AULA
42

Ele deu... a luz

PARA COMEÇAR

Era noite e chovia torrencialmente. Roberto, prevenido, deu a sua ordem preferida:

– Desliga a televisão que é perigoso, está trovejando!

Mal ele acabou a frase, surgiu um clarão, seguido de um estrondo violento. Tudo ficou às escuras, o bairro inteiro. Seguiu-se aquela agitação típica dessas ocasiões. Todo mundo procurando fósforo, isqueiro, vela, qualquer coisa que produzisse uma claridadezinha, pelo menos. Mas, como sempre, nessas horas ninguém acha nada. Até que um clarão iluminou a casa. Era Roberto, sempre prevenido, com uma lanterna na mão.

– Olha aí, mãe – gritou o garotão debochado. – O pai deu a luz!

– É, queria ver ele ligar o chuveiro com essa lanterninha, que eu estou querendo tomar um banho – provocou a mãe, sempre na oposição.

Ernesto não perdeu a deixa:

– E aí, pai, mostra pra ela!

– Você já viu chuveiro elétrico a pilha? É impossível, filho! A gente ia precisar de uma pilha do tamanho desta casa!

A resposta não foi muito convincente. Ernesto exigiu maiores esclarecimentos. Roberto não se apertou muito. Mostrou uma pilha de relógio, pequenininha, as pilhas pequenas do rádio e as maiores da lanterna. O tamanho da pilha, explicou, dependia do consumo de energia exigido pelo aparelho. E arrematou a conversa com uma argumentação definitiva:

– Pilha é que nem bicho. Quanto maior, mais forte!

Como nas ocasiões anteriores, as explicações de Roberto estavam corretas, embora nem sempre sua linguagem seja muito precisa. As pilhas, de fato, têm a sua "força" relacionada com o seu tamanho. Mas a palavra "força", embora aqui também seja usada costumeiramente pelos físicos, não expressa bem o papel que a pilha desempenha.

Na realidade, as pilhas não fazem força. Elas transformam a energia originária de reações químicas que ocorrem entre as substâncias nela contidas em energia elétrica. Assim como as baterias e acumuladores, elas são **geradores**, dispositivos que transformam outras formas de energia em energia elétrica. O nome gerador, como se vê, também não é fisicamente correto – gerar quer dizer criar, não transformar – , mas continua a ser usado por razões históricas, por tradição.

Existem dispositivos que funcionam no sentido oposto ao dos geradores, isto é, que transformam a energia elétrica em outra formas de energia. É o caso dos motores que transformam a energia elétrica em energia mecânica, por exemplo, ou do rádio e da televisão, que a transformam em luz e som. Esses dispositivos ou aparelhos são chamados de **receptores**. Nesta aula vamos estudar os geradores e receptores.

Geradores

Gerador, como já foi dito, é qualquer dispositivo que transforma outras formas de energia em energia elétrica. Por enquanto, não vamos nos preocupar com o processo de transformação de energia, apenas com os seus resultados. Em outras palavras, não vamos estudar como uma pilha transforma a energia química em energia elétrica. Sabemos que isso ocorre, e esse vai ser o nosso ponto de partida.

Para você entender como essa transformação ocorre, vamos fazer uma analogia. Suponha que uma criança coloque algumas bolas, de uma em uma, na parte mais alta de um escorregador. E que, à medida que as bolas vão chegando ao chão, a criança as recoloque lá em cima. É fácil ver que se estabelece uma "corrente de bolas" no escorregador. Veja a Figura 1. É mais ou menos isso o que um gerador faz. Ele fornece energia à cargas elétricas (as bolas, na nossa analogia) estabelecendo uma diferença de potencial entre seus terminais (o que equivale à diferença de altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do escorregador). Em outras palavras, o gerador realiza, sobre cada carga elétrica **q**, um trabalho τ, elevando o seu potencial elétrico.

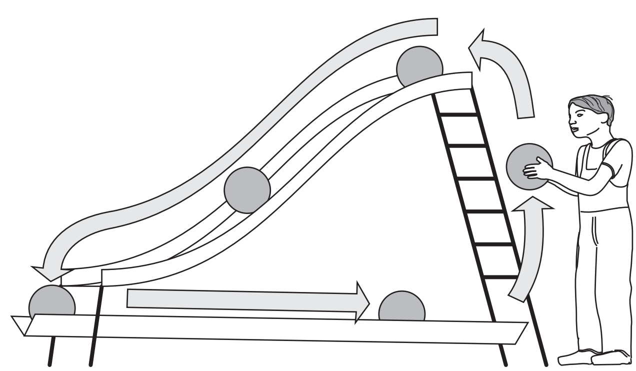

Figura 1
Observe que a criança fornece energia às bolas para que a corrente se mantenha. Esse é o papel do gerador.

A relação entre o trabalho realizado sobre a carga e o valor dessa carga é chamada de **força eletromotriz (fem)** do gerador, cujo símbolo é ε. Define-se, portanto, força eletromotriz pela relação:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{q}$$

A unidade da fem é o **volt**, a mesma da diferença de potencial, pois ambas as grandezas são definidas a partir da razão entre o **joule**, unidade de trabalho, e o **coulomb**, unidade de carga. Na realidade, força eletromotriz é um nome inadequado, utilizado até hoje tanto por tradição como pela falta de um nome melhor.

A força eletromotriz de um gerador não é uma força. É a diferença de potencial que ele poderia fornecer se não houvesse perdas dentro do próprio gerador. Como isso é inevitável (o gerador também oferece uma resistência à passagem da corrente), a diferença de potencial fornecida é sempre menor do que aquela originária do trabalho do gerador. Por essa razão, a representação simbólica de um gerador costuma estar acompanhada de um pequeno resistor. Veja a Figura 2. Para distinguir a diferença de potencial que o gerador fornece, de fato, da diferença de potencial que ele poderia fornecer em condições ideais, denomina-se esta última de força eletromotriz.

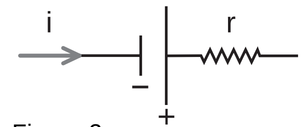

Figura 2
Representação simbólica de um gerador. O traço maior corresponde ao pólo positivo. Observe que o sentido da corrente deve estar presente nesta representação.

Essas considerações nos permitem escrever a equação do gerador, a partir da lei de Ohm. Vamos chamar de **r** a resistência interna do gerador. Se ele for percorrido por uma corrente elétrica **i**, de acordo com a lei de Ohm, haverá uma queda na diferença de potencial entre os seus terminais, correspondente ao produto **r · i**. Assim, a diferença de potencial **V** que um gerador fornece nos seus terminais será a sua força eletromotriz ε menos a diferença de potencial correspondente ao produto **r · i**. Teremos então:

$$V = \varepsilon - r \cdot i$$

Essa expressão é conhecida como **equação do gerador**. Pode-se notar que numa situação ideal, em que não haja perdas no gerador, ou seja, quando a sua resistência interna r for nula, teremos **V** = ε. Embora isso seja impossível, essa é uma condição que costuma aparecer nos problemas para simplificar sua solução.

Passo a passo

1. Uma pilha tem força eletromotriz de 1,5 V e resistência interna de 0,5 Ω quando percorrida por uma corrente elétrica de 0,4 A. Determine, nessas condições, a diferença de potencial entre seus terminais.

Solução:

Basta aplicar a equação do gerador, uma vez que o que se quer é a diferença de potencial V entre seus terminais. Portanto:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}5 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}2 \Rightarrow \mathbf{V = 1{,}3V}$$

2. Vamos admitir que a resistência interna de uma bateria de fem $\varepsilon = 9{,}0$ V seja constante e valha r = 1,5 Ω.

a) a partir da equação do gerador, preencha a tabela abaixo:

V (volts)							
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) com os dados da tabela, construa o gráfico V (volts) × i (ampères)

Solução:

a) Aplicando a equação do gerador, temos: $V = 9{,}0 - 1{,}5 \cdot i$

Fazendo a substituição pelos valores de i sugeridos, completamos a tabela:

V (volts)	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) Colocando os valores num gráfico, obtemos uma reta de inclinação negativa. Isso significa que, à medida que a intensidade da corrente aumenta, diminui a tensão ou diferença de potencial fornecida pela bateria. Como você vê, a resistência interna é um fator que limita a utilização de uma pilha ou bateria.

Esse gráfico costuma ser chamado de curva característica do gerador. É fácil mostrar também que o coeficiente angular dessa reta é numericamente igual à resistência interna r do gerador

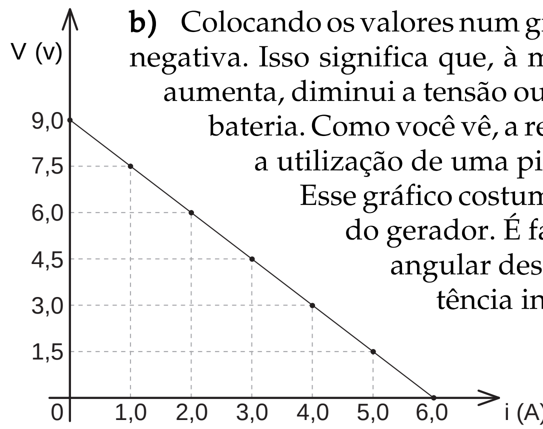

Figura 3. Gráfico V × i

Potência de um gerador

Se você reparar com atenção, vai notar que todas as pilhas – das pequeninas pilhas de relógio às pilhas maiores, usadas em lanternas – fornecem sempre a mesma diferença de potencial, 1,5 volts. (Existem baterias de 9,0 volts que, na verdade, são uma associação de 6 pilhas de 1,5 volts ligadas em série). Por que, então, essa diferença de tamanho? Por que não colocamos uma pilha de relógio numa lanterna, se ela fornece a mesma diferença de potencial que a pilha grande?

A resposta é simples: para que um aparelho elétrico funcione, não basta ligá-lo à diferença de potencial correta; é preciso que ele seja percorrido, também, pela corrente elétrica adequada. Em outras palavras, é preciso fornecer a ele a potência elétrica necessária para que ele possa funcionar, para a qual foi projetado.

Um relógio digital de pulso, por exemplo, precisa de uma potência de cerca de 30 microwatts ($30 \cdot 10^{-6}$ watts) para funcionar. Lembrando a aula passada, a relação entre potência, diferença de potencial e corrente elétrica é $P = V \cdot i$. Portanto, a corrente de que esse relógio precisa é:

$$P = V \cdot i \Rightarrow i = P \# V \Rightarrow i = 30 \cdot 10^{-6} \# 1{,}5 \Rightarrow i = 2{,}0 \cdot 10^{-6}\ A$$

Como se vê, esse relógio precisa de uma corrente muito pequena para funcionar, de 0,000002 A. Para fornecer essa corrente, basta uma pilha pequena. No caso de uma lanterna comum, a potência necessária para acender uma lâmpada é, em geral, da ordem de alguns watts (assim como nos relógios, esses valores variam muito). Suponha que essa potência seja de 3 watts. Repetindo os cálculos anteriores, temos:

$$P = V \cdot i \Rightarrow i = P \# V \Rightarrow i = 3 \# 1{,}5 \Rightarrow i = 2{,}0\ A$$

Portanto, a corrente elétrica necessária para acender uma lâmpada pode ser até 1 milhão de vezes maior que a necessária para o funcionamento do relógio. Note que a corrente elétrica depende de partículas materiais, os elétrons, e por isso depende da quantidade ou massa das substâncias químicas contidas na pilha, o que não acontece com a diferença de potencial. Por essa razão, a diferença de potencial não depende do tamanho da pilha, mas a corrente depende. Quanto maior a corrente elétrica que uma pilha deve fornecer, maior deve ser o seu tamanho. Como você vê, há, de fato, uma relação direta entre o tamanho da pilha e a sua "força", como foi dito na introdução.

Análise da equação do gerador – Rendimento

Muitas vezes, uma análise matemática pode nos dar indicações físicas muito importantes. É o que vamos fazer agora. Inicialmente, reescrevemos a equação do gerador:

$$V = \varepsilon - r \cdot i$$

Agora, multiplicamos os termos dessa equação por i. Obtemos:

$$V \cdot i = \varepsilon \cdot i - r \cdot i^2$$

Arrumando os termos de forma mais conveniente, temos:

$$\boldsymbol{\varepsilon \cdot i = V \cdot i + r \cdot i^2}$$

Lembrando a aula passada, notamos que o termo $\mathbf{V \cdot i}$ é a expressão da potência fornecida à corrente elétrica e que $\mathbf{r \cdot i^2}$ é a expressão da potência dissipada pela resistência interna do gerador. Portanto, o termo $\boldsymbol{\varepsilon \cdot i}$ é a soma da potência fornecida pelo gerador à corrente elétrica mais a potência dissipada devido à sua resistência interna. Em outra palavras, se a função do gerador é produzir uma corrente elétrica, $\mathbf{V \cdot i}$ é a **potência útil** por ele fornecida e $\boldsymbol{\varepsilon \cdot i}$ é a **potência total** desenvolvida pelo gerador. O valor $\mathbf{r \cdot i^2}$ é, como já afirmamos, a potência dissipada, ou seja, a diferença entre o a potência total e potência útil. Em outras palavras, temos:

$$\mathbf{P_{TOTAL} = P_{ÚTIL} + P_{DISSIPADA}}$$

A partir dessa relação, podemos obter uma expressão para o rendimento η de um gerador. Basta lembrar a aula passada, em que retomamos a definição de rendimento:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T}$$

Como $P_U = V \cdot i$ e $P_T = \varepsilon \cdot i$, temos:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon}$$

É interessante notar que a tensão ou diferença de potencial fornecida pelo gerador, V, é sempre menor que a sua força eletromotriz ε, o que mais uma vez mostra que o rendimento é sempre menor que a unidade.

3. Uma pilha tem fem de $\varepsilon = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}4\ \Omega$. Supondo que a sua resistência interna permaneça constante, determine a potência total, a potência útil, a potência dissipada e o rendimento dessa pilha quando percorrida por uma corrente elétrica

a) $i = 0{,}5$ A

b) $i = 3{,}0$ A

Solução:

Em ambos os casos, basta aplicar as relações acima deduzidas. A potência útil poderia ser calculada pela diferença entre a potência total e a potência dissipada. Aqui, no entanto, preferimos determiná-la pela diferença de potencial V fornecida pelo gerador em cada caso.

a) $P_T = \varepsilon \cdot i \Rightarrow P_T = 1{,}5 \cdot 0{,}5 \Rightarrow \mathbf{P_T = 0{,}75\ W}$

Para determinar a potência útil, vamos aplicar a equação do gerador e obter o valor de V:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}5 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 1{,}3\ V$$

Podemos agora determinar a potência útil:

$$P_U = V \cdot i \Rightarrow P_U = 1{,}3 \cdot 0{,}5 \Rightarrow \mathbf{P_U = 0{,}65\ W}$$

A potência dissipada pode ser calculada diretamente:

$$P_D = r \cdot i^2 \Rightarrow P_D = 0{,}4 \cdot 0{,}5^2 \Rightarrow \mathbf{P_D = 0{,}10\ W}$$

Observe que a relação $P_T = P_U + P_D$ é verificada.
O rendimento será:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} \Rightarrow \frac{1{,}3}{1{,}5} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}87} \text{ ou } \eta = \mathbf{87\ \%}$$

b) Analogamente ao item a, obtemos:

$$P_T = \varepsilon \cdot i \Rightarrow P_T = 1{,}5 \cdot 3{,}0 \Rightarrow \mathbf{P_T = 4{,}5\ W}$$

Para determinar a potência útil, calculamos o valor de V:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 3{,}0 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 0{,}3\ V$$
$$P_U = V \cdot i \Rightarrow P_U = 0{,}3 \cdot 3{,}0 \Rightarrow \mathbf{P_U = 0{,}90\ W}$$

A potência dissipada pode ser calculada diretamente:

$$P_D = r \cdot i^2 \Rightarrow P_D = 0{,}4 \cdot 3{,}0^2 \Rightarrow \mathbf{P_D = 3{,}60\ W}$$

O rendimento será:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} \Rightarrow \eta = \frac{0{,}3}{1{,}5} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}2} \text{ ou } \eta = \mathbf{20\ \%}$$

É interessante notar como a **mesma pilha** pode ter rendimentos tão diferentes, dependendo da corrente que passa por ela. É por isso que, às vezes, uma pilha usada que não funciona mais para uma lanterna pode ainda ser útil para um rádio, por exemplo. Isso ocorre porque o rádio, em geral, utiliza correntes bem menores que as lanternas.

Receptores

Assim como os geradores transformam outras formas de energia em energia elétrica, existem dispositivos ou aparelhos que desempenham o papel oposto, ou seja, transformam a energia elétrica em outras formas de energia. Os exemplos mais comuns são os motores, que transformam a energia elétrica em energia mecânica, os inúmeros aparelhos eletrônicos que transformam a energia elétrica em energia sonora e luminosa e os acumuladores ou pilhas recarregáveis, que transformam a energia elétrica em energia química. Em todos esses casos, a força eletromotriz atua no sentido oposto. Não é o dispositivo ou equipamento que realiza trabalho sobre as cargas elétricas: são as cargas elétricas que realizam trabalho sobre o dispositivo. É a corrente elétrica que gera o movimento do eixo no motor; da mesma forma, é ela que aciona os componentes eletrônicos que geram luz e som nos aparelhos de som e imagem e desencadeia as reações químicas que recarregam os acumuladores ou pilhas recarregáveis. É importante lembrar que, assim como nos geradores, a corrente elétrica também percorre os receptores e depende da resistência interna de seus componentes. Por isso, costuma-se adotar para os receptores um símbolo semelhante ao do gerador, invertendo-se apenas o sentido da corrente. Veja a Figura 4.

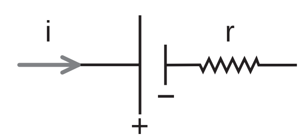

Figura 4
Representação simbólica de um receptor. Observe que, na prática, a única diferença dessa representação, em relação ao gerador, é o sentido da corrente.

A diferença entre os símbolos do gerador e do receptor expressa claramente a diferença no papel exercido pela corrente ou pelas cargas elétricas nesses dois dispositivos. O gerador realiza trabalho sobre as cargas, daí a definição de fem:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{q}$$

No receptor, são as cargas que realizam trabalho. Por isso, define-se uma grandeza análoga à força eletromotriz, chamada de **força contra-eletromotriz** (**fcem**), que representaremos por ε':

$$\varepsilon' = \frac{\tau}{q}$$

As definições são iguais, porque as grandezas envolvidas são iguais, mas muda o agente que realiza o trabalho. A unidade da fcem também é a mesma, o volt. Analogamente à equação do gerador, pode-se também escrever uma **equação do receptor**. Chamando de **r**' a resistência interna do receptor, a diferença de potencial ou tensão, V, nos terminais de um receptor, será dada por:

$$\mathbf{V = \varepsilon' + r' \cdot i}$$

A interpretação física dessa expressão é simples: a diferença de potencial nos terminais de um receptor equivale ao trabalho que as cargas realizam sobre ele (é o fator ε') mais a perda devida à sua resistência interna (o fator **r' · i**).

É importante notar que um dispositivo que transforma a energia elétrica **apenas em calor** não é considerado um receptor. Ele não tem força contra-eletromotriz – é, simplesmente, um resistor.

Potência e rendimento em um receptor

Se multiplicarmos ambos os termos da equação do receptor por i, como fizemos com a equação do gerador, podemos fazer um estudo matemático das relações de potência num receptor:

$$V \cdot i = \varepsilon' \cdot i + r' \cdot i^2$$

Uma análise física dessa expressão mostra que o primeiro termo, $\mathbf{V \cdot i}$, é a potência total fornecida ao receptor. O segundo termo, $\varepsilon' \cdot \mathbf{i}$, é a potência útil consumida pelo receptor. O último termo, $\mathbf{r' \cdot i^2}$, é a potência dissipada devido à sua resistência interna. Em outras palavras, no receptor a relação de potências é a mesma do gerador:

$$P_{TOTAL} = P_{ÚTIL} + P_{DISSIPADA}$$

invertendo-se, porém, as expressões de cálculo da potência útil e da potência total. A expressão do rendimento:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T}$$

aplicada ao receptor, será, também, invertida. Teremos, portanto:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V}$$

Como a tensão aplicada ao receptor é sempre maior que a sua fcem, aqui também, como em todo rendimento, o valor de η é sempre menor que 1,0.

Passo a passo

4. Um motor de brinquedo de fcem 2,0 V só funciona dentro de suas especificações quando submetido a uma tensão de 3,0 V e é percorrido por uma corrente elétrica de 0,8 A. Determine a resistência interna e o rendimento desse motor.

Solução:

Para determinar a resistência interna do receptor, basta aplicar a sua equação:

$$V = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow 3{,}0 = 2{,}0 + r' \cdot 0{,}8 \Rightarrow \mathbf{r' = 1{,}25\,\Omega}$$

Aplicando a expressão do rendimento para o receptor, temos:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V} \Rightarrow \eta = \frac{2{,}0}{3{,}0} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}67} \text{ ou } \eta = \mathbf{67\%}$$

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o conceito de gerador e de força eletromotriz;
- como calcular a potência de um gerador;
- a equação do gerador e o cálculo do seu rendimento;
- o conceito de receptor, sua equação e rendimento.

Nas três últimas aulas estudamos a corrente elétrica, os resistores e, agora, os geradores e receptores. Estamos, portanto, em condições de reunir todos esses elementos em conjuntos, os circuitos elétricos. Um circuito elétrico é um caminho fechado pelo qual as cargas elétricas se movimentam, realizam trabalho e perdem energia nos receptores e resistores e recebem energia de volta nos geradores, repetindo o ciclo. Nossas casas têm sempre um ou mais circuitos elétricos ligados à rede de transmissão da companhia de eletricidade, que é também um enorme circuito elétrico. Esse circuito imenso é o que nos liga a gigantescos geradores localizados, às vezes, a centenas de quilômetros de distância – as **usinas elétricas**.

Há circuitos elétricos extraordinariamente complexos, como aqueles dos aparelhos eletrônicos e computadores, por exemplo. Nós vamos estudar alguns circuitos mais simples. Felizmente, os circuitos domésticos são relativamente simples, e nós poderemos saber, enfim, por que na casa dos nossos amigos não era possível assistir televisão com o chuveiro ligado. Este será o assunto da próxima aula.

Exercício 1

Uma bateria tem uma força eletromotriz de 9,0 V e resistência interna de 0,5 Ω quando percorrida por uma corrente elétrica de 0,8 A. Determine, nessas condições, a diferença de potencial entre seus terminais.

Exercício 2

No exercício anterior, qual seria a máxima corrente que essa bateria poderia fornecer, supondo que a sua resistência interna seja constante?

Exercício 3

Vamos admitir que a resistência interna de uma pilha de fem $\varepsilon = 1{,}5$ V seja constante e valha $r = 0{,}25\,\Omega$.

a) a partir da equação do gerador, preencha a tabela abaixo:

V (volts)							
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) com os dados dessa tabela, construa o gráfico V (volts) $\times$ i (ampères).

Exercício 4

Uma pilha tem uma fem de $\varepsilon = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}2\,\Omega$. Supondo que a resistência interna permaneça constante, determine a potência total, a potência útil, a potência dissipada e o rendimento dessa pilha quando percorrida por uma corrente elétrica

a) $i = 0{,}4$ A

b) $i = 5{,}0$ A

Exercício 5

Um motor de brinquedo de fcem 6,0 V só funciona dentro de suas especificações quando submetido a uma tensão de 9,0 V e é percorrido por uma corrente elétrica de 1,2 A. Determine a resistência interna desse motor.

Exercício 6

Nas condições do problema anterior, qual é o rendimento do motor?