

**Universidade do Minho**  
**Escola de Engenharia**  
Departamento de Electrónica Industrial

# **Mestrado Integrado em Engenharia Física**

## **Circuitos de Corrente Contínua**

- Circuitos série
- Lei de Kirchhoff para a tensão
- O divisor de tensão
- Circuitos paralelo
- Lei de Kirchhoff para a corrente
- Divisor de corrente
- Fontes de tensão
- Fontes de corrente

# Circuitos de Corrente Contínua (CC)

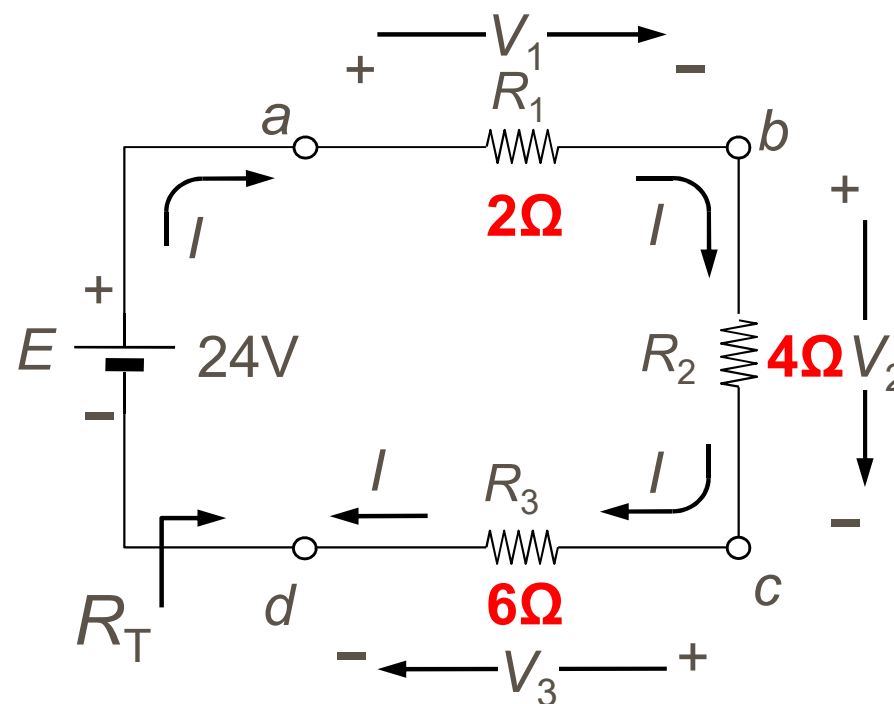
## ■ Ligação em Série

... diz-se que dois elementos estão ligados em série se possuem apenas um terminal em comum que não está ligado a um terceiro elemento ...

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$$

$$R_T = 2\ \Omega + 4\ \Omega + 6\ \Omega = 12\ \Omega$$

$$I = \frac{E}{R_T} \quad I = \frac{24V}{12\Omega} = 2A$$



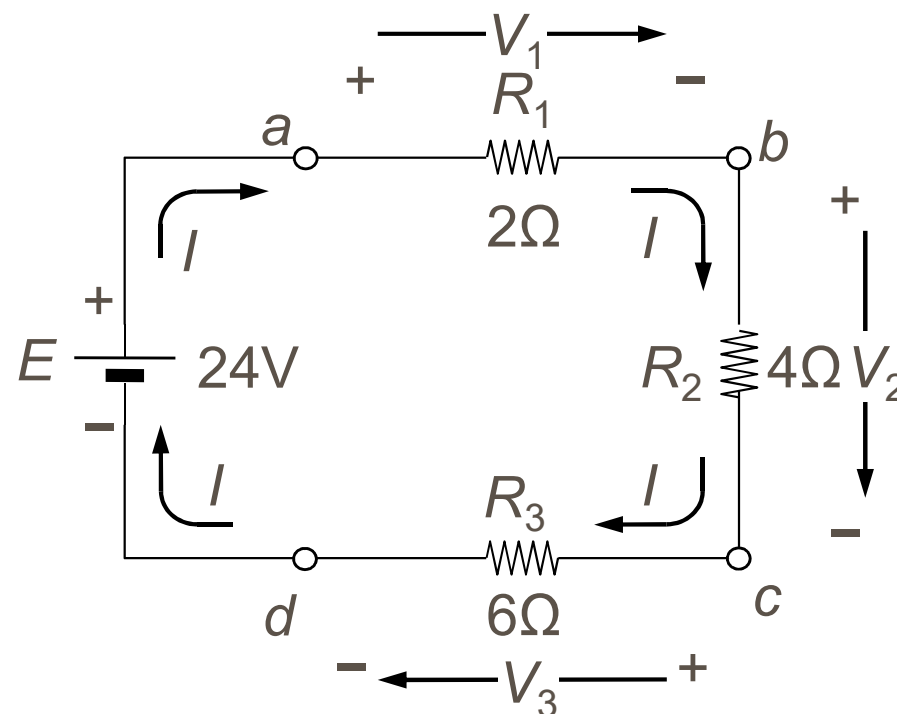
## ■ Leis de Kirchhoff para a tensão

... a soma algébrica das tensões ao longo de um percurso fechado tem de ser igual a zero ...

$$+E - V_1 - V_2 - V_3 = 0$$

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

→ É verdade para as quedas de  
de tensão em  
qualquer tipo de componente e  
para qualquer forma de onda!

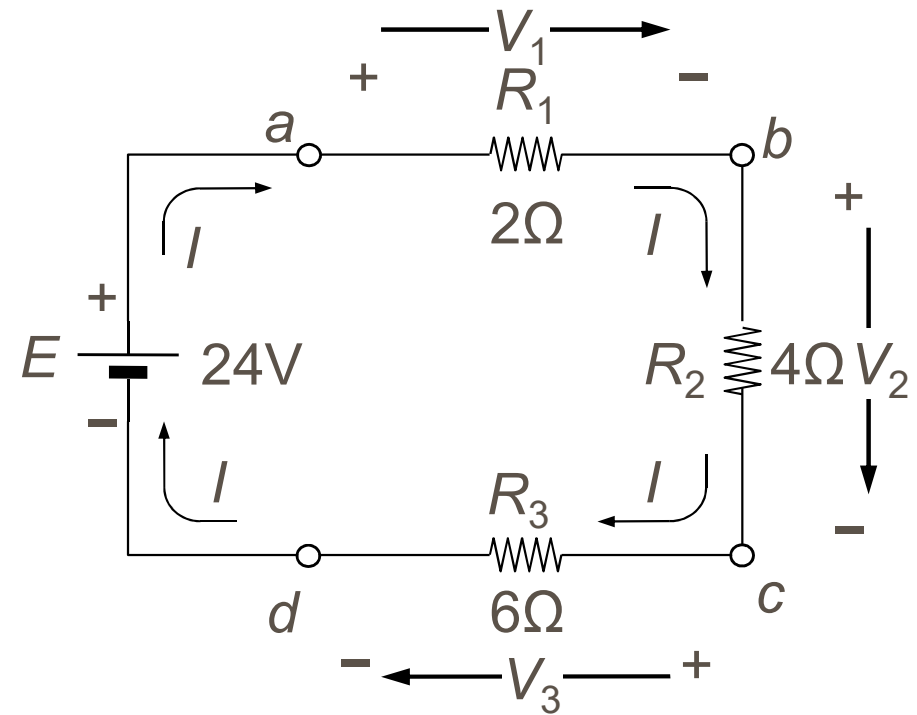


## ■ Regra do Divisor de Tensão

$$V_x = E \frac{R_x}{R_T}$$

$$V_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 24 \text{ V} \frac{2\Omega}{12\Omega} = 4 \text{ V}$$

$$V_3 = E \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 24 \text{ V} \frac{6\Omega}{12\Omega} = 12 \text{ V}$$



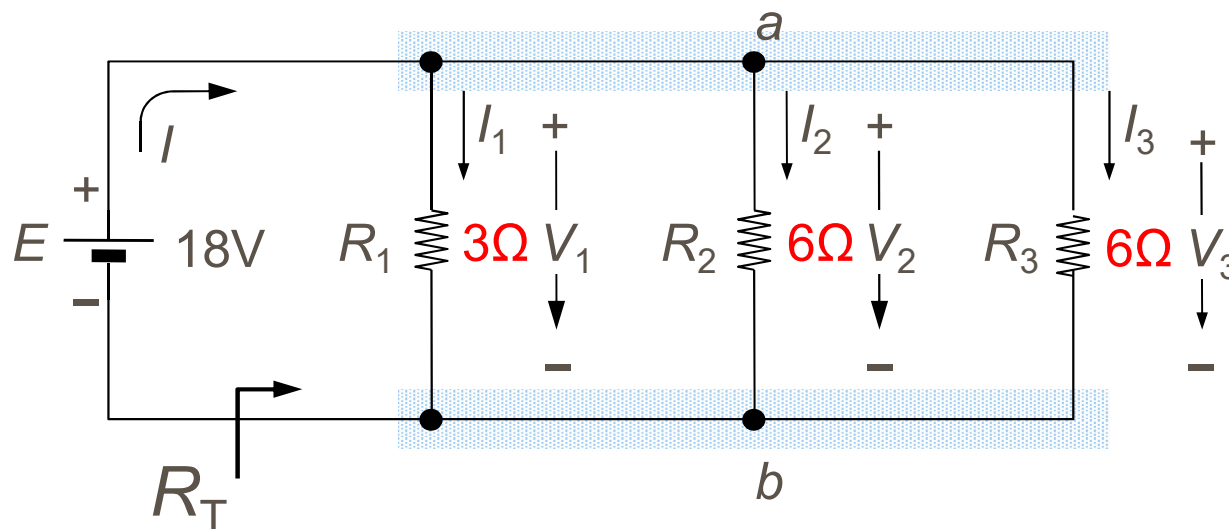
## ■ Ligação em Paralelo

... diz-se que dois elementos estão ligados em paralelo se possuírem dois terminais em comum ...

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_T} &= \frac{1}{3\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega} = \\ &= 0.333\ \text{S} + 0.166\ \text{S} + 0.166\ \text{S} = \\ &= 0.666\ \text{S}\end{aligned}$$

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{18\text{V}}{0.666\ \text{S}} = 12\text{A}$$

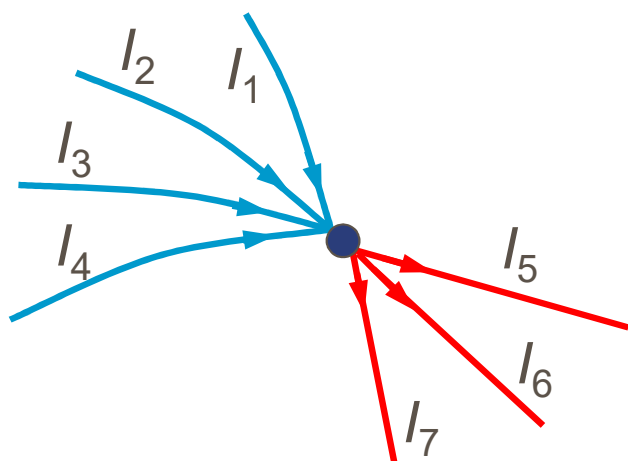


Para o caso do // de 2 resistências:

$$\rightarrow R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## ■ Lei de *Kirchhoff* para a Corrente

... a soma das correntes que convergem para um nó é sempre igual à soma das correntes que deixam esse nó ...



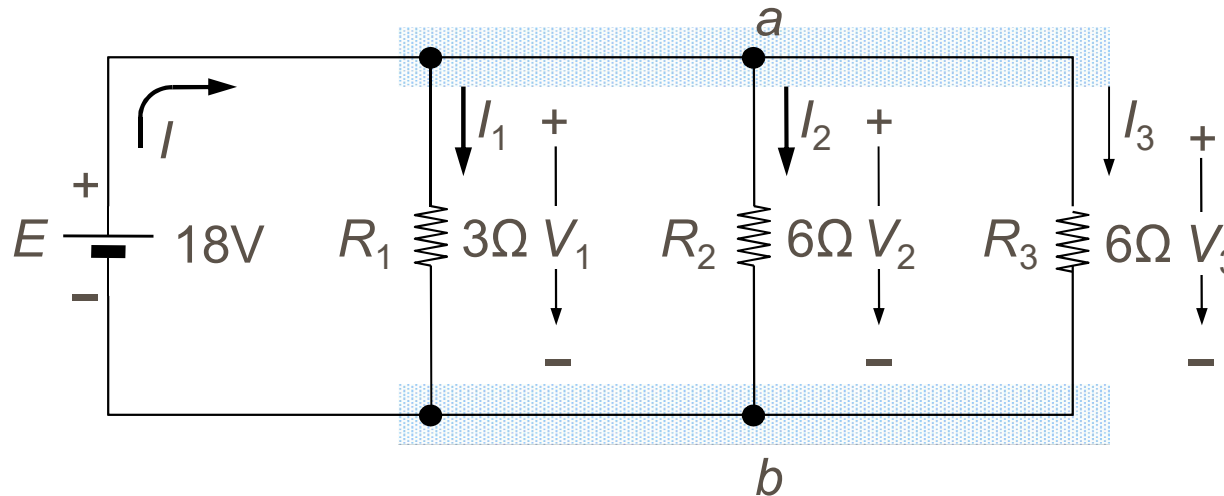
$$\sum I_{converge} = \sum I_{sai}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = I_5 + I_6 + I_7$$

→ É verdade para as correntes em qualquer tipo de componente e para qualquer forma de onda!

## ■ Lei de *Kirchhoff* para a Corrente

... a soma das correntes que convergem para um nó é sempre igual à soma das correntes que deixam esse nó ...



$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$12\text{ A} = 6\text{ A} + 3\text{ A} + 3\text{ A}$$



## ■ Regra do Divisor de Corrente

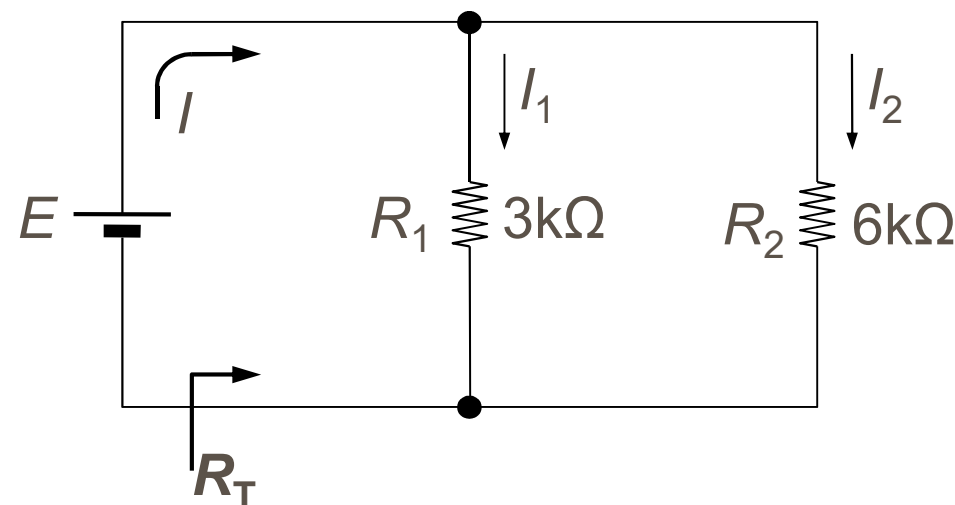
$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(3 \text{ k}\Omega)(6 \text{ k}\Omega)}{3 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ k}\Omega$$

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{9 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 4.5 \text{ mA}$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{9 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{9 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega} = 1.5 \text{ mA}$$



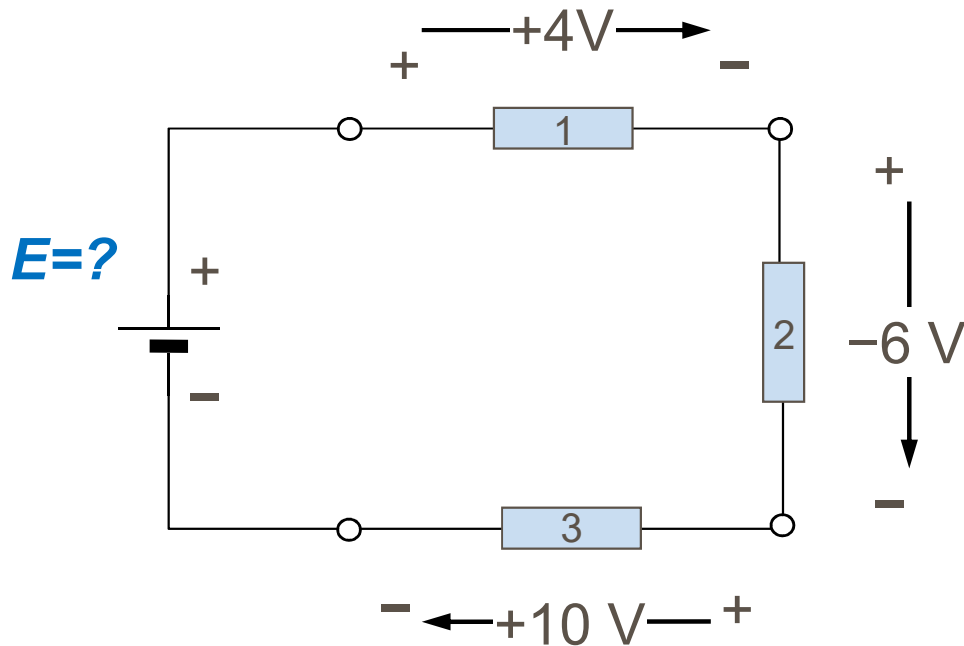
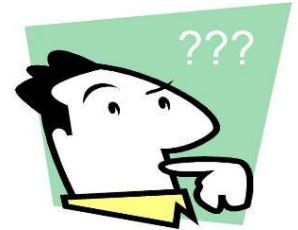
Ou

$$I_1 = 4.5 \text{ mA} \frac{6 \text{ k}\Omega}{6 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

$$I_2 = 4.5 \text{ mA} \frac{3 \text{ k}\Omega}{6 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 1.5 \text{ mA}$$

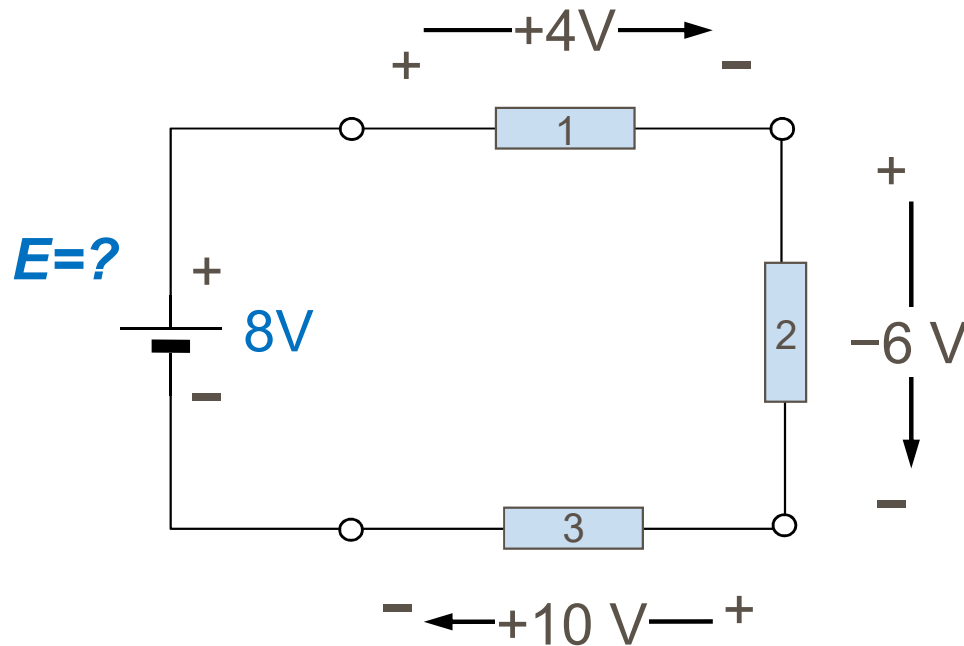
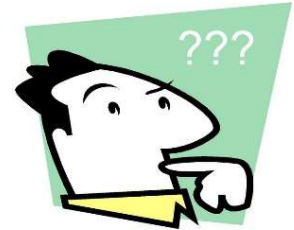
# Circuitos de Corrente Contínua

## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



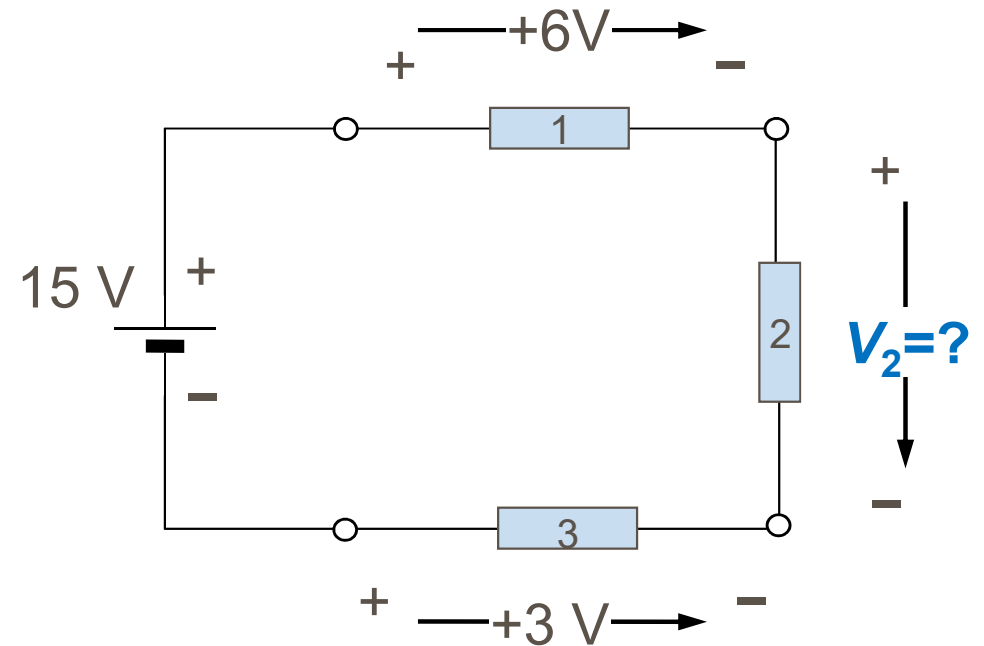
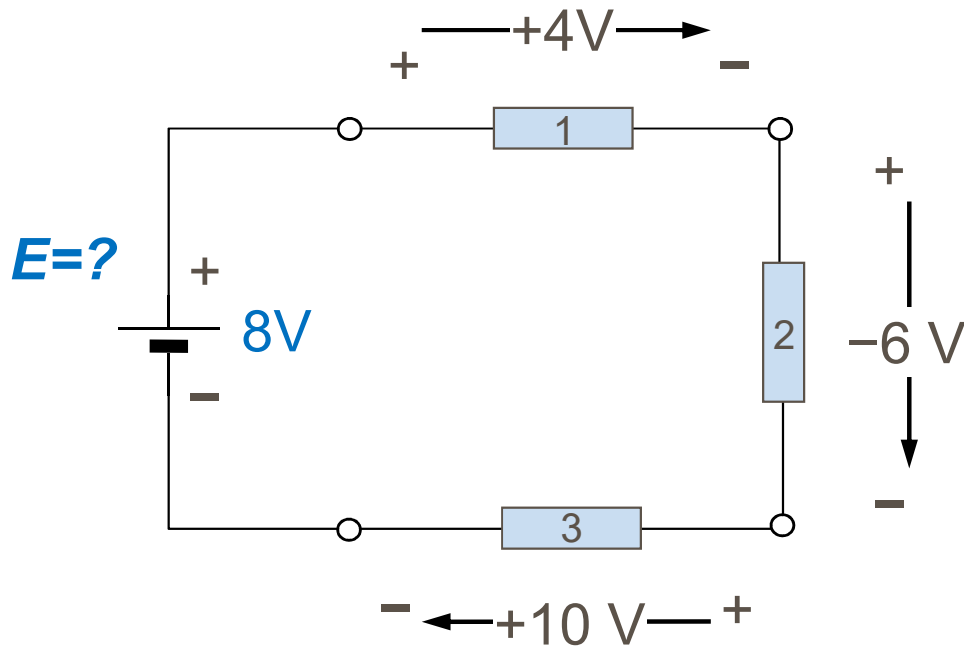
# Circuitos de Corrente Contínua

## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*

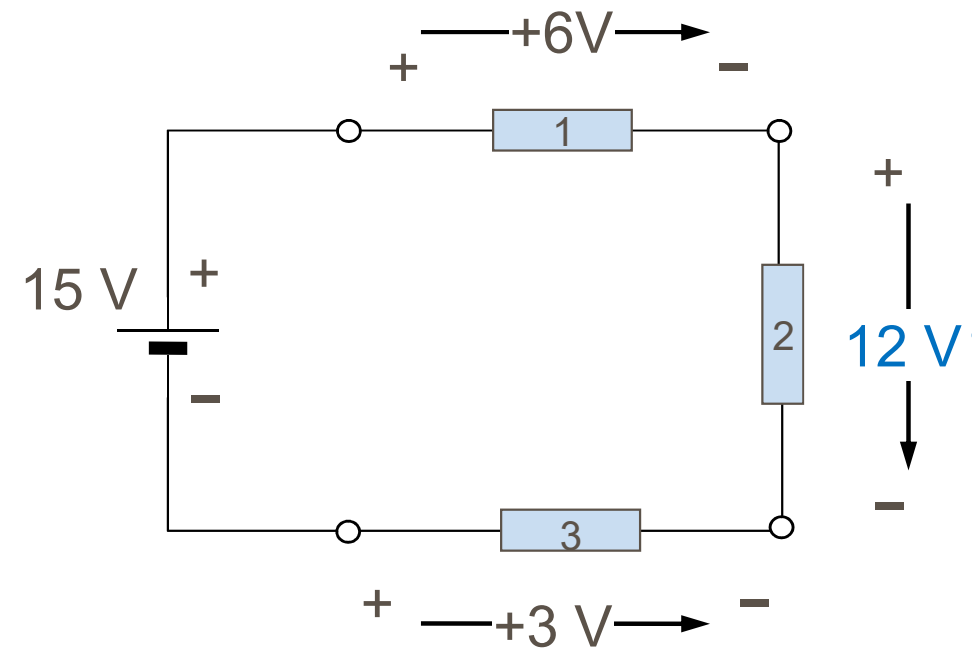
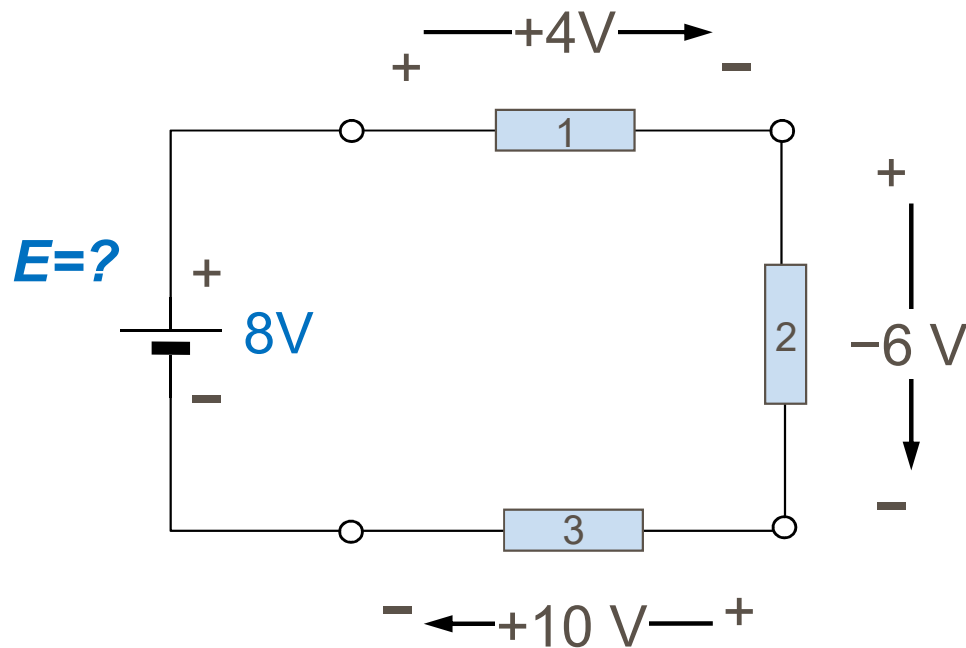
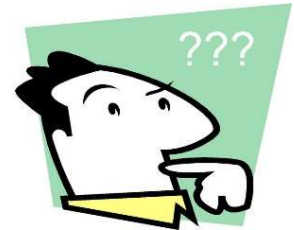


# Circuitos de Corrente Contínua

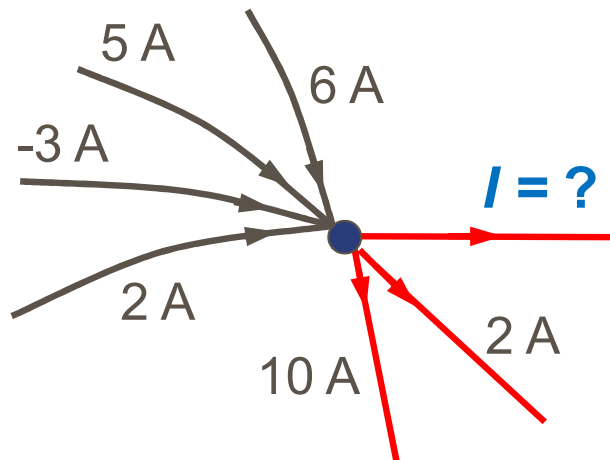
## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



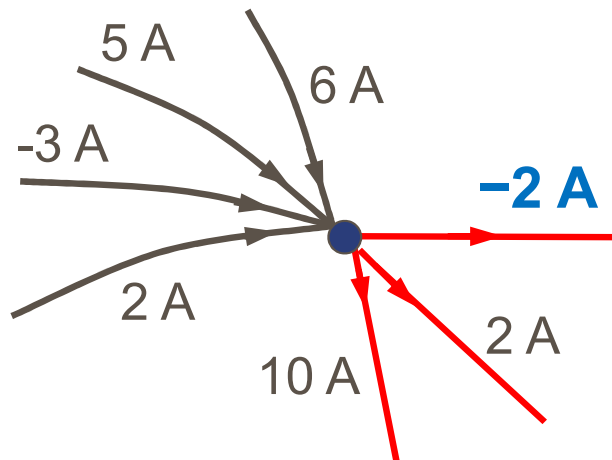
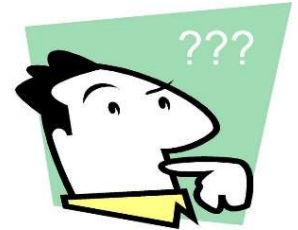
## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



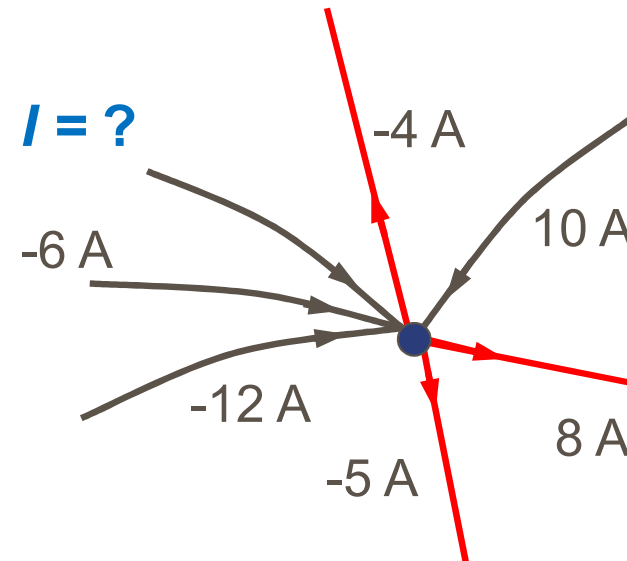
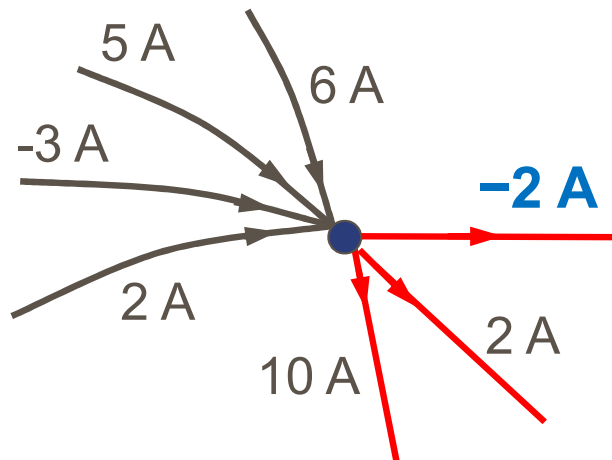
## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*

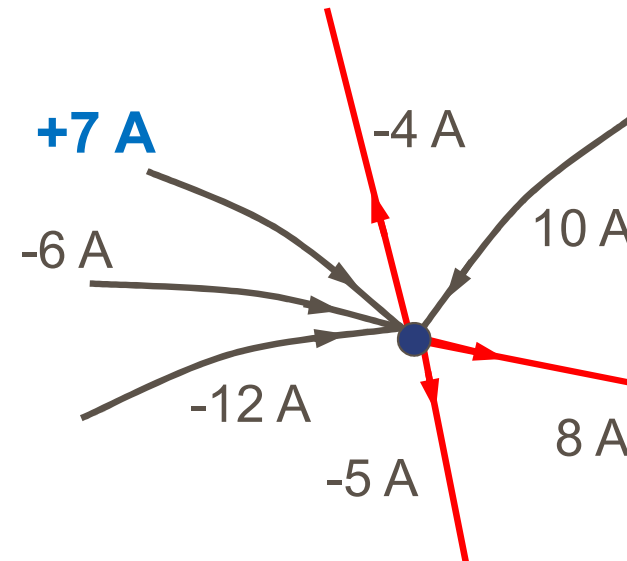
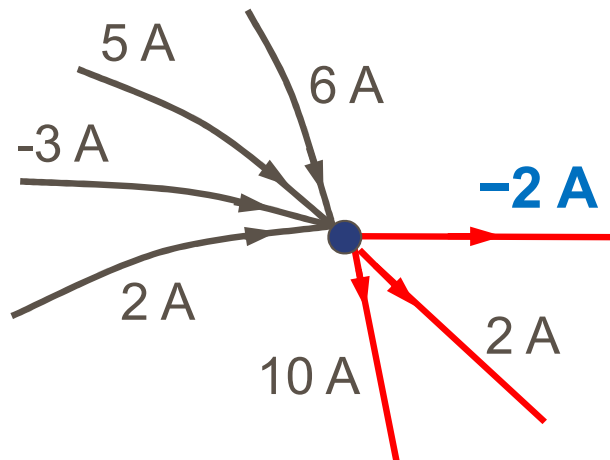
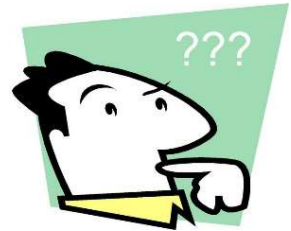


## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



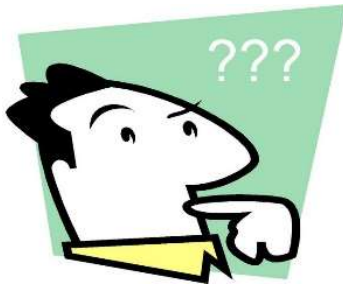


## ■ Leis de Kirchhoff – *Checkpoint*



# Circuitos de Corrente Contínua

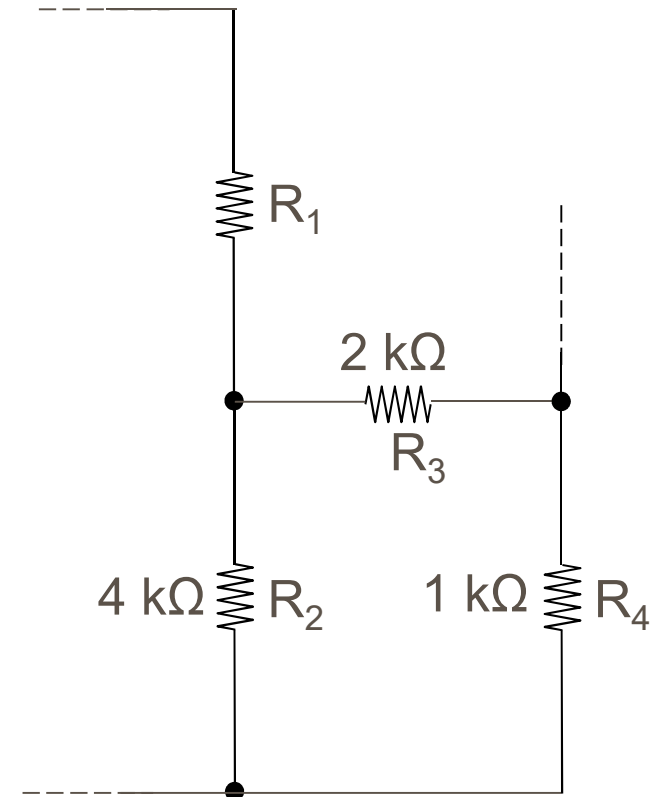
## ■ Resistência total (ou equivalente) - *Checkpoint*



$R_1$  e  $R_2$  estão ligados em série?

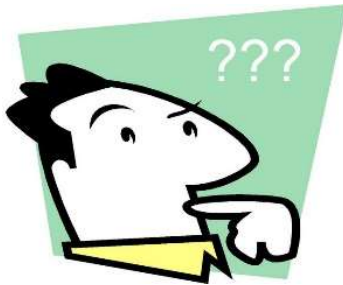
1 – Sim

2 – Não



# Circuitos de Corrente Contínua

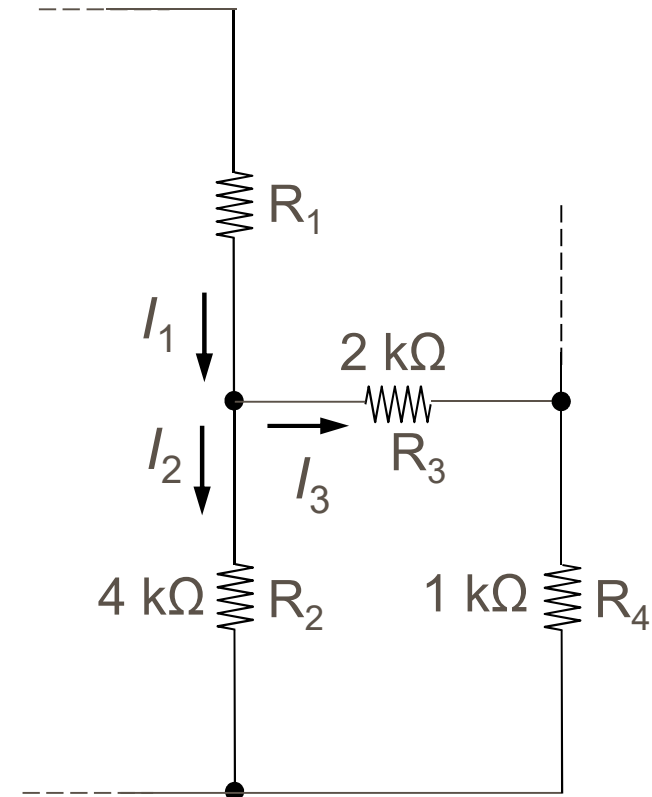
## ■ Resistência total (ou equivalente) - *Checkpoint*



$R_1$  e  $R_2$  estão ligados em série?

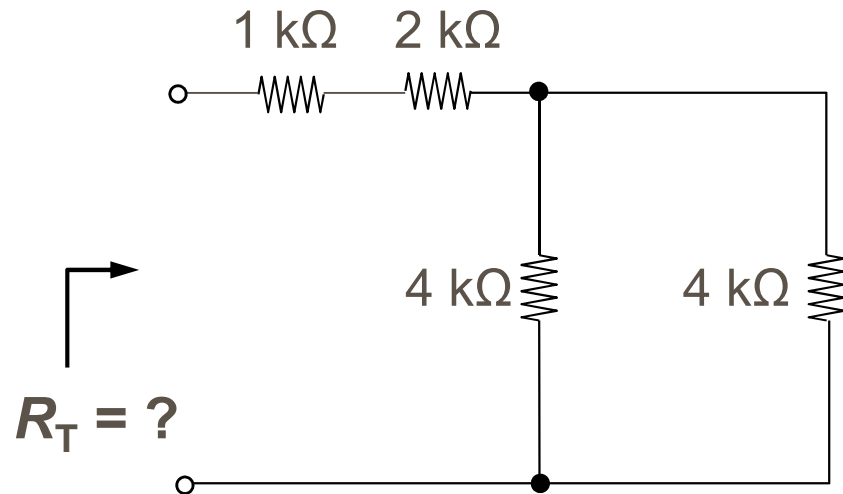
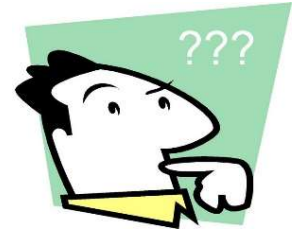
1 – Sim

2 – Não



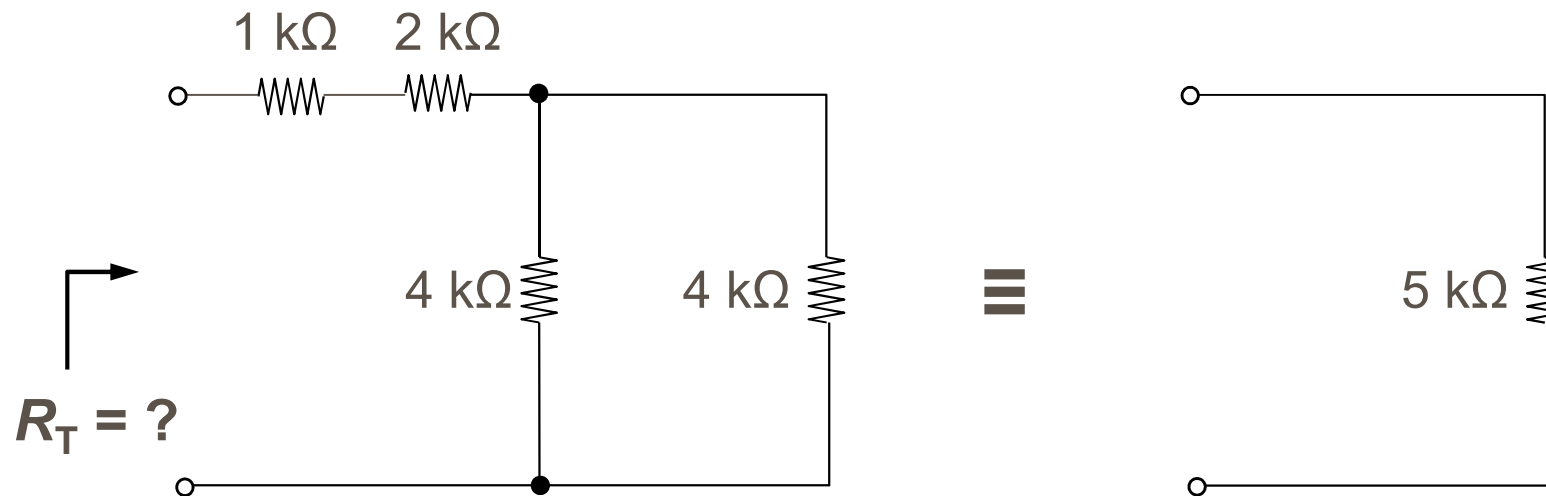
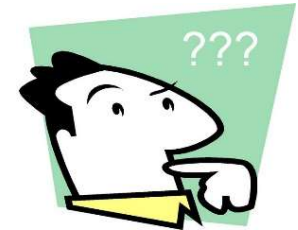
# Circuitos de Corrente Contínua

## ■ Resistência total (ou equivalente) - *Checkpoint*



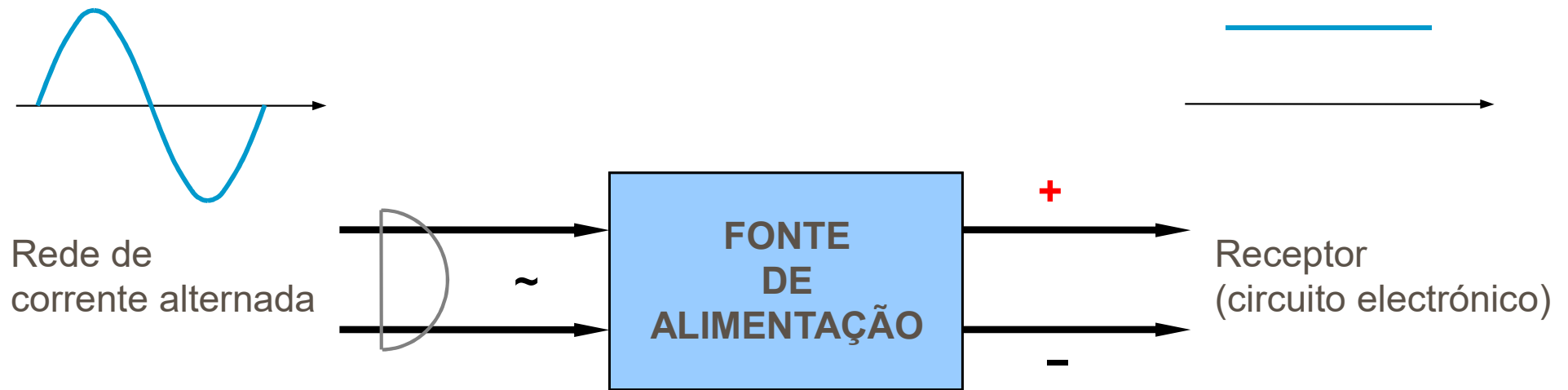
# Circuitos de Corrente Contínua

## ■ Resistência total (ou equivalente) - *Checkpoint*



# Circuitos de Corrente Contínua

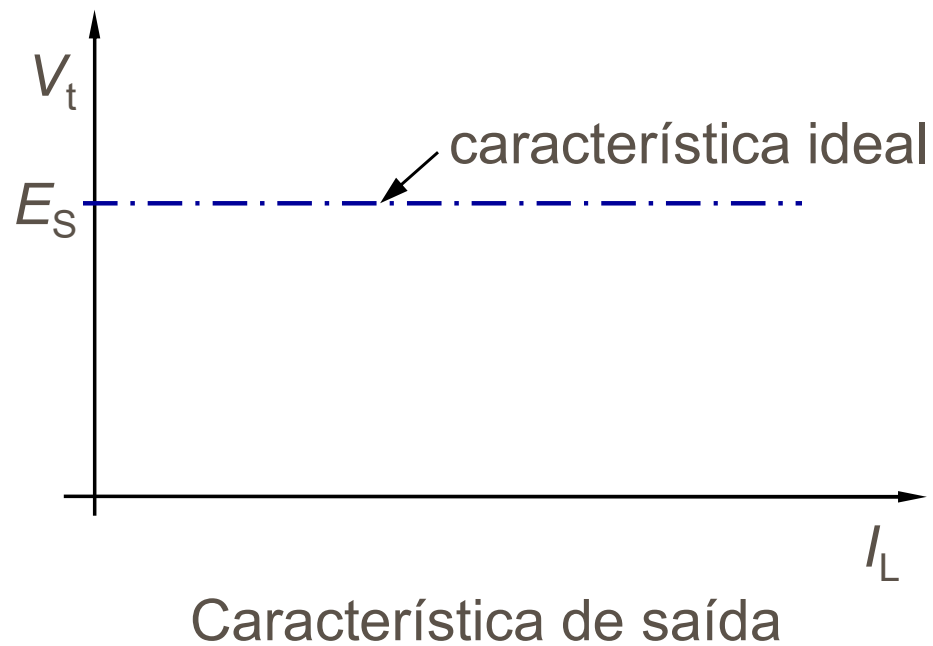
## ■ Fontes de alimentação



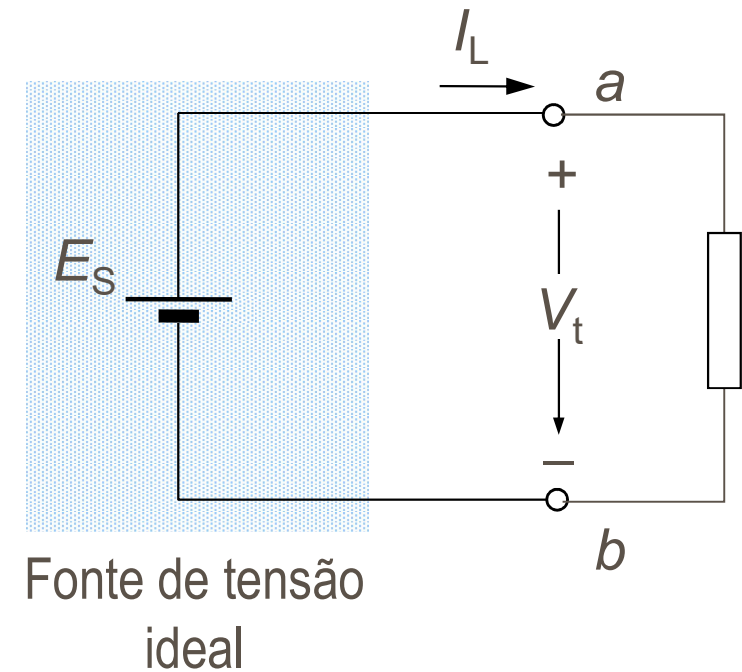
Fonte de alimentação de corrente contínua

## ■ Fontes de Energia

### ■ Fontes de tensão

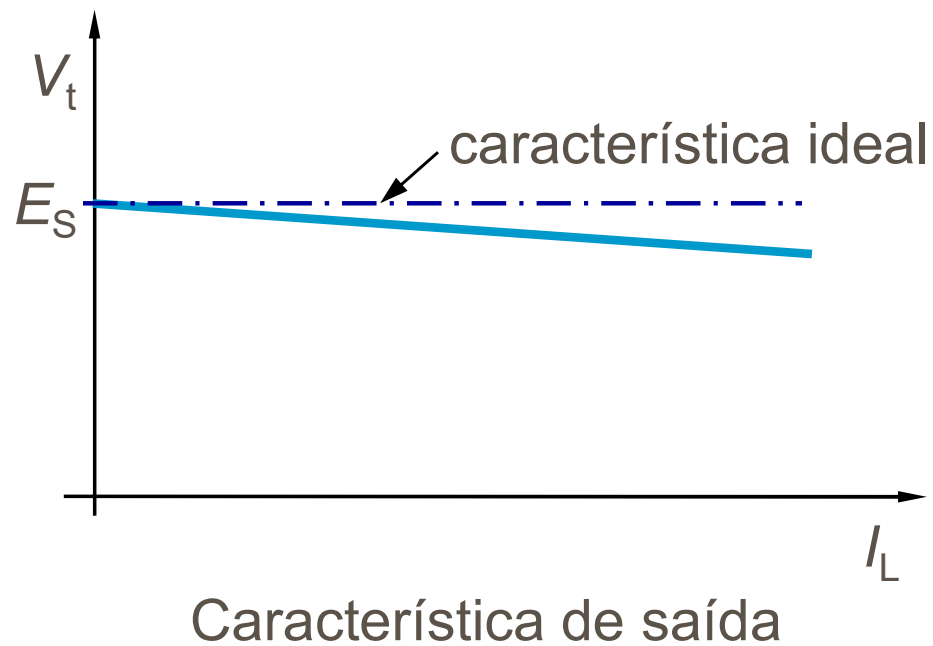


$$V_t = E_S$$



## ■ Fontes de Energia

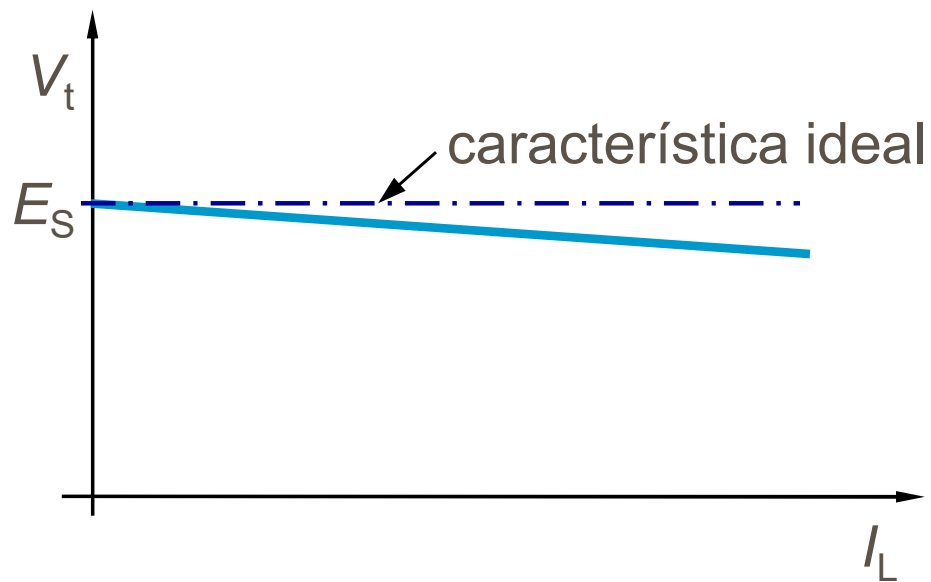
### ■ Fontes de tensão



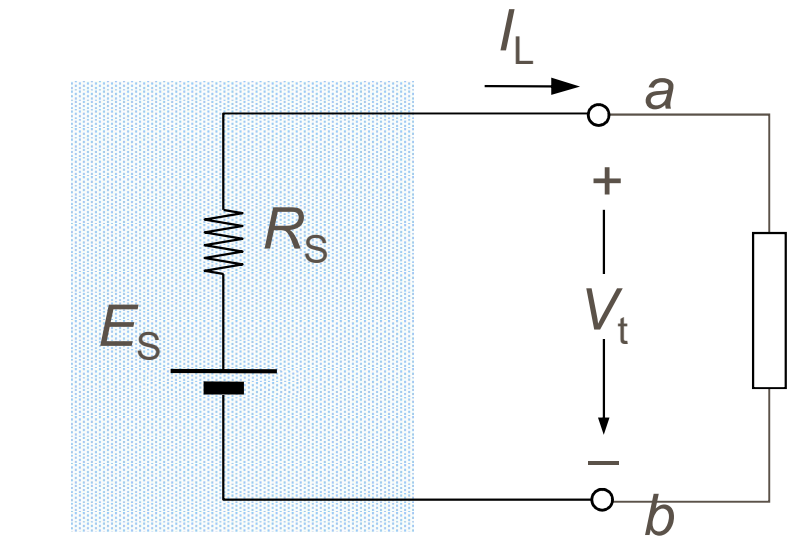


## ■ Fontes de Energia

### ■ Fontes de tensão



Característica de saída

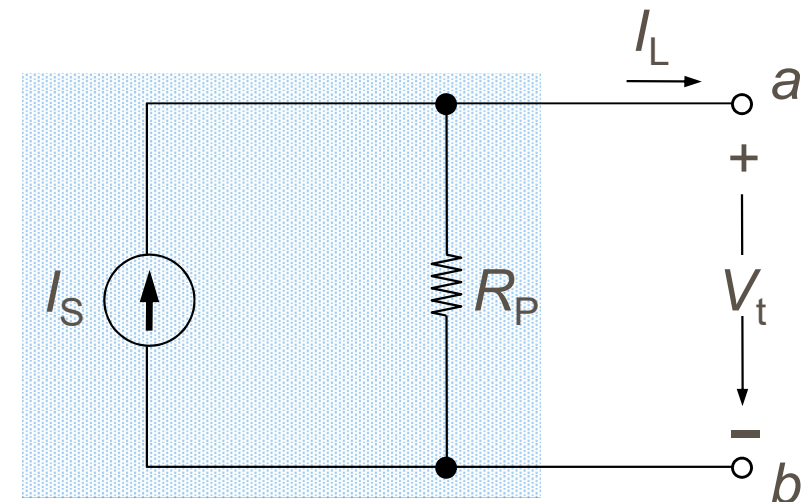
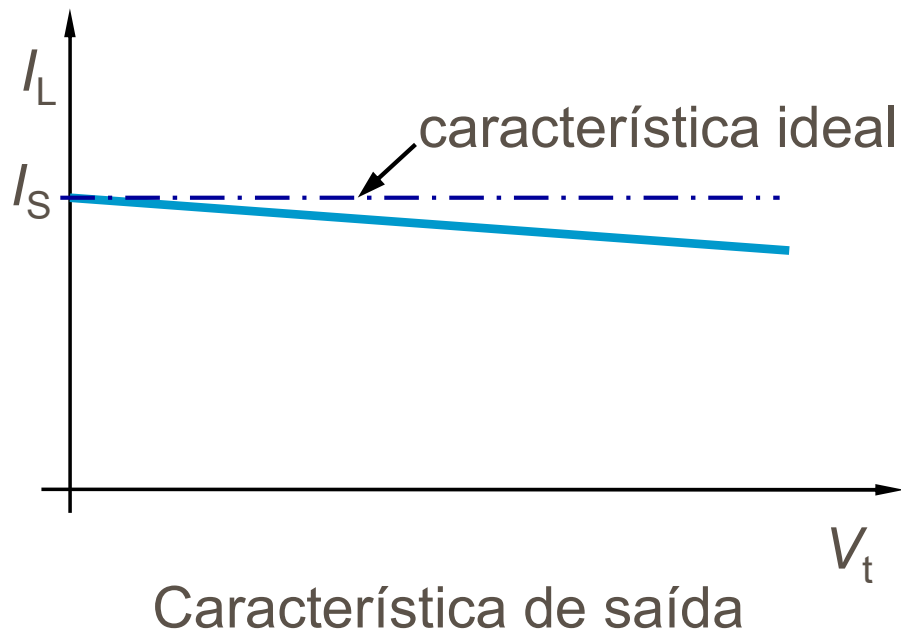


Circuito equivalente

$$V_t = E_S - R_S \cdot I_L$$

## ■ Fontes de Energia

### ■ Fontes de corrente



Circuito equivalente

$$I_L = I_S - \frac{1}{R_P} V_t$$

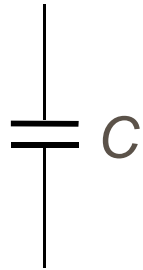
# Circuitos de Corrente Contínua

## ■ Componentes básicos

### ■ Símbolos mais importantes



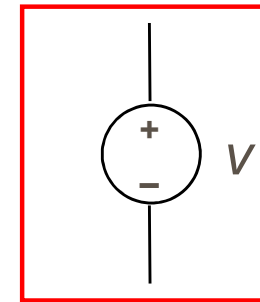
resistência



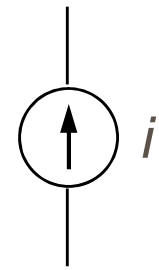
condensador



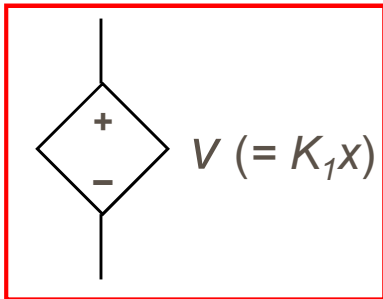
indutor



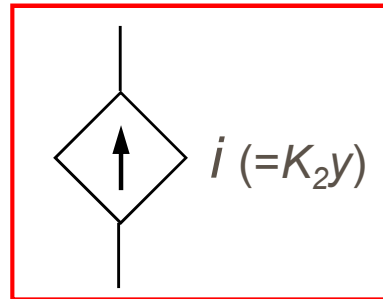
fonte de tensão  
(independente)



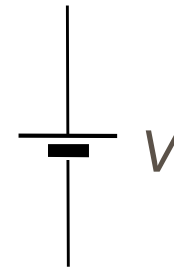
fonte de corrente  
(independente)



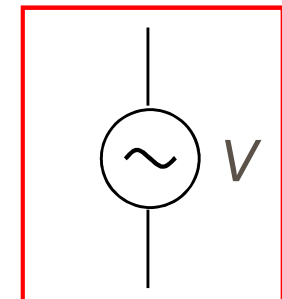
fonte de tensão  
(dependente)



fonte de corrente  
(dependente)



fonte de tensão  
(constante)

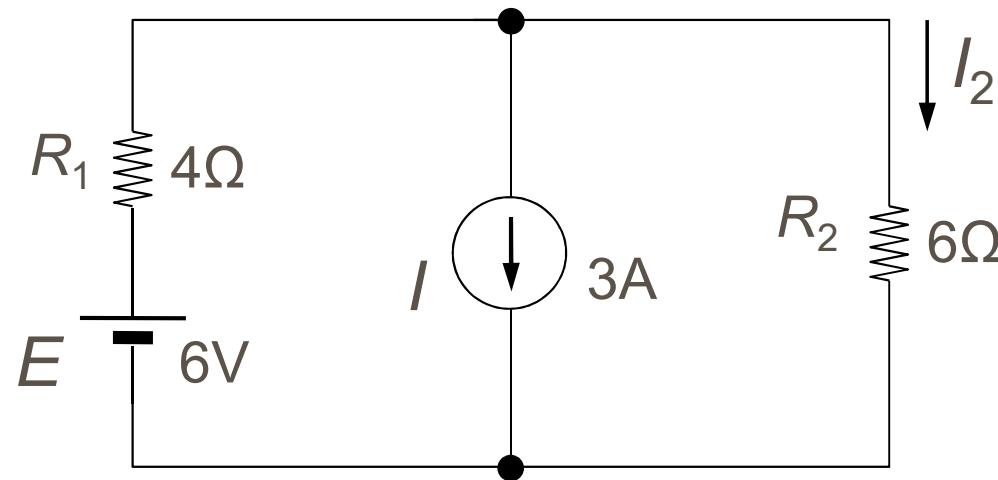


fonte de tensão  
(alternada)

## ■ Teoremas Fundamentais

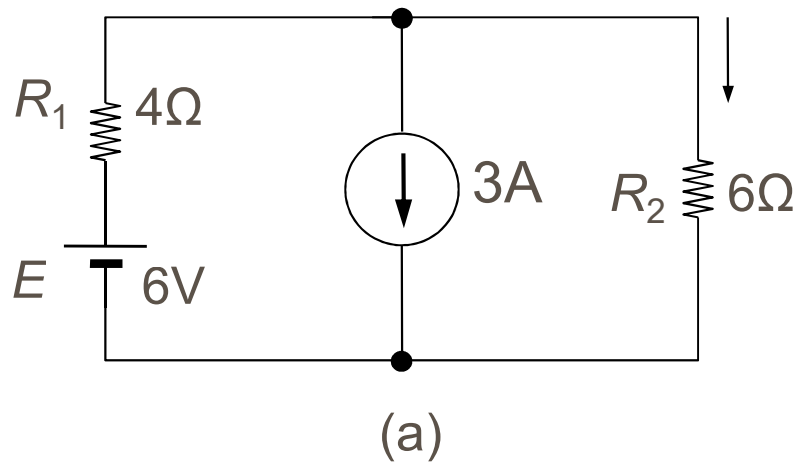
### ■ Teorema da Sobreposição

*... o valor de uma grandeza eléctrica em qualquer parte de um circuito é o resultado da soma algébrica das grandezas nessa parte do circuito devido à contribuição de cada fonte independentemente ...*



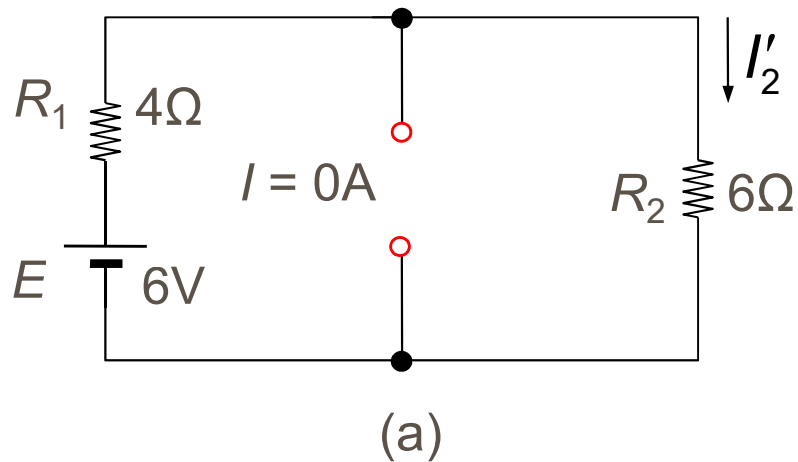
## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Sobreposição



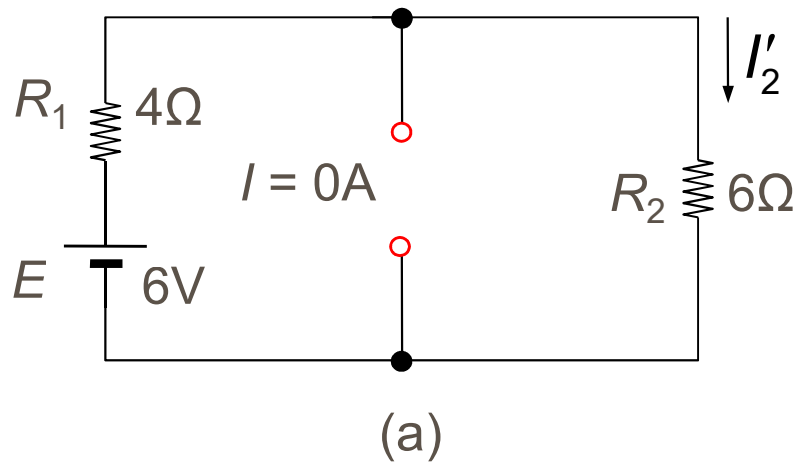
## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Sobreposição



## ■ Teoremas Fundamentais

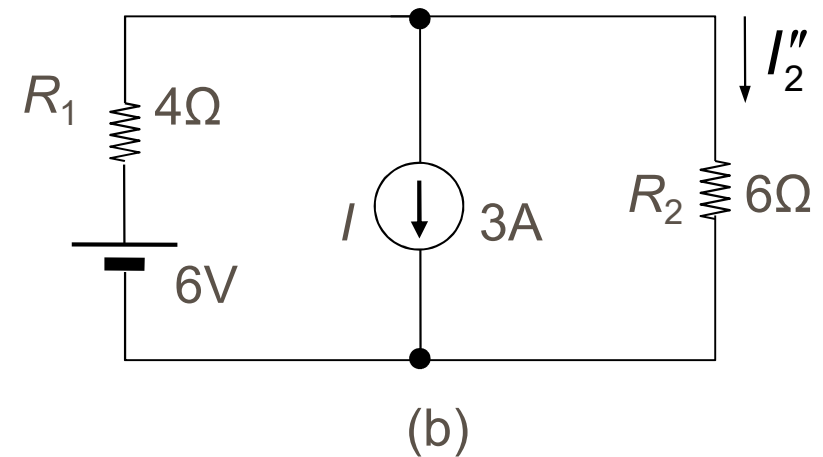
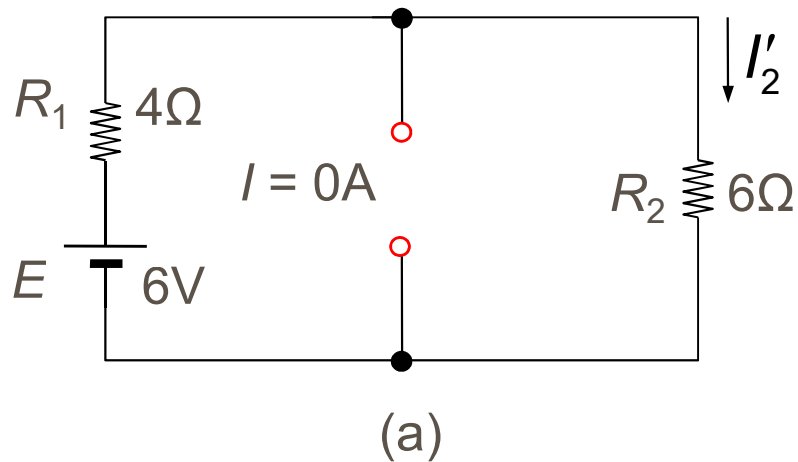
### ■ Teorema da Sobreposição



$$I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6 \text{ V}}{4 \Omega + 6 \Omega} = 0.6 \text{ A}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Sobreposição

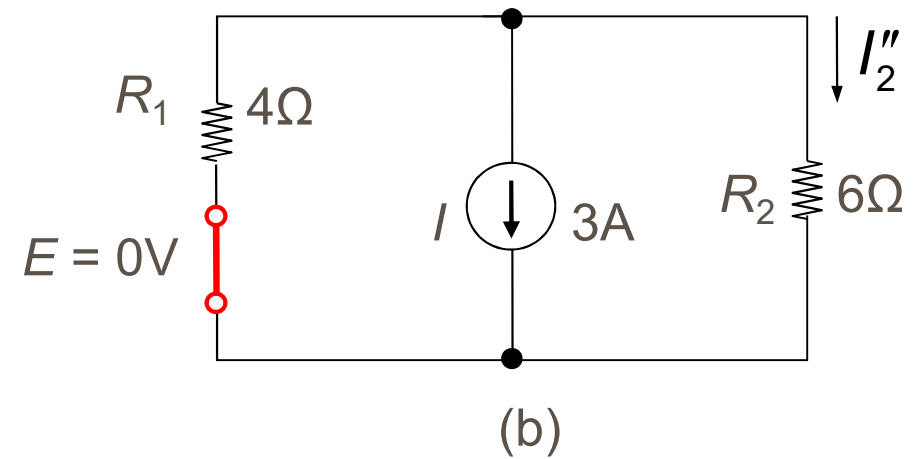
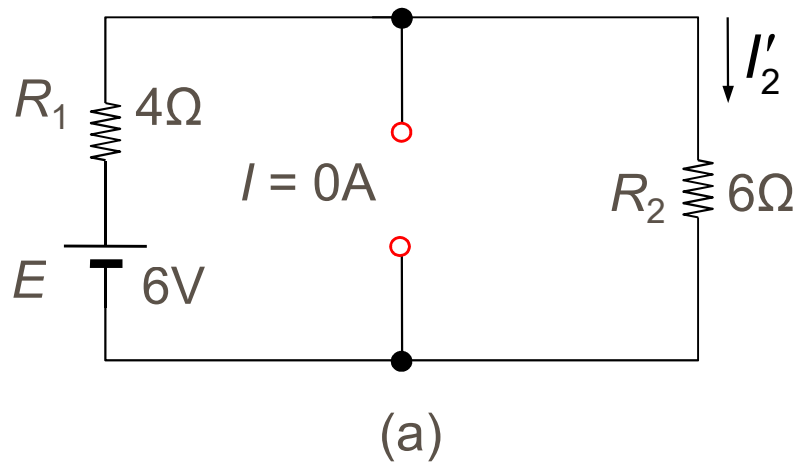


$$I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6 \text{ V}}{4 \Omega + 6 \Omega} = 0.6 \text{ A}$$



## ■ Teoremas Fundamentais

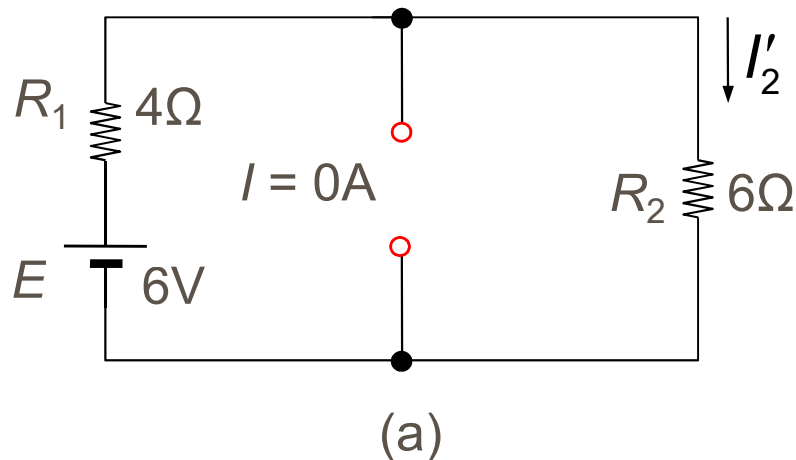
### ■ Teorema da Sobreposição



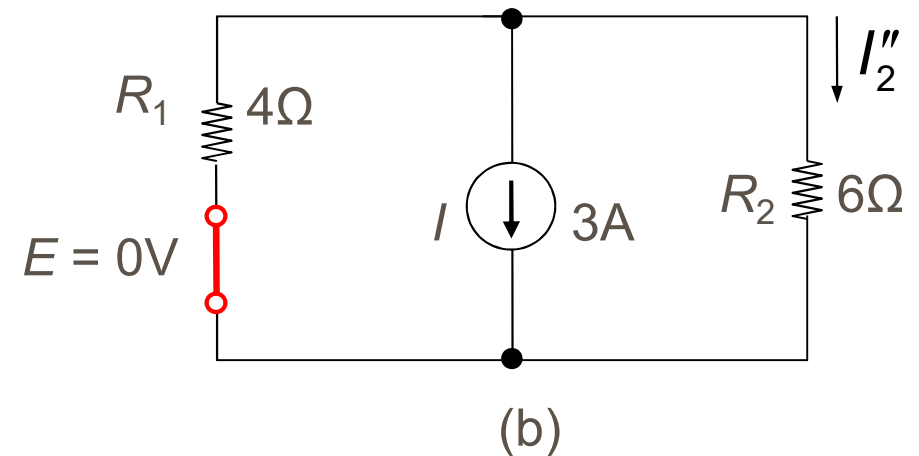
$$I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6 \text{ V}}{4 \Omega + 6 \Omega} = 0.6 \text{ A}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Sobreposição



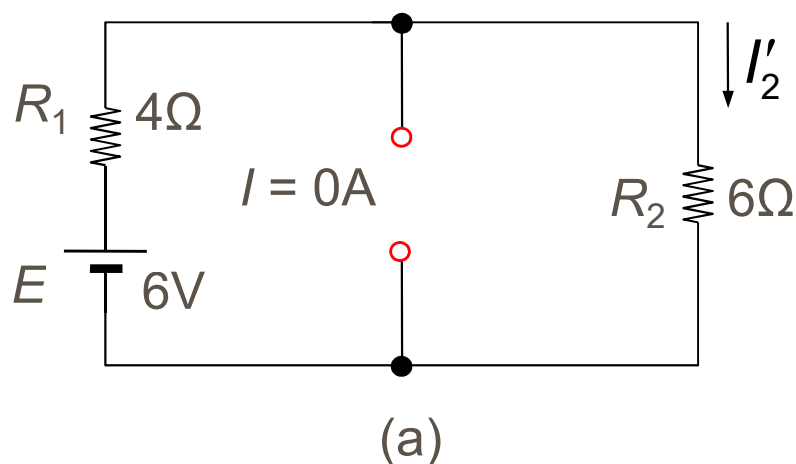
$$I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6 \text{ V}}{4 \Omega + 6 \Omega} = 0.6 \text{ A}$$



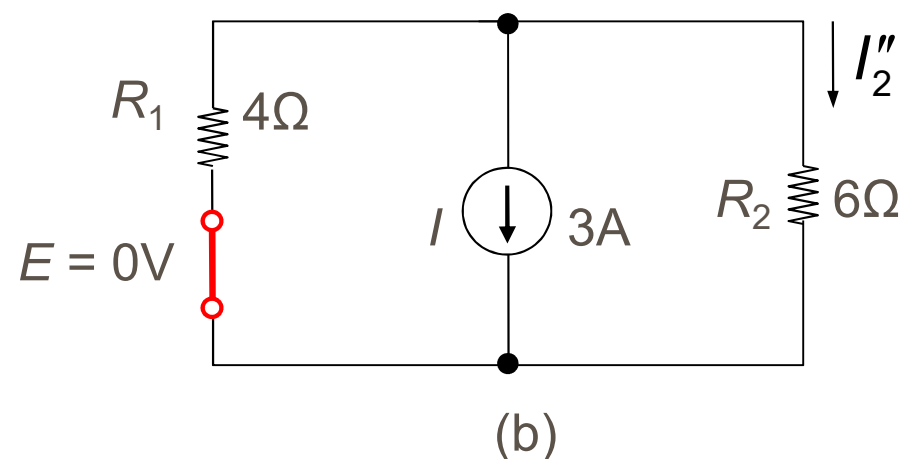
$$I''_2 = -I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -3 \text{ A} \frac{4 \Omega}{4 \Omega + 6 \Omega} = -1.2 \text{ A}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Sobreposição



$$I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6 \text{ V}}{4 \Omega + 6 \Omega} = 0.6 \text{ A}$$

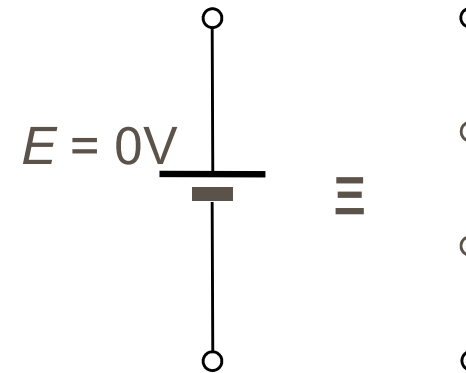
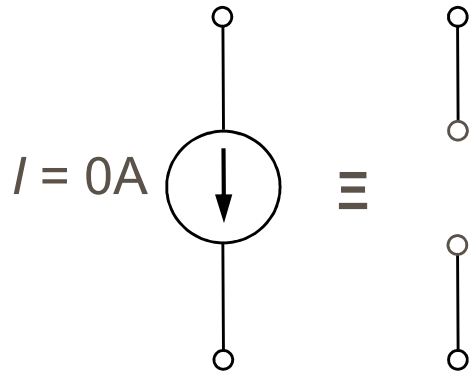


$$I''_2 = -I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -3 \text{ A} \frac{4 \Omega}{4 \Omega + 6 \Omega} = -1.2 \text{ A}$$

$$\rightarrow I_2 = I'_2 + I''_2 = 0.6 \text{ A} - 1.2 \text{ A} = -0.6 \text{ A}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

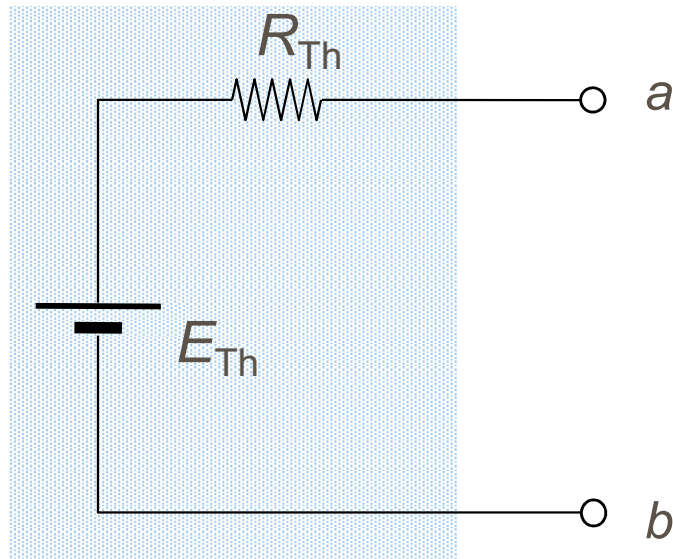
■ Note bem...



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

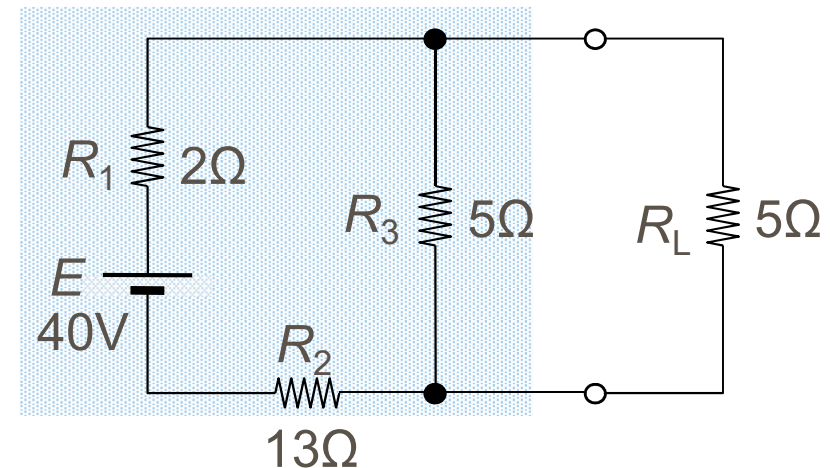
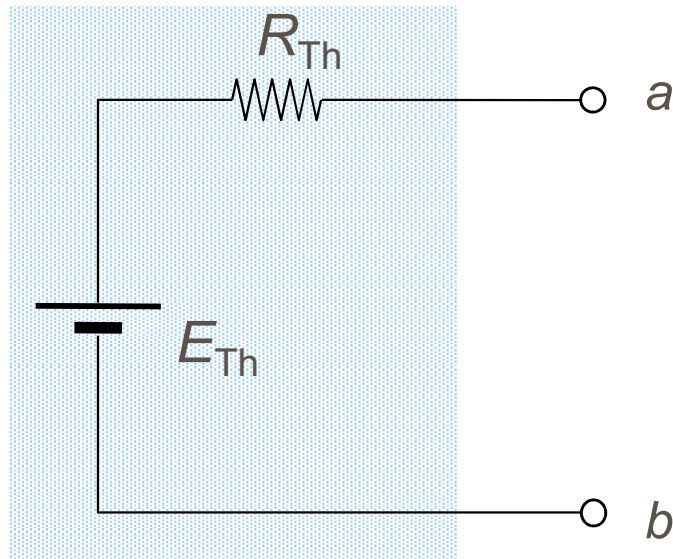
*... O teorema de Thevenin permite a redução de um circuito com qualquer número de resistências e fontes, acessível por dois terminais, a um circuito com apenas uma fonte de tensão e uma resistência interna em série ...*



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

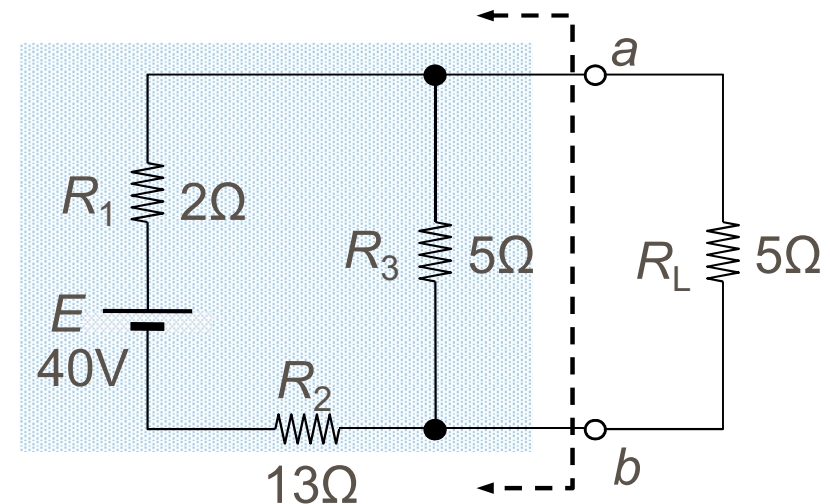
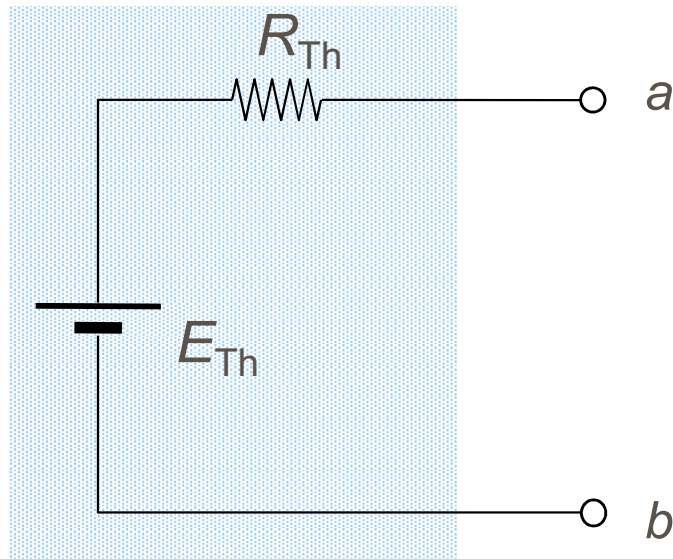
... O teorema de *Thevenin* permite a redução de um circuito com qualquer número de resistências e fontes, acessível por dois terminais, a um circuito com apenas uma fonte de tensão e uma resistência interna em série ...



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

... O teorema de *Thevenin* permite a redução de um circuito com qualquer número de resistências e fontes, acessível por dois terminais, a um circuito com apenas uma fonte de tensão e uma resistência interna em série ...

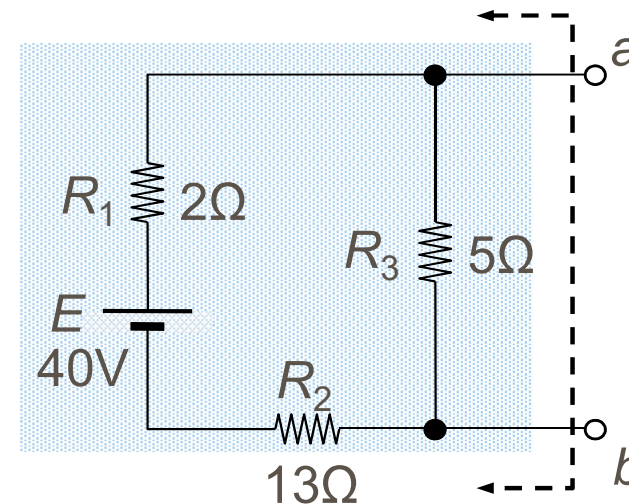
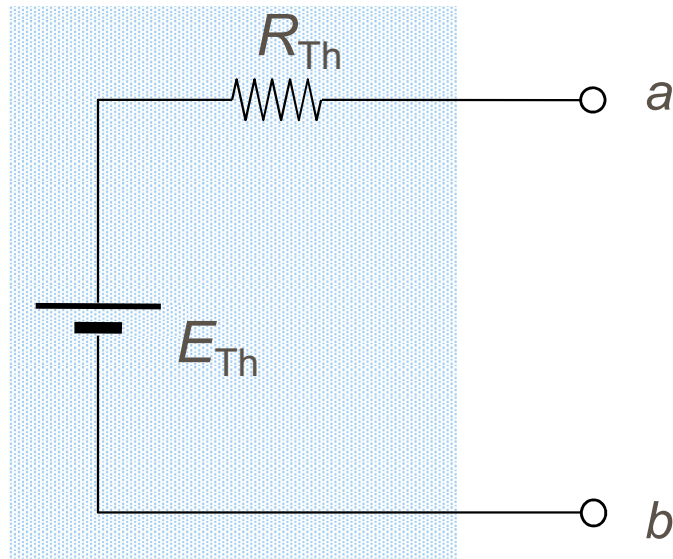




## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

... O teorema de *Thevenin* permite a redução de um circuito com qualquer número de resistências e fontes, acessível por dois terminais, a um circuito com apenas uma fonte de tensão e uma resistência interna em série ...

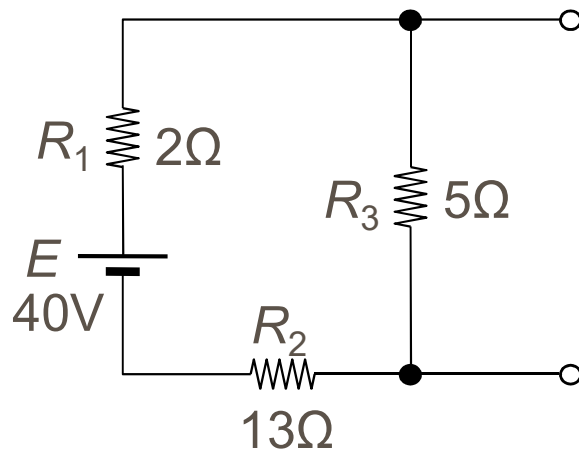




## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

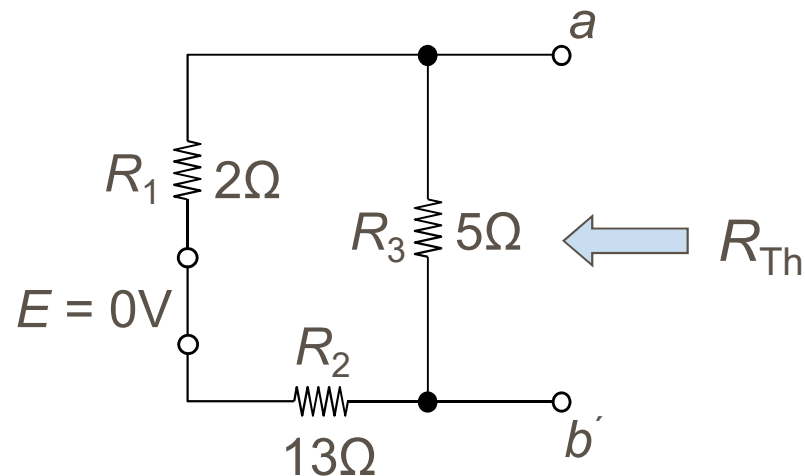
... a resistência equivalente de Thevenin  $R_{Th}$ , é a resistência vista a partir dos dois terminais do circuito que se pretende reduzir, quando se anulam os efeitos de todas as fontes (curto-circuitando as fontes de tensão e abrindo as fontes de corrente) ...



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

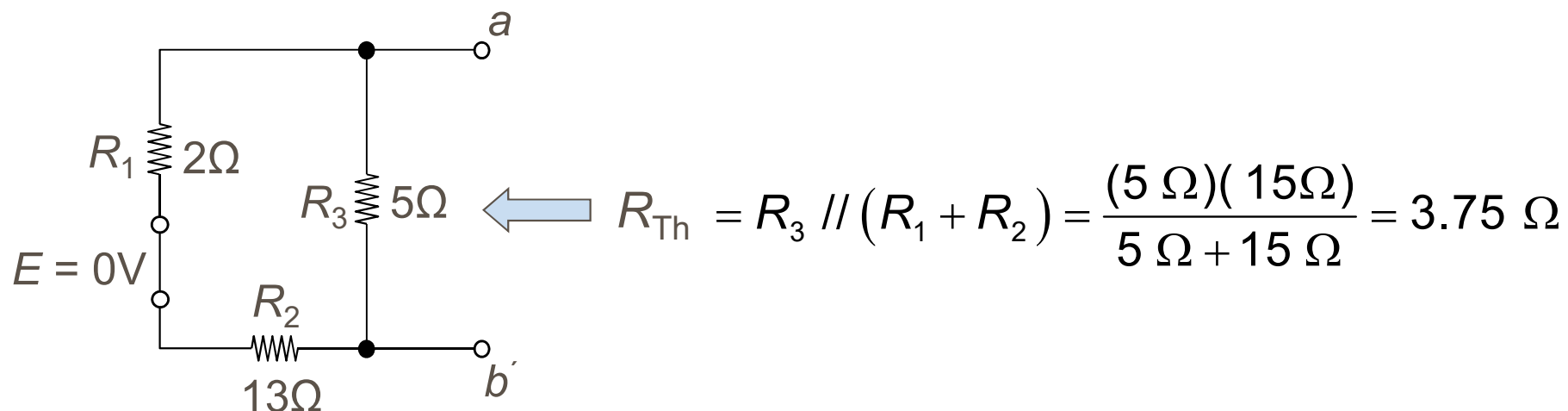
... a resistência equivalente de Thevenin  $R_{Th}$ , é a resistência vista a partir dos dois terminais do circuito que se pretende reduzir, quando se anulam os efeitos de todas as fontes (curto-circuitando as fontes de tensão e abrindo as fontes de corrente) ...



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

... a resistência equivalente de Thevenin  $R_{Th}$ , é a resistência vista a partir dos dois terminais do circuito que se pretende reduzir, quando se anulam os efeitos de todas as fontes (curto-circuitando as fontes de tensão e abrindo as fontes de corrente) ...

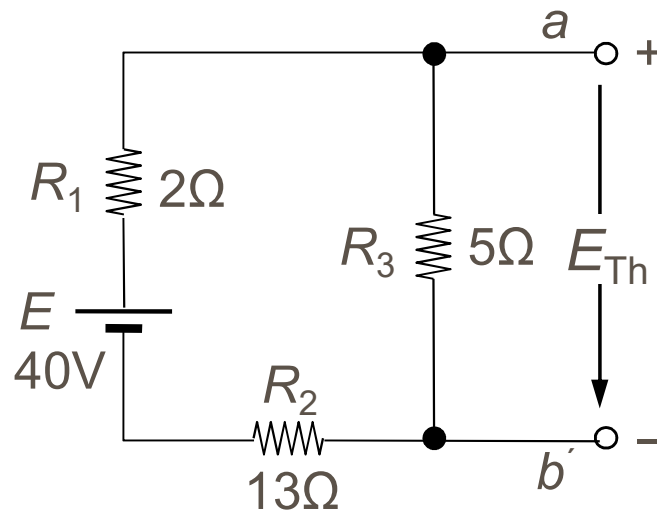


## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

... a tensão equivalente de Thevenin  $E_{Th}$ , é a tensão que se observa entre os dois terminais na situação de circuito aberto (considerando o efeito de todas as fontes)

...

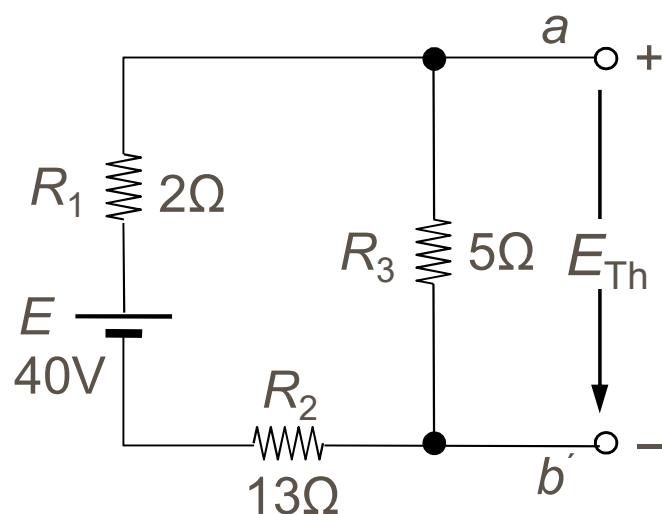


## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de *Thevenin*

... a tensão equivalente de Thevenin  $E_{Th}$ , é a tensão que se observa entre os dois terminais na situação de circuito aberto (considerando o efeito de todas as fontes)

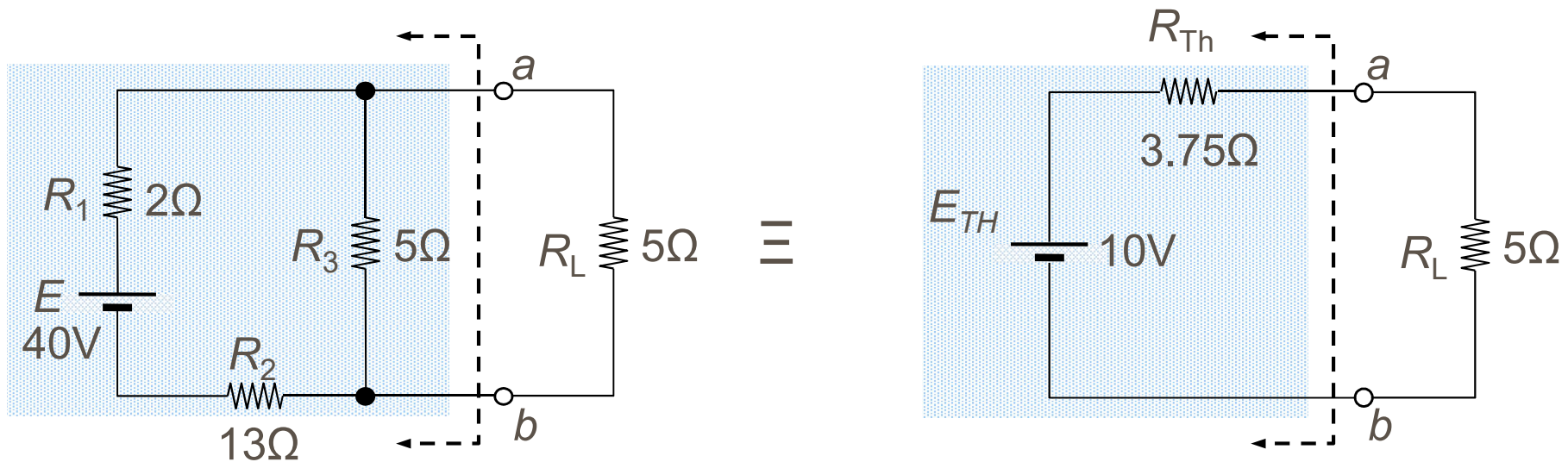
...



$$E_{Th} = V_{R_3} = E \frac{R_3}{R_T} = 40 \text{ V} \frac{5\Omega}{20\Omega} = 10 \text{ V}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

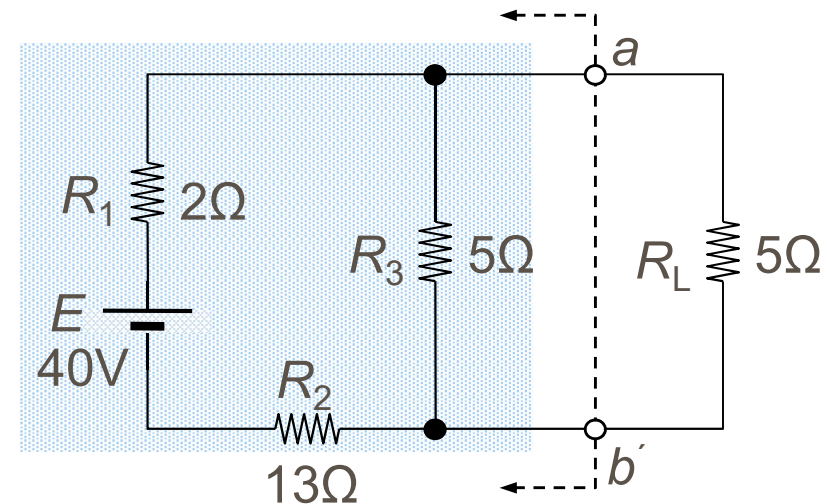
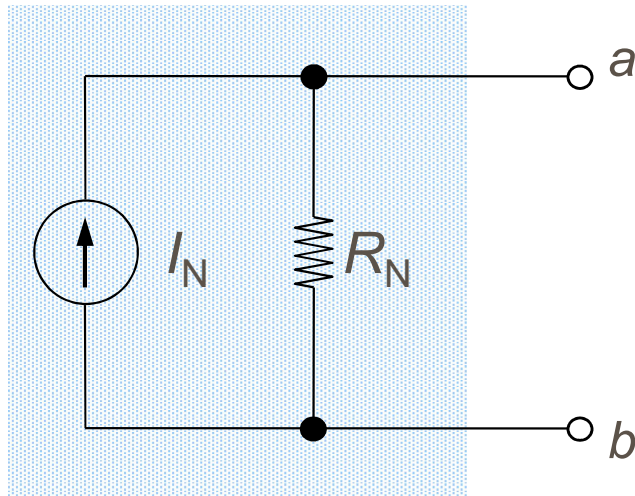
### ■ Teorema de *Thevenin*



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de Norton

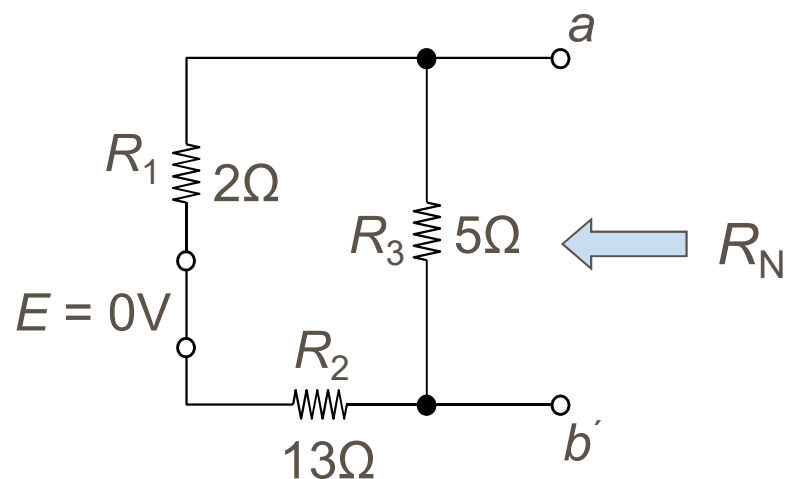
... O teorema de Norton permite a redução de um circuito com qualquer número de resistências e fontes e acessível por dois terminais, a um circuito com apenas uma fonte de corrente e uma resistência interna em paralelo ...



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de Norton

... a resistência equivalente de Norton  $R_N$ , é a resistência vista a partir dos dois terminais do circuito que se pretende reduzir, quando se anulam os efeitos de todas as fontes (curto-circuitando as fontes de tensão e abrindo as fontes de corrente) ...



$$R_N = R_3 \parallel (R_1 + R_2) = \frac{(5\Omega)(15\Omega)}{5\Omega + 15\Omega} = 3.75\Omega$$

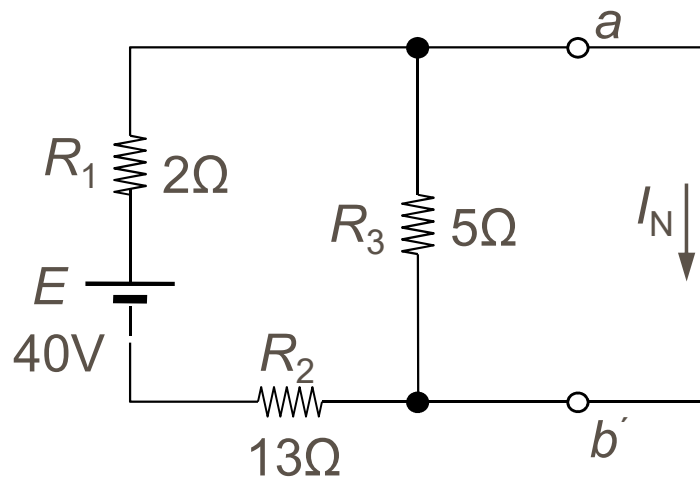


## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema de Norton

... a corrente equivalente de Norton  $I_N$ , é a corrente que circula entre os dois terminais na situação de curto-circuito (considerando o efeito de todas as fontes)

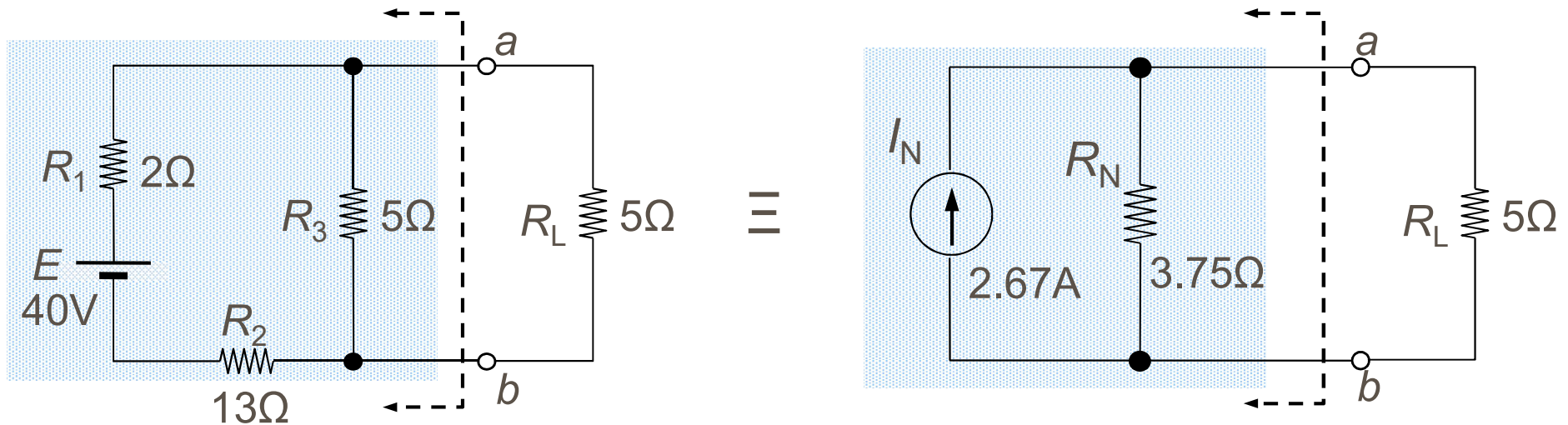
...



$$I_N = \frac{E}{R_1} = \frac{40 \text{ V}}{13+2 \Omega} = 2,67 \text{ A}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

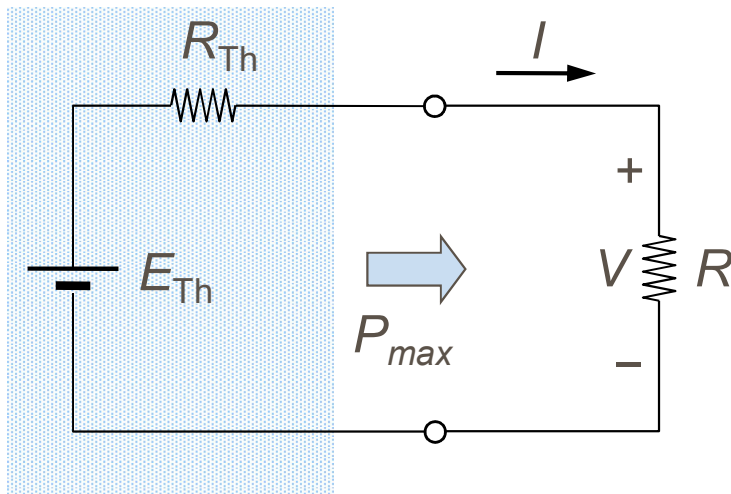
### ■ Teorema de *Norton*



## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Máxima Transferência de Potência

... A máxima transferência de potência entre uma fonte e uma carga ocorre quando a resistência da carga é igual e a resistência interna da fonte ...



$$P_{\max} \Rightarrow R = R_{TH}$$

$$\rightarrow P_{\max} = \frac{E_{Th}^2}{4R}$$

## ■ Teoremas Fundamentais

### ■ Teorema da Máxima Transferência de Potência

#### Exemplo

