

Capítulo IV

Carregamento e potência nominal dos transformadores

Por Manuel Luis Barreira Martinez*

A previsão do carregamento dos transformadores é necessária, pois permite, entre outros, verificar a necessidade de substituição das unidades ou ainda sua especificação para atender a um determinado período de vida útil, técnica econômica ou ambos.

Dentro desse contexto, a partir das curvas de permanência de carga e de tempos máximos – nos quais o nível de carregamento é superior ao nominal –, da relação admissível entre a demanda máxima e a potência nominal do transformador, bem como das taxas de crescimento da demanda em um determinado período de tempo e o fator de potência da carga, é possível definir valores para a potência nominal dos transformadores. Assim sendo, este texto faz uso das “curvas de permanência de carga” para determinar se um transformador precisa ser substituído, devido, por exemplo, a uma condição de sobrecarga, ou ainda, a um carregamento superior ao nominal.

Outros procedimentos podem ser utilizados com este objetivo, como o método proposto no “IEEE Guide for loading mineral oil immersed transformers”, objeto de discussão em apêndice a este texto.

Nota: A definição da relação entre a demanda máxima de um transformador e sua potência nominal leva em conta dois aspectos: a perda da vida útil no período de tempo e os custos das perdas ao se

suprir esta demanda. Note que aplicar um carregamento superior ao nominal da ordem de 1.3 p.u. implica em admitir uma perda nos enrolamentos (perdas série) da ordem de 1.69 p.u.

Desse modo, considerando uma relação entre a demanda máxima e a potência nominal do transformador – FS da ordem de 1.4 seja, conforme a Equação 1, é possível escolher a SNTR – potência nominal do transformador para atender a carga modelada pela Figura 25. A Equação 12 considera unidades coerentes para demanda e potência nominal do transformador em [kVA]. Caso a demanda

máxima seja fornecida em [kW] é necessário considerar o fator de potência no momento da demanda máxima.

$$F_S = \frac{D_{Máxima}}{S_{N_{TR}}} \quad (1)$$

$$S_{N_{TR}} = \frac{20,82}{1,4} \approx 15kVA$$

Na Figura 1, também é mostrada a relação entre a potência nominal e o período de tempo operando de forma contínua acima deste valor, o que, em geral, não ocorre em operação, logo, o procedimento apresenta uma folga intrínseca inerente à continuidade monotômica das

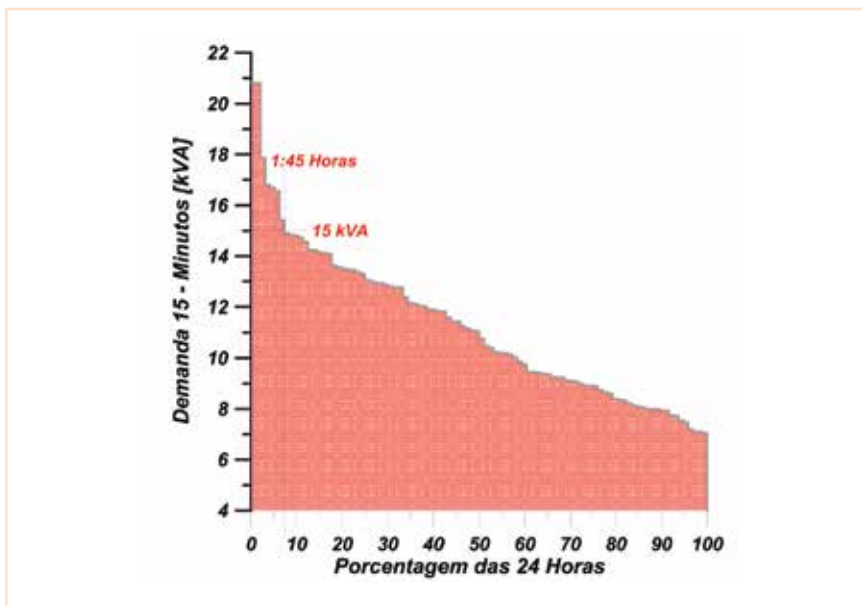


Figura 1 – Curva de permanência de carga – base de demanda em kVA a cada 15 minutos versus potência nominal do transformador.

características de permanência.

Um ponto importante nesses casos é conceituar, de forma adequada, o significado da relação entre a demanda máxima e a potência nominal do transformador, às vezes denominado de Fator de Sobrecarregamento (FS). O primeiro ponto é que a operação acima da potência nominal não pode ocorrer por "tempo indefinido". Em geral, não existem folgas térmicas por períodos indefinidos em transformadores, sejam eles de distribuição, subtransmissão ou transmissão.

Esse conceito contraria a lógica de manufatura e de custos. Segundo é que, partindo de um patamar de carregamento e submetido a valores de demanda superiores à nominal, ocorre no interior dos transformadores um processo de aquecimento que, se não for limitado no tempo, implica na superação das temperaturas de projeto e na consequente redução da vida útil do equipamento.

Assim sendo, considera-se como

uma orientação a ser verificada com os respectivos fabricantes que o valor do FS de um transformador é a relação entre a demanda máxima e a potência nominal do transformador, no período máximo de duas horas na qual é assumido, de forma complementar tal que o patamar inicial de carga fica entre 50% e 70% da potência nominal.

Deste modo, no exemplo anterior, o valor de 1,4 considera que, durante no máximo duas horas, partindo de um patamar de carregamento entre 50% e 70% da potência nominal do transformador, "não ocorre perda de vida útil apreciável do equipamento".

Com auxílio das equações divulgadas nos capítulos anteriores deste fascículo e dos conceitos também já discutidos, obtém-se o gráfico da Figura 1, em que a curva de permanência mantém praticamente todas as informações da curva original de carga, uma Demanda para o patamar de tempo remanescente (DB) de aproximadamente

10,3 kVA, ou seja, 0,69 p.u., patamar próximo ao assumido como representativo neste exemplo.

O Fator de carga (F_C) atual deste transformador, considerando os dados em kVA, é:

$$F_C = \frac{11,05}{20,80} = 0,531$$

O transformador de 15 kVA, conforme os dados levantados, atende à carga existente no presente. Logo, este procedimento pode ser aplicado, por exemplo, para verificar se é necessária uma operação de intervenção visando sua substituição.

No entanto, a especificação de uma unidade nova necessita considerar as condições futuras, com base em uma previsão de crescimento de carga. Deste modo, considerando uma taxa de crescimento de carga anual k e um período de tempo de análise n anos, obtém-se a Equação 2:

$$F_S = \frac{D_{Máxima}}{S_{N_{TR}}} (1 + k)^n \quad (2)$$

Logo, para uma taxa de crescimento de carga anual – $k = 4\%$ ao ano e um período de tempo de análise – $n = 10$ anos, temos:

$$S_{N_{TR}} = \frac{20,80}{1,4} (1 + 0,04)^{10}$$

$$S_{N_{TR}} \approx 25 \text{ kVA}$$

Neste caso, o transformador de 25 kVA opera com um Fator de carregamento máximo ($F_{C_{Max}}$) inicial conforme a Equação 3.

$$F_{C_{Max}} = \frac{D_{Máxima}}{S_{N_{TR}}} \quad (3)$$

ou seja:

$$F_{C_{Max}} = \frac{20,80}{25} \approx 0,84$$

Considerando um período de tempo de análise $n = 20$ anos e uma taxa de crescimento de carga anual $k = 4\%$ ao ano, temos:

$$S_{N_{TR}} = \frac{20,80}{1,4} (1 + 0,04)^{20}$$

$$S_{N_{TR}} \approx 37,5 \text{ kVA}$$

Neste caso, o transformador de 37,5 kVA opera com um Fator de carregamento máximo ($F_{C_{Max}}$) inicial de:

$$F_{C_{Max}} = \frac{20,80}{37,5} \approx 0,56$$

Assumindo uma solução com base em transformadores de 50 kVA, é obtido um Fator de Carregamento Máximo ($F_{C_{Max}}$) inicial de:

$$F_{C_{Max}} = \frac{20,80}{50} \approx 0,42$$

A relação entre a demanda máxima e a potência nominal deste transformador F_S , no fim do seu período de vida útil de 20 anos, segundo a Equação 2 é da ordem de:

$$F_S = \frac{20,80}{50} (1 + 0,04)^{20}$$

$$F_S \approx 0,91$$

Como observado, este transformador não opera em carregamento superior ao nominal.

Para a solução com base nos transformadores de 37,5 kVA, a relação entre a demanda máxima e a potência nominal no fim do seu período de vida útil de 20 anos é da ordem de:

$$F_S \approx 1,21$$

Os transformadores de 37,5 kVA e 50 kVA consideram um período de vida útil de 20 anos, que corresponde a uma taxa de depreciação de 5%. Caso estes sejam os parâmetros, pode-se afirmar que: “As vidas úteis técnica e econômica deste transformador são equivalentes”.

A Tabela 1 mostra uma comparação das características dos transformadores com período de vida útil de 20 anos anteriores.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES – EXEMPLO

Potência do transformador [KVA]	$F_{C_{MAX}}$	F_S
25	0,84	1,82
37,5	0,56	1,21
50	0,42	0,91

Nota: Um valor elevado para a relação entre a demanda máxima e a potência nominal de um transformador F_S possui pelo menos duas implicações negativas. A primeira é, sem sombra de dúvida, a perda de vida útil por operação em condições de temperatura superiores ao admissível para os materiais isolantes utilizados. A segunda é o custo das perdas

nos enrolamentos, associada com a circulação de correntes de carga elevada, uma vez que as perdas dependem do quadrado da corrente, ou seja, da potência. Neste caso, o custo das perdas série para um valor de $F_S = 1,82$ é da ordem de 3,31 vezes o custo destas perdas para um carregamento nominal. Desse modo, existem limites técnicos e econômicos que definem o período de vida útil de um transformador. Logo, mesmo que existam condições técnicas capazes de permitir que um transformador opere em condições de carregamento superior ao nominal, podem existir restrições econômicas ligadas aos custos das perdas, assim, estes aspectos devem ser cuidadosamente verificados.

Um dos pontos que devem ser verificados quando da escolha da potência nominal de um transformador é o seu desempenho térmico. Esta verificação, de modo simplificado, pode ser realizada considerando modelos térmicos reduzidos ou de forma mais sofisticada por meio de modelos mais detalhados com o auxílio de programas para o cálculo de transitórios eletromagnéticos.

Utilizam-se, nestes casos, analogias eletrotérmicas. Estes procedimentos consideram as semelhanças existentes entre o equacionamento integro-diferencial dos circuitos elétricos e os mecanismos de fluxo de calor.

A Figura 2 mostra o circuito elétrico simplificado para representar de forma equivalente o processo de aquecimento de um transformador. Os parâmetros para o

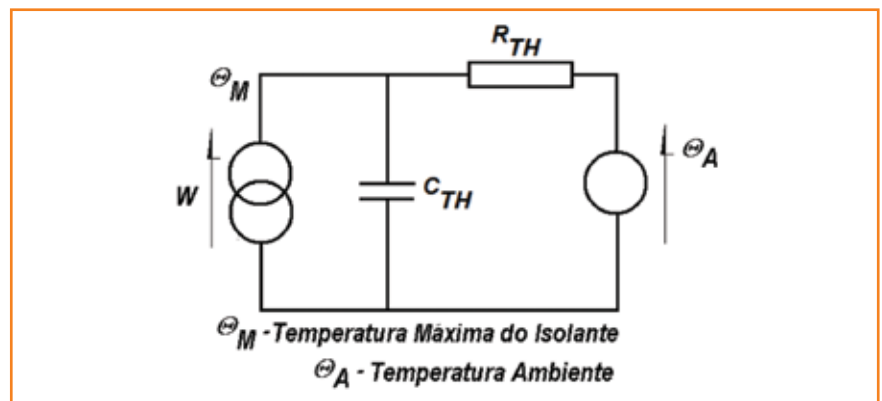


Figura 2 – Equivalente térmico simplificado de um transformador.

modelo equivalente mostrado na Figura 2 são retirados dos resultados dos ensaios a vazio, sob curto e de aquecimento dos transformadores.

A Equação 4 fornece o valor da Máxima Temperatura em Regime Permanente (Θ_M) com base nos valores da Temperatura Ambiente (Θ_A) das perdas a vazio (W_0), perdas sob cargas nominais (W_{cc}), na potência nominal (SNTR) e na potência suprida pelo transformador (S_T).

$$\Theta_{Max} = \Theta_A + R_{TH}(W_0 + W_{CC}(\frac{S_T}{S_{NTR}})^2) \quad (4)$$

A Figura 3 mostra o circuito elétrico simplificado capaz de representar de forma equivalente o processo de aquecimento de um transformador na sua forma para equacionamento transitório, em que por questões de simplicidade as perdas, responsáveis pelo aquecimento, foram representadas de forma concentrada - W.

Deste modo:

$$\frac{W}{s} = (\Theta_M - \frac{\Theta_A}{s})sC_{TH} + \frac{\Theta_M - \frac{\Theta_A}{s}}{R_{TH}}$$

Logo:

$$\Theta_M = \frac{w + (sC_{TH} + \frac{1}{R_{TH}})\Theta_A}{s(sC_{TH} + \frac{1}{R_{TH}})} \quad (5)$$

A Equação 6 é o resultado da aplicação da Anti - Transformada de Laplace à

Equação 5 e descreve no domínio do tempo o comportamento da temperatura máxima do transformador, conforme mostrado na Figura 4.

$$\Theta_M(t) = \Theta_A + wR_{TH}(1 - e^{-\frac{t}{C_{TH}R_{TH}}}) \quad (6)$$

Em que:

$$w = W_0 + k^2W_{cc} \quad (7)$$

A partir das Equações 6 e 7 e dos dados de elevação de temperatura ($\Delta\Theta$) e de constante térmica ($\tau\Theta$), são obtidos os dados do modelo térmico.

Neste caso, assumindo que $W = 320$ [W]:

$$R_{TH} = \frac{\Delta\Theta}{W} = \frac{64}{320} = 0,2[^\circ C/W]$$

$$C_{TH} = \frac{W\tau\Theta}{\Delta\Theta} = \frac{320 * 1.380}{64} = 6.900[sW/^\circ C]$$

Estes valores podem ser utilizados em conjunto curva de permanência de carga e de um tempo máximo para determinar, de forma em geral conservadora, se o transformador atinge ou não sua temperatura máxima de operação.

Uma vez que os transformadores possuem cargas variáveis com o tempo, é possível, com base na técnica de patamares de cargas, calcular o tempo em que um transformador pode ser submetido a um regime de carga superior à nominal sem que seja superado o limite

de temperatura máximo de suas partes isolantes. Para tanto é utilizado o modelo transitório mostrado na Figura 2, em que a Equação 6 pode ser transformada na Equação 8.

$$\Delta\Theta(t) = \Delta\Theta_k(1 - e^{-\frac{t}{C_{TH}R_{TH}}}) \quad (8)$$

Em que:

$$\Delta\Theta_k = R_{TH}(W_0 + k^2W_{cc}) \quad (9)$$

Para uma condição de carregamento k_f [p.u] superior à nominal, obtém-se:

$$\Delta\Theta(t) = R_{TH}(W_0 + k_f^2W_{cc})(1 - e^{-\frac{t}{C_{TH}R_{TH}}})$$

Assumindo uma diferença de temperatura - $\Delta\Theta$ entre o valor máximo de temperatura e a temperatura inicial determinada pela condição de carregamento k_i , obtém-se a Equação 10:

$$T_s = -C_{TH}R_{TH}\ln(1 - \frac{\Delta\Theta}{R_{TH}(W_0 + k_f^2W_{cc})}) \quad (10)$$

Em que:

T_s = Tempo máximo sob a condição de carregamento k_f .

A Tabela 2 mostra, com base em um conjunto de "Ensaio de Aquecimento", única fonte de dados para os usuários de transformadores, que desconhecem detalhes de projetos, os valores das constantes térmicas representativas mais

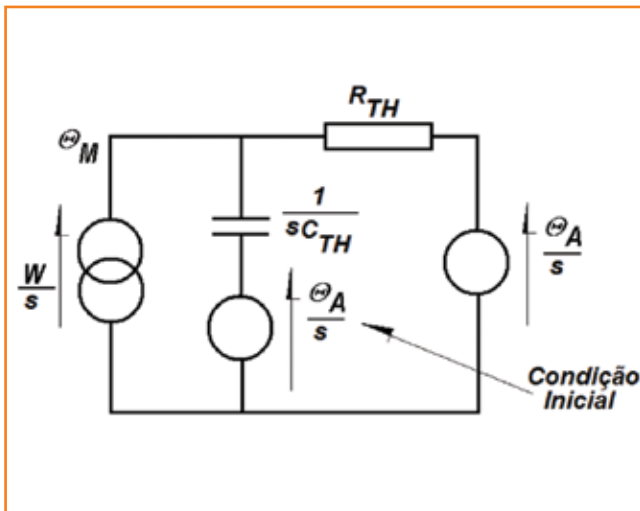


Figura 3 - Circuito equivalente térmico simplificado de um transformador para estudos transitórios.

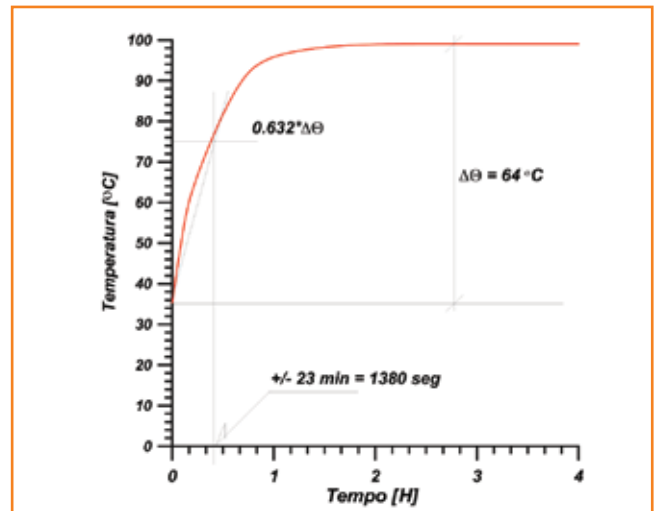


Figura 4 - Comportamento térmico transitório de um transformador.

TABELA 2 – RESISTÊNCIAS E CAPACITÂNCIAS TÉRMICAS EQUIVALENTES MÉDIAS MAIS PROVÁVEIS

KVA/KV	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA [°C]	PERDAS A VAZIO - W_0 [W]	PERDAS EM CARGA - W_{CC} [W]	RESISTÊNCIA TÉRMICA EQUIVALENTE [°C/W]	CAPACIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE [S/W]
45/15 – 3F	52,9	164,0	623,0	0,06722	162.205,2
75/15 – 3F	43,8	332,0	1.027,0	0,03222	209.580,0
30/25 – 3F	47,2	181,0	534,5	0,06594	125.005,8
45/25 – 3F	41,3	211,3	714,0	0,04462	176.506,2
75/25 – 3F	45,6	349,6	1.107,3	0,03138	223.123,2
10/15 – 1F	39,9	52,2	176,2	0,17584	59.090,4
25/25 – 1F	40,9	110,5	373,0	0,08458	99.646,2

prováveis normalmente denominados “médios” que, de modo conjunto com a Equação 10, são utilizados para o cálculo dos tempos sob carregamento superiores aos nominais mostrados na Tabela 3. Com base nestes dados, o padrão adequado para a relação entre a demanda máxima e a potência nominal do transformador FS, partindo dos patamares de carregamento de 0,5 a 0,6 p.u. pelo período de tempo de duas horas é ao redor de 1.1 p.u. Operar com demandas máximas superiores a este valor implica em reduzir o tempo de operação ou ainda da demanda, carregamento inicial.

Dados mais representativos podem ser obtidos com os fabricantes dos transformadores. No entanto, conforme mostra a Tabela 4, não são esperadas

modificações substanciais na direção de maior flexibilidade operacional.

As diferenças em termos de tempo máximo de carregamento entre as Tabelas 3 e 4 são basicamente atribuídas aos métodos de cálculo – medições. Os dados da Tabela 3 foram obtidos com o auxílio do modelo térmico dotado de extrema simplicidade, o único capaz de ser retirado diretamente dos resultados dos ensaios de aquecimento dos transformadores. Deste modo, tendem a fornecer resultados menos confiáveis, principalmente com valores de carregamento superiores a 1.2 p.u.. Isto se deve às diferentes constantes térmicas entre enrolamentos e óleo, que, como se observa no modelo simplificado adotado, é substituída por uma “constante térmica equivalente”. O método

em si apresenta uma certa folga, uma vez que em geral não se observam perfis de carregamento como os mostrados pelas curvas de permanência. Logo, períodos reduzidos de sobrecarregamento são seguidos por períodos de resfriamento, o que, por sua vez, atua no sentido de prover “um certo alívio ao problema térmico”.

Modelos térmicos mais elaborados, em geral, conduzem a uma melhor avaliação dos períodos operando sob potência superior à nominal. No entanto, normalmente, exigem conhecimento de detalhes disponíveis somente a nível de manufatura. Os ensaios de aquecimento fornecem parâmetros capazes de definir alguns perfis de carregamento superior ao nominal, que devem ser encarados com um certo grau de cuidado, pois, como mostram as Tabelas 3 e 4, dependem dos patamares de carga inicial e final, ou seja, necessitam ser observados também por uma ótica de engenharia e risco.

Finalmente, a mensagem é clara: “Não se pode aplicar cargas superiores à nominal aos transformadores por tempo indefinido”, o que aliás não é novidade. Os períodos de tempo em operação superior à nominal variam entre uma e duas horas, quando de carregamento moderado, entre 1.1 p.u. e 1.2 p.u., a dez minutos quando de carregamentos médios - elevados, entre 1.4 p.u. e 1.5 p.u.

TABELA 3 – TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL DE CARGA SUPERIOR À NOMINAL PARA UM TRANSFORMADOR 45 KVA – 15 kV TRIFÁSICO

CARREGAMENTO INICIAL	CARREGAMENTO SUPERIOR AO NOMINAL - TEMPO (MINUTOS)			
	1,1	1,2	1,5	1,6
0,4	134,57	109,47	66,55	57,93
0,5	112,66	92,72	57,40	50,14
0,6	103,55	85,62	53,40	46,71
0,7	77,21	64,66	41,21	36,20
0,8	50,91	43,14	28,09	24,78
0,9	25,08	21,49	14,28	12,66

TABELA 4 – TEMPO MÁXIMO ADMISSÍVEL DE CARGA SUPERIOR À NOMINAL PARA TRANSFORMADORES

CARREGAMENTO INICIAL	CARREGAMENTO SUPERIOR AO NOMINAL - TEMPO (MINUTOS)			
	1,1	1,2	1,4	1,5
0,50	180	90	30	15
0,75	129	60	15	8
0,90	60	30	8	4

Fonte: Schneider Electric

Manuel Luís Barreira Martinez possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo. Atualmente, é professor associado da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em equipamentos, materiais elétricos, distribuição de energia elétrica e técnicas em alta tensão. É autor e coautor de 350 artigos em revistas e seminários, associados a trabalhos de engenharia e 45 orientações de mestrado e doutorado. Atua, principalmente, nos seguintes segmentos: métodos de ensaios, ensaios dielétricos, para-raios para sistemas de média e alta tensão e equipamentos elétricos.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atituedeeditorial.com.br