

# Circuitos Elétricos

(Teoria 1)

## Introdução

Essa **Teoria 1** vai abrir um novo mundo em seus conhecimentos — o mundo da **Eletricidade**. Ela lhe ensinará o que são **circuitos elétricos** e explicará os significados de **corrente elétrica**, **tensão elétrica** e **resistência elétrica**. Você também irá conhecendo, aos poucos, os tipos mais importantes de **componentes ou elementos** que participam dos circuitos elétricos. Após o entendimento dessa parte teórica, recomendamos que faça alguns exercícios relativos a esse assunto.

## Vamos estudar:

### Circuito de uma lanterna de mão

#### Corrente elétrica

#### Tensão elétrica

#### O sentido convencional da corrente elétrica

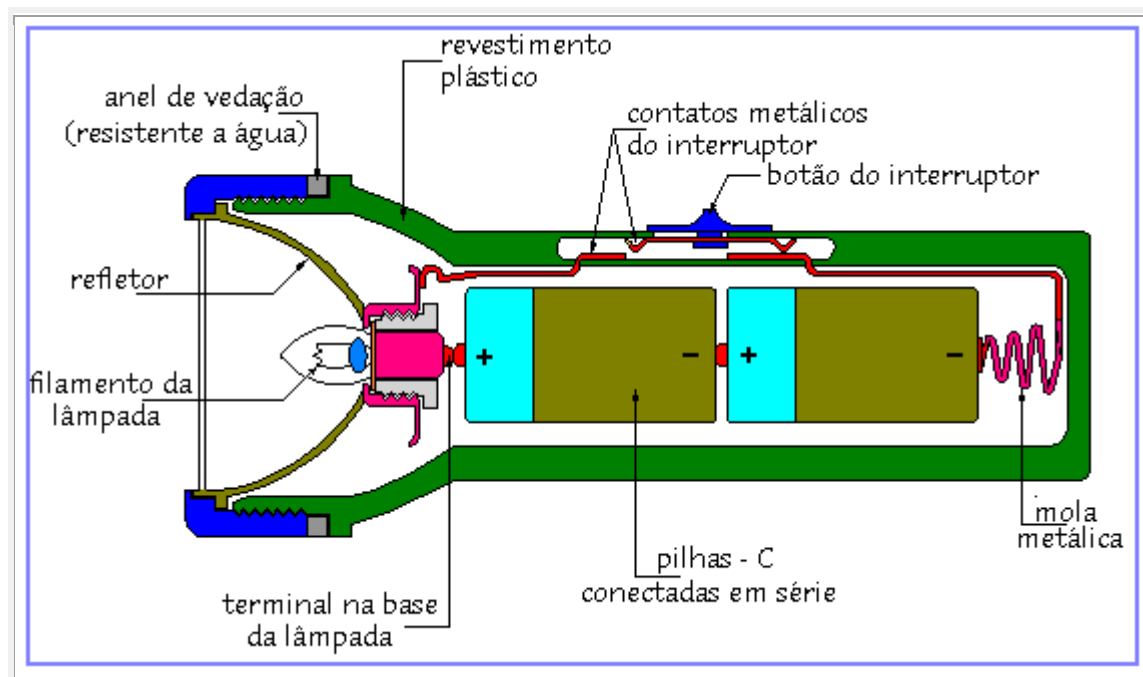
#### Resistência elétrica

#### A lei de Ohm

## 1. Circuito de uma lanterna de mão

☒ Você alguma vez já desmontou completamente uma lanterna de mão para analisar como ela funciona?

Veja na ilustração abaixo como são dispostas as várias partes de uma típica lanterna de mão:



**Estrutura de uma lanterna elétrica**

☒ Por que o projetista escolheu essa particular combinação de materiais?

As partes metálicas da lanterna são postas para **conduzir** a corrente elétrica quando a lanterna é posta para funcionar e, além disso, foram escolhidas para resistirem aos esforços físicos aos quais são submetidas.

A mola metálica, por exemplo, não só permite caminho elétrico para a corrente como também mantém no lugar, sob pressão, as pilhas em seu interior. As partes metálicas do interruptor têm que garantir bom contato elétrico e não ficarem danificadas pelo uso contínuo.

Uma lanterna também tem partes feitas com material **não condutor** de corrente elétrica, tais como plásticos e borrachas. A cobertura de plástico dessa lanterna é um **isolante elétrico**. Sua forma é importante para que se tenha um manuseio cômodo. Sua cor a tornará mais ou menos atraente aos olhos do usuário.

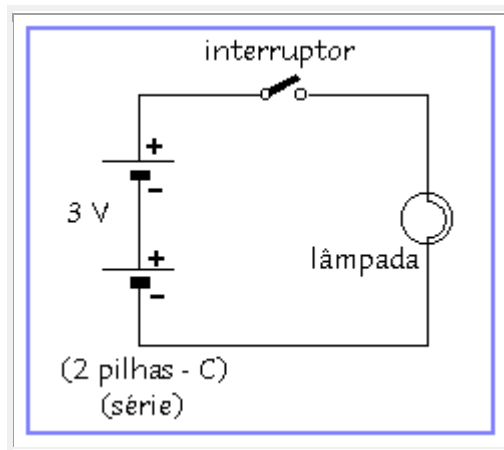
Como você verá, os circuitos elétricos conterão **sempre** partes que conduzem e partes que não conduzem correntes elétricas. **O segredo todo, nos circuitos elétricos, é delimitar um caminho pré planejado para a corrente.**

A lâmpada incandescente e o refletor compõem o sistema óptica da lanterna. A posição da lâmpada dentro do refletor deve ser tal que permita a obtenção de um feixe estreito de luz.

Uma lanterna é um produto elétrico simples, mas muita gente já perdeu noites de sono em seus projetos para que você tenha um dispositivo que trabalhe bem.

☒ Você pode pensar em alguma outra coisa que o projetista deva levar em consideração na produção em massa de lanternas?

Um modo "mais científico" para descrever uma lanterna implica no uso de um **diagrama de circuito**. Nele, as partes relevantes da lanterna serão representadas através de **símbolos**:



**Diagrama de circuito de uma lanterna elétrica**

Nesse circuito foram representadas simbolicamente, duas células voltaicas (pilhas) — formando uma **bateria** —, um interruptor e uma lâmpada incandescente. As linhas no diagrama representam condutores metálicos (fios) que conectam as partes entre si formando o circuito completo.

Um **circuito elétrico** é necessariamente um percurso fechado. Na lanterna, o fechamento do interruptor completa o circuito, permitindo a passagem da corrente elétrica.

Lanternas às vezes falham! Isso acontece quando as partes metálicas do interruptor ou da lâmpada não entram efetivamente em contato (devido à sujeira ou ferrugens), quando a lâmpada "queima" (interrupção em seu filamento) ou quando as pilhas "pifam" (esgotam suas energias químicas armazenadas, popularmente, ficam 'descarregadas'). Em qualquer um desses casos, o circuito estará incompleto.

## Voltar aos itens



## 2. Corrente elétrica

Uma **corrente elétrica** é um fluxo ordenado de partículas carregadas (partículas dotadas de carga elétrica). Em um fio de cobre, a corrente elétrica é formada por minúsculas partículas dotadas de carga elétrica negativa, denominadas elétrons -- eles são os **portadores** da carga elétrica.

No fio de cobre (ou de qualquer outro metal) os elétrons naturalmente lá existentes vagueiam desordenadamente (têm sentidos de movimentos aleatórios) até que, por alguma **ordem externa**, alguns deles passam a caminhar ordenadamente (todos no mesmo sentido) constituindo a corrente elétrica. A **intensidade** dessa corrente elétrica vai depender de **quantos** desses portadores, em movimento bem organizado passam, **por segundo**, por um região desse fio.

A corrente elétrica, num circuito, é representada pela letra **I** e sua intensidade poderá ser expressa em **ampères** (símbolo **A**), em **miliampères** (símbolo **mA**) ou outros submúltiplos tal qual o **microampères** (símbolo  $\mu\text{A}$ ).

**Um ampère** (1 A) é uma intensidade de corrente elétrica que indica a passagem de  $6,2 \times 10^{18}$  elétrons, a cada segundo, em qualquer seção do fio. Esses  $6,2 \times 10^{18}$  elétrons (uma quantidade que escapa ao nosso pensamento) transportam uma carga elétrica total cujo valor é de **um coulomb** (1 C). '**coulomb**' (símbolo C) é a unidade com que se medem as quantidades de cargas elétricas.

Se indicarmos a quantidade total de carga elétrica que passa pela seção de um fio por **Q** (medida em coulombs) e o intervalo de tempo que ela leva para passar por essa seção por  $\Delta t$  (medido em segundos), a intensidade de corrente elétrica **I** (medida em ampères) será calculada por:

$$I = Q : \Delta t$$

Conversões:

$$1 \text{ A} = 1\,000 \text{ mA} = 1\,000\,000 \mu\text{A} \Rightarrow 1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

$$1 \text{ mA} = 1/1\,000 \text{ A} = 1\,000 \mu\text{A} \Rightarrow 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} = 10^3 \mu\text{A}$$

$$1 \mu\text{A} = 1/1\,000\,000 \text{ A} = 1/1000 \text{ mA} \Rightarrow 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A} = 10^{-3} \text{ mA}$$

## Entendeu mesmo? ....

- O que uma "corrente elétrica" significa para você?
- Que unidade é usada para medir essas correntes? Quais os submúltiplos dela?
- Através de que materiais a corrente pode fluir facilmente?
- Cite alguns materiais que atrapalham ou mesmo impedem o fluxo de corrente elétrica através deles.

☒ O que é um circuito elétrico?

## Voltar aos itens

### Tensão elétrica

☒ No circuito da lanterna, o que provoca a circulação da corrente?

É algo produzido pelas células voltaicas (as pilhas). Esse algo, causa da corrente elétrica, é a **tensão elétrica** ou **diferença de potencial (d.d.p.)** que surge entre os terminais da pilha (pólo positivo e pólo negativo).

Vamos explicar isso um pouco mais, não podemos nos contentar com a introdução acima: o que uma pilha realmente faz, quando em funcionamento, é uma **conversão de energia**; ela converte energia química (que está armazenada nas substâncias químicas que estão dentro dela) em energia elétrica. **Quanto** de energia química é convertida em energia elétrica, e transferida **para cada coulomb** de carga elétrica que é movimentado dentro dela, é o que caracteriza a **tensão elétrica** nos terminais da pilha.

Essa grandeza é indicada pela letra **U** e é medida na unidade **volt** (símbolo **V**).

Assim, falar que a tensão **U** entre os terminais de uma pilha é de **1,5 V** significa dizer que ela fornece **1,5 J** de energia elétrica para cada **1,0 C** de carga que a atravessa.

Nota: **J** é o símbolo de **joule**, a unidade oficial de energia.

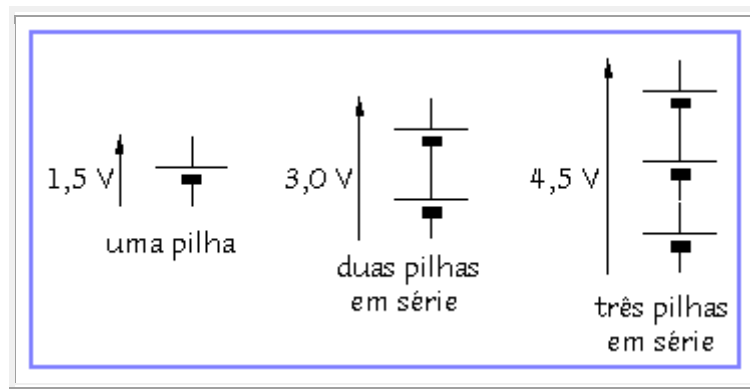
Do mesmo modo, falar que a tensão elétrica entre os terminais de uma bateria (associação conveniente de células voltaicas) é de **12 V**, significa dizer que: cada **1,0 C** de carga elétrica que passa por dentro dela e sai pelo pólo positivo, leva consigo **12 J** de energia elétrica. Claro, a energia química da bateria diminui de **12 J** e, com o uso contínuo ela irá "pifar", ficar sem energia. O termo popular para isso, lembra-se, é "descarregada".

Se indicarmos por **U** a tensão nos terminais da pilha (ou bateria etc.), por **Q** a quantidade de carga elétrica que a atravessa e por **E** a quantidade de energia que ela fornece para essa carga, teremos:

$$U = E : Q$$

Em nosso circuito da lanterna, quando as pilhas estão novas, a tensão fornecida por elas é total, a corrente elétrica circulante é intensa e a lâmpada brilha vivamente. Algum tempo depois, já com mais uso, a tensão fornecida por elas diminui, a intensidade de corrente no circuito diminui e a lâmpada brilha mais fracamente. Eventualmente não acenderá mais; as pilhas "pifaram"!

Cada célula voltaica provê cerca de 1,5 V de tensão entre seus terminais (pólos). Duas células conectadas uma em seguida à outra, em **série**, (pólo positivo de uma encostado no pólo negativo da outra) proverão cerca de 3,0 V. Três pilhas em série proverão cerca de 4,5 V etc.



### Símbolo da pilha e pilhas conectadas em série.

☒ Qual desses arranjos acima faria a lâmpada acender com maior brilho?

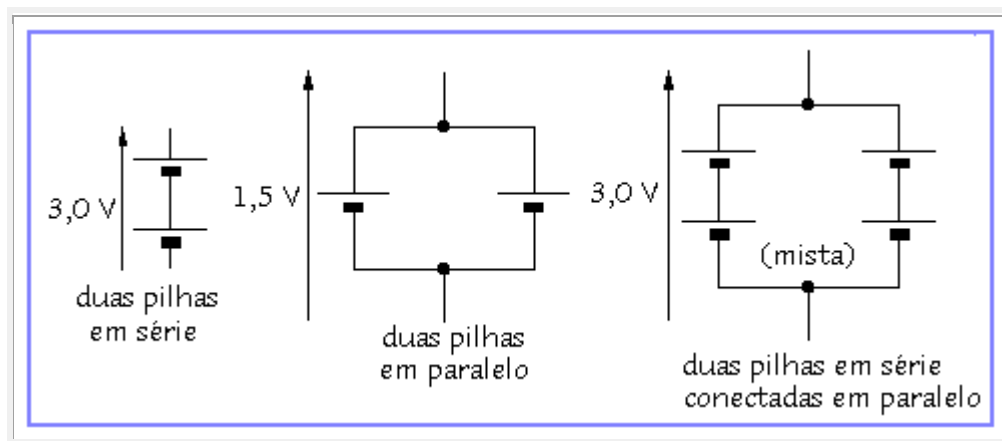
Lâmpadas incandescentes são projetadas para funcionarem com uma certa tensão particular (e alguma tolerância) mas, usando uma mesma lâmpada adequada, quanto maior a tensão maior será o seu brilho.

Nota: Há um código de cores nas pérolas das pequenas lâmpadas incandescentes. A "pérola" é aquela bolinha de vidro dentro da lâmpada que sustenta os fios que vão ao filamento.

☒ Você já reparou nisso? De que cor é a pérola da lâmpada em sua lanterna de duas pilhas (3 V)?

Como já salientamos, no sentido exato, uma **bateria** consiste no arranjo conveniente de duas ou mais células voltaicas. Esses arranjos (ou associações) podem ser em **série**, em **paralelo** ou **mista** (combinações adequadas de séries e paralelos).

Observe essas associações:



### Células associadas em série, paralelo e mista.

Uma célula individual pode prover uma **pequena** intensidade de corrente por **muito** tempo, ou uma **grande** intensidade por **pouco** tempo. Conectando-se as células em série aumentamos a tensão elétrica total disponível, mas isso não afeta o tempo de vida útil das células. Por outro lado, se as células (iguais) forem conectadas em paralelo, a tensão não fica afetada, continua os mesmos 1.5 V, mas o tempo de vida da bateria é dobrado.

Uma lâmpada de lanterna percorrida por corrente de intensidade 300 mA (usando pilhas tipo C, alcalinas) deveria funcionar por cerca de 20 horas antes das pilhas esgotarem-se. Isso traduz, de certo modo, o quanto de energia química está armazenada na pilha e quanto de energia elétrica

pode ser utilizada até ela "pifar". O linguajar popular chama isso de "capacidade de armazenamento" e é indicado em ampères-hora (**A-h**).

Exemplificamos: Uma bateria selada para "no-break" trás as indicações — 12V, 7Ah — . Isso indica que ela está capacitada a manter um corrente de intensidade 7A durante 1 h, ou manter uma corrente de intensidade 3,5A durante 2h, ou 1A durante 7h etc.

**Fazendo experiências com pilhas:** pilhas são assuntos da Química, especificamente da Eletroquímica. Didaticamente, a química desenvolve esse assunto a partir da pilha de Daniel onde, em particular discute-se a eletrólise. A eletrólise você pode encontrar em nossas Salas de Exposições, Sala da Química - Foguete - Eletrólise. Nessa mesma Sala você encontrará o experimento sobre, 'como fazer pilhas com batatas' e colocar relógio digital em funcionamento usando as 'baterias de batatas' ou, permitam-me, as "bataterias".

### Entendeu mesmo? ....

- ☒ O que é tensão elétrica ou diferença de potencial?
- ☒ O que é uma bateria?
- ☒ Em que unidade(s) mede(m)-se a 'capacidade de armazenamento' de uma célula?

### Voltar aos itens



### O sentido convencional da corrente elétrica

Um terminal (pólo) de uma célula (pilha) ou bateria é positivo, enquanto o outro é negativo. É conveniente pensar em corrente elétrica como algo fluindo do pólo positivo para o pólo negativo. Esse sentido de percurso (do + para o -) é denominado **sentido convencional da corrente elétrica**. Setas colocadas nos diagramas sempre indicam esse sentido convencional. Porém, você deve ficar atento que esse só seria o sentido correto se o fluxo ordenado (corrente) fosse constituído por partículas com carga positiva.

Em um fio de cobre, os portadores de carga elétrica são os elétrons. Elétrons são negativamente-carregados e então devem fluir do negativo para o positivo. Isto significa que, realmente, o sentido do fluxo de elétron é oposto ao escolhido como "sentido da corrente convencional".

A corrente elétrica nos mais variados sistemas elétricos e eletrônicos envolve freqüentemente três espécies de portadores de cargas elétricas: os elétrons (-), os ânions (íons negativos) e os cátions (íons positivos). Como exemplo, em transistores, a corrente é formada por fluxos ordenados de elétrons (todos num mesmo sentido) e por "buracos" (todos em sentido oposto ao dos elétrons) que se comportam como portadores de carga positiva.

Quando o comportamento de um circuito elétrico/eletrônico está sendo analisado, de modo geral, não interessa saber que tipo de portador (com carga positiva ou com carga negativa) está participando da corrente elétrica. Em alguns casos, no eletromagnetismo por exemplo, esse conhecimento é indispensável para que possa ser previsto com precisão o efeito da corrente elétrica.

Uma pilha provê uma tensão elétrica com polaridade fixa (o pólo positivo nunca ficará negativo e vice-versa), de forma que fluxo da corrente se dará sempre no mesmo sentido. Por isso ela é

denominada **corrente contínua** ou **CC**, em contraste com a corrente elétrica domiciliar, que é mantida por um gerador que provê tensão elétrica constantemente variável. A polaridade nos terminais desse tipo de gerador é tal que a corrente inverte seu sentido de percurso 60 vezes a cada segundo de funcionamento. Isso dá lugar a uma **corrente alternada** ou **AC**. Nela, os portadores de carga elétrica invertem seu sentido de percurso, num incessante vai-vem.

### Entendeu mesmo? ....

- ☒ O que é "sentido convencional da corrente elétrica"?
- ☒ O comportamento dos circuitos eletrônicos pode ser sempre analisado com precisão ao assumirmos para a corrente esse sentido convencional?

### Voltar aos itens



### Resistência elétrica

Se interligarmos diretamente o pólo positivo de uma bateria automotiva com seu pólo negativo mediante um grosso fio de cobre, iremos conseguir uma corrente elétrica de enorme intensidade durante um curto intervalo de tempo. Em alguns segundos o interior da bateria começará a ferver!

Em uma lanterna não acontece isso. Parte do circuito da lanterna **limita** o fluxo de cargas, mantendo a intensidade da corrente com valores adequados. Algumas outras partes não afetam substancialmente esse fluxo. A propriedade elétrica dessas partes, umas dificultando o fluxo de cargas e outras não, caracterizam uma grandeza denominada **resistência elétrica**.

A mola, as lâminas do interruptor e as conexões da lâmpada são feitas de metal apropriado, de considerável espessura, oferecendo uma **baixa resistência** à corrente elétrica. Por outro lado, o filamento da lâmpada é feito com outro material (tungstênio) e de pequena espessura, oferecendo uma **alta resistência** à corrente elétrica. O fluxo de cargas através desse trecho de grande resistência (o filamento) causa um grande aquecimento que o leva ao brilho-branco, o qual passa a emitir luz visível. No ar, esse filamento se oxidaria de imediato (combustão) e seria volatilizado. Para impedir isso, todo ar é retirado de dentro do bulbo da lâmpada e substituído por um outro gás não oxidante.

A **resistência elétrica (R)** dos condutores, ou seja, quanto de dificuldade eles impõem à passagem da corrente elétrica, é medida em **ohms** (símbolo  $\Omega$ ).

- ☒ Se uma bateria feita com duas pilhas tamanho C, em série, provê uma tensão elétrica  **$U = 3\text{ V}$** , nos terminais de uma lâmpada incandescente, mantendo uma corrente elétrica de intensidade  **$I = 300\text{ mA} = 0,3\text{ A}$** , qual a resistência elétrica **R** desse filamento?

Isso é calculado assim, e mais adiante verá o porque:

$$R = U : I = 3\text{V} : 0,3\text{A} = 10\Omega$$

Os valores de resistências elétricas que participam de circuitos eletrônicos podem variar desde alguns ohms, passar pelos milhares de ohms (quiloohms) e chegar aos megaohms.

Os componentes eletrônicos projetados com o propósito de oferecerem resistência elétrica de valores particulares são chamados de **resistores**.

**Nota importante:** Conceituar 'resistência elétrica' em termos de 'dificuldade' ou 'oposição' à passagem da corrente elétrica é apenas uma técnica macroscópica e simplista para contornar a conceituação microscópica dos efeitos observados quando portadores de carga elétrica interagem com a matéria. As partículas constituintes da corrente elétrica (portadores) chocam-se (interação de campos) com as partículas do próprio condutor. O **número de choques por unidade de volume** é o conceito fiel e microscópico para a grandeza "resistência elétrica". A grande façanha da lei de Ohm, conforme pode ser demonstrado, é que o resultado da 'operação'  $U/I$  (duas grandezas de fácil medição) é justamente a medida do **número de choques por unidade de volume** (uma contagem de difícil realização prática).

### Entendeu mesmo? ....

- ☒ Que partes da lanterna limita o fluxo da corrente?
- ☒ Que unidade é usada para a medida da resistência elétrica de um condutor? Quais seus múltiplos?
- ☒ Que símbolos gráficos são usados habitualmente para representar:
  - a. diferença de potencial (tensão)?
  - b. intensidade de corrente elétrica?
  - c. resistência elétrica de um condutor?

### Voltar aos itens



### A lei de Ohm

A relação entre a intensidade da corrente elétrica (**I**), a tensão elétrica (**U**) e a resistência elétrica (**R**) foi descoberta por Georg Simon Ohm. Ele fez seus próprios fios resistores. Com eles, conseguiu mostrar que a intensidade da corrente depende de seus comprimentos e de suas espessuras, quando a tensão sobre eles e a temperatura são mantidos constantes.

Suas observações (a,b,c), feitas sob **tensão e temperatura constantes**, foram as seguintes:

(1) A intensidade da corrente elétrica diminui quando se aumenta o comprimento do fio, sem alterar sua espessura.

**R aumenta quando o comprimento do fio aumenta.**

(2) A intensidade da corrente elétrica aumenta conforme se aumenta a espessura do fio, sem alterar seu comprimento.

**R diminui quando a espessura do fio aumenta.**

(3) Com comprimento e espessura constantes, a intensidade da corrente se altera quando se substitui um material condutor por outro.

**R depende do material de que é feito o fio.**

(4) Usando-se sempre o mesmo fio, mantido à temperatura constante, a intensidade da corrente aumenta quando se aumenta a tensão aplicada.



Dessas observações, Ohm conclui que, se a temperatura for mantida constante, a relação

### Tensão elétrica : corrente elétrica ou $U : I$

mantinha-se **constante** para qualquer fio particular. Essa constante é exatamente o valor da **resistência elétrica** do fio em questão.

Em símbolos:

$$U : I = \text{constante} = R$$

Reorganizando a lei de Ohm podemos obter duas expressões adicionais:

$$U = R.I \quad \text{e} \quad I = U : R$$

Escrita dessa última forma, a lei de Ohm estabelece que, sob temperatura constante, a **intensidade de corrente** que circula por um material é diretamente proporcional à tensão elétrica (d.d.p.) aplicada e inversamente proporcional à sua resistência elétrica.

Essas equações simples são fundamentais para a Eletrônica e, uma vez que você aprenda a usá-las corretamente, verá que constituem chaves para resolução de delicados problemas sobre circuitos elétricos.

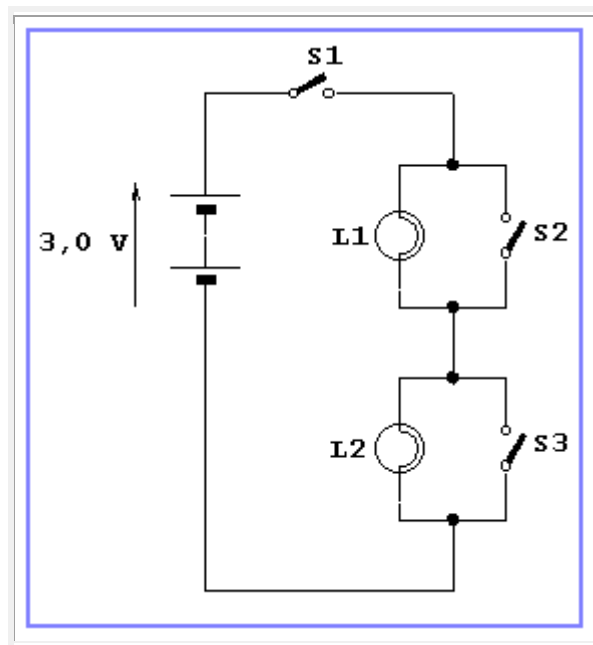
**Nota:** Por motivos que será oportunamente explicado (potencial elétrico), evite escrever a lei de Ohm sob a forma  $V = R.I$ . A letra 'V' refere-se a UM potencial elétrico e, resistor não funciona sob a ação de UM potencial elétrico e sim sob a ação de um **diferença de potenciais** elétricos. Sob esse prisma, será perfeitamente válido escrever  $V - V' = R.I$ , onde  $V - V'$  indica uma diferença de potenciais elétricos (d.d.p.).

#### Entendeu mesmo? ....

☒ Uma d.d.p.(tensão) aplicada entre os extremos de um fio é mantida constante. Se a resistência desse fio, devido a uma causa qualquer, diminuir, a intensidade de corrente através dele  $\ddot{U}$  ..... (aumenta / diminui / não se altera).

☒ Se a d.d.p.(tensão) aplicada sobre um fio é aumentada, sem alterar sua resistência elétrica então, a intensidade de corrente através dele deve  $\ddot{U}$  ..... (aumentar / diminuir / permanecer a mesma).

☒ Calcule a resistência elétrica do filamento de uma pequena lâmpada sabendo-se que, sob tensão de 4,5 V (três pilhas conectadas em série), a intensidade de corrente através dele é de 150 mA.



☒ No circuito acima, que interruptor(es) deve(m) ser fechado(s) para:

- a) acender só a lâmpada L1?
- b) acender só a lâmpada L2?
- c) acender as lâmpadas L1 e L2?

☒ O que acontecerá com as lâmpadas L1 e L2 se os interruptores S1, S2 e S3 forem fechados todos ao mesmo tempo? Por que essa ação deve ser evitada?

## Eletricidade posta a trabalhar

(Parte 6)

Prof. Luiz Ferraz Netto  
[leobarretos@uol.com.br](mailto:leobarretos@uol.com.br)

### A lei de Ohm

Ohm publicou suas conclusões em um livro e em uma série de documentos científicos, entre 1825 e 1827. A regra que ele desenvolveu é fundamental para todos os fenômenos elétricos, e é conhecida como lei de Ohm. A lei estabelece que a corrente voltagem que percorre qualquer circuito é proporcional à força eletromotriz do circuito:

**corrente voltagem  $\propto$  força eletromotriz.**

Expressa como uma equação, a lei torna-se:

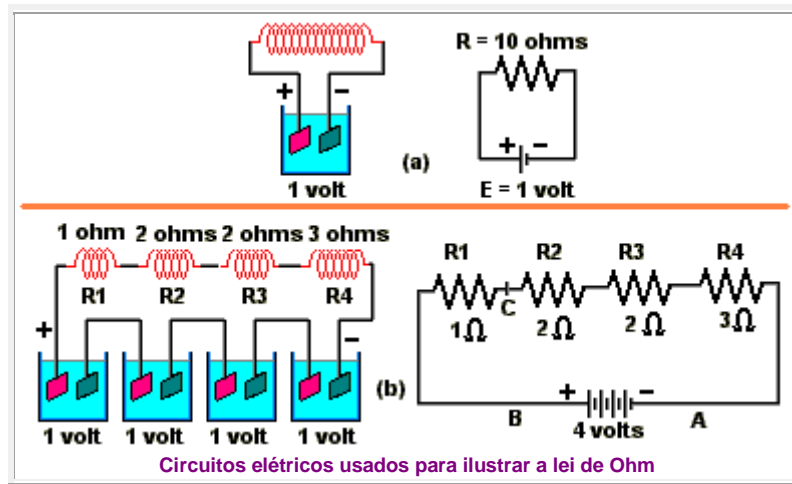
$$\text{corrente voltagem} = (\text{força eletromotriz})/(\text{resistência do circuito})$$

$$I = E/R$$

onde a quantidade **R** (resistência) é a constante de proporcionalidade. **R** depende da resistência elétrica através da qual a corrente deve percorrer o circuito.

A unidade em que é medida a corrente é o **ampère**, assim chamado em homenagem ao grande cientista francês. A força eletromotriz é medida em **volt**, nome dado em homenagem ao italiano **Alessandro Volta**, e a unidade de resistência é o **ohm**, devido ao grande cientista alemão que tinha este nome. Se uma força eletromotriz de um volt atua sobre uma resistência de um ohm, uma corrente de um ampère passa pelo circuito.

O diagrama que se segue abaixo ilustra um circuito elétrico simples (parte **a**), tanto na forma pictorial como esquemática.



A pilha (ou célula) voltaica da parte **(a)** gera uma força eletromotriz de 1 volt, e a resistência em todo o circuito é de 10 ohms. Empregando a lei de Ohm, a corrente que passa é simplesmente:

$$I = E/R = 1 \text{ volt}/10 \text{ ohms} = 0,1 \text{ ampère}$$

O diagrama também apresenta na parte **(b)** um circuito mais complicado, consistindo de várias pilhas ligadas em série com vários pedaços de fios de resistências variadas. A tensão elétrica equivalente gerada pela bateria é a soma das tensões das pilhas individuais, ou seja, 4 volts. Similarmente, a resistência total do circuito é a soma das resistências individuais, 8 ohms. A corrente que passa é, portanto:

$$I = E/R = 4 \text{ volts}/8 \text{ ohms} = 0,5 \text{ ampère}$$

### 'Queda' de tensão elétrica

[ **Nota:** Mais à frente mostraremos que a tensão elétrica útil (**U**) nos terminais de uma pilha ou de um gerador qualquer é uma 'diferença de potencial' (d.d.p.) e que, portanto, tensão elétrica é, no fundo, "uma queda de potencial". Assim, a notação 'queda de tensão' é uma redundância. ]

A lei de Ohm pode ser aplicada a partes de um circuito bem como ao conjunto do circuito. Consideremos **R1** na ilustração acima, por exemplo. A corrente que passa por **R1** produz uma tensão mensurável entre seus terminais, tensão esta que pode ser detectada por um eletroscópio devidamente instalado ora num terminal ora no outro e calculada por meio da lei de Ohm. Podemos apresentar a lei sob outra forma:

$$\text{Tensão} = \text{Resistência} \times \text{corrente}$$

$$U = R.I$$

Sob esta forma, a lei diz-nos que a tensão **U1**, entre os terminais de **R1**, é o produto da corrente que passa pela resistência pelo valor dessa resistência:

$$U1 = R1.I = (1 \text{ ohm}) \times (0,5 \text{ ampère}) = 0,5 \text{ volt}$$

Muitas medições precisas fizeram a verificação desta aplicação da lei. As medições também mostram que a polaridade da tensão nos terminais de **R1** é oposta à da bateria.

[**Nota:** Aqui, vou fazer uma descrição na terminologia própria dos conceitos da época, assim o leitor perceberá que a palavra 'tensão' fica um tanto 'forçada' e poderá sentir a necessidade da inclusão de novo conceito, o de potencial elétrico.]

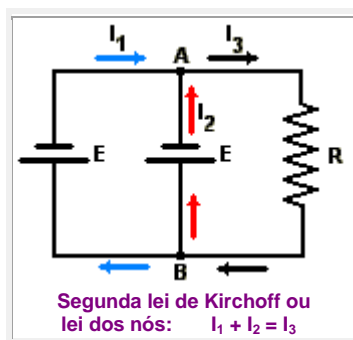
Para compreender esta diferença de polaridade, façamos uma viagem imaginária ao longo do circuito ilustrado acima, na parte **(b)**, começando em **A**, que é o terminal negativo da bateria. À medida que nos deslocamos a partir de **A** e no sentido do movimento dos ponteiros do relógio, observamos um aumento gradual de 'tensão' na bateria. Quando alcançamos o terminal positivo, a 'tensão' é 4 volts maior do que no ponto de partida. Observamos também que esta elevação de 'tensão' ocorreu no sentido do negativo para o positivo. Se o ponto **A** fosse ligado à terra, um eletrômetro sensível indicaria + 4 volts no ponto **B**. Continuando o deslocamento no mesmo sentido e passando por **R1**, observamos que a 'tensão' começa a variar no sentido oposto --- do positivo para o negativo, em vez de ser do negativo para o positivo. É como se uma parte da 'tensão' gerada pela bateria estivesse sendo perdida, à medida que progredimos ao longo da resistência. Com o ponto **A** ainda ligado ao solo, nosso eletrômetro mediria apenas + 3,5 volts no ponto **C**. A perda de 0,5 volt é a "queda de tensão" que ocorreu ao forçar a corrente através da resistência **R1**. É igual à 'queda de tensão' prevista acima pela lei de Ohm, calculada acima.

De maneira semelhante, verifica-se que as 'quedas de tensão' ao longo das outras resistências é de 1 volt, 1 volt e 1,5 volts.

**A soma de todas as 'quedas de tensão' ao longo do circuito é igual à tensão da bateria. E, poderemos escrever:  $U_{BA} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$ .**

Esta última afirmação é uma consequência natural da lei de Ohm, e foi dita pela primeira vez por **Gustav Kirchoff** (1824 -1887), em 1848. **Kirchoff** também observou outra importante regra; vejamos.

Consideremos duas pilhas voltaicas ligadas em paralelo com uma resistência, conforme se vê na ilustração abaixo.



As duas baterias são idênticas, e cada uma produz uma corrente que atravessa a resistência. A regra estabelece que

**a soma das correntes que chegam em qualquer junção (nó) do circuito é igual à soma das correntes que deixam a junção.**

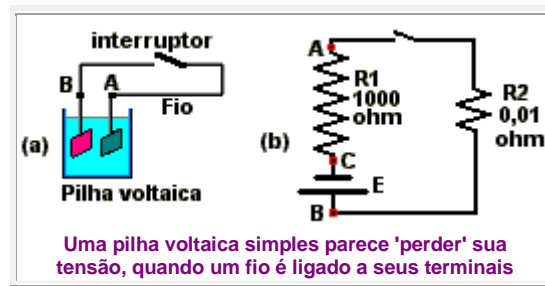
As correntes que chegam e saem do nó **A** estão indicadas por setas no diagrama. De acordo com a lei de Kirchoff,  $I_1 + I_2 = I_3$ . Se cada pilha fornecer 1 ampère, teremos então:  $I_3 = 1 \text{ ampère} + 1 \text{ ampère} = 2 \text{ ampères}$ .

As leis de Kirchoff são extremamente úteis na análise do desempenho dos circuitos elétricos.

### Resistência interna

Nos exemplos discutidos acima, considerou-se que as pilhas voltaicas não tinham resistência interna. Isto está longe da verdade, especialmente para a pilha simples que era conhecida no tempo de Ohm. Na verdade, foi esta (ou melhor, a falta desta) resistência interna que levou à idéia errônea de que a tensão e a corrente não são relacionadas.

Sabia-se muito bem, por exemplo, que uma pilha voltaica "perde" sua 'tensão' quando se liga um fio metálico, grosso e curto, a seus terminais. A despeito da aparente ausência de tensão, a pilha envia uma corrente pelo fio. A lei de Ohm possibilita-nos compreender por que uma pilha voltaica parece perder sua força eletromotriz quando um fio é ligado aos seus terminais. Consideremos o aparelho ilustrado abaixo. Os terminais **A** e **B** de uma pilha simples estão ligados em série com um interruptor e com um pequeno pedaço de fio (a).



Quando o interruptor está aberto, como na ilustração, nenhuma corrente pode passar, e a presença de uma força eletromotriz pode ser detectada nos terminais da pilha com um eletroscópio. Quando o interruptor está fechado, uma corrente passa pelo fio, e um eletroscópio não é capaz de detectar uma força eletromotriz mensurável nos terminais da pilha.

No diagrama, parte (b), mostramos o mesmo circuito em forma esquemática. Os fios de ligação são agora considerados como tendo resistência zero, e a resistência real do circuito é concentrada em dois lugares, designados **R1** e **R2**. A resistência **R2** tem um valor igual à resistência do fio da parte do circuito externo da pilha. A resistência **R1** é equivalente à resistência interna da pilha. Ela representa a resistência encontrada pelas cargas elétricas ao passar internamente de um elétrodo da pilha para o outro. A resistência mais a força eletromotriz, traçadas esquematicamente entre os pontos **A** e **B**, são eletricamente equivalentes à pilha voltaica verdadeira.

Para uma pilha voltaica simples (da época), a resistência interna **R1** é de cerca de 1 000 ohms. Entretanto, o fio pode ter uma resistência **R2** tão baixa como 0,01 ohm. Empregando estes números, a resistência total do circuito será a soma:  $R = R1 + R2$  ou  $R = 1\,000,01$  ohms. Se a força eletromotriz da pilha for de ( $E = 1$  volt), a corrente será:  $I = E/R = 1/1000,01 = 0,000999$  ampère ou aproximadamente 0,001 ampère.

A resistência do fio é tão pequena em comparação com a resistência interna da pilha, que não apresenta efeito significativo sobre a quantidade de corrente que passa. **R2** pode ser desprezado, para fins práticos.

A lei de Ohm (generalizada) pode ser enunciada sob a forma  $E = R.I$ . Nesta forma, ela pode nos informar por que a tensão da pilha 'desapareceu' quando o interruptor foi fechado. O primeiro passo consiste em calcular a 'queda de tensão' entre os terminais **A** e **C** da resistência interna **R1** (veja ilustração acima). Essa tensão, **U<sub>1</sub>**, é simplesmente a resistência **R<sub>1</sub>** vezes a corrente **I**:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 1000 \times 0,00099999 = 0,99999 \text{ volt}$$

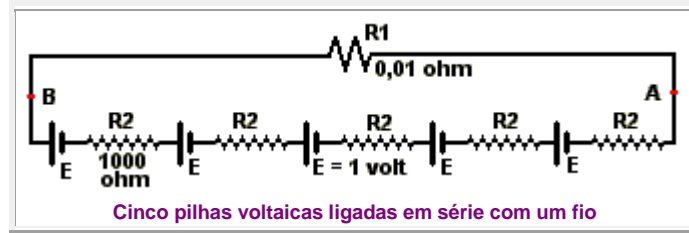
A tensão entre os terminais de **R1** é de quase 1 volt. Esta tensão é considerada como uma 'queda de tensão', porque é subtraída da tensão total gerada ou força eletromotriz da pilha voltaica. Uma grande parte da tensão total gerada pela pilha voltaica é "gasta" em forçar a corrente a passar através de sua própria resistência interna. A tensão disponível nos terminais, ou seja, a tensão útil que a bateria está fornecendo para o circuito externo é "sempre igual à sua força eletromotriz, menos a 'queda de tensão' causada por sua resistência interna". Podemos formalizar tudo isso assim:

$$U = E - R_{int.} \cdot I = E - U_{int.}$$

onde  $U$  é a tensão útil disponível nos terminais da pilha,  $R_{int.}$  é sua resistência interna (é a  $R_1$  na ilustração) e  $I$  é o valor da corrente elétrica que circula tanto pelo interior da pilha quanto pelo circuito externo. Essa é a expressão do "gerador elétrico linear" que os alunos tanto utilizam em seus exercícios no terceiro ano do Ensino Médio, no Vestibular etc.

A tensão entre os terminais **A** e **B** (ilustração acima), quando o interruptor está fechado, é a diferença  $1 - 0,99999 = 0,0001$  volt. Esta tensão é demasiado pequena para ser detetada pelos meios disponíveis no princípio do século dezanove; assim, era natural que os cientistas supusessem que ela desaparecia inteiramente.

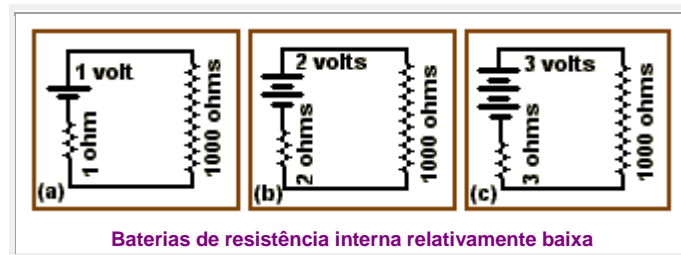
A lei de Ohm ajuda-nos também a compreender por que várias pilhas simples não podem fornecer mais corrente que uma única pilha do mesmo tipo. O diagrama esquemático, a seguir, apresenta várias pilhas ligadas em série com um pequeno pedaço de fio.



A tensão total entre os terminais da bateria, **A** e **B**, é a soma das tensões totais geradas pelas pilhas individuais, ou seja, 5 volts ( $E_{AB} = E + E + E + E + E = 5E = 5 \times 1 \text{ volt} = 5 \text{ volts}$ ). A resistência total ao longo do circuito todo (internas + externa) é de 5 000,01 ohms ( $R = R_1 + R_2 + R_2 + R_2 + R_2 + R_2 = 0,01 + 5 \times 1000 = 5\,000,01 \text{ ohms}$ ). Portanto, a corrente vale:  $I = E_{AB}/R = 5 \text{ volts}/5000,01 \text{ ohms} = 0,000999998 \text{ ampère}$ .

A corrente produzida pelas cinco pilhas é quase idêntica à produzida por uma única pilha do mesmo tipo (veja exemplo anterior). O valor da corrente, em ambos os exemplos, é limitada quase inteiramente pela resistência interna da bateria. Acrescentando uma pilha adicional, acrescenta-se tensão apenas suficiente para vencer a resistência interna adicional, e a corrente permanece essencialmente inalterada.

As baterias que se fabricam hoje têm uma resistência interna muito mais baixa que a das antigas pilhas voltaicas. Se a resistência externa for grande, em comparação com a resistência interna da bateria, a corrente do circuito aumenta à medida que são acrescentadas pilhas adicionais. A ilustração abaixo apresenta três circuitos típicos, que ilustram bem este ponto.



Cada bateria é ligada a uma resistência de 1 000 ohms. Na parte (a), a bateria é uma pilha simples, tendo uma resistência interna de 1 ohm. A bateria de duas pilhas da parte (b) tem uma força eletromotriz de 2 volts, e uma resistência interna de 2 ohms. A bateria da parte (c) tem uma força eletromotriz de 3 volts e uma resistência interna de 3 ohms.

Os valores das três correntes elétricas podem ser calculados por meio da lei de Ohm:

- Circuito (a):  $I = 1 \text{ volt}/1001 \text{ ohms} = 0,000999 \text{ ampère}$
- Circuito (b):  $I = 2 \text{ volts}/1002 \text{ ohms} = 0,001996 \text{ ampère}$
- Circuito (c):  $I = 3 \text{ volts}/1003 \text{ ohms} = 0,002991 \text{ ampère}$

A quantidade de corrente que passa aumenta visivelmente à medida que aumenta o número de pilhas. Os contemporâneos de Ohm deixaram de reconhecer esta verdade devido à resistência interna relativamente alta das baterias de que dispunham.

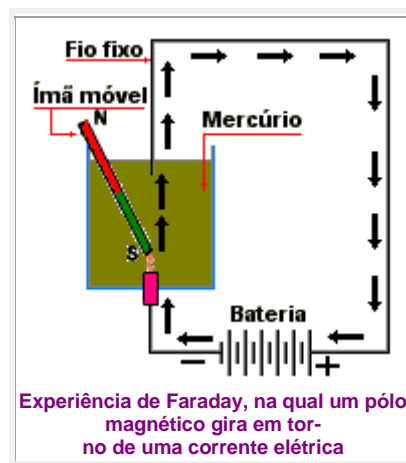
**Ohm** demonstrara que a corrente que passa em qualquer condutor depende de dois fatores --- a resistência inerente ao circuito, e a tensão total ou força eletromotriz da fonte de eletricidade. Esta última é análoga ao papel desempenhado pela diferença de temperatura na transferência de calor. Mais do que isso, ele demonstrou que a força eletromotriz é o conceito que relaciona a teoria da eletricidade dinâmica com a teoria mais antiga da eletricidade estática. Grande parte do trabalho realizado no quarto de século seguinte foi um desenvolvimento natural das idéias de Ohm. Infelizmente, a importância de suas descobertas não foi inteiramente reconhecida durante muitos anos. Embora ele tivesse recebido uma medalha da Royal Society em 1841, não foi promovido a professor efetivo até 1849 --- vinte e dois anos após a publicação de seu livro sobre eletricidade. Ele é hoje reconhecido como um dos grandes cientistas de seu tempo.

### Potencial elétrico

A tensão elétrica é freqüentemente considerada como uma diferença de potencial. Potencial elétrico é um conceito útil, que evoluiu em conexão com a teoria eletrostática. Cargas elétricas deslocam-se nos condutores, e saltam através do espaço como centelhas porque as cargas se repelem mutuamente. Elas tendem a ser repelidas para fora dos corpos que têm grandes concentrações de carga, e a penetrar nos corpos que têm concentrações mais baixas. Se dois corpos com igual concentração de carga forem ligados por um fio, não ocorrerá deslocamento de carga (corrente elétrica). Diz-se que tais corpos têm o mesmo potencial. Se os dois corpos tiverem uma diferença de potencial, ocorrerá um deslocamento correspondente de carga. Essa diferença de potencial é idêntica, em princípio, à força eletromotriz ou tensão da bateria.

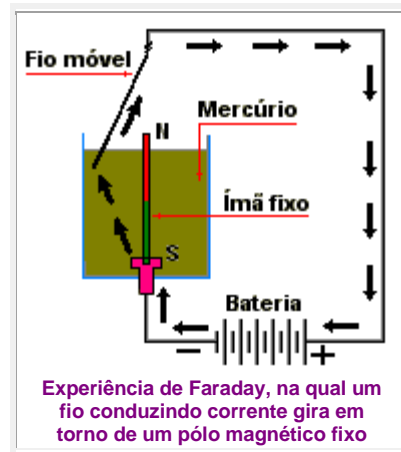
### O primeiro motor elétrico

Imediatamente após tomar conhecimento da descoberta de Oersted sobre a conexão entre a eletricidade dinâmica (em contraposição à eletricidade estática) e o magnetismo, **Michael Faraday** (1791 -1867) achou um meio de explorar a descoberta. Ele sabia que uma corrente elétrica exerce uma força sobre um pólo magnético que lhe fica próximo. Talvez essa força pudesse fazer um pólo magnético girar em torno de um fio conduzindo corrente. Faraday utilizou o aparelho ilustrado abaixo para verificá-lo.



A corrente passa em um circuito fechado, como se indica pelas setas (veja comentário ao final dessa parte 2). O mercúrio, que é um bom condutor de eletricidade, forma uma parte do percurso que vai do fundo do vaso de vidro até o fio fixo. Quando passa uma corrente, o pólo norte do ímã desloca-se em uma trajetória circular em torno do fio fixo. Se os pólos magnéticos forem invertidos, ou o sentido da corrente, o sentido de rotação será também invertido.

Com o sucesso dessa experiência, Faraday prosseguiu para provar que um fio transportando uma corrente pode ser posto a girar em torno de um pólo magnético. O ímã fixo foi colocado em um adaptador, como na ilustração a seguir, e o fio mergulhado no mercúrio tornou-se capaz de mover-se livremente.



Logo que o circuito foi completado, o fio começou a girar em torno do pólo magnético. Uma vez mais, o sentido de rotação pôde ser invertido, bastando inverter os pólos magnéticos ou o sentido da corrente.

**Comentário:** Vê-se a corrente passando do terminal negativo (-) para o terminal positivo (+) através do circuito externo da bateria. Como veremos, uma corrente elétrica em condutor metálico é realmente um fluxo de elétrons carregados negativamente que são 'repelidos' para fora da bateria, no terminal negativo, e 'atraídos' para a bateria, no terminal positivo. Alguns livros mostram a chamada "corrente convencional" que circula em sentido oposto. Isto é uma relíquia de tempos passados, quando se pensava que o fluido ou partículas de eletricidade tinha uma carga positiva. Mas, isso não encerra o tema sobre o sentido da corrente; aguarde!