

Estabilidade térmica dos materiais isolantes eléctricos

RENATO J. R. MORGADO

*Engenheiro Electrotécnico **

DIETMAR APPELT

*Licenciado em Ciências Físico-Químicas **

1 — INTRODUÇÃO

Os materiais isolantes eléctricos envelhecem. Eis um facto bem conhecido. Tal como todos os objectos da natureza, os isolantes eléctricos obedecem à fatídica lei natural: envelhecem ao longo do tempo, isto é, vão perdendo a capacidade de resistir às solicitações que lhe são impostas em serviço.

Em que consiste esse envelhecimento, quais os factores que o determinam e como? A resposta a estas perguntas é de um interesse evidente, tanto para o fabricante como para o utilizador do equipamento eléctrico.

Sabe-se que a aptidão de um isolante eléctrico em realizar a sua função depende de muitos factores que actuam como agentes de envelhecimento, tais como: a temperatura a que é utilizado, o campo eléctrico que o solicita electricamente, os esforços mecânicos aos quais é sujeito (em particular se sob a forma de vibrações ou choques), a humidade, os agentes químicos, etc. Por outro lado a utilização de um material isolante eléctrico depende não só das suas qualidades eléctricas, mecânicas, térmicas, etc., à temperatura de serviço e quando novo, mas também da sua capacidade de resistir à acção dos agentes de envelhecimento e, na prática, o factor limitativo pode ser qualquer um deles (ou combinação deles).

Entre os agentes de envelhecimento a temperatura tem um papel preponderante e é, frequentemente, o factor limitativo.

A influência que outros agentes de envelhecimento, além da temperatura, têm no processo de degradação dum isolante ou dum sistema de isolamento tem sido objecto de intensa investigação, procurando-se estabelecer processos de avaliação dessa influência que permitam identificar e codificar um sistema de isolamento quanto à sua estabilidade de comportamento em serviço, tendo em conta a acção simultânea dum dado conjunto de agentes de envelhecimento.

Os conhecimentos actuais estão, no entanto, muito longe de o permitir de uma forma razoavelmente satisfatória e está-se ainda na fase das ideias gerais e do estabelecimento de regras básicas de experimentação e estudo nesse domínio [1].

O presente artigo tem por finalidade resumir o estado actual dos conhecimentos sobre o problema da estabilidade térmica dos isolantes eléctricos e indicar os elementos fundamentais que podem servir de guia para a escolha desses isolantes, do ponto de vista da acção de apenas este agente de envelhecimento: a temperatura. A utilização dos isolantes eléctricos pode, no entanto, ser muitas vezes limitada (e é sempre, pelo menos, influenciada) por outros factores, além da sua estabilidade térmica, tais como, por exemplo, as suas propriedades mecânicas, dieléctricas e térmicas à temperatura de serviço. Isto é: isolantes de uma mesma classe térmica podem ser adequados para um dado tipo de equipamento eléctrico e não convir para outros equipamentos, embora funcionando todos à mesma temperatura de serviço.

2 — NOÇÃO DE ESTABILIDADE TÉRMICA. CLASSES TÉRMICAS

Dum ponto de vista puramente qualitativo, e como o próprio termo o deixa antever, a *estabilidade térmica* de um material isolante eléctrico é a maior ou menor aptidão que esse material tem para resistir ao efeito da temperatura. Este conceito é, no entanto, mal definido, já que os métodos preconizados para a sua avaliação não permitem fazê-lo duma forma exacta e adequada.

Com efeito a apreciação da estabilidade térmica de um isolante eléctrico tem de ser feita através da avaliação da evolução de um conjunto de propriedades (mecânicas, eléctricas, etc.) de modo a obter-se um quadro geral do comportamento do isolante, à temperatura da experiência e nas condições da experiência. Por outro lado essa experiência tem de ser feita por ensaios acelerados (doutro modo demoraria tempos incomportáveis), para o que se submete o material isolante a temperaturas superiores à de serviço (à qual, afinal, se pretende conhecer a estabilidade do isolante

* Ambos os autores são colaboradores da EFACEC.

em questão). Os resultados têm, então, que ser extrapolados para esta temperatura por regras que os falseiam mais ou menos, quer por não terem em conta que certos fenómenos destrutivos se produzem à temperatura de ensaio e não à temperatura de serviço, quer porque os processos de degradação não são perfeitamente conhecidos.

A CEI (1) classificou os materiais isolantes eléctricos em sete classes [2], designadas pelas letras Y, A, E, B, F, H e C, e a cada uma associou uma temperatura, respectivamente 90° C, 105° C, 120° C, 130° C, 155° C, 180° C e maior que 180° C.

O significado que a CEI deu a estes números é um tanto vago: estas temperaturas são tais que, respeitadas como temperaturas máximas a que o isolante em questão ficará sujeito, lhe assegurarão uma duração de vida normal (isto é, economicamente adequada e que a prática mostra ser razoável), desde que sejam respeitadas as condições normais de funcionamento do equipamento de cuja estrutura isolante o material electro-isolante faz parte.

Conceito portanto impreciso, porque depende de noções tais como «vida normal» e «condições normais de funcionamento», noções que só a prática de construção e utilização de um certo equipamento eléctrico pode estabelecer estatisticamente. Só a experiência pode mostrar que se obtém uma vida satisfatória, por exemplo em máquinas rotativas ou em transformadores, utilizando um certo isolante a um certo nível de temperatura. Só então esse isolante pode ser classificado numa certa classe térmica, ficando-lhe assim sempre associada uma certa utilização num certo equipamento eléctrico (por exemplo, motores de tracção eléctrica).

Acresce, ainda, que a temperatura máxima a que um isolante ficará sujeito é a temperatura do seu *ponto mais quente* e esta raramente poderá ser medida (2).

Do que fica dito ressalta que a classificação térmica de um isolante eléctrico não tem mais que um valor informativo e de orientação e que compete ao construtor avaliar os outros factores que, em cada caso, condicionam a sua escolha.

De notar, ainda, que os isolantes eléctricos só muito raramente são utilizados sozinhos. Normalmente o construtor faz combinações de diversos isolantes para constituir um *sistema de isolamento*. A noção de estabilidade térmica e todas as considerações que à sua volta se podem fazer podem aplicar-se a sistemas de isolamento e pode acontecer que para constituir um sistema de isolamento de uma certa classe térmica se possa incorporar algum isolante duma classe inferior.

Note-se que este conceito de classe térmica, destinado a classificar isolantes eléctricos, aparece frequentemente, na linguagem corrente, aplicado a equipamentos eléctricos completos (em especial máquinas rotativas), significando a classe térmica dos sistemas de isolamento neles utilizados (fala-se por exemplo em motores de classe F).

3 — MATERIAIS ISOLANTES PERTENCENTES ÀS DIFERENTES CLASSES TÉRMICAS

A título de informação geral, sem carácter imperativo e sem pretender ser exaustiva, a CEI [2] indica quais os materiais isolantes que, de acordo com a prática já adquirida, poderão ser considerados como tendo uma estabilidade térmica correspondente a uma dada classe.

Desta indicação da CEI podem retirar-se as seguintes ideias gerais:

- Materiais como a seda, o algodão, o papel, etc., impregnados ou não com um líquido isolante orgânico (como o óleo, por exemplo), e ainda algumas resinas orgânicas, como por exemplo as resinas alquídicas e os vernizes à base de resinas naturais, são isolantes de estabilidade térmica relativamente baixa e correspondem-lhe as primeiras classes: Y, A e E, respectivamente 90° C, 105° C e 120° C. Estes materiais utilizam-se cada vez menos em electrotecnia e a tendência actual é cada vez mais a de utilizar materiais de alta estabilidade térmica.
- Nas classes térmicas seguintes (B e F, 130° C e 155° C, respectivamente) aparecem a mica, a fibra de vidro e o amianto, com impregnantes adequados à respectiva classe: goma laca, resinas alquídicas, poliésteres, resinas epóxicas, etc.,
- Nas classes térmicas mais elevadas (H e C, 180° C e acima de 180° C, respectivamente) continuam a aparecer a mica, a fibra de vidro e o amianto, que são materiais extraordinariamente estáveis do ponto de vista térmico; aparecem também o quartzo, a porcelana, as cerâmicas e os silicões.

A extraordinária estabilidade térmica dos materiais inorgânicos como as micas, o vidro, o amianto, etc., tornam estes materiais particularmente adequados à sua utilização nas classes térmicas mais elevadas. No entanto, são de aplicação pouco versátil (não se pode, por exemplo, obter mica líquida para fazer impregnações, ou em filme). Por esta razão têm-se procurado substâncias orgânicas de estabilidade térmica suficiente que, para além do seu uso como impregnantes, possam ser utilizadas como isolantes sólidos em produtos semiacabados de classes térmicas mais elevadas. Assim, os poliésteres e os silicões aparecem cada vez mais nessas classes, por exemplo sob a forma de filmes isolantes.

Se bem que em muitos casos (especialmente nas classes térmicas mais baixas) materiais isolantes constituídos basicamente por compostos da mesma família química pertençam à mesma classe térmica, tal facto não constitui uma regra, isto é, a função química não define só por si uma classe térmica. Os constantes progressos que se têm feito no domínio dos polímeros sintéticos permitem melhorar hoje significativamente a classe térmica de um isolante, controlando convenientemente as condições de síntese ou acrescentando aditivos adequados.

4 — O QUE É O ENVELHECIMENTO TÉRMICO? COMO SE MANIFESTA?

Os fenómenos que acontecem durante o envelhecimento térmico dum isolante eléctrico são extremamente complexos e variam não só de material para material, mas também conforme as condições de serviço (humidade, esforços mecânicos, etc.) em que o envelhecimento térmico ocorre [3, 4].

(1) Comissão Electrotécnica Internacional.

(2) Por isso os aquecimentos admitidos nas normas específicas de cada equipamento eléctrico são sempre inferiores à diferença entre a temperatura da classe térmica dos isolantes utilizados e a temperatura do ambiente arrefecedor do equipamento em questão.

Entre esses fenómenos contam-se fundamentalmente:

- perda de constituintes mais ou menos voláteis;
- certas modificações químicas dos constituintes (por exemplo por fenómenos de hidrólise) conducentes à formação de produtos agressivos, como por exemplo o cloreto de hidrogénio;
- fenómenos de oxidação e conseqüente fragilização;
- polimerização ou despolimerização molecular. No primeiro caso o material perde flexibilidade e torna-se quebradiço; no segundo caso o material perde a resistência mecânica (é o caso da celulose, por exemplo).

Estes complexos fenómenos manifestam-se por uma degradação irreversível das propriedades mecânicas, eléctricas, químicas, etc., dos isolantes.

A experiência mostra que essa degradação segue uma lei do tipo da lei de Arrhenius [3, 4], isto é:

$$\log t = C + \frac{B}{T}$$

em que B e C são constantes, T é a temperatura termodinâmica à qual se processa o envelhecimento e t é o

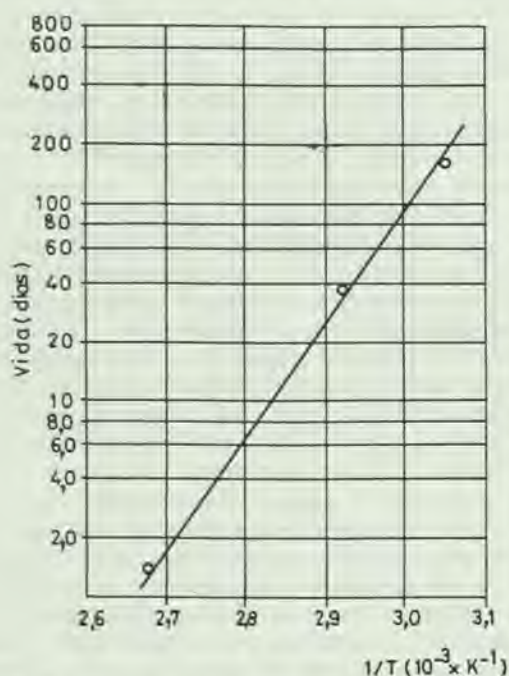


Fig. 1 — Resultados de ensaios de envelhecimento térmico em papel Kraft

tempo correspondente a uma certa variação (por exemplo a que corresponde ao fim de vida do isolante) da propriedade particular em questão. Desta forma resulta rectilínea a representação gráfica do logaritmo da duração de vida dum isolante, a uma temperatura absoluta T suposta constante, em função de $1/T$.

A fig. 1 mostra um exemplo [3] referente a ensaios de envelhecimento térmico de papel Kraft, sujeito a um campo eléctrico de cerca de 40 kV/mm.

A recta resultante pode facilmente ser utilizada para prever, por extrapolação, a duração de vida a uma temperatura T qualquer.

As constantes B e C são características do material em questão, das condições da experiência e da pro-

priedade particular escolhida. A experiência mostra que as diferentes qualidades do material não se deterioram todas com a mesma velocidade. Por isso estas rectas de duração de vida têm que ser traçadas, para um dado material, uma para cada uma das diversas propriedades que possam ser responsáveis pelo seu fim de vida em serviço.

5 — AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE TÉRMICA DOS ISOLANTES E SISTEMAS DE ISOLAMENTO.

PERFIL DE ESTABILIDADE TÉRMICA E ÍNDICE DE TEMPERATURA

Como dissemos, a noção de classe térmica [2] é muito vaga e imprecisa. Por isso tem sido realizado um grande esforço no sentido de se encontrarem métodos e de se estabelecerem critérios de avaliação de estabilidade térmica dos isolantes eléctricos [5, 6] que permitam classificá-los numa forma mais precisa.

As soluções a que se tem chegado estão, no entanto, longe de serem satisfatórias e as informações que sobre estes problemas podem ser obtidas por via laboratorial continuam a ter apenas um carácter indicativo que não dispensam um conhecimento prático do comportamento dos equipamentos eléctricos em serviço.

Recentemente apareceram na normalização da CEI [7] as noções de índice de temperatura e de perfil de estabilidade térmica. Estas noções são bastante mais definidas que a noção de classe térmica e permitem já uma classificação dos isolantes razoavelmente significativa. Essa classificação é, no entanto, apenas relativa e continua a não permitir qualquer previsão da duração de vida dum isolante ou sistema de isolamento sob determinadas condições de serviço.

As informações decorrentes de uma série de ensaios de envelhecimento térmico (quase sempre ensaios de envelhecimento acelerado, isto é, realizados a temperaturas mais elevadas que as previsíveis em serviço) podem traduzir-se sob a forma duma recta de envelhecimento ou recta de estabilidade térmica que traduz a lei de Arrhenius.

O perfil de estabilidade térmica e o índice de temperatura são números que resumem, numa forma mais ou menos cómoda e mais ou menos significativa, as informações contidas na recta de estabilidade térmica.

5.1 — ÍNDICE DE TEMPERATURA

Índice de temperatura é um número igual à temperatura, expressa em graus Celsius, que corresponde a um determinado tempo na recta de estabilidade térmica. É habitual referir o índice de temperatura a 20 000 h.

A fig. 2 mostra uma recta de estabilidade térmica extrapolada para 20 000 h. Nessa figura vê-se que o índice de temperatura, referido a 5000 h, é de 184° C, o que se escreve do seguinte modo: $11/5 \text{ kh}/184$. Na mesma figura vê-se que o índice de temperatura referido a 20 000 h é de 164° C, o que se escreve simplesmente $11/164$, dispensando-se a explicitação do tempo a que se refere, por se referir ao tempo preferencial de 20 000 h.

Desta definição resulta, pois, não haver em princípio qualquer relação entre o índice de temperatura e o tradicional conceito de classe térmica. Não obstante, é frequente encontrarem-se confundidos os dois conceitos, por exemplo em catálogos de fabricantes de materiais isolantes. Assim podem-se encontrar refe-

rências como «tal fio esmaltado apresenta um índice de temperatura 130, pelo que é adequado à bobinagem de equipamento da classe B».

5.2 — PERFIL DE ESTABILIDADE TÉRMICA

O perfil de estabilidade térmica é constituído por três números: os dois primeiros iguais às temperaturas, expressas em graus Celsius, que correspondem, na recta de estabilidade térmica, a 20 000 h e 5000 h,

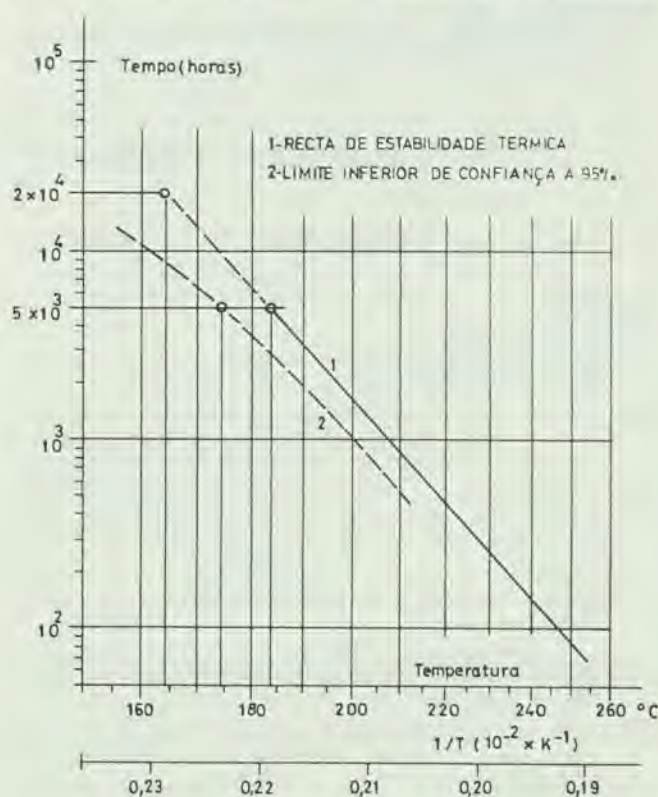


Fig. 2 — Recta de estabilidade térmica. Índice de temperatura. Perfil de estabilidade térmica

respectivamente; o terceiro indicando o limite inferior de confiança a 95 % na temperatura correspondente a 5000 h.

Na fig. 2 mostra-se, além da recta de estabilidade térmica, a linha correspondente ao limite inferior de confiança a 95 %. A determinação desta linha é feita avaliando, por algum método estatístico, a incerteza estatística dos resultados do ensaio de estabilidade térmica sobre um número suficientemente grande de provetes [8].

Na fig. 2 vê-se que o perfil de estabilidade térmica, para o exemplo representado, é constituído pelos números 164, 184 e 174, o que se escreve do seguinte modo: PET 164/184(174).

A recta de estabilidade térmica e, portanto, o perfil de estabilidade térmica e o índice de temperatura, referem-se, como já dissemos, a uma determinada propriedade do material em questão e implicam a escolha de algum critério de fim de vida. Portanto, e como as diversas propriedades não se deterioram todas com a mesma velocidade, para termos uma prefiguração genérica do material em serviço precisamos de um conjunto de perfis e de índices, para as diferentes propriedades que possam vir a ser determinantes no fim de vida do isolante em serviço.

É de notar, ainda, que a determinação de uma recta

de estabilidade térmica, para uma determinada propriedade e um dado critério de fim de vida, implica a fixação muito clara das condições de ensaio (por exemplo, outras condições ambientais além da temperatura, como a humidade, vibrações, etc.).

À primeira vista parece ser de concluir que é de esperar um melhor comportamento a longo prazo à temperatura de serviço nos materiais que apresentem um índice de temperatura mais elevado. Tal conclusão não é, no entanto, necessariamente verdadeira e a probabilidade de ser falsa é tanto maior quanto mais a temperatura de serviço se afastar da temperatura de ensaio que lhe está mais próxima [9]. Com efeito, o comportamento à temperatura de serviço resulta de uma extrapolação do comportamento observado a temperaturas superiores.

6 — CRITÉRIOS DE ENVELHECIMENTO E DE FIM DE VIDA

O estabelecimento de uma recta de estabilidade térmica implica a escolha dum critério de envelhecimento e dum critério de fim de vida. Estes critérios podem basear-se na capacidade que o material (sob a forma de provetes e em condições de ensaio bem definidas) tem para suportar solicitações tais como eléctricas, mecânicas, etc. (fig. 3), ou podem basear-se na alteração de uma propriedade do material, por

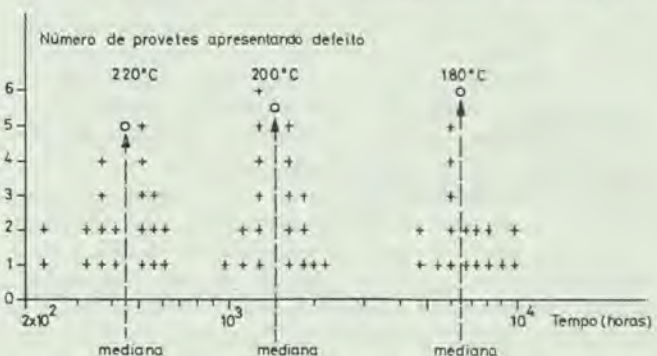


Fig. 3 — Determinação do tempo necessário para atingir o fim de vida a cada temperatura. Critério: Capacidade de suportar uma dada solicitação

exemplo a massa, a dureza, a resistência à tracção, à flexão ou ao rasgamento, o grau de polimerização, etc. (fig. 4).

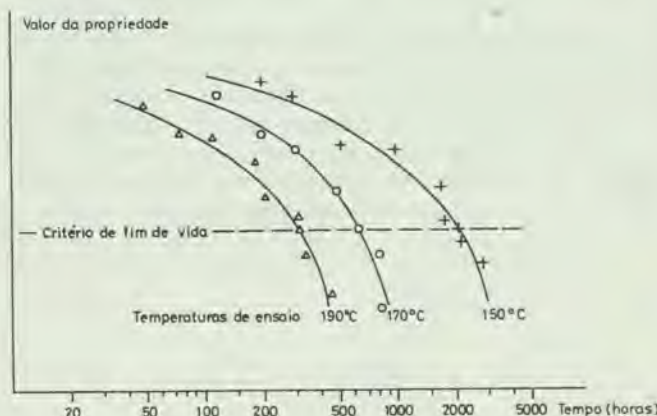


Fig. 4 — Determinação do tempo necessário para atingir o fim de vida a cada temperatura. Critério: variação duma propriedade

Por outro lado, há duas formas de fixar quantitativamente estes critérios:

- por um valor da propriedade em questão, ou da solicitação que o provete do material ainda suporta;
- pela variação, expressa em fracção do valor inicial, da propriedade em questão, ou da solicitação que o material ainda suporta.

Esta segunda forma de definir quantitativamente um critério de fim de vida é menos sugestiva que a primeira do ponto de vista do comportamento do material em serviço, já que nesta situação o que interessa é que as propriedades do material se mantenham acima dum certo nível, indispensável para que ele corresponda às exigências que lhe são feitas.

Além disto, fixar como critério de fim de vida uma certa fracção do valor inicial da propriedade em questão pode desclassificar, em relação a outros, um material que, por ter propriedades iniciais mais favoráveis, até presente, ao atingir o seu fim de vida, propriedades ainda suficientes para realizar as suas funções; outros materiais de qualidades menos favoráveis mas termicamente mais estáveis, poderiam apresentar índices de temperatura mais elevados.

Isto faz ressaltar, mais uma vez, como se deve ser prudente na interpretação a dar às informações do perfil de estabilidade térmica ou do índice de temperatura de materiais isolantes eléctricos, quando se pretende prefigurar o seu comportamento em serviço e com esse fim comparar vários materiais entre si.

A CEI indica [10], para os diferentes tipos de materiais isolantes eléctricos, classificados segundo a Enciclopédia dos Isolantes Eléctricos (3), as propriedades que, segundo o consenso que a CEI reúne, são as mais adequadas para avaliar a estabilidade térmica dos materiais e fixa o critério de fim de vida respectivo. Assim, por exemplo, para as resinas isolantes sem solvente, líquidas ou pastosas no momento da aplicação e termoendurecíveis por reacção química, as propriedades indicadas como critério de envelhecimento são a massa e a tensão disruptiva; como critério de fim de vida os valores fixados são 5 % de diminuição de massa e 50 % de valor residual da tensão disruptiva, determinada segundo as regras estabelecidas pela CEI [11].

7 — CONCLUSÕES

Apesar dos esforços que têm sido feitos para serem estabelecidas regras e métodos de apreciação adequados da estabilidade térmica dos materiais isolantes eléctricos [12], ainda não existem soluções satisfatórias.

As noções de *perfil de estabilidade térmica* e de *índice de temperatura*, recentemente adoptadas pela CEI, permitem uma comparação dos isolantes eléctricos

bastante mais significativa que a primitiva noção de *classe térmica*. Não existe no entanto qualquer relação estabelecida entre elas e a duração de vida dos isolantes sob certas condições de serviço.

Por outro lado, materiais com os mesmos *perfis de estabilidade térmica* e/ou *índices de temperatura* (isto é, classificados como sendo igualmente estáveis termicamente) podem ter propriedades eléctricas, físicas, químicas, térmicas, mecânicas, etc., muito diferentes, e portanto, convirem para certo equipamento eléctrico e não para outro que, contudo, tenha o mesmo aquecimento em serviço.

O conhecimento da estabilidade térmica dum isolante é indispensável, mas, tal como ela pode actualmente ser definida, tem apenas o interesse duma primeira indicação, que necessita de ser complementada com a experiência adquirida nos equipamentos em serviço. ■

(3) Editada pela Association Suisse des Electriciens.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CEI 505 (1975), *Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique*.
- [2] CEI 85 (1957), *Recommandations relatives à la classification des matières destinées à l'isolement des machines et appareils électriques en fonction de leur stabilité thermique en service*.
- [3] PETER H. G. ALLEN, ARNOLD TUSTIN, *The aging process in electrical insulation: A tutorial summary*, IEEE Trans. Elec. Insul., vol. EI-7, n.º 3 (Set. 1972), pp. 153-157.
- [4] THOMAS, W. DAKIN, *Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon*, AIEE Trans., vol. 67 (1948), pp. 113-122.
- [5] L. J. BERBERICH, T. W. DAKIN, *Guiding principles in the thermal evaluation of electrical insulation*, AIEE Trans. (Power App. Syst.), vol. 75 (Ago. 1956), pp. 752-761.
- [6] A. M. LOCKIE, *Thermal classification of insulating materials and systems*, Proc. 9th. IEEE Electrical Insulation Conf. (1969), paper 69C 33-EI, pp. 77-79.
- [7] CEI 216-1 (1974), *Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques — Première partie: Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique*.
- [8] CEI, Document 15B (Secrétariat) 43 (Mar. 1975), *Guide for the determination of thermal endurance properties, thermal endurance profiles and temperature indices of electrical insulating materials, Part. 3: Statistical methods for the determination of thermal endurance profile*.
- [9] ANDREAS KELEN, *Aging of insulating materials and equipment insulation in service and tests*, IEEE Trans. Elec. Insul., vol. EI-12, n.º 1 (Fev. 1977), pp. 55-60.
- [10] CEI 216-2 (1974), *Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique des matériaux isolants électriques — Deuxième partie: Liste des matériaux et des essais existants*.
- [11] CEI 243 (1967), *Méthodes d'essai recommandées pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides aux fréquences industrielles*.
- [12] F. AUGUST GOBA, *Bibliography on thermal aging of electrical insulation*, IEEE Trans. Elec. Insul., vol. EI-4, n.º 2 (Jun. 1969), pp. 31-58.