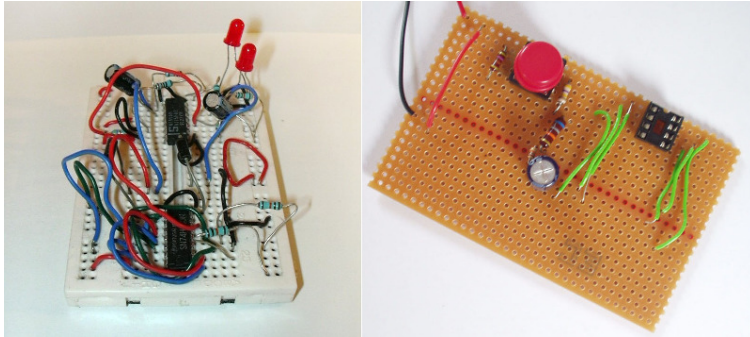


5. Circuitos de corrente contínua



Os elementos de circuitos são produzidos com terminais de tamanho padrão para facilitar a sua montagem. Uma forma de montar circuitos, sem ser preciso soldar (figura à esquerda), é com uma placa de teste (*breadboard*). Para construir circuitos mais duradouros, pode-se usar uma placa de circuito (*stripboard*), que é uma placa de um material isolador com furos e com pistas paralelas de cobre num dos lados (figura à direita); o contacto entre diferentes componentes consegue-se inserindo os terminais em furos que estejam na mesma pista, tal como na placa de teste, mas soldando os terminais sobre o cobre. Também se podem construir circuitos mais compactos, utilizando placas de circuito impresso (PCB). Uma PCB é semelhante a uma placa de circuito, mas as pistas de cobre e os furos são desenhados por medida para cada circuito específico.

5.1. Diagramas de circuito

Um circuito de corrente contínua, ou circuito C.C. (em inglês, *Direct Current*, D.C.), é um circuito em que todas as fontes de tensão têm força eletromotriz constante e todas as resistências são constantes. Se no circuito forem ligados condensadores, a corrente poderá variar em função do tempo (resposta transitória do circuito), mas passado algum tempo a carga e tensão nos condensadores atingem valores constantes.

Neste capítulo explica-se como calcular os valores iniciais e finais de correntes e cargas e no capítulo sobre processamento de sinais estuda-se a análise da resposta transitória dos circuitos de corrente contínua. Para analisar circuitos é conveniente usar os diagramas simplificados. Um exemplo de diagrama de circuito é a montagem usada para carregar um condensador e a seguir observar como diminui a diferença de potencial quando o condensador é descarregado através de um voltímetro. O diagrama do circuito é apresentado na figura 5.1. A pilha liga-se ao condensador durante algum tempo, até este ficar carregado e é logo desligada. A ação de ligar e desligar a pilha é representada no diagrama de circuito pelo interruptor, que estará fechado enquanto o condensador é carregado.

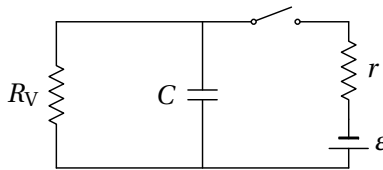


Figura 5.1.: Carga e descarga de um condensador.

O voltímetro é representado no diagrama por meio da sua resistência interna R_V . Geralmente, admite-se que o voltímetro não interfere com o circuito, sendo representado apenas pelas setas com sinais positivo e negativo, que indicam os pontos onde são ligados os terminais positivo e negativo do voltímetro. Neste caso a resistência do voltímetro é importante e, por isso, foi desenhada. Um voltímetro ideal teria uma resistência infinita, que não permitiria que o condensador descarregasse, permanecendo a sua diferença de potencial constante. Num voltímetro real, a carga no condensador produz uma corrente através do voltímetro, que faz diminuir a carga e, conseqüentemente, a diferença de potencial.

5.2. Leis dos circuitos

A análise de um circuito consiste em calcular a corrente ou diferença de potencial em cada resistência e a carga ou diferença de potencial em cada condensador. Com essas grandezas pode-se também determinar a potência que está a ser dissipada nas resistências e a energia armazenada nos condensadores. Para analisar os circuitos é conveniente usar duas regras gerais chamadas **leis de Kirchhoff**.

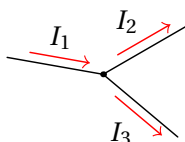


Figura 5.2.: Lei das correntes.

A primeira lei, a **lei dos nós** ou lei das correntes, estabelece que em qualquer ponto de um circuito onde há separação da corrente (nó), é igual a soma das correntes que entram no ponto e a soma das correntes que dele saem. Por exemplo, no nó representado na figura 5.2, há uma corrente I_1 a entrar no nó, e duas correntes I_2 e I_3 a sair. A lei das correntes implica:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (5.1)$$

Esta lei é válida sempre que as correntes são estacionárias; nomeadamente, quando a densidade da nuvem de cargas de condução permanece constante dentro do condutor, sem que haja acumulação de cargas em nenhum ponto; nesse caso, toda a carga que entra por um condutor, por unidade de tempo, deverá sair por outros condutores.

A segunda lei designada **lei das malhas**, ou lei das tensões, estabelece que a soma das diferenças de potencial, em qualquer percurso fechado (malha) num circuito, é sempre nula.

Por exemplo, o circuito na figura 5.3 tem três malhas: ABCDEA, BFGDCB e ABFGDEA. A lei das malhas associa uma equação a cada malha. A equação da malha ABCDEA é:

$$V_{B/A} + V_{C/B} + V_{D/C} + V_{E/D} + V_{A/E} = 0 \quad (5.2)$$

Na equação anterior, $V_{B/A}$ denota o potencial em B, em relação ao potencial em A, ou seja, a voltagem $V_B - V_A$. A equação anterior corrobora-se facilmente tendo em conta essa notação.

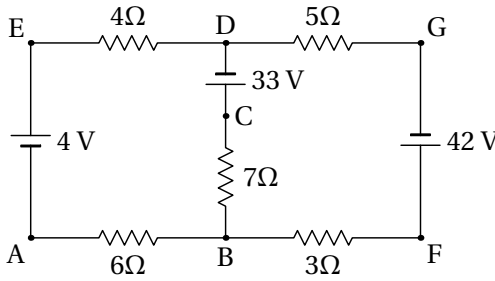


Figura 5.3.: Circuito com duas malhas.

5.3. Método das malhas

Nos circuitos com várias resistências estudados no capítulo 3 foi sempre possível substituir as resistências por uma resistência equivalente e calcular a corrente fornecida pela fonte bem como todas as correntes nas resistências.

Nos casos em que há várias fontes ou quando não é possível associar resistências (ou condensadores) em série e em paralelo até obter uma única resistência (ou condensador) equivalente, é útil usar o **método das malhas**. Por exemplo, no circuito da figura 5.4 nenhuma das resistências está em série ou em paralelo com qualquer outra. Como tal, não é possível usar o método do capítulo 3.

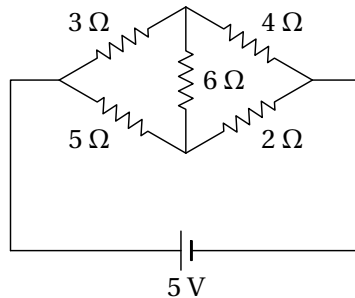


Figura 5.4.: Circuito com resistências que não estão nem em série nem em paralelo.

Usaremos o circuito da figura 5.4 para mostrar o fundamento do método das malhas. Na resolução de problemas não é necessário fazer uma análise como a que segue, pois basta aplicar as regras enunciadas no fim

da secção, para obter a matriz do circuito.

Como se mostra na figura 5.5, começa-se por identificar as 3 malhas do circuito e a cada malha atribui-se uma das 3 **correntes de malha** i_1 , i_2 e i_3 . Note-se que na figura 5.5, as malhas estão desenhadas com forma retangular, mas são equivalentes à malhas do circuito na figura 5.4. É conveniente escolher o mesmo sentido de rotação para todas as correntes de malha; no caso da figura 5.5, escolheu-se o sentido horário.

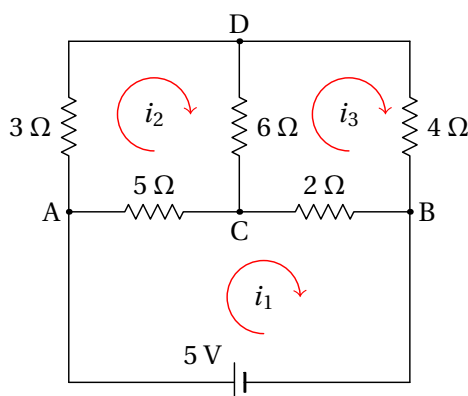


Figura 5.5.: Correntes de malha no circuito da figura 5.4.

Nos dispositivos que pertencem apenas a uma malha, a corrente é igual à corrente dessa malha. Por exemplo, na figura 5.5, a corrente na resistência de $3\ \Omega$ é igual a i_2 . Nos dispositivos situados entre duas malhas vizinhas, a corrente é a soma algébrica das correntes nessas duas malhas. Por exemplo, a corrente que na resistência de $5\ \Omega$ é $i_1 - i_2$, do ponto A para o C (ou, de forma equivalente, $i_2 - i_1$ de C para o A).

Com este método a regra dos nós é garantida em cada nó, e basta aplicar a regra das malhas a cada uma das três malhas para obter 3 equações com as 3 correntes de malha. As diferenças de potencial entre os vários pontos do circuito da figura 5.5, em função das correntes de malha, são as seguintes (unidades SI):

$$\begin{aligned} \Delta V_{C/A} &= -5(i_1 - i_2) & \Delta V_{B/C} &= -2(i_1 - i_3) & \Delta V_{BA} &= 5 \\ \Delta V_{D/A} &= -3 i_2 & \Delta V_{C/D} &= -6(i_2 - i_3) & \Delta V_{B/D} &= -4 i_3 \end{aligned} \quad (5.3)$$

substituindo esses valores, as três equações das malhas são:

$$\Delta V_{C/A} + \Delta V_{B/C} + \Delta V_{A/B} = -5 i_1 + 5 i_2 - 2 i_1 + 2 i_3 + 5 = 0 \quad (5.4)$$

$$\Delta V_{D/A} + \Delta V_{C/D} + \Delta V_{A/C} = -3 i_2 - 6 i_2 + 6 i_3 + 5 i_1 - 5 i_2 = 0 \quad (5.5)$$

$$\Delta V_{B/D} + \Delta V_{C/B} + \Delta V_{D/C} = -4 i_3 + 2 i_1 - 2 i_3 + 6 i_2 - 6 i_3 = 0 \quad (5.6)$$

Agrupando os termos que dependem de cada uma das correntes, pode-se escrever o sistema na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 7 & -5 & -2 \\ -5 & 14 & -6 \\ -2 & -6 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

O sistema matricial 5.7 foi obtido calculando primeiro as diferenças de potencial nas secções do circuito e aplicando a regra das malhas. No entanto, é possível escrever esse sistema imediatamente olhando para o circuito (figura 5.5) e usando as seguintes regras:

- Cada linha da matriz do circuito corresponde a uma das malhas.
- Na linha n , o número na coluna n será positivo e igual à soma de todas as resistências que houver na malha n .
- O número na linha n e coluna m (com n diferente de m) será negativo e com valor absoluto igual à soma de todas as resistências que existirem no segmento de circuito que demarca a fronteira entre as malhas n e m .
- Cada linha n na matriz com uma coluna no lado direito da equação 5.7 é igual à soma algébrica de todas as f.e.m. que houver na malha n . Nessa soma algébrica, são consideradas positivas todas as fontes em que o sentido arbitrado para a corrente passe do elétrodo negativo para o positivo (aumento de potencial) e negativas todas as fontes em que o sentido arbitrado para a corrente passe do elétrodo positivo para o negativo (diminuição de potencial).

A matriz do circuito é sempre simétrica, com os elementos na diagonal positivos e todos os restantes elementos negativos. No exemplo 5.1 as regras acima enunciadas são usadas para escrever diretamente o sistema matricial de equações do circuito.

As 3 correntes de malha são a solução do sistema 5.7, que pode ser obtida por qualquer dos métodos de resolução de sistemas de equações lineares,

por exemplo, a regra de Cramer:

$$i_1 = \begin{vmatrix} 5 & -5 & -2 \\ 0 & 14 & -6 \\ 0 & -6 & 12 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 7 & -5 & -2 \\ -5 & 14 & -6 \\ -2 & -6 & 12 \end{vmatrix} = 1.473 \text{ A} \quad (5.8)$$

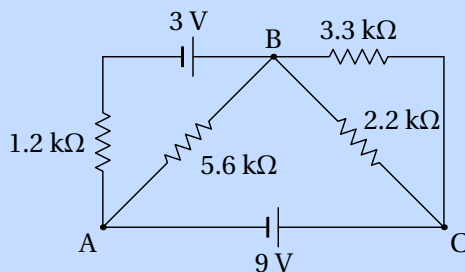
$$i_2 = \begin{vmatrix} 7 & 5 & -2 \\ -5 & 0 & -6 \\ -2 & 0 & 12 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 7 & -5 & -2 \\ -5 & 14 & -6 \\ -2 & -6 & 12 \end{vmatrix} = 0.804 \text{ A} \quad (5.9)$$

$$i_3 = \begin{vmatrix} 7 & -5 & 5 \\ -5 & 14 & 0 \\ -2 & -6 & 0 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 7 & -5 & -2 \\ -5 & 14 & -6 \\ -2 & -6 & 12 \end{vmatrix} = 0.647 \text{ A} \quad (5.10)$$

Neste caso, todas as correntes obtidas são positivas, o que indica que o sentido das correntes de malha coincide com os sentidos arbitrados na figura 5.5. A corrente que passa pela fonte é então $I_{\text{fem}} = 1.473 \text{ mA}$; a corrente na resistência de 3Ω é $I_3 = 0.804 \text{ mA}$ e a corrente na resistência de 4Ω é $I_4 = 0.647 \text{ mA}$ (ver figura 5.5). Na resistência de 5Ω , entre as malhas 1 e 2, a corrente é $I_5 = i_1 - i_2 = 0.669 \text{ mA}$, para a direita, que é o sentido de i_1 , porque i_1 é maior que i_2 . Na resistência de 2Ω a corrente é $I_2 = 0.826 \text{ mA}$, para a direita, e na resistência de 6Ω a corrente é $I_6 = 0.157 \text{ mA}$, para baixo porque $i_2 > i_3$.

Exemplo 5.1

No circuito representado no diagrama, calcule: (a) A intensidade e sentido da corrente na resistência de $5.6 \text{ k}\Omega$. (b) A diferença de potencial na resistência de $3.3 \text{ k}\Omega$. (c) A potência fornecida ou dissipada por cada uma das fontes.



Resolução. Começa-se por escolher um sistema consistente de unidades, para poder trabalhar com números, sem ter que escrever unidades em

cada equação. Expressando os valores das resistências em $k\Omega$ e a diferença de potencial em V, os valores das correntes aparecem em mA.

O circuito tem 3 malhas; no entanto, pode-se reduzir o número de malhas para 2, pois as resistências de $2.2\ k\Omega$ e $3.3\ k\Omega$ estão em paralelo e podem ser substituídas por uma única resistência: $2.2 \parallel 3.3 = (2.2 \times 3.3) / (2.2 + 3.3) = 1.32$.

O circuito equivalente obtido, com duas correntes de malha, é:

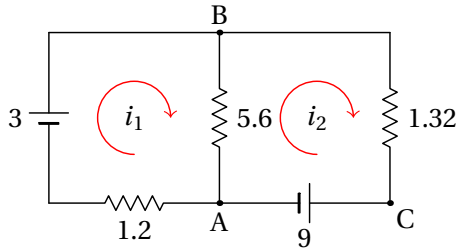


Figura 5.6.: Circuito equivalente para o exemplo 5.1.

O sistema matricial correspondente a esse circuito é:

$$\begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ -9 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Usando o *Maxima*, a solução do sistema é:

```
(%i1) float (solve ([6.8*i1 - 5.6*i2 = 3, -5.6*i1 + 6.92*i2 = -9]));
(%o1)  [[i2 = -2.829, i1 = -1.888]]
```

e os sinais negativos das duas correntes indicam que são no sentido oposto ao sentido que foi arbitrado no diagrama. (a) Na resistência de $5.6\ k\Omega$ passa a corrente de malha 1.888 , no sentido de A para B, e a corrente de malha 2.829 , no sentido de B para A. Conseqüentemente, a corrente nessa resistência é $2.829 - 1.888 = 0.941\ \text{mA}$, de B para A. (b) A corrente na resistência de $1.32\ k\Omega$ é igual à segunda corrente de malha, $2.829\ \text{mA}$, de C para B. Como tal, a diferença de potencial entre C e B, que é também a diferença de potencial na resistência de $3.3\ k\Omega$, é $1.32 \times 2.829 = 3.73\ \text{V}$ (maior potencial em C do que em B). (c) A corrente que passa pela fonte de $3\ \text{V}$ é igual á primeira corrente de malha, $1.888\ \text{mA}$; como essa corrente passa do

elétrodo positivo para o negativo, a fonte de 3 V dissipa uma potência de $1.888 \times 3 = 5.664$ mW. Na fonte de 9 V, a corrente é igual à segunda corrente de malha, 2.829 mA; como essa corrente passa do eletrodo negativo para o positivo, a fonte fornece uma potência de $2.829 \times 9 = 25.46$ mW.

5.4. Princípio de sobreposição

No exemplo 5.1, se cada uma das correntes de malha i_1 e i_2 for separada em duas parcelas, $i_1 = I_1 + J_1$ e $i_2 = I_2 + J_2$, a equação matricial 5.11 pode ser escrita da forma seguinte:

$$\begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3+0 \\ 0-9 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

E, se as correntes I_1 , I_2 , J_1 e J_2 forem soluções dos dois sistemas:

$$\begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

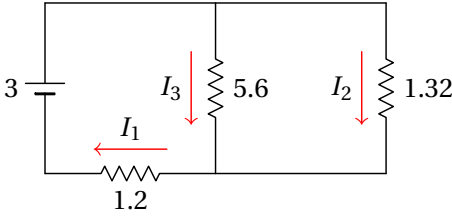
$$\begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -9 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

ficará garantido que i_1 e i_2 são a solução da equação 5.11. Estes dois sistemas de equações acima correspondem a dois circuitos mais simples do que o circuito original na figura 5.6, em cada um desses circuitos uma das fontes é substituída por um fio com resistência nula. Esses dois novos circuitos são tão simples, que podem ser resolvidos sem recorrer ao método das malhas, como mostra o exemplo seguinte.

Exemplo 5.2

Resolva novamente o exemplo 5.1, usando o princípio de sobreposição.

Resolução. Colocando a fonte de 9 V em curto-circuito na figura 5.6, obtém-se o seguinte circuito:



As correntes I_1 , I_2 e I_3 são as correntes nas três resistências, em unidades de mA. Note-se que essas já são as correntes reais e não correntes de malha. A resistência total entre os terminais da fonte é:

$$(5.6 \parallel 1.32) + 1.2 = 2.2682$$

Como tal, a corrente I_1 é:

$$I_1 = \frac{3}{2.2682} = 1.323$$

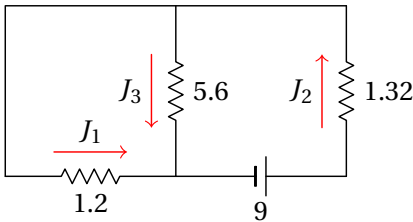
A diferença de potencial no conjunto em paralelo ($5.6 \parallel 1.32$) é

$$\Delta V_2 = \Delta V_3 = \left(\frac{5.6 \times 1.32}{5.6 + 1.32} \right) I_1 = 1.0682 \times 1.323 = 1.413$$

e as outras duas correntes são:

$$I_2 = \frac{1.413}{1.32} = 1.07 \quad I_3 = \frac{1.413}{5.6} = 0.252$$

Colocando a fonte de 3 V em curto-circuito na figura 5.6, obtém-se o seguinte circuito:



As correntes nas três resistências são agora J_1 , J_2 e J_3 . Note-se que as correntes J_1 e J_2 têm sentidos opostos aos sentidos de I_1 e I_2 . A resistência total entre os terminais da fonte é:

$$(1.2 \parallel 5.6) + 1.32 = 2.3082$$

e, como tal, a corrente J_2 é:

$$J_2 = \frac{9}{2.3082} = 3.899$$

A diferença de potencial no conjunto em paralelo ($1.2 \parallel 5.6$) é

$$\Delta V_1 = \Delta V_3 = \left(\frac{1.2 \times 5.6}{1.2 + 5.6} \right) J_2 = 0.9882 \times 3.899 = 3.853$$

e as outras duas correntes são:

$$J_1 = \frac{3.853}{1.2} = 3.21 \quad J_3 = \frac{3.853}{5.6} = 0.688$$

Com estes resultados e olhando para os dois diagramas de circuito, pode-se calcular:

$$\begin{aligned} I_{1,2} &= J_1 - I_1 = 3.21 - 1.323 = 1.89 \text{ mA} && \text{(para a direita)} \\ I_{5,6} &= J_2 - I_2 = 3.899 - 1.07 = 2.83 \text{ mA} && \text{(para cima)} \\ I_{1,32} &= I_3 + J_3 = 0.252 + 0.688 = 0.94 \text{ mA} && \text{(para baixo)} \end{aligned}$$

que são os mesmos resultados obtidos usando o método das malhas. O resto da resolução é segue os mesmos passos já feitos quando as correntes foram calculadas pelo método das malhas.

5.5. Circuitos com condensadores

A diferença de potencial num condensador é diretamente proporcional à carga armazenada nas suas armaduras. Se ligarmos um condensador, inicialmente sem carga, entre dois pontos de um circuito, a sua diferença de potencial inicial é nula; é como se, nesse instante, fosse feito um curto-circuito entre os dois pontos com um fio de resistência nula. Nos instantes seguintes a diferença de potencial aumenta, à medida que entra carga no condensador; como a diferença de potencial no condensador não pode aumentar indefinidamente, a carga e a tensão atingirão valores finais constantes.

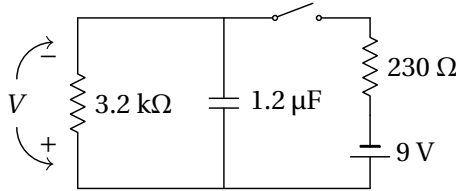
Quando a carga e a tensão no condensador alcançarem os seus valores finais, a corrente no condensador é nula e o condensador pode então ser considerado como um interruptor aberto que não deixa passar corrente. O aumento da carga até ao valor final, no período em que a corrente diminui do valor inicial até zero, constitui a **resposta transitória** à alteração produzida pela ligação da fonte.

A resposta transitória será estudada no capítulo sobre processamento de sinais. No presente capítulo consideram-se apenas os valores iniciais e finais das grandezas elétricas nos circuitos de corrente contínua. Todos os condensadores no circuito podem ser substituídos por fios com resistência nula, no instante inicial $t = 0$ e por interruptores abertos para calcular os valores finais. O tempo necessário para as cargas atingirem os valores finais é habitualmente muito curto.

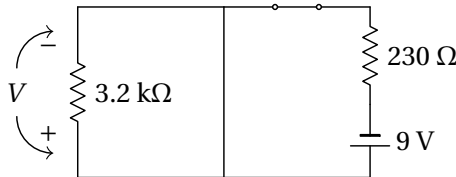
Exemplo 5.3

Um condensador de $1.2 \mu\text{F}$, inicialmente descarregado, liga-se a uma pilha com f.e.m. de 9 V e resistência interna de 230Ω e usa-se um voltímetro com resistência interna de $3.2 \text{ k}\Omega$ para medir a voltagem no condensador. (a) Determine as correntes inicial e final na pilha. (b) Determine o valor da carga final do condensador.

Resolução. A ligação do condensador à pilha pode ser representada por um interruptor que está inicialmente aberto. O voltímetro deve ser ligado em paralelo ao condensador e, assim sendo, representa-se por uma resistência de $3.2 \text{ k}\Omega$ em paralelo com o condensador. O diagrama do circuito é então



(a) No instante inicial, quando se fecha o interruptor, a voltagem do condensador é nula, porque está descarregado, sendo equivalente a um fio com resistência nula; o diagrama equivalente é o seguinte

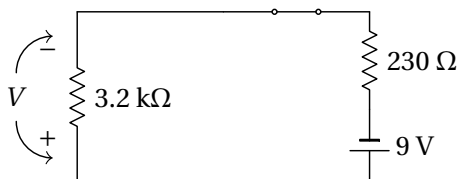


Note-se que toda a corrente que sai da fonte passa por esse fio e nenhuma corrente passa pelo voltímetro, porque a resistência do fio é nula. Outra forma de explicar este resultado é que como a resistência do fio é nula, a diferença de potencial nele também é nula e como está em paralelo com o voltímetro, a voltagem do voltímetro é nula (está em curto-circuito); a corrente no volímetro é $\Delta V/R$ e como ΔV é nula, a corrente no voltímetro também é nula. A corrente no instante inicial é então igual a (unidades SI)

```
(%i2) I0: float(9/230);
```

```
(%o2)      0.03913
```

Quando o condensador fica completamente carregado, é então equivalente a um interruptor aberto e o circuito equivalente é:



e a corrente final é igual a

```
(%i3) I: float(9/(3200 + 230));
(%o3)      0.002624
```

(b) Como o condensador está ligado em paralelo com o voltímetro, a diferença de potencial final entre as suas armaduras é igual à diferença de potencial final na resistência de 3.2Ω , que é:

```
(%i4) DV: 3200*I;
(%o4)      8.397
```

e a carga final do condensador é igual a

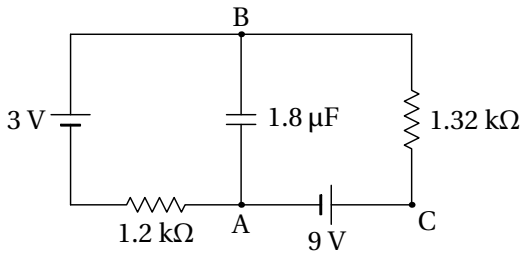
```
(%i5) Q: 1.2e-6*DV;
(%o5)      1.008 × 10-5
```

ou seja, $Q = 10.076 \mu\text{C}$. Note-se que os resultados dos comandos do Maxima mostram apenas 4 algarismos significativos, mas internamente está a ser usada uma precisão maior nos cálculos e nos valores armazenados nas variáveis.

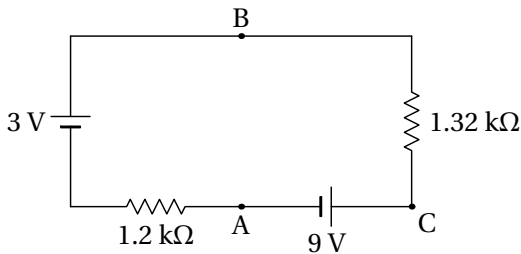
Exemplo 5.4

No circuito do exemplo 5.1, se a resistência de $5.6 \text{ k}\Omega$ for substituída por um condensador de $1.8 \mu\text{F}$, qual a carga final desse condensador e qual a sua polaridade?

Resolução. O diagrama do circuito é:



Quando a carga alcança o valor final, o condensador atua como interruptor aberto e o circuito equivalente é:



Como tal, o circuito também é equivalente a uma fonte única de 6 V, no mesmo sentido da fonte de 9 V, ligada a uma resistência de 2.52 kΩ. A corrente é então no sentido anti-horário e com intensidade igual a

$$I = \frac{6}{2520}$$

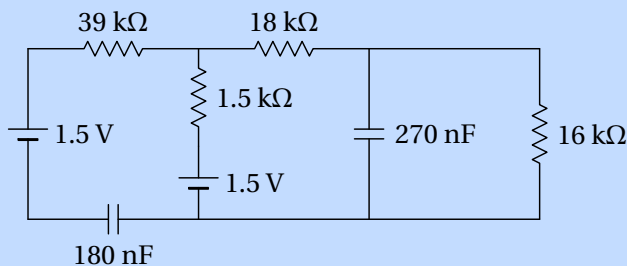
Essa corrente permite calcular a diferença de potencial no condensador (igual à diferença de potencial entre os pontos A e B) e a carga:

```
(%i6) I: float(6/2520);
(%o6)      0.002381
(%i7) DV: 9 - 1320*I;
(%o7)      5.857
(%i8) Q: 1.8e-6*DV;
(%o8)      1.054 × 10-5
```

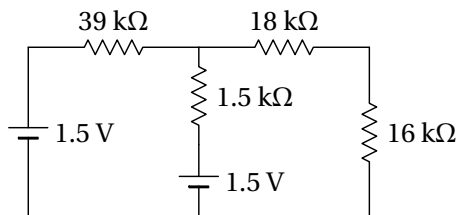
A carga final do condensador é então 10.543 μC e a polaridade é positiva na armadura ligada ao ponto B e negativa na armadura ligada ao ponto A (o cálculo de DV com o comando %i7 foi feito admitindo um potencial de B maior do que o potencial de A).

Exemplo 5.5

No circuito representado no diagrama, determine a potência dissipada em cada resistência e a energia armazenada em cada condensador, no estado estacionário.



Resolução. Quando o circuito estiver no estado estacionário, os condensadores comportam-se como interruptores abertos e o circuito equivalente é o seguinte



Na resistência de $39 \text{ k}\Omega$ a corrente é nula (não tem por onde circular) e o circuito tem apenas uma malha, com resistência total $1.5 + 18 + 16 = 35.5 \text{ k}\Omega$ e corrente igual a

$$I: 1.5/35.5e3;$$

$$4.225 \times 10^{-5}$$

A partir dessa corrente calculam-se a seguir todas as potências dissipadas nas resistências e as energias armazenadas nos condensadores.

- Na resistência de $39 \text{ k}\Omega$, $P = 0$, já que a corrente é nula.
- Na resistência de $18 \text{ k}\Omega$,

$$P_{18}: 18e3 * I^2;$$

$$3.214 \times 10^{-5}$$

$$P = 32.136 \mu\text{W}$$

- Na resistência de 16 k Ω ,

```
(%i11) P16: 16e3*I^2;
(%o11)      2.857 x 10^-5
```

$$P = 28.566 \mu\text{W}$$

- Na resistência de 1.5 k Ω ,

```
(%i12) P1_5: 1.5e3*I^2;
(%o12)      2.678 x 10^-6
```

$$P = 2.678 \mu\text{W}$$

- No condensador de 270 nF, a diferença de potencial é a mesma que na resistência de 16 k Ω :

```
(%i13) DV: 16e3*I;
(%o13)      0.6761
(%i14) U270: 270e-9*DV^2/2;
(%o14)      6.17 x 10^-8
```

$$U = 61.702 \text{ nJ}$$

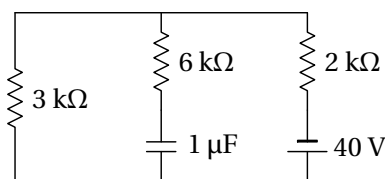
- No condensador de 180 nF, um possível percurso entre os dois pontos onde está ligado passa pela fonte do lado esquerdo, pela resistência de 39 k Ω (com diferença de potencial nula), pela resistência de 1.5 k Ω e pela segunda fonte. Como tal,

```
(%i15) DV: 1.5 + 1.5e3*I - 1.5;
(%o15)      0.06338
(%i16) U180: 180e-9*DV^2/2;
(%o16)      3.615 x 10^-10
```

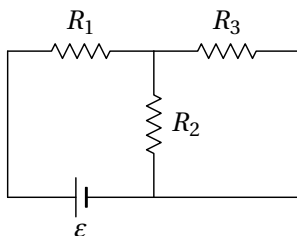
$$U = 0.3615 \text{ nJ}$$

Perguntas

- Qual dos seguintes princípios físicos está relacionado com a lei dos nós?
 - Conservação da energia.
 - Quantização da carga.
 - Conservação da carga.
 - Conservação da quantidade de movimento.
 - Ação e reação.
- Num condensador dentro de um circuito de corrente contínua, qual das seguintes grandezas tem sempre um valor final nulo?
 - A carga.
 - A diferença de potencial.
 - A corrente.
 - A capacidade.
 - A energia armazenada.
- Uma fonte de voltagem constante foi ligada a um condensador e 3 resistências, como mostra o diagrama. Qual a intensidade da corrente final fornecida pela fonte?

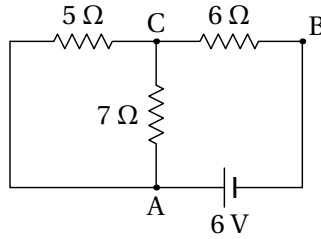


- 5 mA
 - 8 mA
 - 10 mA
 - 20 mA
 - 0
- Se I_1 , I_2 e I_3 são os valores absolutos das correntes que circulam pelas resistências R_1 , R_2 e R_3 no circuito da figura, qual das equações é correta?



- A. $I_1 + I_2 = I_3$
- B. $I_1 + I_3 = I_2$
- C. $I_2 + I_3 = I_1$
- D. $I_1 = I_2$
- E. $I_2 = I_3$

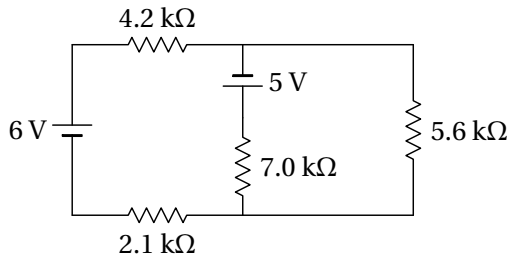
5. Qual das afirmações seguintes, sobre o potencial nos pontos A, B e C, é correta?



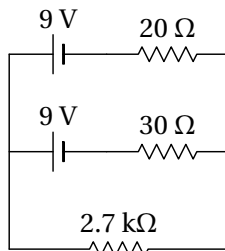
- A. $V_C > V_B > V_A$
- B. $V_C > V_A > V_B$
- C. $V_A > V_B > V_C$
- D. $V_A > V_C > V_B$
- E. $V_B > V_A > V_C$

Problemas

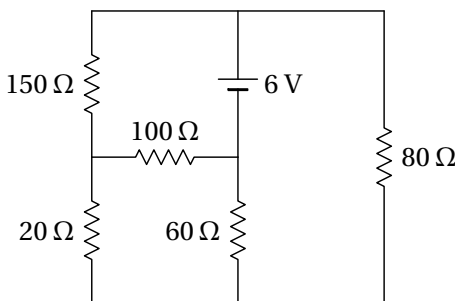
1. No circuito da figura, determine quais das fontes de força eletromotriz fornecem ou absorvem energia e calcule a potência fornecida, ou absorvida, por cada uma.



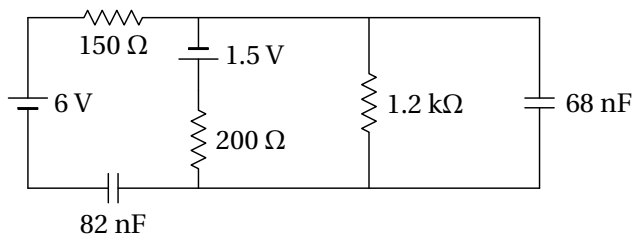
2. Duas pilhas com a mesma força eletromotriz de 9 V, têm resistências internas diferentes, porque uma delas está mais gasta. A pilha mais gasta tem resistência interna de $30\ \Omega$, e a menos gasta tem resistência interna e $20\ \Omega$. As duas pilhas ligam-se em paralelo a uma resistência de $2.7\ \text{k}\Omega$, como mostra o diagrama. (a) Qual das duas pilhas fornece maior potência ao circuito? (b) Calcule a corrente na resistência de $2.7\ \text{k}\Omega$.



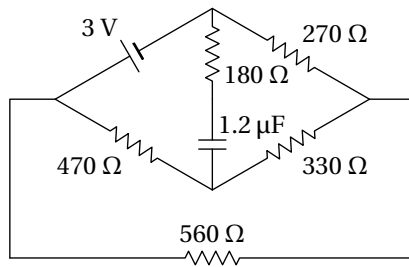
3. Se as duas pilhas do problema anterior fossem ligadas em série, e não em paralelo, qual delas forneceria maior potência no circuito? Que inconveniente poderá existir do ponto de vista prático?
4. Determine a potência dissipada em cada resistência no circuito e a potência fornecida pela f.e.m. Verifique que a potência fornecida pela f.e.m. é igual à soma das potências dissipadas em todas as resistências.



5. No circuito representado no diagrama, os dois condensadores estão inicialmente descarregados. Determine: (a) As correntes iniciais nas resistências e condensadores. (b) As cargas finais nos condensadores, indicando as suas polaridades.



6. (a) Determine a intensidade e sentido da corrente no condensador, no instante inicial em que está descarregado.. (b) Determine a carga final do condensador, indicando a sua polaridade.



7. No problema 4, se a resistência de 100Ω for substituída por um condensador de 39 nF , qual a energia final armazenada nesse condensador?

Respostas

Perguntas: 1. C. 2. C. 3. B. 4. C. 5. D.

Problemas

- As duas fontes fornecem potência; a f.e.m. de 6 V fornece 5.24 mW , e a f.e.m. de 5 V fornece 3.93 mW .
- (a) A que tem resistência interna de 20Ω . (b) 3.32 mA .
- A que tem resistência interna menor (20Ω). O inconveniente é que pode dar-se o caso em que a pilha mais gasta não fornece energia mas dissipa, na sua resistência interna, parte da energia fornecida pela outra pilha.
- Na resistência de 20Ω , $45 \mu\text{W}$. Na resistência de 100Ω , 62.0 mW . Na resistência de 150Ω , 82.1 mW . Na resistência de 60Ω , 105.8 mW . Na resistência de 80Ω , 151.4 mW . A f.e.m. fornece 401.4 mW .
- Usando subíndices iguais ao valor da resistência ou capacidade, (a) $I_{1200} = 0$, $I_{200} = 7.5 \text{ mA}$, $I_{150} = I_{82} = 40 \text{ mA}$, $I_{68} = 32.5 \text{ mA}$. (b) $I_{150} = 0$, $I_{1200} = I_{200} = 1.07 \text{ mA}$, $Q_{68} = 87.4 \text{ nC}$ (positiva na armadura de baixo e negativa na de cima), $Q_{82} = 597.4 \text{ nC}$ (positiva na armadura da direita e negativa na da esquerda).
- (a) 4.78 mA , de baixo para cima. (b) $2.44 \mu\text{C}$ (negativa na armadura de cima e positiva na de baixo).
- 236.5 nJ .