



VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: COMO DOBRAR PARA 60 ANOS

José Mak*

Armando Bassetto Filho

Saburo Aita

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL

RESUMO

A eficiência limitada do sistema de preservação de transformadores através de sílica-gel ou de membranas possibilita o contato do óleo isolante com água e oxigênio atmosféricos. Estes aceleram o processo de envelhecimento do sistema isolante óleo-papel e conseqüentemente do transformador.

Este trabalho apresenta resultados de estudos que demonstram a acentuada influência destes contaminantes e propõe medidas para atacar a causa do desgaste e não seu efeito. A utilização de máquina termovácuo automatizada de alto rendimento, baixos custos operacionais e baixo consumo de energia elétrica é uma das medidas propostas. A segunda é um sistema de preservação de óleo isolante a baixa pressão de nitrogênio, adaptável aos transformadores energizados. São estas duas medidas que permitirão dobrar a vida útil de transformadores para 60 anos.

O custo desta proposta na maioria dos transformadores de potência da CPFL é de US\$ 500.000, sendo que a empresa pretende economizar cerca de US\$ 40.000.000 nas próximas duas décadas.

Palavras Chaves:

Transformador de Potência - Vida Útil - Papel Kraft.

1 - INTRODUÇÃO

Os critérios para especificação dos transformadores utilizados no Brasil contemplam custos das perdas, do investimento em núcleo e enrolamentos e no resfriamento, mas não em extensão de vida do equipamento por meio de investimento em preservação do óleo isolante. A maioria dos transformadores de potência instalados no sistema da CPFL possui conservadores constituídos por tanques de expansão à pressão atmosférica equipados com respiros de sílica-gel, com ou sem membranas em seu interior.

Isto possibilita que o óleo isolante dessas unidades fique contaminado com o oxigênio atmosférico, mesmo no caso de transformadores com membranas. O compromisso destas de ser resistentes ao óleo resulta em baixa eficiência em conter água e oxigênio. Além disso, como tais transformadores estão instalados em regiões quentes e úmidas, a

eficiência da sílica-gel fica comprometida. Logo, parte da umidade atmosférica também penetra no transformador, contaminando tanto o óleo quanto o isolamento sólido, composto por papel isolante.

Independentemente da carga do transformador, a água e o oxigênio aceleram seu processo de envelhecimento. Na Figura 1 pode-se ver que, à medida que o teor de água aumenta, a vida do papel reduz-se. Segundo Clark [1], papéis envelhecidos a mesma temperatura têm sua vida reduzida pela metade, se o teor de água dobra.

Quanto ao oxigênio, pode-se ver na Figura 2 que um papel em contato com elevado teor de oxigênio (cerca de 30.000 ppm) tem a vida reduzida dez vezes em relação a outro papel que, embora tendo envelhecido à mesma temperatura, esteja em contato com um teor baixo de oxigênio (inferior a 3000 ppm) [2,3]

O oxigênio não é nocivo apenas ao papel isolante, como também ao óleo. À medida que este envelhece, são formados ácidos que atacam o próprio papel. Num estágio mais avançado de degradação do óleo, forma-se borra que se acumula nas partes mais frias como aletas dos radiadores. Isto provoca sobreaquecimento do transformador. Dessa forma, deve-se manter o nível de oxigênio o mais baixo possível para impedir a formação de ácidos e de borra.

A acidez do óleo acelera muito o envelhecimento do papel, mesmo o teor de água do óleo estando baixo. Siqueira e outros [4] realizaram estudo de laboratório em que amostras de papel isolante foram secas e envelhecidas a 155°C em tubos selados sob atmosfera de nitrogênio. Parte das amostras foi imersa em óleo novo, com teor de água de 17 ppm. A outra parte foi colocada em contato com óleo oxidado, com teor de água de 13 ppm e índice de neutralização de 0,35 mg KOH/g. O papel envelhecido no óleo novo levou um tempo seis vezes maior que o papel no óleo ácido para atingir grau de polimerização de 200 (Figura 3).

A curva de expectativa de vida da norma NBR-5416/81 [5] leva em consideração apenas os aspectos de envelhecimento térmico. O fim de vida foi estabelecido arbitrariamente em 50% do valor inicial da tensão de tração do papel. Eliminados os efeitos aceleradores provocados pelo excesso de oxigênio e água no transformador, pode-se considerar apenas o efeito térmico como principal fator de envelhecimento. Assim, usando-se a curva como referência, observa-se que um papel envelhecendo constantemente a 78 °C levaria 60 anos para atingir 50% do valor inicial de sua tensão de tração, isto é, seu fim de vida arbitrário. Entretanto, atualmente não se considera mais 50% da tração inicial como fim de vida arbitrário. Mas já há quem defenda 20% [6], o que corresponde aproximadamente a um GP de 200. Além do mais, protótipos de transformadores envelhecidos aceleradamente em laboratório a 200°C chegaram a ter uma vida até 15,3 vezes superior àquela estabelecida pela norma ANSI. Já transformadores selados com colchão de nitrogênio e mantidos com baixos teores de água e oxigênio, atingiram valores de GP de 314 e 124 após 55 e 61 anos em operação respectivamente [6].

A simples eliminação da maior parte do oxigênio e da água do óleo tem efeito extremamente positivo na vida útil do transformador. Assim, colocando em prática medidas com esse objetivo, os autores estabeleceram na CPFL o projeto 60 anos. Este visa dobrar a vida útil estimada para os transformadores de potência, que passará de 30 para 60 anos. Ao mesmo tempo também se reduzirão os custos com tratamento de óleo isolante.

A primeira medida implantada foi o desenvolvimento de uma máquina termovácuo totalmente automatizada para recondição de óleo isolante. Já a segunda medida visa impedir a contaminação do óleo com umidade e oxigênio atmosféricos por meio de selagem do transformador com colchão de gás nitrogênio a baixa pressão.

Os custos estimados para implantação total dessas propostas no sistema de potência da CPFL são da ordem de US\$ 500.000, a serem utilizados na aquisição de mais máquinas e de materiais e mão-de-obra para os sistemas de selagem por nitrogênio tanto dos transformadores existentes quanto daqueles a serem adquiridos. Em função do número de transformadores instalados, do ganho de vida útil estimado e da otimização da manutenção, pretende-se economizar cerca de US\$ 40.000.000, nas próximas duas décadas, afora a economia de escala obtida além do escopo deste projeto.

2 – MAQUINA AUTOMATIZADA TERMOVÁCUO

As máquinas termovácuo são utilizadas para retirar a umidade do transformador por meio da secagem do óleo através de aquecimento e da aplicação de vácuo. A CPFL possui duas dessas máquinas com capacidade de secagem de 3000 e 5000 litros de óleo por hora. Como os transformadores da CPFL têm muita água, a eficiência do processo é muito baixa. A maior parte da umidade não é retirada, pois fica retida no papel isolante do transformador. Em pouco tempo, então, é necessário uma nova secagem do óleo.

Ainda com o objetivo de eliminar as causas da contaminação de transformadores e ao mesmo tempo reduzir os custos de secagem e desgaseificação de óleo, a Edwards do Brasil em parceria com a CPFL desenvolveu o projeto de uma máquina termovácuo totalmente automatizada, com vazão de 500 litros por hora, sem resistência de aquecimento de óleo (Figura 4). Visto que a máquina é acoplada ao transformador sem qualquer acompanhamento direto, seu sistema de controle permite que se religue automaticamente no caso de retorno do fornecimento de energia após interrupções. Se houver rompimento da mangueira de entrada de óleo da máquina, esta desliga-se, podendo enviar um sinal elétrico a um posto de controle da subestação à distância. Ao mesmo tempo, bloqueia as válvulas de saída de óleo do transformador. O sinal também é dado, caso for necessário substituir os filtros da máquina.

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios práticos feitos com a máquina. O transformador estudado é trifásico, 138-11.9 kV, 25MVA, fabricado em 1975. Como pode ser visto na tabela, os teores de água do óleo estavam na faixa de 40 ppm e a rigidez dielétrica era menor que 30 kV. A máquina permaneceu acoplada ao transformador durante três semanas. Depois, a rigidez dielétrica aumentou e o teor de água do óleo ficou abaixo de 20 ppm.

3 - SISTEMA DE SELAGEM COM GÁS NITROGÊNIO

Além dos filtros de sílicagel, os transformadores de potência mais modernos são equipados com membranas de neoprene para melhor proteção do óleo contra penetração de umidade. Entretanto, tais membranas permitem a passagem de oxigênio e de água. Lampe e Spicar [3] afirmam que a penetração de oxigênio em um transformador com membrana contendo 50.000 litros de óleo é de 10.000 ppm por ano. Num levantamento de dados feito com transformadores da CPFL, observou-se que 15% dos 99 transformadores com membranas tinham teor de água acima de 30 ppm. Coincidentemente, 15% dos 33 transformadores selados com colchão de nitrogênio convencional também estavam com teor de água acima de 30 ppm. Entretanto, os transformadores selados com nitrogênio têm mais de 30 anos de operação, ao passo que cerca de 90% dos com membrana têm menos de 15 anos.

Para prevenir a contaminação do óleo isolante por umidade e oxigênio, tanto em transformadores com membrana quanto naqueles apenas com filtro de sílica-gel, a CPFL desenvolveu um novo sistema de preservação. Este consiste em preencher o espaço acima do nível do óleo no tanque de expansão com nitrogênio seco à pressão máxima de 2 g/cm². A expansão do gás é possibilitada por uma bolsa de plástico flexível acoplada ao tanque de

expansão, a qual se instala num tanque de aço ao lado do transformador (Figura 5). O custo do sistema é bastante baixo. Por exemplo, para um transformador com 10.000 litros de óleo, são gastos em torno de US\$ 3.000 na compra da bolsa, construção do tanque de aço e instalação do sistema no campo.

A bolsa é instalada na tubulação anteriormente ligada ao filtro de sílica-gel. Aplica-se vácuo leve no espaço acima do nível de óleo do tanque de expansão e preenhe-se-o com nitrogênio seco a uma pressão máxima de 2 g/cm² a 25°C. Finalmente, faz-se o acondicionamento do óleo para retirada de umidade e de gases, principalmente do oxigênio. É necessário completar o volume de nitrogênio apenas duas vezes por ano. O teor de nitrogênio, entretanto, permanece nos mesmos níveis registrados antes da instalação da bolsa, como mostra a Tabela 2.

O teor de oxigênio dissolvido no óleo caiu drasticamente após a instalação da bolsa (Tabela 2) . Embora tenha havido uma redução inicial devido à desgaseificação do óleo antes da instalação da bolsa, a queda foi contínua atingindo valor bem baixo.

O desempenho do sistema de bolsa de nitrogênio é melhor do que aquele esperado para o sistema de preservação de óleo por meio de membranas. Isso se deve a certa facilidade de penetração de oxigênio no caso das unidades com membrana, porque somente esta isola o óleo do ar atmosférico. Já o sistema com bolsa separa o óleo do ar atmosférico por meio de um colchão de gás nitrogênio, além da própria bolsa. Como a pressão do nitrogênio é ligeiramente superior à do ar, é muito mais provável que o nitrogênio vaze, em vez de o ar permear através da bolsa.

Outro fator limitante é a vida útil das membranas, a qual está estimada em apenas dez anos. Como a vida útil do transformador é no mínimo trinta anos, a membrana passa a ser um fator limitante, pois é necessário desligar o transformador para substituí-la. Em recente levantamento de campo, encontraram-se membranas rachadas em transformadores com cerca de dez anos em serviço. No caso da bolsa com nitrogênio, sua durabilidade também está estimada em dez anos, porém não é necessário desligamento do transformador para substituí-la já que seu tanque está apoiado no solo.

O teor de água das unidades equipadas com o sistema de bolsa também tem-se mantido em níveis inferiores aos registrados antes da instalação da bolsa. A redução inicial tem-se mantido, mesmo alguns anos após a realização do processo de secagem do óleo (Tabela 2) Os valores atuais estão abaixo de 20 ppm.

O teor de nitrogênio mantém-se no nível anterior à instalação da bolsa (Tabela 2) . Ele foi reduzido drasticamente após a desgaseificação do óleo, realizada na instalação da bolsa. O retorno do teor de nitrogênio aos níveis anteriores dá-se alguns meses mais tarde. Graças à baixa pressão de nitrogênio mantida na bolsa, não ocorre sobressaturação deste no óleo.

4 - CONCLUSÕES

A eliminação da maior parte do oxigênio e da água do óleo isolante tem um efeito extremamente positivo na vida útil do transformador. Assim, os autores colocaram em prática medidas com esse objetivo e estabeleceram na CPFL o projeto 60 anos. Este visa dobrar a vida útil estimada para os transformadores de potência. Ou seja, ela passaria de 30 para 60 anos.

Desenvolveu-se o projeto de uma máquina termovácuo totalmente automatizada, com vazão de 500 litros por hora, para retirada de umidade e gases de óleos isolantes. Esta é acoplada ao transformador sem qualquer acompanhamento direto, graças ao sistema de controle utilizado.

Para eliminar a contaminação do óleo isolante com umidade e oxigênio atmosféricos, foi desenvolvido um sistema de preservação. Este consiste em retirar o filtro de sílica gel do conservador e conectar em sua tubulação uma bolsa de plástico flexível contendo nitrogênio, a qual é colocada ao lado do transformador num tanque de aço.

O teor de oxigênio também caiu de 25.000 ppm para menos de 5.000 ppm após a instalação da bolsa. O teor de nitrogênio dos óleos tem-se mantido no nível anterior à instalação do sistema de bolsa de nitrogênio.

O desempenho do sistema de bolsa com nitrogênio é melhor do que aquele esperado para a sistema de preservação de óleo por meio de membranas. Isso se deve principalmente ao fato que a penetração de oxigênio é facilitada no caso das unidades com membrana, porque somente esta isola o óleo do ar atmosférico.

Os custos estimados para implantação total do projeto 60 anos no sistema de potência da CPFL são da ordem de US\$ 500.000, a serem utilizados na aquisição de máquinas termovácuo e de materiais e mão-de-obra para a selagem por nitrogênio. Com isso, pretende-se economizar cerca de US\$ 40.000.000 nas próximas duas décadas, afora a economia de escala obtida além do escopo deste projeto.

Este projeto também possibilitou os seguintes ganhos adicionais: troca de bolsa com nitrogênio com equipamento energizado, recondicionamento físico do óleo em condições de envelhecimento incipiente e conseqüente postergação de tratamento físico-químico, menor custo de homens-hora, menor custo operacional, menor custo de máquinas etc.

BIBLIOGRAFIA

1. CLARK, F.M., "Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation," **AIEE Transactions**, vol. 61, out. 1942, pp. 742-749.
2. LAMPE, W. et al. "Continuous Purification and Supervision of Transformer Insulation systems in service," **IEEE PES Winter Meeting**, New York, A 78 111-7, 1978.
3. LAMPE, W. and SPICAR, E. "Influence of Different Stress Factors on the Dielectric and Mechanical Strength of Oil-Cellulose Insulation," CIGRE Paper 15-05, 1978.
4. SIQUEIRA, M.C. et al. "Avaliação dos Ensaia Efetuados em Laboratório para Verificação do Desempenho do Óleo Mineral Isolante Regenerado e sua Influência no Envelhecimento do Papel Isolante," **8º E.T. CFQ**, Porto Alegre, GCOI, set. 1991.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aplicação de Carga em Transformadores de Potência. NBR 5416. Brasil.
6. McNUTT, W.J. "Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides," *Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, jan. 1992, pp. 392-398.

TABELA 1 - Teor de Água e Rigidez Dielétrica

MÊS /ANO	R.D. (kV)	T.A. (ppm)
OUT/ 89	27	45
ABR/90	29	46
JAN/91	27	39
MA 1/91	23	40
FEV/ 92	25	43

SECAGEM DO TRANSFORMADOR

MAR/92	81	9
ABR / 92	83	6
MAI /92	78	16
JUL / 93	73	17
JUN/ 94	75	16

* Método IEC 156

TABELA 2 – Teores de Água, Nitrogênio e Oxigênio nos Transformadores Selados

CASO	DATA	ÁGUA	TEOR (ppm)	
			N ₂	O ₂
1	3/89*	26,5	62300	18700
	6/89	14,5	3405	8746
	6/91	17,4	77956	8480
	7/92	----	81420	4696
	3/93	18,0	53615	1867
	5/94	17,0	89999	903
2	11/89*	13,6	77000	23000
	9/89	13,6	67055	4500
	12/90	----	62476	4187
	8/92	12,0	77000	4658
	9/93	19,0	89999	1232
	9/94	14,0	89999	1341
3	11/89*	14,0	77000	23000
	6/90	----	67055	4500
	8/92	12,0	77000	4658
	2/93	16,0	91106	2543
	9/94	10,0	89999	1330
4	2/89*	25,6	60776	13379
	6/92	13,4	18664	2957
	10/92	13,1	34856	1618
	7/93	14,0	89999	1287
	7/94	13,0	89999	715
5	2/91*	14,5	72000	13080
	9/92	7,5	66916	1143
	10/92	10,0	52008	1009
	5/93	10,0	89999	2579

* última leitura antes da instalação do sistema de selagem

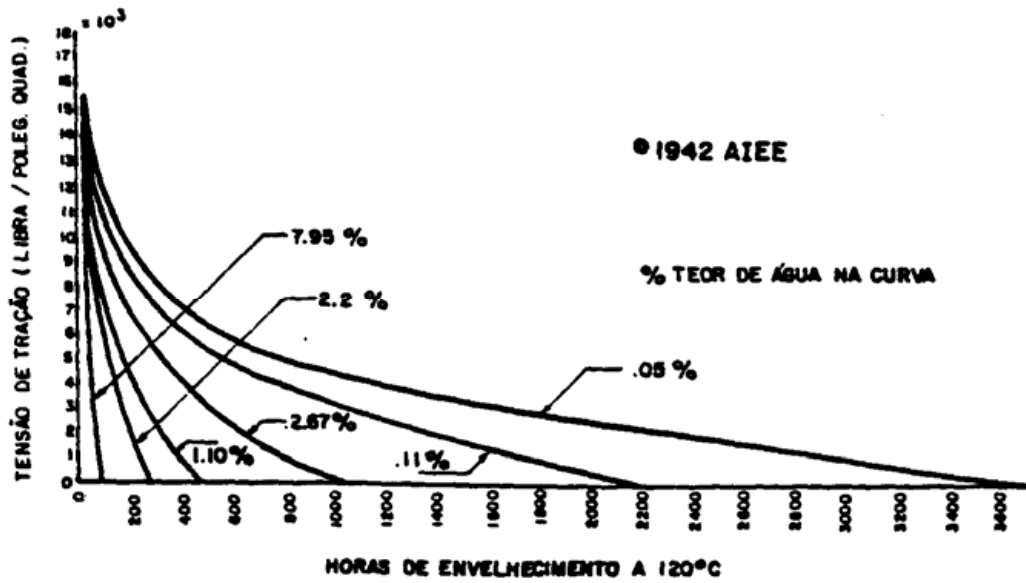


FIGURA 1 – Efeito da Umidade do Papel Isolante¹

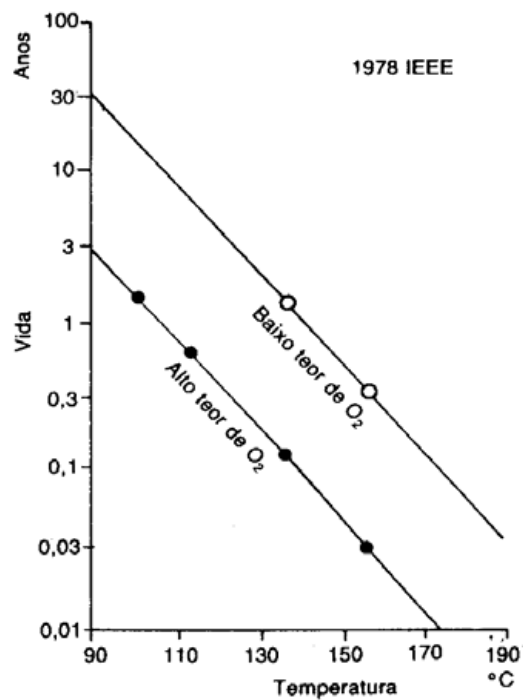
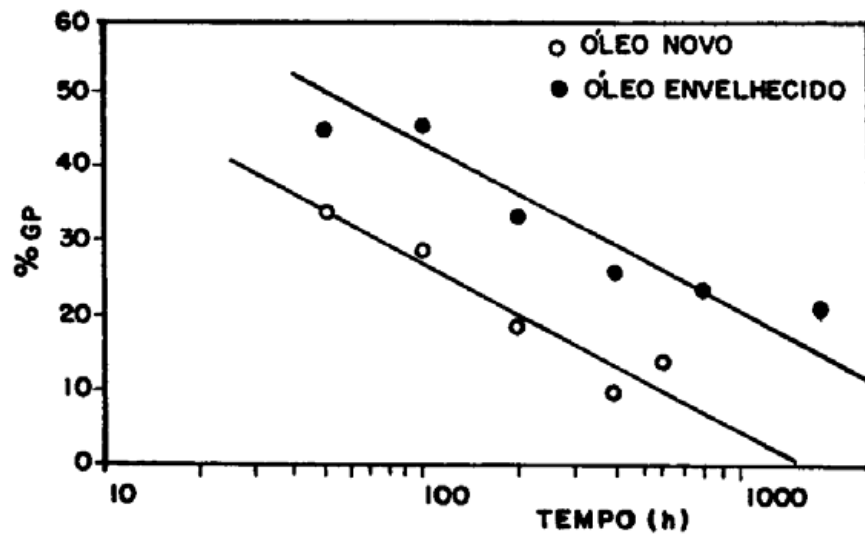


FIGURA 2 – Influência do Oxigênio na Vida do Papel Isolante²

FIGURA 3 – GP versus Tempo⁴