

Halliday & Resnick
Fundamentos de Física
Eletromagnetismo
Volume 3



LTC
EDITORA



www.grupogen.com.br
<http://gen-io.grupogen.com.br>



Conteúdos editoriais



ROCA

LTC

atlas



O **GEN | Grupo Editorial Nacional** reúne as editoras Guanabara Koogan, Santos, Roca, AC Farmacêutica, LTC, Forense, Método, EPU, Atlas e Forense Universitária



O **GEN-IO | GEN – Informação Online** é o repositório de material suplementar dos livros dessas editoras

www.grupogen.com.br

<http://gen-io.grupogen.com.br>



Capítulo 27

Circuitos



27-1 Circuitos de uma Malha



Objetivos do Aprendizado

- 27.01** Conhecer a relação entre a força eletromotriz e o trabalho realizado.
- 27.02** Conhecer a relação entre a força eletromotriz, a corrente e a potência de uma fonte ideal.
- 27.03** Desenhar o diagrama esquemático de um circuito de uma malha com uma fonte e três resistores.
- 27.04** Usar a regra das malhas para escrever uma equação para as diferenças de potencial dos elementos de um circuito ao longo de uma malha fechada.
- 27.05** Conhecer a regra das resistências.
- 27.06** Conhecer a regra das fontes.
- 27.07** Saber que resistores em série são atravessados pela mesma corrente, que é a mesma do resistor equivalente.
- 27.08** Calcular o resistor equivalente de resistores em série.
- 27.09** Saber que a diferença de potencial entre as extremidades de um conjunto de resistores em série é a soma das diferenças de potencial entre os terminais dos resistores.



27.10 Calcular a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito.

27.11 Conhecer a diferença entre uma fonte real e uma fonte ideal e substituir, no diagrama de um circuito, uma fonte real por uma fonte real em série com uma resistência.

27.12 Calcular a diferença de potencial entre os terminais de uma fonte real para os dois sentidos possíveis da corrente no circuito.

27.13 Saber o que significa aterrar um circuito, e representar esse aterramento em um diagrama esquemático.

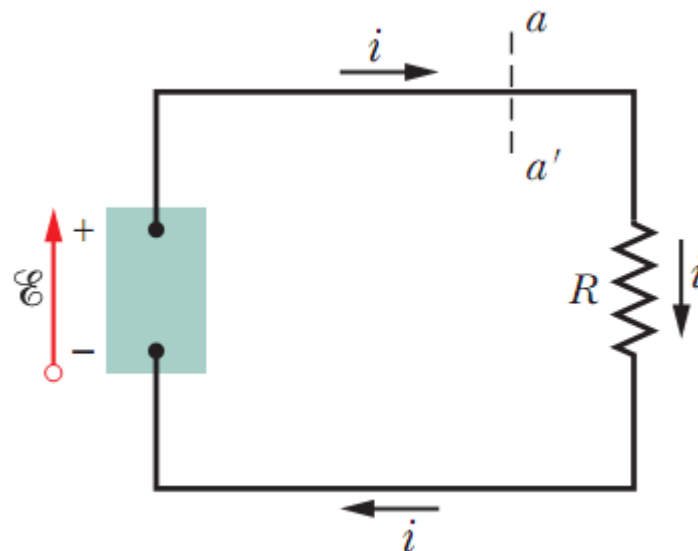
27.14 Saber que aterrar um circuito não afeta a corrente do circuito.

27.15 Calcular a taxa de dissipação de energia de uma fonte real.

27.16 Calcular a potência fornecida ou recebida por uma fonte.

Para produzir uma corrente constante, precisamos de uma "bomba" de cargas, um dispositivo que, realizando trabalho sobre os portadores de carga, mantenha uma diferença de potencial entre dois terminais. Esse dispositivo é chamado de **fonte de tensão**, ou, simplesmente, **fonte**.

A figura mostra um circuito formado por uma fonte (uma bateria, por exemplo) e uma única resistência R . A fonte de tensão mantém um dos terminais (o terminal positivo ou terminal +) em um potencial mais elevado que o outro (o terminal negativo ou terminal –). Como mostra a figura, a força eletromotriz da fonte é representada por uma seta que aponta do terminal negativo para o terminal positivo. Um pequeno círculo na origem da seta que representa a força eletromotriz serve para distingui-la das setas que indicam a direção da corrente.



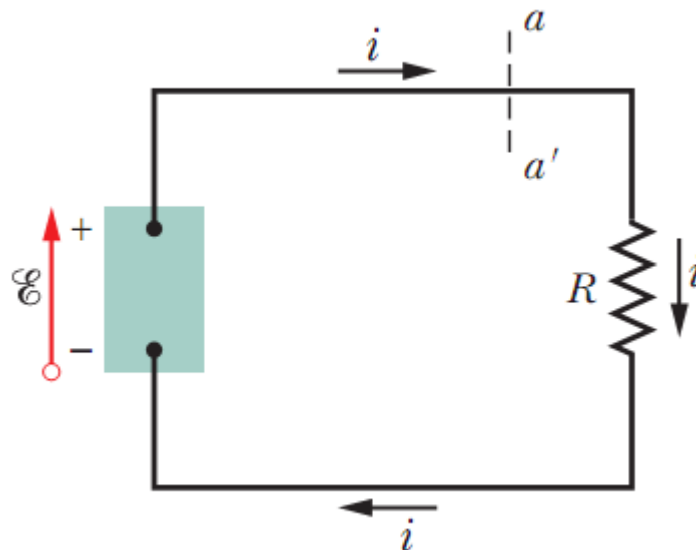


Uma fonte de tensão realiza trabalho sobre as cargas para manter uma diferença de potencial entre os terminais. Se dW é o trabalho realizado para transportar uma carga positiva dq do terminal negativo para o terminal positivo, a força eletromotriz da fonte é dada por

$$\mathcal{E} = \frac{dW}{dq} \quad (\text{definição de } \mathcal{E})$$

Uma **fonte de tensão ideal** é uma fonte na qual os portadores de carga não encontram resistência ao se deslocarem do terminal negativo para o terminal positivo. A diferença de potencial entre os terminais de uma fonte ideal é igual à força eletromotriz da fonte.

Uma **fonte de tensão real** possui uma resistência interna diferente de zero. Quando uma fonte real não está ligada a um circuito e, portanto, não conduz uma corrente elétrica, a diferença de potencial entre os terminais é igual à força eletromotriz. Quando a fonte conduz uma corrente, a diferença de potencial é menor que a força eletromotriz.





Cálculo da Corrente em Circuitos de uma Malha

Método da Energia

De acordo com a equação $P = i^2 R$, em um intervalo de tempo dt , uma energia dada por $i^2 R dt$ é transformada em energia térmica no resistor da figura. Dizemos que essa energia é **dissipada**. (Como estamos supondo que a resistência dos fios é desprezível, eles não dissipam energia.)

Durante o mesmo intervalo de tempo, uma carga $dq = i dt$ atravessa a fonte B; o trabalho realizado pela fonte sobre essa carga é

$$dW = \mathcal{E} dq = \mathcal{E} i dt$$

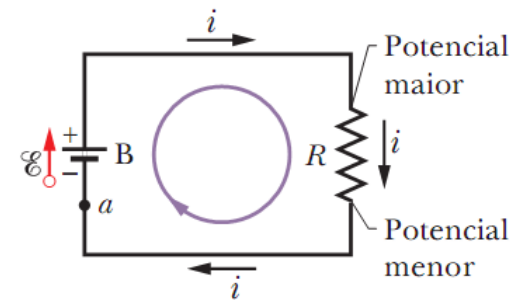
De acordo com a lei de conservação da energia, o trabalho realizado pela fonte (ideal) é igual à energia térmica que aparece no resistor

$$\mathcal{E} i dt = i^2 R dt$$

o que nos dá

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

A fonte faz uma corrente atravessar o resistor, do potencial maior para o potencial menor.





Cálculo da Corrente em Circuitos de uma Malha

Método do Potencial

Suponha que começamos no ponto a da figura, cujo potencial é V_a , e nos deslocamos mentalmente ao longo do circuito, somando algebricamente as diferenças de potencial que encontramos no caminho. Nosso ponto de partida é o terminal negativo da bateria. Como a bateria é ideal, a diferença de potencial entre os terminais é \mathcal{E} . Quando passamos do terminal negativo para o terminal positivo da bateria, a variação do potencial é $+\mathcal{E}$.

Quando completamos a volta, o potencial inicial, depois de modificado pelas variações de potencial ocorridas no percurso, deve ser igual ao potencial final, ou seja,

$$V_a + \mathcal{E} - iR = V_a$$

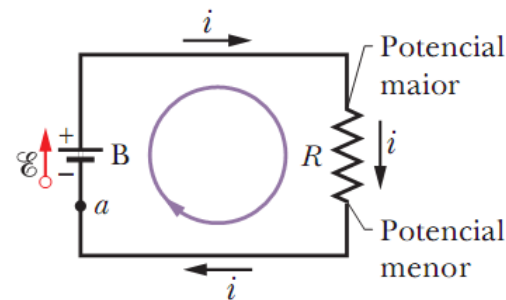
Subtraindo V_a de ambos os membros da equação, obtemos

$$\mathcal{E} - iR = 0$$

o que nos dá

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

A fonte faz uma corrente atravessar o resistor, do potencial maior para o potencial menor.





Cálculo da Corrente em Circuitos de uma Malha



REGRA DAS MALHAS: A soma algébrica das variações de potencial encontradas ao longo de uma malha completa de um circuito é zero.

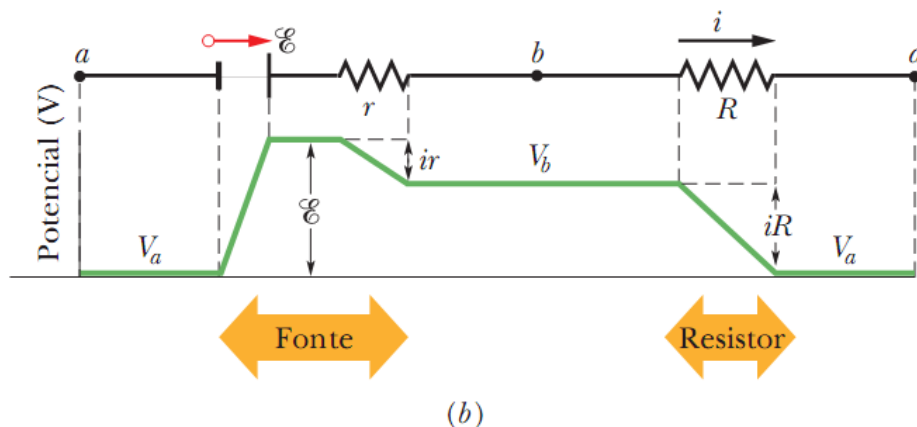
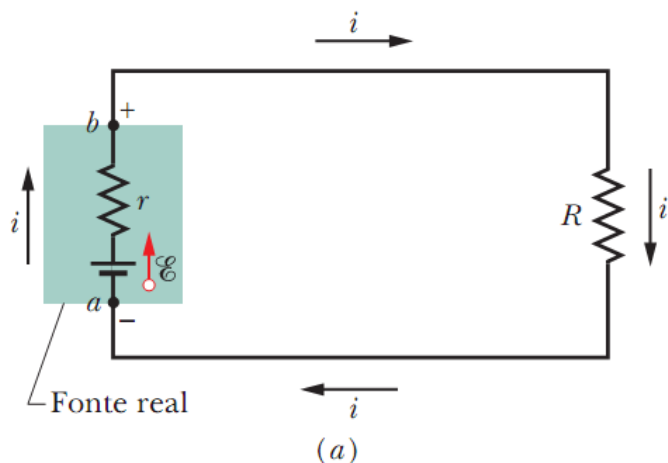


REGRA DAS RESISTÊNCIAS: Quando atravessamos uma resistência no sentido da corrente, a variação do potencial é $-iR$; quando atravessamos uma resistência no sentido oposto, a variação é $+iR$.



REGRA DAS FONTES: Quando atravessamos uma fonte ideal no sentido do terminal negativo para o terminal positivo, a variação do potencial é $+E$; quando atravessamos uma fonte no sentido oposto, a variação é $-E$.

Resistência Interna



A figura (a) mostra uma fonte real, de resistência interna r , ligada a um resistor de resistência R . A resistência interna é a resistência elétrica dos materiais condutores da fonte e, portanto, não pode ser removida. A figura (b) mostra graficamente as variações do potencial elétrico ao longo do circuito. Aplicando a regra das malhas ao circuito no sentido horário, a partir do ponto a , temos

$$\mathcal{E} - ir - iR = 0$$

Explicitando a corrente, obtemos

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Resistências em Série

A figura (a) mostra três resistências ligadas em série com uma fonte ideal. As resistências estão ligadas uma após a outra, e uma diferença de potencial é mantida pela fonte entre os pontos *a* e *b*. As diferenças de potencial entre os terminais das resistências produzem a mesma corrente *i* em todas as resistências. Para determinar a resistência total R_{eq} da figura (b), aplicamos a regra das malhas aos dois circuitos. No caso da figura (a), começando no ponto *a* e percorrendo o circuito no sentido horário, obtemos

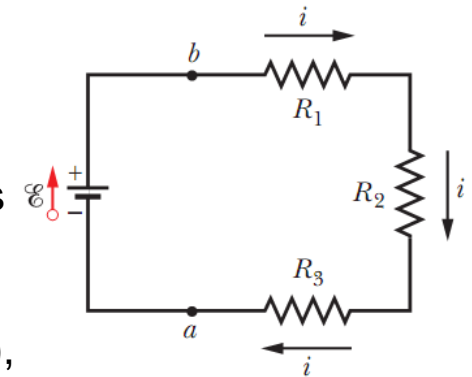
$$\mathcal{E} - iR_1 - iR_2 - iR_3 = 0, \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

No caso da figura (b), com as três resistências substituídas por uma única resistência equivalente R_{eq} , obtemos

$$\mathcal{E} - iR_{eq} = 0, \quad i = \frac{\mathcal{E}}{R_{eq}}.$$

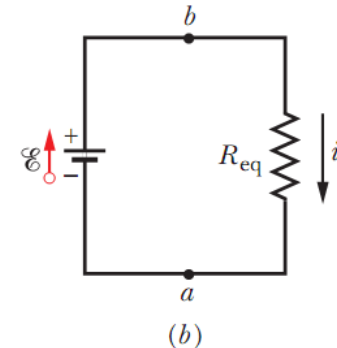
Igualando as duas equações, obtemos

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad \rightarrow \quad R_{eq} = \sum_{j=1}^n R_j \quad (n \text{ resistências em série})$$



(a)

Resistores em série e o resistor equivalente são atravessados pela mesma corrente.



(b)



Resistências em Série

Quando uma diferença de potencial V é aplicada a resistências ligadas em série, a corrente i é a mesma em todas as resistências, e a soma das diferenças de potencial das resistências é igual à diferença de potencial aplicada V .

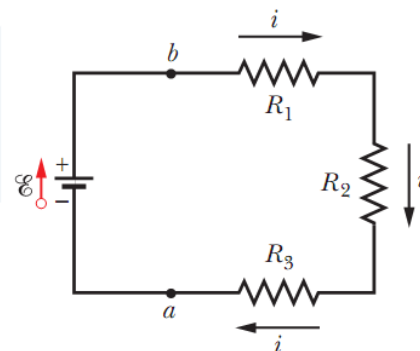
Resistências ligadas em série podem ser substituídas por uma resistência equivalente R_{eq} percorrida pela mesma corrente i e com a mesma diferença de potencial *total* V que as resistências originais.



Teste 2

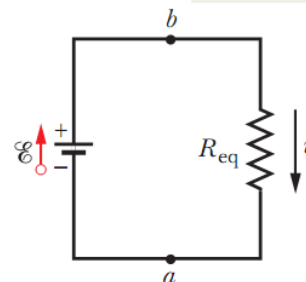
Na Fig. 27-5a, se $R_1 > R_2 > R_3$, coloque as três resistências na ordem decrescente (a) da corrente que passa pelas resistências e (b) da diferença de potencial entre os terminais das resistências.

Respostas: (a) todas empatadas
(b) V_1 , V_2 e V_3



(a)

Resistores em série e o resistor equivalente são atravessados pela mesma corrente.



(b)



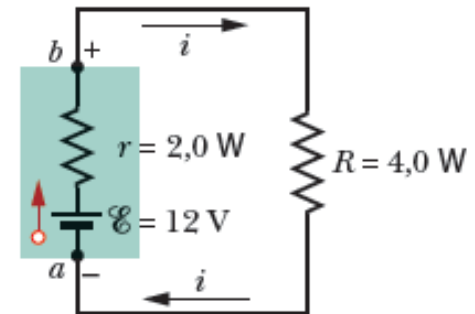
Diferença de Potencial

Para determinar a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito, começamos em um dos pontos e percorremos o circuito até o outro ponto, somando algebricamente as variações de potencial que encontramos no percurso.

A resistência interna reduz a diferença de potencial entre os terminais de uma fonte real.

Diferença de Potencial entre os Terminais de uma Fonte Real: Na figura, a diferença de potencial $V_b - V_a$ é a diferença de potencial V entre os terminais da fonte e, portanto, é dada por

$$V = \mathcal{E} - ir$$



Aterramento de um Circuito: Aterrar um circuito significa ligar um ponto do circuito à superfície da Terra (na verdade, ao solo úmido, que é um bom condutor de eletricidade)

Potência de uma Fonte: A potência P_{fonte} fornecida por uma fonte é dada por

$$P_{\text{fonte}} = i\mathcal{E} \quad (\text{potência fornecida pela fonte})$$



27-2 Circuitos com Mais de uma Malha



Objetivos do Aprendizado

27.17 Conhecer a regra dos nós.

27.18 Desenhar um diagrama esquemático de um circuito formado por uma fonte e três resistores em paralelo e saber distingui-lo do diagrama de um circuito formado por uma bateria e três resistores em série.

27.19 Saber que resistores em paralelo estão submetidos à mesma diferença de potencial, que também é a mesma do resistor equivalente.

27.20 Calcular a resistência do resistor equivalente de vários resistores em paralelo.

27.21 Saber que a corrente total que atravessa uma combinação de resistores em paralelo é a soma das correntes que atravessam os resistores.

27.22 No caso de um circuito com uma fonte, alguns resistores em paralelo e outros resistores em série, simplificar o circuito por partes, usando resistores equivalentes, até que a corrente na fonte possa ser determinada, e depois trabalhar no sentido inverso para calcular a corrente e a diferença de potencial de cada resistor.



- 27.23** Se um circuito não pode ser simplificado usando resistores equivalentes, identificar as malhas do circuito, escolher nomes e sentidos para as correntes dos ramos, escrever equações para todas as malhas usando a regra das malhas e resolver o sistema de equações resultante para obter as correntes dos ramos.
- 27.24** Em um circuito com fontes reais em série, substituí-las por uma única fonte ideal em série com um resistor.
- 27.25** Em um circuito com fontes reais em paralelo, substituí-las por uma única fonte ideal em série com um resistor.

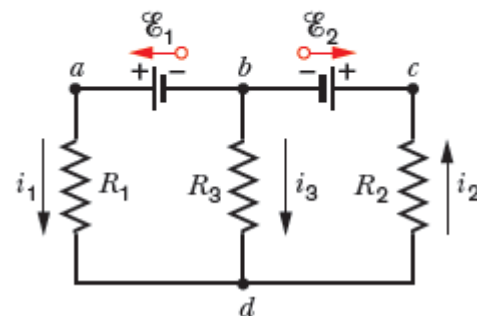


REGRA DOS NÓS: A soma das corrente que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem do nó.

A corrente que sai de um nó é igual à corrente que entra (a carga é conservada).

A figura mostra um circuito com duas malhas. Percorrendo a malha da esquerda no sentido anti-horário a partir do ponto b , a regra das malhas nos dá

$$\mathcal{E}_1 - i_1 R_1 + i_3 R_3 = 0$$



Percorrendo a malha da direita no sentido anti-horário a partir do ponto b , a regra das malhas nos dá

$$-i_3 R_3 - i_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0$$

Percorrendo a malha maior no sentido anti-horário a partir do ponto b , a regra das malhas nos dá

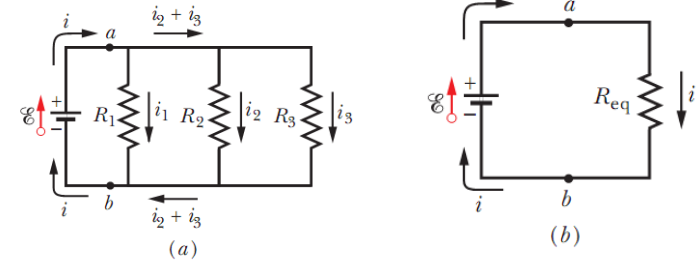
$$\mathcal{E}_1 - i_1 R_1 - i_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0$$

que é a soma das equações das duas malhas menores.

Resistências em Paralelo

A figura (a) mostra três resistências ligadas em paralelo a uma fonte de tensão ideal. A diferença de potencial aplicada V é mantida pela fonte. Na figura (b), as três resistências em paralelo foram substituídas por uma resistência equivalente R_{eq} .

Resistores em paralelo e o resistor equivalente estão submetidos à mesma diferença de potencial.



Para obter o valor de R_{eq} na figura (b), escrevemos as correntes das resistências da figura (a) na forma $i_1 = \frac{V}{R_1}$, $i_2 = \frac{V}{R_2}$, e $i_3 = \frac{V}{R_3}$

em que V é a diferença de potencial entre os pontos a e b . Aplicando a regra dos nós ao ponto a da figura (a) e substituindo as correntes por seus valores, obtemos

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

No caso da figura (b), com as três resistências substituídas por uma única resistência equivalente, obtemos

$$i = \frac{V}{R_{eq}}$$

e, portanto,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \quad (n \text{ resistências em paralelo})$$



Resistores e Capacitores

Tabela 27-1 Resistores e Capacitores em Série e em Paralelo

Em série	Em paralelo	Em série	Em paralelo
<u>Resistores</u>		<u>Capacitores</u>	
$R_{eq} = \sum_{j=1}^n R_j$ Eq. 27-7	$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}$ Eq. 27-24	$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}$ Eq. 25-20	$C_{eq} = \sum_{j=1}^n C_j$ Eq. 25-19
A corrente é a mesma em todos os resistores	A diferença de potencial é a mesma em todos os resistores	A carga é a mesma em todos os capacitores	A diferença de potencial é a mesma em todos os capacitores



Teste 4

Uma fonte com uma diferença de potencial V entre os terminais é ligada a uma combinação de dois resistores iguais e passa a conduzir uma corrente i . Qual é a diferença de potencial e qual a corrente em um dos resistores, se os resistores estiverem ligados (a) em série e (b) em paralelo?

Respostas:

- (a) $V/2$ e i
- (b) V e $i/2$

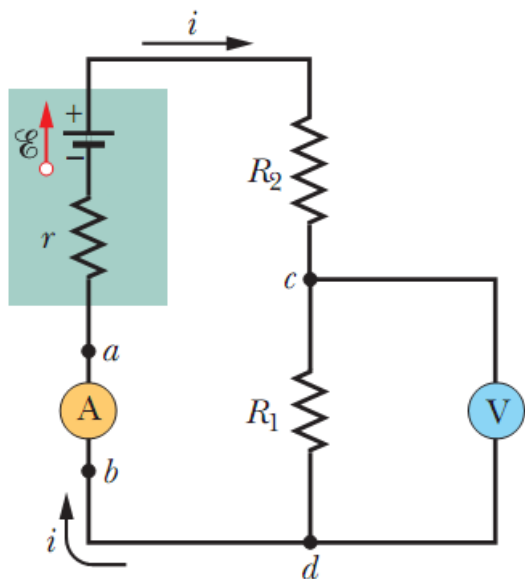


27-3 O Amperímetro e o Voltímetro



Objetivo do Aprendizado

27.26 Saber como funcionam o amperímetro e o voltímetro, e qual deve ser a resistência interna desses instrumentos para que indiquem corretamente a grandeza que está sendo medida.



O instrumento usado para medir correntes é chamado de **amperímetro**. Para medir a corrente em um fio, em geral precisamos desligar ou cortar o fio e introduzir o amperímetro no circuito para que a corrente passe pelo aparelho. Na figura, o amperímetro A está sendo usado para medir a corrente i . É essencial que a resistência R_A do amperímetro seja muito menor que todas as outras resistências do circuito; se não for assim, a simples presença do medidor mudará o valor da corrente que se pretende medir.

O instrumento usado para medir diferenças de potencial é chamado de **voltímetro**. Para medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito, ligamos os terminais do voltímetro a esses pontos sem desligar nem cortar nenhum fio do circuito. Na figura, o voltímetro V está sendo usado para medir a diferença de potencial entre os terminais de R_1 . É essencial que a resistência R_V do voltímetro seja muito maior que a resistência dos elementos do circuito que estão ligados entre os mesmos pontos do circuito que o voltímetro. Se não for assim, a simples presença do medidor mudará o valor da diferença de potencial que se pretende medir.



27-4 Circuitos RC



Objetivos do Aprendizado

- 27.27** Desenhar diagramas esquemáticos de circuitos RC em que o capacitor está sendo carregado e de circuitos RC em que o capacitor está sendo descarregado.
- 27.28** Escrever a equação de malha (uma equação diferencial) de um circuito RC em que o capacitor está sendo carregado.
- 27.29** Escrever a equação de malha (uma equação diferencial) de um circuito RC em que o capacitor está sendo descarregado.
- 27.30** Saber como varia a carga do capacitor com o tempo em um circuito RC .
- 27.31** Calcular a diferença de potencial do capacitor de um circuito RC a partir da variação com o tempo da carga do capacitor.
- 27.32** Calcular a corrente e a diferença de potencial do resistor de um circuito RC em função do tempo.
- 27.33** Calcular a constante de tempo capacitiva τ de um circuito RC .
- 27.34** Calcular a carga e a diferença de potencial do capacitor no instante inicial e após um longo tempo para circuitos RC em que o capacitor está sendo carregado e circuitos RC em que o capacitor está sendo descarregado.



Carga de um capacitor: O capacitor C da figura está inicialmente descarregado. Para carregá-lo, colocamos a chave S na posição a . Isso completa um circuito RC série formado pelo capacitor, uma fonte de tensão ideal e um resistor R .

A carga do capacitor aumenta de acordo com a equação

$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{carga de um capacitor})$$

em que $C\mathcal{E} = q_0$ é a carga final do capacitor. Durante a carga, a corrente é

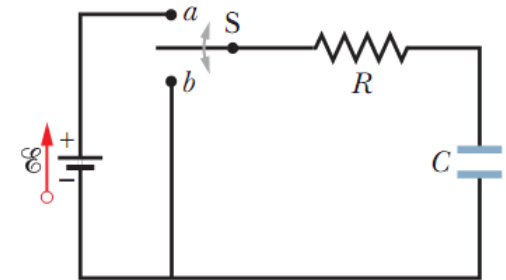
$$i = \frac{dq}{dt} = \left(\frac{\mathcal{E}}{R}\right)e^{-t/RC} \quad (\text{carga de um capacitor})$$

e a tensão é

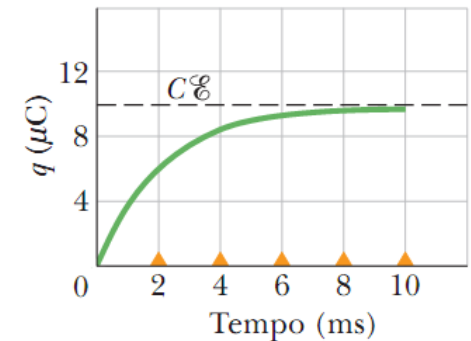
$$V_C = \frac{q}{C} = \mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{carga de um capacitor})$$

O produto RC é chamado de **constante de tempo capacitiva** do circuito e é representado pelo símbolo τ .

$$\tau = RC \quad (\text{constante de tempo})$$



Circuito RC



Carga do capacitor da figura acima em função do tempo.



Descarga de um capacitor: Suponha que o capacitor da figura está totalmente carregado, com um potencial V_0 igual à força eletromotriz da fonte. No instante $t = 0$, a chave S é colocada na posição b e o capacitor começa a se descarregar através do resistor R .

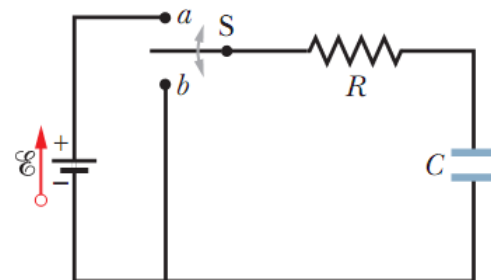
A carga do capacitor diminui de acordo com a equação

$$q = q_0 e^{-t/RC} \quad (\text{descarga de um capacitor})$$

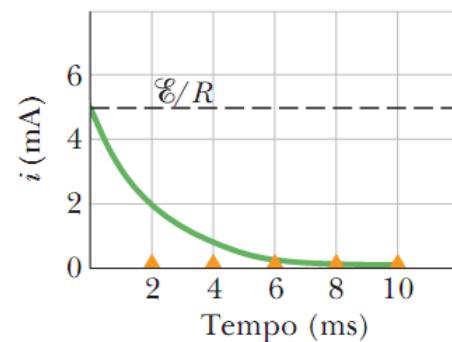
em que $q_0 (=CV_0)$ é a carga inicial do capacitor.

Durante a descarga, a corrente é

$$i = \frac{dq}{dt} = -\left(\frac{q_0}{RC}\right)e^{-t/RC} \quad (\text{descarga de um capacitor})$$



Circuito RC



Descarga do capacitor da figura acima em função do tempo.



Um capacitor que está sendo carregado se comporta inicialmente como um fio comum. Após um longo período de tempo, o capacitor se comporta como um fio partido.



27 Resumo



Força Eletromotriz

$$\mathcal{E} = \frac{dW}{dq} \quad \text{Eq. 27-1}$$

Circuitos de uma Malha

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad \text{Eq. 27-4}$$

Potência

- Potência transferida para um dispositivo

$$P = iV \quad \text{Eq. 27-14}$$

- Potência dissipada por um resistor

$$P_r = i^2 r \quad \text{Eq. 27-16}$$

- Potência fornecida por uma fonte

$$P_{\text{fonte}} = i\mathcal{E} \quad \text{Eq. 27-17}$$

Resistências em Série

$$R_{\text{eq}} = \sum_{j=1}^n R_j \quad \text{Eq. 27-7}$$

Resistências em Paralelo

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \quad \text{Eq. 27-24}$$

Circuitos RC

- A carga de um capacitor aumenta de acordo com a equação

$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) \quad \text{Eq. 27-33}$$

- A corrente durante a carga é

$$i = \frac{dq}{dt} = \left(\frac{\mathcal{E}}{R} \right) e^{-t/RC} \quad \text{Eq. 27-34}$$

- A corrente durante a descarga é

$$i = \frac{dq}{dt} = - \left(\frac{q_0}{RC} \right) e^{-t/RC} \quad \text{Eq. 27-40}$$