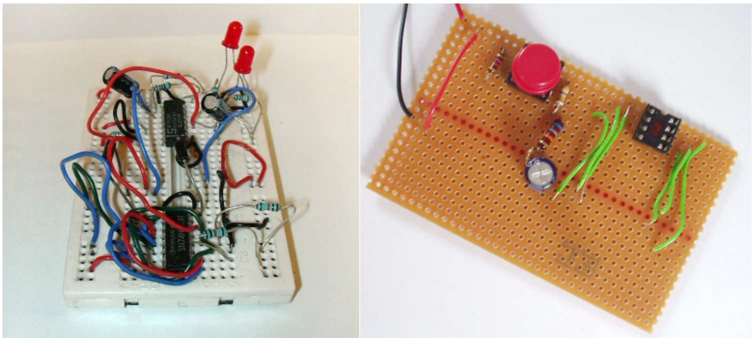
5. Circuitos de corrente contínua



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.

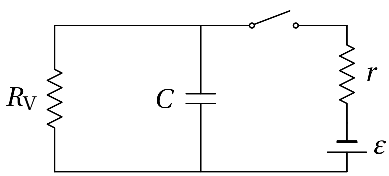


Figura 5.1.: Carga e descarga de um condensador.

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, consequentemente, 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**.

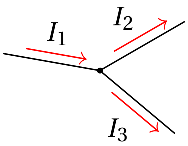


Figura 5.2.: Lei das correntes.

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:

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{5.1}$$

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:

$$V_{\mathrm{B/A}} + V_{\mathrm{C/B}} + V_{\mathrm{D/C}} + V_{\mathrm{E/D}} + V_{\mathrm{A/E}} = 0 \tag{5.2}$$

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

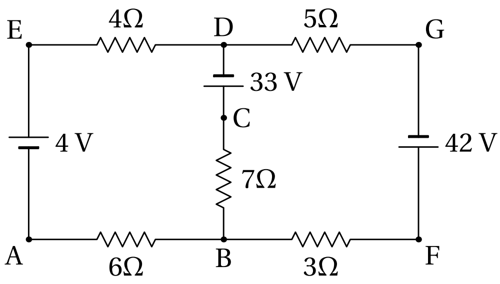


Figura 5.3.: Circuito com duas malhas.

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.

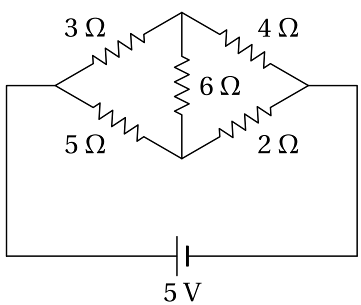


Figura 5.4.: Circuito com resistências que não estão nem em série nem em paralelo.

Usaremos o circuito da figura 5.4 para mostrar o fundamento do método das malhas. Na resolução de problemas não 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.

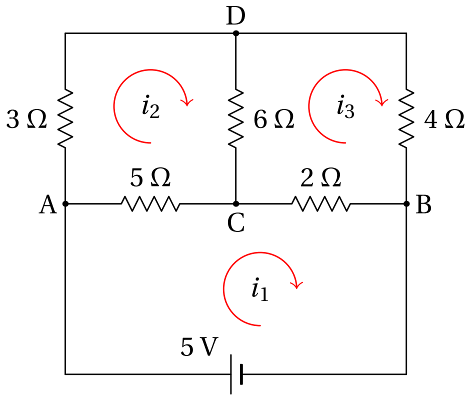


Figura 5.5.: Correntes de malha no circuito da figura 5.4.

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 Ω 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 Ω 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):

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

substituindo esses valores, as três equações das malhas são:

$$\Delta V_{\text{C/A}} + \Delta V_{\text{B/C}} + \Delta V_{\text{A/B}} = -5\,i_1 + 5\,i_2 - 2\,i_1 + 2\,i_3 + 5 = 0 \tag{5.4}$$

$$\Delta V_{\text{D/A}} + \Delta V_{\text{C/D}} + \Delta V_{\text{A/C}} = -3\,i_2 - 6\,i_2 + 6\,i_3 + 5\,i_1 - 5\,i_2 = 0 \tag{5.5}$$

$$\Delta V_{\text{B/D}} + \Delta V_{\text{C/B}} + \Delta V_{\text{D/C}} = -4\,i_3 + 2\,i_1 - 2\,i_3 + 6\,i_2 - 6\,i_3 = 0 \tag{5.6}$$

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

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

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:

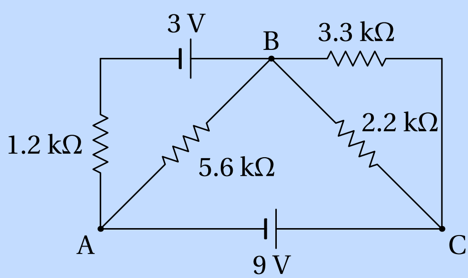
$$i_1 = \begin{vmatrix} 5 & -5 & -2 \\ 0 & 14 & -6 \\ 0 & -6 & 12 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 7 & -5 & -2 \\ -5 & 14 & -6 \\ -2 & -6 & 12 \end{vmatrix} = 1.473 \text{ A} \tag{5.8}$$

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

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

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 $I_{\text{fem}} = 1.473$ mA; a corrente na resistência de 3 Ω é $I_3 = 0.804$ mA e a corrente na resistência de 4 Ω é $I_4 = 0.647$ mA (ver figura 5.5). Na resistência de 5 Ω, entre as malhas 1 e 2, a corrente é $I_5 = i_1 - i_2 = 0.669$ mA, para a direita, que é o sentido de i_1, porque i_1 é maior que i_2. Na resistência de 2 Ω a corrente é $I_2 = 0.826$ mA, para a direita, e na resistência de 6 Ω a corrente é $I_6 = 0.157$ 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 kΩ. (*b*) A diferença de potencial na resistência de 3.3 kΩ. (*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. Exprimindo os valores das resistências em kΩ 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 kΩ e 3.3 kΩ estão em paralelo e podem ser substituídas por uma única resistência: $2.2 \parallel 3.3 = (2.2\times3.3)/(2.2+3.3) = 1.32$.

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

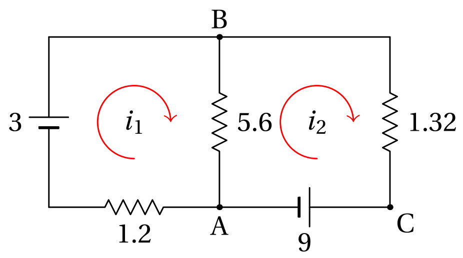


Figura 5.6.: Circuito equivalente para o exemplo 5.1.

O sistema matricial correspondente a esse circuito é:

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

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 kΩ 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. Consequentemente, a corrente nessa resistência é $2.829 - 1.888 = 0.941$ mA, de B para A. (*b*) A corrente na resistência de 1.32 kΩ é igual à segunda corrente de malha, 2.829 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 kΩ, é $1.32\times2.829=3.73$ V (maior potencial em C do que em B). (*c*) A corrente que passa pela fonte de 3 V é igual á primeira corrente de malha, 1.888 mA; como essa corrente passa do elétrodo positivo para o negativo, a fonte de 3 V dissipa uma potência de 1.888×3=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 elétrodo negativo para o positivo, a fonte fornece uma potência de 2.829×9=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:

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

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

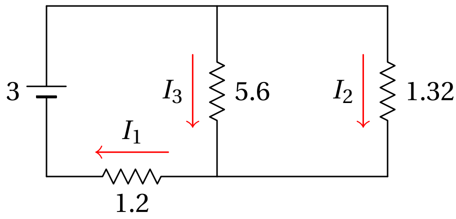
$$\begin{bmatrix} 6.8 & -5.6 \\ -5.6 & 6.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

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

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:

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

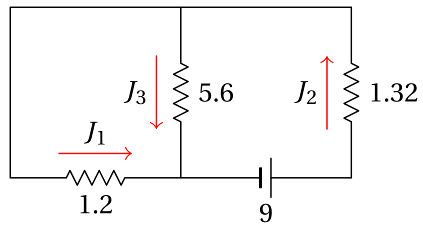
A diferença de potencial no conjunto em paralelo $(5.6 \parallel 1.32)$ é

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

e as outras duas correntes são:

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

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:

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

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

$$\begin{aligned} I_{1.2} &= J_1 - I_1 = 3.21 - 1.323 = 1.89\ \text{mA} \qquad &\text{(para a direita)}\\ I_{5.6} &= J_2 - I_2 = 3.899 - 1.07 = 2.83\ \text{mA} \qquad &\text{(para cima)}\\ I_{1.32} &= I_3 + J_3 = 0.252 + 0.688 = 0.94\ \text{mA} \qquad &\text{(para baixo)} \end{aligned}$$

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

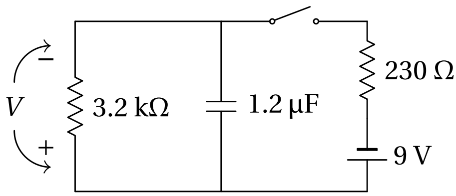
A diferença de potencial num condensador é diretamente proporcional à carga armazenada nas suas armaduras. Se ligarmos um condensador, inicialmente sem carga, entre dois pontos de um circuito, a sua diferença de potencial inicial é nula; é como se, nesse instante, fosse feito um curto-circuito entre 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.

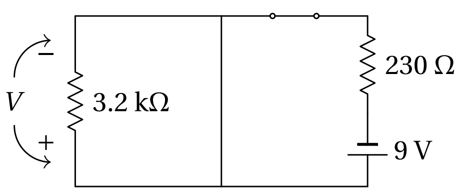
A resposta transitória será estudada no capítulo sobre processamento de sinais. No presente capítulo consideram-se apenas os valores iniciais e finais das grandezas elétricas nos circuitos de corrente contínua. Todos os condensadores no circuito podem ser substituídos por fios com resistência nula, no 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 μF, inicialmente descarregado, liga-se a uma pilha com f.e.m. de 9 V e resistência interna de 230 Ω e usa-se um voltímetro com resistência interna de 3.2 kΩ 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 kΩ em paralelo com o condensador. O diagrama do circuito é então



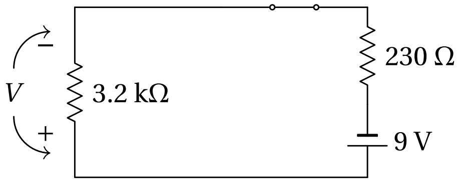
(*a*) No instante inicial, quando se fecha o interruptor, a voltagem do condensador e nula, porque está descarregado, sendo equivalente a um fio com resistência nula; o diagrama equivalente é os seguinte



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 volimetro 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) $\quad 0.002624$

(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 3.2 Ω, que é:

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

(%o4) $\quad 8.397$

e a carga final do condensador é igual a

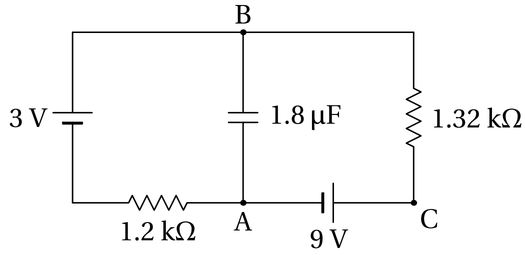
```
(%i5) Q: 1.2e-6*DV;
```

(%o5) $\quad 1.008 \times 10^{-5}$

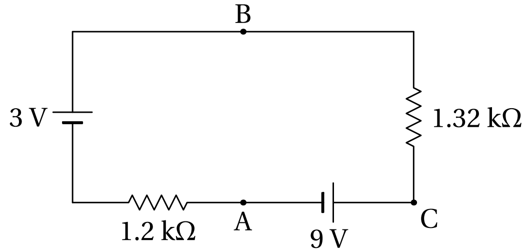
ou seja, $Q = 10.076\ \mu\text{C}$. Note-se que os resultados dos comandos do Maxima mostram apenas 4 algarismos significativos, mas internamente está a ser usada uma precisão maior nos cálculos e nos valores armazenados nas variáveis.

Exemplo 5.4
No circuito do exemplo 5.1, se a resistência de 5.6 kΩ for substituída por um condensador de 1.8 μF, 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 , ligada a uma resistência de 2.52 kΩ. A corrente é então no sentido anti-horário e com intensidade igual a

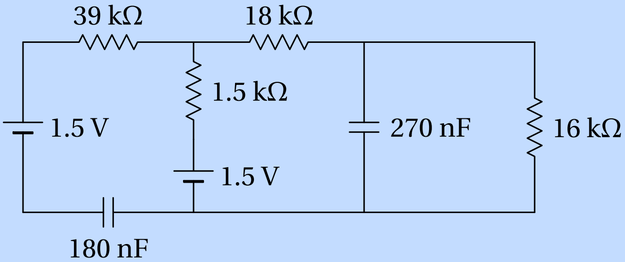
$$I = \frac{6}{2520}$$

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

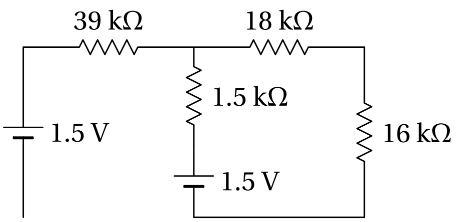
```
(%i6) I: float(6/2520);
(%o6)         0.002381
(%i7) DV: 9 - 1320*I;
(%o7)         5.857
(%i8) Q: 1.8e-6*DV;
(%o8)         1.054 × 10^-5
```

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 kΩ 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 kΩ e corrente igual a

```
(%i9) I: 1.5/35.5e3;
```

(%o9) 4.225×10^{-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 kΩ, $P = 0$, já que a corrente é nula.
- Na resistência de 18 kΩ,

```
(%i10) P18: 18e3*I^2;
```

(%o10) 3.214×10^{-5}

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

- Na resistência de 16 kΩ,

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

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

- Na resistência de 1.5 kΩ,

```
(%i12) P1_5: 1.5e3*I^2;
(%o12)          2.678 × 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 kΩ:

```
(%i13) DV: 16e3*I;
(%o13)          0.6761
(%i14) U270: 270e-9*DV^2/2;
(%o14)          6.17 × 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 kΩ (com diferença de potencial nula), pela resistência de 1.5 kΩ 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 × 10^-10
```

$U = 0.3615\ \text{nJ}$

Perguntas

1. Qual dos seguintes princípios físicos está relacionado com a lei dos nós?

A. Conservação da energia.

B. Quantização da carga.

C. Conservação da carga.

D. Conservação da quantidade de movimento.

E. Ação e reação.

2. Num condensador dentro de um circuito de corrente contínua, qual das seguintes grandezas tem sempre um valor final nulo?

A. A carga.

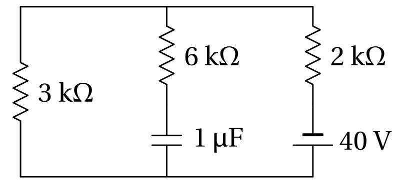
B. A diferença de potencial.

C. A corrente.

D. A capacidade.

E. A energia armazenada.

3. 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?



A. 5 mA

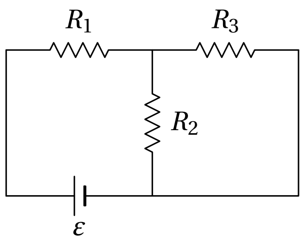
B. 8 mA

C. 10 mA

D. 20 mA

E. 0

4. 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. $I_1 + I_2 = I_3$

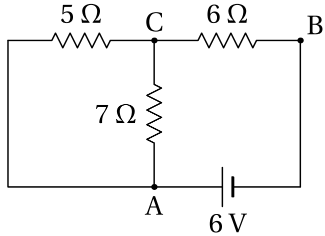
B. $I_1 + I_3 = I_2$

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. $V_C > V_A > V_B$

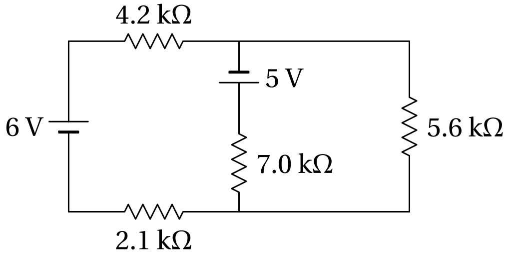
C. $V_A > V_B > V_C$

D. $V_A > V_C > V_B$

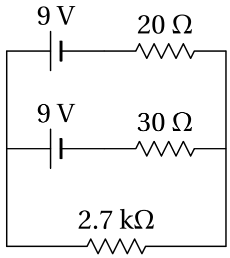
E. $V_B > V_A > V_C$

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.

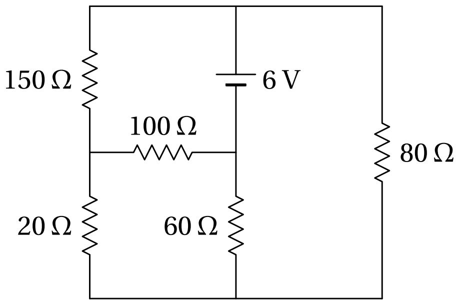


2. Duas pilhas iguais, de 9 V, têm sido usadas de modo diferente e, por isso, uma delas está mais gasta. As duas pilhas ligam-se em paralelo a uma resistência de 2.7 kΩ, como mostra o diagrama. (*a*) Qual das duas pilhas está mais gasta? (*b*) Qual das duas pilhas fornece maior potência no circuito? (*c*) Calcule a corrente na resistência de 2.7 kΩ.

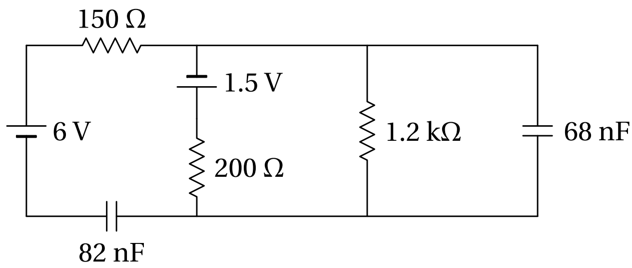


3. Se as duas pilhas do problema anterior fossem ligadas em série, e não em paralelo, qual delas forneceria maior potência no circuito? Que inconveniente poderá existir do ponto de vista prático?

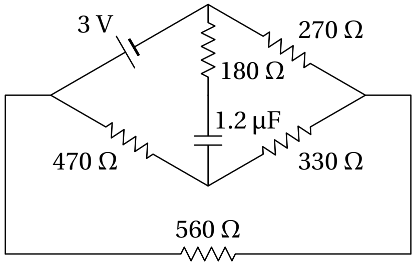
4. Determine a potência dissipada em cada resistência no circuito e a potência fornecida pela f.e.m. Verifique que a potência fornecida pela f.e.m. é igual à soma das potências dissipadas em todas as resistências.



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 100 Ω 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

1. 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.

2. (*a*) A que tem resistência interna de 30 Ω. (*b*) A que está menos gasta (com resistência interna de 20 Ω). (*c*) 3.32 mA.

3. A que tem resistência interna menor (20 Ω). 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.

4. Na resistência de 20 Ω, 45 μW. Na resistência de 100 Ω, 62.0 mW. Na resistência de 150 Ω, 82.1 mW. Na resistência de 60 Ω, 105.8 mW. Na resistência de 80 Ω, 151.4 mW. A f.e.m. fornece 401.4 mW.

5. Usando subíndices iguais ao valor da resistência ou capacidade, (*a*) $I_{1200} = 0$, $I_{200} = 7.5$ mA, $I_{150} = I_{82} = 40$ mA, $I_{68} = 32.5$ mA. (*b*) $I_{150} = 0$, $I_{1200} = I_{200} = 1.07$ mA, $Q_{68} = 87.4$ nC (positiva na armadura de baixo e negativa na de cima), $Q_{82} = 597.4$ nC (positiva na armadura da direita e negativa na da esquerda).

6. (*a*) 4.78 mA, de baixo para cima. (*b*) 2.44 μC (negativa na armadura de cima e positiva na de baixo).

7. 236.5 nJ.