

Motor Eléctrico de Corrente Contínua com Excitação Híbrida

A. Leão Rodrigues

Prof. Associado da FCT/UNL

Dep. Eng. Electrotécnica, 2825 Monte de Caparica

resumo

O artigo descreve sucintamente a análise do circuito magnético da máquina de corrente contínua com enrolamento de excitação de força magnetomotriz controlável, combinada com a força magnetomotriz produzida por magnetos permanentes. Estudam-se vários tipos de perfil polar da máquina de corrente contínua com excitação híbrida de forma a explorar as potencialidades deste tipo de excitação. Para ilustrar este estudo apresentam-se os resultados experimentais obtidos num motor série tetrapolar para tracção eléctrica.

D. C. Electric Motor with Hybrid Excitation

abstract

The paper describes briefly the elementary analysis of magnet systems applied to d.c. electrical machines combining permanent magnets and a controlled field coil. Some air gap pole profiles of d.c. machines with hybrid excitation are studied in order to explore the circumstances under which combined excitation may be profitably employed. In order to illustrate the theory, experiments on a four-pole series wound d.c. traction motor are reported.

1. Introdução

Na maior parte das aplicações de máquinas eléctricas de corrente contínua é necessário regular o fluxo magnético da excitação o que, obviamente, não é possível fazer numa máquina magnetoeléctrica. No caso de um dínamo, quando a carga ou a velocidade variam, só é possível manter constante a tensão aos terminais ajustando convenientemente a corrente de excitação. Em sistemas de accionamento que empregam motores de corrente contínua de magnetos permanentes, onde a excitação é fixa, a velocidade é normalmente variada por meio de um sistema electrónico de regulação que, forçosamente, tem uma potência maior do que seria necessário se o fluxo de excitação pudesse ser

controlado. Consequentemente, para certas aplicações, é apropriado considerar uma forma híbrida de excitação, isto é, usar simultaneamente no mesmo pólo um magneto permanente e um enrolamento de excitação de reduzida força magnetomotriz que permita pequenos ajustes do fluxo de excitação.

Com os novos materiais magnéticos permanentes de terras raras de alto produto energético, em particular o Nd-Fe-B, é possível dimensionar os pólos da máquina com reduzido volume [1,2] e deixar ainda espaço suficiente para instalar um pequeno enrolamento de excitação. Isto permitirá regular dentro de certos limites o fluxo de excitação da máquina, além de reduzir o seu volume e peso e obviamente aumentar a sua potência específica.

2. Máquina com excitação por meio de enrolamentos

A figura 1 representa uma máquina de corrente contínua bipolar, de entreferro constante δ , excitada por meio de um enrolamento de n espiras atravessadas pela corrente i , isto é, de força magnetomotriz ni . Aplicando a lei de Ampère

$$\oint (\vec{H} \cdot d\vec{l}) = \Sigma i \quad (1)$$

ao circuito magnético e admitindo uma permeabilidade magnética $\mu = \infty$ para o ferro, resulta $2H_0 \delta = 2ni$ onde $H_0 = B / \mu_0$ é a intensidade do campo magnético no entreferro e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética absoluta do ar. A densidade de fluxo B no entreferro vem então

$$B = \mu_0 ni / \delta \quad (2)$$

Se for S a área da superfície efectiva do pólo em presença do induzido, admitindo B uniforme no entreferro e desprezando o fluxo de dispersão, o fluxo magnético por pólo resulta

$$\Phi_p = BS = ni \cdot \mu_0 S / \delta = ni \cdot P \quad (3)$$

onde $P = \mu_0 S / \delta$ é a permeância polar.

Para reduzir o efeito da reacção magnética do induzido na zona da linha neutra real [3], é costume dar ao terminal polar um perfil com a configuração ilustrada na figura 2a. De acordo com a figura 2b, a permeância P_b debaixo do terminal polar por unidade de comprimento axial efectivo da máquina é

$$P_b = \mu_0 \int_{x_a}^{x_b} dx / \theta x = \mu_0 \ln(x_b / x_a) / \theta$$

Como o ângulo θ é geralmente pequeno (5° a 10°) vem

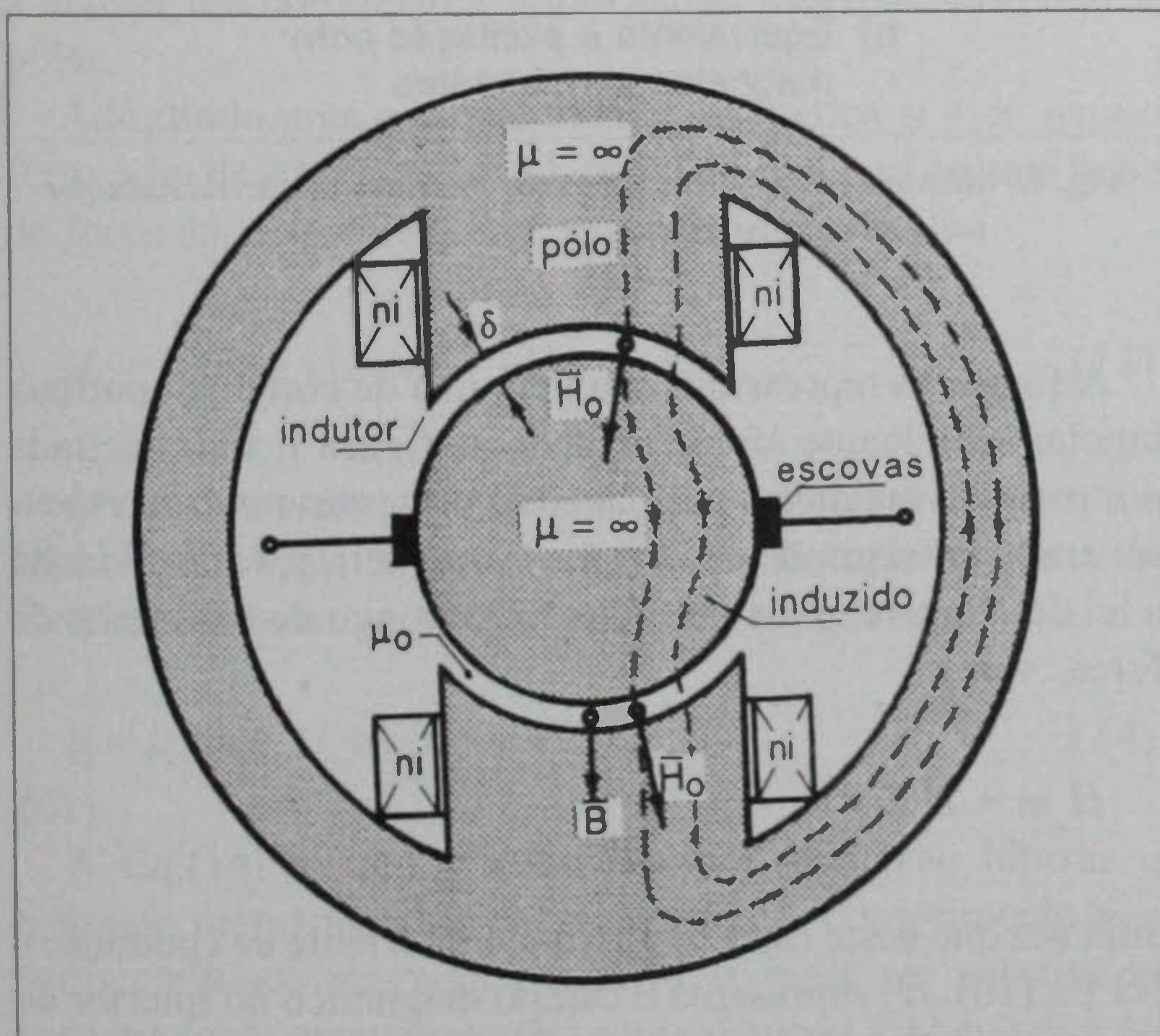


Fig. 1 - Excitação por meio de enrolamento.

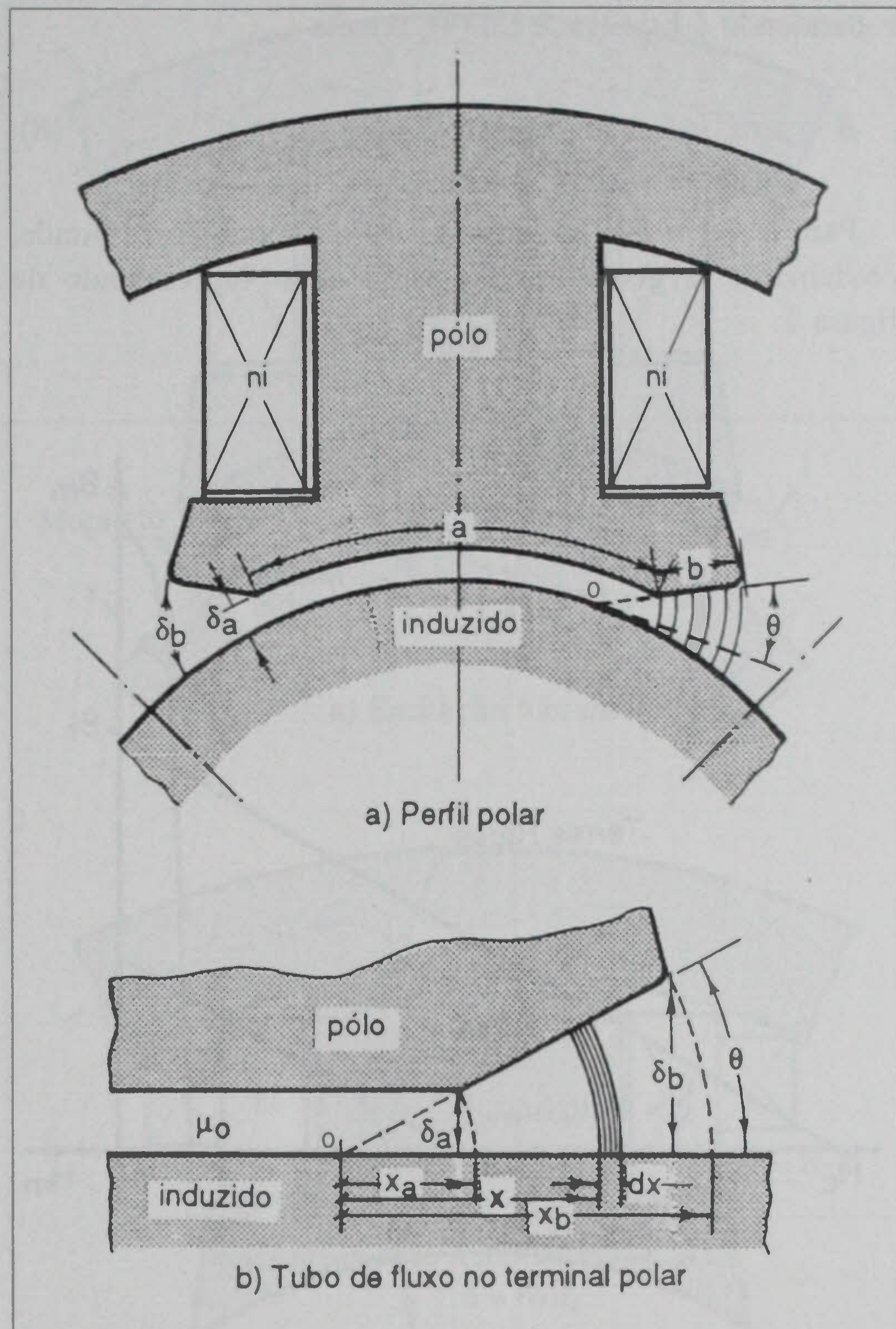


Fig. 2 - Perfil polar para atenuar a reacção magnética.

$\delta_b \approx x_b \theta$ e $\delta_a \approx x_a \theta$ e portanto o fluxo Φ_b por unidade de comprimento axial da máquina debaixo de um terminal polar, vem

$$\Phi_b = ni \cdot P_b = \mu_0 ni \cdot \ln(\delta_b / \delta_a) / \theta$$

e a densidade média B_b de fluxo resulta

$$B_b = \Phi_b / (x_b - x_a) = \mu_0 ni \cdot \ln(\delta_b / \delta_a) / (\delta_b - \delta_a) \quad (4)$$

A densidade média de fluxo B debaixo do pólo com a configuração representada na figura 2a escreve-se então

$$B = (\Phi_a + \Phi_b) / (a + 2b) = B_a a / (a + 2b) + 2B_b b / (a + 2b) \quad (5)$$

Definindo a relação

$$k = a / (a + 2b) \quad (6)$$

a Eq.(5) vem

$$B = kB_a + (1 - k) B_b \quad (7)$$

e atendendo à Eq.(2) e à Eq.(4), resulta

$$B = \mu_0 n i [k/\delta_a + (1-k) \ln(\delta_b/\delta_a)/(\delta_b - \delta_a)] \quad (8)$$

Para $k = 1$ a Eq.(8) reduz-se à Eq.(2) que corresponde, obviamente, à geometria do perfil polar representado na figura 1.

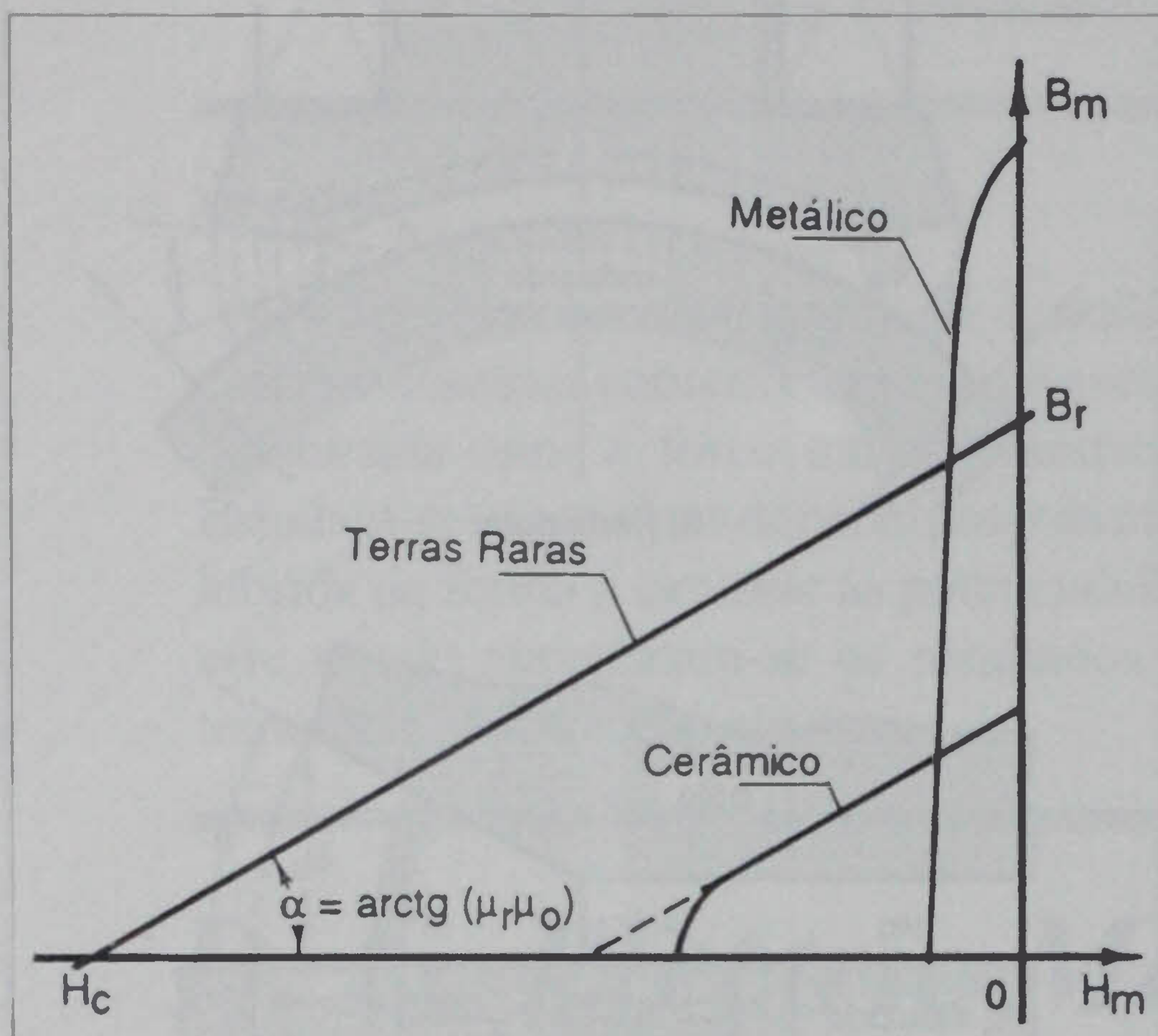


Fig. 3 - Características de desmagnetização.

3. Máquina com excitação por meio de magnetos permanentes

As características de desmagnetização típicas das três famílias de materiais magnéticos permanentes, usualmente empregues na construção de máquinas dinamoelétricas, estão representadas na figura 3.

Os materiais metálicos, do tipo Alnico, têm uma característica de desmagnetização não linear com alta remanescência B_r e baixa coercividade H_c , enquanto que os materiais cerâmicos, ou ferrites, embora a sua característica também não seja linear, pode, no entanto, considerar-se praticamente linear ao longo de uma larga região. Só as características de desmagnetização dos novos materiais de terras raras (SmCo e NdFeB) são lineares [4] e podem ser representadas pela equação

$$B_m = \mu_r \mu_0 (H_c + H_m) \quad (9)$$

onde μ_r é a permeabilidade magnética relativa do material e H_c a sua coercividade (a que se dá um valor positivo), sendo H_m negativo no segundo quadrante. A remanescência do magneto é dada para $H_m = 0$ e vale $B_r = \mu_r \mu_0 H_c$. Para os materiais magnéticos de terras raras verifica-se aproximadamente $\mu_r = 1$ e então $B_r = \mu_0 H_c$ e portanto μ_0 mede o declive da característica de desmagnetização.

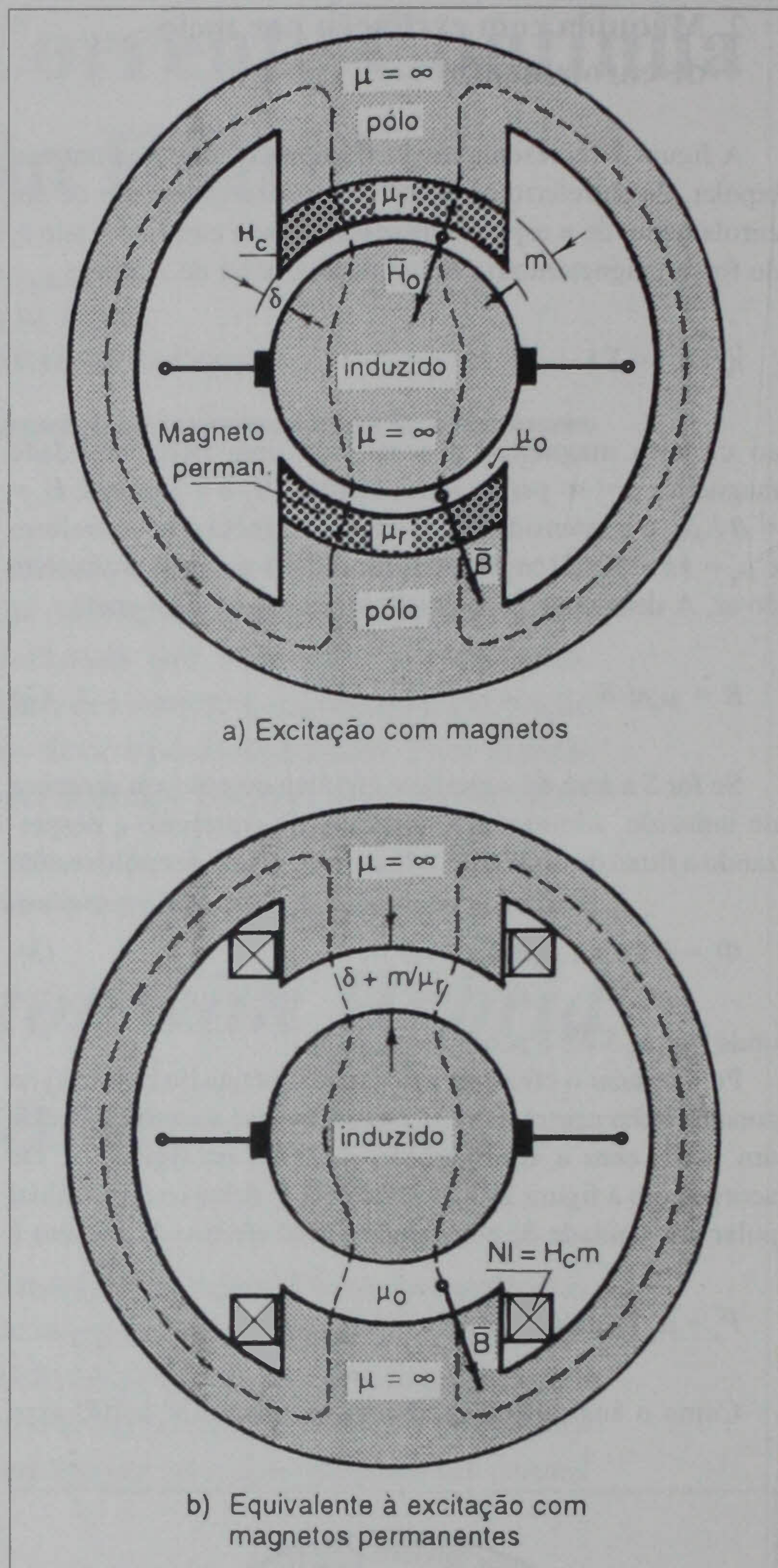


Fig. 4 - Máquina dinamoelétrica e máquina equivalente excitada por meio de renrolamentos.

A figura 4a representa uma máquina de corrente contínua bipolar semelhante à representada na figura 1, mas excitada por meio de magnetos permanentes de terras-raras de espessura radial m segundo a direcção de magnetização. Aplicando a lei de Ampère, dada pela Eq.(1), ao longo de uma linha de força, vem

$$H_m m + H_0 \delta = 0 \quad (10)$$

uma vez que neste caso $\sum i = 0$ (não há corrente de condução). Na Eq.(10), H_m representa o campo magnético no interior do magneto segundo a sua direcção de magnetização e H_0 o campo magnético criado no entreferro. Atendendo

a que a densidade de fluxo no entreferro é $B = \mu_0 H_0$ e que $B_m = B$ (área transversal do magneto igual à área polar) a Eq.(10) escreve-se

$$H_m = -(B/\mu_0)(\delta/m) \quad (11)$$

Substituindo a Eq.(11) na Eq.(9), resulta

$$B = \mu_0 H_c m / (\delta + m/\mu_r) \quad (12)$$

Comparando a Eq.(12) com a Eq.(2) conclui-se que o magneto de coercividade H_c , espessura m e permeabilidade relativa μ_r colocado na máquina representada na figura 4a pode ser substituído por uma força magnetomotriz equivalente $NI = H_c m$ produzindo a mesma densidade de fluxo B no entreferro equivalente de comprimento $\delta + m/\mu_r$, como ilustra a figura 4b.

4. Máquina com excitação híbrida

Considere-se uma máquina de corrente contínua mas agora com excitação híbrida, isto é, na qual uma força magnetomotriz ni criada por um enrolamento de n espiras atravessado por uma corrente i produz um fluxo magnético concordante com o fluxo produzido por um magneto permanente montado no mesmo pólo. Pretende-se analisar este sistema para alguns tipos de perfil frequentemente usados em máquinas de corrente contínua clássicas.

4.1. Magnetos colocados na face polar com entreferro uniforme

A figura 5a representa um pólo de uma máquina de corrente contínua com excitação híbrida onde se combina a força magnetomotriz ni com um magneto permanente de espessura radial m colocado na face polar de modo a manter um entreferro δ uniforme ao longo de todo o arco polar.

Admitindo uma permeabilidade magnética $\mu = \infty$ para o ferro, a lei de Ampère, Eq.(1), aplicada ao longo de uma linha de força dá $H_m m + H_0 \delta = ni$, donde

$$H_m = -(B/\mu_0)(\delta/m) + ni/m \quad (13)$$

uma vez que neste caso $\sum i = ni$. Substituindo novamente a Eq.(13) na Eq. (9), que representa a característica de desmagnetização do magneto, obtém-se agora

$$B = \mu_0 (ni + H_c m) / (\delta + m/\mu_r) \quad (14)$$

A Eq.(14) mostra que no caso da excitação híbrida o magneto permanente de coercividade H_c , comprimento m e permeabilidade magnética relativa μ_r pode ser substituído por uma força magnetomotriz equivalente $ni + H_c m = ni + NI$ produzindo a mesma densidade de fluxo B no entreferro

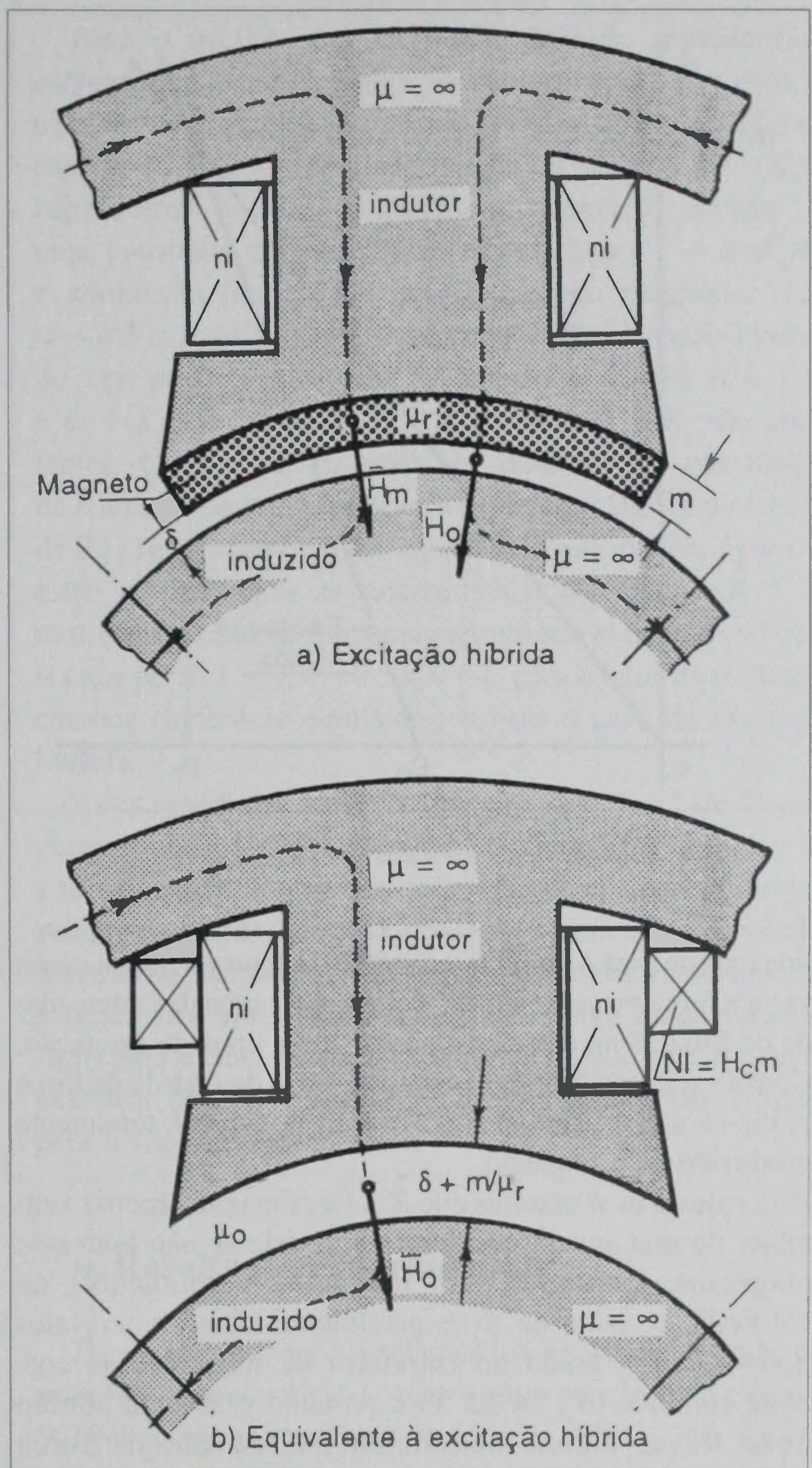


Fig. 5 - Máquina com excitação híbrida e máquina equivalente excitada por meio de enrolamentos.

equivalente de comprimento $\delta + m/\mu_r$, como ilustra a figura 5b.

Se for B_{max} a máxima densidade de fluxo pretendida no entreferro, a Eq.(13) mostra que é necessário uma força magnetomotriz máxima, produzida pelo enrolamento de excitação, dada por

$$(ni)_{max} = B_{max} \delta/\mu_0 - m(B_r - B_{max})/\mu_r \mu_0 \quad (15)$$

O primeiro termo da Eq.(15) é igual à força magnetomotriz necessária para excitar a máquina de entreferro δ e sem magnetos permanentes, como indica a Eq.(2). O segundo termo mostra que o facto de colocar na face polar uma camada uniforme de espessura m de material magnético permanente, só reduz a força magnetomotriz total se a remanescência B_r do magneto for maior do que a densidade de fluxo máxima B_{max} pretendida. Admitindo

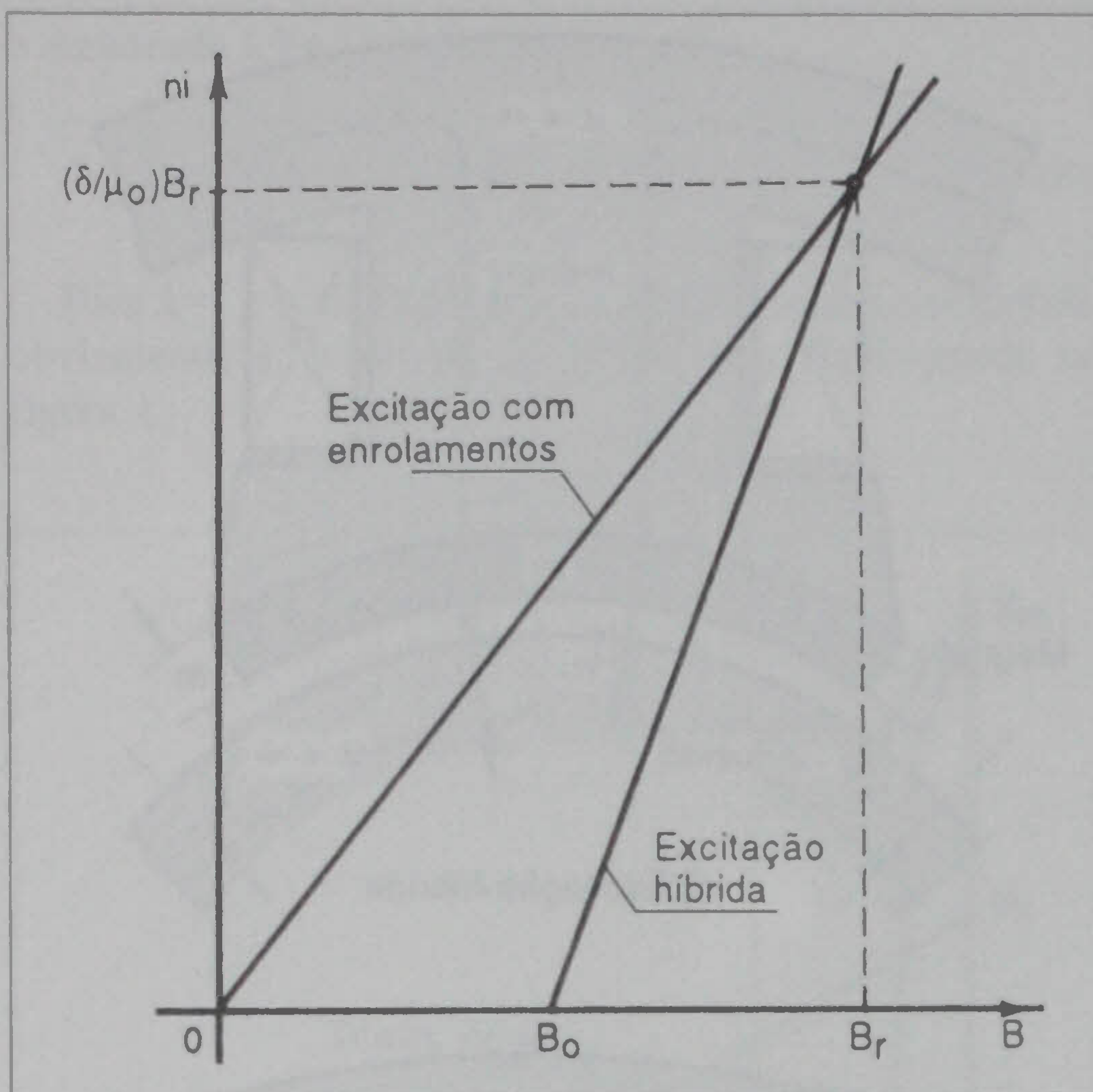


Fig. 6 - Variação de ni com B para os dois tipos de excitação.

linearidade para o circuito magnético, a figura 6 ilustra como varia a força magnetomotriz ni para obter uma dada densidade de fluxo B no entreferro para os dois tipos de excitação. Com a excitação híbrida, quando $ni = 0$, a densidade de fluxo reduz-se a $B_0 = [m/(m + \mu_r \delta)] B_r$, valor que é totalmente produzido pelo magneto.

Para valores de B maiores que B_r , a força magnetomotriz vem maior do que aquela que seria necessária se não houvesse magnetos. Contudo, para magnetos permanentes de Nd-Fe-B, o valor de B_r é geralmente superior ao valor típico de B_{med} usado no entreferro de máquinas de corrente contínua ($B_{med} \approx 0,5$ T) e portanto o sistema híbrido pode trazer alguns benefícios na redução da força magnetomotriz [5].

4.2. Magnetos colocados parcialmente na face polar com entreferro uniforme

Uma configuração possível para o perfil polar está representada na figura 7. Apenas parte dos terminais polares são revestidos por uma camada uniforme de material magnético de espessura m e comprimento b de forma a deixar um entreferro constante δ_b . A zona central de arco a tem um entreferro constante δ_a que, de um modo geral, pode ser diferente de δ_b (entreferro em degrau).

A densidade de fluxo na zona central polar de entreferro δ_a é dada pela Eq.(2), ou seja, $B_a = \mu_0 ni / \delta_a$, enquanto que debaixo dos magnetos de entreferro δ_b é dada, de acordo com a Eq.(14), pela relação $B_b = \mu_0 (ni + H_c m) / (\delta_b + m/\mu_r)$.

Atendendo à Eq.(7), a densidade média de fluxo ao longo do arco polar será então

$$B = \mu_0 [k ni / \delta_a + (1 - k)(ni + H_c m) / (\delta_b + m/\mu_r)] \quad (16)$$

que se reduz à Eq.(14), quando $k = 0$ e $\delta_b = \delta$.

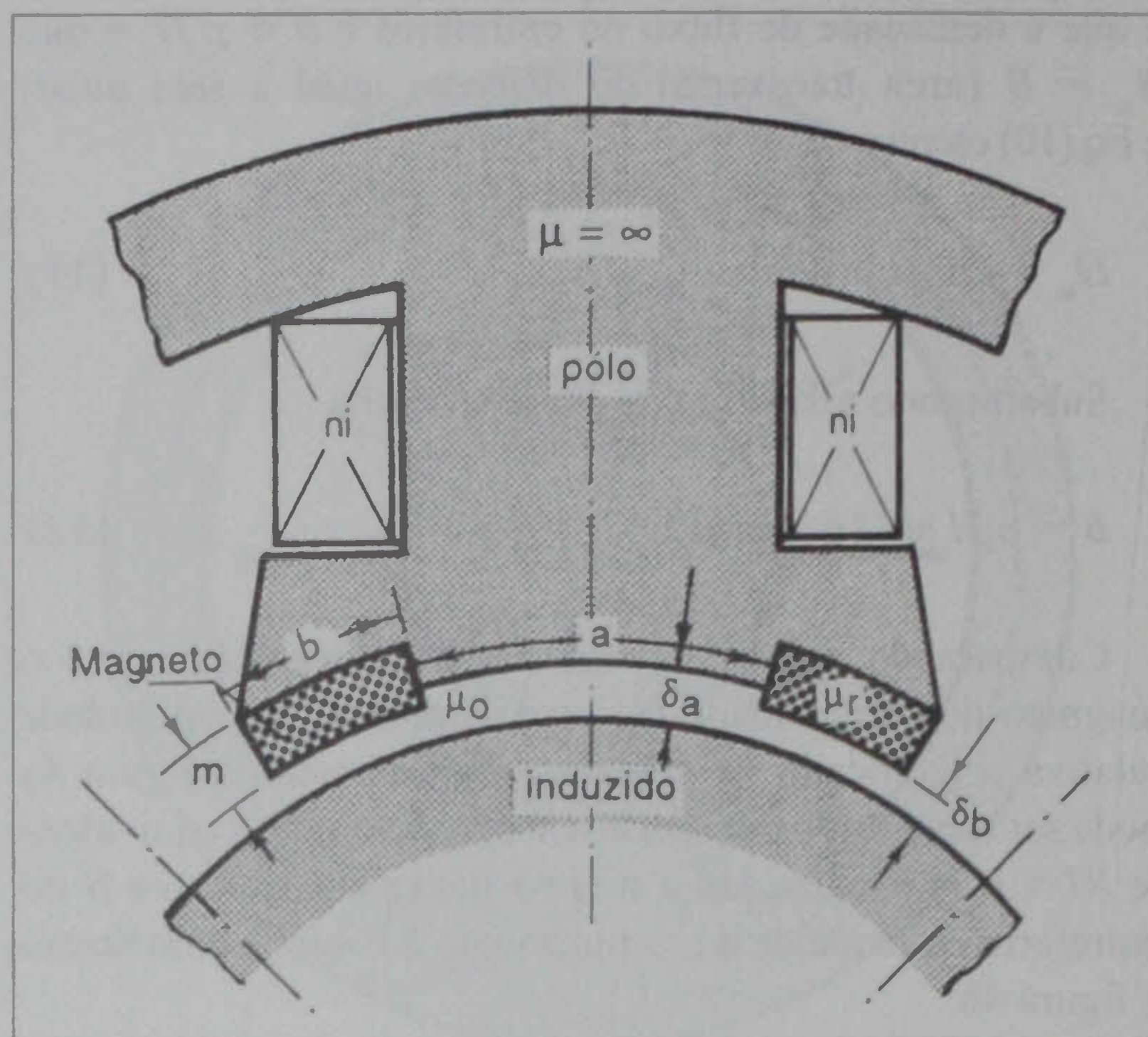


Fig. 7 - Excitação híbrida com entreferro em degrau.

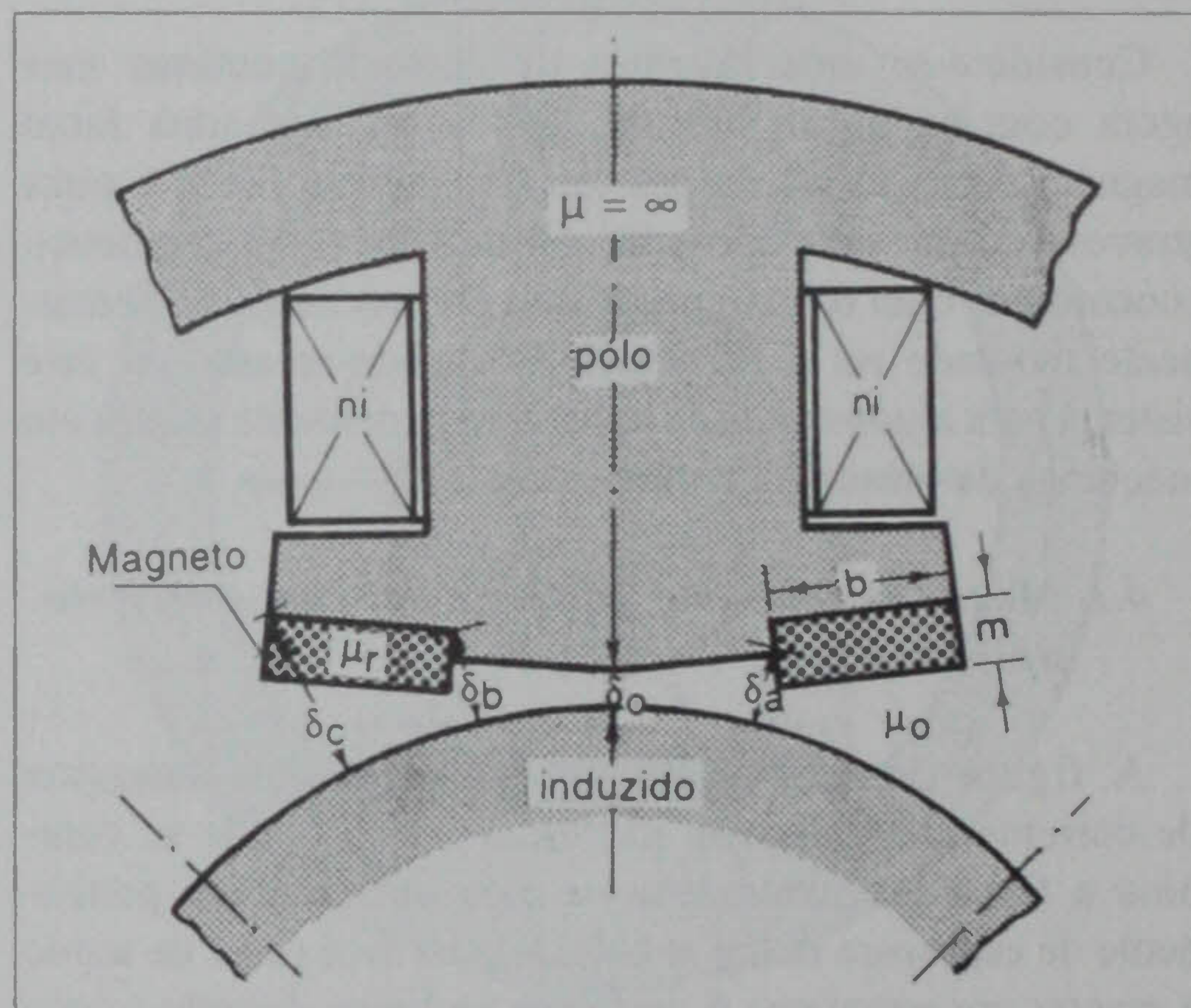


Fig. 8 - Excitação híbrida com entreferro variável.

4.3. Magnetos colocados nos terminais polares com entreferro variável

A figura 8 mostra a configuração de um pólo com excitação híbrida e entreferro variável. Nos terminais polares são abertos rasgos ficando com entreferros de comprimento radial $\delta_b = \delta_c$ respectivamente entre as suas extremidades e a superfície do induzido. Nos rasgos são inseridos blocos de material magnético permanente de espessura m , comprimento b e de permeabilidade relativa μ_r . Para esta geometria e de acordo com a Eq.(4), a densidade média de fluxo na parte central do pólo é dada por

$$B_a = \mu_0 ni \ln (\delta_a / \delta_c) / (\delta_a - \delta_c) \quad (17)$$

e na zona do terminal polar por

$$B_b = (\mu_0 ni + H_c m) \cdot \ln(\delta_c/\delta_b)/(\delta_c - \delta_b + m/\mu_r) \quad (18)$$

Substituindo as Eqs(17) e (18) na Eq. (7) obtém-se facilmente a densidade média de fluxo magnético B ao longo do pólo para esta configuração.

5. Comparação entre as características de velocidade do motor de excitação clássica e de excitação híbrida

Pretende-se variar a velocidade N de um motor clássico de corrente contínua de excitação independente, variando a força magnetomotriz de excitação ni , mantendo a tensão V aos terminais e a corrente absorvida I constantes (potência constante), e comparar o seu andamento com a característica de velocidade do motor com excitação híbrida para as mesmas condições.

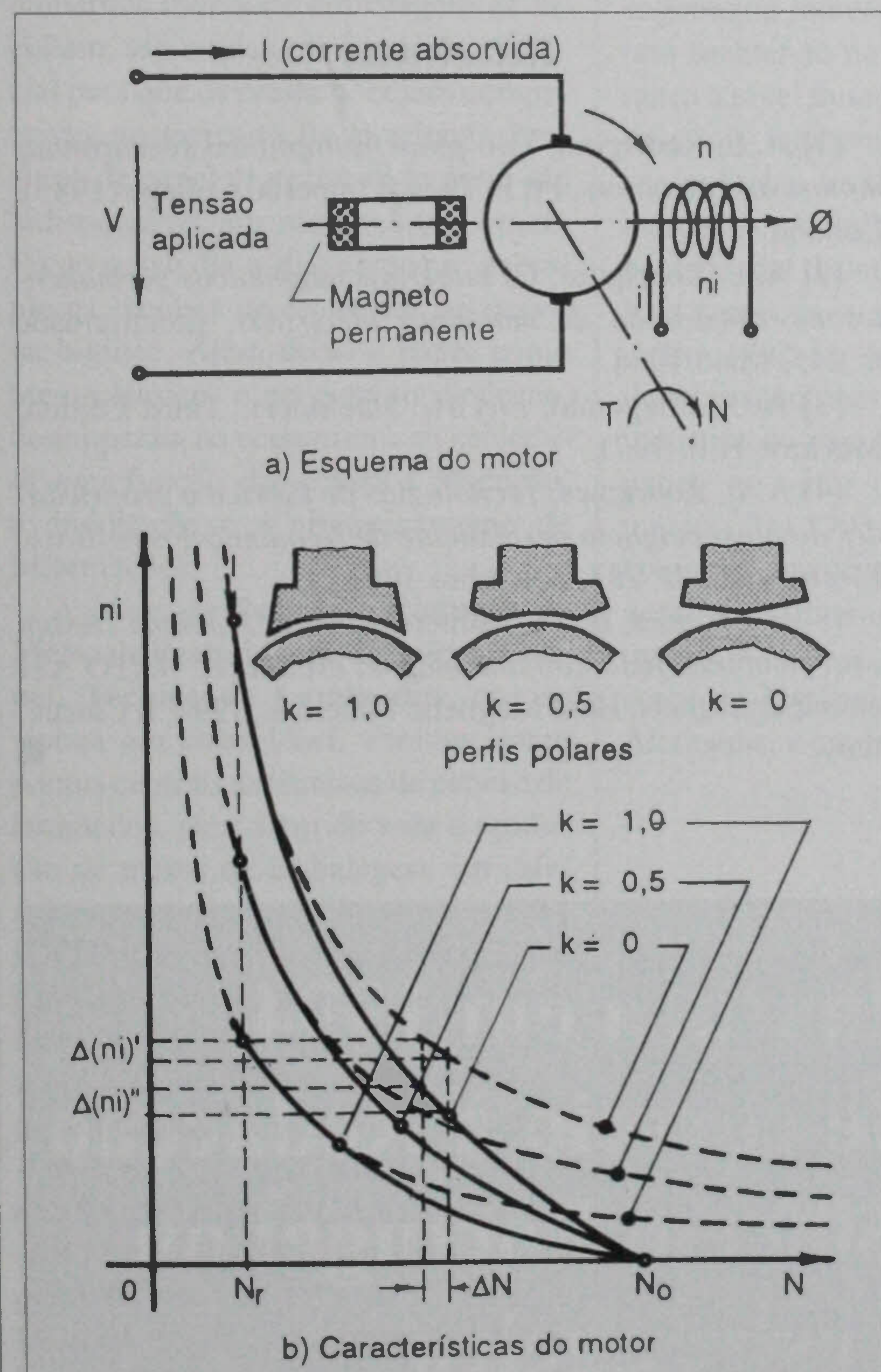


Fig. 9 - Motor com excitação híbrida e características de velocidade.

Para o motor com excitação híbrida representado esquematicamente na figura 9a com um fluxo por pólo Φ , a potência absorvida (desprezando perdas) é dada por $VI = \omega T$ onde $\omega = 2\pi N$ é a velocidade angular do induzido e $T = K_0 \Phi I$ representa o binário electromagnético, sendo K_0 uma constante construtiva do motor. Logo $V = 2\pi K_0 \Phi N$ e admitindo linearidade para o circuito magnético vem $\Phi = B/S = P \cdot ni$ onde P é a permeância do pólo que depende do seu perfil através do parâmetro k . Então $BN = K_1$ e $ni = K_2 B$ ou ainda $ni = K_1 K_2 / N$ onde K_1 e K_2 são constantes. O valor de ni pode ser determinado em função de B através da Eq.(8) relativa à excitação clássica ou através da Eq.(16) correspondente à excitação híbrida. Na figura 9b estão representadas as características de velocidade N do motor em função da força magnetomotriz ni do pólo referentes aos perfis $k = 0$, $k = 0,5$ e $k = 1$, para o caso da excitação clássica (hipérbole equilátera) e para o caso da excitação híbrida.

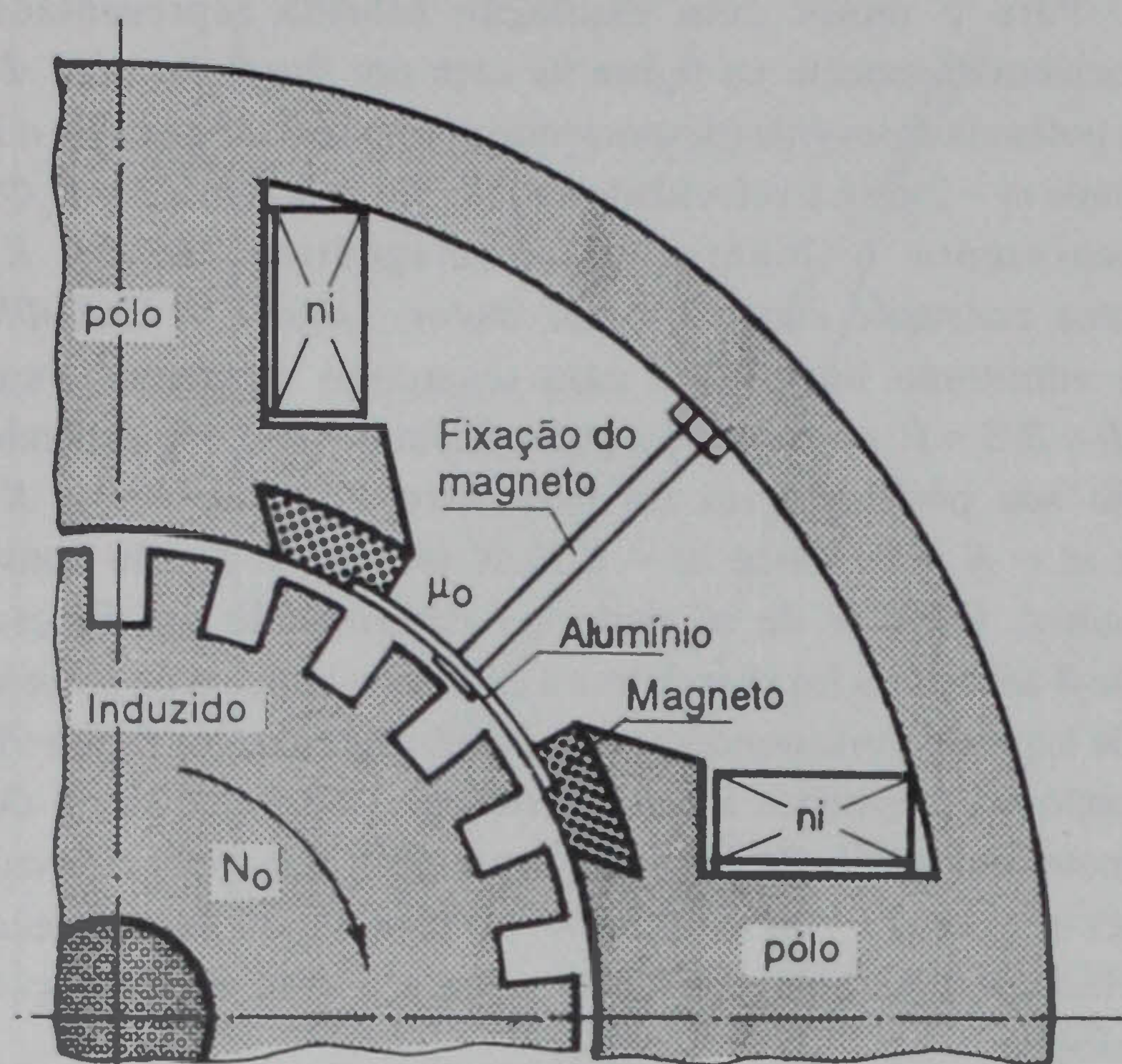
Estes resultados mostram que entre a velocidade N_r (que corresponde a $B = B_r$) e N_0 (que se refere a $B = B_0$ e $ni = 0$), a força magnetomotriz necessária para a excitação híbrida é sempre menor do que a da excitação clássica. Os resultados mostram ainda que para um pequeno ajuste de velocidade ΔN é necessária uma maior variação de força magnetomotriz $\Delta(ni)$ para o caso da excitação híbrida do que para o caso da excitação clássica, o que se traduz numa maior sensibilidade para o sistema híbrido.

6. Resultados experimentais

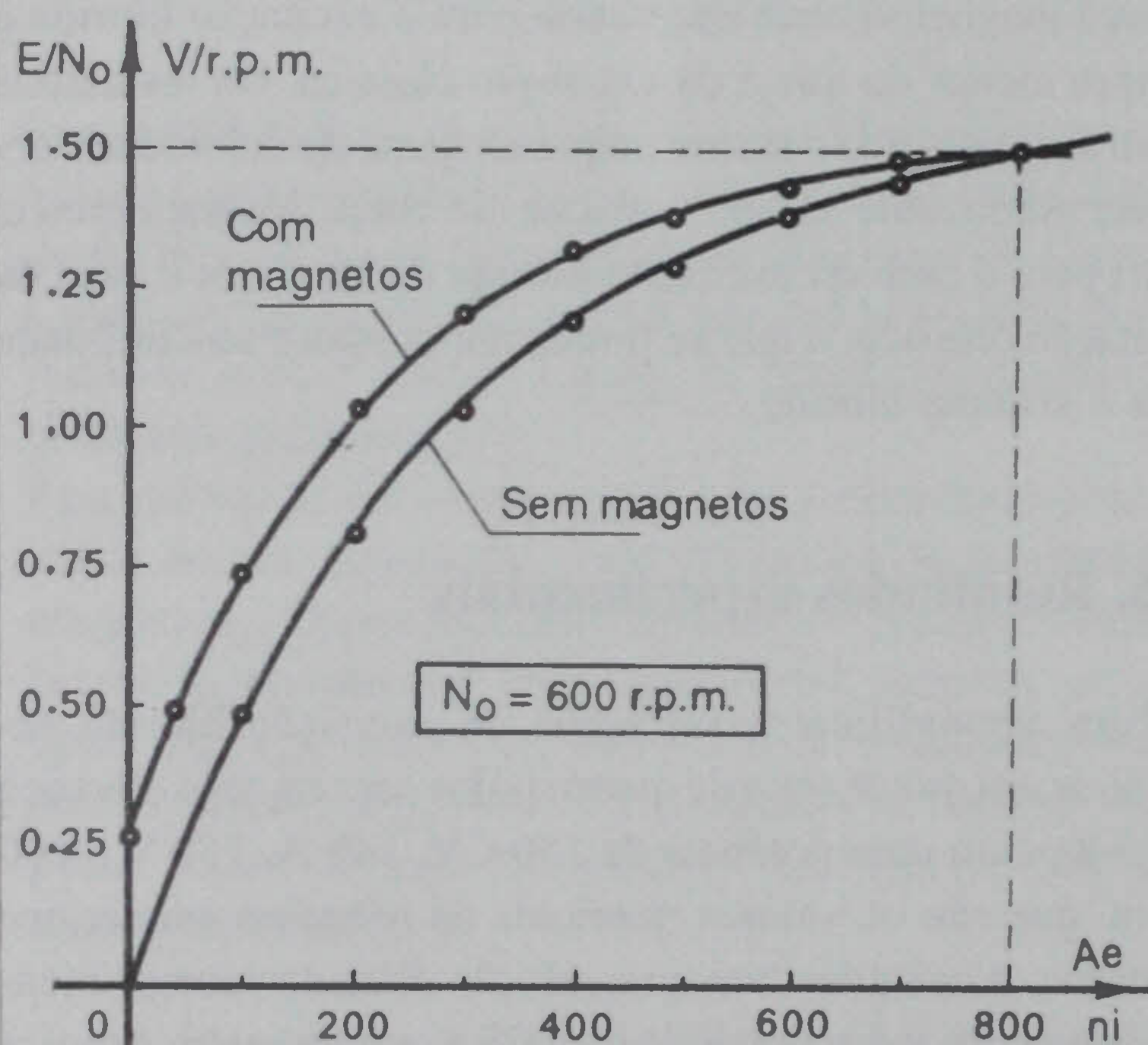
Para exemplificar a vantagem da excitação híbrida ensaiou-se um motor série de quatro pólos para tracção eléctrica WT340, com uma potência de 150 CV, 148 A, 750 V e 600 r.p.m. que são os valores nominais da máquina em serviço contínuo. A máquina tem uma relação diâmetro/comprimento efectivo do induzido de $D/l = 1,75$ e um diâmetro exterior de $D_0 = 659$ mm.

Nos terminais polares foram fixados magnetos permanentes de Nd-Fe-B, como ilustra a figura 10a, tendo sido retirados para este efeito os pólos auxiliares de comutação.

Colocou-se a máquina a funcionar como gerador de excitação independente à velocidade nominal $N_0 = 600$ r.p.m. variando a força magnetomotriz ni de forma a obter a relação $2\pi K_0 = E/N_0$ por medição da tensão E aos terminais em vazio. O valor nominal do fluxo de excitação corresponde a $E/N_0 = 1,5$ V/r.p.m. A máquina foi ensaiada para o caso da excitação clássica (substituindo os magnetos por idênticos blocos de material ferromagnético) e para o caso da excitação híbrida (magnetos e enrolamentos de excitação) e os resultados obtidos estão representados graficamente na figura 10b. O gráfico mostra que entre 1/3 a 5/6 do fluxo nominal a corrente para excitar a máquina híbrida é cerca de 25% menor do que no caso da excitação sem magnetos.



a) Corte transversal do motor



b) Características de magnetização

Fig. 10 - Motor série ensaiado e características de magnetização.

7. Conclusões

O facto da excitação híbrida conduzir a um valor de força magnetomotriz menor, dentro de certos limites, do que na excitação clássica para obter o mesmo fluxo, permite projectar a máquina com pólos principais mais curtos e consequentemente reduzir o seu diâmetro exterior. Para o caso concreto do motor de tracção ensaiado é possível reduzir o comprimento dos pólos de cerca de 25 mm, o que se traduz numa redução de 4% no seu diâmetro exterior. O peso total do motor ensaiado é de 1900 kg e com a excitação híbrida podia ser reduzido cerca de 130 kg, o que corresponde a uma redução de 7% no peso e 15% no volume global da máquina.

Agradecimentos

O autor deseja agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa todas as facilidades concedidas para a preparação deste trabalho. Ao "British Council" fica o grato reconhecimento pela concessão da bolsa de curta duração que permitiu uma estadia em Cardife onde, no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Wales, se procedeu aos ensaios do motor de tracção.

Referências

- [1] A. L. Rodrigues, *Two-phase autopiloted synchronous motors and actuators*, Ph.D Thesis, Imperial College (1983), London.
- [2] A. L. Rodrigues, *Os materiais magnéticos permanentes na construção de máquinas eléctricas*, Electricidade nº 245, Maio 1988.
- [3] A. E. Fitzgerald, *Electric Machinery*, Third Edition, McGraw-Hill, 1971.
- [4] A. L. Rodrigues, *Tecnologias de fabrico e propriedades do novo magneto permanente de Neodímio-Ferro-Boro*, Electricidade nº 281, Setembro 1991.
- [5] E. Spooner, B. J. Chalmers, *Electric Machine Design with combined field-coil and magnet excitation*, NATO ASI on Supermagnets, Hard Magnetic Materials, 1990, Il Ciocco, Italy.

Renove a sua Assinatura em 1994
Envie cheque ou vale de correio à Redacção
com o valor de 5500\$00 em Portugal ou
US\$12 para o estrangeiro