura (m)
1	4,68	2,30
2	2,81	2,30
3	2,81	1,60

As curvas de carga diárias com demanda máxima de aproximadamente 76% e de 100%, com duração de 8 horas, a seguir A e B, e 12 horas, a seguir C e D, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Curva diária – Pico 8h duração

Tempo (horas)	Demanda(pu)	
	Curva A	Curva B
0 - 9	0 - 9	0 - 9
9 - 17	9 - 17	9 - 17
17 - 19	17 - 19	17 - 19
19 - 20	19 - 20	19 - 20
20 - 22	20 - 22	20 - 22
22 - 24	22 - 24	22 - 24

Tabela 3 – Curva diária – Pico 12h duração

Tempo (horas)	Demanda(pu)	
	Curva C	Curva D
0 - 8	0,41	0,41
8 - 20	0,76	1,00
20 - 24	0,41	0,41

O sistema de aquisição foi projetado com 16 canais de aquisição de dados, 14 para medição de temperatura e dois para medir velocidade e a pressão do ar no duto da saída. O sistema tem sensores que detectam circunstâncias de operação anômalas. Por exemplo, se a temperatura superior do óleo exceder 90 °C, o sistema será desligado. Também conta com um sistema de controle a distância para verificar o status das resistências, permitindo que o operador ligue ou desligue qualquer uma das resistências de onde estiver. Pode também fazer download dos dados armazenados na memória do dispositivo. Esta memória tem capacidade para armazenar durante cinco dias medições em intervalos de cinco minutos. A Figura 1 apresenta os resultados das medições da curva de carga diária D.

Ventilação forçada

O papel da ventilação forçada é muito importante em transferência de calor entre a câmara e o ambiente. A equação de transferência de calor do ar que corre por meio da câmara para o ambiente é:

$$Q_{vent} = V_{ar}\, C_{ar}\, (T_{camara} - T_{amb})$$

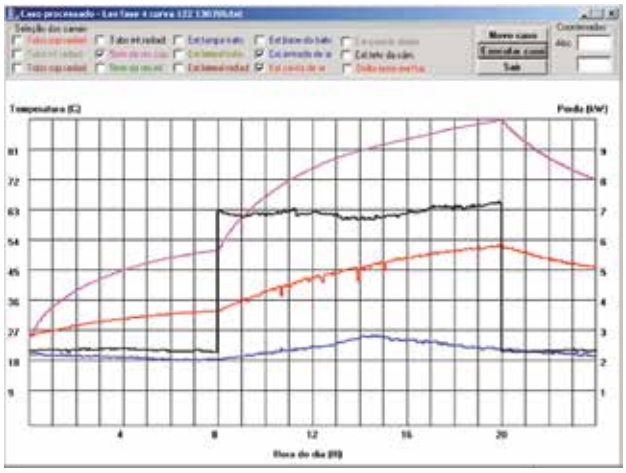
Em que:

V_{ar} - fluxo do ar, kg/s;

C_{Ar} - capacidade térmica do ar, CAr, 1015 J/kg×K);

TAMB - temperatura do ar externo da câmara, oC;

T_{camara} - temperatura da câmara, oC.



Convenção: Preta – Curva diária de carga; Lilás – Máxima temperatura do óleo; Azul – Temperatura de entrada do ar; Vermelho – Temperatura saída do ar.

Figura 1 – Resultados medidos.

Desconsiderando a transferência de calor pelas paredes e teto da câmara, o calor transferido pelo ar que circula no ambiente é igual ao calor produzido no transformador. Supondo uma temperatura ambiente de 25 °C, a temperatura

na câmara, para uma condição operativa do transformador, é:

$$T_{câmara} = \frac{Q_{vent}}{V_{ar}\,C_{ar}} + T_{amb}$$

A temperatura na câmara para o transformador em carga de 0,6 pu é apresentada na Figura 2. Observa-se que, sem ventilação forçada, em carga máxima, a temperatura da câmara chega aproximadamente a 40 °C, e com carga de 0,6 pu, chega a cerca de 20 °C.

Custo anual de operação

Os custos usados são:

- Transformador trifásico 500 kVA: US$ 16.000,00;
- Tamanho da câmara A, B e C, respectivamente, US$ 20.000,00, US$ 18.800,00 e US$ 15.000,00;

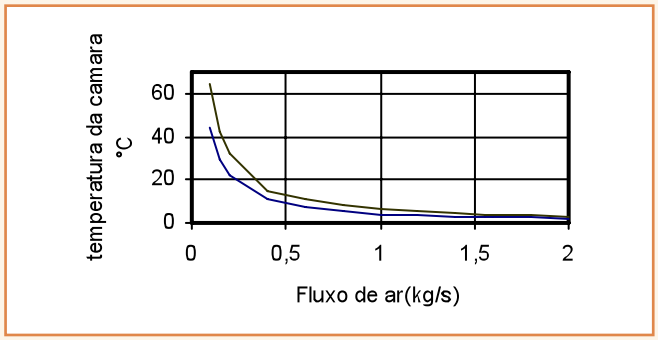


Figura 2 – Temperatura da câmara.

- Motor-ventilador e dutos para ventilação forçada: US$ 1.400,00;
- Custo demanda, CDem = 183,00 US$/kW/ano;
- Custo energia, Cε = 0,12 US$/kWh.

O custo anual de operação inclui:

- Custo amortização câmara, isto é:

$$C_{Amort,câmara} = \frac{j}{1-(1+j)^{-L_{câmara}}}\,C_{câmara}$$

Supondo a taxa de juros em 12% ao ano e a vida da câmara, L câmara, igual a 40 anos, tem-se:

$$C_{Amort,câmara} = \frac{0.12}{1-1.12^{-40}}\,C_{câmara} = 0.1213\,C_{câmara}$$

O custo anual de câmara dos tamanhos A, B e C é, respectivamente, US$ 2.426,00, US$ 2.280,00 e US$ 1.820,00:

- Custo da amortização levando em consideração a vida do transformador, LTrans do transformador, que depende da curva de carga diária;
- Custo das perdas do transformador que não inclui nenhuma perda da carga, as perdas do ferro, que são constantes durante o ano e as perdas do cobre que dependem da curva de carga diária. Supondo que o Pnl é a perda da carga ferro, o custo correspondente é dado perto:

$$C_{nl} = P_{nl}\,(C_{Dem} + 8760\,C_{\varepsilon})$$

O custo das perdas de carga é o mesmo para todas as curvas diárias, iguais a 1.481 US$/ano. O custo anual de perdas do cobre depende da curva carga de diária e pode ser dada por:

$$C_{PerdaCobre} = s_{max}^2\,P_{cobre,fl}\,C_{Dem} + 365\,P_{cobre,fl}\,C_{\varepsilon}\int_0^{24} s_i^2\,dt$$

$$C_{PerdaCobre} = A_{Dem}\,C_{Dem} + B_{Energia}\,C_{\varepsilon}$$

Em que:

$P_{coop,fl}$ – perdas do cobre;
s_{max} – demanda máxima;
s_i – demand at time "i".

Os custos de perda no cobre são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Custo de perdas

Curva de carga diária	Custo de perdas no cobre (US$/ano)	Custo das perdas (US$/ano)
A	2.410	3.891
B	3.693	5.174
C	3.058	4.539
D	3.822	5.303

A amortização do motor ventilador, se for usado na alternativa assumindo vida de 10 anos, é dada por:

$$C_{f.ar} = 1400\,\frac{0.12}{1-1.12^{-10}} = 247.80\,US\$/ano$$

- Custo da energia absorvida pelo motor do ventilador. Este custo depende do período em que o motor está funcionando. A potência absorvida pelo motor é 2,5 kW.

Resultado dos testes em campo

A Tabela 4 mostra as vidas estimadas do transformador, resultado dos testes em campo. A vida estimada assumindo plena carga, a elevação da temperatura do ponto quente é de 25 °C. A temperatura de óleo superior foi medida experimentalmente, assim, a perda de vida foi calculada pela fórmula:

$$LF\% = 100\sum_{i=0,\tau} 10^{-\left(-14.133+\frac{6972.15}{T_{hs}(i)}\right)}$$

Tabela 4 – Estimativa de vida do transformador (ano)

Curva diária	Fluxo de ar	Tamanho 1	Tamanho 2	Tamanho 3
A	Natural	121,6	101,73	92,7
B	Natural	7,3	5,61	5,0
	Ventilação forçada 24h	54,5	53,60	53,3
	Ventilação forçada horário de pico	32,6	25,01	15,5
C	Natural	83,4	67,69	61,7
D	Natural	4,1	3,15	2,8
	Ventilação forçada 24h	31,2	30,77	30,6
	Ventilação forçada horário de pico	25,8	18,17	12,4

Evidentemente, por meio dos resultados, ao carregar o transformador até 70%, o uso da ventilação forçada não é necessário. E, também, a câmara do tamanho 3, a menor, pode ser construída sem qualquer problema. Porém, quando o carregamento é aproximadamente 100%, é recomendada a ventilação forçada para aumentar a vida útil. Os resultados, ao comparar o uso de ventilação forçada durante todo o dia e somente durante o horário de pico, são mostrados nas Tabelas 5 e 6. A vida útil máxima do transformador foi estimada para ser em torno de 45 anos. As perdas do transformador foram desprezadas porque são as mesmas para os três tamanhos. A demanda do motor-ventilador ajustado para ventilação forçada é 2,5 kW.

Dos resultados nas Tabelas 5 e 6, é evidente que a condição ótima de operação é aquela em que a ventilação forçada é ligada somente durante a demanda de pico do transformador. Comparando também as diferenças de custo entre tamanhos, é evidente que a câmara menor é a mais barata.

Tabela 5 – Custo operacional transformador (US$/ano) – curva A

Tipo de circulação de ar	Custo anual	Tamanho 1	Tamanho 2	Tamanho 3
Natural	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	3.400	4.081	4.452
	Total	**5.826**	**6.361**	**6.272**
Ventilação forçada 24h	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	1.932	1.932	1.932
	Ventilatação	248	248	248
	Sem ventilação	3.086	3.086	3.086
	Total	**7.692**	**7.546**	**7.086**
Ventilação Forçada horário de pico	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	1.987	2.040	2.321
	Ventilação	248	248	248
	Sem ventilação	1.029	1.029	1.029
	Total	**5.690**	**5.597**	**5.418**

Tabela 6 – Custo operacional transformador (US$/ano) – curva B

Tipo de circulação de ar	Custo anual	Tamanho 1	Tamanho 2	Tamanho 3
Natural	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	5.176	6.395	7.061
	Total	**7.602**	**8.675**	**8.881**
Ventilação forçada 24h	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	1.978	1.981	1.982
	Ventilatação	248	248	248
	Sem ventilação	3.086	3.086	3.086
	Total	**7.738**	**7.595**	**7.136**
Ventilação Forçada horário de pico	Câmara	2.426	2.280	1.820
	Transformador	2.029	2.201	2.548
	Ventilação	248	248	248
	Sem ventilação	1.543	1.543	1.543
	Total	**6.246**	**6.272**	**6.159**

Usar o sistema computacional desenvolvido nele é possível estabelecer a variação da vida útil em função do carregamento do transformador, como mostrado nas Figuras 2 e 3 para as curvas de carga diárias A e C, respectivamente.

Operação em condição de emergência

Para se obter um ótimo carregamento de transformador instalado em uma câmara subterrânea, é importante operar na demanda máxima durante todo o ano, operar em sobrecarga apenas em um curto período de tempo, por exemplo, um a dez dias, devido às falhas. Levando em consideração a condição de contingência, a vida útil pode ser calculada como:

$$Vida = \frac{100}{(365 - n_{falta}) \times DLL_{Normal} + n_{falta} \times DLL_{falta}}$$

Em que:

DLL_{Normal} - perda de vida diária para a operação normal;

DLL_{Falta} - perda de vida diária para a operação com a condição emergência;

N_{Falta} - número dos dias operando em condição de emergência.

Foi assumido que, para ambos A e C, o transformador operando com uma curva de carga diária de 76% de pico de demanda e, em condição de falha, carga de 103%. As Figuras 3 e 4 mostram os resultados para as curvas A e C, respectivamente.

Conclusão

Do estudo realizado, é possível concluir que:

- É conveniente usar ventilação forçada em pico de longa duração e em carga de demanda elevada, para qualquer

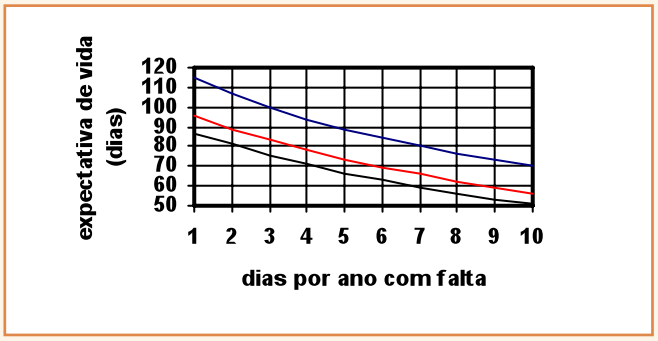


Figura 3 – Transformador com falta – curva A.

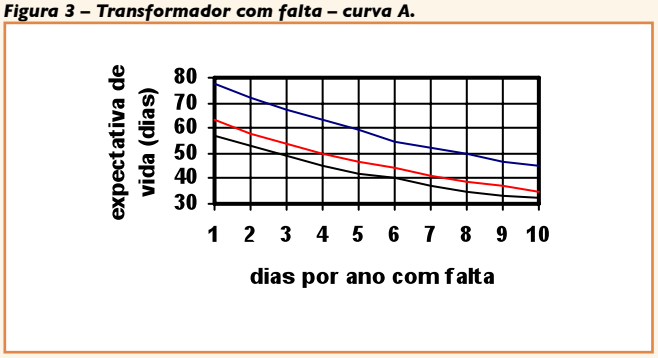


Figura 4 – Transformador com falta – curva C.

tamanho de câmara. Esta é caso para a curva de carga diária D mostrada no paper.

- As economias significativas de energia em fonte de ventilação forçada são anotadas somente durante o horário de pico, como mostrado na Tabela 5 (custos operacionais mais baixos). A ventilação forçada será ligada quando a temperatura da câmara alcançar 50 °C e desligar quando abaixo de 45 °C.
- A ventilação natural é suficiente para assegurar uma vida útil adequada aos transformadores, quando a demanda está em níveis moderados, porque usamos as curvas diárias A e C quando a carga cai abaixo de 45 °C.
- A vida útil estimada é maior de 30 anos para os transformadores que operam sem ventilação forçada, contanto que o pico de carga diária seja menor que 80% em circunstâncias normais e, menor que 105% durante as condições de emergência (menos de 15 dias por ano).

Referências

• *JARDINI, J. A.; SCHMIDT, H. P.; TAHAN, C. M. V. T.; OLIVEIRA, C. C. B.; AHN, S. U. Distribution transformer loss of life evaluation: a novel approach based on daily load profiles. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, jan. 2000, p. 361-366.*

• *COURCHESNE, P. Underground distribution vaults with environmental control. 30C-Dist-5, p. 259-265.*

• *CHAABAN, M.; FOATA, M. Performance thermique des voûtes de transformation enfouies de type CTE. Report No. IREQ-95-134, jun. 1995.*

• *CHAABAN, M.; FOATA, M.; LEDUC, J. Modélisation aérothermique des voûtes souterraines de distribution. Report No. IREQ-96-186, set. 1996.*

• *AHN, S. U. Política de carregamento dos transformadores de distribuição. Dissertação (Mestrado). EPUSP, 1993.*

• *ANSI. Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers, C57.91, 1981.*

• *ABNT. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimentos, NBR-5416, 1981.*

• *IEC. Loading guide for oil-immersed power transformers, IEC-354, 1991.*

• *GOUVÊA, M. R.; ROBBA, E. J.; MOREIRA, J. R. S.; BELVEDERE, E. C. Thermal simulation for distribution transformers in U transformers in underground vaults.*

*ERMÍNIO CESAR BELVEDERE é engenheiro eletricista e atua na Gerência de Engenharia de Distribuição da AES Eletropaulo.

MARCOS ROBERTO GOUVÊA é engenheiro eletricista, mestre e doutor em engenharia elétrica. Atualmente, é professor doutor da Universidade de São Paulo (USP).

ERNESTO JOÃO ROBBA é engenheiro eletricista com pós-doutorado pela Universidade de São Paulo. Atualmente, é responsável técnico pela E J Robba Consultoria e Cia Ltda.

JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA é engenheiro mecânico, mestre e doutor em engenharia mecânica. Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da USP e professor do programa de pós-graduação interinstitucional do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP (IEE/USP).

RAFAEL FERREIRA COSTA é engenheiro e pesquisador do Centro de Estudos em Regulamentação e Qualidade de Energia da Universidade de São Paulo (Enerq/USP).

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br