

Tal como o motor linear de indução plano, o motor tubular é uma máquina de fluxo axial. O artigo apresenta uma breve teoria deste motor para aplicações em regime estático, bem como os seus parâmetros principais de dimensionamento.

*Such as the plane linear induction motor, the tubular motor is an axial flux machine. A brief theory of this type of linear motor for standstill applications, as well as the main design factors, are presented in the paper.*

## Breve teoria, cálculo e aplicação do motor linear de indução tubular

C. Pereira Cabrita

Dr. Eng. Elect. (IST), Prof. Aux. (IST)

A. Leão Rodrigues

Ph.D., M.Sc. (D.I.C.), Prof. Associado (FCT/ULN)

### Simbologia

$b$  — largura das bobinas = largura das cavas, m.  
 $D$  — diâmetro médio do tubo condutor rotórico, m.  
 $D_c$  — diâmetro exterior das bobinas, m.  
 $D_i$  — diâmetro interior das bobinas, m.  
 $d_{cu}$  — diâmetro do condutor de bobinagem, m.  
 $F$  — força de arranque, kg.  
 $f$  — frequência da rede, Hz.  
 $g$  — comprimento do entreferro, m.  
 $h$  — altura das cavas, m.  
 $I_1$  — corrente nos enrolamentos do estator, A.  
 $J_1$  — densidade linear de corrente estatórica, A/m.  
 $K_S$  — factor de correcção de Russell.  
 $K_W$  — factor de enrolamento dos enrolamentos do estator.  
 $L$  — comprimento total do estator, m.  
 $l_B$  — comprimento médio das espiras do enrolamento estatórico = perímetro médio das bobinas, m.  
 $N_1$  — número total de espiras de cada enrolamento.

$p$  — número de pares de pólos.  
 $Q$  — factor de qualidade.  
 $q$  — número de cavas por pólo e por fase.  
 $R_1$  — resistência dos enrolamentos do estator,  $\Omega$ .  
 $R_2$  — resistência equivalente da chapa rotórica no motor plano, e do tubo condutor rotórico no motor tubular,  $\Omega$ .  
 $S_{cu}$  — secção do condutor da bobinagem,  $m^2$ .  
 $t$  — espessura da chapa rotórica no motor plano, espessura do tubo condutor rotórico no motor tubular, m.  
 $V_s$  — velocidade de sincronismo, m/s.  
 $X_m$  — reactância de magnetização,  $\Omega$ .  
 $X_1$  — reactância de fugas dos enrolamentos do estator,  $\Omega$ .  
 $W$  — largura do bloco magnético estatórico no motor linear plano, m.  
 $z_c$  — número de espiras de cada bobina dos enrolamentos do estator.  
 $\beta$  — factor de encurtamento do passo dos enrolamentos do estator.  
 $\lambda_c$  — permeância específica de fugas dos enrolamentos do estator na zona das cavas.  
 $\lambda_d$  — permeância específica de fugas diferencial dos enrolamentos do estator.

- $\lambda_e$  — permeância específica de fugas das cabeças dos enrolamentos do estator.
- $\mu_0$  — permeabilidade magnética do vazio,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.
- $\rho$  — resistividade da chapa rotórica no motor plano, resistividade do tubo condutor rotórico no motor tubular,  $\Omega \cdot m$ .
- $\rho_{Cu}$  — resistividade do cobre,  $\Omega \cdot m$ .
- $\tau_p$  — passo polar, m.
- $\omega$  — frequência angular eléctrica, rad/s.

## 1. Introdução

No estudo das máquinas eléctricas rotativas convencionais é usual afirmar-se que quanto mais elevado for o seu rendimento melhor será a qualidade da máquina. Há no entanto que acautelar a utilização do termo «melhor» pois ele não é sinónimo exclusivo de «maior rendimento». Com efeito, qualquer sistema que desenvolva uma força de tracção sobre um corpo estático produz uma potência mecânica praticamente nula e, conseqüentemente, apresenta um rendimento igual a zero sem que por isso deixe de ser um sistema útil. Este facto pode ser ilustrado através de um exemplo prático concreto [1]. Numa aciaria localizada na cidade de Leninegrado, utiliza-se um accionador linear plano de simples estator como transportador da gusa em fusão através de uma rampa com 3° de inclinação. Para uma potência absorvida de 60 kW a potência mecânica desenvolvida é de apenas 50 W, o que conduz a um rendimento de 0.08 %. Apesar disso, porém, esse accionador linear constitui um sistema excelente devido às seguintes vantagens económicas:

- Os gastos foram reduzidos para metade dos correspondentes a qualquer outro sistema alternativo;
- Os custos de manutenção foram reduzidos de 40 %;
- A produtividade aumentou 3 vezes;
- O ferro é separado automaticamente da escória, pois não sendo esta condutora não acompanha o ferro no seu deslocamento electromecânico, escorrendo assim para a parte inferior da rampa, onde é posteriormente recolhida.

Os pequenos accionadores lineares tubulares são máquinas que se inserem neste contexto, e a sua utilização na indústria tem vindo a despertar cada vez um maior interesse devido à sua simplicidade construtiva, à sua robustez e ao seu elevado grau de eficácia [1, 6, 7]. Deste modo, apresenta-se seguida-

mente a topologia electromagnética deste tipo de motores lineares, as suas múltiplas aplicações industriais bem como o seu modelo equivalente e as equações que o regem.

## 2. Breves considerações sobre accionamentos electromecânicos de força

Ao considerarem-se as máquinas lineares de indução para aplicações de força e de baixa velocidade, podem enunciar-se os seguintes critérios para definir a sua qualidade [1, 2, 3]:

- A potência consumida por unidade de força desenvolvida;
- A razão entre a força desenvolvida e o peso ou o volume da máquina e do equipamento auxiliar de controlo;
- O custo inicial da máquina e do equipamento de controlo por unidade de força desenvolvida;
- A segurança e a fiabilidade do sistema;
- A quantidade e a complexidade de todo o equipamento auxiliar de controlo.

## 3. Topologia do motor linear de indução tubular

O princípio de funcionamento deste motor pode ilustrar-se de uma forma elementar utilizando-se uma tira de cartão onde se representam alternadamente os pólos N e S do campo viajante, como se esquematiza na figura 1. Essa tira pode ser enrolada de dois modos diferentes; Segundo um deles, obtém-se a topologia da máquina rotativa convencional, figura 1a, e segundo o outro, ao dobrá-la como se representa na figura 1c, resulta uma máquina tubular equivalente à máquina rotativa. A tira original, figura 1b, representa a estrutura básica de um motor linear plano [3, 4]. O movimento do campo magnético na figura 1c é, contudo, linear, tal como na figura 1b, se bem que a máquina seja de forma cilíndrica.

Do ponto de vista tecnológico, os motores tubulares apresentam uma configuração como se esquematiza na figura 2. O conjunto estatórico é composto por três unidades básicas: bobinas, aletas e núcleos. Os núcleos são constituídos por anéis em ferro maciço, com um corte transversal para permitir a saída dos dois terminais de cada bobina. Estes núcleos, além de fazerem parte integrante do circuito magnético do motor, protegem ainda mecanicamente as bobinas e permitem uma melhor dissipação do calor gerado. O rotor, por seu lado, é constituído por um tubo em ferro, que é parte integrante do circuito magnético, sendo revestido por uma folha

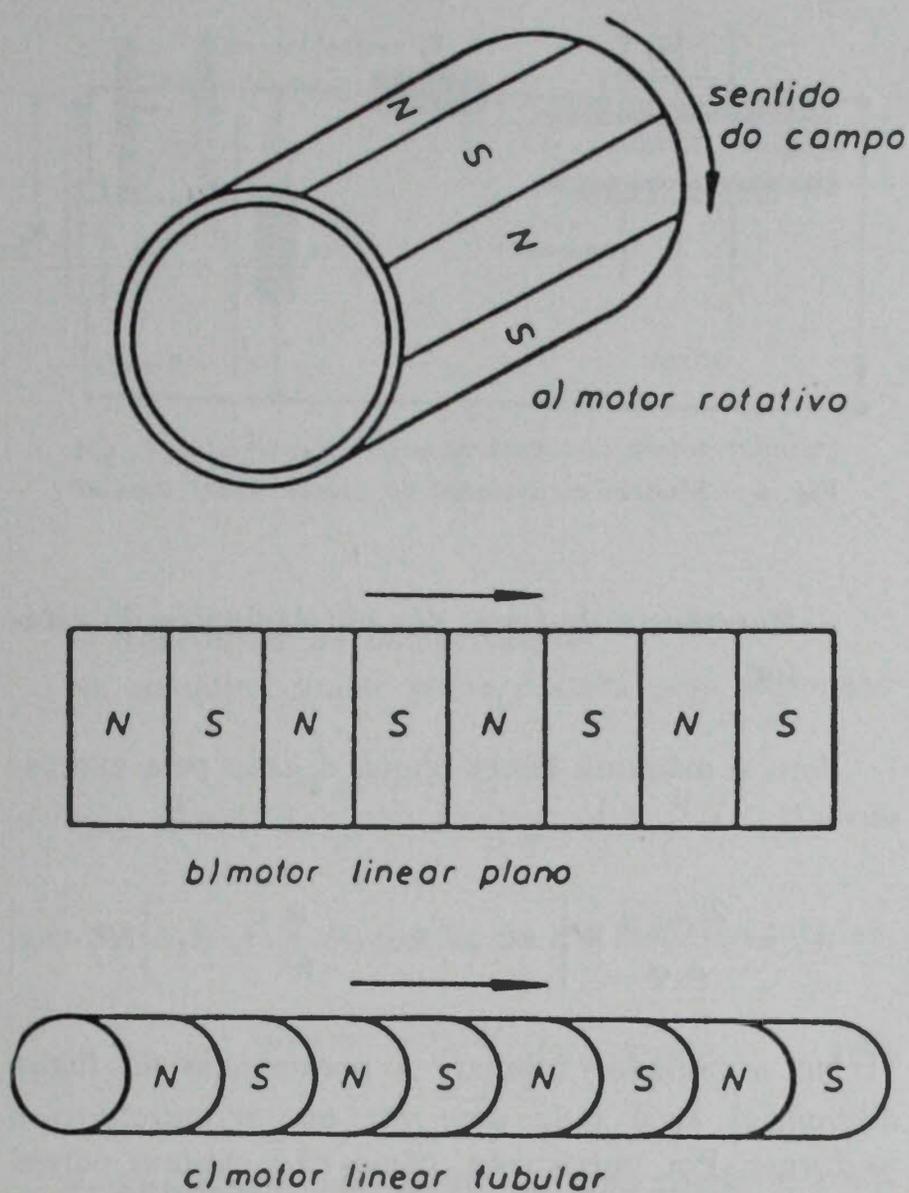


Fig. 1 — Princípio de obtenção do motor linear de indução tubular

de metal condutor, normalmente cobre ou alumínio. Electricamente, os enrolamentos do estator formam um sistema trifásico simétrico, devendo as bobinas ser ligadas entre si, como se mostra na figura 2.

As bobinas, em lugar de apresentarem uma configuração plana, podem ser helicoidais de passo  $h$ , como se representa na figura 3. Nesse caso haverá uma componente axial do campo viajante,  $B_{axial}$ , bem como uma componente radial,  $B_{radial}$ , tendo assim o rotor um movimento simultâneo de rotação e de translação.

#### 4. Aplicações industriais

Como possíveis aplicações, algumas já em prática e bem sucedidas, podem citar-se as seguintes [1, 2, 3, 6, 7].

- Bombas de fluídos líquidos e gasosos;
- Bombas de metais em fusão.
- Cadeias de enchimento de vasilhame;
- Abertura de portas de correr;
- Actuadores de braços robóticos;
- Comando de lemes de aeronaves.

Nos últimos quatro tipos de aplicações, o accionador tubular pode substituir vantajosamente os clássicos sistemas hidráulicos e pneumáticos. Nestes sistemas, o equipamento auxiliar — compressores, depósitos, condutas, válvulas — além de aumentar o custo inicial da montagem, requer uma manutenção cuidada, e os órgãos como os compressores devem funcionar mesmo quando o accionador se encontra em repouso de modo a manter a pressão nas canalizações. Isto não se torna necessário com o accionador eléctrico, que requer uma quantidade mínima de equipamento auxiliar e só é ligado à rede durante

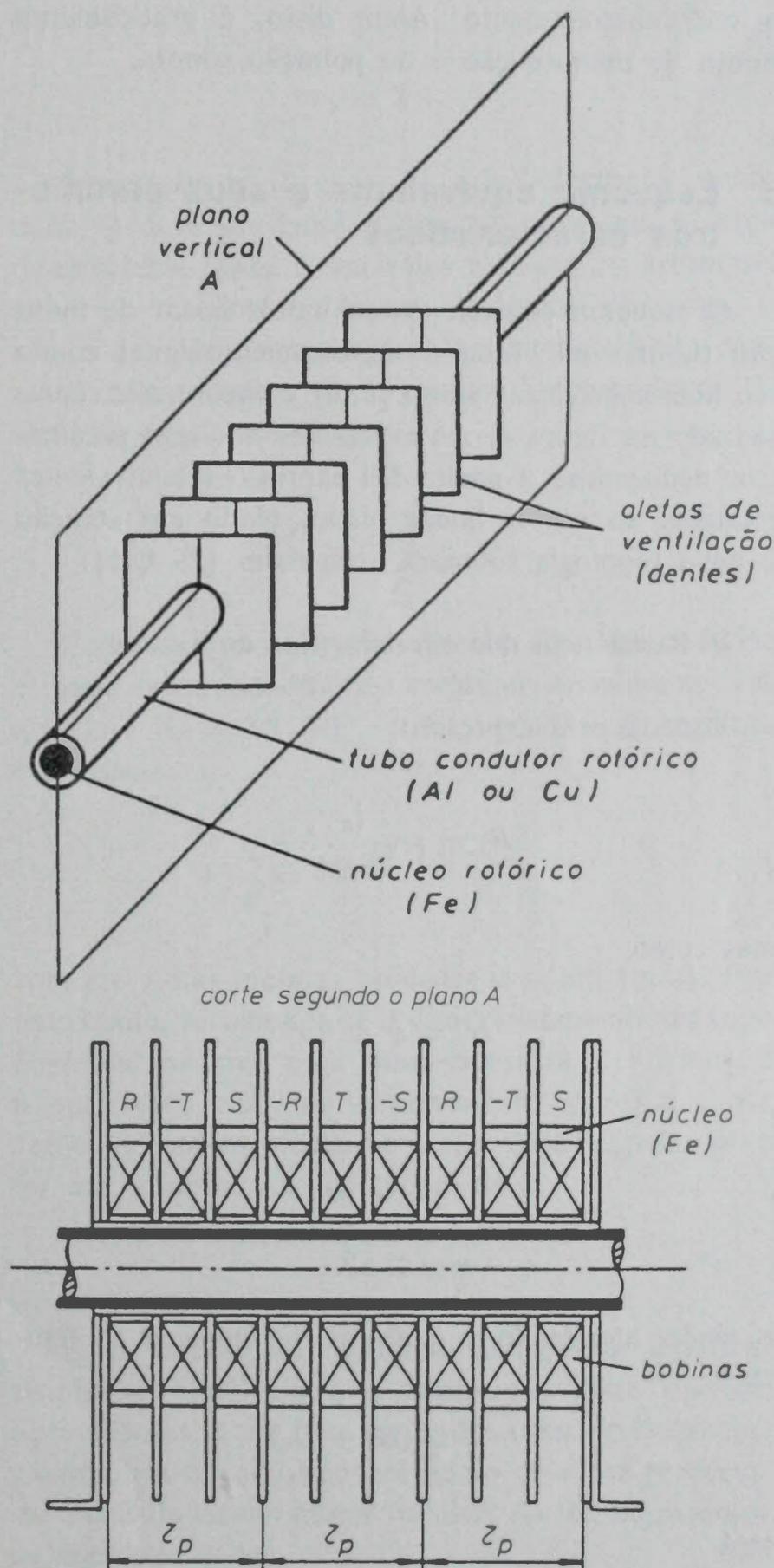


Fig. 2 — Configuração construtiva do motor linear tubular

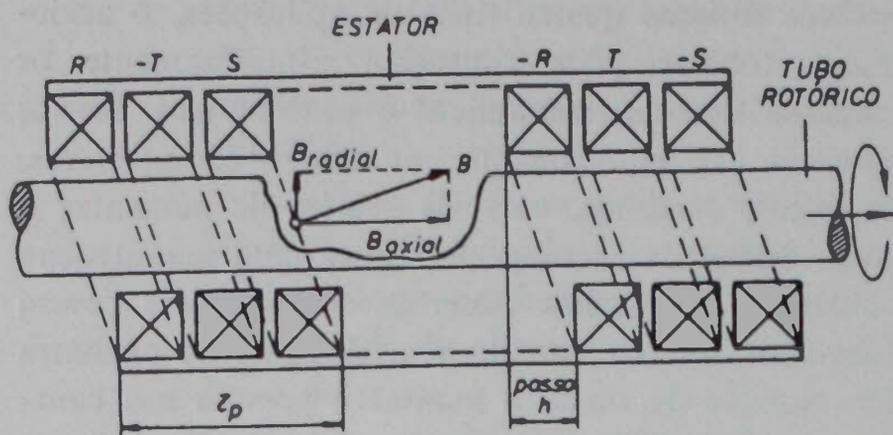


Fig. 3 — Motor linear tubular com bobinas helicoidais

o seu funcionamento. Além disso, é praticamente isento de manutenção e de poluição sonora.

## 5. Esquema equivalente e seus parâmetros característicos

O esquema equivalente do motor linear de indução tubular por fase, é rigorosamente igual ao do seu homólogo linear plano [2, 4] e encontra-se representado na figura 4. As expressões dos seus parâmetros deduzem-se a partir das expressões equivalentes relativas ao motor linear plano, tendo em atenção a nova topologia tubular. Virá assim [2, 4, 5]:

### — Resistência dos enrolamentos do estator

É dada pela expressão

$$R_1 = \rho_{cu} \frac{l_B}{S_{cu}} N_1^2$$

mas como

$$N_1 = q z_c 2p$$

e

$$S_{cu} = \frac{\pi d^2}{4}$$

e ainda, atendendo-se à geometria indicada na figura 5,

$$l_B = \frac{1}{2}(D_e + D_i)$$

virá

$$R_1 = 4 \rho_{cu} \frac{1}{d_{cu}^2} (D_e + D_i) (q z_c p) \quad (1)$$

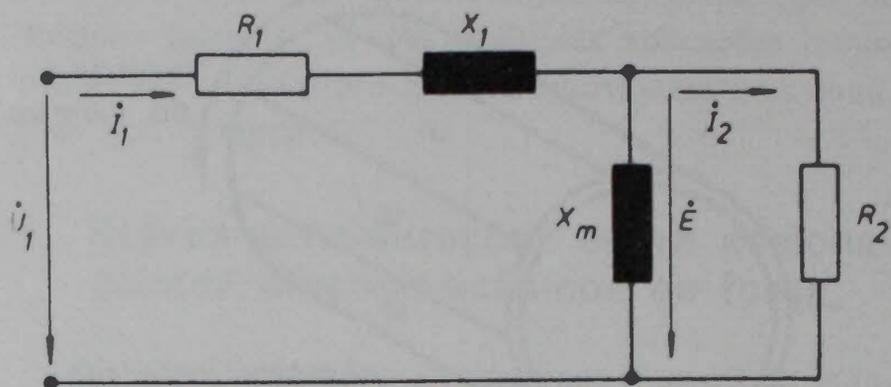


Fig. 4 — Modelo equivalente do motor linear tubular

### — Reactância de fugas dos enrolamentos do estator

Para a máquina linear plana, é dada pela expressão [2]:

$$X_1 = \frac{2 \mu_0 \omega}{p q} W \left[ (\lambda_c + \lambda_d) + \frac{q}{W} \tau_p \lambda_e \right] N_1^2$$

No accionador tubular, a permeância de fugas diferencial  $\lambda_d$  é nula uma vez que o entreferro é uniforme. Por outro lado, como não existem partes frontais de bobinas como nos motores planos, a permeância de fugas  $\lambda_e$  é igualmente nula; saliente-se que, enquanto no motor linear plano apenas as partes activas das bobinas contribuem para gerar o campo magnético viajante, no motor tubular elas são integralmente aproveitadas para a geração desse campo.

Comparando ainda a geometria da máquina plana com a da máquina tubular, a largura do bloco estatórico na máquina plana,  $W$ , representará na máquina tubular o perímetro médio do tubo condutor rotórico, ou seja,

$$W = \pi D$$

Na máquina tubular, o factor de encurtamento do passo,  $\beta$ , é forçosamente igual a 1, enquanto que as suas cavas, de forma rectangular, são completamente fechadas, e daí resulta

$$\lambda_c = \frac{h}{12 b} (3 \beta + 1) = \frac{h}{3 b}$$

Por outro lado, como

$$h = \frac{1}{2}(D_e - D_i)$$

virá finalmente

$$X_1 = \frac{\pi \mu_0 \omega D (D_e - D_i)}{3 b p q} N_1^2 \quad (2)$$

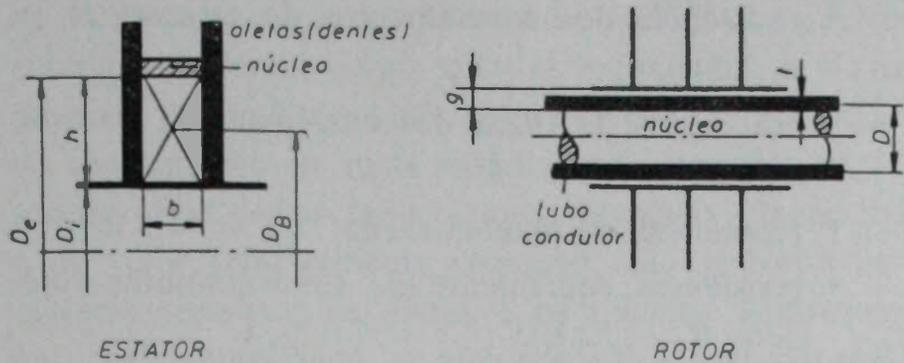


Fig. 5 — Dimensões características do motor tubular

### — Reactância de magnetização

Na máquina linear plana é dada pela expressão

$$X_m = \frac{6 \mu_0 \omega}{\pi^2} \cdot \frac{\tau_p W}{p g} (K_W N_1)^2$$

mas como  $W = \pi D$ , resulta para a máquina tubular,

$$X_m = \frac{6 \mu_0 \omega}{\pi} \cdot \frac{\tau_p D}{p g} (K_W N_1)^2 \quad (3)$$

### — Resistência equivalente do tubo condutor rotórico

Na máquina linear plana tem-se

$$R_2 = \frac{6 W}{\tau_p p} \cdot \frac{\rho}{t} (K_W N_1)^2 \frac{I}{K_S}$$

Na máquina linear plana, a resistividade das zonas laterais da chapa rotórica deverá ser corrigida através do factor de Russell,  $K_S$ . Porém, no motor tubular, pela sua topologia, o factor de Russell é inerentemente unitário e assim, como  $W = \pi D$ , virá

$$R_2 = \frac{6 \pi D}{\tau_p p} \cdot \frac{\rho}{t} (K_W N_1)^2 \quad (4)$$

### — Factor de qualidade

Define-se [1] como sendo a relação entre  $X_m$  e  $R_2$  e portanto

$$Q = \frac{2 \tau_p^2 \mu_0 f t}{\pi p g} \quad (5)$$

## 6. Dimensionamento

O cálculo dos accionadores lineares tubulares é efectuado com base na expressão da força desenvolvida no arranque, ou seja, em regime estático. Essa expressão, deduzida a partir do modelo equivalente

da máquina, tal como se fez em relação ao motor linear plano [2, 4], é dada por [2, 3, 5],

$$F = 0.05 \pi D L \frac{\rho J_1^2}{t V_s} \cdot \frac{Q^2}{1 + Q^2} \quad (6)$$

sendo a densidade linear de corrente estatórica  $J_1$ , e a velocidade de sincronismo  $V_s$  calculadas respectivamente pelas seguintes expressões:

$$J_1 = \frac{3\sqrt{2} l_1 q z_c K_W}{\tau_p}$$

e

$$v_s = 2 \tau_p f$$

Demonstra-se [2, 3, 4, 5], que o factor de qualidade  $Q$  deve ser igual à unidade para que a força desenvolvida tenha o seu valor máximo no arranque. Sendo o motor tubular uma máquina de força, o seu cálculo deve ser processado com base nesta conclusão. Deste modo, se se atender à expressão de  $Q$ , virá, ao considerar-se  $Q = 1$ ,

$$\tau_p^2 \frac{t}{g} = \frac{\pi}{2} \frac{\rho}{\mu_0 f}$$

Para uma alimentação directa da rede a 50 Hz e para tubos condutores rotóricos usualmente em alumínio ( $\rho = 2.8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ), resulta a seguinte expressão

$$\tau_p^2 \frac{t}{g} = 700 \quad (7)$$

com  $t$  e  $g$  nas mesmas unidades e  $\tau_p$  em [mm]. Por outro lado, recomenda-se o dimensionamento do tubo condutor rotórico com uma espessura  $t = 2$  mm, e o entreferro com um comprimento  $g = 3$  mm por razões de ordem mecânica. Logo, o passo polar deve ter um comprimento da ordem de

$$\tau_p = 32 \text{ mm}$$

Estas imposições permitem simplificar significativamente o cálculo e a construção deste tipo de accionadores. Com base em todos estes pressupostos, exemplifica-se seguidamente como deve ser processado o cálculo de um motor tubular. Assim, impondo-se os seguintes dados.

- tipo de enrolamento: série, ligação em estrela
- tensão composta no arranque: 150 V



de ferro para o estator. Se o rotor possuir um núcleo tubular em ferro, como aliás se recomenda, o fluxo na zona das bobinas pode fechar-se pelo ar e, apesar do seu trajecto ser mais longo, dispõe de uma ampla secção. Por outro lado, como o campo magnético é de valor relativamente reduzido, não se torna necessário construir as aletas e os núcleos estatóricos em chapa empilhada, o que simplifica consideravelmente a sua construção. Estes accionadores, que são simples pistões eléctricos, apresentam a melhor relação força/peso a mais baixo custo e são praticamente isentos de manutenção, o que lhes confere uma elevada segurança e fiabilidade, condição indispensável, por exemplo, na indústria aeronáutica. Como foi salientado anteriormente, algumas das suas possíveis aplicações encontram-se já em prática e com bastante sucesso. ■

## Referências bibliográficas

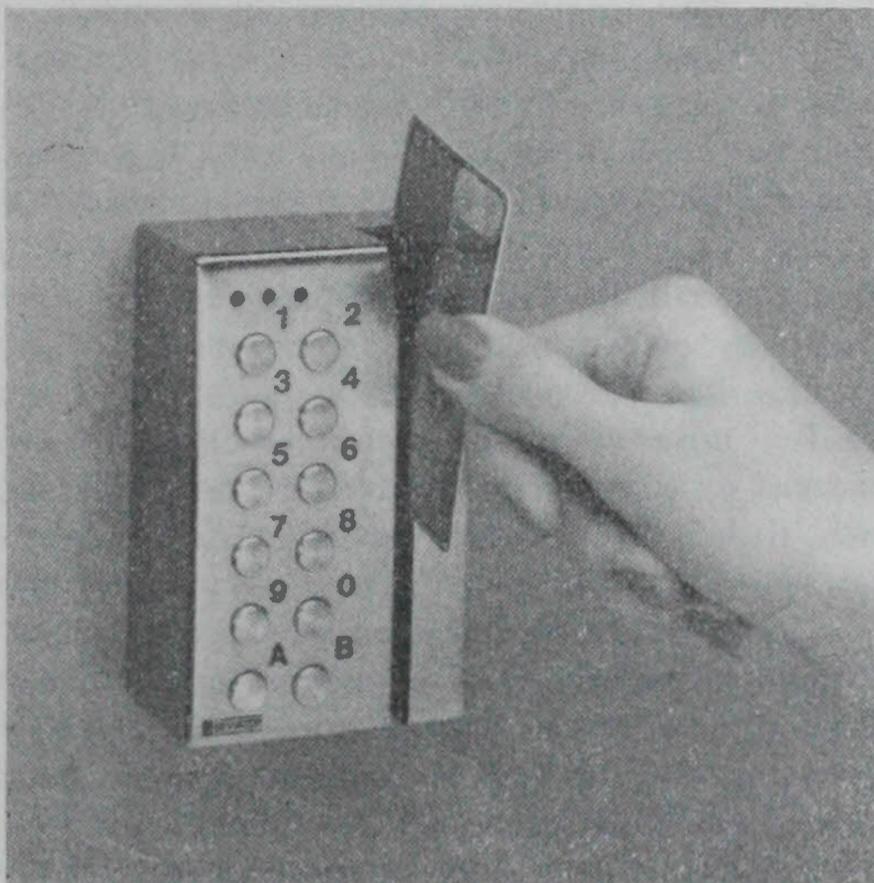
- [1] E. R. Laithwaite, *Máquinas de inducción especiales*, Editorial Labor, Barcelona, 1976.
- [2] C. Pereira Cabrita, *Motor linear de indução. Análise teórica, projecto e ensaio*, Dissertação de Doutoramento, I. S. T., 1988.
- [3] C. Pereira Cabrita, A. Leão Rodrigues, *O motor linear tubular. Características industriais de um protótipo*, Comunicação apresentada no Endiel 89, Exponor, Matosinhos, 1989.
- [4] A. Leão Rodrigues, C. Pereira Cabrita, *Breve teoria e ensaio do motor linear de indução trifásico para baixas velocidades*, *Electricidade* n.º 263, Jan. 1990.
- [5] C. Pereira Cabrita, *O motor linear tubular. Método de cálculo*, Monografia interna da Secção de Máquinas Eléctricas e Electrónica de Potência do I. S. T.
- [6] S. A. Nasar, I. Boldea, *Linear motion electric machines*, Wiley, USA, 1976.
- [7] G. W. Mclean, *Review of recent progress in linear motors*, *IEE Proceedings — B*, Nov. 1988, p. 380-416.

## PRODUTOS

# Fechadura de cartão magnético

A menor fechadura electrónica do mundo para cartão magnético foi lançada agora pela empresa sueca Bewator, através do modelo Bewacard 60. Destina-se a empresas que queiram aumentar facilmente o seu grau de segurança. Pode-se usar apenas com um código, só com um cartão magnético ou com código e cartão combinados. Além de cartões especiais de entrada é também possível usar cartões de crédito bancário do género que traz números gravados à frente segundo standard internacional.

À fechadura, com as medidas compactas exteriores de 112x70x45 mm, podem-se ligar no máximo 60 cartões. Já que se podem usar tanto os cartões especiais de passagem como os vulgares cartões de crédito, aumenta-se a flexibilidade e a segurança do sistema.



Os cartões pessoais são tratados com mais cuidado pelos seus possuidores.

A fechadura possui três níveis de segurança: código, cartão ou código e

cartão combinado. Através de uma regulação do tempo, os três níveis de segurança podem entrar em acção em diferentes partes do dia.

O responsável da empresa pode programar directamente nos botões da fechadura a aceitação dos cartões. A aceitação de cartões extraviados ou pertencentes a ex-empregados da empresa pode facilmente ser encerrada, sem que seja preciso proceder a dispendiosas mudanças de fechaduras ou de chaves.

A fechadura Bewacard 60 pode ser instalada no interior ou exteriormente, por exemplo em portas de entrada ou de uma secção ou ainda nos portões de garagens. A fechadura accionada a cartão tem unidade central e leitor combinados, resultando uma fácil instalação com fio duplo. A robusta protecção exterior é constituída em aço inoxidável.

O preço parece ser um pouco mais alto do que uma fechadura de código ou uma solução tradicional com chaves. ■