

## O ELETROMAGNETISMO NAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

### Resumo

*O eletromagnetismo desempenha um papel fundamental na conversão de energia nas máquinas elétricas e a sua compreensão é importante para se ter um completo domínio do tema.*

*O campo magnético, que envolve o funcionamento das máquinas elétricas, pode ter origem em ímanes permanentes ou pode ser criado com recurso a bobinas. A abordagem ao magnetismo criado pelos ímanes permanentes ou bobinas é normalmente baseada nos efeitos observáveis e não na explicação a nível atómico desses fenómenos, recorrendo-se habitualmente a argumentos associados a observações experimentais, sem de facto se dar uma interpretação física.*

*O objetivo deste artigo é explicar os processos atómicos relacionados com fenómenos magnéticos e elétricos existentes nas máquinas elétricas, tornando mais claros e transparentes alguns conceitos, tais como a existência de polos magnéticos, interação de atração/repulsão magnética e campo magnético.*

### 1. Introdução

As máquinas elétricas, compreendendo os geradores, motores ou transformadores, têm o seu princípio de funcionamento baseado em processos magnéticos que lhes conferem as suas características.

As máquinas rotativas podem ter bobinas instaladas quer na parte móvel, “rotor”, quer na parte estática, “estator”. É de referir que, em diversas máquinas, uma dessas bobinas pode ser substituída por ímanes permanentes, podendo-se obter resultados semelhantes, embora com limitações relativas aos materiais utilizados.

Para se compreender o funcionamento das máquinas elétricas é fundamental entender-se bem o magnetismo, pois dele dependem as interações que determinam as suas características.

Dado que o magnetismo é invisível, a sua compreensão física não é óbvia, embora os seus efeitos possam ser facilmente observados ou sentidos, de uma forma básica, a partir da interação de repulsão ou atração entre dois ímanes. Desta forma é fácil demonstrar a existência de forças entre os campos magnéticos criados.

Do mesmo modo, com a conhecida experiência da limalha de ferro lançada sobre um vidro pousado sobre um íman, é simples demonstrar a formação das imaginárias “linhas de fluxo”, pois a limalha orienta-se em alinhamentos que materializam as referidas linhas. Deste modo, por constatação, é simples aceitar esta ciência “oculta” como um dado adquirido, embora de facto não tenha sido explicada nem compreendida na sua essência.

Ficam sempre algumas dúvidas, ou seja, algumas questões não inteiramente esclarecidas, tais como, por exemplo, “porque é que dois ímanes têm a capacidade de se repelirem sem sequer se tocarem fisicamente?” Parece ser um processo de pura magia que desafia os nossos sentidos e que tem sido utilizado no mundo mítico, sendo o termo “magnetismo” frequentemente associado também a fenómenos transcendentais.

### 2. Estado da arte

Os conceitos associados ao eletromagnetismo são habitualmente apresentados recorrendo a leis da física transcritas em expressões que tornam pouco compreensíveis e difíceis de entender os verdadeiros fenómenos.

São exemplos as afirmações seguintes: “a integral de linha da componente tangencial da intensidade de campo magnético  $H$  ao longo de um contorno fechado  $C$  é igual à corrente total que passa através de qualquer superfície  $S$  delimitada por esse contorno” [1]; “o fluxo magnético através de uma superfície é definido como a integral de superfície da componente normal do vetor campo magnético,  $B$ ” [2]; “a intensidade de campo magnético,  $H$ , é uma forma de medida do esforço da corrente em estabelecer um campo magnético” [3]; “a descrição exata do campo magnético requer o uso das equações de Maxwell e o conhecimento das relações entre a indução  $B$  e a intensidade de campo magnético  $H$ ” [4]; “encarando a força entre correntes elétricas numa perspectiva causa-efeito, a corrente cria um campo magnético à sua volta que exerce forças sobre outras correntes eventualmente existentes nessa região” [5]; “Sabemos da teoria eletromagnética de Maxwell que os polos magnéticos ocorrem em pares. Como tal, quando um íman é cortado em pedaços, cada peça terá um par de polos. Polos magnéticos iguais exercem forças entre si, de modo que se repelem mutuamente, enquanto os polos norte e sul se atraem” [6].

No livro de Física de Knight [7] são apresentadas de uma maneira simples algumas constatações para as quais ainda não foram, até agora, apresentadas justificações satisfatórias que se referem seguidamente:

a) “O magnetismo é uma força de ação à distância. Polos iguais repelem-se e polos opostos atraem-se.” (Fig. 1)

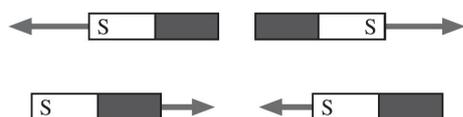


Figura 1. Atração e repulsão dos polos magnéticos. [7]

b) “É um fenómeno estranho que, cortando-se um íman pela metade (Fig. 2), fiquemos com dois ímanes mais fracos, porém completos, cada qual dotado de um polo norte e de um polo sul. Um polo magnético isolado, como um polo norte na ausência de um polo sul, seria

chamado de monopolo magnético. Ninguém jamais observou um monopolo magnético. Por outro lado, ninguém ainda forneceu uma razão convincente para que monopolos magnéticos isolados não possam existir, e algumas teorias de partículas subatómicas preveem que eles deveriam existir. Se os monopolos magnéticos existem ou não na natureza, permanece uma questão aberta num dos níveis mais fundamentais da física.”

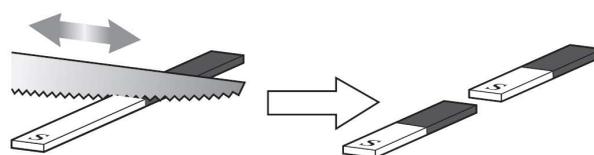


Figura 2. “O corte de um íman cria novos dipolos”. [7]

c) “Não é de todo óbvio que as forças magnéticas causadas por correntes correspondam ao mesmo tipo de magnetismo que aquelas exercidas por ímanes. Talvez existam dois tipos diferentes de forças magnéticas, um originado de correntes, e outro, de ímanes permanentes. Essas duas maneiras distintas de produzir efeitos magnéticos constituem, de facto, apenas dois aspetos diferentes de uma única força magnética.” (Fig. 3)

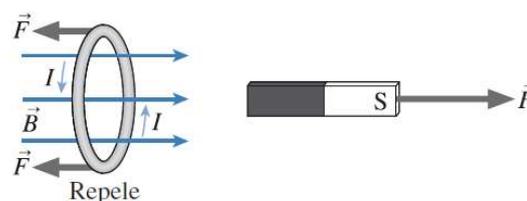
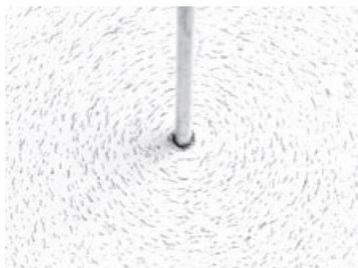


Figura 3. Semelhança entre campo magnético criado por uma bobine e por um íman. [7]

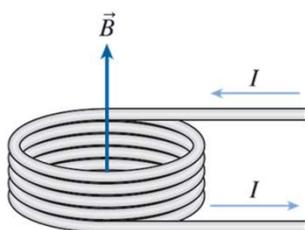
d) “Existem diversas formas de descrever o campo magnético através das suas propriedades:

- Toda a corrente que flui num fio cria um campo magnético em todos os pontos do espaço ao seu redor (Fig. 4).



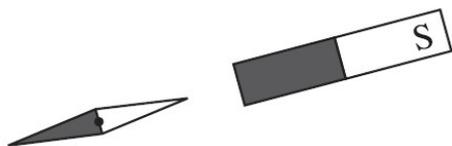
**Figura 4. Campo magnético criado por um condutor percorrido por uma corrente. [7]**

- Em cada ponto do espaço, o campo magnético é um vetor. Ele possui tanto um módulo que chamamos de intensidade de campo magnético  $B$ , quanto uma orientação (direção e sentido). (Fig. 5)



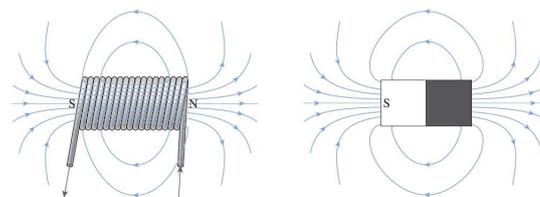
**Figura 5. Campo magnético criado por uma bobina percorrida por uma corrente. [7]**

- O campo magnético exerce forças sobre os polos magnéticos. A força exercida sobre um polo norte é paralela ao vetor  $B$ , e a força exercida sobre o polo sul é oposta ao vetor  $B$ .
- Forças magnéticas fazem com que a agulha de uma bússola fique alinhada paralelamente a um campo magnético, com o polo norte da bússola indicando a orientação (direção e sentido) do campo magnético naquele ponto.



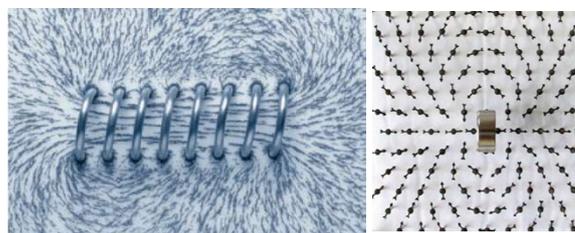
**Figura 6. “A agulha de uma bússola alinha-se paralelamente a um campo magnético”. [7]**

- O campo magnético pode ser descrito através do uso das linhas de campo magnético que são linhas imaginárias desenhadas numa região do espaço de modo que toda a tangente a uma linha de campo esteja orientada no sentido do campo magnético. (Fig. 7 e 8)



**Figura 7. As linhas de campo magnético são linhas imaginárias. [7]**

- O campo magnético diretamente acima das espiras é oposto ao campo dentro das espiras. Uma bobina funciona como um agrupamento de espiras de corrente.”



**Figura 8. Linhas de campo magnético criadas por uma bobina [7] e por um ímã [8].**

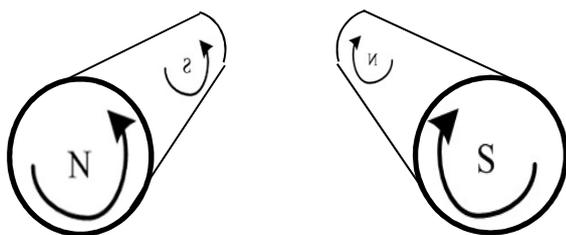
### 3. Compreensão a nível atômico do campo magnético e dos polos magnéticos

“Eu sinto que é uma desilusão pensar nos elétrons e nos campos como duas entidades fisicamente diferentes e independentes. Uma vez que nenhuma delas pode existir sem a outra, há apenas uma realidade a ser descrita, que tem dois aspectos diferentes; e a teoria deve reconhecer isso desde o início em vez de fazer as coisas duas vezes.” Albert Einstein [9].

O magnetismo de sólidos quase exclusivamente se origina pelo movimento de elétrons [10]. Em escala atômica, os momentos magnéticos intrínsecos estão associados à rotação de cada elétron, spin, e uma contribuição adicional está associada ao seu movimento orbital em torno do núcleo [11]. Todos os campos magnéticos são gerados por correntes elétricas circulantes. [12]

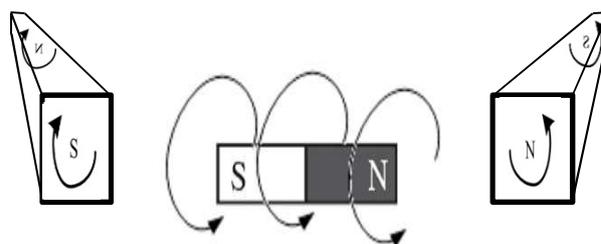
A corrente elétrica (movimento ordenado de elétrons) ao circular nas espiras de uma bobine gera um campo magnético que tem exatamente as mesmas características do campo magnético criado por um ímã permanente (Fig. 7).

Dado que, numa bobina alimentada por corrente contínua, o movimento circular de elétrons cria um campo magnético idêntico ao criado por um ímã permanente, leva-nos a admitir que os elétrons dentro de um ímã poderão ter orbitais igualmente circulares de modo a produzirem um efeito semelhante. Tal como um ímã, uma bobina onde circula uma corrente contínua tem dois polos, tendo um a designação Norte e outro Sul. Nesta situação, olhando de topo para a extremidade da bobina onde a corrente circula no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, podemos associar este lado da bobina ao polo Norte, e consequentemente, o lado oposto ao polo Sul.



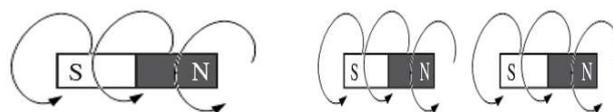
**Figura 9. Sentido da corrente e polos criados nas extremidades de uma bobina**

Do mesmo modo, com o auxílio de uma bússola podemos identificar o polo Norte de um ímã e assumir igualmente que nesse lado do ímã, os elétrons se movem ordenadamente em orbitais circulares e com sentido anti-horário e, visto da extremidade Sul, acontece o contrário.



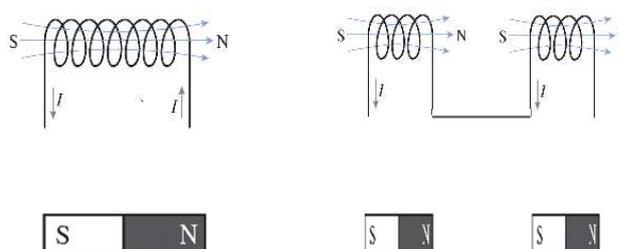
**Figura 10. Sentido de circulação interna dos elétrons num ímã permanente**

Deste modo as designações de polo Norte e Sul de um ímã estariam associadas à identificação do sentido de circulação interna dos elétrons. Assim, é evidente que quando se parte um ímã se criam dois dipolos, pois não se altera o sentido de circulação dos elétrons.



**Figura 11. O corte de um ímã permanente cria novos dipolos**

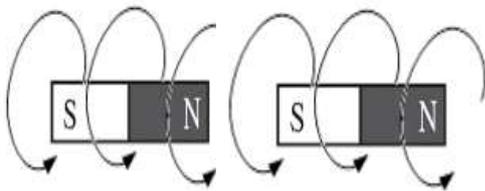
Do mesmo modo, também se torna evidente que ao dividir-se a bobine a meio se obtenham dois dipolos. Assim, por exemplo, se dividirmos uma bobina de 100 espiras em 2 bobinas de 50 espiras cada, obtemos dois dipolos, fenómeno semelhante acontece quando se parte um ímã ao meio.



**Figura 12. O "corte" de uma bobina cria novos dipolos**

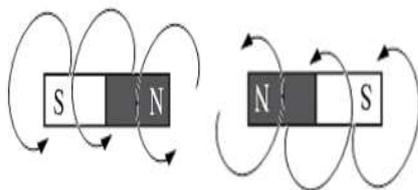
Agora resta a questão de entender porque é que dois polos iguais se repelem e dois polos diferentes se atraem.

No caso de se aproximarem polos diferentes, o movimento dos elétrons em cada ímã é circular e com o mesmo sentido levando a crer que as trajetórias dos elétrons sob influência de ambos os ímanes se encaixam sem colisões permitindo a aproximação dos dois ímanes. Por outro lado, é importante ter presente que os elétrons que giram em torno do núcleo são fortemente atraídos pelos respectivos núcleos e a distância entre eles é mantida graças às forças centrífugas que afastam os elétrons (cargas negativas) dos respectivos prótons (cargas positivas). Acontece que o efeito dessas forças centrífugas apenas confere efeito de afastamento dos elétrons aos respectivos núcleos. Assim, quando se aproximam polaridades diferentes de dois ímanes, dado que as orbitais dos elétrons são circulares e têm iguais sentidos nos referidos ímanes, estes permitem a sua aproximação, mas os elétrons de um dado ímã são fortemente atraídos pelos prótons do outro ímã. Ou seja, surgem forças de atração entre as diferentes polaridades dos ímanes.



**Figura 13. Polaridades diferentes de dois ímanes atraem-se**

Na outra situação de se aproximarem polos iguais de dois ímanes, o movimento dos elétrons em cada ímã é circular, mas com sentidos contrários, levando a crer que os elétrons sob influência de ambos os ímanes sofrem colisões entre eles não permitindo a aproximação dos dois ímanes, ou seja surgem forças de repulsão promovendo o afastamento entre polos iguais.



**Figura 14. Polos iguais de dois ímanes repelem-se**

#### 4. Conclusão

Partindo da compreensão da criação de campo magnético criado por uma corrente de elétrons quando percorre uma bobina abordou-se o conceito de polos magnéticos Norte e Sul; como os ímanes permanentes apresentam propriedades magnéticas semelhantes, a associação do magnetismo ao movimento circular dos elétrons permitiu entender por que razão surgem dois dipolos quando se parte um ímã a meio e também a existência de forças de atração entre polos diferentes e repulsão entre polos iguais. Em termos de conclusão, foram abordados fenómenos com os quais convivemos diariamente, mas cuja explicação tem estado suportada na constatação dos seus efeitos e não na explicação numa escala atômica que justifica de uma forma simples e transparente o magnetismo tal como existe na natureza.

#### 5. Referências

- [1] Fitzgerald, A. K., Jr. Umans, S.D., Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed, AMGH Editora, 2014.
- [2] Toro, V. D., Fundamentos de Máquinas Elétricas, Guanabara, 1994.
- [3] Chapman, S. J., Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill, 2012.
- [4] Mora, J. F., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2008.
- [5] Meireles, V. C., Circuitos Elétricos, Lidel, 2007.
- [6] Stefanita, C. G., Magnetism, Basics and Applications, Springer, 2012.
- [7] Knight, R. D., Física: uma abordagem estratégica, Eletricidade e Magnetismo vol. 3, Bookman, 2009.
- [8] Benelli, C., Gatteschi, D., Introduction to Molecular Magnetism: From Transition Metals to Lanthanides, Wiley, 2015.
- [9] Mead, C., Collective Electrodynamics: Quantum Foundations of Electromagnetism, MIT Press, 2002.
- [10] Skomski, R., Simple Models of Magnetism, OUP Oxford, 2012.
- [11] Coey, J. M. D., Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge University Press, 2010.
- [12] Fitzpatrick, R., Maxwell's Equations and the Principles of Electromagnetism, Jones & Bartlett Learning, 2008.