

A. INTRODUÇÃO

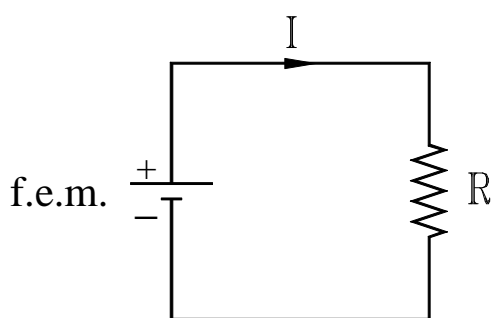
(1) Analogia entre Circuitos Magnéticos e Elétricos

Um circuito elétrico de resistência (R), ilustrado na figura 1(a), é percorrido por uma corrente (I) de cargas elétricas movidas por uma força eletromotriz (fem), segundo a lei de Ohm:

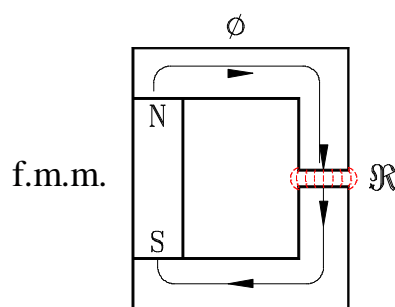
$$V = fem = R \cdot I$$

De modo análogo, um circuito magnético de **relutância** (\mathfrak{R}), ilustrado na figura 1(b), é submetido a um **fluxo** (ϕ), resultante da orientação dos dipolos magnéticos do material por ação de uma **força magnetomotriz** (fmm):

$$\mathfrak{S} = fmm = \mathfrak{R} \cdot \phi$$



(a) Circuito Elétrico



(b) Circuito Magnético

Figura 1

Enquanto cargas elétricas de fato percorrem o circuito elétrico, os dipolos magnéticos apenas modificam a sua orientação, sendo o fluxo magnético uma abstração para explicar como o efeito magnético se propaga através dos materiais.

As noções de **campo elétrico** (E) e **campo magnético** (H) são necessárias para explicar a ação remota dos fenômenos eletromagnéticos, mesmo através do vácuo, onde não existem nem cargas nem dipolos.

A fem cria um campo elétrico devido à separação das cargas de polaridade diferente (positiva e negativa), resultando a corrente elétrica I no circuito condutor. A fmm , por sua vez, cria um campo magnético através da orientação dos dipolos (norte-sul). Esse campo estabelece um fluxo magnético ϕ , porém não resulta em uma "corrente magnética", daí a analogia entre circuito elétrico e circuito magnético não ser perfeita e a "lei de Ohm magnética" requerer devida interpretação. Com o alinhamento dos dipolos, resultam as linhas de campo magnético através do meio, produzindo os enlaces que

chamamos de fluxo magnético, responsável pela ação à distância sobre outros campos magnéticos.

(2) Produção de Campo Magnético

O grande vínculo que acontece entre campos elétricos e magnéticos, decorre do fato de uma corrente de cargas elétricas em um circuito elétrico produzir um campo magnético associado, observação que foi feita pela primeira vez em 1820 por Oersted, durante uma aula de Física. Em 1831, Faraday verificou que, reversamente, um campo magnético variável era capaz de produzir uma força eletromotriz em um circuito elétrico submetido ao campo magnético. Da observação de Oersted conclui-se que podemos produzir campos magnéticos usando correntes elétricas. A força magnetomotriz resultante é proporcional à corrente e ao número (N) de espiras enlaçadas:

$$\mathfrak{F} = fmm = N \cdot I = \mathfrak{R} \cdot \phi$$

Uma fmm apreciável pode ser produzida pela corrente elétrica percorrendo um solenóide com muitas espiras, que concentra o campo magnético em seu interior, conforme mostrado na figura 2.

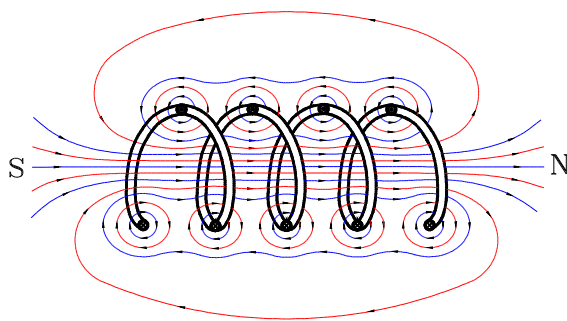


Figura 2

Com essa propriedade, podemos substituir o ímã da figura 1(b) por um eletroímã como fonte magnética, resultando o circuito eletromagnético mostrado na figura 3.

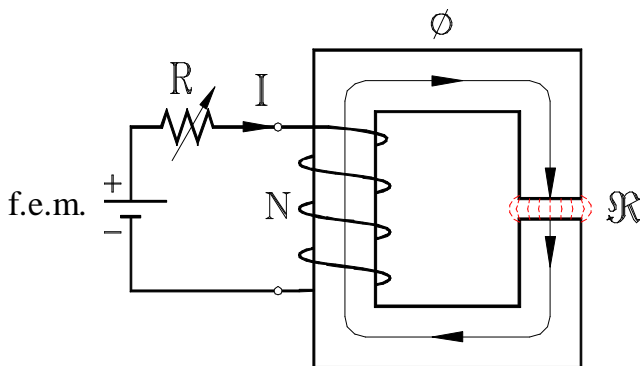


Figura 3

A figura 4 mostra como se pode controlar o fluxo magnético através da variação da corrente elétrica.

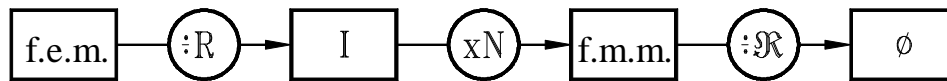


Figura 4

Note que na figura 4 as relações entre as diversas grandezas são algébricas. Fica claro também como obter fluxo magnético a partir de tensão ou corrente elétrica.

Questão: como obter tensões ou correntes elétricas a partir de fluxo magnético? Exemplifique.

(3) Indução Eletromagnética

A partir da observação de Faraday, de que a variação de fluxo magnético produz força eletromotriz por efeito de indução, ou seja:

$$\frac{d}{dt}\phi \rightarrow fem$$

fecha-se o laço básico da conversão eletromagnética, representado pela figura 5.

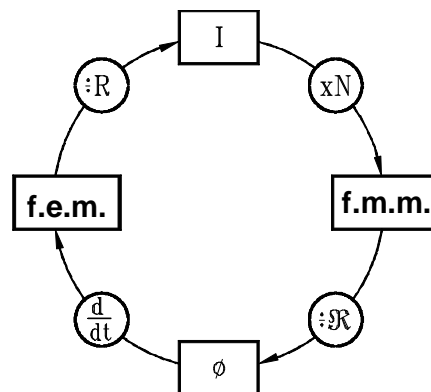


Figura 5

Todas as grandezas envolvidas (elétricas e magnéticas) são orientadas, o que significa que tanto o sentido da corrente como o sentido do fluxo são prefixados pela orientação das forças eletro ou magnetomotrizes. Verifica-se que o laço se fechou através de uma relação diferencial entre ϕ e fem , expressando taxa de variação no tempo.

Questão: que implicação tem isso no caso de tensões e correntes contínuas, de valores constantes?

(4) Propriedades Magnéticas

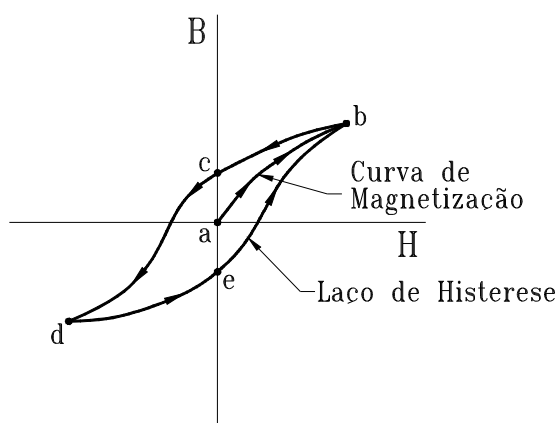
Existem algumas restrições importantes que devem ser observadas na analogia entre circuitos elétricos e magnéticos:

- a **condutividade elétrica** do meio pode variar desde quase zero (materiais dielétricos) até quase infinito (materiais supercondutores).
- a **permeabilidade magnética** relativa do meio varia muito menos (de 1, para o vácuo, até da ordem de 10.000, para materiais ferromagnéticos).

Isto significa que se pode confinar a corrente elétrica ao circuito condutor, usando materiais isolantes, porém não se consegue evitar que uma parte do fluxo magnético escape do circuito magnético, pois não se conhece isolantes magnéticos. Essa fuga de fluxo do circuito principal é chamada **dispersão magnética** que, em geral, causa efeitos indesejáveis devido ao acoplamento e interferência com circuitos próximos. Essa é uma razão para se definir o vetor **densidade de fluxo** B , que pode variar de ponto para ponto em meios não homogêneos.

Outra característica, que ocorre justamente nos melhores condutores magnéticos (materiais ferromagnéticos), é a **saturação magnética** que faz com que seja necessário utilizar circuitos magnéticos (núcleos) superdimensionados, ao contrário dos circuitos elétricos, onde se pode utilizar condutores finos que admitem elevadas densidades de correntes e requerem pequenas seções transversais. A saturação do caminho magnético, por sua vez, aumenta a dispersão, piorando as características magnéticas globais e gerando não linearidade nas relações magnéticas.

Além da saturação e da dispersão, a característica de magnetização dos materiais ferromagnéticos apresenta o fenômeno da **histerese**, o que significa que a reversão do processo (magnetização contrária) requer energia para a desmagnetização. Isto representa perdas magnéticas em circuito de corrente alternada. Sob fluxos variáveis, o núcleo ferromagnético pode apresentar também perdas devido às correntes parasitas ou de Foucault, que são induzidas no núcleo.



ϕ - fluxo magnético [Wb]

H - intensidade do campo [A/m]

$B = \mu \cdot H$ - densidade do fluxo [T ou Wb/m²]

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ - permeabilidade do meio [H/m]

μ_0 - permeabilidade do vácuo [H/m]

Figura 6

(5) Produção de Força Eletromagnética

Uma vez que Faraday mostrou que a variação de fluxo magnético consegue separar cargas elétricas em um circuito elétrico enlaçado por esse fluxo, é de se esperar que haja transferência de energia para esse circuito, já que a *fem* induzida provoca corrente elétrica no circuito fechado e o produto [tensão x corrente] dá potência elétrica. Mais ainda, sabendo-se que a potência elétrica pode ser convertida em calor e/ou trabalho, e, assumindo que as perdas no circuito considerado sejam desprezíveis, a energia transferida deve aparecer como trabalho correspondente.

Questão: Como é que se dá esse processo ?

A análise desse problema foi feita originalmente por Ampère, que determinou a força (F) que atua sobre um condutor de comprimento (ℓ), percorrido por uma corrente (I) e

submetido a um campo magnético com densidade (B), chegando ao produto vetorial que relaciona a intensidade e a direção das variáveis envolvidas:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{\ell} \times \vec{B})$$

onde $\vec{\ell}$ (comprimento do condutor) está orientado no sentido da corrente.

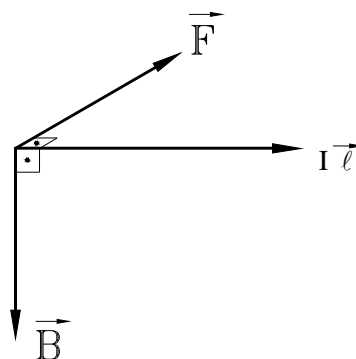


Figura 7

Com essa lei podemos quantificar os processos de conversão eletromecânicos que desenvolvem trabalho (quantidade de movimento), ou seja, as máquinas elétricas. Uma outra maneira para se determinar as forças desenvolvidas parte da equação de balanço de energia elétrica, magnética e mecânica. Esse processo será utilizado no estudo do eletroímã no próximo laboratório.

(6) Dispositivo Eletromagnético

Dispositivo eletromagnético é todo tipo de máquina que realiza essa conversão e nosso objetivo é estudá-lo do ponto de vista dos princípios de funcionamento, explorando as propriedades e interações eletromagnéticas que tenham aplicações tecnológicas. Muitos dispositivos eletromagnéticos já foram desenvolvidos desde o século passado, porém muitas aplicações ainda devem ser exploradas. Para se ter uma idéia, apenas recentemente se começou a utilizar em máquinas elétricas os recursos de controle do fluxo magnético por meios eletrônicos.

B. PARTE EXPERIMENTAL

Tendo como objetivo motivar a curiosidade e o senso de pesquisa sobre dispositivos eletromagnéticos, vamos realizar alguns experimentos utilizando montagens bem elementares. Nessa série de experimentos iremos observar:

- (1)** Campo magnético produzido por corrente elétrica.
- (2)** Distribuição do campo magnético produzido por um eletroímã.
- (3)** Influência do meio sobre a distribuição do campo magnético.
- (4)** Anéis de Thompson - levitação magnética.
- (5)** Freio eletromagnético.
- (6)** Força eletromagnética atuando sobre condutores.
- (7)** Medidores eletromecânicos elementares: bobina móvel (galvanômetro de D'Arsonval); eletrodinâmico; ferro móvel.
- (8)** Visualização do laço de histerese em osciloscópio.
- (9)** Bobina de Ruhmkorff e ignição automotiva.