

SOBRE OS ÍMÃS PERMANENTES E SUAS APLICAÇÕES NA ELETROELETRÔNICA

Benedito Antonio Luciano, Doutor
Sissi Alves da Silva, bolsista PET

Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Federal da Paraíba
Caixa Postal 10105
58109 970 - Campina Grande - Pb
e-mail: benedito@dee.ufpb.br

Resumo

Partindo de uma breve revisão histórica sobre o desenvolvimento dos ímãs permanentes, ao longo dos tempos, são apresentados os principais parâmetros característicos destes tipos de materiais, ditos magneticamente duros. Classificados em três famílias de ímãs: os Alnicos, os Ferrites, os Terras-raras, estes materiais magnéticos são comparados entre si no que diz respeito às suas aplicações, em geral, e na eletroeletrônica, em particular. Uma bibliografia básica sobre o assunto também é apresentada.

1. Introdução

No Brasil, o mercado de materiais magnéticos movimenta algo em torno de US\$ 100 milhões/ano, sendo 70% representados pelos aços elétricos e 30% pelos ímãs permanentes, onde os ferrites ocupam a maioria das aplicações, sobretudo naquelas onde o fator determinante é o preço baixo [1].

Entretanto, quando o fator determinante não é o preço baixo e sim o produto energético ($BH_{máx}$), os ímãs terras-raras: samário-cobalto e neodímio-ferro-boro, apresentam-se como alternativas aos ímãs ferrites, principalmente quando as figuras de mérito em questão são o volume e o peso.

Nos dias atuais, estes materiais são largamente utilizados na eletroeletrônica, sobretudo em aplicações especiais tais como:

motores de posicionamento das cabeças de leitura e gravação de discos rígidos (*winchesters*), motores de corrente contínua sem comutador e escovas (*brushless*), motores de passo para aplicações em braços de robôs, tacômetros, excitatrizes auxiliares, além de outras aplicações eletromecânicas que serão apresentadas neste trabalho.

2. Um Breve Histórico

A história registra que as primeiras evidências do despertar da humanidade para os materiais imantados ocorreu na China quando os chineses relataram a utilização de peças imantadas para serem utilizadas na confecção de um artefato útil para a orientação da navegação das caravanas, relato este que aponta para o surgimento da bússola.

Contam que as caravanas mais bem preparadas que cruzaram o deserto de Gobi levavam sempre um camelo branco, que carregava uma tigela cheia de água nas costas. Dentro dessa tigela flutuava um pedaço de ferro magnetizado. As laterais da jarra eram pintadas de várias cores: vermelho para o sul, preto para o norte, verde para o leste e branco para o oeste; era essa a bússola primitiva que guiava as caravanas pelas areias do deserto [2].

Não se pode dizer, com precisão, quando se deu a primeira produção de ímãs artificiais.

Entretanto, no século XIII, surgiram vários estudos e ensaios que mostravam a possibilidade de produzir ímãs artificialmente.

Contudo, o primeiro trabalho de importância reconhecida sobre os ímãs permanentes só foi publicado em 1600. Tido como um dos grandes clássicos da Física Experimental, este trabalho, intitulado de "De Magnete Magneticisque Corporibus Et De Magno Magnete Tellure Physiologia Noya" escrito por William Gilbert, descrevia fenômenos físicos inerentes aos materiais magnetizados e sua aplicação em instrumentos de navegação. William Gilbert descobriu a razão de uma agulha de uma bússola orientar-se em direções definidas: a própria TERRA era um ímã permanente.

Da época de William Gilbert até os dias atuais, tivemos a colaboração de cientistas do mundo inteiro para a acumulação de todo o conhecimento que temos sobre os ímãs permanentes.

Numa rápida cronologia, extremamente resumida, poderíamos partir do primeiro livro publicado sobre o tema, a partir dos trabalhos de "Canton e Michell", até a introdução dos conceitos de materiais magneticamente moles e duros, no século XIX, passando pelos trabalhos de Madame Curie que em 1857, conseguiu um material com coercitividade de 7 kA/m, e o processo inovador dos japoneses Honda e Takagi que em 1917, conseguiram, mediante a aplicação de cobalto, materiais magnéticos com coercitividade de 20kA/m e produto de energia de 8kJ/m³ [3].

3. Ímãs Permanentes

Os ímãs permanentes são materiais magnéticos que possuem a característica de apresentarem uma indução magnética residual mesmo após a retirada da força magnetizante. Assim como os indutores, os ímãs permanentes produzem fluxo magnético. A diferença é que estes últimos conseguem isto sem nenhum tipo de enrolamento de excitação e sem nenhuma dissipação de energia elétrica.

Como qualquer um outro material ferromagnético, os ímãs permanentes podem ser caracterizados pelo seu laço de histerese $B-H$.

Os ímãs permanentes também são conhecidos como materiais magneticamente duros, o que significa materiais ferromagnéticos com largo ciclo de histerese.

Para efeito de estudos analíticos e de projetos, a região de interesse é o segundo quadrante da característica $B-H$ destes materiais (Fig. 1).

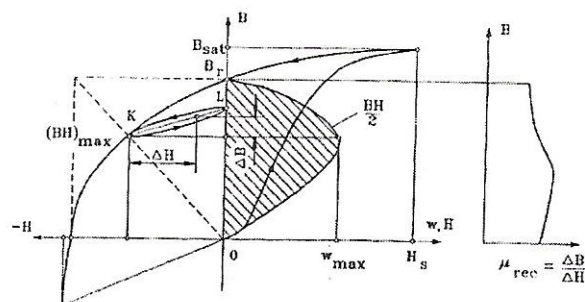


FIGURA 1: Curva de desmagnetização, laço menor de recuo, energia e permeabilidade magnética de recuo [4].

De acordo com a Fig. 1, se uma intensidade de campo magnético reversa for imposta a uma amostra de material magnético previamente magnetizada, um toróide, por exemplo, a densidade de fluxo magnético cai para uma intensidade determinada pelo ponto K . Quando o campo reverso é removido, a densidade de fluxo magnético retornará ao ponto L . Portanto, a aplicação do campo reverso tem como resultado uma diminuição da *remanência*, ou *magnetismo residual* (B_r). Reaplicando uma intensidade de campo magnético reverso, a densidade de fluxo magnético será novamente reduzida, descrevendo um laço menor de histerese ao retornar aproximadamente ao mesmo valor da densidade de campo magnético do ponto K .

Este laço menor de histerese pode, com uma pequena margem de erro, ser representado por um segmento de reta denominada *reta de recuo*. Este segmento

de reta tem uma inclinação conhecida como permeabilidade magnética de recuo μ_{rec} .

De uma forma geral, os ímãs permanentes são caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- *Saturação da densidade de fluxo magnético* (B_{sat}): correspondente à intensidade de campo magnético de saturação (H_s). Neste ponto, o alinhamento de todos os *momentos magnéticos dos domínios* estão na mesma direção do campo magnético externo aplicado.
- *Densidade de fluxo magnético residual* ou *remanência* (B_r): é o valor da densidade de fluxo magnético correspondente à intensidade de campo magnético igual a zero. Um alto valor de fluxo magnético residual resulta em densidades de fluxos magnéticos mais elevadas nos entreferros dos circuitos magnéticos, podendo proporcionar elevados torques ou forças.
- *Força coerciva, coercitividade* ou *intensidade de campo coercivo* (H_c): é o valor da intensidade de campo magnético desmagnetizante necessário para trazer a densidade de fluxo magnético a zero num material previamente magnetizado. Em termos práticos, quanto maior o valor da força coerciva maior será a resistência do material a campos desmagnetizantes, podendo ser empregados ímãs de menor espessura.

Permeabilidade magnética de recuo (μ_{rec}): é a razão entre o incremento da densidade de fluxo magnético e o incremento da intensidade de campo magnético, em qualquer ponto da curva de desmagnetização:

$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rec} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

onde a *permeabilidade relativa de recuo* $\mu_{rec} = 1 \dots 3.5$.

- *Produto de energia máximo* ($BH_{máx}$): é a densidade máxima de energia (em Joules por metro cúbico) armazenada num ímã. Como o produto BH tem a dimensão de densidade de energia, é algumas vezes chamado de produto de energia, e seu valor máximo, o produto máximo de energia, o qual corresponde ao ponto de coordenadas B_{max} e H_{max} na curva de desmagnetização. Um alto valor de produto de energia resulta em compactação eletromagnética.

3.1 Classificação dos Ímãs Permanentes

Para efeito de classificação, os ímãs permanentes podem ser agrupados em três grandes famílias:

- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe);
- Cerâmicos (*Ferrites*): *ferrites* de bário e *ferrites* de estrôncio; e
- Terras-raras (SmCo e NdFeB).

3.1.1 Alnicos

As maiores vantagens dos *alnicos* são: alta densidade de fluxo magnético remanente (cerca de 1,2 T) e baixos coeficientes de temperatura. Tais características permitem o uso destes ímãs em altas temperaturas (520°C, por exemplo).

Os *alnicos* apresentam curvas de desmagnetização fortemente não-linear e da mesma forma como são facilmente magnetizados, podem ser também desmagnetizados. Por este motivo, estes tipos de ímãs se destinam às aplicações onde os entreferros são relativamente grandes, sendo às vezes necessário o emprego de sapatas polares adicionais para protegê-los

contra o efeito desmagnetizante do fluxo da armadura.

Da metade dos anos 40 até 1970, o mercado dos ímãs permanentes era dominado pelos *alnicos* quando, a partir de então, os *ferrites* tornaram-se os materiais

magneticamente duros mais largamente utilizados.

Atualmente, encontram-se aplicações dos *alnicos* (isotrópicos e anisotrópicos) em pequenos motores, nas faixas de pequenas potências nominais, até cerca de 150 kW.

3.1.2 Ferrites

Os *ferrites* de estrôncio e de bário foram desenvolvidos a partir do final da década dos anos quarentas. Apesar de possuírem uma densidade de fluxo magnético mais baixa que os *alnicos*, os ímãs *ferrites* são mais imunes a campos desmagnetizantes, em função de sua força coerciva mais elevada. Porém, as maiores vantagens dos ímãs *ferrites* são o baixo custo e a alta resistência elétrica às correntes parasitas, mesmo a altas frequências.

Em termos comparativos, os ímãs *ferrites* são mais econômicos que os *alnicos* para o uso em motores elétricos a ímã permanente a partir de 7,5 kW. Os *ferrites* de bário são largamente utilizados em pequenos motores de corrente contínua encontrados em automóveis (ventiladores, limpadores de pára-brisa, bombas, etc.), e sobretudo em brinquedos de crianças. Os *ferrites* de estrôncio possuem força coerciva superior aos *ferrites* de bário.

Por último, vale a pena salientar que produção dos ímãs *ferrites* causam impacto do ponto de vista ambiental.

3.1.3 Terras-raras

A primeira geração destes novos materiais, baseada na composição SmCo_5 , foi descoberta no início da década dos anos sessentas e tornada disponível comercialmente no início dos anos setentas. As curvas de desmagnetização dos ímãs SmCo são praticamente lineares (inclinação de $1,06\mu_0$), o que denota alta resistência a campos desmagnetizantes. Além disso, eles possuem altos valores de produto energético (cerca de 160 kJ/m^3), densidade de fluxo magnético remanente (aproximadamente 1

Tesla) e força coerciva (720 kA/m), respectivamente.

Entretanto, devido aos elevados preços do Sm e do Co, a utilização deste tipo de ímã fica reservada às aplicações especiais, onde o fator custo não seja a figura de mérito determinante, como em motores de baixo momento de inércia e alto torque, por unidade de volume.

A segunda geração dos ímãs terras-raras, baseada em *neodímio-ferro-boro*, foi anunciada em 1983, durante a vigésima nona Conferência Anual de Magnetismo e Materiais Magnéticos, ocorrida em Pittsburg. O *neodímio* é um elemento terra-rara muito mais abundante que o *samário*.

Os ímãs NdFeB possuem maior produto energético (210 kJ/m^3), maior força coerciva (900 kA/m) e maior indução remanente ($1,2 \text{ Tesla}$) que os ímãs SmCo .

Entretanto, ao lado destes parâmetros altamente positivos, os ímãs NdFeB apresentam as desvantagens de alta suscetibilidade à corrosão e grande limitação no que diz respeito à temperatura de utilização em serviço (150°C) e temperatura de Curie (310°C).

Atualmente, o preço de produção em larga escala dos ímãs NdFeB ($\text{US}\$300/\text{kg}$) é cerca de 70 a 90% do custo dos ímãs SmCo . A queda dos preços dos ímãs terras-raras tem propiciado um uso crescente destes materiais magnéticos nos mais variados campos de aplicações: equipamentos acústicos, equipamentos de informática, equipamentos aeroespaciais, transportes, equipamentos de som e imagem, equipamentos biomédicos, brinquedos para crianças, etc [2], [4] e [8].

Além das aplicações já citadas, os ímãs terras-raras, quando empregados em máquinas elétricas, cobrem uma larga faixa de potência (dos mW aos MW), passando pelos motores de passo empregados em robótica (Fig. 2), máquinas para ferramentas industriais (acima de 15 kW) e grandes motores síncronos com potências superiores a 1 MW.

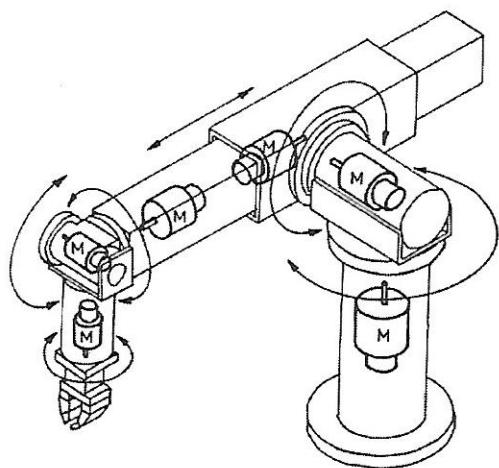


FIGURA 2: Aplicação de ímãs terras-raras em motores de passo num robô industrial [4].

Sobre as aplicações gerais dos ímãs permanentes, e em particular dos ímãs terras-raras, existe uma vasta bibliografia, distribuída em livros textos [4] e [5], anais de congressos e *workshops* [6], seminários [7], além de excelentes artigos publicados em *proceedings* do *IEEE* [2] e [8].

4. Conclusões

Foram apresentadas neste trabalho algumas das principais aplicações dos ímãs permanentes na eletroeletrônica. Nesta apresentação, além de alguns registros cronológicos a cerca do desenvolvimento tecnológico destes materiais, um destaque especial foi dado às aplicações específicas dos ímãs terras-raras, acrescido de informações bibliográficas básicas para quem desejar maiores informações sobre o assunto.

5. Agradecimentos

À CAPES pela concessão da bolsa PET à aluna Sissi Alves da Silva.

6. Referências Bibliográficas

- [1] ELETRICIDADE MODERNA. **O Brasil na corrida dos ímãs de terras raras**. São Paulo: Aranda Editora, n. 212, nov. 1991.
- [2] OVERSHOTT, K. J. Magnetism: it is permanent. **IEEE Proceedings-A**, Vol.138, No. 1, pp. 22-30, 1991.
- [3] COEY, J. M. D. Permanent Magnetism - a milenar perspective. **Proceedings of the Fourteenth International Workshop on Rare-Earth Magnetics and Their Applications**. São Paulo: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda., pp. 1-7, Sep. 1996.
- [4] GIERAS, J. F. and WING, M. **Permanent magnet motor technology: design and applications**. New-York: Marcel Dekker, Inc., 1997, 444p.
- [5] McCAIG, M. **Permanent magnets in theory and practice**. Plymouth: Pentech Press, 1977.
- [6] LUCIANO, B. A. and KIMINAMI, C. S. A new electric machine with rare-earth magnets in the rotor and amorphous alloy in the stator. **Proceedings of the Fourteenth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications**. São Paulo: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, pp. 397-406, Sept. 1996.
- [7] LUCIANO, B. A. e KIMINAMI, C. S. Os Novos Materiais e a Eficiência Energética. **Anais do XIX Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades - ABM**, Belo Horizonte, pp155-165, 04 a 06 de Junho de 1997.
- [8] STRNAT, K. J. Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology. **Proceedings of the IEEE**, vol78, Nº. 6, pp. 923-946, June 1990.