

# MÁQUINAS ELÉTRICAS I

Larissa de Matos Guedes  
Pedro Augusto do Nascimento  
Thiago Moreira Brito

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS

# MÁQUINAS ELÉTRICAS I

Larissa de Matos Guedes  
Pedro Augusto do Nascimento  
Thiago Moreira Brito

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS



## **Autores**

### **Larissa de Matos Guedes**

Possui Curso Técnico Profissionalizante em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás (1997). Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2004), graduação em Programa de Formação de Professores pela Universidade Católica de Brasília (2008), mestrado (2006) e doutorado (2013) em Engenharia Elétrica, ambos, pela Universidade de Brasília. Atualmente é professora da Secretaria de Educação do Distrito Federal. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência.

### **Pedro Augusto do Nascimento**

Nasceu em 1984 em Goiânia, Goiás. cursou Licenciatura em Física pela Universidade Católica de Brasília (2008), atuou como professor de física em escolas de Ensino Médio e cursos pré-vestibulares no Distrito Federal e em Minas Gerais até 2012. Durante esse período, também, trabalhou como professor de laboratório. Atualmente é professor no curso de Eletrotécnica na Escola Técnica de Brasília.

### **Thiago Moreira Brito**

Nasceu em 1979 em Goiânia, Goiás. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2003). É especialista em Docência Superior pela Universidade Gama Filho. Atualmente é professor titular do Centro Universitário Euro Americana e professor formador na Rede e-Tec Brasil do MEC.

### **Design Instrucional**

NT Editora

### **Projeto Gráfico**

NT Editora

### **Revisão**

Bruna Vasconcelos

### **Capa**

NT Editora

### **Editoração Eletrônica**

NT Editora

### **Ilustração**

Marcelo Moraes

Daniel Motta

### **NT Editora, uma empresa do Grupo NT**

SCS Quadra 2 – Bl. C – 4º andar – Ed. Cedro II

CEP 70.302-914 – Brasília – DF

Fone: (61) 3421-9200

sac@grupont.com.br

www.nteditora.com.br e www.grupont.com.br

Guedes, Larissa de Matos; Nascimento, Pedro Augusto do; Brito, Thiago Moreira.

Máquinas elétricas I / Larissa de Matos Guedes; Pedro Augusto do Nascimento; Thiago Moreira Brito. – 1. ed. – Brasília: NT Editora, 2015.

152 p. il. ; 21,0 X 29,7 cm.

ISBN 978-85-8416-076-1

1. Máquinas elétricas. 2. Transformadores.

I. Título

Copyright © 2015 por NT Editora.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer modo ou meio, seja eletrônico, fotográfico, mecânico ou outros, sem autorização prévia e escrita da NT Editora.

## ÍCONES

Prezado(a) aluno(a),

Ao longo dos seus estudos, você encontrará alguns ícones na coluna lateral do material didático. A presença desses ícones o(a) ajudará a compreender melhor o conteúdo abordado e também como fazer os exercícios propostos. Conheça os ícones logo abaixo:



### **Saiba Mais**

Este ícone apontará para informações complementares sobre o assunto que você está estudando. Serão curiosidades, temas afins ou exemplos do cotidiano que o ajudarão a fixar o conteúdo estudado.



### **Importante**

O conteúdo indicado com este ícone tem bastante importância para seus estudos. Leia com atenção e, tendo dúvida, pergunte ao seu tutor.



### **Dicas**

Este ícone apresenta dicas de estudo.



### **Exercícios**

Toda vez que você vir o ícone de exercícios, responda às questões propostas.



### **Exercícios**

Ao final das lições, você deverá responder aos exercícios no seu livro.

**Bons estudos!**

## Sumário

<b>1. REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO.....</b>	<b>7</b>
1.1 Campo magnético .....	8
1.2 Corrente elétrica e campos magnéticos .....	11
1.3 Eletroímãs .....	16
1.4 Forças magnéticas .....	20
1.5 Relés .....	28
<b>2. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....</b>	<b>34</b>
2.1 Propriedades magnéticas dos materiais.....	34
2.2 Fenômeno da indução .....	38
2.3 Lei de Faraday .....	44
2.4 Correntes parasitas .....	47
2.5 Freios eletromagnéticos .....	49
<b>3. TRANSFORMADOR MONOFÁSICO .....</b>	<b>56</b>
3.1 Teoria de operação.....	57
3.2 Diagrama fasorial .....	68
3.3 Transformador de dois enrolamentos.....	72
3.4 Modelos de transformadores monofásicos .....	74
3.5 Símbolos .....	75
3.6 Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) .....	78
<b>4. ENTENDENDO OS TRANSFORMADORES.....</b>	<b>83</b>
4.1 Circuito equivalente .....	83
4.2 Parâmetros de testes em vazio .....	85
4.3 Rendimento.....	91
4.4 Autotransformador .....	93
4.5 Relação de potência em autotransformadores .....	97
<b>5. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO .....</b>	<b>106</b>
5.1 Tipos de conexão para transformadores monofásicos em sistemas trifásicos .....	108
5.2 Leitura de especificações.....	117
5.3 Marcações dos terminais e símbolos de ligação e deslocamento angular .....	120
5.4 Símbolos para ligações dos enrolamentos de fase e indicação do deslocamento angular .....	123
<b>6. ACESSÓRIOS DE TRANSFORMADORES .....</b>	<b>129</b>
6.1 Partes fundamentais dos transformadores.....	131
6.2 Tipos de transformador.....	143
<b>GLOSSÁRIO.....</b>	<b>150</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>152</b>

Seja bem-vindo (a) ao curso **Máquinas Elétricas 1!**

Uma das máquinas elétricas mais presente no cotidiano do eletrotécnico é o transformador. Por serem controladores de tensão, os transformadores estão sempre presentes direta ou indiretamente nos circuitos elétricos industriais e residenciais.

Neste curso, você terá a oportunidade de conhecer o funcionamento dos transformadores, bem como seus tipos e partes. Esse conhecimento será muito importante, pois o eletrotécnico pode trabalhar na fabricação, instalação, escolha ou na manutenção desses equipamentos.

Vamos ter também a companhia do Nikola, um futuro eletrotécnico como você e, por isso, alguém que quer aprender muito sobre máquinas elétricas.

Não perca tempo! Aproveite esta oportunidade para aprender mais.

Bons estudos!

Os autores.



# 1. REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO

## Objetivos

Ao final desta lição, você deverá ser capaz de:

- Compreender as diversas grandezas envolvidas em fenômenos eletromagnéticos;
- Explicar o que são polos magnéticos, campo magnético e eletroímãs;
- Conhecer como atuam as forças magnéticas sobre partículas carregadas.

## Introdução

A origem da expressão magnetismo ocorreu por volta de 800 a.C. na Grécia Antiga, ao se observar uma pedra com poder de atrair objetos de ferro. Tal minério ficou conhecido como Magnetita por ser muito comum na região chamada **Magnésia**. O homem reparou que a **magnetita** é capaz de atrair ou repelir outras pedras semelhantes. Hoje sabemos que essas pedras são ímãs naturais, ou seja, contêm um óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Todo ímã tem dois **polos** distintos, denominados polos Norte e Sul. Você já ouviu falar na frase “os opostos se atraem”? Pois é, entre ímãs, os polos iguais se repelem e polos diferentes se atraem. Observe o diagrama de forças a seguir:

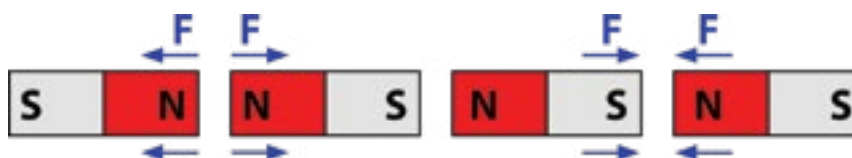


Figura 1.1 – Diagrama de atração e repulsão magnética.

Outra característica muito interessante dos ímãs é que não há monopolos magnéticos.

Mas o que são monopolos magnéticos?



**Magnésia:** é o nome de uma unidade regional da Grécia, localizada na região da Tessália. Sua capital é a cidade de Vólos.

**Magnetita:** a Magnetita é um mineral magnético formado pelos óxidos de ferro II e III ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cuja fórmula química é  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . O mineral apresenta forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica. É um mineral que se dissolve lentamente em ácido clorídrico.

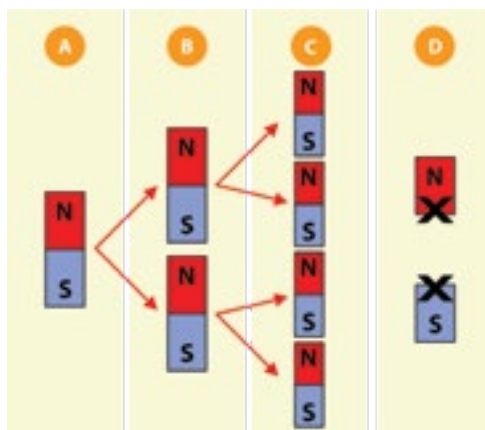
**Polos:** cada uma das extremidades do eixo de uma esfera.



Excelente pergunta, Nikola! Imagine que temos um ímã em nossas mãos e queremos investigar de onde vem o poder dele. Para isso vamos tentar separar os polos magnéticos (polo Norte do polo Sul) partindo o ímã ao meio (figura 1.2 – A).

Após dividirmos o ímã em dois pedaços, constatamos que não conseguimos separar os polos magnéticos. Cada pedaço se tornou um novo ímã com os dois polos – Norte e Sul. Então tentamos dividir um dos pedaços do ímã (figura 1.2 – B) em frações cada vez menores, mas sempre os resultados serão novos ímãs com polos Norte e Sul (figura 1.2 – C).

Figura 1.2 – Investigando os monopólios magnéticos.



Esse experimento foi realizado diversas vezes até chegarmos à estrutura atômica do ímã e com isso descobrimos que átomos e elétrons são pequenos ímãs, cada um com seus polos Norte e Sul. Como não conseguimos dividir um elétron ao meio, não é possível isolar apenas um polo magnético, isto é, não existe um polo magnético (monopolo magnético) separado (figura 1.2 – D).

## 1.1 Campo magnético



**Campo magnético:** é a região próxima a um ímã que influencia outros ímãs ou materiais ferromagnéticos e paramagnéticos, como cobalto e ferro.

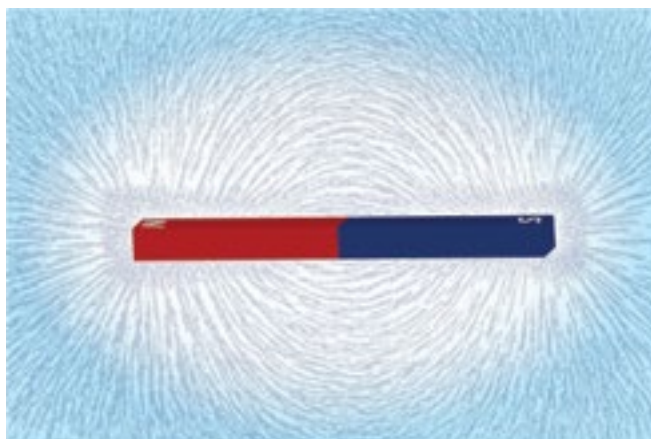
Eu entendi que os ímãs exercem, entre eles, forças de atração e repulsão. Mas como eles conseguem fazer isso sem estarem em contato?



Ótima observação, Nikola! Entre ímãs existe uma força denominada **Força Magnética**. A força elétrica está relacionada com um campo elétrico. Com a força magnética, não é diferente, ela também está relacionada com um campo, o campo magnético. Há um experimento muito útil para visualizar o **campo magnético** utilizando um ímã, uma prancheta e uma limalha de ferro.

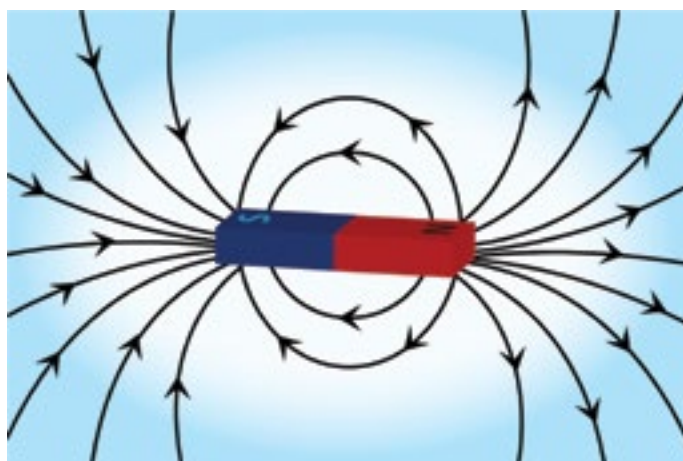
Os polos Norte e Sul de um ímã são emissores e receptores de campo magnético e essa troca é contínua e permanente. Ao jogarmos limalha sobre o ímã, as pequenas partículas de ferro vão interagir com o campo magnético, evidenciando essas linhas que saem de um polo para o outro, conforme visto na figura 1.3.

Figura 1.3 – Visualização do Campo magnético.



Chamamos essas linhas de **Linhas de Indução** ou **Linhas de Campo** (figura 1.4). E por motivos didáticos, definiremos que as linhas sempre saem do polo Norte e vão para o polo Sul. Porém, o real é que ambos os polos são emissores e receptores de linhas de campo magnético.

Figura 1.4 – Visualização das linhas de indução magnética.



#### Dica!

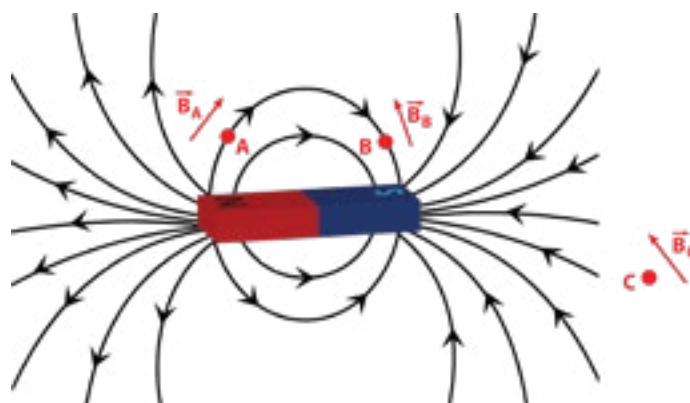
O desenho na figura 1.4 é uma representação das linhas de indução. A quantidade e extensão das linhas ficam a critério de quem desenha; não há problema em desenhá-las apenas uma ou duas, pois elas servem apenas para indicar a presença e a direção do campo magnético.



Mas é possível perceber que o ímã tem uma área de interação a sua volta e, quanto mais próximo do ímã, mais forte é o seu poder de atração ou repulsão com outros ímãs e com materiais ferromagnéticos. Essa área de interação é o **Campo Magnético**. É possível calcular ou medir o valor do campo magnético em um ponto específico do espaço.

Na figura 1.5, temos três pontos ao redor do ímã (A, B e C). Observe que em cada ponto é possível representar o campo magnético pontualmente; para isso utilizamos uma grandeza vetorial denominada **Vetor Campo Elétrico**, que tem módulo, direção e sentido bem definidos.

Figura 1.5 – Visualização do vetor campo magnético ( $\vec{B}$ ).



A unidade do SI para campo magnético é o tesla (T), em homenagem ao físico croata Nicolas Tesla. E representamos o vetor campo magnético por  $\vec{B}$ . Outra unidade para o vetor campo magnético é o **Gauss** (G). Essa unidade não está no SI (Sistema Internacional de Unidades).

$$1 T = 1 \frac{N}{C \frac{m}{s}} = 10^4 G$$



### Exercitando o conhecimento...

Quando um ímã permanente em forma de barra é partido ao meio, observa-se que:

- Conseguimos separar os polos magnéticos.
- As propriedades magnéticas desaparecem.
- Em cada uma das metades temos polo Norte e polo Sul.
- O número e o tipo dos polos, em cada metade, dependerá do material de que é feito o ímã.

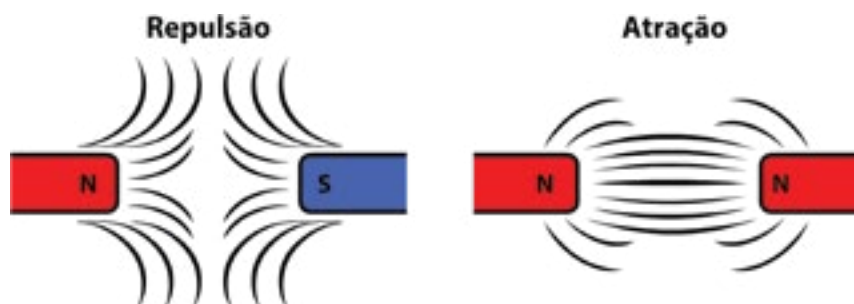
...

*Comentários:*

*As propriedades magnéticas estão relacionadas com a estrutura molecular dos materiais. E não conseguimos separar polos magnéticos, pois o próprio elétron é um pequeno ímã. Logo, se você pensou na alternativa C está correto.*

Observando as linhas de campo com limalha de ferro, fica fácil entendermos como os *ímãs* exercem, entre eles, forças de atração e repulsão mesmo não estando em contato (figura 1.6).

Figura 1.6 – Linhas de indução para repulsão e atração.



#### Saiba mais!

O planeta Terra é um *ímã* gigante. Vários instrumentos utilizam a Terra como referência graças às suas características magnéticas, como a bússola, um instrumento de orientação inventado pelos chineses e utilizado há milhares de anos. As bússolas mais simples são compostas de uma agulha magnetizada com livre movimento de rotação. Essa agulha, por estar livre, se alinhará com o campo magnético terrestre sempre que possível, mostrando para quem a utiliza o hemisfério geográfico Norte da Terra.

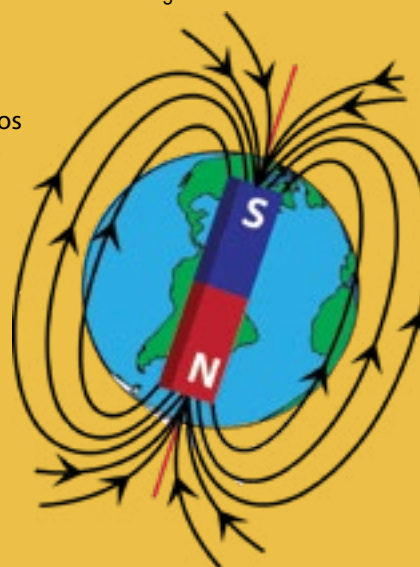


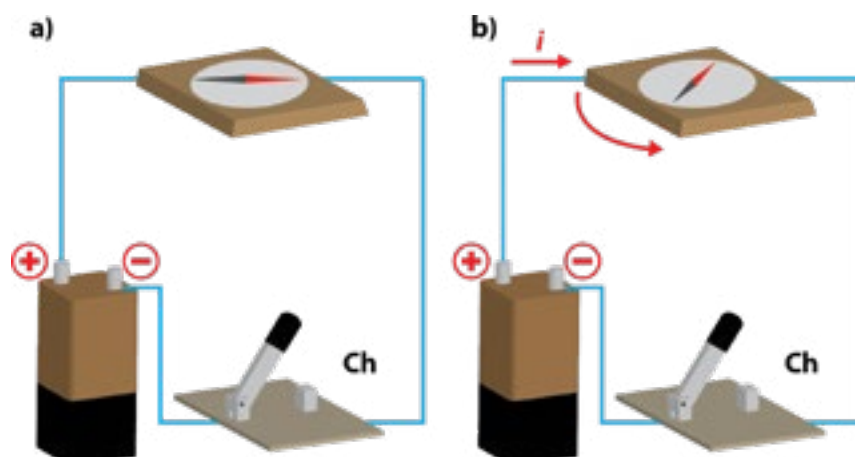
Figura 1.7 – Campo magnético terrestre.

## 1.2 Corrente elétrica e campos magnéticos

Até o século XVIII, os fenômenos elétricos e magnéticos eram estudados separadamente. Em 1820, o então secretário vitalício da Academia de Ciências de Copenhague, Hans Christian Oersted, publicou seu trabalho sobre a interação entre eletricidade e magnetismo. Oersted ficou mundialmente famoso por ter observado a **deflexão** de uma agulha imantada sofre o efeito de uma corrente elétrica. Através de experiências continuadas durante alguns dias, Oersted formulou a **Lei Fundamental do Eletromagnetismo**, em que o efeito magnético da corrente elétrica tem um movimento circular em torno dela. O fenômeno divulgado por Oersted marcou a descoberta do eletromagnetismo.

**Deflexão:** mudar de trajetória.

Figura 1.8 – Experimento de Oersted.



## Experimento de Oersted

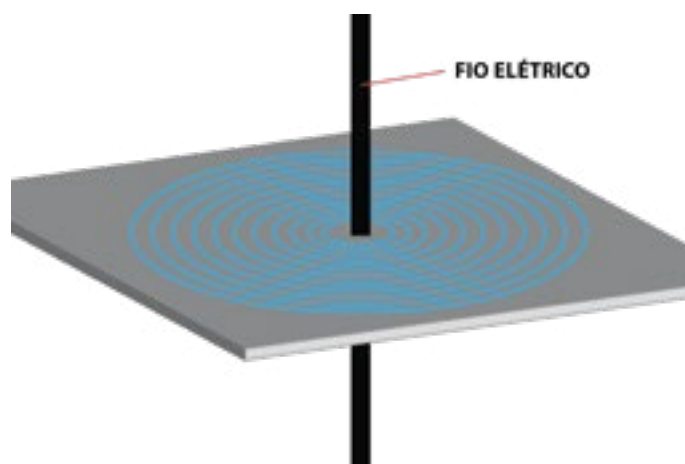


**Perpendicular:** forma geométrica onde uma reta forma um ângulo reto (90 graus) com outra reta.

- a) A chave está desligada e a bússola aponta normalmente para o Norte da Terra.
- b) Quando a chave é acionada e uma corrente elétrica se estabelece entre os polos da bateria, a bússola passa a apontar para uma direção **perpendicular** ao fio.

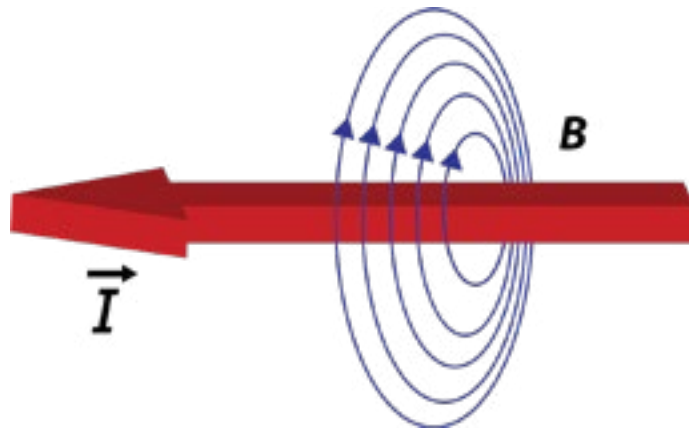
No experimento, Oersted demonstrou que a bússola sofre interferências se colocada próxima ao fio elétrico em funcionamento, isto é, além dos *ímãs*, correntes elétricas também geram campos magnéticos. Utilizando limalha de ferro, é possível mapear o campo em volta do fio e, assim, concluímos que cargas elétricas em movimento criam um campo magnético perpendicular e radial à direção de propagação. Isso é a Lei Fundamental do Eletromagnetismo: o efeito magnético da corrente elétrica tem um movimento circular em torno dela, ilustrado nas figuras 1.9 e 1.10.

Figura 1.9 – Linhas de campo em um fio elétrico.



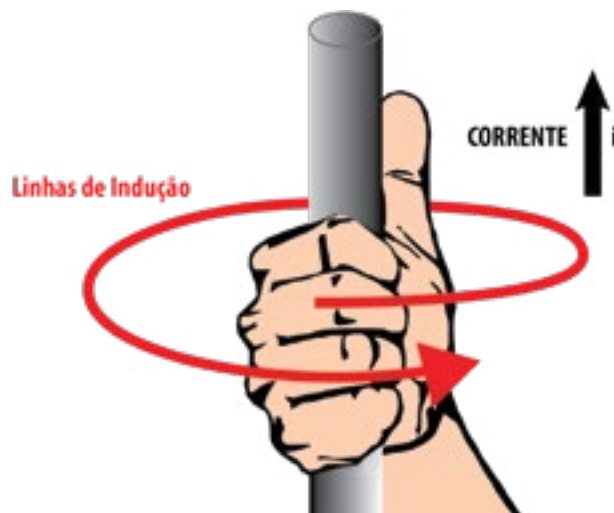
Visualização das linhas de indução em volta de um fio com corrente elétrica por meio de limas de ferro.

Figura 1.10 – Experimento de Oersted.



A lei fundamental do eletromagnetismo requer um cuidado fundamental com a geometria. O sentido do campo magnético dependerá do sentido da corrente e pode ser facilmente encontrado usando a regra da mão direita:

Figura 1.11 – Regra da mão direita.



Onde estiver apontando o sentido da corrente com o polegar, os demais dedos apontam o sentido do campo magnético. Mas cuidado, isso só vale para mão direita!



## Exercitando o conhecimento...

As bússolas, da figura 1.12-A, estão dispostas em volta de um fio elétrico O (desligado). Todas as bússolas apontam para o polo Norte terrestre. Quando uma corrente elétrica passa pelo fio condutor, no sentido do plano do papel para a vista do leitor, como ficarão as agulhas de cada bússola?

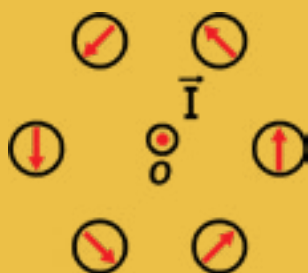
Indique na figura 1.12-B a posição correta de cada agulha.

Figura 1.12



...

Resposta:



Comentários:

*Elas irão se alinhar em sentido anti-horário, pois cargas elétricas em movimento criam um campo magnético perpendicular e radial à direção de propagação. E o sentido das setinhas foi encontrado com a regra da mão direita.*

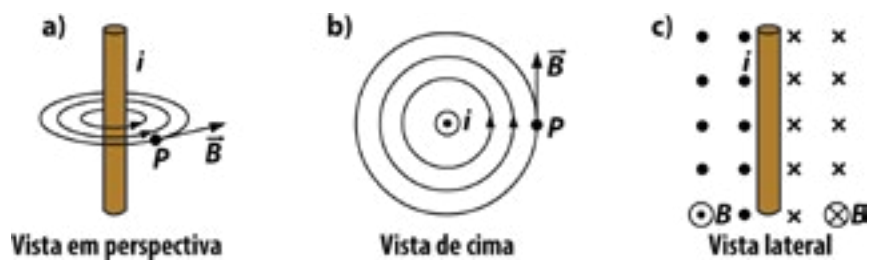
Então existe: campo magnético, linhas de campo ou linhas de indução e vetor campo magnético?



Perfeito! São três formas diferentes de tratarmos do mesmo fenômeno. E iremos usar as três para compreendermos as máquinas elétricas.

Veja a figura 1.13. Na vista em perspectiva (a) e de cima (b), temos as linhas de campo desenhadas e também está representado o vetor campo magnético  $\vec{B}$  em um ponto P. Na vista lateral, está representado apenas o vetor  $\vec{B} - O$ , "x" representa o vetor entrando no papel e os pontinhos representam o vetor saindo.

Figura 1.13 – Representação das linhas de campo e do vetor  $\vec{B}$ .



A partir dos trabalhos de Oersted, os estudos sobre eletromagnetismo se aprofundaram e diversas leis e fórmulas foram elaboradas. Descobrimos que o campo magnético está relacionado com o tamanho do ímã, a distância do ponto medido à fonte do campo, o meio em que o campo está imerso (permeabilidade do meio  $\mu$ ), o formato da fonte, entre outros. Existem várias fórmulas para se calcular o módulo do campo magnético. À medida que forem necessárias, as forneceremos nos capítulos subsequentes.

### Saiba mais!

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo. Ela é uma constante universal análoga à permissividade  $\epsilon_0$  do vácuo na Eletrostática e só depende do sistema de unidades adotado. No SI, ela vale:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$$

### Exercitando o conhecimento...

A figura a seguir representa dois pontos, A e B, próximos de um condutor retilíneo muito extenso, percorrido por uma corrente elétrica contínua  $i$  cujo sentido está indicado na figura.

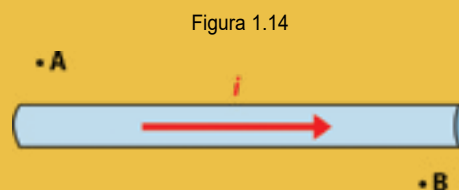
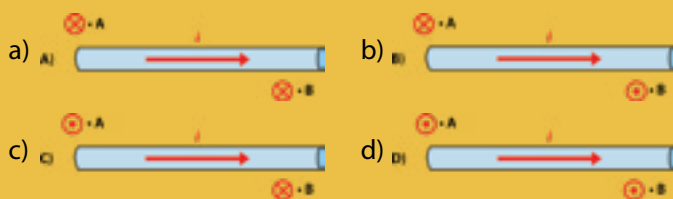


Figura 1.14



Como são os vetores campo magnéticos para os pontos A e B?



...

Resposta: letra B.

Comentários:

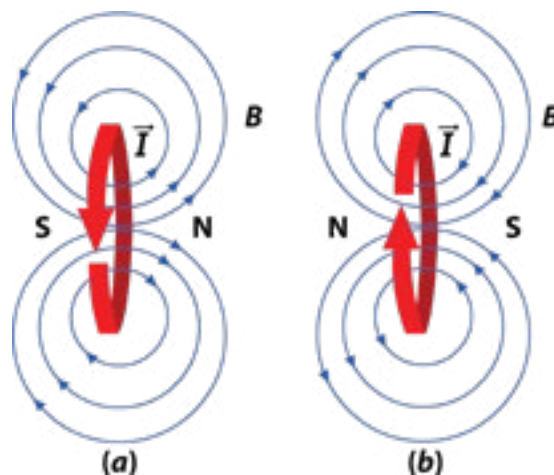
Se você marcou a letra B, muito bem, já está dominando a regra da mão direita. Realizar exercícios da regra da mão direita é muito importante para se compreender melhor algumas máquinas elétricas. Vamos em frente!

### 1.3 Eletroímãs



Observando a figura 1.9, visualizei como é o campo magnético em volta de um fio condutor; contudo, como seria esse campo se enrolarmos esse fio?

Figura 1.15 – Campo Magnético ao redor de uma espira carregada.



Parabéns, Nikola! Vejo que você está muito interessada em nosso curso. Bem, quando enrolamos um fio criamos um arco ou um laço chamado espira. O campo magnético ao redor de uma espira carregada é assim (figura 1.15):

Veja a configuração do campo magnético para diferentes sentidos de rotação da corrente elétrica dentro em uma espira, onde  $\vec{I}$  é a corrente elétrica,  $B$  são as linhas de indução e  $N$  e  $S$  os polos Norte e Sul. Isto ocorre devido à configuração do campo.

O sentido do campo magnético está intimamente ligado com o sentido da corrente elétrica, tanto que se invertermos o sentido da corrente, o campo magnético também inverte o seu sentido.

Eu percebi na figura 1.15 que quando a corrente elétrica muda de sentido (a para b) os polos magnéticos também se invertem. Que legal!



Isso mesmo! Podemos até afirmar que as duas espirais estão se repelindo, pois as correntes elétricas criaram polos magnéticos em cada uma delas, e como já vimos, polos iguais se repelem, no caso Norte com Norte.

O módulo do vetor campo elétrico no centro da espira pode ser encontrado pela fórmula:

### Campo magnético para uma Espira

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Constante =  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$

Campo Magnético tesla

Corrente elétrica ampere

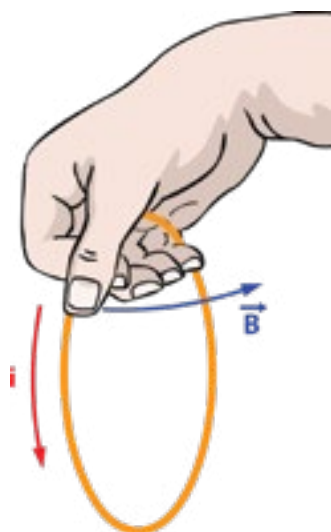
Raio da espira metro

Sendo:

- $I$  a corrente elétrica;
- $B$  o campo magnético;
- $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo (uma constante);
- $R$  o raio da espira.

Para encontrar a orientação do campo magnético, temos que usar o recurso da regra da mão direita novamente (figura 1.16).

Figura 1.16 – Campo Magnético ao redor de uma espira carregada.



**Solenóide:**  
vide bobina.

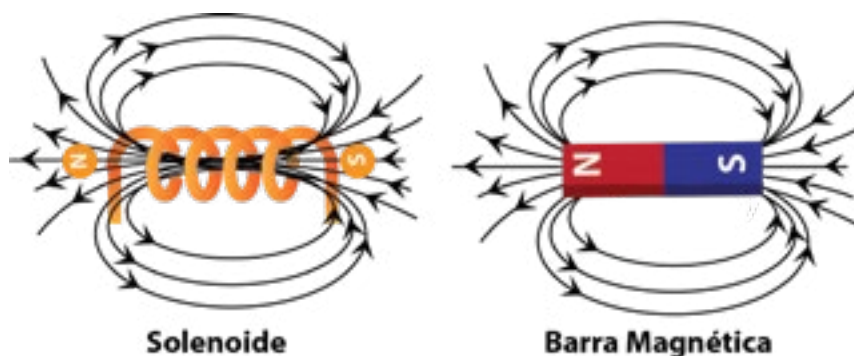
**Bobina:**  
bobinas, enro-  
lamento ou  
solenóide são  
basicamente  
compostos  
por espiras de  
fio elétricos  
enroladas  
em forma de  
mola sobre  
um núcleo  
cerâmico,  
metálico ou  
mesmo sem  
um núcleo  
(chamado de  
núcleo de ar).

**Helicóide:**  
circular,  
encaracolado,  
curvo, espiral,  
espiralado,  
cocleado,  
coclear,  
cocleiforme,  
espiráleo,  
espirálico,  
espiroide.

Ao apontarmos o sentido da corrente com o polegar, os demais dedos apontarão o sentido do campo magnético. E de novo: isso só vale para mão direita, o recurso da mão direita é apenas uma das formas de simplificar a geometria desse princípio físico, outros livros adotam outras regras, como a regra da mão esquerda. Contudo, o resultado tem de ser o mesmo.

Agrupando várias espiras teremos um **solenóide**, também chamado de **bobina** ou mola. Que irá se comportar exatamente como um *ímã* em barra. Porém, com uma vantagem, podemos desligar o *ímã* a qualquer momento (figura 1.17).

Figura 1.17 – Campo magnético em um solenóide.



Um solenóide é um fio enrolado de forma **helicóide**, com voltas muito próximas umas das outras. O campo de um solenóide é o mesmo de um conjunto de N espiras colocadas uma ao lado da outra.

$$B = N \cdot \frac{\mu_0 I}{2R}$$

## Campo magnético para um solenoide

O campo magnético formado no interior de um solenoide é muito utilizado na indústria e na ciência, pois tem suas linhas de campo aproximadamente paralelas. O campo é uniforme e forte; o campo na parte externa é idêntico ao campo de uma barra imantada.

### Exercitando o conhecimento...

**Questão 01** – Uma espira circular de raio 10 cm, é percorrida por uma corrente de intensidade 4 A.

Considerando  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ , as características do vetor indução magnética no centro da espira são:

- a)  $8,0\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$ ;  $\otimes$ .
- b)  $8,0\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$ ;  $\odot$ .
- c)  $1,2\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$ ;  $\otimes$ .
- d)  $0,5\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$ ;  $\odot$ .

**Questão 02** – Uma bobina chata com 5 voltas e 10 cm de raio é percorrida por uma corrente elétrica com intensidade de 0,5 A. Qual o campo magnético no seu interior?

Considerando  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ .

---



---



---



---

...

Comentários:

1) Se você encontrou como resposta b)  $8,0\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$ ;  $\odot$ , excelente. Chegamos a esse resultado, pois temos:

$$R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$N = 1$$

$$i = 4 \text{ A}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$$

$$B = N \cdot \frac{\mu_0 I}{2R} \rightarrow B = 1 \times \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 4}{2 \times 0,1} \rightarrow B = 8,0\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

E pela regra da mão direita constatamos o sentido do campo magnético, ele está saindo da folha, por isso:  $\odot$

Figura 1.18

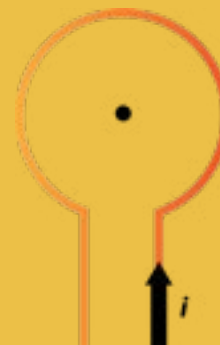
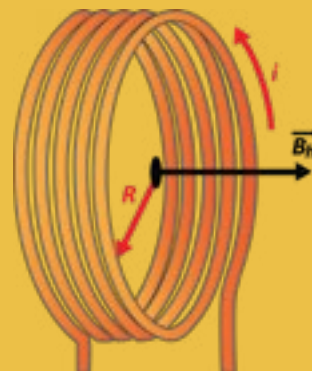


Figura 1.19



2) E para o segundo exercício um campo magnético de aproximadamente  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{T}$ , pois se temos:

$$R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$N = 1$$

$$I = 4 \text{ A}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

$$B = N \cdot \frac{\mu_0 I}{2R} \rightarrow B = 1 \times \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 4}{2 \times 0,1} \rightarrow B = 8,0\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

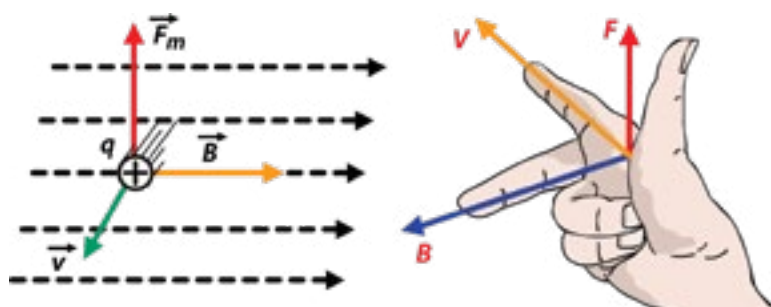
### Importante!

Esse conhecimento de magnitude do campo magnético no interior de uma bobina é muito importante para o eletrotécnico compreender o funcionamento de uma máquina elétrica. Para cada tipo e espira pode haver uma fórmula diferente. Não se preocupe em gravar as fórmulas e sim em saber utilizá-las.

## 1.4 Forças magnéticas

Vimos em tópicos anteriores que uma carga elétrica em movimento gera um campo magnético. Se essa carga penetra em uma região onde já existe um campo magnético, os dois campos vão interagir (o campo que a carga gerou e outro campo que chamamos de externo, que ela penetrou). O resultado é que sobre a carga surgirá uma força magnética. Mas a força magnética tem um arranjo geométrico bem diferente das outras forças, tanto que a regra da mão direita é um truque que simplifica a visualização desse arranjo da força magnética.

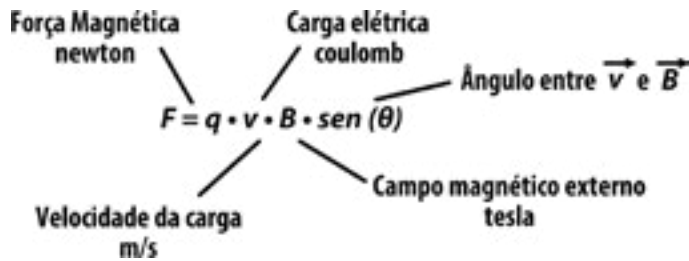
Figura 1.20 – Arranjo tridimensional da força magnética e regra da mão direita.



### Dica!

Normalmente, representamos apenas o campo magnético externo. Não representamos o gerado pela carga para evitar confusões.

A regra da mão direita ajuda-nos a encontrar a orientação (direção e sentido) da força magnética. A força magnética ( $F$ ) dependerá do módulo da carga elétrica ( $q$ ), da velocidade da carga ( $v$ ), do módulo do campo externo ( $B$ ) e do ângulo entre a trajetória da carga e o campo externo ( $\theta$ ).



$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}(\theta)$$

Eu me lembro dessa fórmula. Na escola usávamos uma frase para decorá-la: "Feliz Quem Vê Bem sem Óculos".



Ótima dica! Contudo, não é comum tratarmos da velocidade das cargas elétricas. Nenhum eletrotécnico se ocupa em tentar descobrir com que velocidade as cargas viajam dentro do fio condutor, pois isto é algo muito rápido, tanto que consideramos como um fenômeno instantâneo, isto é, ao ligarmos um interruptor de uma luminária, a lâmpada se acende imediatamente. Por isso, podemos adaptar a fórmula da força magnética para as grandezas que normalmente trabalhamos.

Veja:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\text{espaço percorrido pela carga}}{\text{tempo gasto}}$$

$$qv = \frac{q \Delta S}{\Delta T}$$

Se o espaço percorrido pela carga é o comprimento "l" do fio e  $q/\Delta T = i$ , temos:

$$q \frac{\Delta S}{\Delta T} = \frac{q}{\Delta T} \Delta S = i \cdot l, \text{ ou seja,}$$



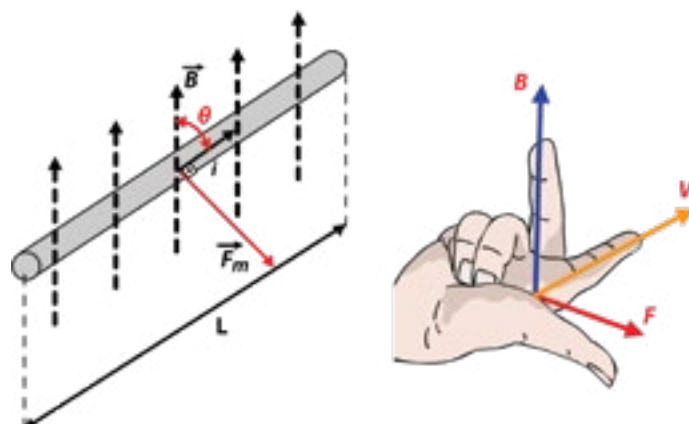
$$F = l \cdot i \cdot B \cdot \text{sen}(\theta)$$

Então quer dizer que na primeira uso carga e velocidade e na segunda uso comprimento do fio condutor e a corrente? Interessante!



Muito bem, Nikola. E a regra da mão direita se aplica às duas versões da fórmula. O dedo indicador que representa a velocidade para a primeira fórmula irá representar o sentido da corrente elétrica na segunda (figura 1.21).

Figura 1.21 – Regra da mão direita sobre um fio elétrico condutor.





## Exercitando o conhecimento...

Um fio condutor reto, de comprimento  $L = 0,5 \text{ m}$ , está ligado em um circuito de corrente contínua e passa por ele uma corrente elétrica de intensidade  $i = 4,0 \text{ A}$ . O condutor está em um local onde há um campo magnético, externo, uniforme de intensidade  $B = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$  e forma com a direção do campo um ângulo de  $90^\circ$  de acordo com a figura a seguir.

Figura 1.22 – Fio condutor percorrido por uma corrente  $\vec{I}$ .



Sabemos que é simples o cálculo do módulo da força magnética sobre o fio.

$$F = l i B \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$F = 0,5 \times 4,0 \times 2,5 \cdot 10^{-3} \times \text{sen}(90^\circ)$$

$$\text{Ou seja, } F = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Baseado nessas orientações faça o que se pede a seguir:

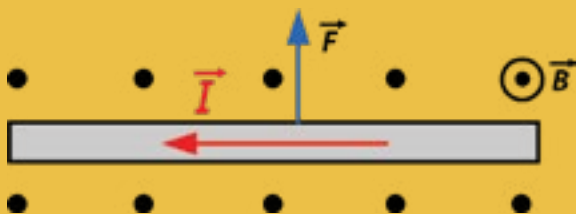
- Indique a orientação (direção e sentido) da força.
- Qual seria o módulo da força magnética se o ângulo entre o fio e o campo magnético externo fosse de  $30^\circ$ ?

Dado:  $\text{sen } 30^\circ = 0,5$ .

...

Comentários:

Na alternativa a, a força magnética apontará para cima:



Pois aplicando a regra da mão direita chegamos a esse resultado. Conhecer a orientação da força magnética sobre um fio condutor, irá nos auxiliar a prever vários problemas dentro de uma máquina elétrica.



A força magnética que a letra b pergunta, tem módulo igual a  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ . Pois se:

$$L = 0,5 \text{ m}$$

$$i = 4,0 \text{ A}$$

$$B = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$\theta = 30^\circ \rightarrow \text{sen}(30^\circ) = 0,5$$

Temos:

$$F = \int B \cdot \text{sen}(\theta) \rightarrow F = 0,5 \times 4,0 \times 2,5 \cdot 10^{-3} \times 0,5 \rightarrow F = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Outro fator muito importante é o ângulo entre o condutor elétrico e o campo magnético externo. Observe que apesar da variação do ângulo ser de apenas  $30^\circ$ , a força se alterou em 50%.

Esse tema é muito interessante, mas qual seria um exemplo de aplicação nas máquinas elétricas?

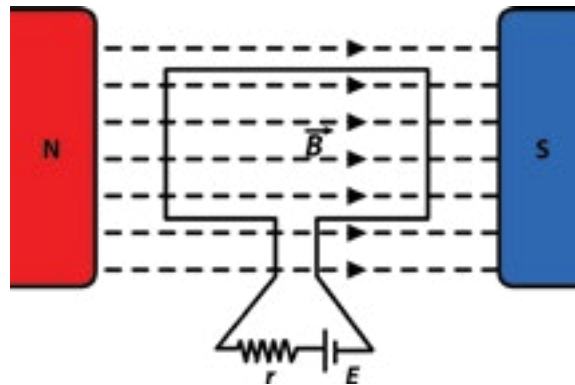


Vamos com calma, Nikola. Esse conteúdo é o primeiro passo para entendermos algumas máquinas elétricas, como, por exemplo, os motores elétricos. Para ilustrar sua aplicação, vamos resolver um exercício juntos?

Exemplo:

Uma espira retangular (de  $1,5\text{m} \times 1,0\text{m}$ ) está ligada em um circuito de corrente contínua e posicionada entre dois ímãs (figura 1.23):

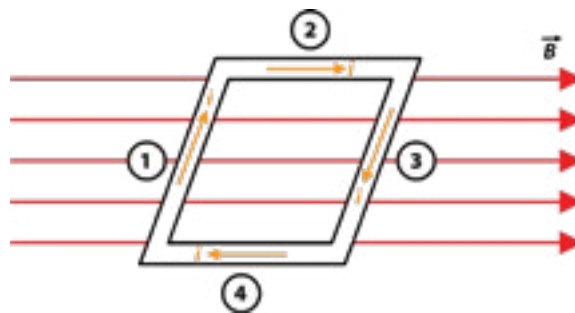
Figura 1.23 – Circuito com espira retangular.



Se o campo magnético entre os *ímãs* é constante e tem intensidade de 3,0 T e pelo circuito percorre uma corrente elétrica de 2,0 A, qual o módulo e a orientação da força magnética para cada uma das extremidades da espira?

Na figura 1.24, temos a vista simplificada da espira retangular: aqui estão enumerados os lados da espira, pois cada lado faz um ângulo diferente com o campo magnético.

Figura 1.24 – Vista simplificada da Espira retangular imersa no campo magnético.



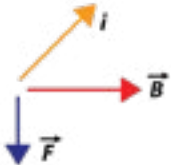

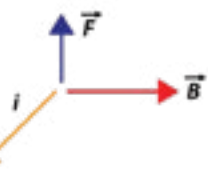
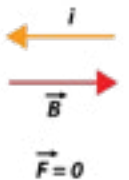
Vamos calcular a força magnética em cada um dos lados.

Dados:

$$I = 2,0 \text{ A} \quad B = 3,0 \text{ T} \quad l_1 = l_3 = 1,0 \text{ m} \quad l_2 = l_4 = 1,5 \text{ m}.$$

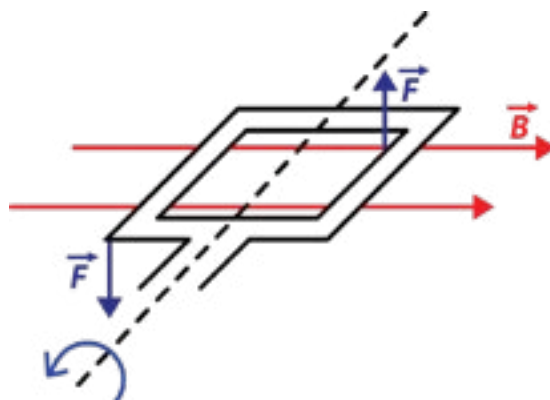
Tabela – seno:

$\theta$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
<i>Seno</i>	0	0,50	0,71	0,87	1,00

<p>①</p> 	$F = \int i B \cdot \text{sen}(\theta)$ $F = 1,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ A} \times 3,0 \text{ T} \text{ sen}(90^\circ)$ $F = 6,0 \text{ N}$
<p>②</p> 	$F = \int i B \cdot \text{sen}(\theta)$ $F = 1,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ A} \times 3,0 \text{ T} \text{ sen}(0^\circ)$ $\text{sen}(0^\circ) = 0$ $F = 0 \text{ N}$
<p>③</p> 	$F = \int i B \cdot \text{sen}(\theta)$ $F = 1,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ A} \times 3,0 \text{ T} \text{ sen}(90^\circ)$ $F = 6,0 \text{ N}$
<p>④</p> 	$F = \int i B \cdot \text{sen}(\theta)$ $F = 1,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ A} \times 3,0 \text{ T} \text{ sen}(180^\circ)$ $\text{sen}(180^\circ) = 0$ $F = 6,0 \text{ N}$

Nas extremidades 2 e 4, não há força magnética, pois a corrente está paralela ao campo magnético externo. Mas nas extremidades 1 e 3, as forças têm módulos iguais à 6,0 N, e sentidos opostos, uma aponta para cima e a outra para baixo. O resultado dessas forças é uma tendência de rotação da espira (figura 1.25).

Figura 1.25 – Tendência de rotação da espira.



Entendi, as forças que atuam nos lados 1 e 3 vão forçar a espira e se ela estiver livre, irá girar no sentido anti-horário. Acertei?

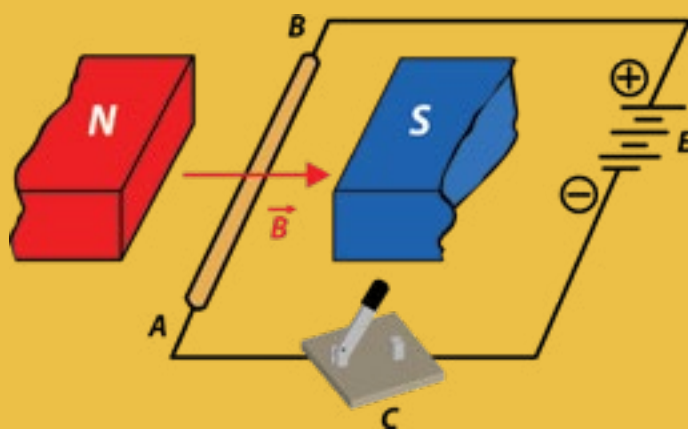


Exato! Mas logo veremos isso detalhadamente.

### Exercitando o conhecimento...

Um condutor retilíneo AB está conectado a um circuito elétrico, conforme representado pela figura abaixo:

Figura 1.26 – Circuito elétrico.



Colocando-se esse condutor entre dois ímãs e fechando a chave C, o condutor AB:

- a) Será atraído pelo polo Norte.
- b) Será atraído pelo polo Sul.
- c) Irá se deslocar para cima.
- d) Irá se deslocar para baixo.
- e) Será atraído e repellido de forma alternada.

...

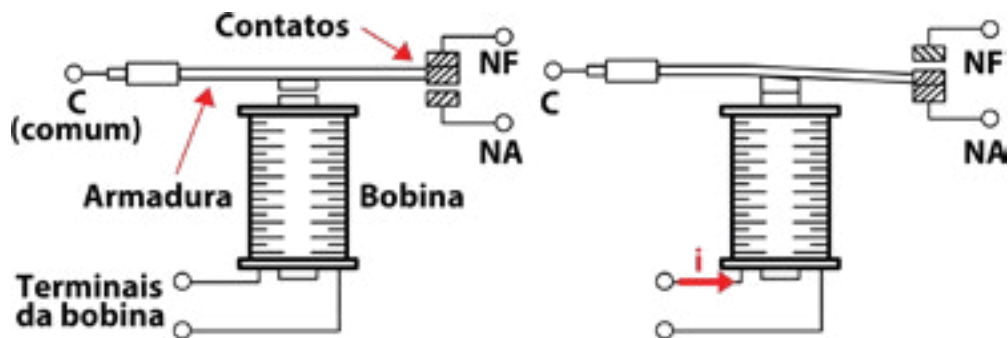
*Comentários:*

*Aplicando a regra da mão direita, teremos uma situação semelhante ao que ocorre na lateral direita da espira na figura 1.25. Marcou a alternativa C? Muito bem! Como estamos vendo, são muitas situações que a regra da mão direita será útil ao nosso curso.*

## 1.5 Relés

O Relé ou relê é um ótimo exemplo de aplicação tecnológica do magnetismo. Trata-se de um interruptor eletromecânico que utiliza um eletroímã (bobina) para ligar ou desligar uma chave elétrica. A seguir temos o esquema de funcionamento de um relé simples (figura 1.27).

Figura 1.27 – Esquema de funcionamento de um relé.



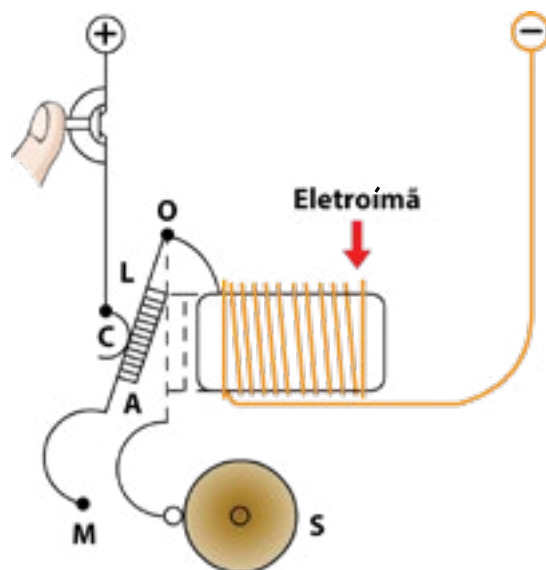
Na configuração apresentada na figura 1.27, a bobina inicialmente está desmagnetizada. Quando passa por ela uma corrente elétrica, magnetiza-se e atrai a armadura. O contato inicial está em NF e, após a magnetização, passa para NA.

O relé pode ser configurado para ligar ou desligar um circuito. Denominamos essas configurações de normalmente fechada (NF) ou normalmente aberta (NA).

Utilizamos relés desde 1937, quando o telégrafo foi inventado pelo americano Samuel Morse. Contudo, os relés foram modernizados com o tempo, primeiro utilizando eletrônica, e atualmente com a microcomputação. Eles desenvolvem basicamente a função de controle de chaveamento.

Como são interessantes os relés. Estou pensando em construir uma campainha utilizando o mesmo princípio do relé. Ao apertar o interruptor da campainha, fecha-se o contato elétrico de um circuito e uma bobina moverá uma sineta. Legal, não?





Muito bom, Nikola. De fato são infinitas as aplicações que podemos dar para esses conhecimentos.

### Exercitando o conhecimento...

Vamos aproveitar a ideia do Nikola e pensar em aplicação para os relés. Pense em pelo menos uma aplicação para um relé. Faça um esquema explicando como você pretende acionar a bobina e o que o relé irá acionar ou desligar. Se você não conseguir ter nenhuma ideia, procure em livros, revistas ou na internet e tente descrever uma aplicação para o relé.

---



---



---



---



---



---



...

#### Comentários:

*Relés são aplicados em: caixas d'água, poços artesianos, cisternas, bombas submersas, atraso na energização, supressão de ruídos, prevenção de sobrecarga no sistema de potência durante partidas de motores, mudança da ligação de motores de estrela para o triângulo, atraso na desenergização, para providenciar uma função de operação depois que a tensão de controle tenha sido removida e vários outros exemplos.*

Parabéns, você finalizou a primeira parte da revisão sobre eletromagnetismo. Os conhecimentos dessa lição serão muito importantes para o entendimento dos transformadores durante esse curso e para os motores elétricos no curso Máquinas Elétricas 2.

### Resumindo...

Vamos fazer uma revisão da nossa lição sobre eletromagnetismo? Você viu quais são as grandezas físicas necessárias para o domínio das máquinas elétricas. E revisou os tópicos: polos magnéticos, campo magnético, campo magnético de corrente elétrica e forças magnéticas sobre partículas carregadas.

Veja se você se sente apto a:

- Compreender diversas grandezas envolvidas em fenômenos eletromagnéticos;
- Explicar o que são polos magnéticos, campo magnético e eletroímãs;
- Demonstrar como atuam as forças magnéticas sobre partículas carregadas.

Na próxima lição, aprenderemos sobre indução eletromagnética. Até breve!



Parabéns,  
você finalizou  
esta lição!

Agora  
responda  
às questões  
ao lado.

### Exercícios

**Questão 01** – Uma barra imantada B, apoiada numa superfície perfeitamente horizontal, é colocada próxima a duas barras, uma de ferro (C) e outra de prata (A), nas posições indicadas na figura a seguir. Sabendo que o ferro é uma substância ferromagnética e a prata diamagnética, assinale a alternativa correta.

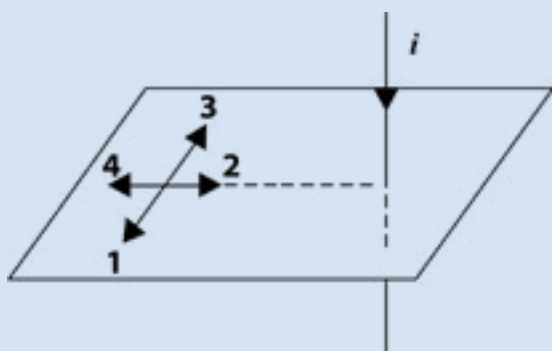
- A barra C será fortemente atraída por B.
- A barra A será fortemente atraída por B.
- Ambas as barras serão fortemente atraídas por B.
- A barra A será fortemente repelida por B e a barra C será atraída por B.



**Questão 02** – Um ímã é partido em quatro partes iguais. A partir disso, obtêm-se:

- a) Quatro pedaços de ímã, sendo dois polos Norte e dois polos Sul.
- b) Dois ímãs inteiros e dois pedaços de ímãs, sendo um polo Norte e um polo Sul.
- c) Ímãs inteiros e pedaços de ímãs, dependendo de como o ímã original foi dividido.
- d) Quatro ímãs completos.

**Questão 03** – Um fio longo retilíneo vertical é percorrido por uma corrente  $i$  para baixo. Em um ponto  $P$  situado em um plano perpendicular ao fio, o vetor que representa a direção e o sentido do campo magnético criado pela corrente é:



- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4

**Questão 04** – São materiais ferromagnéticos:

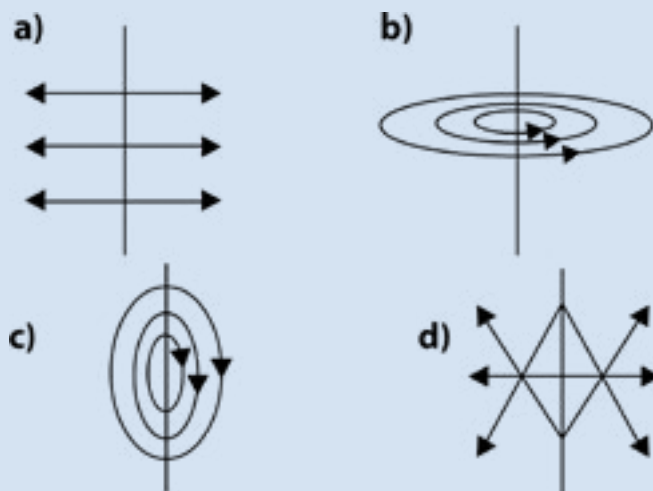
- a) Os que são ligeiramente atraídos pelos ímãs e não podem ser magnetizados.
- b) Os que não são atraídos pelos ímãs e não podem ser magnetizados.
- c) Os que não são atraídos pelos ímãs e podem ser magnetizados.
- d) Os que são atraídos pelos ímãs e podem ser magnetizados.

**Questão 05** – Assinale a opção que corresponda à afirmativa correta:

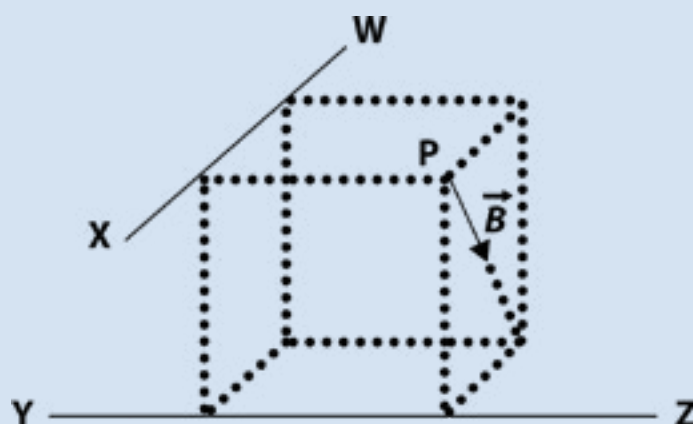
- a) As linhas de um campo elétrico podem passar duas ou mais vezes no mesmo ponto.
- b) As linhas de um campo magnético só podem cruzar-se no polo Norte magnético.
- c) Em um campo magnético, todas as linhas de campo podem cruzar-se.
- d) A unidade do SI para campo magnético é o tesla (T), em homenagem ao físico croata Nicolas Tesla.



**Questão 06** – Um fio metálico, retilíneo e infinito, é carregado com uma determinada carga. Qual das figuras abaixo poderia representar as linhas de força do campo magnético produzido pelo fio?



**Questão 07** – Dois fios condutores WX e YZ, retos e longos, estão dispostos sobre duas arestas de um cubo imaginário, como mostra a figura.



Correntes elétricas iguais estão presentes nos dois fios. O campo magnético resultante de tais correntes, no ponto P, é indicado na figura. Nessas condições, as correntes elétricas nos fios têm os sentidos:

- a) De W para X e de Z para Y.
- b) De W para X e de Y para Z.
- c) De X para W e de Z para Y.
- d) de X para W e de Y para Z.

**Questão 08** – Analise cada uma das seguintes afirmações e indique se é verdadeira (V) ou falsa (F).

1. ( ) Sabe-se que existem dois tipos de polos magnéticos, mas não se conhece a existência de monopolos magnéticos.
2. ( ) Um ímã pode ser magnetizado pelo atrito com um pano, como se faz para eletrizar um corpo.
3. ( ) Um ímã permanente pode ser “descarregado” de seu magnetismo por um leve toque com a mão, assim como se descarrega um corpo eletrizado de sua carga elétrica.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta de indicações, de cima para baixo.

- a) V – V – V      b) V – V – F      c) V – F – F      d) F – F – V

**Questão 09** – Um fio retilíneo e longo, no plano da página, é percorrido por uma corrente elétrica constante, cujo sentido é de A para B.



A direção e o sentido do campo magnético produzido pela corrente elétrica estão mais bem representados pelos vetores indicados na figura:

- (A) A ————  $\begin{matrix} \odot \\ \otimes \end{matrix}$  ———— B
- (B) A ————  $\begin{matrix} \otimes \\ \odot \end{matrix}$  ———— B
- (C) A ————  $\begin{matrix} \otimes \\ \otimes \end{matrix}$  ———— B
- (D) A ————  $\begin{matrix} \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{matrix}$  ———— B
- (E) A ————  $\begin{matrix} \longleftarrow \\ \longrightarrow \end{matrix}$  ———— B

**Questão 10** – As espiras adjacentes de um solenoide no qual circula uma corrente elétrica:

Marque a alternativa correta.

- a) Repelem-se mutuamente.
- b) Atraem-se mutuamente.
- c) Não exercem nenhuma ação mútua.
- d) Possuem uma tensão induzida.