

Os materiais magnéticos permanentes na construção de máquinas eléctricas

A. Leão Rodrigues *

resumo

O artigo apresenta uma breve descrição das propriedades dos materiais magnéticos permanentes, dando especial ênfase aos novos materiais de terras-raras. Com vista à sua aplicação na excitação de máquinas eléctricas rotativas expõe-se o método da linha de carga para o cálculo de um magneto que conduz à optimização do volume do material. Examina-se em seguida as proporções de uma máquina eléctrica que são afectadas pelo emprego de cada uma das famílias de materiais magnéticos permanentes na sua construção.

1 — Introdução

Os materiais magnéticos permanentes, tais como os alnicos e ferrites cerâmicas são produzidos e utilizados há longos anos numa grande variedade de equipamentos eléctricos domésticos e industriais, em comunicações, transportes e outros equipamentos militares específicos. Os engenheiros projectistas estão familiarizados com as vantagens e desvantagens destes materiais e muita literatura se tem publicado sobre o fabrico, características e método de cálculo destes materiais [1, 2, 3]. Contudo, durante os últimos quinze anos, desenvolveu-se uma nova família de materiais magnéticos permanentes à base de cobalto e uma terra-rara (usualmente o samário), cujas características vieram revolucionar o projecto dos equipamentos que empregam estes materiais.

abstract

The paper describes briefly the permanent magnet materials properties and rare-earth materials are specially emphasised. For optimisation of magnet material for field excitation in rotating electrical machines, the load line technic is presented. Some of the factors -- including size effects -- affecting the application of the three permanent magnet types to electrical machines are examined.

Hoje, tanto os alnicos e as ferrites como os materiais magnéticos de terras-raras (samário-cobalto), são produzidos industrialmente em larga escala, tendo sobretudo grande aplicação no fornecimento da excitação de máquinas eléctricas rotativas. Com efeito, uma vez que não existem perdas de Joule na excitação de máquinas com magnetos permanentes é evidente que o seu rendimento vem substancialmente maior do que o das máquinas que empregam a excitação clássica por meio de enrolamentos de cobre. Importante também é a redução no volume total da máquina que se obtém quando se empregam materiais magnéticos cada vez com melhores características.

(*) A. Leão Rodrigues, Dr. Eng. Electrotécnico, Prof. Associado da F.C.T./U.N.L., Departamento de Ciência dos Materiais.

Os avanços revolucionários conseguidos nos últimos anos no fabrico dos materiais magnéticos permanentes e a sua criteriosa aplicação em máquinas eléctricas e outros dispositivos electromagnéticos, deu início a uma intensa investigação destes materiais.

2 — Parâmetros fundamentais de um material magnético permanente

Os materiais magnéticos permanentes diferenciam-se das substâncias ditas «macias» fundamentalmente pelo seu largo ciclo de histerese. A figura 1 mostra a comparação entre o ciclo de histerese de um material magnético «macio» e um material magnético «duro». Como é sabido, a área do ciclo de histerese representa a energia dissipada ao descrever o ciclo, energia que se degrada em calor e que constitui as chamadas perdas por histerese.

Para caracterizar o ciclo de histerese definem-se dois parâmetros fundamentais que podem imediatamente ser nele identificados. A remanescência B_r , é a densidade de fluxo (Weber/metro quadrado ou Tesla) que fica retida no material depois de ele ser completamente magnetizado e o campo magnético H (Ampère/metro) ter sido reduzido a zero. A coercividade H_c , é a intensidade do campo magnético que é necessário aplicar em sentido contrário à densidade de fluxo remanescente para a destruir completamente.

Os materiais magneticamente macios, embora a sua remanescência seja elevada, têm reduzida coercividade, que é facilmente destruída por acção de campos exteriores. Têm, no entanto, baixas perdas por histerese (ciclo de pequena área) e portanto são materiais ideais para ser usados nos condutores de fluxos magnéticos alternados, como por exemplo no circuito magnético de um transformador de potência. Pelo

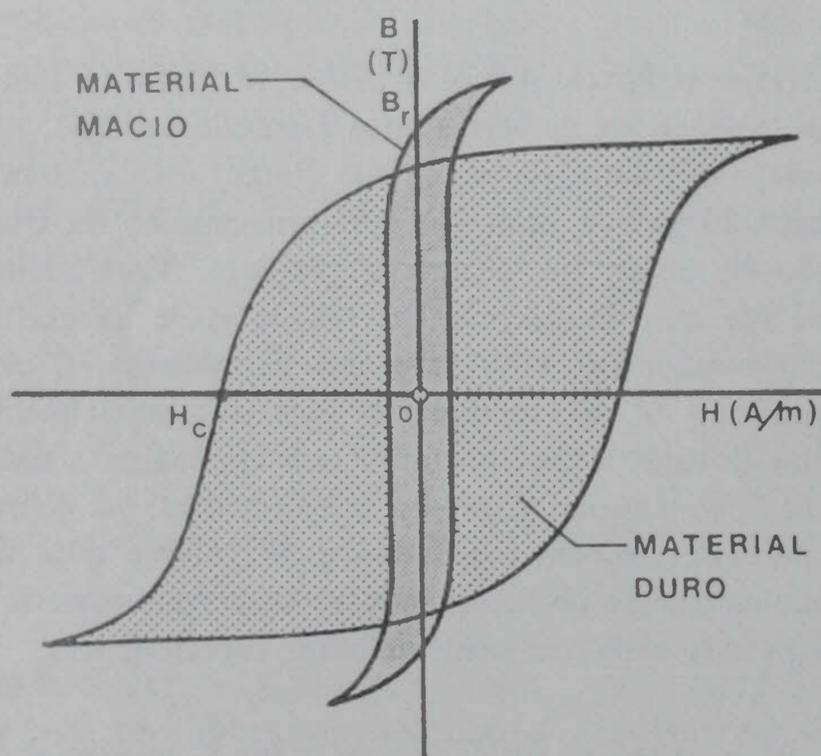


Fig. 1 — Comparação entre os ciclos de histerese de um material macio e um material duro

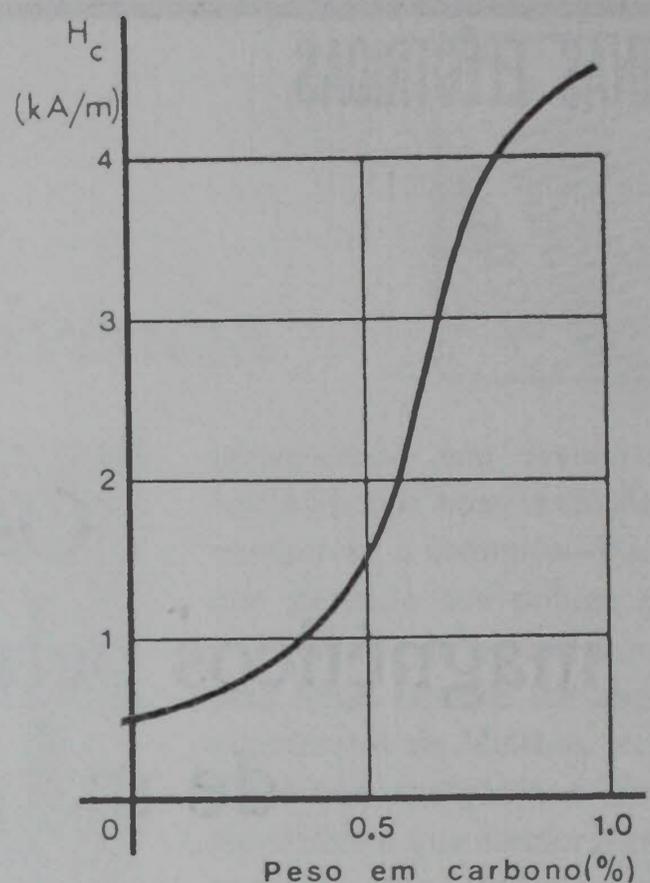


Fig. 2 — Variação da coercividade com o teor de carbono

contrário, os materiais magneticamente duros têm alta coercividade, o que permite manter a sua remanescência em presença de campos desmagnetizantes elevados. São pois os materiais magneticamente duros ideais para a construção de magnetos permanentes. Os materiais duros estão também na base das aplicações em registo magnético de som, imagem e informação digitalizada.

Inicialmente o primeiro material usado na fabricação de magnetos permanentes era o ferro, ao qual se juntava deliberadamente carbono. A presença do carbono, finamente disperso através da rede cristalina do ferro, faz aumentar as perdas por histerese, logo a área do ciclo e conseqüentemente a coercividade. A figura 2 mostra o andamento da coercividade em função da percentagem do carbono no ferro [2]. Com a adição do carbono, porém, o magneto torna-se por outro lado mais duro e menos dúctil, logo mais difícil de maquinar.

2.1 — Características de desmagnetização

A região do ciclo de histerese do 2.º quadrante é a mais importante para um magneto permanente e é designada por «característica de desmagnetização». Nestas condições, o magneto actua como uma fonte de força magnetomotriz (f.m.m.) e fluxo magnético, o qual pode ser conduzido a uma determinada região do espaço por meio de uma forma especial dada ao magneto ou usando um circuito magnético em ferro macio.

Convém notar, no entanto, que um magneto permanente não é um sistema de energia armazenada que se possa consumir, porque senão a energia acumulada

acabaria por se dissipar cada vez que o magneto fosse utilizado. A energia armazenada num magneto permanente é apenas energia potencial e o magneto actua como um sistema conservativo. Um magneto realmente produz trabalho cada vez que atrai uma peça de ferro, mas o trabalho é fornecido ao magneto quando se separa a peça de ferro do magneto!

2.2 — Produto energético

O produto energético de um magneto permanente é definido pela quantidade numericamente igual à área do rectângulo BH que pode ser inscrito na curva de desmagnetização. Convém no entanto referir que o produto energético representado pelo ponto (B,H) da característica de desmagnetização é igual ao dobro da verdadeira densidade de energia $W = (1/2) BH$ acumulada no entreferro.

Normalmente o fabricante fornece os valores do produto energético juntamente com a característica de desmagnetização e isto pode ser apresentado de duas maneiras, como mostra a figura 3.

a) Para cada ponto (B,H) da característica de desmagnetização efectua-se o produto BH e representa-se graficamente em função de B no 1.º quadrante adjacente à curva de desmagnetização. O ponto P da curva de desmagnetização para o qual o produto BH é máximo é imediatamente determinado.

b) Quando várias curvas de desmagnetização estão representadas no mesmo gráfico é usual sobrepor-se uma família de hipérbolas equiláteras $BH = \text{Const.}$ A hipérbole particular que for tangente a uma das curvas de desmagnetização determina imediatamente o ponto de $(BH)_{\text{max}}$ do magneto.

Estes dois métodos permitem determinar facilmente o produto energético máximo. Todavia, o método mais expedito consiste em traçar paralelas aos eixos coordenados a partir de B_r e H_c que se intersectam no ponto Q . A recta OQ intersecta então a curva de desmagnetização num ponto muito próximo de P que

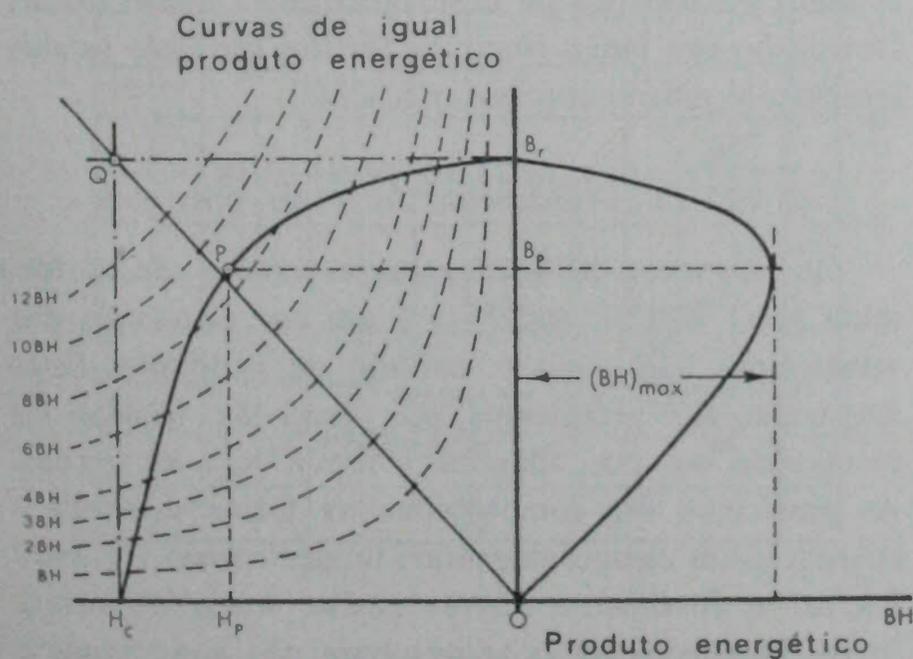


Fig. 3 — Produto energético e família de hipérbolas

conduz a $(BH)_{\text{max}}$. Esta construção não é rigorosamente correcta (excepto se a curva de desmagnetização fosse linear), mas é frequentemente usada como um ponto de partida para o dimensionamento de um magneto.

O produto energético máximo $(BH)_{\text{max}}$ tem as dimensões de uma energia por unidade de volume (J/m^3) e é um parâmetro importante no dimensionamento de um magneto (como se verá na secção 4), pois quanto maior for $(BH)_{\text{max}}$ menor será o volume do magneto para criar um determinado fluxo magnético.

3 — Classificação dos materiais magnéticos permanentes

De acordo com a exposição anterior, um bom material para a construção de um magneto permanente deverá ter alta remanescência B_r e coercividade H_c , elevado produto energético $(BH)_{\text{max}}$ e alto ponto de Curie. Como é sabido, o ponto de Curie é a temperatura a partir da qual um material ferromagnético se torna eventualmente não-magnético. Este parâmetro é sobretudo importante quando se utiliza o magneto em dispositivos sujeitos a elevadas temperaturas.

Para se obter alta remanescência B_r basta actuar na composição química do material, embora o valor da remanescência possa ser substancialmente aumentado provocando uma anisotropia no material. A anisotropia pode ser conseguida arrefecendo o magneto a partir de uma alta temperatura e submetendo-o a um campo magnético. Desta forma os domínios magnéticos de Weiss orientam-se segundo a direcção preferencial do campo. Magnetos sem uma direcção preferencial de magnetização, tendo propriedades magnéticas semelhantes em todas as direcções, são conhecidos por isotrópicos.

Para obter alta coercividade H_c basta introduzir irregularidades na rede cristalina do material. Injetando impurezas não-magnéticas no material também é possível aumentar a sua coercividade.

Para se classificar os materiais magnéticos permanentes terá que se ter em conta não só o tipo de composição usada mas também os valores de B_r e H_c que os materiais apresentam. Desta forma, os materiais magnéticos permanentes classificam-se em três grandes famílias ou grupos a saber: Materiais magnéticos do tipo **metálico**, do tipo **cerâmico** e o do tipo de **terras-raras**. Lynch [4] subdividiu o grupo dos materiais magnéticos metálicos em dois sub-grupos: magnetos metálicos de alto B_r e baixo H_c e magnetos de baixo B_r e alto H_c .

A figura 4 mostra uma comparação das características de desmagnetização típicas dos materiais magnéticos permanentes dos quatro grupos referidos, que se passam resumidamente a descrever.

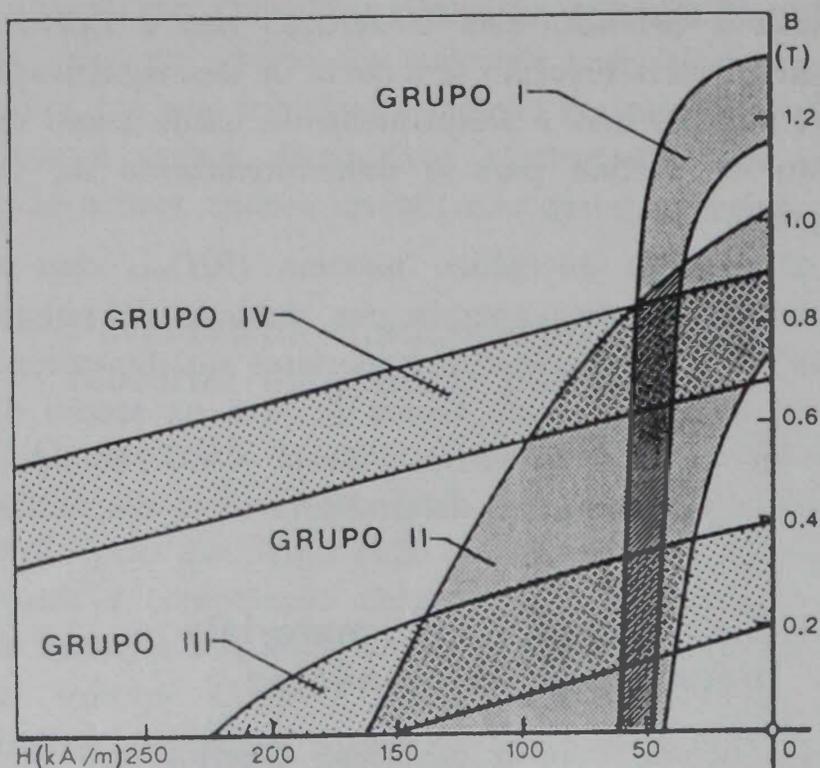


Fig. 4 — Características de desmagnetização típicas dos materiais magnéticos permanentes

GRUPO I — Magnetos metálicos com alto B_r e baixo H_c

A série dos magnetos Alnicos (Al — Ni — Co — Fe) tem sido a mais usada durante o último século e é a mais importante dos materiais magnéticos metálicos. De acordo com a sua composição química é comercialmente conhecida por ALCOMAX, MAGLOY, NL e TICONAL. A composição desta liga é aproximadamente 8 % de Al, 14 % de Ni e 25 % de Co, sendo o resto balanceado com ferro. O Alnico é obtido normalmente por fusão ou sinterização dos metais componentes.

A característica de desmagnetização destes magnetos é não-linear e devido à sua baixa coercividade ($H_c \approx 60$ kA/m) o magneto deve ser bastante longo na direcção de magnetização e necessita uma protecção em ferro macio (terminais polares) para não desmagnetizar em presença de campos magnéticos exteriores.

GRUPO II — Magnetos metálicos com baixo B_r e alto H_c

Adicionando nióbio e titânio ao Alnico obtêm-se magnetos como HYCOMAX, MAGLOY 8, COLUMAX cujas coercividades andam à volta de 150 kA/m, embora a sua remanescência desça para cerca de 0.8 T. A sua característica de desmagnetização é também não-linear, mas a sua permeabilidade reversível é menor que a dos materiais do grupo I, resistindo mais facilmente à desmagnetização imposta por campos exteriores.

GRUPO III — Magnetos Cerâmicos

Os magnetos cerâmicos consistem numa mistura de óxido com a fórmula $MO \cdot 6Fe_2O_3$ onde, para um bom magneto, M representa o metal bário ou estrôncio. Estes materiais são normalmente conhecidos por Ferrites e de acordo com a sua composição são comercialmente conhecidos por FERROBA, MAGNADUR, MAGNAL e NEOPERM.

O processo de fabricação dos magnetos cerâmicos, ou ferrites, consiste em aquecer uma mistura de óxido de ferro (Fe_2O_3) com carbonato de estrôncio ($SrCO_3$) numa proporção estequiométrica, resultando daqui um composto que é seguidamente pulverizado em partículas da ordem de $1 \mu m$. Estas partículas são então pré-sinterizadas (calcinadas) a uma temperatura da ordem de $1150^\circ C$ a $1400^\circ C$ a fim de serem eliminadas certas impurezas e o produto resultante é depois comprimido num molde de modo a dar a forma desejada ao magneto. Segue-se então a sinterização a uma temperatura de $1100^\circ C$ a $1300^\circ C$ a fim de as partículas se aglutinarem por fusão pontual na forma desejada. A atmosfera de sinterização é o ar. Para se produzirem magnetos anisótropos, as partículas durante a sinterização são submetidas a um forte campo magnético de forma a serem alinhadas segundo a direcção preferencial do campo.

As partículas de ferrites podem também ser misturadas com um agente ligante para produzir magnetos flexíveis, conhecidos comercialmente por Ferroba.

Comparadas com magnetos do tipo metálico, as ferrites têm maior estabilidade magnética, baixo peso específico (≈ 5 g/cm³) e alta resistência eléctrica ($\rho \approx 1$ M Ω m) podendo portanto serem consideradas isolantes eléctricos. São no entanto mecanicamente mais duras e quebradiças e só podem ser maquinadas usando técnicas especiais. Exceptua-se, claro, a Ferroba que pode ser cortada à tesoura.

A ferrite tem uma relativamente alta coercividade (≈ 240 kA/m), valores moderados de remanescência e uma característica de desmagnetização quase linear. Devido ao seu baixo custo, as ferrites são hoje usadas largamente em numerosas aplicações.

GRUPO IV — Magnetos de terras-raras

Os magnetos de terras-raras e cobalto têm a fórmula geral $TRCo_5$, onde TR é um dos elementos das terras-raras tais como o samário ou neodímio. Estes magnetos são produzidos por meio da técnica da metalurgia dos pós, idêntica à usada com as ferrites. As partículas são comprimidas na forma desejada e sujeitas a um campo magnético muito intenso (≈ 2400 kA/m) e finalmente sinterizadas numa atmosfera inerte (normalmente o argon) para não contaminar o material.

Embora se tenham tentado combinações diferentes de terras-raras, o tipo mais importante é o samário-cobalto (Sm Co_5), conhecido comercialmente por SUPERMAGLOY. Na figura 5 mostra-se uma comparação das características do Supermagloy com os outros tipos de materiais magnéticos, indicando o ponto de produto energético máximo.

As vantagens dos magnetos de terras-raras residem no seu elevado produto energético máximo que é cerca de 3 a 4 vezes maior que a dos outros tipos de magnetos. O valor da remanescência está situado entre a dos magnetos metálicos e a dos cerâmicos, mas a sua característica de desmagnetização é perfeitamente linear em toda a sua zona de funcionamento. Além disso, estes magnetos são muito estáveis magneticamente. A sua principal desvantagem é o preço por unidade de volume que é inevitavelmente muito maior que os dos magnetos clássicos, devido ao elevado custo da matéria-prima e técnica de construção mais sofisticada. Contudo, devido ao seu alto valor do produto energético máximo e elevada coercividade, estes magnetos permitem o uso de reduzidos comprimentos segundo a direcção de magnetização e não necessitam de protecção (peças polares em ferro) contra campos desmagnetizantes exteriores.

Os magnetos de terras-raras são também extremamente difíceis de maquinar e por isso produzem-se já em formas normalizadas. No entanto, as partículas TRCo_5 podem também misturar-se com um agente ligante tal como resina epoxy ou outro material polimérico e serem depois comprimidos na forma requerida, de que o magneto tipo HERA é um exemplo. Porém, devido ao agente ligante, tanto B_r como H_c ficam reduzidos para cerca de 1/3 em relação ao

magneto puro de Sm Co_5 . Assim, para produzir o mesmo efeito necessita-se de um volume de magneto Hera cerca de duas vezes o volume do Supermagloy. Outra desvantagem é que a temperatura máxima de funcionamento é cerca de 100°C , devido à presença do polímero. Todavia os magnetos tipo Hera são mais baratos que o Sm Co_5 e facilmente maquináveis.

4 — Cálculo de um magneto permanente em regime estático

Um magneto está a funcionar em regime estático quando, uma vez magnetizado no seu circuito magnético, são fixadas as dimensões do entreferro e o magneto permanente não é influenciado por campos magnéticos exteriores. O circuito magnético representado na figura 6 em que um magneto de comprimento ℓ_m e secção transversal A_m está inserido, o entreferro g aberto na zona do ferro macio é responsável pela auto-desmagnetização do magneto. O cálculo do magneto permanente em regime estático consiste simplesmente em estabelecer as relações entre as propriedades magnéticas do material e as dimensões do magneto com o fluxo útil no entreferro produzido pelo magneto permanente.

Aplicando a lei de Ampère

$$\oint (\vec{H} \cdot d\vec{\ell}) = \sum ni$$

ao circuito magnético composto pelo magneto permanente, ferro e entreferro e notando que $\sum ni = 0$ (não há corrente de condução), resulta

$$H_m \ell_m + H_{Fe} \ell_{Fe} + H_g g = 0 \quad (1)$$

onde $H_m \ell_m$ é a f.m.m. produzida pelo magneto permanente, $H_{Fe} \ell_{Fe}$ é a queda de potencial magnético ao longo do circuito em ferro de comprimento ℓ_{Fe} e $H_g g$ a queda de potencial magnético no entreferro.

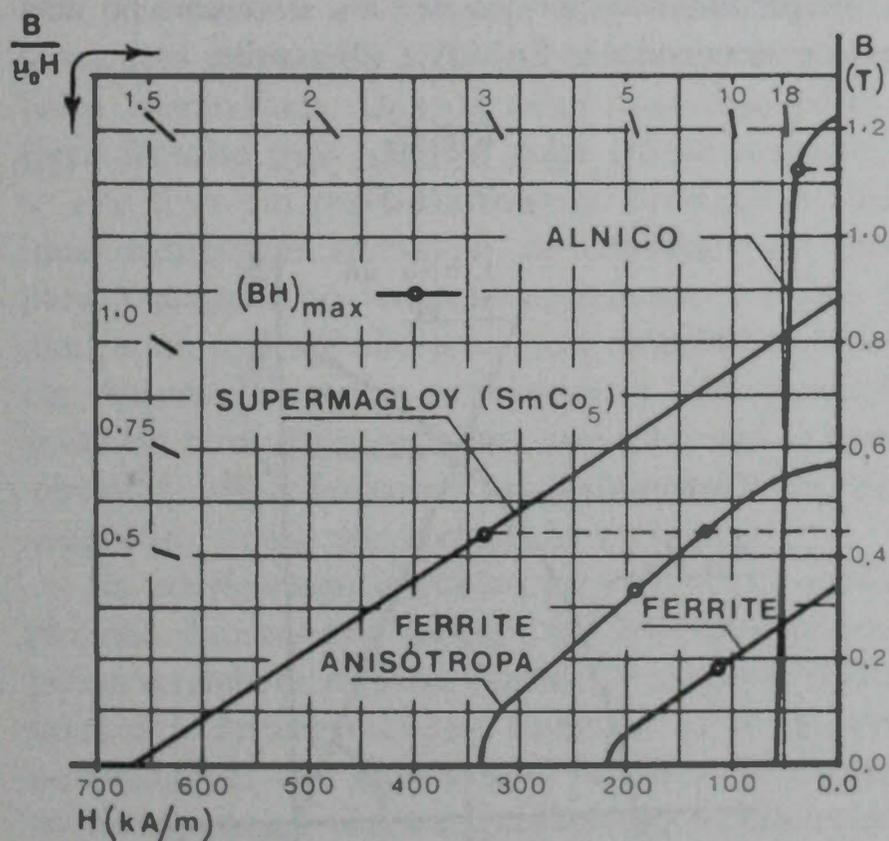


Fig. 5 — Comparação das propriedades do SmCo_5 com outros materiais magnéticos

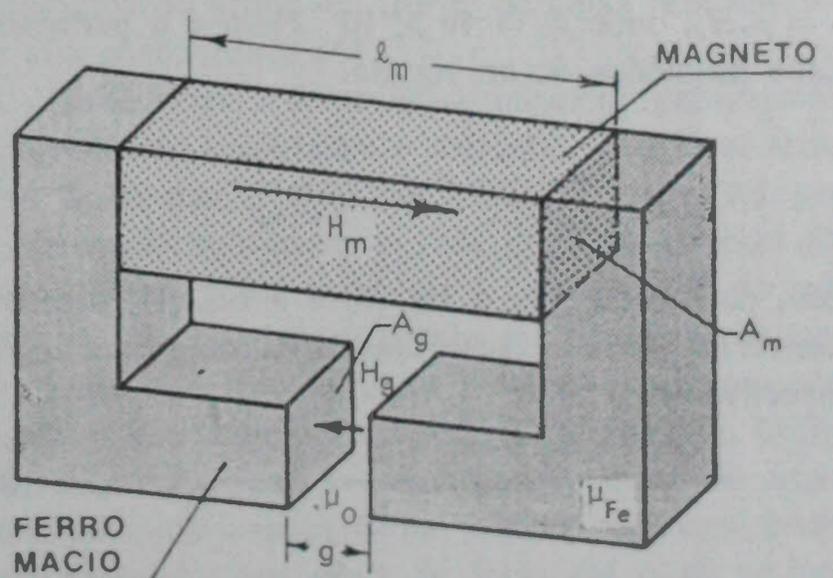


Fig. 6 — Circuito magnético com magneto permanente

Pelo princípio da conservação do fluxo, o fluxo total $B_m A_m$ produzido pelo magneto permanente deve satisfazer a equação

$$B_m A_m = B_g A_g + \phi_{disp} \quad (2)$$

onde $B_g A_g = \phi_g$ é o fluxo no entreferro e ϕ_{disp} representa o fluxo de dispersão ao longo do circuito magnético.

A Eq. (2) e a Eq. (1) podem ser escritas na forma

$$B_m A_m = B_g A_g \left(1 + \frac{\phi_{disp}}{B_g A_g} \right) = K_1 B_g A_g \quad (3)$$

e

$$H_m \ell_m = - H_g g \left(1 + \frac{H_{Fe} \ell_{Fe}}{H_g g} \right) = - K_2 H_g g \quad (4)$$

onde

$$K_1 = \left(1 + \frac{\phi_{disp}}{\phi_g} \right) = 1 + \frac{P_{disp}}{P_g} \quad (5)$$

é o factor de dispersão e

$$K_2 = 1 + \frac{H_{Fe} \ell_{Fe}}{H_g g} \quad (6)$$

é o factor de relutância, responsável pela queda de potencial magnético no circuito para circular o fluxo útil através das peças polares no entreferro.

O factor de dispersão K_1 depende apenas da geometria do circuito magnético e pode ser calculado a partir da permeância de dispersão P_{disp} e da permeância útil P_g do entreferro. Na prática K_1 é sempre maior que K_2 . Normalmente K_2 varia entre 1.05 e 1.45, aproximadamente, dependendo da permeabilidade das peças polares em ferro. Porém K_1 pode ser da ordem de 20 ou mais em circuitos magnéticos com magnetos de largas dimensões.

Dividindo membro a membro as Eq. (3) e (4) e notando que a densidade de fluxo no entreferro é $B_g = \mu_0 H_g$, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética do ar, resulta:

$$-\frac{B_m}{H_m} = \mu_0 \frac{K_1 A_g \ell_m}{K_2 A_m g} \quad (7)$$

onde, de acordo com a Eq. (3) e a Eq. (4), a secção transversal A_m e o comprimento ℓ_m do magneto são respectivamente

$$A_m = K_1 \frac{B_g}{B_m} A_g \quad (8)$$

e

$$\ell_m = - K_2 \frac{H_g}{H_m} g \quad (9)$$

Convém esclarecer que o comprimento do magneto ℓ_m é uma quantidade essencialmente positiva e portanto H_m deverá ser negativo, isto é, o campo magnético produzido pelo magneto é desmagnetizante.

4.1 — Ponto de funcionamento do magneto

A quantidade B_m/H_m na Eq. (7) tem as dimensões de (Henry/metro) e é chamada *permeância unitária*, sendo numericamente igual ao coeficiente angular da linha de carga OP no segundo quadrante da curva de desmagnetização do magneto, como indica a figura 7.

O ponto de intersecção P da linha de carga com a curva de desmagnetização do magneto no 2.º quadrante $B_m(H_m)$ chama-se ponto de funcionamento do magneto. Conhecidas as coordenadas B_m e H_m do ponto de funcionamento, então as Eq. (8) e (9) permitem determinar o valor da secção transversal A_m e comprimento ℓ_m do magneto, para uma dada densidade de fluxo B_g , área do entreferro A_g e comprimento do entreferro g .

Fixando A_m , ℓ_m e A_g , a Eq. (7) mostra que aumentando o entreferro g , diminui o ângulo θ , indicando que B_m no magneto decresce e conseqüentemente decresce a densidade de fluxo B_g no entreferro, como era de esperar.

4.2 — Ponto de funcionamento para o volume mínimo de material magnético

Para uma dada densidade de fluxo B_g no entreferro existe uma posição particular do ponto de funcionamento P do magneto na característica de desmagnetização para o qual o volume do magneto permanente é mínimo.

Representando por $V_m = A_m \ell_m$ o volume do magneto e atendendo às Eq. (8) e (9) resulta

$$V_m = \frac{K_1 K_2 B_g^2}{\mu_0 (B_m H_m)} \cdot V_g \quad (10)$$

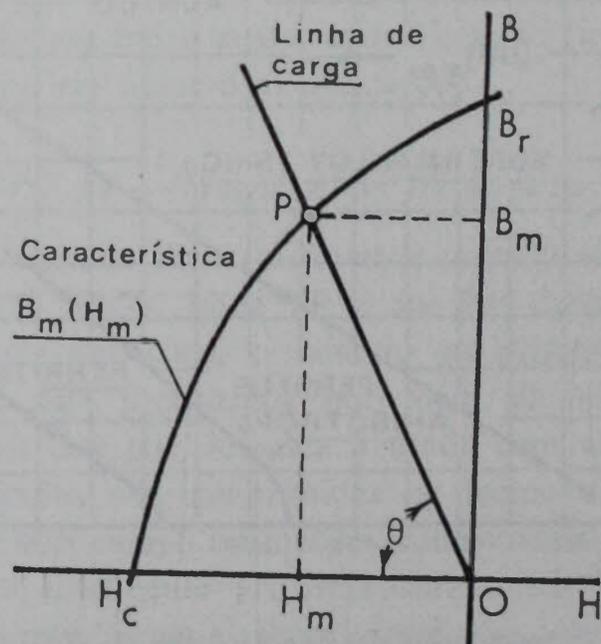


Fig. 7 — Ponto de funcionamento do magneto permanente

onde $V_g = A_g g$ é o volume do entreferro. Para um dado volume do entreferro, o volume do magneto é mínimo quando o produto energético $B_m H_m$ for máximo, como mostra a Eq. (10). Daqui resulta a importância do produto energético máximo na economia do material magnético. A construção para determinar o ponto da característica de desmagnetização onde o produto $B_m H_m$ é máximo está indicada na figura 3. Logo, a diagonal OQ do rectângulo $QB_r OH_c$ dá aproximadamente a permeância unitária da Eq. (7) para a condição do mínimo volume de material do magneto permanente.

5 — Colocação dos magnetos permanentes em máquinas eléctricas rotativas

Existem três configurações básicas para colocar um magneto permanente numa máquina eléctrica rotativa a fim de gerar o sistema de excitação: *Configuração Radial, Circunferencial e Axial*.

Estas configurações tanto podem existir no rotor (conforme ilustra a figura 8a), como no estator (conforme mostra a figura 8b).

Na *configuração radial* cada magneto fornece o fluxo total por polo através do entreferro, enquanto na configuração circunferencial cada magneto fornece apenas metade do fluxo por polo através de um duplo entreferro, de modo que o resultado é idêntico. Porém, quando se usam magnetos metálicos de baixa coercividade na configuração radial é necessário protegê-los com peças polares em ferro macio de modo a criar uma barreira ao fluxo de reacção produzido pelas correntes em presença do magneto. A figura 9 ilustra este efeito quando a corrente está no eixo em quadratura. Sem a protecção polar em ferro o fluxo produzido pela corrente em presença tende a desmagnetizar o magneto permanente metálico, uma vez que este tem baixa coercividade. Quando existe protecção polar o fluxo fecha-se pelo terminal polar em ferro macio, e se este tiver um perfil conveniente consegue-se ainda uma distribuição sinusoidal de densidade de fluxo para o magneto ao longo do entreferro. A figura 10 mostra um rotor de oito polos com magnetos metálicos em Alcomax dispostos radialmente e com protecção polar em ferro. Para cunhar os magnetos sem os curto-circuitar magneticamente usa-se um material não-magnético, como por exemplo o alumínio.

Na *configuração circunferencial*, porém, a protecção não é necessária porque ela está inerentemente presente, embora algumas regiões do magneto fiquem sujeitas a desmagnetização. Como se pode observar na figura 11, que mostra uma máquina de corrente contínua com os magnetos colocados circunferencialmente, os magnetos são susceptíveis de desmagnetizar devido à reacção magnética do induzido, sobretudo

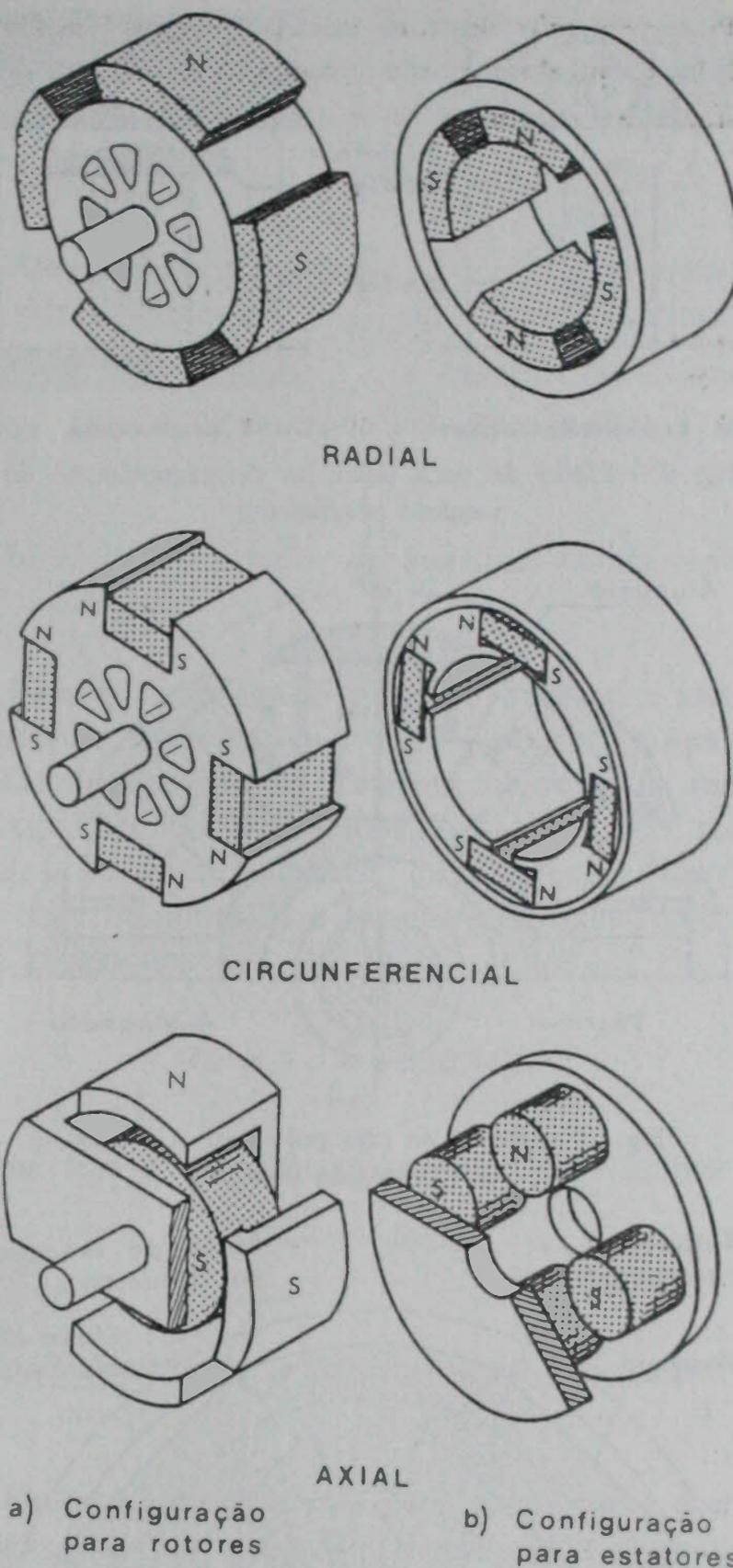
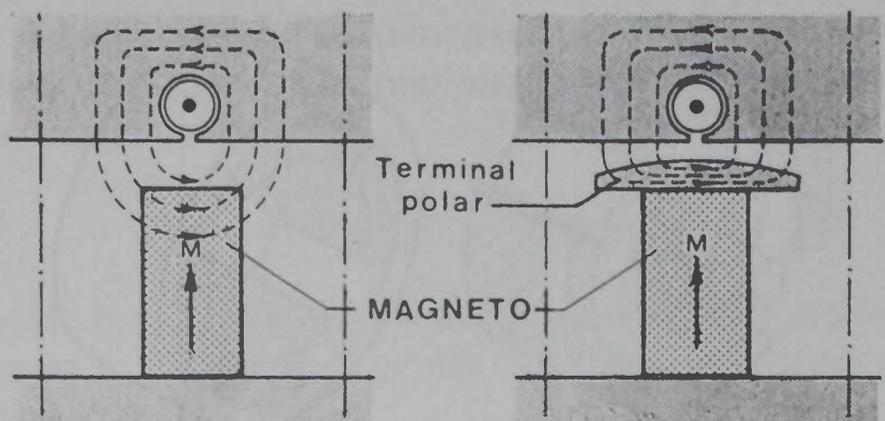


Fig. 8 — Colocação de magnetos permanentes em rotores e estatores

num dos extremos do magneto. Para evitar esta desmagnetização dos magnetos metálicos, dever-se-á usar magnetos do grupo II, isto é, de baixa remanescência e alta coercividade [5].

Na *configuração axial* o magneto permanente é magnetizado axialmente e colocado entre duas flanges em ferro macio fixas ao veio do rotor. As peças polares são imbricadas ou interdigitadas criando alternativamente pólos magnéticos na superfície do rotor. Apesar do fluxo de dispersão ser grande nesta configuração, este tipo de rotor é muito usado nos alternadores dos automóveis devido à sua robustez. O fluxo de dispersão pode no entanto ser atenuado usando rotores multi-interdigitados usando magnetos cerâmicos separados por anéis de ferro aos quais se ligam peças polares [6].



Sem protecção polar Com protecção polar

Fig. 9 — Efeito da peça polar na desmagnetização do magneto permanente

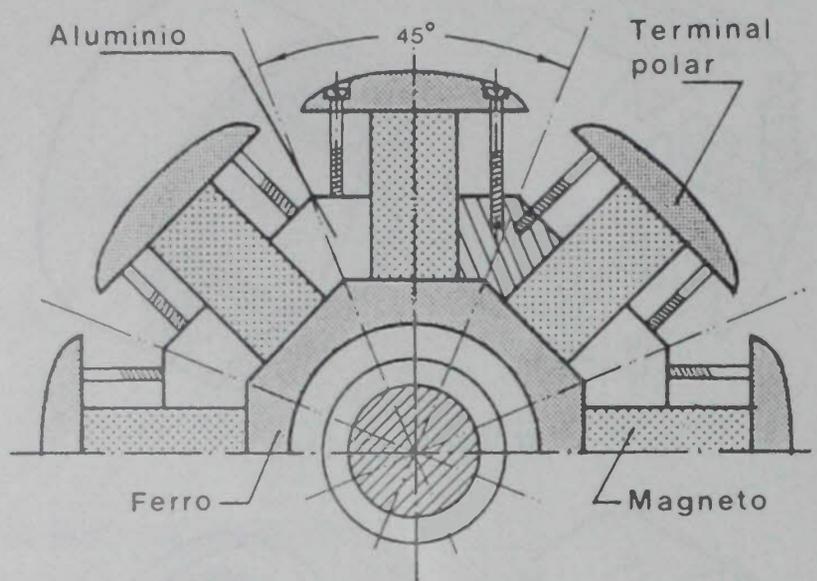


Fig. 10 — Rotor de oito pólos em Alcomax com protecção polar

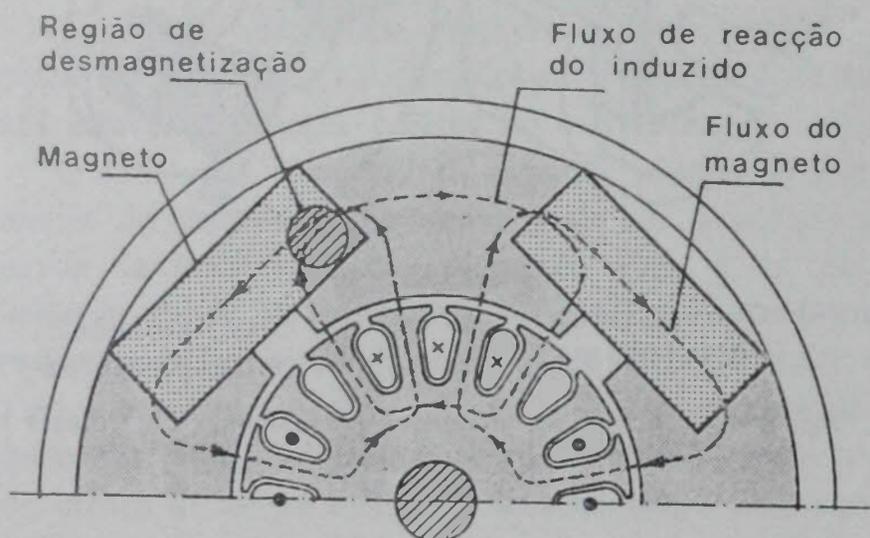


Fig. 11 — Configuração circunferencial dos magnetos numa máquina de corrente contínua

6 — Comparação das proporções e geometria de uma máquina eléctrica utilizando de per si as três famílias de materiais magnéticos

A figura 12 representa uma máquina de corrente contínua excitada por meio de magnetos permanentes. Se for I a corrente absorvida pelo induzido e ϕ_g o fluxo útil no entreferro produzido pelos magnetos permanentes, a máquina funcionará como motor, desenvolvendo um binário T dado por

$$T = C \phi_g I \quad (11)$$

onde C é uma constante construtiva do induzido.

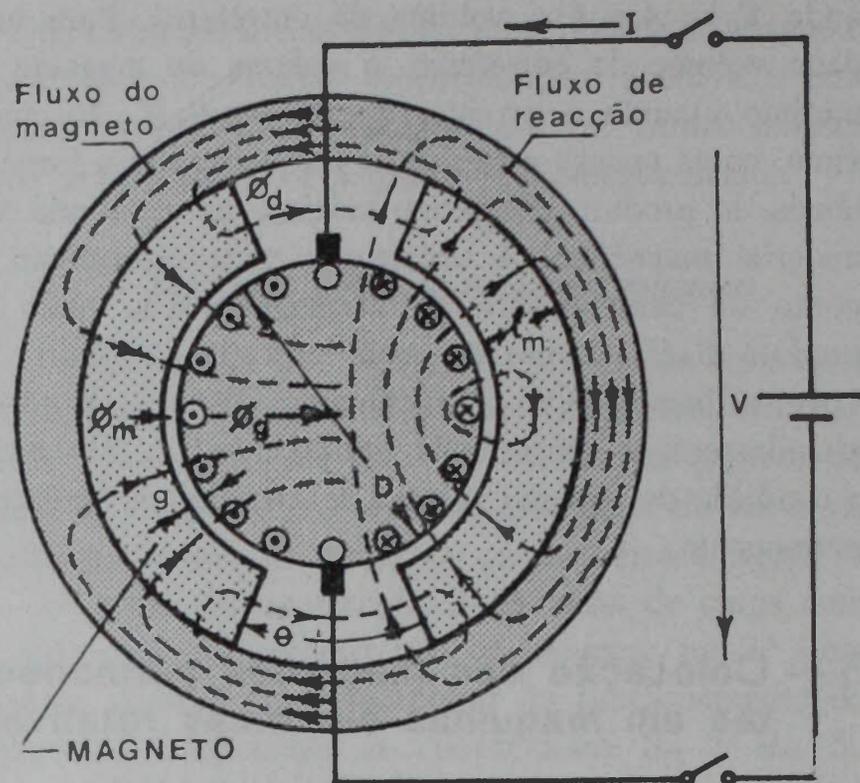


Fig. 12 — Máquina de corrente contínua excitada com magnetos permanentes

Para um dado diâmetro fixo D do induzido a corrente I fica limitada, por razões térmicas, a um valor bem determinado. Logo, para aumentar o binário motor é necessário aumentar o fluxo ϕ_g produzido pelo magneto e portanto usar bons materiais magnéticos permanentes para a excitação da máquina.

Sob o ponto de vista de projecto da máquina é importante comparar as proporções que se obtêm quando se empregam na sua construção cada um dos três diferentes tipos de magnetos permanentes (metálicos, cerâmicos e terras-raras) cujas características de desmagnetização estão representadas graficamente na figura 5. Para esta comparação admitam-se as seguintes hipóteses:

- a máquina é bipolar com um factor de relutância $K_2 = 1$;
- o diâmetro $D = 2R$ do induzido é fixo, logo I é o mesmo nos três casos;
- o binário motor produzido em cada máquina é o mesmo, logo, de acordo com a Eq. (11), o fluxo ϕ_g produzido por cada tipo de magneto deverá ser o mesmo;
- o entreferro g e o comprimento axial L da máquina são os mesmos nos três casos;
- o arco polar $b = (\pi - \theta) R$ é fixo e portanto a área $A_g = bL$ debaixo do polo é fixa. Logo, a densidade de fluxo $B_g = \phi_g / A_g$ no entreferro é a mesma nos três casos.

Nestas condições é possível determinar o comprimento radial ℓ_m de cada tipo de magneto e consequentemente o diâmetro exterior D_{ext} para cada máquina. Conhecida a característica de desmagnetiza-

ção, o comprimento ℓ_m do magneto pode ser calculado conforme descrito na secção 4, através da Eq. (7),

$$-\frac{B_m}{\mu_0 H_m} = K_I \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{\ell_m}{g} \quad (12)$$

onde, para esta geometria, o factor de dispersão tem a forma [5]

$$K_I = 1 + \frac{4}{\pi\theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)} \left\{ \left(1 + \frac{R}{\ell_m}\right) \cdot \log \left(1 + \frac{\ell_m}{R}\right) - 1 \right\} \frac{g}{R} \quad (13)$$

Considerando como exemplo uma máquina de potência fraccionária com uma relação $g/R = 0.15$ e $(1-\theta/\pi) = 0.75$, o factor de dispersão é da ordem de $K_I = 1.03$, isto é, 3% do fluxo produzido pelo magneto dispersa-se sem chegar ao induzido, não contribuindo para o binário.

a) *Diâmetro exterior da máquina usando magnetos de Sm Co₅*

Os magnetos de terras-raras devem idealmente funcionar no ponto de $(BH)_{max}$ a fim de minimizar o seu volume e consequentemente o seu custo. A característica de desmagnetização do SmCo₅ representada na figura 5, dá para esta condição o valor $-B_m/\mu_0 H_m = 1$ ou seja $B_m = 0.42$ T e $H_m = 334$ kA/m. Para magnetos segmentados é $A_m = A_g$ e substituindo na Eq. (12) resulta para o comprimento radial do magneto o valor

$$\ell_m = \frac{g}{K_I} = 0.15 R \quad (14)$$

e para o valor da densidade de fluxo no entreferro

$$B_g = \frac{B_m}{K_I} = 0.41 T$$

que conduz a um fluxo útil no entreferro de

$$\phi_g = B_g A_g = B_g (\pi-\theta) RL = 0.97 RL \quad (15)$$

Metade do fluxo produzido pelo magneto $\phi_m = K_I \phi_g$ passa através da secção cL da carcaça na linha neutra e pela continuidade do fluxo vem então

$$\frac{1}{2} K_I \phi_g = B_{Fe} \cdot cL \quad (16)$$

Admitindo uma densidade de fluxo máxima no ferro de $B_{Fe} = 1.5$ T (saturação) e substituindo a Eq. (15) na Eq. (16) resulta para a espessura da carcaça

$$c = 0.33 R \quad (17)$$

Atendendo aos resultados (14) e (17), o diâmetro exterior da máquina D'_{ext} em função do diâmetro D do induzido vem:

$$D'_{ext} = 2(c + \ell_m + g + R) = 1.63 D \quad (18)$$

b) *Diâmetro exterior da máquina usando ferrites cerâmicas*

Para que o magneto cerâmico produza a mesma densidade de fluxo $B_m = 0.42$ T que o magneto SmCo₅ é necessário que funcione no ponto da característica definido pela relação $-B_m/\mu_0 H_m = 3$, como mostra a figura 5. Nestas condições, e fazendo $A_m = A_g$, resulta para o comprimento radial do magneto o valor

$$\ell_m = 3 \frac{g}{K_I} = 0.44 R$$

o que leva a um diâmetro exterior da máquina de

$$D''_{ext} = 1.92 D \quad (19)$$

c) *Diâmetro da máquina usando magnetos de alnico*

Os magnetos metálicos, dada a sua baixa coercividade, convém que sejam estabilizados magneticamente num ponto da sua característica muito próxima da remanescência e protegidos por terminais polares, com uma área $A_g = bL$, contra a reacção magnética do induzido. Considerando o magneto a funcionar num ponto definido pela relação $-B_m/\mu_0 H_m = 18$, ou seja $B_m = 1.12$ T ou $B_g = 1.09$ T, da Eq. (12) resulta

$$\ell_m = 18 \frac{g}{K_I} \cdot \frac{A_m}{A_g} = 2.62 R \frac{A_m}{A_g}$$

onde $A_m = mL$ é a secção transversal do magneto. Pela conservação do fluxo, resulta

$$0.41 A_g = 1.09 A_m$$

donde $m = 0.37 b$

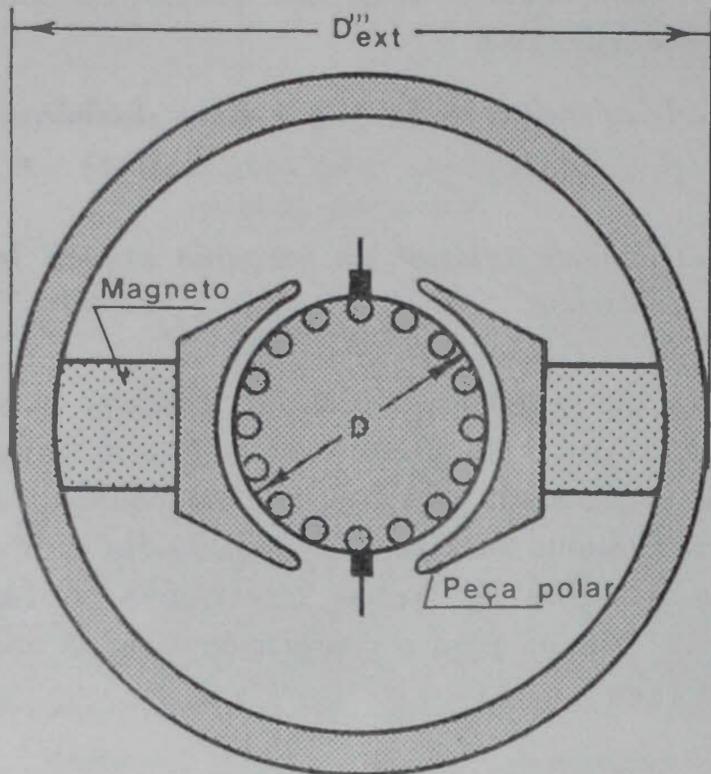
e portanto

$$\ell_m = 0.97 R$$

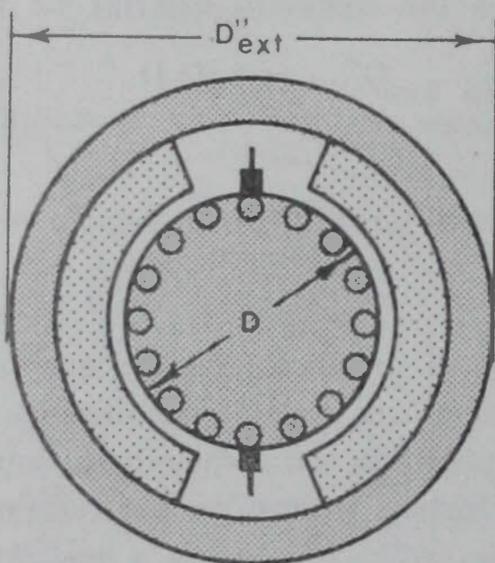
que é dos três casos o comprimento mais longo.

Com os terminais polares de comprimento radial 2 g a máquina com magnetos de alnico resulta com um diâmetro exterior de

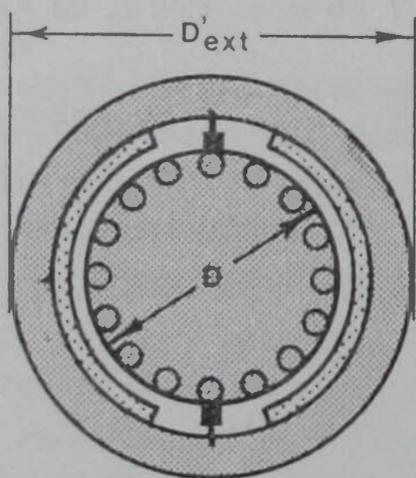
$$D'''_{ext} = 2.75 D \quad (20)$$



ALNICO



FERRITE



TERRAS RARAS

Fig. 13 — Comparação das proporções de três máquinas que produzem o mesmo binário

Na figura 13 estão representadas na mesma escala as proporções obtidas para cada uma das máquinas.

7 — Conclusões

O exemplo apresentado ilustra a importância da aplicação dos novos materiais magnéticos na miniaturização de motores eléctricos. Para o alnico é necessário um magneto com um comprimento na direcção radial aproximadamente igual ao raio do induzido e para as ferrites de cerca de metade, enquanto para o SmCo_5 é necessário apenas um magneto com uma espessura na direcção de magnetização da ordem do entreferro. Isto traduz-se numa redução de volume de cerca de 30 % em relação aos motores cerâmicos e de 65 % em relação aos motores antigos em alnico, com a desvantagem destes terem de ser protegidos com peças polares em ferro macio. É certo que o preço unitário do SmCo_5 ainda é bastante superior ao dos magnetos clássicos, mas em sistemas onde o espaço é vital (videocassetes, instrumentos cirúrgicos, robótica, indústria aeroespacial, etc.) os micromotores construídos à custa destes novos materiais têm um impacto enorme.

O elevado custo dos magnetos de SmCo_5 deve-se não só ao sofisticado processo de fabrico mas também, e fundamentalmente, à carestia do cobalto. Com efeito, descobriram-se recentemente na República Popular da China vastas jazidas mineralíferas de terras-raras enquanto a produção do cobalto, oriundo basicamente do Zaire e da Zâmbia, tem sofrido uma drástica redução devido à instabilidade política daquela região e dificuldades técnicas. Por essa razão os japoneses estão a fazer uma intensa investigação no domínio dos materiais magnéticos de terras-raras e, embora ainda não comerciável, conseguiram uma combinação de uma terra-rara — o neodímio — não com cobalto mas com ferro (abundante na natureza) com resultados em termos de custo/produto energético máximo altamente prometedores. A Comunidade Europeia forçada a entrar na competição lançou o programa EURAM que contempla, entre outros, o projecto de investigação destes novos materiais magnéticos permanentes.

AGRADECIMENTOS

O Autor deseja agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e ao Instituto Nacional de Investigação Científica todas as facilidades concedidas para a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] F. BRAILSFORD, *An Introduction to the Magnetic Properties of Materials*, 1968, Longmans.
- [2] C. HECK, *Magnetic Materials and their Applications*, 1974, Butterworths.
- [3] R. J. PARKER, R. J. STUDDERS, *Permanent Magnets and their Applications*, 1962, John Wiley and Sons Inc. New York.
- [4] R. LYNCH, *The Development of Samarium Cobalt Permanent Magnet D. C. Servomotors*, 1976, I. E. E. Conference of Small Electrical Machines, Conference Publication Number 136.
- [5] J. K. BINNS, M. A. JABBAR, *Comparison of performance characteristics of a class of high-field permanent magnet machine for different magnet materials*, September 1981, I. E. E. Second International Conference of Small and Special Electrical Machines, Conference Publication Number 202, pp. 107-110.
- [6] K. J. BINNS, T. S. LOW, *Multistacked permanent magnet generators—the relation between output and magnet characteristics*, September 1981, I. E. E. Second International Conference on Small and Special Electrical Machines, Conference Publication Number 202, pp. 138-141.
- [7] A. L. RODRIGUES, *Two Phase Auto-piloted Synchronous Motors and Actuators*, Ph. D. Thesis, Department of Electrical Engineering, Imperial College of Science and Technology, London, 1983.

ESTIMADO CLIENTE

DÊ-NOS A SUA OPINIÃO

SOBRE A REVISTA

Electricidade

A NOSSA INTENÇÃO É FAZER UMA REVISTA ÚTIL

ÍNDICE DE ANUNCIANTES

| | |
|--|-----------------------|
| Sorefame | verso da capa |
| CEL-CAT | III |
| Siemens | IV, V |
| Morgado & Companhia, Lda. | VI |
| Telemec (Telemecanique) | VII, VIII, IX, X |
| Tudor | XI |
| Landis & Gyr | XII |
| Sotécnica (Condensadores BICC) | XIII |
| Metropolitano | XIV |
| Cunha Barros | XV |
| Bruno Janz | XVI |
| Cabos Ávila | verso de contra-capas |
| Shell | contra-capas |