

Determinação da corrente máxima admissível por uma máquina eléctrica

C. Pereira Cabrita (*)
A. Leão Rodrigues (**)

abstract

The paper presents the heating and cooling universal temperature-rise curves for an ideal homogeneous body, internally heated and surface cooled; based on these curves, a boundary condition of an electrical machine for safe overload times when starting from ambient temperature is derived. The method described is supposed to be original and is valid for any type of electrical machine.

Experimental results obtained from a low speed three-phase linear induction prototype machine are displayed, which confirm the validity of the referred method.

resumo

Neste trabalho apresentam-se as curvas universais da evolução do aquecimento e do arrefecimento de um corpo ideal homogéneo, aquecido internamente e arrefecido superficialmente; com base nelas, deduz-se a curva da corrente máxima admissível e da corrente de sobrecarga em função do tempo para uma máquina eléctrica. O método da determinação da corrente máxima admissível aqui descrito é suposto ser original e é válido para qualquer tipo de uma máquina eléctrica.

Como prova da validade do método, apresentam-se os resultados experimentais obtidos no ensaio de aquecimento de um protótipo de um motor linear de indução trifásico para baixas velocidades.

1. Introdução

A vida média de uma máquina eléctrica, ou de um dispositivo eléctrico em geral, depende fundamentalmente dos efeitos térmicos, mecânicos e dieléctricos

que podem ocorrer nesse equipamento. Estes efeitos têm normalmente origem numa sobreintensidade de corrente (curtocircuito ou sobrecarga).

Como é sabido, o curto-circuito é uma sobreintensidade que dá origem a uma corrente violenta e de curta duração (muito maior que a corrente nominal do equipamento) e que se estabelece subitamente por qualquer contacto accidental, falsa manobra, erro de ligações ou falta de isolamento. A sobrecarga é uma sobreintensidade de valor um pouco maior que a corrente nominal e se estabelece gradualmente durante um tempo apreciável. É o caso de um motor eléctrico

(*) C. Pereira Cabrita, Doutorada pela U. T. L., Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores do Instituto Superior Técnico.

(**) A. Leão Rodrigues, Ph.D., M.Sc. (D.I.C.), Professor Associado da Faculdades de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

ao qual se pede uma potência um pouco superior à sua potência nominal.

Qualquer tipo destas sobreintensidades dá efectivamente lugar, numa máquina eléctrica, a:

- **efeitos térmicos**, que, no caso do curto-circuito, produzem calor que não chega a ser dissipado por radiação e/ou convecção provocando a fusão dos condutores com conseqüente perigo de incêndio;
- **efeitos mecânicos**, que são devidos aos esforços electrodinâmicos entre condutores (forças de Laplace) que, no caso de um curto-circuito, chegam a atingir algumas centenas de kg/m, suficientes para causar a destruição mecânica das partes do circuito eléctrico;
- **efeitos dieléctricos**, que destroem o isolamento dos condutores eléctricos. É o caso de uma sobrecarga permanente que origina a deterioração lenta do isolamento. Com efeito, quando se utiliza um material isolante a uma temperatura θ_0 pode esperar-se que durante um tempo t_0 as suas características dieléctricas e mecânicas se mantenham inalteráveis. Porém, se se aumentar a temperatura de funcionamento para $\theta > \theta_0$, o tempo durante o qual o material mantém as mesmas características é $t < t_0$.

Segundo Montsinger, em ensaios feitos sobre materiais isolantes orgânicos, a subida de 10°C na temperatura de funcionamento faz reduzir para metade a vida do isolante, o que pode ser traduzido pela seguinte relação

$$t = t_0 \cdot 2^{-\frac{\theta - \theta_0}{10}}$$

A vida média do isolante é portanto função do tempo e da temperatura a que este está sujeito, sendo a temperatura obviamente função da intensidade de corrente que atravessa o condutor e da sua resistência óhmica.

O conhecimento da corrente máxima I_{max} admissível em função do tempo t , para um dado nível de isolamento θ_n , é portanto um elemento fundamental para o bom funcionamento, dentro dos limites de segurança, de uma máquina eléctrica. É essa função $I_{max} = f(\theta_n, t)$ que, a partir do ensaio de aquecimento da máquina, se pretende mostrar, ao longo deste trabalho, como determinar.

2. Curva da evolução do aquecimento

Considere-se uma máquina eléctrica como sendo idealmente um corpo homogêneo desenvolvendo calor no seu enrolamento a ritmo constante e em condições invariantes de ventilação superficial. Nestas condições, o aumento de temperatura da sua superfície é directamente proporcional à potência de aquecimento e inversamente proporcional à superfície efectiva de emissão de calor. A temperatura final da máquina é atingida quando o calor produzido for igual ao calor dissipado (equilíbrio térmico).

A fim de escrever a equação que traduz este balanço térmico, represente-se por $S(\text{m}^2)$ a superfície efectiva de emissão de calor, $G(\text{kg})$ a massa total da máquina, $h(\text{J/kg}/^\circ\text{C})$ o seu calor específico e θ ($^\circ\text{C}$) a temperatura num dado instante $t(\text{s})$. Se for $p(\text{W})$ a taxa de produção de calor, no intervalo de tempo dt será produzida a energia calorífica pdt , sendo armazenada a quantidade de energia $Ghd\theta$ e dissipada a parcela $S\theta\lambda dt$, onde $\lambda(\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C})$ representa o calor específico (ou coeficiente de ventilação da máquina). Como as energias caloríficas armazenadas na máquina e dissipadas para o exterior deverão igualar a energia calorífica gerada no enrolamento, a equação diferencial que traduz este balanço energético será

$$Ghd\theta + S\theta\lambda dt = pdt \quad (1)$$

cuja solução é

$$\theta - \theta_{amb} = (\theta_f - \theta_{amb}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

onde θ_{amb} representa a temperatura ambiente e

$$\theta_f = \frac{p}{\lambda S} \quad (3)$$

é a temperatura final (ou aquecimento de regime). A temperatura θ_f é atingida quando todo o calor produzido pela fonte se dissipa para o exterior e não há portanto mais calor armazenado. Na Eq. (2) a grandeza

$$\tau = \frac{Gh}{S\lambda} \quad (4)$$

representa a constante de tempo térmica e mede o tempo que a máquina demoraria a atingir a temperatura final se todo o calor produzido pela máquina

ficasse armazenado na sua massa sem haver dissipação para o exterior. Uma boa ventilação dá origem a pequenos valores de constantes de tempo térmicas, uma vez que, neste caso, o coeficiente de ventilação é elevado. O valor da constante de tempo térmica de uma máquina eléctrica pode variar desde alguns segundos até horas, ou mesmo dias, dependendo da massa G da máquina, da superfície de arrefecimento e da facilidade da transferência de calor para o exterior.

Exprimindo em valores por unidade (p.u) o tempo t e a sobrelevação de temperatura $\theta - \theta_{amb}$ tomando como base respectivamente a constante de tempo térmica τ e a sobrelevação máxima $\theta_f - \theta_{amb}$, isto é,

$$t^* = \frac{t}{\tau} \quad e \quad \theta^* = \frac{\theta - \theta_{amb}}{\theta_f - \theta_{amb}} \quad (5)$$

a Eq. (2) escreve-se na forma

$$\theta^* = 1 - e^{-t^*} \quad (6)$$

cujo andamento está representado na figura 1.

A Eq. (6) permite desde já concluir o seguinte:

- a lei do aquecimento em valores p.u. é universal e não depende em absoluto do sistema térmico considerado;
- a curva da evolução do aquecimento tende assintoticamente para a ordenada correspondente à temperatura de sobrelevação final $\theta_f - \theta_{amb}$, ou seja, $\theta^* = 1$;

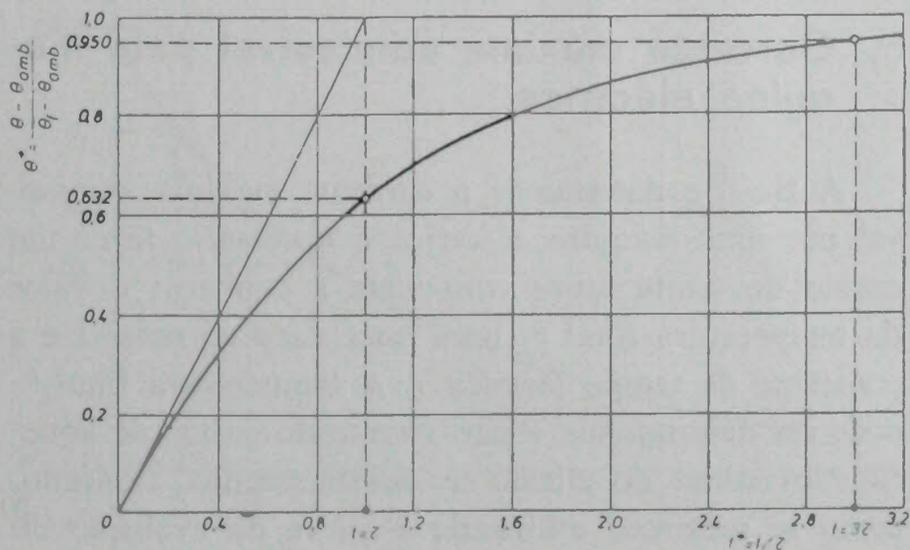


Fig. 1 — Curva universal da evolução do aquecimento

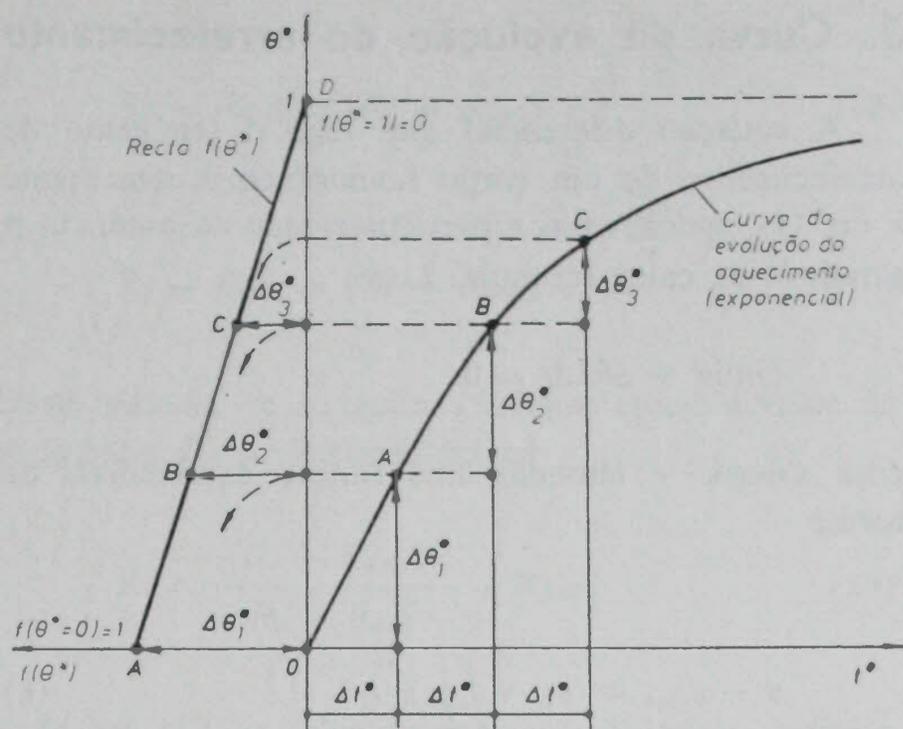


Fig. 2 — Variação linear dos incrementos de temperatura $\Delta\theta^*$ em função do aquecimento θ^* , para intervalos de tempo Δt^* iguais

- ao fim de um intervalo de tempo $t = \tau$, ($t^* = 1$), a temperatura atinge 63,2 % do seu valor final;
- a tangente geométrica à curva da evolução do aquecimento na origem dos eixos coordenados intercepta a assíntota $\theta^* = 1$ em $t = \tau$.

A figura 1 sugere que para conhecer experimentalmente a temperatura final $\theta_f - \theta_{amb}$ há necessidade de fazer ensaios durante um tempo infinito. Porém, na prática, atendendo ao andamento exponencial desta função, basta apenas fazer observações durante um tempo ligeiramente superior a uma constante de tempo térmica. Com efeito, derivando a Eq. (6), obtém-se

$$\frac{d\theta^*}{dt} = f(\theta^*) = 1 - \theta^* \quad (7)$$

que traduz a equação de uma recta definida pelos pontos A ($\theta^* = 0$, $f(\theta^*) = 1$) e D ($\theta^* = 1$, $f(\theta^*) = 0$), como está representada no 2.º quadrante da curva da evolução do aquecimento da figura 2. Para intervalos de tempo Δt^* iguais da curva inicial da evolução do aquecimento no 1.º quadrante, determinam-se os pontos A, B, C, ... que permitem traçar o segmento de recta no 2.º quadrante o qual, por extrapolação, determina o valor da temperatura final correspondente ao ponto D. Conhecido $\theta_f - \theta_{amb}$ é imediata a determinação da constante de tempo térmica τ através do traçado da tangente geométrica na origem à curva da evolução do aquecimento [1, 2].

3. Curva da evolução do arrefecimento

A equação diferencial que rege o fenómeno de arrefecimento de um corpo homogéneo é semelhante à Eq. (1), apenas com a particularidade da potência p geradora de calor ser nula. Logo

$$Ghd\theta + S\theta\lambda dt = 0$$

cuja solução é também uma função exponencial da forma

$$\theta - \theta_{amb} = (\theta_f - \theta_{amb}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

que decresce a partir do valor máximo de temperatura $\theta_f - \theta_{amb}$ previamente atingido. Em valores p.u. a Eq. (8) escreve-se

$$\theta^* = e^{-t^*} \quad (9)$$

cujo andamento está representado na figura 3. Por conseguinte,

- a lei de arrefecimento, expressa em valores p.u., é universal;
- a curva de arrefecimento dirige-se assintoticamente para a temperatura ambiente;
- ao fim de um intervalo de tempo $t = \tau$ ($t^* = 1$), a temperatura é igual a 36.8 % da máxima sobrelevação de temperatura $\theta_f - \theta_{amb}$;
- a tangente geométrica à curva de arrefecimento em $\theta^* = 1$, intercepta o eixo das abcissas em $t = \tau$.

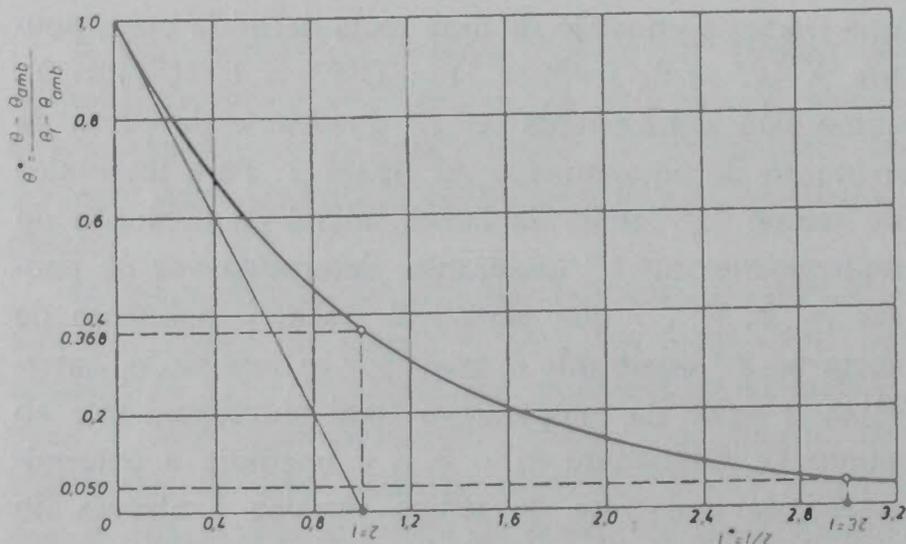


Fig. 3 — Curva universal da evolução do arrefecimento

Para um corpo homogéneo, a constante de tempo térmica de arrefecimento é igual à constante de tempo térmica de aquecimento. No entanto, numa máquina eléctrica com boa ventilação as constantes de tempo térmicas de aquecimento e de arrefecimento são diferentes, sendo esta última obviamente maior.

4. Métodos de medição da temperatura numa máquina eléctrica

Quando se procede aos ensaios de aquecimento ou de arrefecimento de uma máquina eléctrica, a temperatura pode ser medida pelos seguintes processos:

- Utilizando um termómetro aplicado sobre a superfície cuja temperatura se pretende medir (método directo).
- Utilizando sondas termopares embebidas em pontos estratégicos da máquina.
- Por variação da resistência óhmica dos enrolamentos (método indirecto).

Através deste último processo, a temperatura θ é calculada indirectamente pela expressão

$$R_\theta = R_{amb} [1 + \alpha (\theta - \theta_{amb})] \quad (10)$$

onde R_θ e R_{amb} representam as resistências óhmicas do enrolamento respectivamente à temperatura θ e à temperatura ambiente θ_{amb} e α é o coeficiente de temperatura do enrolamento (para o cobre $\alpha = 0.00382^\circ\text{C}^{-1}$). A resistência do enrolamento a uma dada temperatura pode ser medida directamente através de uma ponte de Kelvin.

5. Corrente máxima admissível pela máquina eléctrica

A fim de determinar a corrente máxima admissível por uma máquina eléctrica é necessário fazer um ensaio de temperatura com vista a conhecer o valor da temperatura final θ_f para uma dada corrente I e a constante de tempo térmica τ . A temperatura final θ_f pode ser determinada a partir tanto do ensaio de aquecimento como do ensaio de arrefecimento. Contudo, como se mostrou, utilizando a curva da evolução do aquecimento é necessário proceder-se a uma extrapolação, uma vez que θ_f só é atingida ao fim de um

tempo infinito. Por outro lado, a curva da evolução do arrefecimento é facilmente obtida injectando durante um curto intervalo de tempo uma corrente contínua suficientemente elevada e ajustando-a em seguida até se estabelecer o equilíbrio térmico. Na prática, o equilíbrio térmico é atingido quando a tensão aplicada não necessita mais de ajuste para manter a corrente I constante. Nesta situação a fonte de tensão é desligada da máquina e a partir desse instante mede-se em intervalos sucessivos a resistência do enrolamento e determina-se a temperatura θ através da Eq. (10), gerando assim a curva da evolução do arrefecimento em função do tempo.

Combinando as Eqs. (8) e (10) resulta

$$R_{\theta} - R_{amb} = (R_f - R_{amb}) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

onde R_{θ} é a resistência dos enrolamentos à temperatura θ no instante t e R_f é a resistência à temperatura θ_f no instante em que se interrompeu a corrente ($t = 0$). Portanto, a curva da evolução do arrefecimento poderá ser traçada em termos da temperatura do enrolamento da máquina ou da sua resistência óhmica (à parte um factor de escala), como mostra a figura 4.

A resistência R_f do enrolamento no instante de corte da corrente, correspondente à temperatura final de equilíbrio, é difícil de ser medida com rigor, uma vez que terá de decorrer algum tempo para se poder ligar a ponte de medida. O problema é facilmente solucionado medindo as resistências R_1 e R_2 do enrolamento em intervalos de tempo t_1 e $t_2 = 2t_1$. Para estes valores, resulta da Eq. (11)

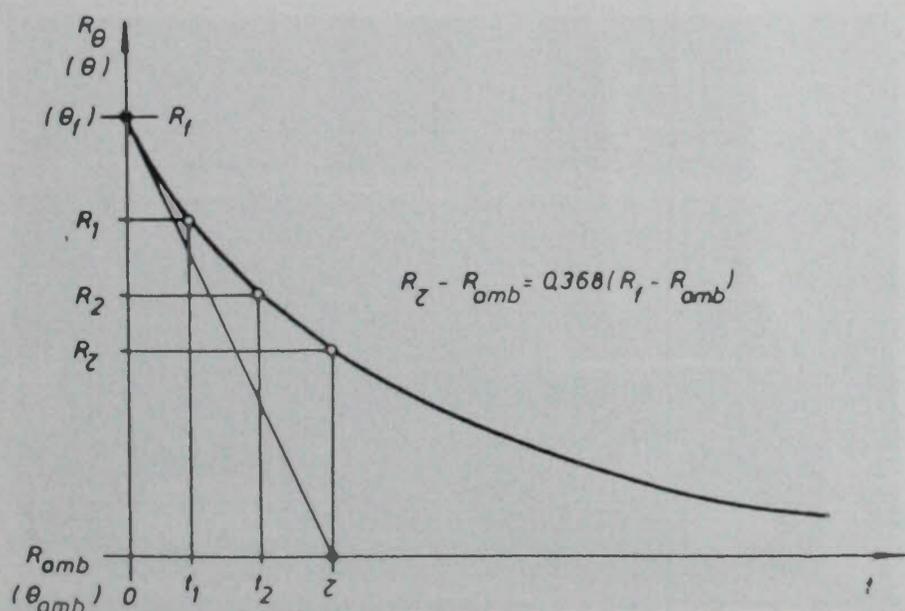


Fig. 4 — Curva da evolução do arrefecimento dos enrolamentos da máquina em termos da sua resistência óhmica

$$R_1 - R_{amb} = (R_f - R_{amb}) e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (12)$$

$$R_2 - R_{amb} = (R_f - R_{amb}) e^{-\frac{2t_1}{\tau}} \quad (13)$$

Deste sistema de equações obtém-se então o valor da resistência R_f no instante inicial

$$R_f = \frac{(R_1 - R_{amb})^2}{R_2 - R_{amb}} + R_{amb} \quad (14)$$

e da Eq. (12) o valor da constante de tempo térmica da máquina

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \frac{R_1 - R_{amb}}{R_2 - R_{amb}}} \quad (15)$$

A temperatura θ_f dos enrolamentos no instante em que a máquina é desligada ($t = 0$) correspondente a uma determinada curva da evolução do arrefecimento obtida a partir de uma corrente injectada I , é determinada pela combinação das Eqs. (10) e (14) que dá

$$\theta_f = \frac{1}{\alpha R_{amb}} \cdot \frac{(R_f - R_{amb})^2}{R_2 - R_{amb}} + \theta_{amb} \quad (16)$$

Conhecido θ_f correspondente a uma corrente particular I , poder-se-á determinar qual a corrente máxima em regime permanente que a máquina pode suportar sem que a correspondente sobrelevação de temperatura $\theta_{max} - \theta_{amb}$ ultrapasse o valor imposto pela respectiva classe de isolamento; esta corrente, designada por I_{max} , representa a corrente nominal da máquina. Com efeito, como a sobrelevação de temperatura $\theta_f - \theta_{amb}$ é, de acordo com a Eq. (3), proporcional às perdas de Joule $p = RI^2$ no enrolamento, vem

$$\theta_f - \theta_{amb} = \frac{\Delta R}{\lambda S} I^2 \quad (17)$$

onde $\Delta R = R_f - R_{amb}$. Admitindo que $\Delta R \simeq R_{max} - R_{amb}$, a corrente I_{max} produz uma sobrelevação máxima de temperatura dada por

$$\theta_{max} - \theta_{amb} = \frac{\Delta R}{\lambda S} I_{max}^2 \quad (18)$$

Dividindo membro a membro as Eqs. (17) e (18) e manipulando termos, resulta

$$I_{max} = I \sqrt{\frac{\theta_{max} - \theta_{amb}}{\theta_f - \theta_{amb}}} \quad (19)$$

Convém aqui referir que a Eq. (19) erra por defeito, uma vez que a hipótese de $\Delta R = \text{constante}$ nas Eqs. (17) e (18) nas condições de corrente constante não é estritamente correcta, uma vez que ΔR aumenta com a sobrelevação de temperatura.

Determinada a constante de tempo térmica τ a partir da Eq. (15) e I_{max} a partir da Eq. (19) e atendendo à Eq. (2) é possível escrever a relação

$$\theta - \theta_{amb} = (\theta_{max} - \theta_{amb}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \left(\frac{I_{max}}{I}\right)^2 \quad (20)$$

que permite determinar a temperatura θ do enrolamento da máquina para uma dada corrente I em qualquer instante t . Inversamente, é possível determinar a corrente I através do enrolamento da máquina em qualquer instante t de forma a não ultrapassar a sobrelevação de temperatura $\theta_{max} - \theta_{amb}$ imposta pela classe do seu isolamento. Com efeito, fazendo na Eq. (20) $\theta = \theta_{max}$, resulta

$$t = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{I_{max}}{I}\right)^2\right] \quad (21)$$

cujo andamento, em coordenadas semi-logarítmicas, é uma hipérbole quadrática tendendo para a assíntota I_{max} [3].

Sendo por definição $sc = I/I_{max}$ a sobrecarga da máquina eléctrica e atendendo às Eqs. (5), resulta

$$sc = \left(1 - e^{-\frac{t^*}{\tau}}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

cujo andamento, em coordenadas semi-logarítmicas, está representado na figura 5. A Eq. (22) mostra que a lei de sobrecargas da máquina, expressa em valores p.u., é universal, não dependendo em absoluto do tipo de máquina ou das suas características [4].

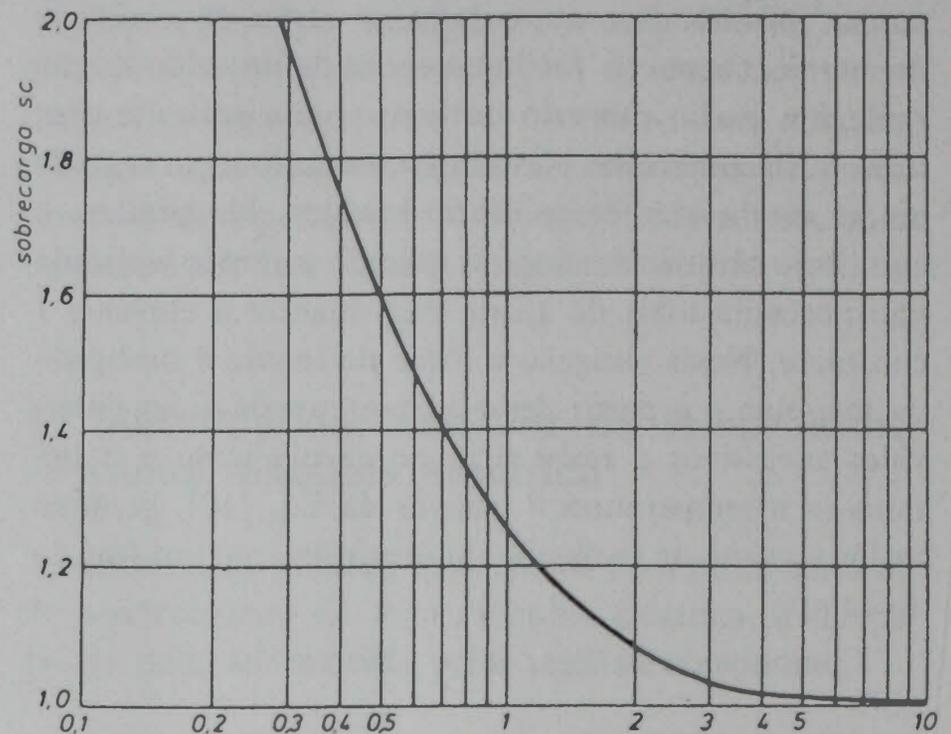


Fig. 5 — Curva universal de sobrecargas

6. Resultados experimentais

Como suporte experimental da teoria exposta, procedeu-se aos ensaios de aquecimento de um protótipo de uma máquina linear de indução trifásica de duplo estator [5], os quais permitem determinar a corrente máxima que a máquina pode suportar durante um certo tempo sem se danificar.

Os ensaios foram realizados com ventilação natural e ventilação forçada, tendo sido utilizada uma turbina de 1/4 CV para o ensaio de ventilação forçada.

Na figura 6 mostra-se a disposição dos estatores no respectivo banco de ensaios, bem como a turbina de ventilação. Para que a corrente fosse igual ao longo de todo o enrolamento, as três fases dos dois estatores

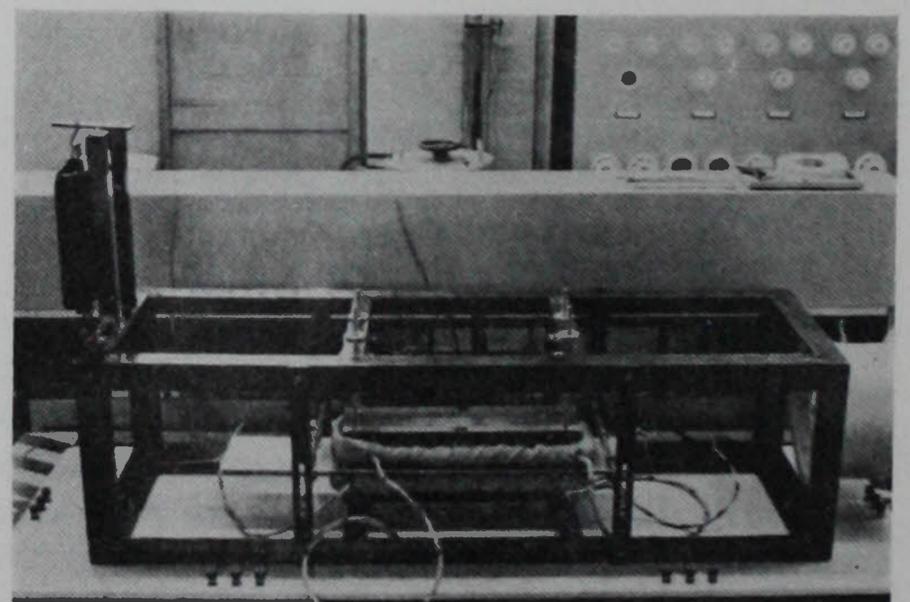


Fig. 6 — Máquina linear de indução trifásica de duplo estator durante o ensaio de aquecimento

foram ligadas em série, constituindo assim um único enrolamento que foi posteriormente alimentado em corrente contínua.

Atingido o equilíbrio térmico, a corrente foi desligada e a resistência ôhmica do enrolamento medida ao longo do tempo por meio de uma ponte de Kelvin. Os resultados obtidos para a curva da evolução do arrefecimento do enrolamento com ventilação natural encontram-se expressos na figura 7 a) e com ventilação forçada na figura 7 b). Recorrendo a estas curvas, determinaram-se os seguintes valores:

a) Com ventilação natural

Considerando os instantes $t_1 = 2$ min e $t_2 = 4$ min na figura 7 a), as resistências ôhmicas correspondentes são $R_1 = 44.1 \Omega$ e $R_2 = 43.9 \Omega$ respectivamente. Medindo previamente $R_{amb} = 40.3 \Omega$ e $\theta_{amb} = 16.0^\circ \text{C}$, as Eqs. (14), (15) e (16) dão respectivamente

$$\begin{aligned} R_f &= 44.3 \Omega \\ \tau &= 37.0 \text{ min} \\ \theta_f &= 42.0^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Admitindo que o limite de temperatura imposta pela classe do isolamento é $\theta_{max} - \theta_{amb} = 125^\circ \text{C}$ (classe H), a corrente nominal I_{max} admissível, para a corrente de equilíbrio térmico $I = 1.5 \text{ A}$, é calculada pela Eq. (19) que dá $I_{max} = 3.3 \text{ A}$.

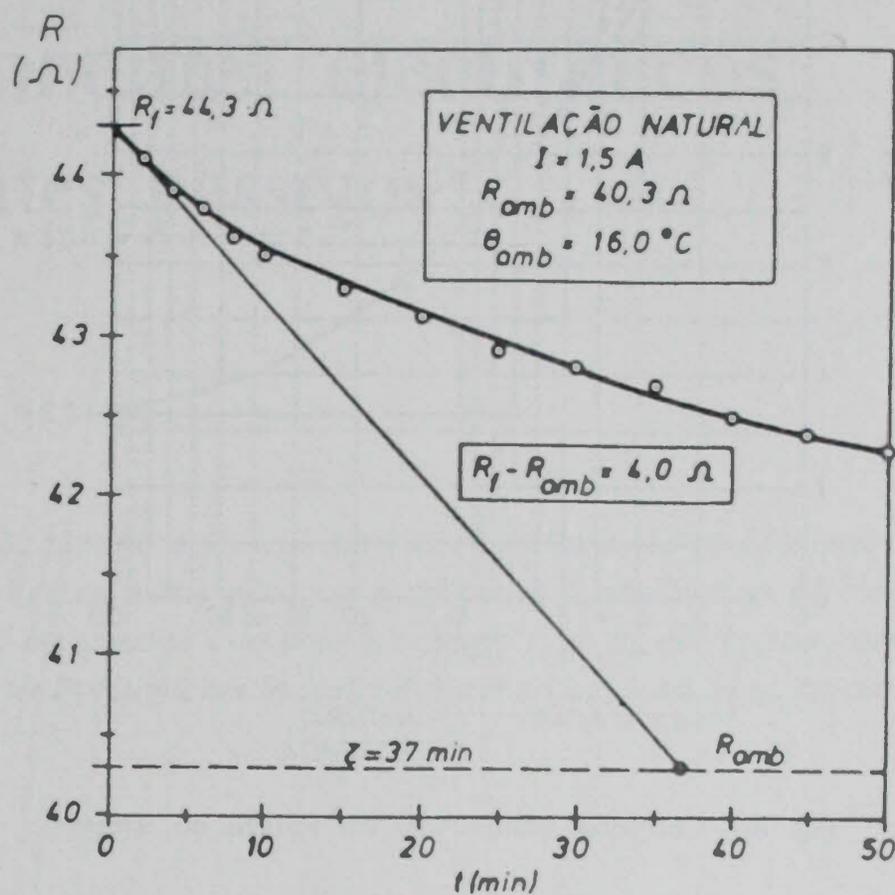
b) Com ventilação forçada

Considerando os instantes $t_1 = 1$ min e $t_2 = 2$ min na figura 7 b) e aplicando o mesmo procedimento anterior, foram obtidos para o caso da ventilação forçada os seguintes resultados:

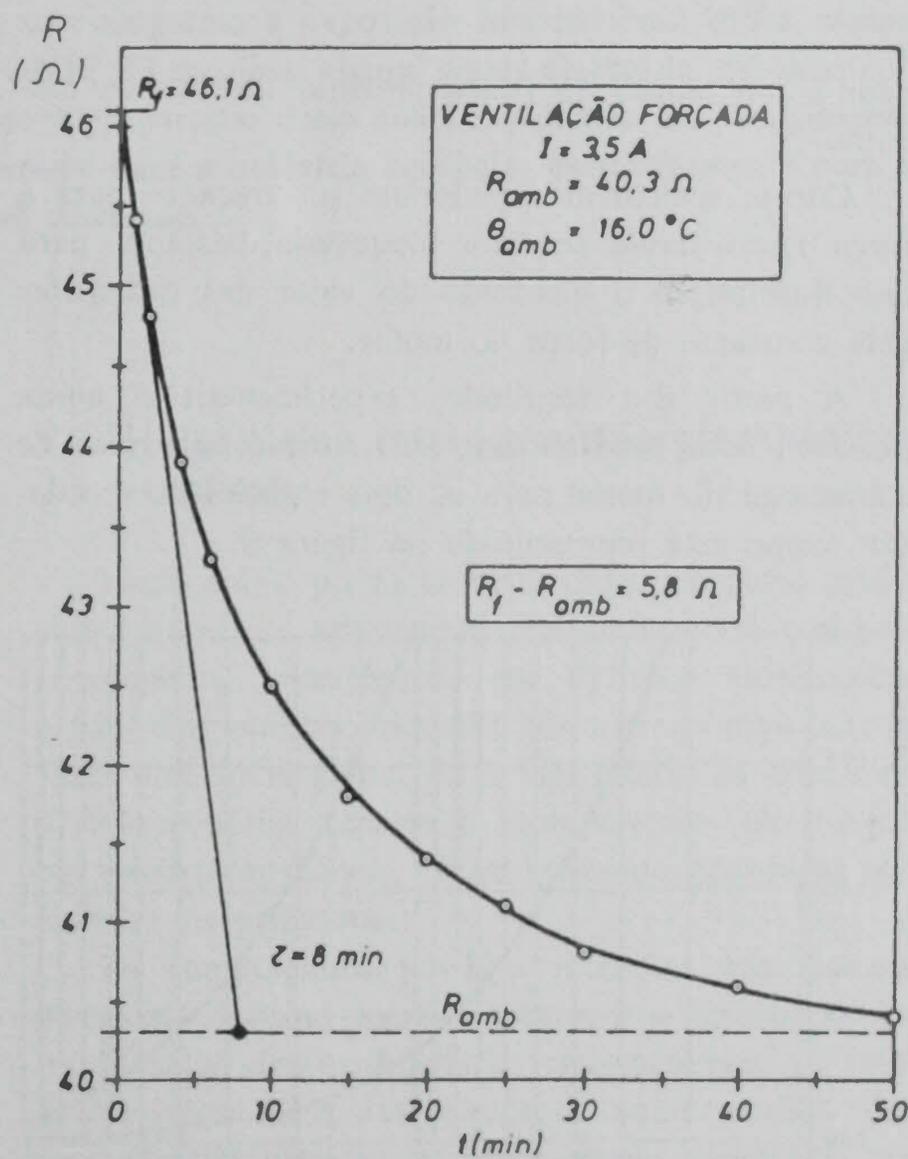
$$\begin{aligned} R_f &= 46.1 \Omega \\ \tau &= 8.0 \text{ min} \\ \theta_f &= 53.5^\circ \text{C} \\ I_{max} &= 6.4 \text{ A} \end{aligned}$$

Substituído na Eq. (21) $\tau = 37.0$ min, $I_{max} = 3.3 \text{ A}$ para o caso da ventilação natural e $\tau = 8.0$ min e $I_{max} = 6.4 \text{ A}$ para a ventilação forçada, é possível estabelecer uma fronteira para a corrente máxima admissível pela máquina durante um determinado tempo finito. Na figura 8 estão representadas essas correntes admissíveis para os casos da ventilação natural e ventilação forçada em função do tempo. Como exemplo, a máxima corrente admissível pelo protótipo do motor linear durante 10 min é cerca de 6.8 A para o caso

da ventilação natural e 7.7 A para a ventilação forçada, valores obviamente maiores que os valores nominais de 3.3 A e 6.4 A, respectivamente, que correspon-



a)



b)

Fig. 7 — Curvas da evolução do arrefecimento do protótipo da máquina linear de indução

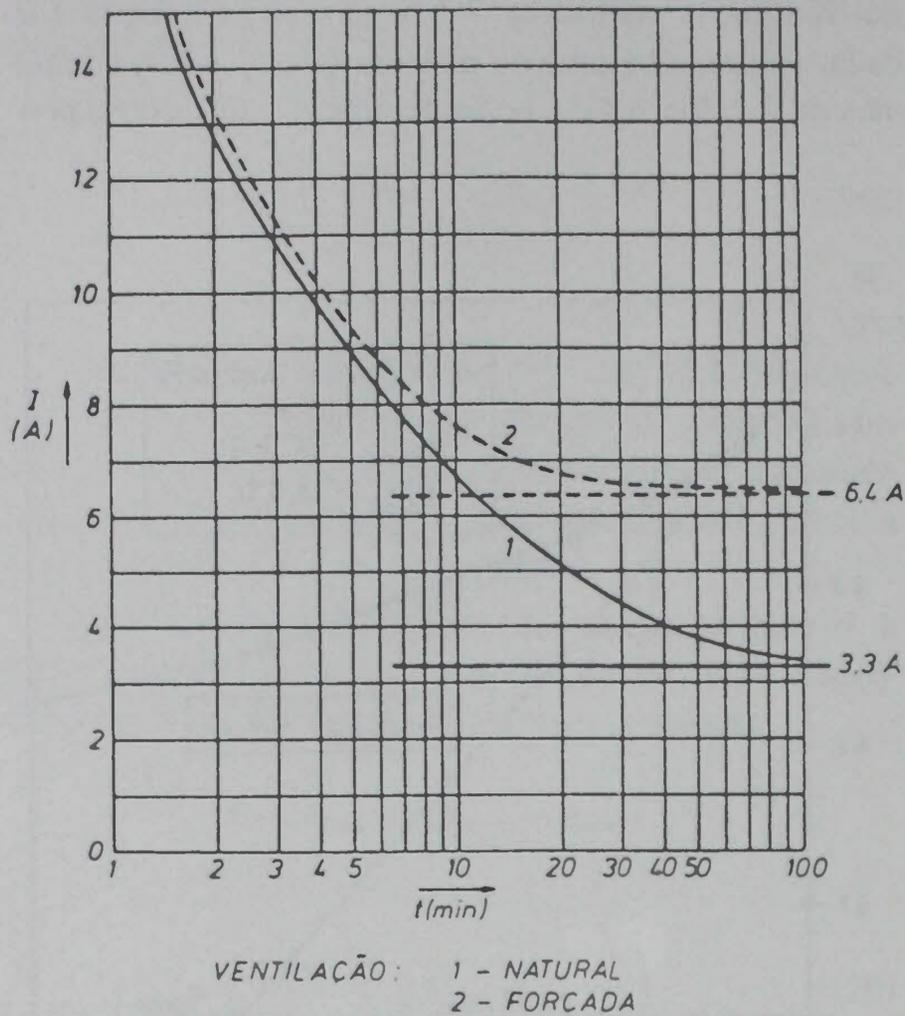


Fig. 8 — Correntes admissíveis em função do tempo

dem a um tempo de funcionamento infinito da máquina.

Curvas semelhantes poderiam ser traçadas para a força desenvolvida no rotor bloqueado, bastando para isso multiplicar o quadrado do valor das ordenadas pela constante de força do motor.

A partir dos resultados experimentais é ainda possível, com base na Eq. (22), traçar as curvas de sobrecarga do motor para os dois regimes de ventilação, como está representado na figura 9.

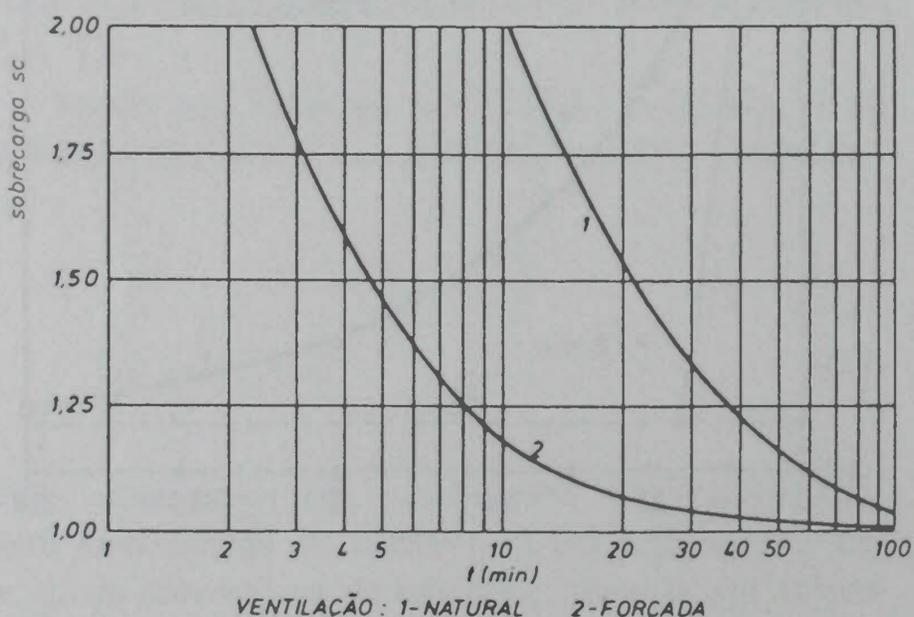


Fig. 9 — Capacidades de sobrecarga da máquina linear de indução

7. Conclusões

Foi apresentado um método original que permite determinar experimentalmente, de modo eficiente e rápido, a corrente máxima admissível durante um dado tempo de funcionamento por uma máquina eléctrica. O método é geral, podendo ser aplicado a qualquer dispositivo eléctrico, tendo neste trabalho sido particularizado para um motor linear de indução.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao Instituto Superior Técnico, à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e ao Instituto Nacional de Investigação Científica todas as facilidades concedidas para a realização deste trabalho. Aos Srs. Victor Cóias e José Bastos da Secção de Máquinas Eléctricas do I. S. T., fica o grato reconhecimento pela sua excelente ajuda na construção do protótipo do motor linear de indução e do banco de ensaios de aquecimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. C. Martin, *Cálculo industrial de máquinas eléctricas*, Ediciones Técnicas Danae, Barcelona, 1968, 2 volumes.
- [2] J. C. Martin, *La máquina eléctrica*, Editorial Labor, Barcelona, 1969, 2 volumes.
- [3] A. L. Rodrigues, *Two-phase auto-piloted synchronous machine and actuators*, Ph.D. Thesis, Imperial College, Londres, 1983.
- [4] C. M. P. Cabrita, *Motor Linear de Indução. Análise Teórica, Projecto e Ensaio*, Dissertação de Doutoramento, I. S. T., Lisboa, 1988.
- [5] C. M. P. Cabrita e A. L. Rodrigues, *O accionador linear de indução e as suas múltiplas aplicações industriais*, ENDIEL 89, Exponor, Matosinhos, Porto.

PRÓXIMO NÚMERO

Leia

«Locomotivas de Minas.

Estudo e análise

da sua frenagem»