

TRANSFORMADORES

Franklin Guerra (*)
Isaac Moreira

Primeira abordagem à utilização de modelos reduzidos para a determinação experimental do campo térmico de transformadores arrefecidos por convecção natural

resumo

Os autores descrevem ensaios efectuados sobre dois enrolamentos geometricamente semelhantes, arrefecidos por ar ou óleo. Deduzem os critérios de semelhança a partir das equações da condução e da convecção do calor. Comparam-nos com os resultados experimentais. Concluem que os campos térmicos dos dois sistemas são semelhantes, o que abre caminho ao estudo térmico dos enrolamentos de transformador por meio de modelos reduzidos.

Preâmbulo

A temperatura dos enrolamentos é um factor determinante da duração de vida dos transformadores. Esta temperatura varia de ponto para ponto dos enrolamentos. Como a degradação térmica dos isolantes cresce exponencialmente com a temperatura, tem uma importância de primeira grandeza conhecer o seu valor mais elevado, isto é, a chamada temperatura do «ponto quente» do transformador.

O aquecimento é função do regime de carga imposto ao transformador. Conhecer a temperatura do ponto quente torna-se uma exigência crucial de quem deseja carregar racionalmente os seus transformadores. Por isso toda a gente se preocupa em descobrir um método experimental conclusivo.

Os clássicos ensaios de aquecimento apenas determinam a temperatura média dos enrolamentos. Os métodos dos fluxos múltiplos, que pretenderam conhecer

abstract

This paper concerns some experiments on two geometrical similar windings, cooled by air or by oil. It derives the criteria of their thermal similitude from heat conduction and convection laws. These criteria are compared with experimental results. The conclusion is that thermal fields of the two systems are similar and therefore the similitude method seems to appear as an useful tool for the thermal analysis of transformer windings.

a temperatura do ponto quente durante o ensaio rotineiro de aquecimento, não foram adoptados pois conduziam a resultados pouco concludentes.

Hoje desenvolvem-se os métodos (mais ou menos rebuscados) de medição *directa* da temperatura do ponto quente. Para isso introduzem-se sondas nos pontos provavelmente mais quentes e colhem-se as temperaturas através de fibras ópticas. Mas a introdução de corpos estranhos, mesmo bons isolantes, em pleno seio do campo eléctrico dos transformadores exige uma perfeição extrema de desenho e execução. Estes ensaios são perigosos para o material.

Ocorreu-nos que a temperatura do ponto quente de um transformador se poderia conhecer pela técnica dos modelos reduzidos.

(*) Franklin Guerra, Eng. Elect. (U.P.), Isaac Moreira, Eng. Tec. (I.S.E.P.).

Bastaria definir os *critérios de semelhança* entre o transformador e o seu modelo reduzido, para se determinar experimentalmente, a partir das medições feitas no modelo, as temperaturas de *todos* os pontos do transformador.

Isto significa que o método permitiria conhecer, já não dizemos apenas a temperatura e a localização do ponto quente, mas *todo* o campo térmico do transformador.

Neste artigo descrevemos uma primeira abordagem ao método e as conclusões iniciais. Consideramo-las animadoras e por isso decidimos publicá-las, na esperança de interessarem outros laboratórios. Os nossos ensaios foram realizados na EFACEC, a quem agradecemos a autorização para os divulgar.

Critérios de semelhança térmica

O calor gerado por perdas óhmicas e dieléctricas nos enrolamentos dos transformadores é evacuado para o ambiente por um mecanismo com dois passos:

- condução térmica das partes sólidas;
- convecção na interface com os fluídos ambientes.

Tomemos para ponto de partida dois enrolamentos *geometricamente semelhantes*, isto é, com dimensões homólogas rigorosamente proporcionais. Ao enrolamento de maiores dimensões chamaremos *protótipo* e à sua reprodução *modelo reduzido*. O coeficiente de proporcionalidade entre as dimensões homólogas é a *escala dos comprimentos*:

$$k_l = \frac{\text{cota geométrica qualquer do modelo}}{\text{cota geométrica homóloga do protótipo}}$$

Se as potências dissipadas no protótipo e no modelo forem diferentes, poderemos definir também uma *escala das potências*:

$$k_p = \frac{\text{potência num ponto qualquer do modelo}}{\text{potência no ponto homólogo do protótipo}}$$

Estas potências dissipadas provocam o aquecimento dos enrolamentos e por isso se pode ainda definir uma *escala dos aquecimentos*, que é a relação:

$$k_\theta = \frac{\text{aquecimento num ponto qualquer do modelo}}{\text{aquecimento do ponto homólogo do protótipo}}$$

Haverá alguma relação necessária entre estas três escalas?

Demonstramos em anexo que usando os mesmos materiais no protótipo e no modelo e considerando ape-

nas os regimes permanentes, se observa a seguinte relação entre as escalas:

$$k_\theta = \frac{k_p}{k_l}$$

Esta relação, imposta pelas leis da condução do calor, é a chave teórica de que dispomos para determinar o aquecimento dos vários pontos do protótipo a partir das *medições* do aquecimento dos pontos homólogos do modelo. Constitui portanto o *critério de semelhança térmica* dos dois sistemas.

É uma condição necessária, mas não suficiente. Tem de se juntar outra condição, que exprima a semelhança de comportamento térmico para a convecção do calor, na zona fronteira entre os enrolamentos e o meio ambiente.

Para isso temos que lançar mão de uma nova escala de semelhança, a *escala dos coeficientes de transmissão térmica*, isto é, a relação:

$$k_\alpha = \frac{\text{coeficiente de transmissão térmica entre um ponto da parede do modelo e o meio ambiente}}{\text{idem para o ponto homólogo do protótipo}}$$

A condição de semelhança na fronteira exprime que a quantidade de calor conduzida das fontes internas até à fronteira é igual à quantidade de calor evacuada por convecção. A sua expressão matemática, deduzida em anexo, é a seguinte (para o caso de se usarem os mesmos materiais no protótipo e no modelo):

$$k_\alpha = \frac{1}{k_l}$$

Em conclusão, os critérios teóricos da semelhança térmica entre os dois enrolamentos, em regime permanente e utilizando os mesmos materiais, são os seguintes:

- critério de semelhança para a condução:

$$k_\theta = \frac{k_p}{k_l}$$

- critério de semelhança para a convecção:

$$k_\alpha = \frac{1}{k_l}$$

Verificação experimental

Para verificar experimentalmente estes critérios de semelhança construímos duas bobinas em fio de cobre, com *todas* as suas dimensões à escala

$$k_l = \frac{1}{2}$$

Diâmetro nú ou isolado do condutor, espessura dos isolantes, diâmetros e altura das bobinas — tudo estava geometricamente na proporção de 1:2. Os materiais utilizados, condutores e isolantes, eram da mesma qualidade.

Alimentamos as bobinas por fontes de potência regulável e deixamos estabilizar as temperaturas, medidas por termopares regularmente distribuídos em 20 pontos homólogos no interior das bobinas.

Realizamos duas séries de ensaios.

Numa delas, as bobinas eram arrefecidas por convecção natural do ar. Fizemos ensaios a vários níveis de potência, com bobinas nuas ou com isolantes suplementares adossados (tubos isolantes, rodela isolantes).

Na outra série de ensaios, as bobinas foram mergulhadas em óleo e arrefecidas por termossifão. É claro que *todas* as dimensões do circuito termohidráulico (cubas, radiadores, canalizações) estavam também à escala 1:2 (fig. 1).

Analizamos ainda uma variante à segunda série de ensaios, em que soprámos o radiador do modelo por um pequeno ventilador.

Dos resultados experimentais extraímos as seguintes conclusões.

Segundo este critério, deveria ser $k_{\theta} = 2k_p$. Ora os ensaios conduziram-nos aos seguintes resultados:

$$k_{\theta} \simeq 3 k_p \quad \text{— para o arrefecimento no ar}$$

$$k_{\theta} \simeq 2,8 k_p \quad \text{— para o arrefecimento no óleo}$$

$$k_{\theta} \simeq 2,1 k_p \quad \text{— para o arrefecimento no óleo com o radiador-modelo soprado pelo ventilador}$$

A justificação deste facto entronca obviamente na observância do critério de convecção, que deveria ser, quando modelo e protótipo são ambos arrefecidos por termossifão (convecção natural do ar e do óleo):

$$k_{\alpha} = k_l^{-1} \quad (k_{\alpha} = 2 \text{ nos nossos ensaios})$$

Ora, de facto, o coeficiente de transmissão do calor por convecção natural varia aproximadamente na proporção inversa da raiz cúbica (regime turbulento) ou da raiz quarta (regime laminar) das dimensões geométricas. Quer isto dizer que a escala k_{α} está na realidade compreendida entre

$$\frac{1}{\sqrt[3]{k_l}} \text{ e } \frac{1}{\sqrt[4]{k_l}} \quad (1,2 \text{ a } 1,3 \text{ nos nossos ensaios}).$$

Para se realizar o critério da fronteira $k_{\alpha} = 1/k_l$, seria necessário acelerar a convecção do modelo reduzido por qualquer meio artificial. A ventilação forçada do radiador-modelo constituiu um desses artifícios, que aproximou a escala dos aquecimentos do seu valor teórico.

2.ª conclusão: os campos térmicos dos dois sistemas (protótipo e modelo reduzido) são semelhantes

O simples facto experimental de k_{θ} não depender do ponto escolhido mostra que a distribuição interna dos aquecimentos é a mesma nos dois sistemas.

A semelhança dos dois campos térmicos manifestou-se nos nossos ensaios por um desvio-padrão (em relação ao valor médio dos aquecimentos) que atingiu os seguintes valores típicos:

5 a 7% nos ensaios no ar

8 a 10% nos ensaios em óleo

6 a 7% nos ensaios em óleo com o radiador-modelo ventilado.

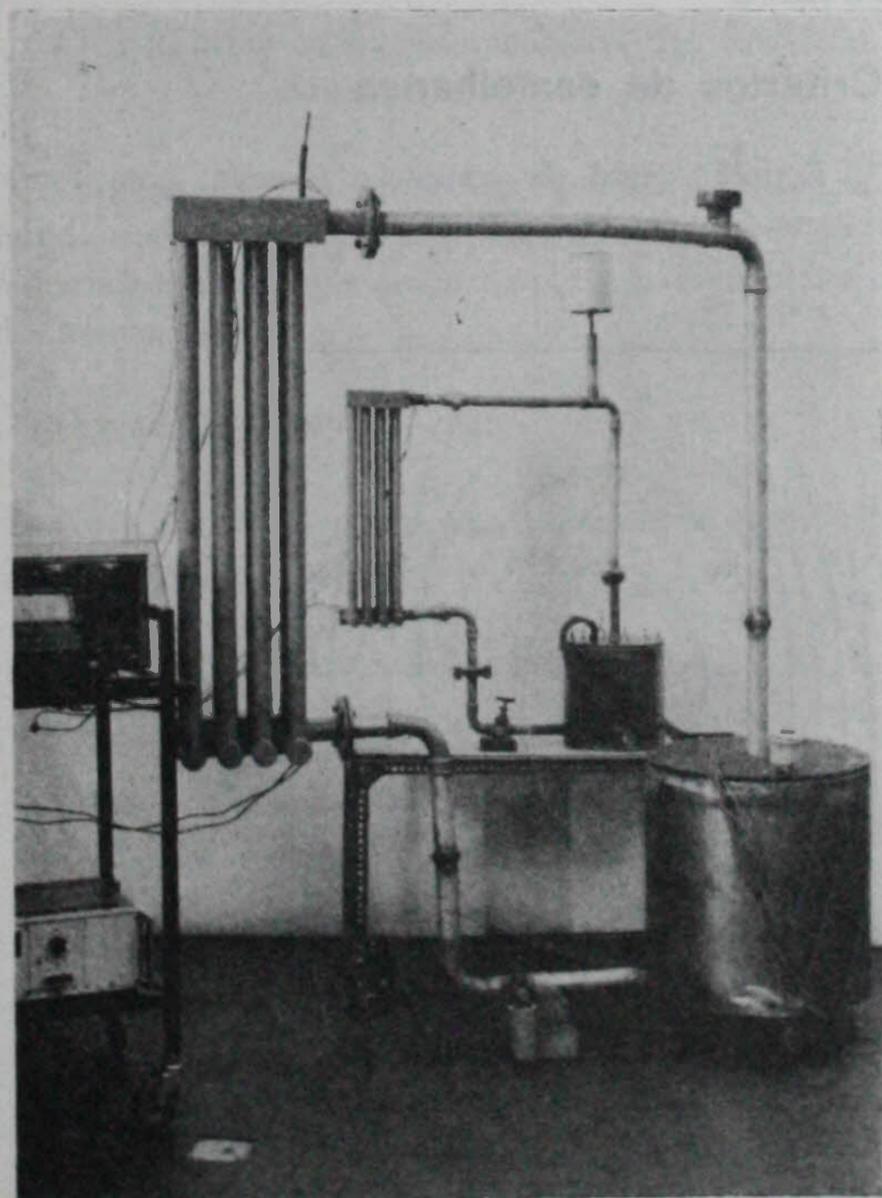


Fig. 1 — Conjunto do protótipo e seu modelo reduzido

Estes desvios provêm dos seguintes erros:

- erros dos termopares e do equipamento de medida;
- erros aleatórios na construção do modelo e protótipo;
- erros de localização de termopares homólogos.

Para dar uma ideia visual da fraca importância dos desvios observados, transcrevemos na figura 2 as isotérmicas do enrolamento-modelo em duas condições distintas, a que corresponde o desvio-padrão de 6% na escala dos aquecimentos.

Juntando a 1.ª e a 2.ª conclusão podemos afirmar que, embora desconhecendo *a priori* a escala de semelhança k_θ , os campos térmicos dos dois sistemas são semelhantes.

As medições no campo térmico do modelo reduzido permitem por consequência:

- 1.º — conhecer a localização exacta do ponto quente do protótipo (igual à do modelo);
- 2.º — conhecer a relação entre a temperatura do ponto quente e a temperatura média do enrolamento-protótipo (relação igual também à do modelo).

As regras de cálculo usadas no projecto dos transformadores determinam com suficiente rigor a tempe-

ratura média dos enrolamentos. A partir dela podemos portanto conhecer *a posteriori* a escala de semelhança k_θ .

É claro que a utilidade do modelo não se limita à definição do ponto quente. A escala k_θ permite prever o aquecimento de todo e qualquer ponto do protótipo.

3.ª conclusão: o modelo reduzido pode abrir o caminho ao estudo experimental do termosifão e dos fenómenos térmicos transitórios

No decorrer dos ensaios realizados tivemos oportunidade de comprovar as condições de semelhança do termosifão-protótipo com o termosifão-modelo.

Tivemos também a oportunidade de comparar as constantes de tempo térmicas dos dois sistemas e verificar a sua compatibilidade com os critérios de semelhança deduzidos da equação da condução do calor em regime não estacionário.

Não nos deteremos aqui nestes aspectos, que divergem do objectivo central do nosso artigo. Não queremos contudo deixar de apontar as perspectivas que parecem abrir.

ANEXO

Critérios de semelhança

Equação geral da condução térmica, com fonte interna de calor homogeneamente distribuída:

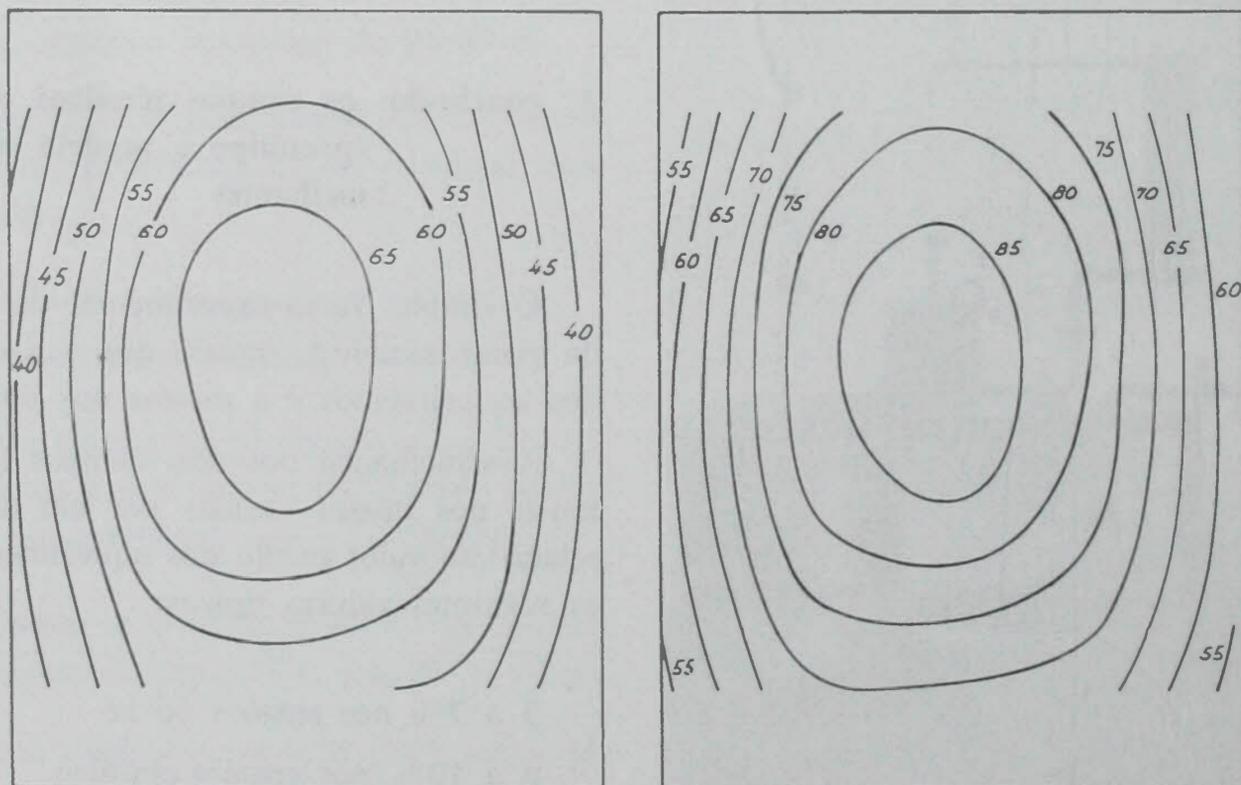


Fig. 2 — Isotérmicas do enrolamento-modelo mergulhado em óleo, potência injectada 160W, com radiador ventilado (à esquerda) e não ventilado

$$\Delta T + \frac{p}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Δ = laplaciano

T = temperatura

p = potência da fonte interna por unidade de volume

λ = condutibilidade térmica

a = difusividade térmica

t = tempo

Critério de semelhança em regime permanente $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right)$, com os mesmos materiais no modelo e no protótipo ($\lambda, a = \text{constantes}$):

$$k_T = \frac{k_P}{k_l}$$

k_T = escala das temperaturas (ou dos aquecimentos, isto é, das temperaturas subtraídas da temperatura ambiente)

k_l = escala dos comprimentos

$k_P = k_p k_l^3$ = escala das potências das fontes internas

Condição de fronteira: a densidade de energia transmitida por condução até um ponto da fronteira é igual à densidade de energia evacuada por convecção através do mesmo ponto:

$$(\lambda \text{ grad}_n T)_f = \alpha (T_f - T_a)$$

grad_n = gradiente segundo a normal à superfície da fronteira

T_f = temperatura na fronteira

T_a = temperatura do meio ambiente

α = coeficiente de transmissão do calor por convecção.

Critério de fronteira, com os mesmos materiais no modelo e no protótipo:

$$k_\alpha = \frac{1}{k_l}$$

Vamos exemplificar para este último caso o raciocínio que conduz das equações de estado aos critérios de semelhança. Para o primeiro caso o raciocínio é o mesmo.

Condição de fronteira para o protótipo:

$$\left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial n'} \right)_f = \alpha' (T'_f - T_a)$$

Tomando aquecimentos ($\theta = T - T_a$) em vez de temperaturas:

$$\left(\lambda' \frac{\partial \theta'}{\partial n'} \right)_f = \alpha' \theta'_f$$

Para o modelo:

$$\left(\lambda'' \frac{\partial \theta''}{\partial n''} \right)_f = \alpha'' \theta''_f$$

Dividindo membro a membro a 2.ª equação pela 1.ª:

$$\left(\frac{\lambda''}{\lambda'} \frac{\partial \theta''}{\partial \theta'} \frac{\partial n'}{\partial n''} \right)_f = \frac{\alpha''}{\alpha'} \frac{\theta''_f}{\theta'_f}$$

$$\text{ou } k_\lambda k_\theta \frac{1}{k_l} = k_\alpha k_\theta$$

Se os materiais foram os mesmos no protótipo e no modelo ($k_\lambda = 1$), então:

$$k_\alpha = \frac{1}{k_l}$$