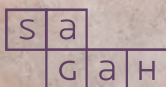


# ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

Fauzi Marraui



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS

# Circuitos magnéticos

## Objetivos de aprendizagem

Ao final deste texto, você deve apresentar os seguintes aprendizados:

- Analisar sistemas que usam campos magnéticos.
- Identificar as propriedades dos materiais magnéticos.
- Descrever modelos de circuitos magnéticos.

## Introdução

Os sistemas que utilizam o princípio do campo magnético dependem das propriedades desses materiais, a partir das quais é possível compor os modelos de circuitos magnéticos, ou seja, a capacidade de analisar os sistemas que usam o campo magnético, identificar as propriedades dos materiais magnéticos e descrever os modelos de circuitos magnéticos é fundamental no estudo de dispositivos e equipamentos eletrônicos, como as máquinas elétricas e os transformadores. Portanto, o objetivo deste capítulo é torná-lo apto a desenvolver essa capacidade.

## Sistemas que usam campos magnéticos

Determinada forma de energia pode ser convertida em outras formas de energia por meio de mecanismos e, também, de suas próprias características. De acordo com Chapman (2013), no caso de motores, geradores e transformadores, o mecanismo fundamental pelo qual uma forma de energia é convertida em outra constitui-se a partir dos campos magnéticos.

Pode-se dizer que o campo magnético é formado a partir de uma corrente elétrica circulante por um condutor. Conforme Umans (2014), para direcionar e dar forma a esse campo magnético, praticamente todas as máquinas elétricas e transformadores utilizam materiais ferromagnéticos, que possibilitam as implementações práticas de grande parte dos dispositivos eletromecânicos, já que atuam como um meio de transferência e conversão de energia. Assim,

o entendimento desses dispositivos depende da análise dos sistemas que utilizam esses materiais, ou seja, que usam campos magnéticos.

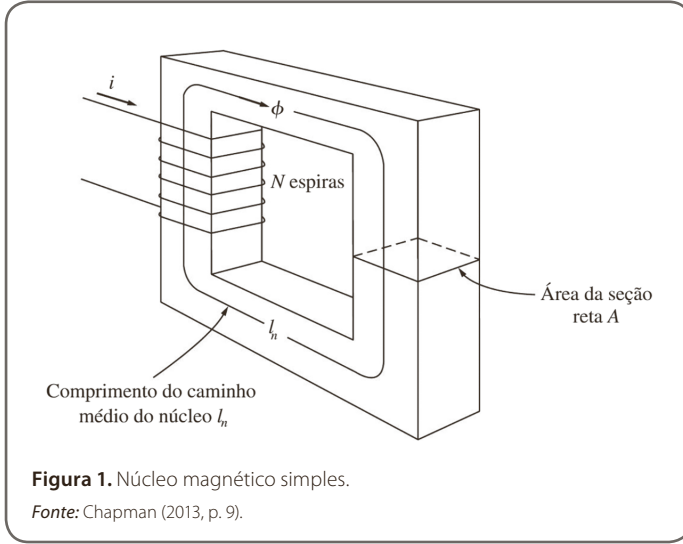
Podemos analisar alguns princípios básicos para descrever como os campos magnéticos atuam nesses sistemas, que, segundo Chapman (2013), são quatro:

1. um fio condutor de corrente é capaz de produzir um campo magnético ao seu redor;
2. se um campo magnético passar por uma bobina, induzirá uma tensão sobre ela;
3. na presença de um campo magnético, haverá uma força induzida sobre um fio condutor de corrente;
4. um fio que se move na presença de um campo magnético tem uma tensão induzida sobre ele.

Assim, você deve compreender qual a lei fundamental que rege a produção de um campo magnético. De acordo com Chapman (2013), ela é conhecida como lei de Ampère, em que o campo magnético é produzido por de uma corrente, dada pela Equação (1):

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{líquida}} \quad (1)$$

onde  $\mathbf{H}$  representa a intensidade do campo magnético produzido pela corrente líquida, dada por  $I_{\text{líquida}}$ , tendo sua unidade de medida em ampères, enquanto  $H$  (magnitude ou módulo do vetor  $\mathbf{H}$ ) é medida em ampères-espiras por metro. O caminho de integração é dado pelo comprimento do caminho médio no núcleo,  $l_n$ . A Equação (1) pode ser mais bem compreendida a partir da Figura 1.



A Figura 1 ilustra um núcleo retangular com um enrolamento de  $N$  espiras de fio. Considerando que o núcleo compõe-se por um material ferromagnético, segundo Chapman (2013), essencialmente todo o campo magnético produzido pela corrente ficará contido dentro do núcleo; além disso, a bobina cruza o caminho de integração  $N$  vezes quando está conduzindo uma corrente  $i$ , portanto a corrente líquida que passa por dentro do caminho de integração se torna  $N \cdot i$ , que, com a lei de Ampère, forma a Equação (2):

$$H \cdot l_n = N \cdot i \quad (2)$$

Assim, o valor da intensidade do campo magnético no núcleo em virtude da corrente aplicada é dada pela Equação (3):

$$H = \frac{N \cdot i}{l_n} \quad (3)$$

Chapman (2013) afirma que a intensidade do campo magnético,  $\mathbf{H}$ , refere-se à medida do esforço que uma corrente faz para estabelecer um campo magnético, e essa intensidade do fluxo do campo magnético produzido também dependerá do material do núcleo. Assim, existe uma relação entre  $\mathbf{H}$  e a densidade do fluxo magnético resultante dentro de um material ( $\mathbf{B}$ ), representada pela Equação (4).

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material.

Nesse sentido, uma lei, denominada lei de Gauss dos campos magnéticos, afirma, de acordo com Umans (2014), que a densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  é conservada, ou seja, em uma superfície fechada não há entrada nem saída líquida de fluxo, podendo ser representada pela Equação (5).

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (5)$$

Assim, a partir das Equações (1) a (5), é possível notar que as grandezas de um campo magnético podem ser determinadas pelas correntes dos valores instantâneos das correntes que lhe dão origem.

Agora que já viu o princípio que descreve a formação do campo magnético nos sistemas que o utilizam, e como também eles dependem do material que os compõe, você observará no próximo tópico as propriedades dos materiais magnéticos.

## Propriedades dos materiais magnéticos

Conforme Fowler (2013), os materiais que sofrem a atração de campos magnéticos denominam-se materiais magnéticos, sendo os mais conhecidos o ferro, os compostos ferrosos e as ligas que contêm ferro e outros metais (p. ex., aço). Por isso, esses materiais também são chamados de ferromagnéticos. Existem materiais que são atraídos quando expostos a um campo magnético intenso, como o níquel e o cobalto (i. e., materiais ligeiramente magnéticos, já que, quando comparados ao ferro, por exemplo, são fracamente magnetizados).

Para facilitar seu entendimento, imagine os materiais que você não consegue atrair com um ímã — trata-se dos não magnéticos. É natural que você tenha pensado em materiais como madeira, papel ou borracha, entretanto é importante não esquecer que inúmeros materiais metálicos, isoladamente, também são não magnéticos, como o cobre, o latão e o alumínio.

Contextualizando para os dispositivos de conversão eletromecânica de energia, os materiais magnéticos têm muita importância. Primeiro porque, segundo Umans (2014), a utilização desse tipo de material possibilita obter densidades elevadas de fluxo magnético com níveis relativamente baixos de força magnetizante, pois as forças magnéticas e a densidade de energia aumentam com o aumento da densidade de fluxo, refletindo positivamente no desempenho dos dispositivos de conversão de energia. Além disso, os materiais magnéticos podem ser empregados para delimitar e direcionar os campos magnéticos gerados, uma característica aplicada em transformadores e máquinas elétricas.

As propriedades básicas dos materiais ferromagnéticos são comuns a todos eles, apesar de se caracterizarem por uma ampla faixa de propriedades. Contudo, para que você possa compreendê-las, antes algumas definições devem estar claras:

- domínios — regiões nas quais os momentos magnéticos de todos os átomos estão em paralelo, dando origem a um momento magnético líquido;
- momento magnético — força do campo magnético associada ao elétron.

Assim, conforme Umans (2014), os materiais ferromagnéticos são compostos por muitos domínios: quando uma força magnetizante externa é aplicada a esse material, os momentos dos domínios magnéticos tendem a se alinhar ao campo magnético aplicado, somando-se a ele e resultando na elevação do valor da densidade de fluxo, o qual se torna muito maior que o valor resultante em decorrência somente da força magnetizante.

Esse fato resulta em uma permeabilidade magnética,  $\mu$ , descrita na Equação (4), maior do que a permeabilidade do vácuo, representada por  $\mu_0$ . De acordo com Umans (2014), esse comportamento se repete à medida que a força magnetizante aumenta e continua até que todos os momentos magnéticos estejam alinhados ao campo aplicado, ponto no qual não há mais contribuição para o aumento da densidade do fluxo magnético e, portanto, o material está completamente saturado.

Além da saturação, outro fenômeno comum das propriedades dos materiais ferromagnéticos consiste histerese magnética, que ocorre quando a força magnetizante externa aplicada ao material é reduzida, já que, mesmo na ausência dessa força, segundo Umans (2014), os momentos magnéticos tendem a se alinhar naturalmente, de modo a seguir as direções de mais fácil magnetização, próximas da direção do campo aplicado. Assim, por esse efeito de histerese, a relação entre  $B$  e  $H$  em um material ferromagnético é não linear, possibilitando vários sentidos.

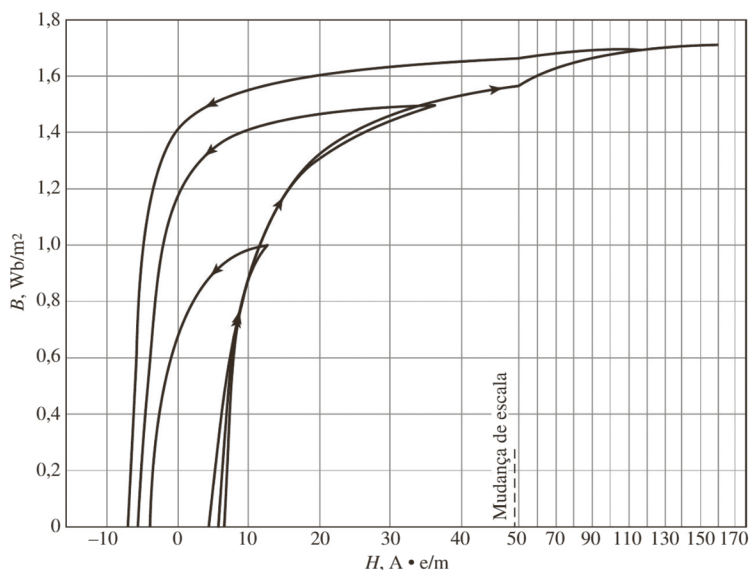
Normalmente, as características de um material não podem ser escritas de maneira analítica, por isso, de acordo com Umans (2014), são apresentadas em formas de gráficos, constituídos por conjuntos de curvas determinadas empiricamente a partir de ensaios realizados com esses materiais.



### Fique atento

Os fabricantes de materiais magnéticos disponibilizam os dados numéricos de uma vasta variedade de materiais, entretanto um problema resultado do uso e da análise desses dados consiste na diversidade dos sistemas de unidade utilizados, ou seja, o leitor deve ficar atento às conversões. Por exemplo, conforme Umans (2014), a magnetização pode ser dada em oersteds ou em ampères-espiras por metro, e a densidade de fluxo magnético em gauss, quilogauss ou teslas.

A curva  $B$ - $H$  ou laço de histerese é a curva mais comum para descrever um material magnético, conforme ilustrado pela Figura 2.



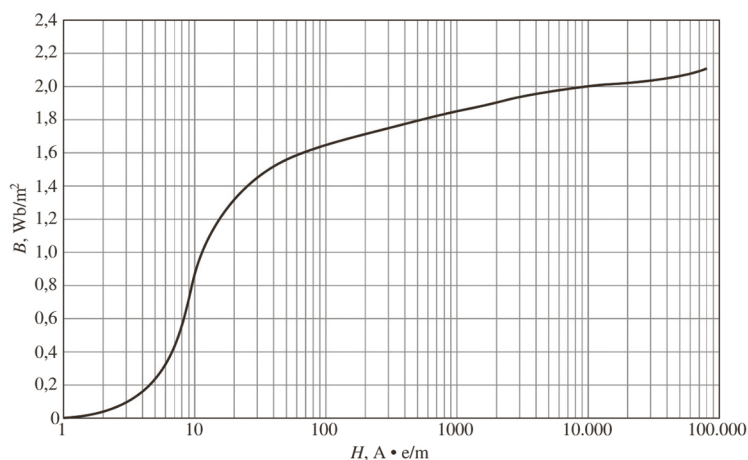
**Figura 2.** Curva  $B$ - $H$  para aço elétrico de grão orientado.

Fonte: Umans (2014, p. 20).

Contudo, para fins de engenharia, essa análise pode ser realizada de maneira mais simples, a partir da curva de magnetização CC ou normal. A Figura 3 ilustra uma curva de magnetização para o aço elétrico M-5.

A Figura 2 ilustra o primeiro e o segundo quadrantes de um conjunto de laços de histerese, para o aço M-5, utilizado em equipamentos elétricos. Essas curvas, ou seja, esses laços, representam a relação entre a densidade do fluxo magnético  $B$  e a intensidade deste (a força magnetizante  $H$ ). Conforme Umans (2014), cada uma dessas curvas é obtida com a variação cíclica da força magnetizante, de modo que a histerese faz com que tomem vários sentidos. Após vários ciclos, as curvas se fecham, formando laços fechados, como pode ser observado na Figura 2, e as flechas representam o sentido seguido por  $B$ , enquanto a grandeza  $H$  cresce e decresce. Além disso, é possível observar que, à medida que  $H$  aumenta, as curvas começam a ficar horizontais, o que significa que o material está tendendo à saturação.





**Figura 3.** Curva de magnetização para aço elétrico de grão orientado.

Fonte: Umans (2014, p. 21).

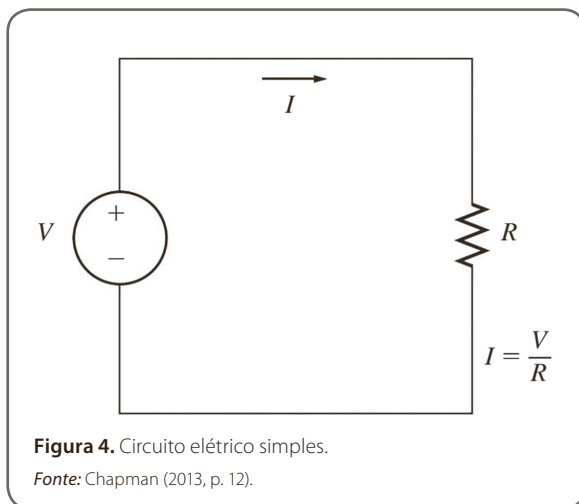
De acordo com Umans (2014), essa curva é obtida a partir dos valores máximos de  $B$  e  $H$  nas extremidades dos laços de histerese, de modo a desprezar a natureza histerética do material, ainda que preservando as suas características não lineares.

Como agora você conhece o princípio dos sistemas que usam campo magnético e as propriedades básicas dos materiais magnéticos, já dispõe da base para compreender os circuitos magnéticos.

## Modelos de circuitos magnéticos

Pode-se definir um circuito magnético analogamente a um circuito elétrico. Como visto neste capítulo, uma corrente circulando em uma bobina com fio enrolado em um núcleo gera um fluxo magnético neste núcleo, o que, de acordo com Chapman (2013), é análogo a um circuito elétrico, no qual uma tensão gera um fluxo de corrente. Em outras palavras, é possível analisar os circuitos magnéticos como se analisam os circuitos elétricos simples.

Assim, sabe-se que, em um circuito elétrico, como ilustra a Figura 4, a fonte de tensão  $V$  injeta no circuito uma corrente  $I$  que passa por uma resistência  $R$ .



A partir da velha conhecida lei de Ohm, como mostrado na Equação (6), têm-se:

$$V = RI \quad (6)$$

Em outras palavras, no circuito elétrico, o fluxo de corrente é injetado por uma tensão ou uma força eletromotriz, a qual, nos circuitos magnéticos, é análoga à força magnetomotriz ( $FMM$ ), medida em ampère-espiras, e, segundo Chapman (2013), igual ao fluxo efetivo de corrente aplicado ao núcleo, dado pela Equação (7):

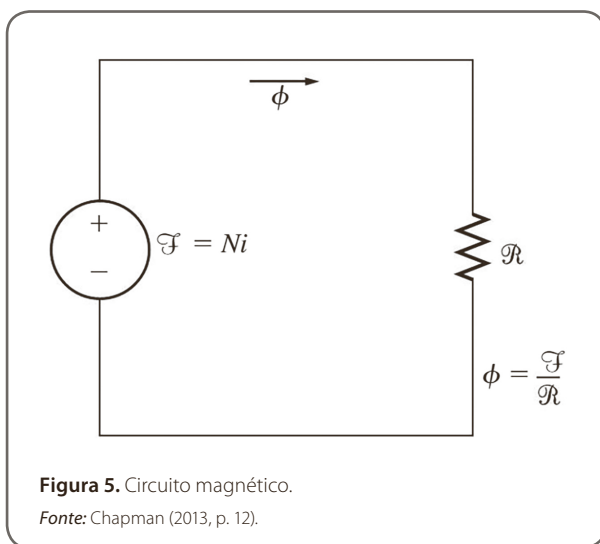
$$FMM = N \cdot i \quad (7)$$

Assim como nos circuitos elétricos, a  $FMM$  no circuito magnético também apresenta uma polaridade associada, sendo que o terminal positivo da fonte de  $FMM$  corresponde ao terminal de onde o fluxo sai, e o terminal negativo é de onde o fluxo volta a entrar. Além disso, ainda conforme Chapman (2013), no

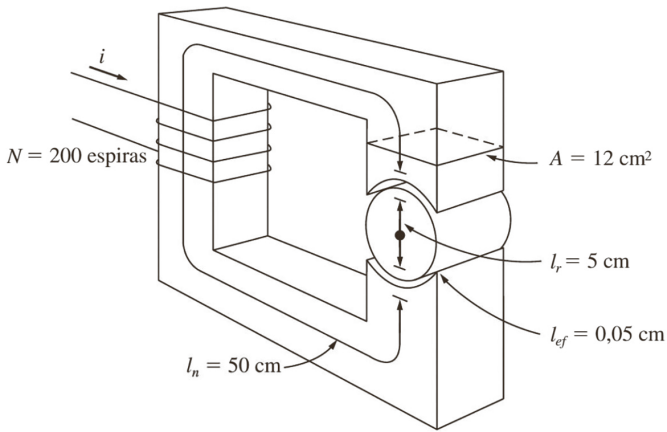
circuito magnético, a  $FMM$  aplicada faz com que um fluxo  $\phi$  seja produzido; assim, paralelamente à lei de Ohm para os circuitos elétricos, a relação entre o fluxo e a  $FMM$  é dada pela Equação (8):

$$FMM = \phi \cdot \mathfrak{R} \quad (8)$$

onde  $\mathfrak{R}$  representa a relutância do circuito, tendo como unidade o ampère-espira ( $A \cdot e$ ) por weber ( $Wb$ ). De acordo com Chapman (2013), a relutância é o equivalente da resistência elétrica, pois obedece às mesmas regras que as resistências em um circuito elétrico (p. ex., quando estão em série, a relutância equivalente corresponde à soma das relutâncias). Contudo, é importante reiterar que, quando se usam os conceitos de circuitos magnéticos, os cálculos de fluxo são sempre aproximados. A Figura 5 ilustra o modelo de circuito magnético análogo ao circuito elétrico simples.

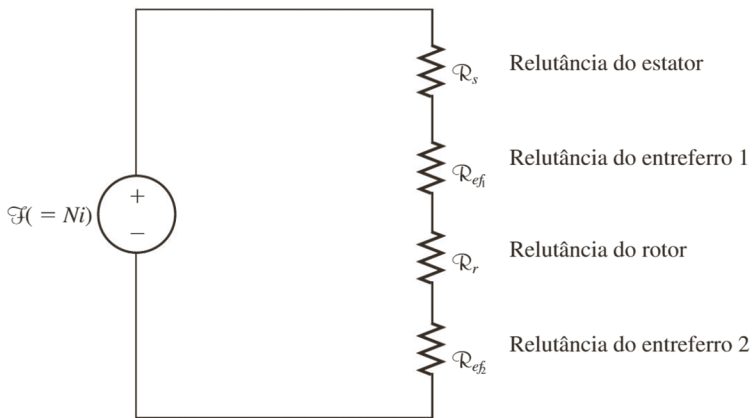


A partir das relações expostas neste tópico, outros modelos de circuitos magnéticos podem ser formados. A Figura 6 ilustra de maneira simplificada o rotor e o estator de um motor CC, e a Figura 7 o respectivo circuito magnético.



**Figura 6.** Representação simplificada do rotor e do estator de um motor CC.

Fonte: Chapman (2013, p. 20).



**Figura 7.** Circuito magnético do rotor e do estator de um motor CC.

Fonte: Chapman (2013, p. 20).



## Referências

CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FOWLER, R. *Fundamentos de eletricidade*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Corrente Contínua e Magnetismo, v. 1).

UMANS, S. D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.

Conteúdo:



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS