

# Indução Magnética

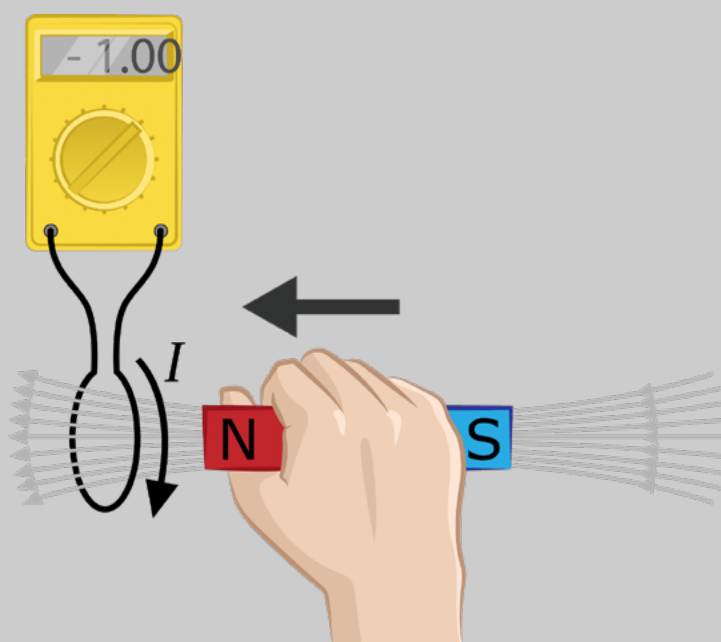
## Fluxo Magnético e as Leis de Faraday e Lenz

Em torno dos anos 1830, Michael Faraday e Joseph Henry descobriram, de forma independente, que um campo magnético variável gera um fluxo magnético variável em uma espira de fio fechada estacionária e que induz corrente no fio. Formas de se obter campos magnéticos variáveis são através de correntes variáveis em espiras ou com o movimento de ímãs.

Tal variação de fluxo magnético produz uma força eletromotriz (FEM) e as correntes são chamadas de **FEM induzida e correntes induzidas** (TIPLER; MOSCA, 2019). Esse processo é denominado de indução magnética. Outro fato observado por Faraday e Henry é que em um campo magnético constante, caso uma espira se movimente, nela será induzida uma FEM. Tal efeito é utilizado em motores elétricos geradores, onde a energia mecânica é convertida em energia elétrica.

### Experimento 1

Quando o ímã é movido em direção a espira de fio conectado a um amperímetro, o visor do aparelho irá mostrar que uma determinada corrente foi induzida na espira.

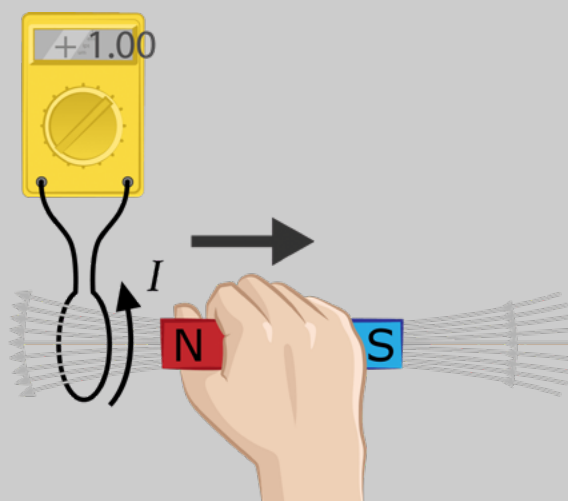


Fonte: Adaptada de Serway e Jewett (2014, p. 182).

#PraCegoVer: A figura apresenta um amperímetro com uma espira conectada em seus terminais. Nessa espira um ímã é movido da direita para a esquerda. Em torno da espira é indicado que existe uma corrente no sentido horário e o amperímetro apresenta o valor de -1 ampère.

## Experimento 2

Quando o ímã é movido para fora da espira, esse movimento causa uma corrente no sentido inverso à situação anterior. Tal fato é comprovado com a inversão do sinal que o amperímetro apresenta.

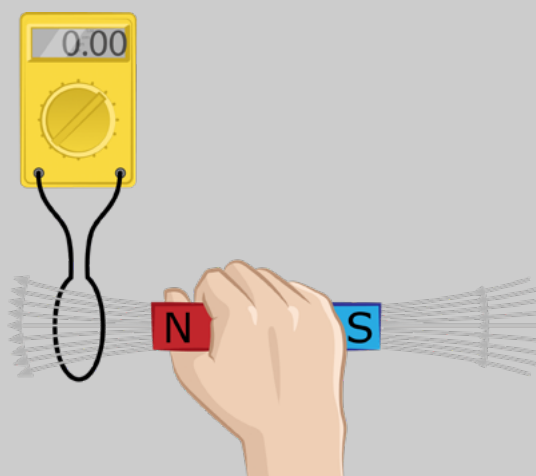


Fonte: Adaptada de Serway e Jewett (2014, p. 182).

#PraCegoVer: A figura apresenta um amperímetro com uma espira conectada em seus terminais. Nessa espira um ímã é movido da esquerda para a direita. Em torno da espira é indicado que existe uma corrente no sentido anti-horário e o amperímetro apresenta o valor de +1 ampère.

## Experimento 3

Quando o ímã permanece imóvel não há variação de fluxo magnético e conseqüentemente não há corrente na espira, como pode ser visto no valor zero do amperímetro.



Fonte: Adaptada de Serway e Jewett (2014, p. 182).

#PraCegoVer: A figura apresenta um amperímetro com uma espira conectada em seus terminais. Nessa espira um ímã é mantido parado. Nenhuma corrente é representada na espira e o amperímetro mostra o valor de zero ampère.

O fluxo magnético através de uma superfície  $S$  é expresso por:

$$(7) \quad \phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA = \int_S B_n dA$$

Onde  $\hat{n}$  é o vetor normal à superfície integrada. A unidade de fluxo magnético é a intensidade do campo magnético vezes a área, ou seja, tesla vezes metro ao quadrado, tal unidade é o **weber** (Wb). Tal como no caso do fluxo elétrico, o fluxo magnético é proporcional ao número de linhas de campo por meio de uma seção de área. A força eletromotriz  $\varepsilon$  gerada através da variação do fluxo magnético é expressa pela **Lei de Faraday**:

$$(8) \quad \varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$$



## Curiosidade

A Lei de Faraday é uma das leis mais importantes no eletromagnetismo, pois permite calcular a tensão gerada através da variação do fluxo magnético em uma determinada área. O artigo “A lei de Faraday” apresenta diversas animações que facilitam a compreensão do efeito da indução magnética. O artigo está disponível clicando [aqui](#).

O sinal negativo na lei de Faraday tem relação com a força eletromotriz induzida. Tal direção foi definida por convenção conhecida como **Lei de Lenz**.



## Atenção

**Lei de Lenz:** A FEM está em uma direção que se opõe, ou tende a se opor, à variação que a produz.

## Força Eletromotriz Induzida e Indutâncias

A Lei de Lenz não especifica exatamente qual tipo de variação causa a FEM e a corrente induzida. Isso é feito de propósito, uma vez que existem diversas situações que tal lei pode englobar. Tomando como exemplo um ímã se movendo para a direita em direção a uma espira, tal como representado na figura a seguir:

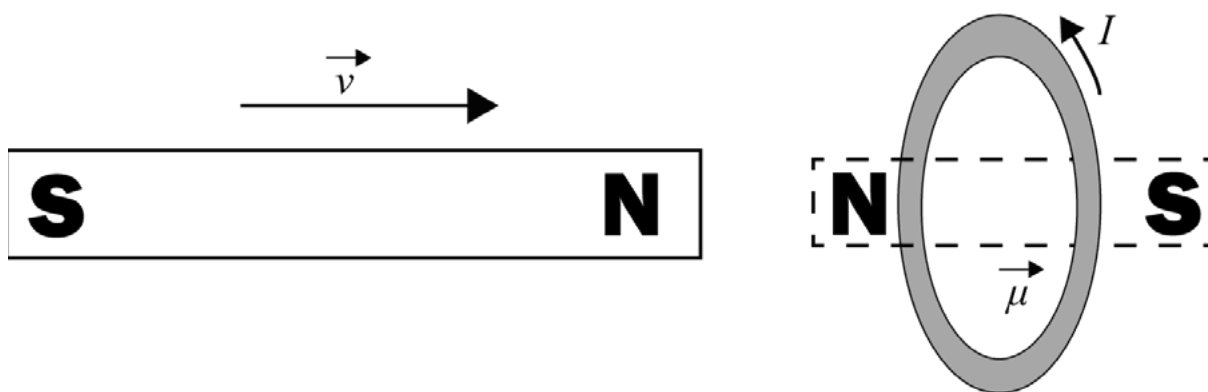


Figura 5 - Representação da força eletromotriz gerada através da movimentação de um ímã próximo de uma espira

Fonte: Adaptada de Tipler e Mosca (2019, p. 268).

#PraCegoVer: Uma barra de ímã é representada se movimentando com seu polo norte para a direita, onde existe uma espira circular de fio. Um ímã virtual é representado como o produto da força eletromotriz induzida pela corrente na espira, esse ímã tem o polo norte representado no lado esquerdo.

O movimento do ímã para a direita irá gerar uma variação no campo magnético na região da espira, o que induz uma corrente  $I$  na mesma. A Lei de Lenz afirma que a força eletromotriz induzida deve ser no sentido de se opor ao movimento do ímã. Ou seja, nesse caso a corrente induzida na espira produz um campo magnético que exerce força para a esquerda sobre o ímã. A orientação desse ímã deve ser tal que os polos próximos sejam iguais, para que haja força de repulsão. Nesse caso o polo norte induzido está à esquerda e o sentido da corrente é definido pela regra da mão direita.



## Atenção

Uma forma alternativa de interpretar a Lei de Lenz é por meio da seguinte afirmação: Quando um fluxo magnético através de uma superfície varia, o campo magnético devido a qualquer corrente induzida produz um fluxo sobre ela mesma – através da mesma superfície e em oposição à variação (TIPLER; MOSCA, 2019).

O fluxo magnético por meio de um circuito está relacionado à corrente nesse circuito e às correntes próximas. Considerando uma espira transportando uma corrente  $I$ , o valor do campo magnético gerado pela espira é proporcional à essa corrente. Com isso, o fluxo magnético através da espira é proporcional à corrente:

$$(9) \quad \phi_B = L \cdot I$$

Em que  $L$  é a constante de proporcionalidade, chamada de indutância da espira. A unidade utilizada para a indutância é o Henry (H). A indutância de um conjunto de espiras ou bobina depende apenas da forma geométrica. Por exemplo, para um solenoide de comprimento  $\ell$ ,  $N$  voltas e  $n = N / \ell$  é o número de voltas por unidade de comprimento, a indutância é:

$$(10) \quad L = \mu_0 n^2 A \ell$$

Logo, a indutância de um solenoide é proporcional ao quadrado do número de voltas por unidade de comprimento  $n$  e ao volume ( $A\ell$ ).



## Reflita

Qual a indutância de um solenoide com 5 centímetros de comprimento, uma área de 1 centímetro quadrado e 25 voltas?

Primeiramente debes ser convertidas as grandezas para as unidades do SI:

$$(11) \quad \begin{aligned} \ell &= 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m} \\ n &= N / \ell = 25 / 0,05 = 500 \text{ voltas/m} \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \\ A &= 1 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

A indutância de um solenoide pode ser encontrada pela equação :

$$(12) \quad \begin{aligned} L &= \mu_0 n^2 A \ell \\ L &= 4\pi \times 10^{-7} \cdot 500^2 \cdot 1 \times 10^{-4} \cdot 0,05 \\ L &= 1,57 \text{ } \mu\text{H} \end{aligned}$$

Logo, a indutância desse solenoide é de 1,57 microhenrys, que é um valor típico de solenoides utilizadas em circuitos eletrônicos.

## Energia Magnética e Circuitos RL

Quando uma corrente de um circuito está variando, o fluxo magnético devido à essa corrente também está variando, com isso uma FEM é induzida no circuito. De acordo com a Lei de Faraday e a relação  $\phi_B = L \cdot I$ , é possível calcular a FEM induzida em uma espira de acordo com a taxa de variação da corrente:

$$(13) \quad \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

Geralmente, espiras e solenoides são construídos com a finalidade de serem bons indutores, ou seja, possuem um valor fixo de indutância e a resistência do fio condutor pode ser desprezada. A figura a seguir apresenta o símbolo utilizado para representar o elemento indutor em circuitos. A queda de tensão calculada a partir da equação (13) é apresentada na figura, em função do sentido da corrente.

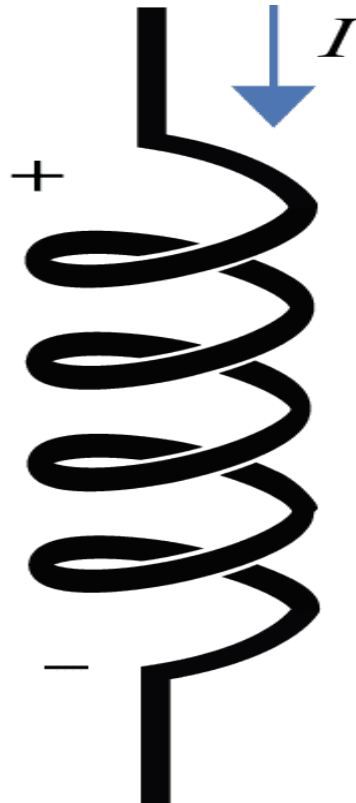


Figura 9 - Representação de um elemento indutor utilizada em diagramas de circuitos

Fonte: Adaptada de Knight (2009, p. 1066).

#PraCegoVer: Um indutor é representado por um fio com diversas voltas em torno do eixo Y, a corrente tem o sentido negativo desse eixo e a FEM é representada com sinal positivo por onde entra a corrente e sinal negativo onde sai a corrente.

Assim como o capacitor armazena energia por meio das cargas presentes em suas placas, o indutor armazena energia em forma magnética. Em um indutor a energia é armazenada no campo magnético da parte interno do enrolamento e está relacionada com a corrente que ele transporta:

$$(14) \quad U_B = \frac{1}{2} LI^2$$

Uma maneira de expressar a energia por unidade de volume é através da densidade de energia magnética  $u_m$ :

$$(15) \quad \mu_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$



## Curiosidade

Uma das aplicações do efeito da indutância é no uso de transformações de níveis de tensão através da relação entre o número de bobinas em circuitos primários e secundários. O forno por indução utiliza esse efeito para aquecer materiais, tal efeito é apresentado no artigo “Forno de indução”.

Um circuito que contém um resistor e um indutor é chamado de **circuito RL** (SERWAY; JEWETT, 2014). Tal circuito é apresentado na figura a seguir, onde  $S$  é uma chave que está inicialmente aberta e no instante  $t = 0$  é fechada. Uma análise da resposta do circuito é realizada a partir do momento que a chave é fechada, antes disso a corrente no circuito é nula.

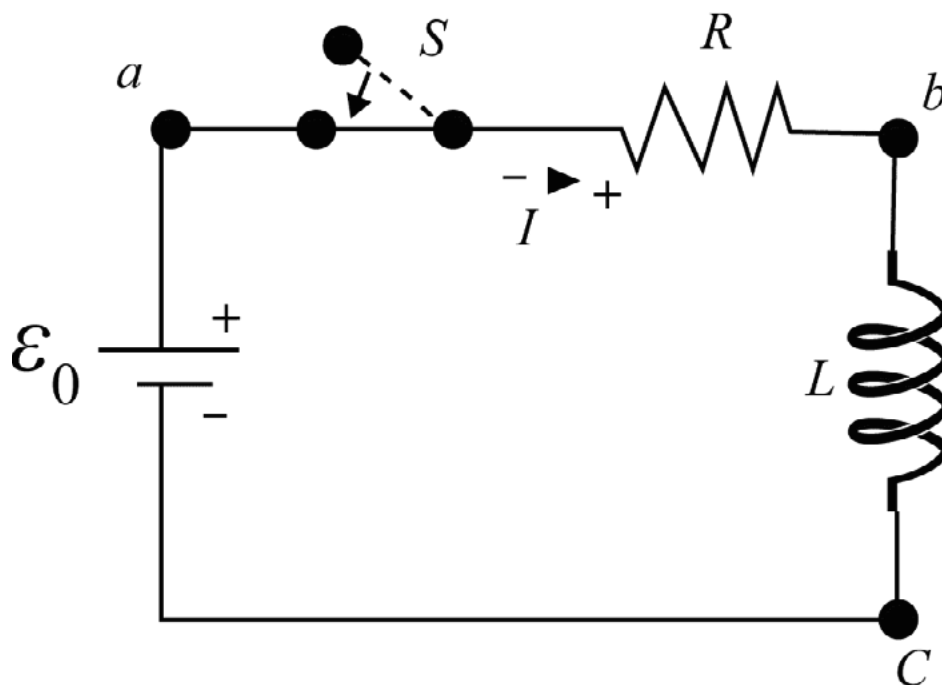


Figura 10 - Representação de um circuito que contém uma chave, uma bateria, um resistor e um indutor

Fonte: Adaptada de Tipler e Mosca (2019, p. 281).

#PraCegoVer: Um circuito em que estão conectados em série uma fonte de tensão, uma chave, um resistor e um indutor é representado no diagrama. Uma seta na chave representa seu movimento de abertura ou fechamento. A corrente é representada como sendo no sentido horário.

De acordo com a Lei das malhas de Kirchhoff é possível obter a equação que relaciona as variáveis do circuito:

$$(16) \quad \varepsilon_0 - IR - L \frac{dI}{dt} = 0$$

Tal equação quando resolvida para a corrente resulta na expressão:

$$(17) \quad I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}})$$

Uma análise da equação (17) para um tempo muito grande resulta na corrente em estado estacionário que é dada pela relação entre a tensão e a resistência. Da mesma forma que para circuitos RC, aqui é possível utilizar uma constante de tempo:

$$(18) \quad \tau = L / R$$

Ou seja, quanto maior a indutância ou menor a resistência, maior o tempo para que o circuito chegue ao valor máximo de corrente.



# Conclusão

Nesse conteúdo foi apresentado o campo magnético gerado por uma carga elétrica em movimento e as Leis de Faraday e Lenz para obter informações a respeito da força eletromotriz induzida. Além disso, foi demonstrado que a estrutura e organização interna dos átomos pode alterar o comportamento magnético de determinados materiais.

Por meio da indução magnética foi mostrado que é possível obter uma diferença de tensão quando uma variação de fluxo magnético é imposta em uma espira, tal como é utilizada tal propriedade em motores elétricos. A capacidade que um elemento indutor tem de armazenar energia **é apresentada e sua aplicação em circuitos contendo resistores é analisada.**

Esse conjunto de ferramentas, conceitos e propriedades é amplamente importante em análises de circuitos elétricos e máquinas voltadas para conversão de energia mecânica em elétrica.

# Referências

FORNO de indução. **Instituto de Física**, UnB, [2020]. Disponível em: [http://www.fis.unb.br/gefis/index.php?option=com\\_content&view=article&id=207&Itemid=326](http://www.fis.unb.br/gefis/index.php?option=com_content&view=article&id=207&Itemid=326). Acesso em: 18 out. 2022.

LEI de Ampère para estudantes de Engenharia - Dois fios coaxiais. [S. l.: s. n.], 2017. 1 vídeo (7min59s). Publicado pelo canal **Física In Box**. Disponível em: <https://youtu.be/CDe5DhFY49c>. Acesso em: 18 out. 2022.

LEI de Biot Savart Regra da mão direita. [S. l.: s. n.], 2011. 1 vídeo (5min45s). Publicado pelo canal **Naldo Física**. Disponível em: <https://youtu.be/5V5MRo7A5RA>. Acesso em: 18 out. 2022.

LEI de Faraday. **Pós-Graduação Universidade Federal do ABC**, [2020]. Disponível em: <https://propg.ufabc.edu.br/mnpf-sites/relatividade-restrita/lei-de-faraday/>. Acesso em: 18 out. 2022.

MAGNETIZAÇÃO e Histerese. [S. l.: s. n.], 2017. 1 vídeo (10min). Publicado pelo canal **Paulo H. Roesler**. Disponível em: <https://youtu.be/FgpB7ZVrIZk>. Acesso em: 18 out. 2022.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. **Princípios de física**. vol. 3. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**: eletricidade e magnetismo, óptica. vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

KNIGHT, R. D. **Física 3** [recurso eletrônico]: uma abordagem estratégica. Tradução Manuel Almeida Andrade Neto. 2. ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2009.