CDU 621.315.004.6
Material eléctrico
Desgaste

Envelhecimento tecnológico e suas causas

HERMÍNIO DUARTE RAMOS

Engenheiro Electrotécnico
Assistente da U.L. (Angola)

1 — INTRODUÇÃO

O envelhecimento dos materiais provoca alterações irreversíveis nas suas propriedades físicas, quer nas características eléctricas, como rigidez dielétrica, resistência de isolamento e perdas dielétricas, quer nas características mecânicas, tais como elasticidade, rigidez mecânica, etc.

Por isso se torna importante o conhecimento da duração de vida dos materiais isolantes, isto é, o tempo que decorre, sob determinadas condições de serviço, para que as suas propriedades características variem de valores de fronteira admissíveis. Através da avaliação parcial da duração de vida dos isolantes usados na construção dos aparelhos eléctricos, por exemplo, alternadores, motores, transformadores, condensadores, cabos, etc., obtém-se uma indicação da duração de vida do respectivo equipamento.

No presente artigo definem-se os conceitos fundamentais ligados ao fenómeno geral do envelhecimento tecnológico a partir de noções aplicadas à vida humana (sobrevivência e duração de vida), e caracterizam-se, pela sua importância no comportamento das máquinas e cabos eléctricos, os envelhecimentos térmico e eléctrico dos isolantes paralelamente com o envelhecimento mecânico.

2 — DURAÇÃO DE VIDA HUMANA

Processos estatísticos permitem definir para os seres animados uma duração de vida que, aplicada ao homem, constitui um instrumento matemático de revelado valor económico, por exemplo, na técnica de seguros, ou como índice de assistência social de uma sociedade, já com valor político.

Observando-se a percentagem de pessoas vivas que nasceram antes de uma certa data de referência, obtém-se por representação gráfica

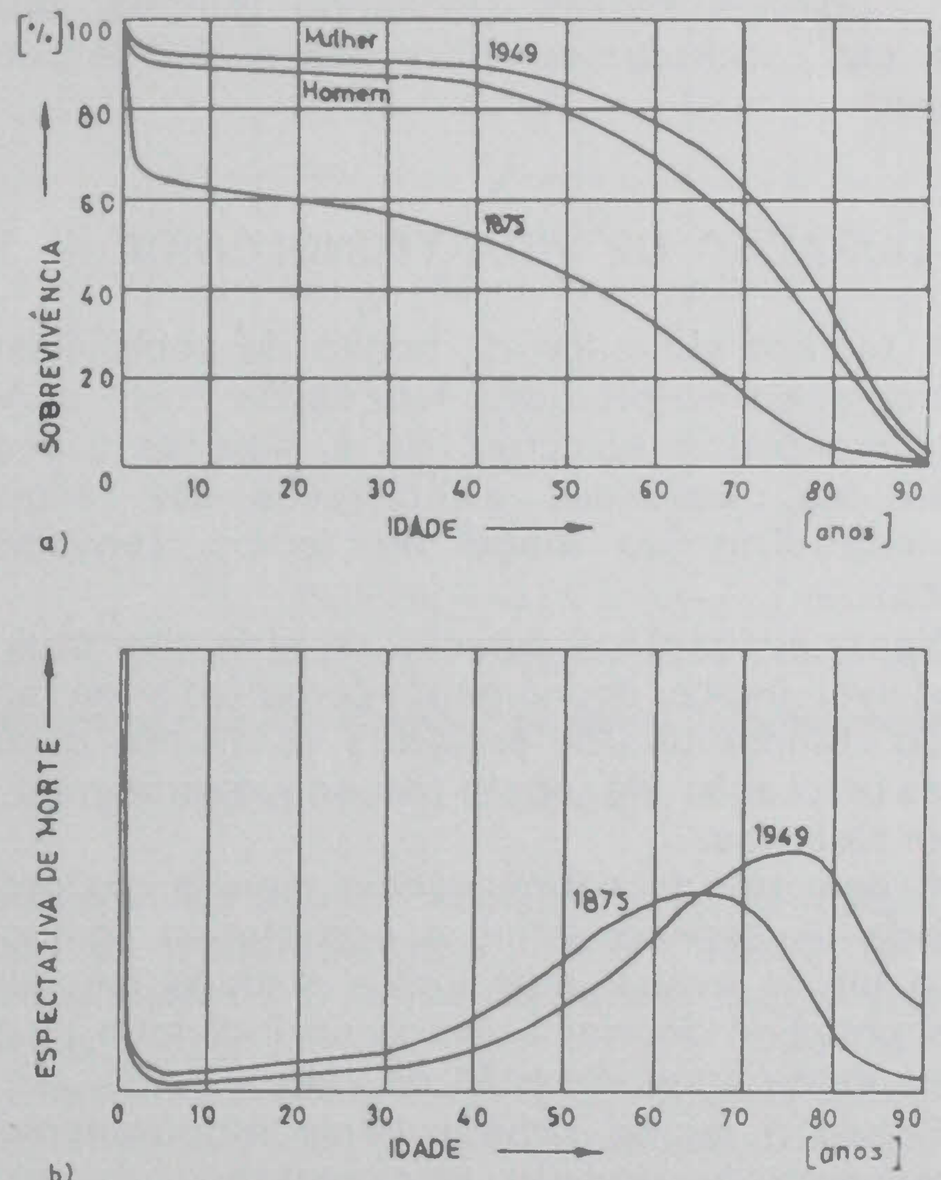


Fig. 1 — Duração de vida humana
a) Sobrevivência na Alemanha [1];
b) Expectativa de morte

dessa percentagem em função da idade num sistema de eixos rectangulares uma curva que traduz a lei de sobrevivência para essa data.

Será de esperar que esta lei seja monòtonamente decrescente com o aumento da idade, obtendo-se em geral uma curva para os seres do sexo masculino abaixo da correspondente curva para os seres femininos, quer dizer, a sobrevivência da mulher é probabilìsticamente superior à do homem (fig. 1-a).

A curva de sobrevivência é pois uma lei estatística e encontra-se ìntimamente relacionada com o envelhecimento do indivíduo.

O módulo da derivada da sobrevivência em ordem à idade determina um coeficiente incremental, que designaremos por espectativa de morte por dar indicação da maior ou menor probabilidade de o indivíduo deixar de existir em função da idade (fig. 1-b).

A idade correspondente ao máximo da espectativa de morte definimos como sendo a duração de vida.

Pela comparação das curvas de sobrevivência na Alemanha (fig. 1-a) em duas épocas diferentes (1875 e 1949) verifica-se que a mortalidade diminuíu notàvelmente em consequência do progresso social, em especial no referente à mortalidade infantil.

Observa-se que por virtude da melhoria de condições de vida em cada período anual (índice de progresso social) a curva de sobrevivência não se mantém. De um modo geral, as modificações das condições sociais (incluíndo guerras, epidemias, etc.) introduzem alterações na lei de sobrevivência.

3 — DURAÇÃO DE VIDA TECNOLÓGICA

A técnica serviu-se da noção de sobrevivência considerando os produtos fabricados e em serviço como indivíduos-técnicos, isto é, sujeitos à degradação das qualidades tecnológicas das respectivas estruturas ao longo do tempo (envelhecimento).

Nesta aplicação a duração de vida constitui um apreciável índice económico, como seja na apreciação comparativa de produtos da mesma espécie ou na avaliação do ponto de encomenda nos armazenamentos.

A derivada da sobrevivência técnica em ordem à idade de serviço define a espectativa de inoperação ou de avaria, pois indica a idade em que é mais provável ocorrer a avaria do indivíduo, a qual corresponde à sua duração de vida.

Sendo a lei de sobrevivência monòtonamente decrescente geralmente a espectativa de avaria toma valores pouco superiores a zero, excluíndo casos de envelhecimento prematuro (pois teòricamente a variação da lei de sobrevivência é de zero a infinito). No entanto para o cálculo da duração de vida apenas interessa o andamento qualitativo ao longo da idade. Para os casos singulares em que a sobrevivência tem uma variação uniforme a duração de vida corresponde a um valor arbitràriamente reduzido da sobrevivência.

Assim no caso das lâmpadas de incandescência verifica-se que a partir das 500 horas de serviço começam a queimar-se os respectivos filamentos, indicação do envelhecimento do material, tendo uma duração de vida da ordem das 1050 horas (fig. 2), altura em que é máxima a espectativa de avaria.

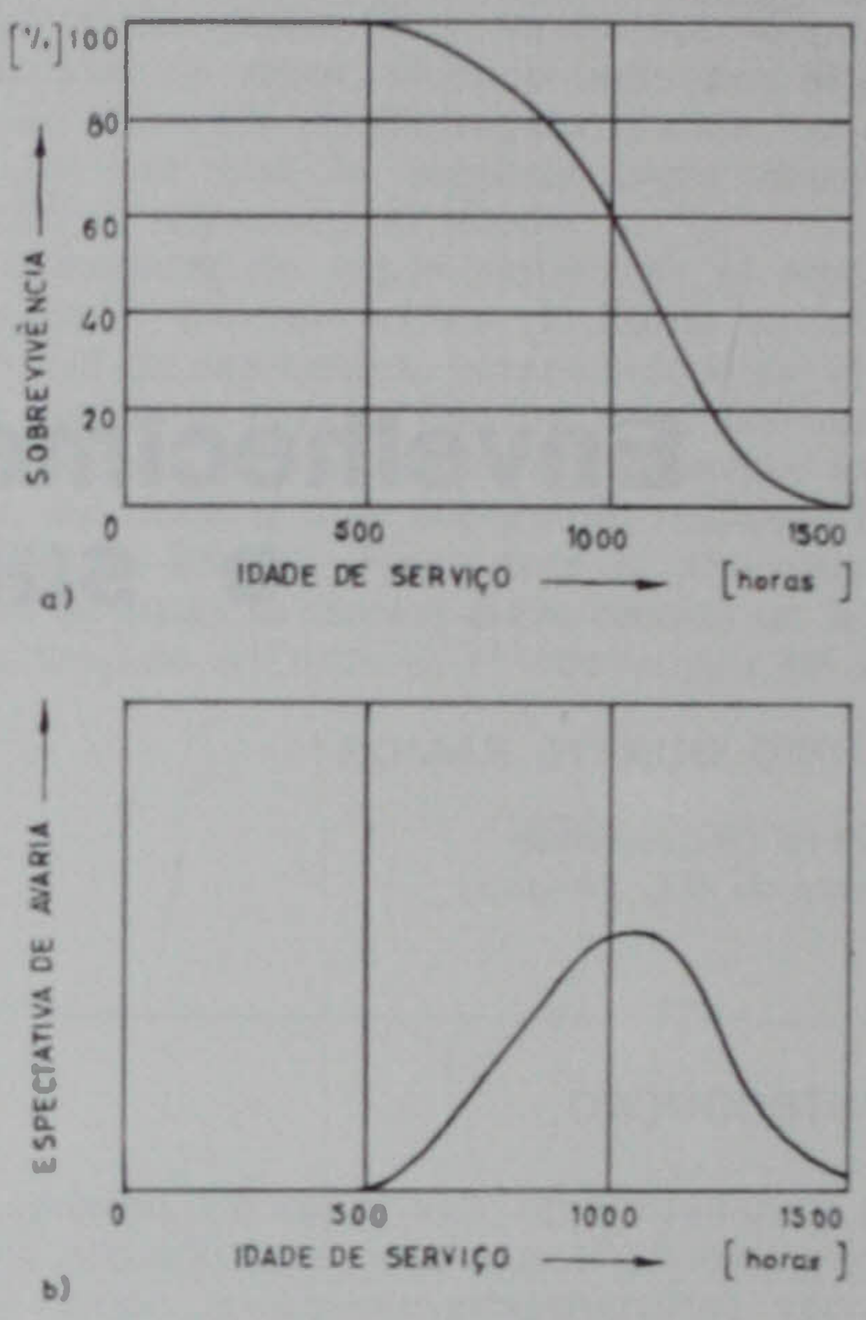


Fig. 2 — Duração de vida das lâmpadas incandescentes
a) Sobrevivência [1]
b) Expectativa de inoperação

3.1 — Influência da longa duração

Se se trata de equipamentos de elevado custo, como é o caso típico das máquinas eléctricas de grande potência, as noções simples apresentadas são de difícil aplicação dada a longa duração destes produtos e o progressivo desenvolvimento das técnicas.

De facto nos indivíduos-técnicos de longa duração manifesta-se a influência da melhoria das condições técnicas de produção e exploração, tal como acontece com a influência das condições sociais no caso dos seres humanos. Há todavia uma diferença: o número de produtos técnicos fabricados por cada série homogénea de produção é relativamente pequeno, o que restringe o valor do estudo estatístico.

3.2 — Influência das partes do indivíduo

Uma máquina é formada por vários orgãos vitais, cada um com as suas características tecnológicas, sendo portanto a sua duração de vida função do envelhecimento de cada uma das partes e do correspondente progresso tecnológico.

Geralmente a inoperação de uma máquina resulta da avaria de uma das partes. Mas a sua duração de vida, nestas circunstâncias, poderá prolongar-se através da correspondente reparação.

Deste modo, por um lado o instante de inoperação definitiva da máquina depende fundamentalmente da decisão humana do explorador, e por outro lado uma máquina reparada constitui um novo indivíduo, deixando de pertencer ao grupo das restantes máquinas da mesma série de produção, isto é, sob o aspecto de sobrevivência dessa série de produção este indivíduo comporta-se como inoperativo.

Uma maneira de rodear a dificuldade consiste em encarar a máquina nas suas partes fundamentais e estabelecer curvas de sobrevivência para cada uma delas. Por exemplo, a duração de vida do enrolamento de uma máquina, determinada pelas propriedades do seu isolamento, é igual ao intervalo de tempo que decorre entre a entrada em serviço da máquina e a sua completa substituição (fig. 3-a). O momento de cada renovação é definido quando a ocorrência de avarias torna a exploração anti-económica, segundo o critério clássico, ou, como modernamente se procede, quando os ensaios de inspecção em serviço revelam grande probabilidade de ocorrer avaria.

Outra solução para a dificuldade da concretização da duração de vida de uma máquina consiste em determinar curvas de sobrevivência de 1.º grau, referida à primeira renovação por envelhecimento, de 2.º grau, e assim sucessivamente (fig. 3-b).

A duração de vida de uma máquina é resultante das sucessivas renovações, correspondentes às sucessivas avarias nas suas partes. O aparecimento de avarias pode ser tomado como uma medida do envelhecimento, evidentemente de escasso valor científico.

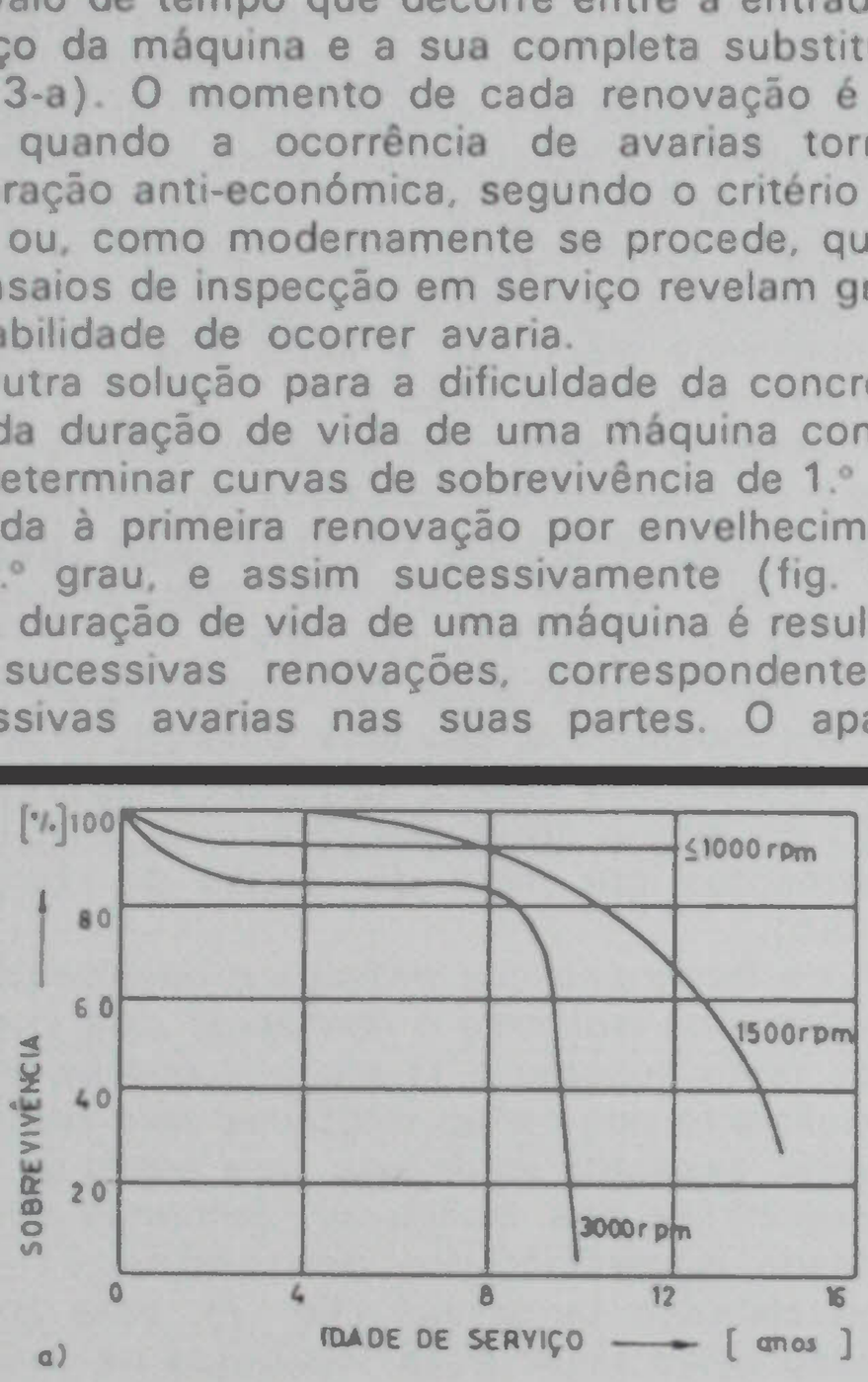


Fig. 3 — Duração de vida de alternadores trifásicos
a) **Sobrevivência de indutores (potência de 9 a 12 MVA) para diferentes velocidades [2]**
b) **Sobrevivência de estatores para diversas potências nominais [1]**

Way [3] analisou grande número de enrolamentos de alternadores de diversas idades tendo constatado que abaixo de 81°C é insignificante o número de avarias. Baseado nos seus resultados traçou-se a variação do número médio de avarias por enrolamento (fig. 4), concluindo-se que entre 81°C e 100°C o número de avarias é aproximadamente proporcional à idade de tal modo que a renovação total do enrolamento se verifica para idades muito altas, da ordem dos vinte anos, e entre 101°C e 130°C a primeira renovação deverá efectuar-se após dez anos mantendo-se uma duplicação do número de avarias por cada três anos.

3.3 — Factores do Envelhecimento

Os exemplos apresentados indicam como factores do envelhecimento a temperatura (fig. 4), que define o envelhecimento térmico, a potência nominal (fig. 3-b), de certo modo relacionada com o envelhecimento eléctrico e a velocidade (fig. 3-a) que implica no envelhecimento mecânico.

Todavia as causas imediatas dos mecanismos de degradação deverão investigar-se para cada caso particular.

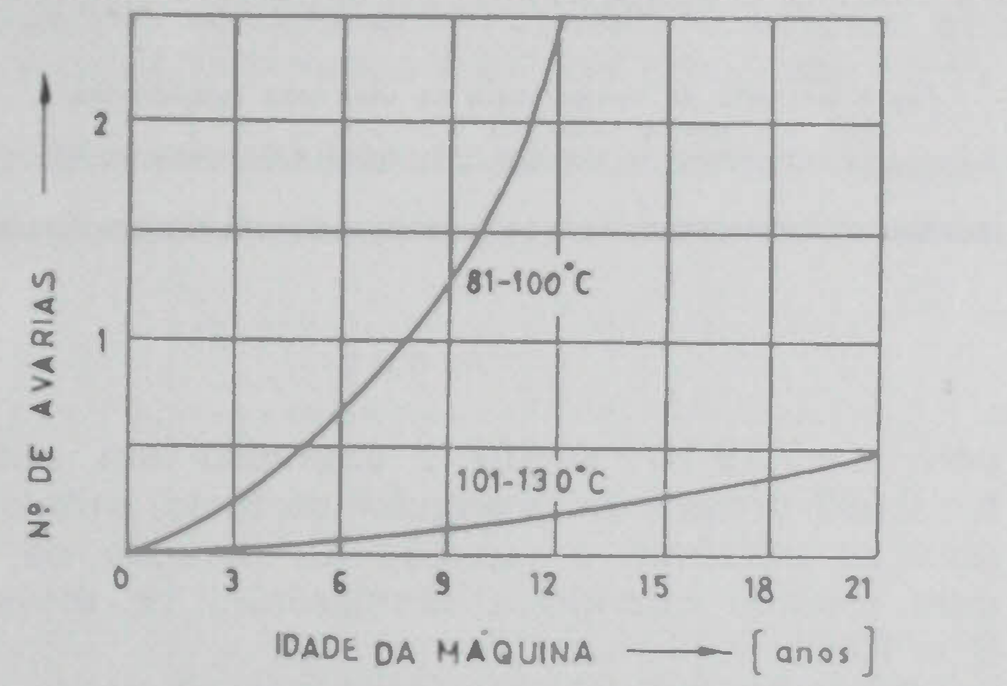


Fig. 4 — Número de avarias em enrolamentos de alternadores para diferentes temperaturas

4 — ENVELHECIMENTO TÉRMICO

O envelhecimento térmico é uma função do tempo e da temperatura, numa relação tal que quanto maior for a temperatura menor é a duração de vida.

Montsinger ocupou-se do problema do envelhecimento térmico de transformadores tendo estabelecido uma importante regra prática, conhecida pelo seu nome [4]: quando a temperatura de serviço se eleva de cerca de 10°C a duração de vida reduz-se a metade. Esta lei empírica resultou de vários ensaios em enrolamentos com isolamento de papel e algodão que, para uma gama de 80°C a 104°C, corresponde a uma recta numa representação gráfica semi-logarítmica da temperatura θ em função da duração t (fig. 5-a) e que analìticamente se traduz pela expressão exponencial

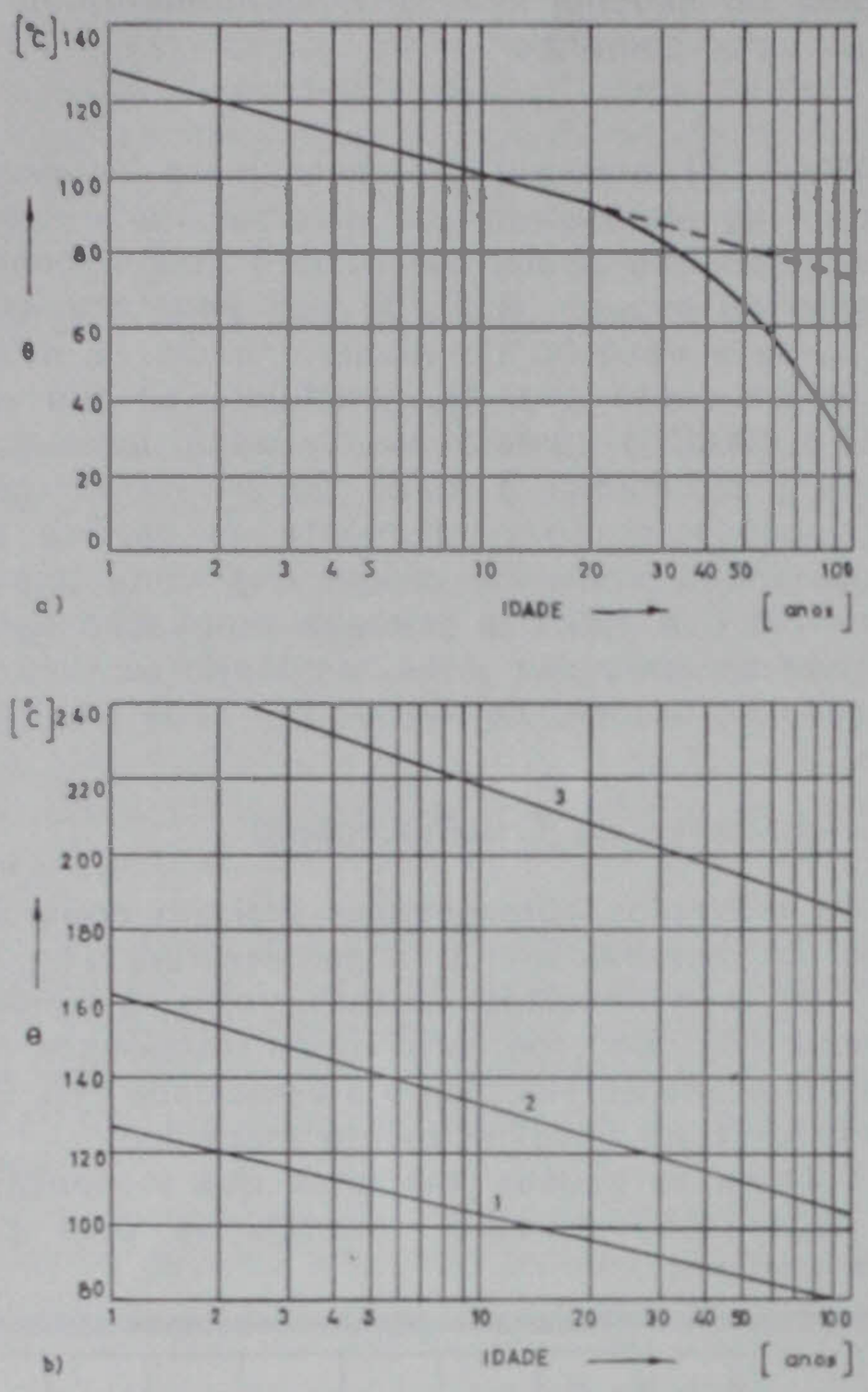


Fig. 5 — Efeito da temperatura na vida dos isolamentos
a) Papel e mica [4]
b) Papel e algodão (1), mica (2) e silicon (3) [6]

$$t = a.\ e^{-b\theta} \qquad (1)$$

com $a = 7{,}15.10^{4}$ sendo t expresso em anos e $b = 0{,}088$ o coeficiente angular da recta, através da qual se confirma a redução da duração de vida para metade quando a temperatura de eleva de 8 a 10°C.

Baseado em reacções químicas Buessing [5] estudou teòricamente as leis da duração de vida para materiais isolantes, concluindo que para reacções monomoleculares de dissociação ($AB \rightarrow A + B$) e para reacções bimoleculares de combinação ($A + B \rightarrow AB$) a duração de vida e a temperatura absoluta se relacionam por meio de uma exponencial

$$t = a.\ e^{-\frac{b}{T}} \qquad (2)$$

Esta expressão define uma recta numa representação semi-logarítmica ln$t$ em função de 1/T. Contudo mostra que a fórmula de Montsinger é uma boa aproximação para baixas temperaturas ($\theta << 273$). Aliás esta mesma conclusão de validade também está evidenciada na curva original de Montsinger.

Verificou porém, para outros tipos de reacções, expressões cuja representação semi-logarítmica deixa de ser linear.

5 — ENVELHECIMENTO ELÉCTRICO

Na base do envelhecimento eléctrico reside o fenómeno físico da ionização das cavidades preenchidas com ar existentes no seio dos dieléctricos, dando origem às chamadas descargas parciais que têm como efeitos principais a perturbação da estrutura cristalina do dieléctrico e a formação de reacções químicas secundárias, em especial nos isolantes orgânicos, com a formação de ácidos (por exemplo, devido ao aparecimento de óxido de azoto em presença de humidade) que atacam os materiais. Além disso nas zonas onde se realizam as descargas localizam-se elevadas temperaturas que degradam o papel e algodão dos isolantes clássicos e as folhas de isolantes orgânicos modernamente utilizados.

Neste tipo de envelhecimento participam por conseguinte mecanismos puramente eléctricos (electrónicos e iónicos) acompanhados de processos químicos e térmicos, mas surgem também acções mecânicas devidas às forças exercidas pelo campo eléctrico sobre as camadas do dieléctrico.

As cavidades, quer por defeito de fabrico quer por efeitos electromagnéticos, formam-se sobretudo nas curvas dos isolamentos dos enrolamentos das máquinas eléctricas e junto dos condutores e baínhas dos cabos eléctricos.

O envelhecimento manifesta-se entre as cavidades e os eléctrodos respectivos por um processo que a técnica denominou de arborização (treeing), dada a sua forma ramificada, que termina na disrupção do dieléctrico (fig. 6-a).

Em geral a apreciação do comportamento dos materiais isolantes a elevados esforços eléctricos faz-se através das curvas da rigidez dieléctrica em função do tempo até à disrupção (fig 6-b) e dos equipamentos por meio da tensão de disrupção (fig. 6-c).

Outro fenómeno que provoca o envelhecimento prematuro dos isolantes é conhecido pela designação de rasto superficial (tracking), que se verifica especialmente nos cabos eléctricos sem baínha de protecção expostos ao ar livre, pela acção de arcos nas superfícies dos isolantes resultantes da condutividade superficial por contaminação e do campo eléctrico tangencial (fig. 7). Este facto é agravado pelas fugas superficiais que se verificam nos terminais dos cabos sobretudo na presença de humidade.

É evidentemente importante a consideração da resistência dos materiais ao rasto superficial noutras situações, por exemplo, nos transformadores de medida e no isolamento dos terminais dos disjuntores.

6 — ENVELHECIMENTO MECÂNICO

Quando os isolantes estão sujeitos a elevadas velocidades de rotação, como no caso dos motores e dos alternadores, as forças electromagnéticas que se exercem sobre os condutores provocam vibrações nos isolantes dos enrolamentos que vão degradando as suas propriedades. O movimento



(a)

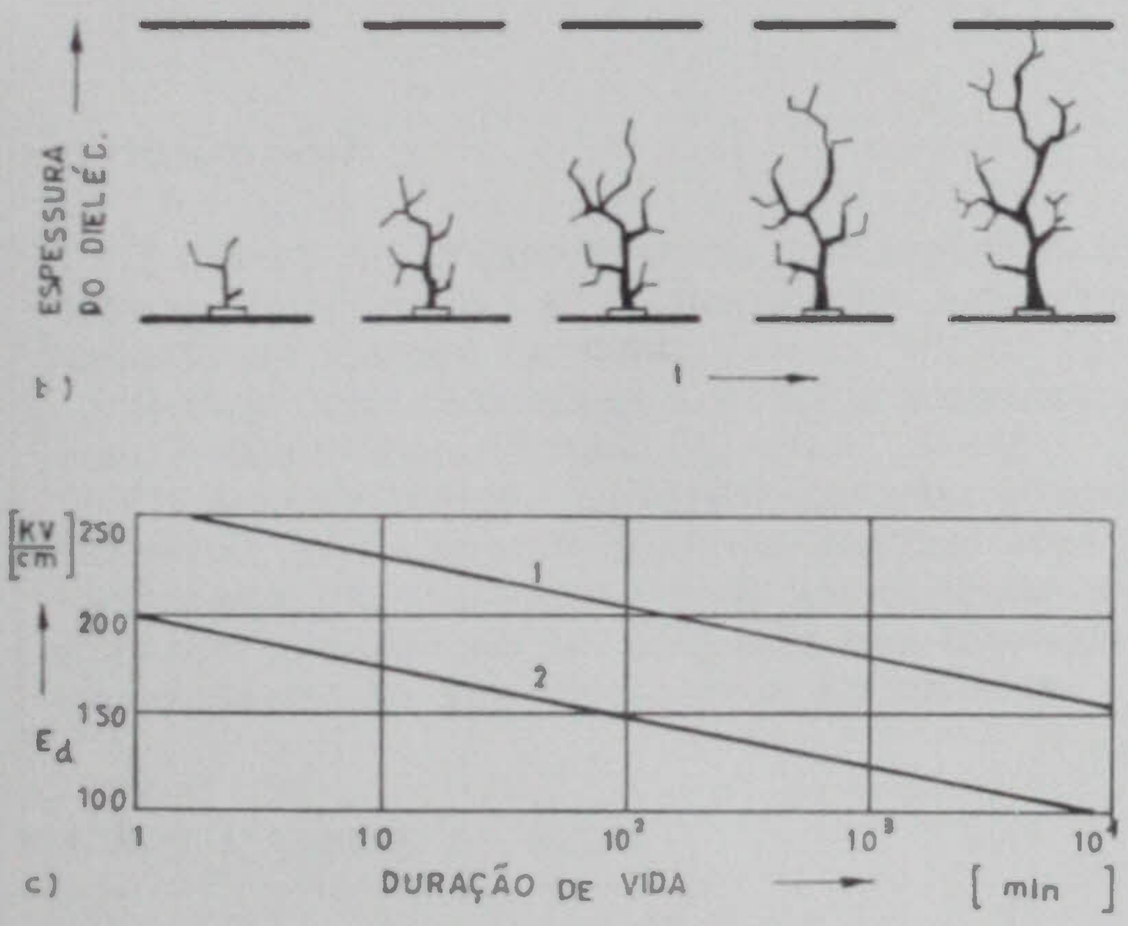


Fig. 6 — Efeito da ionização nos dieléctricos
a) Arborização em polistirene [7]
b) Desenvolvimento da arborização
c) Rigidez dieléctrica [8] de 3 mm de micadur (1) e de 3 mm de mica asfáltica (2)
d) Tensão de disrupção de transformadores de corrente 6 kV com isolamento de resina sintética vasada [9]

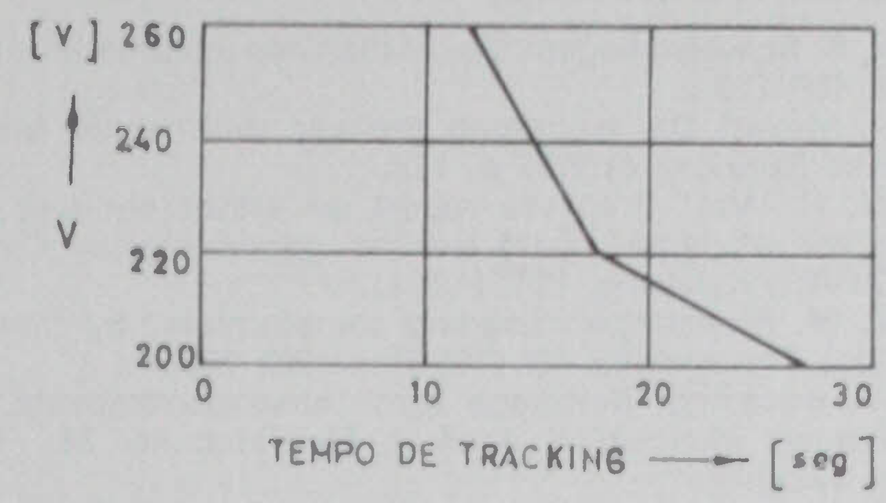


Fig. 7 — Efeito da tensão sobre o tempo de «tracking» em asbesto [10]

das cabeças das bobinas é aproximadamente elíptico, podendo em boa aproximação admitir-se circular.

Baseado em ensaios de envelhecimento mecânico realizados por Schmidt [19], que provocou 50 vibrações por segundo em barras de isolamento constituídas por folhas de Schellac, traçou-se a curva que representa a tensão de disrupção em função do tempo de envelhecimento, tendo-se constatado um tempo crítico para uma dada amplitude de vibração (fig. 8).

7 — CONCLUSÕES

Da análise exposta conclui-se que a duração de vida dos equipamentos eléctricos é condicionada pelo envelhecimento dos materiais isolantes e que este é função do tempo e de três grandezas essên-

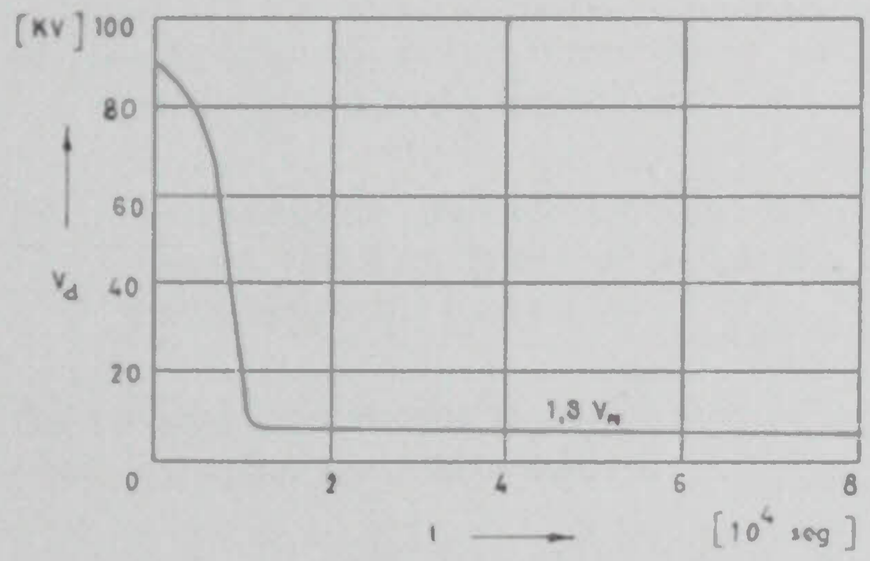


Fig. 8 — Efeito das vibrações (amplitude de 2,24 mm) sobre uma barra de folhas de Schellac a 20°C

ciais: temperatura, ionização (intrínseca e devida a heterogeneidades) e vibrações (amplitude e frequência).

Em cada um destes três domínios há um imenso campo de investigação. No que diz respeito à fadiga mecânica muito pouco se tem publicado. Em relação ao envelhecimento eléctrico são vários os caminhos em estudo, desde a análise microscópica à interpretação macroscópica do fenómeno, mas em todos se encontram actualmente deficiências de esclarecimento que se traduzem numa compreensão global imperfeita. O processo térmico foi o que melhor explicação encontrou.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. F. Schwenkhagen: Der Maschinenschaden 25 (1912) p. 105-116.
[2] H. Meyer: Die Isolierung grosser elektrischer Maschinen, Springer (1962) p. 123.
[3] W. R. Way: Progress report on stator winding insulation of large hydro-electric generators in Canada, CIGRE - Relatório 111 (1954).
[4] V. M. Montsinger: Loading transformers, by temperature, Trans. AIEE 49 (1930) p. 782-785.
[5] W. Buessing: Beitraege zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen, Arch. f. Elekrotechnik 36 (1942) p. 333-361.
[6] G. Lesch: Lehrbuch der Hochspannungskchnik, Springer (1959) p. 273. (segundo AEG).
[7] J. H. Mason: Dielectric breakdown in solid insulation, Progress in Dielectrics 1 (1959) p. 25.
[8] B. Doljah e O. Wohlfahrt: Die Isolation von Statorwicklungen in Hochspannungsmaschinen, BBC Mitteilung 51 (1964) p. 274-280.
[9] J. Golinski: Ionisationserscheinungen und Fragen der Lebensdauer von Giessharzisolationen, Elektrie (1966) p. 341-343.
[10] V. E. Yarsley e G. C. Ives: Testing insulating materials for susceptibility to tracking, Proc. IEE 100 II A (1953) p. 289-296.
[11] D. Schmidt: Die Alterung von Hochspannungsisolierungen elektrischer Maschinen infolge mechanischer Schwingungen, Elektrie p. 177-180.

resumo

ENVELHECIMENTO TECNOLÓGICO E SUAS CAUSAS

Definem-se as noções de sobrevivência e duração de vida aplicadas ao homem e à técnica e apresentam-se os factores principais, que contribuem para os envelhecimentos térmico, eléctrico e mecânico.

resumé

VIEILLISSEMENT TECHNOLOGIQUE ET SES CAUSES

D'après les notions de survie et de durée de vie ou discute le phenomène du vieillissement des isolants, en particulier dans les cas du vieillissement thermique, électrique et mécanique.

synopsis

TECHNOLOGICAL AGEING AND ITS CAUSES

The duration of life servs to discuss the performance of materials in service and to define the main factors of thermal, electrical and mechanical aging.