

LEI

18 set 23

Física Experimental

1.º semestre - 2023/2024

<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/>

José Figueiredo

Edifício C8, Sala 8.5.14 - Tel: 217 500 939 · Ext. 28514

Conteúdos programáticos

Componente de circuitos elétricos e eletrónica analógica:

Esta componente da UC de Física Experimental compreende o estudo dos conceitos essenciais à compreensão do papel dos elementos/componentes elétricos, como resistências, condensadores, bobines e transformadores, bem como o funcionamento e a função de dispositivos como díodos, LEDs, transístores, amplificadores operacionais. Estudo compreende também as leis que regem o funcionamento dos circuitos, como a lei de Ohm, as leis de Kirchhoff, os modelos físicos usados para descrever estes componentes, e ainda as técnicas de análise mais comuns, abordando os domínios do comportamento no tempo e na frequência. Em paralelo, serão abordadas as aplicações mais comuns dos circuitos eletrónicos estudados.

Componente de circuitos digitais (eletrónica digital):

A componente de eletrónica digital da UC de Física Experimental compreende o estudo da representação de informação em sistemas digitais, das funções e portas lógicas básicas, de circuitos combinatórios e sequenciais simples, e dos conceitos associados aos conversores analógico-digitais (ADCs) e digitais-analógicos (DACs).

Objetivos e programa

A UC Física Experimental tem como objetivo contribuir para a aquisição de conhecimentos e de conceitos que abarcam os princípios físicos que estão na base do funcionamento dos componentes e circuitos elétricos e eletrônicos, incluindo conceitos sobre sinais elétricos, aparelhos de medida, métodos de medição e análise de grandezas elétricas.

Os conteúdos teóricos e as atividades laboratoriais centram-se no estudo de componentes elétricos e eletrônicos, dos equipamentos de medida de grandezas elétricas, e na análise de funcionamento de circuitos elétricos e eletrônicos (analógicos e digitais). Nas aulas teóricas revêm-se os conceitos fundamentais necessários à compreensão do funcionamento de componentes e à operação de circuitos elétricos e eletrônicos, ao funcionamento dos aparelhos de medida, dos métodos de medição e à análise de dados.

A parte laboratorial compreende uma componente de preparação prévia (a realizar antes da aula) na qual é realizada a análise do funcionamento de circuitos usando simuladores de circuitos elétricos e eletrônicos (PSpice) com os valores nominais dos componentes. Na aula PL, as simulações são verificadas usando agora os valores medidos das grandezas física que caracterizam os componentes (valores reais), seguida da montagem dos circuitos em placas de teste e consequente caracterização do seu funcionamento, com a análise comparativa com os resultados das simulações efetuadas com os valores reais das grandezas físicas que caracterizam o circuito.

Atividades laboratoriais

Os trabalhos abarcam os seguintes conceitos e conteúdos :

1. Circuitos divisores de tensão e de corrente, curva I-V da resistência ôhmica e de uma lâmpada incandescente;
2. Condensadores e filtros RC;
3. Curvas I-V de díodos de sinal, de díodos Zener e de Leds;
4. Transformadores e retificação de sinais;
5. Portas lógicas, operações binárias, memórias e contadores;
6. Sinais não sinusoidais, séries de Fourier e digitalização de sinais.

Cada sessão laboratorial compreende a realização de trabalho autónomo (preparação previa das atividades a realizar (e.g., estudo analítico e a simulação dos circuitos a montar), atividade laboratorial de montagem em placas de teste e de análise de funcionamento de circuitos, e de tratamento dos resultados obtidos na atividade laboratorial. O acompanhamento dos alunos é constante durante a realização das atividades presenciais; e, sempre que solicitado, nas sessões de trabalho autónomo.

Calendarização PLs

- Laboratório 1: Circuitos divisores de tensão e de corrente, curva I-V da resistência ôhmica e de uma lâmpada incandescente;
 - Turno A: 25/9
 - Turno B: 2/10
- Laboratório 2: Condensadores e filtros RC;
 - Turno A: 9/10
 - Turno B: 16/10
- Laboratório 3: Curvas I-V de díodos de sinal, de díodos Zener e de Leds;
 - Turno A: 23/10
 - Turno B: 30/10
- Laboratório 4: Transformadores e retificação de sinais;
 - Turno A: 6/11
 - Turno B: 13/11
- Laboratório 5: Portas lógicas, operações binárias, memórias e contadores;
 - Turno A: 20/11
 - Turno B: 27/11
- Laboratório 6: Sinais não sinusoidais, séries de Fourier e digitalização de sinais.
 - Turno A: 4/12
 - Turno B: 11/12

Funcionamento e metodologia de avaliação

As turmas PL são divididas em dois turnos (A e B) com até 8 alunos por turno (cada turno compreenderá 4 grupos de 2 alunos). Cada turno terá aulas de 2 em 2 semanas, realizando os 6 trabalhos acima listados. O tempo letivo da semana em que o turno não tem aula PL presencial deve ser dedicada ao estudo prévio dos circuitos a estudar na aula PL seguinte.

Classificação final e as condições obrigatórias de aprovação na UC:

a) Parte Laboratorial (PL): compreende atividades de preparação prévia (estudo analítico e simulação), a montagem e a análise do funcionamento de circuitos elétricos e eletrónicos. A classificação na PL deve ser maior ou igual a 10 em 20 valores. A PL tem peso de 60% na nota final da UC.

b) Parte Teórica (PT) - avaliação em exame: A matéria a avaliar abarcará a compreensão dos conceitos necessários é boa realização dos trabalhos (incluindo os conhecimentos adquiridos em resultantes das atividades de preparação, da do desempenho e da qualidade da análise dos resultados obtidos). A classificação da PT corresponde à nota obtida no exame (normal e/ou recurso) e deve ser maior ou igual a 8 valores. A PT tem peso de 40% na nota final da UC.

c) A Nota Final da UC (NF) é calculada por: $NF = 0,60 PL + 0,40 PT$.

Metodologia de avaliação da parte laboratorial

Cálculo da classificação na Parte Laboratorial (PL):

Média aritmética das 6 “avaliações contínuas” do trabalho individual (incluindo a preparação prévia dos trabalhos e o desempenho em sala de aula). As “avaliações contínuas” das componentes da PL são apresentadas aos alunos na forma literal A B C D F, cuja correspondência numérica (a 200 pontos) é a seguinte:

A. 180 a 200 pontos

B. 150 a 179 pontos

C. 120 a 149 pontos

D. 100 a 119 pontos

F. < 100 pontos

Em cada sessão PL, o docente regista para si as classificações com os valores numéricos efetivos. No final do semestre, procede-se ao ajuste do valor numérico das notas entre todos os docentes, para “harmonizar” as classificações numéricas finais da PL.

Resumo da metodologia de avaliação

Nota da parte laboratorial (NPL): A avaliação das aulas laboratoriais é contínua, e considera as atividades de preparação, o desempenho nas aulas PL e a produção de relatórios sucintos, a entregar no final da aula, sendo que o aluno só ficará aprovado na componente prática se tiverem uma classificação final igual ou superior a 10 valores.

Nota da parte Teórica (NPT): A aprovação na componente teórica é obtida através da realização de exame. Para aprovação na UC a nota da componente teórica (nota de exame) deverá ser igual ou superior a 8 valores, independentemente de a nota da componente laboratorial ser igual ou superior a 10 valores.

A Nota Final (NF) é calculada por: $NF = 0,60 \text{ NPL} + 0,40 \text{ NPT}$.

Para mais detalhe [Consultar Avaliação no Moodle](#)

Análise e projeto de circuitos elétricos

- A **análise** é o processo pelo qual determinamos o que se pretende com o problema, obtemos as informações necessárias para entendê-lo e calculamos os parâmetros de interesse.
- Quando fornecemos energia a circuitos/sistemas eletrônicos começamos por ter os “períodos” ou regimes de funcionamento **transitório**, seguindo-se o regime **permanente ou estacionário**.
- Podemos considerar 4 categorias de análise:
 - **Análise DC (não considera o regime transitório)**
 - Análise **transiente** (análise temporal – ver como os sinais variam ao longo do tempo)
 - Análise sinusoidal (... regime permanente)
 - Resposta em frequência (como é que um circuito responde a sinais sinusoidais de frequência diferente)
- **Projeto** é o processo pelo qual sintetizamos algo novo como parte da solução de um problema, de uma necessidade e de uma invenção.
- Uma parte crucial do projeto é a **análise das potenciais soluções** – existe, em geral, mais que uma *solução (circuito)* para a uma dada aplicação.

A análise de circuitos e resolução de problemas em engenharia₁

- A análise de circuitos elétricos e eletrônicos promove um conjunto de competências essenciais a um engenheiro, com ênfase para o desenvolvimento de metodologias de resolução de problemas, incluindo a habilidade de determinar o(s) objetivo(s) de um problema particular, **capacidade de recolher informação necessária para chegar à solução**, tirando partido de técnicas como, por exemplo, a análise por inspeção e a decomposição em circuitos mais simples, e ter em atenção considerações como, por exemplo, a simetria dos circuitos.
- Guiando-nos pela nossa intuição, a compreensão do funcionamento dos circuitos elétricos beneficia muito da nossa capacidade de transferir o que conhecemos do comportamento de outros sistemas físicos, como, por exemplos, sistemas hidráulicos, permitindo-nos muitas vezes chegar à solução de um problema novo sem grandes esforços.
- É importante treinar a análise por inspeção (e.g. decompor um circuito em topologias mais simples), e desenvolver o conhecimento intuitivo acerca do funcionamento dos dispositivos e circuitos – fazendo analogias com outros sistemas físicos.
- A análise de circuitos dá-nos, acima de tudo, a oportunidade de praticar, em abundância, a verificação da validade/correção das soluções que encontramos.

A análise de circuitos e resolução de problemas em engenharia₂

11

Quase tudo que iremos aprender nesta UC será consequência de 3 leis: lei de Ohm, lei de Kirchhoff para a tensão (lei das malhas – conservação da energia) e lei de Kirchhoff para a corrente (lei dos nós – conservação da carga elétrica).

Além de estudarmos componentes e circuitos elétricos e sistemas digitais, também procuraremos desenvolver/treinar técnicas de análise e resolução de problemas e estimular a habilidade de tirar partido do conhecimento intuitivo acerca do funcionamento do mundo físico que poderá ser útil na resolução de certos problemas, nomeadamente treinando a análise por inspeção (e.g. decompor um circuito em topologias mais simples) e tirar partido da simetria dos circuitos.

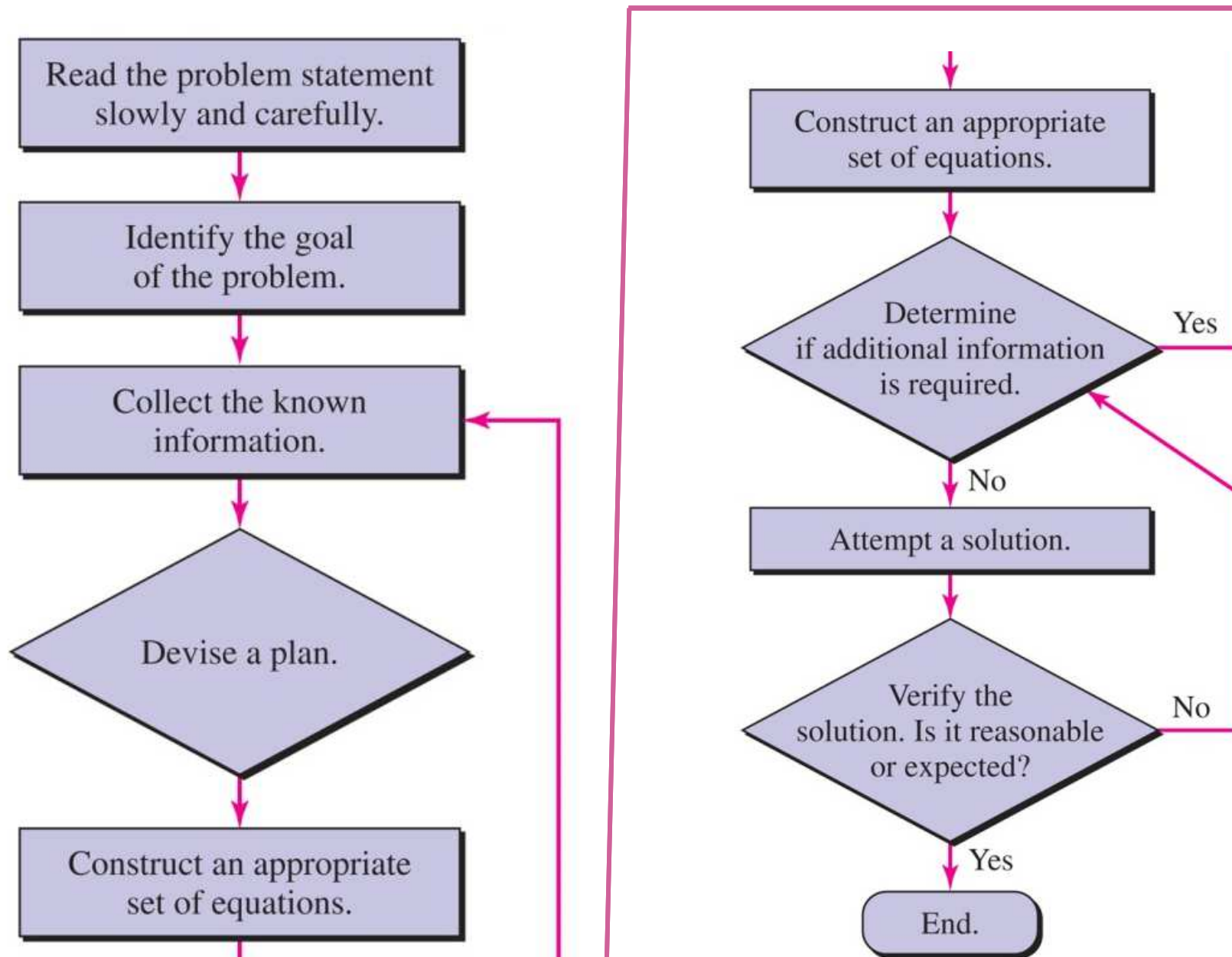
É fundamental treinar atitudes e metodologias tendentes à/ao:

- abordagem metódica para a resolução de problemas
- capacidade de determinar a meta ou metas de um problema específico
- recolha das informações necessárias para efetuar uma solução, e
- reforço da prática de verificação da validade da solução.

Por fim, a resolução de um problema também deve ser **esteticamente agradável** (que permita, por exemplo, a leitura e a compreensão por outras pessoas).

‡

Estratégias de resolução de problemas



Objetivos da educação e formação em engenharia

Quatro etapas do método científico:

- Observação - observar refletindo
- Formular uma hipótese
- Experimentar - realizar experiências para avaliar a validade da hipótese
- Avaliação/teste permanente da validade da hipótese.

Visualizar o vídeo do link abaixo

O vídeo mostra a resposta de várias pessoas à seguinte tarefa/desafio: tirar um amendoim que está no fundo do tubo/frasco, sendo que tubo/frasco está preso à mesa, que por sua vez está fixa ao chão. A sala tem material e/ou ferramentas suficientes para completar a tarefa/desafio.

<https://www.youtube.com/watch?v=WU0oplySyT0>

Objetivos da educação e formação (em engenharia)

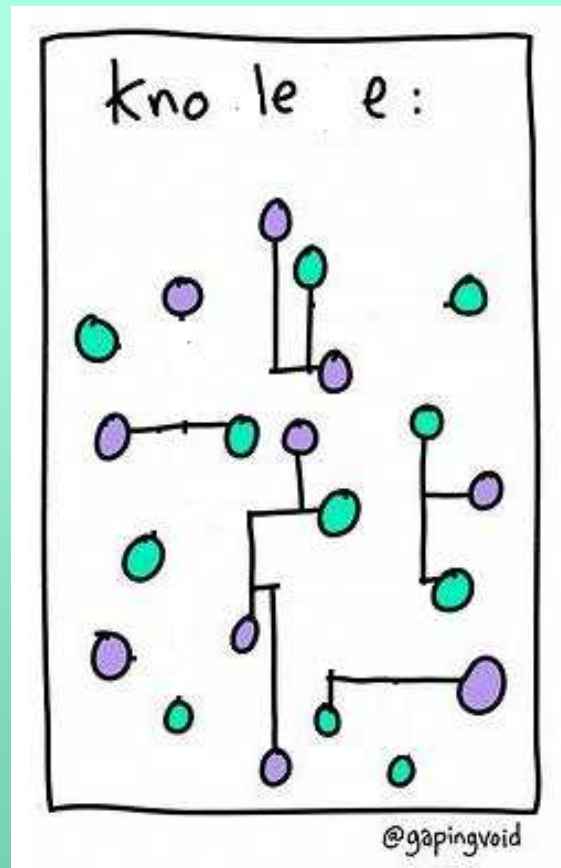
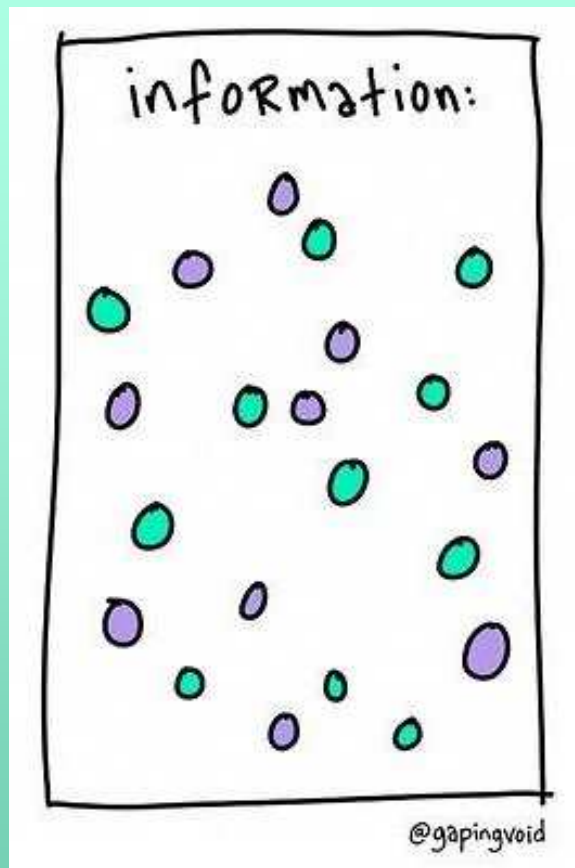
Após a visualização do vídeo do link abaixo:

Porque será que *ninguém* prestou atenção
ao *material* que havia na sala?

Será que estamos a aprender as coisas certas na escola?

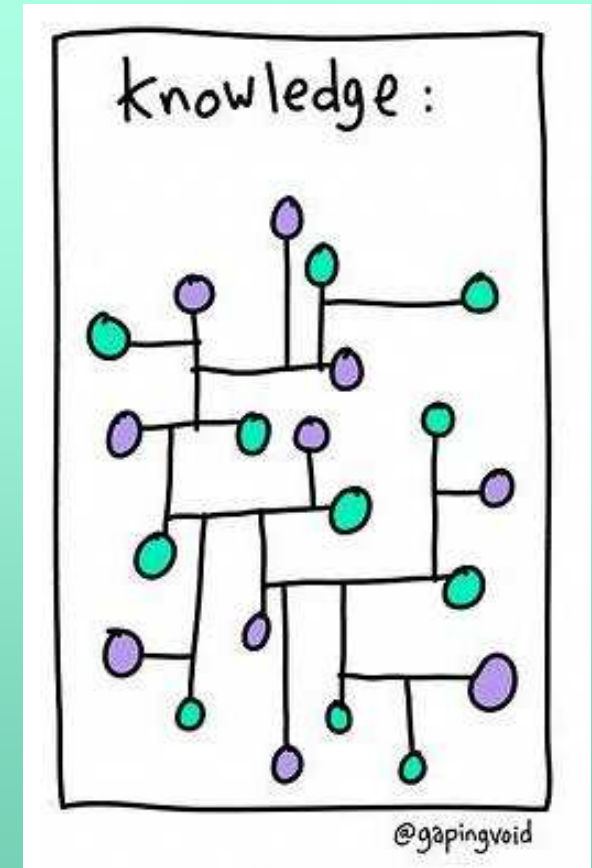
Papel das aulas e a aquisição de conhecimento

Trabalho nas aulas (Ts, TPs, PLs ...)*



***Fornecer e enquadrar informação, relacionar conceitos, promover análise crítica dos assuntos e problemas**

Trabalho autónomo*



**** ligar os “pontos” (com a ajuda dos docentes, se necessário).**

Bibliografia

Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos	Manuel de Medeiros Silva	1996	Fundação Calouste Gulbenkian	
Basic Electronics for Scientists and Engineers	Dennis L. Eggleston	2011	Cambridge University Press	http://cis.rmuti.ac.th/electricrail/wp-content/uploads/2020/08/BasicElectronicsforScientistsandEngineers-2.pdf
Física Experimental: uma Introdução	M. C. Abreu, L. Matias e L. F. Peralta	1994	Editorial Presença	(pdf no sítio Moodle da UC)
Practical Electronics for Inventors	Paul Scherz e Simon Monk	2016	McGraw-Hill Education books	http://instrumentacion.qi.fcen.uba.ar/libro/Scherz.pdf

Materiais disponibilizados pelos docentes (slides, folhas das TPs, guias das aulas PL, etc.).

Trabalho autónomo semanal

A disciplina (de 6 ECTS) tem a carga horária presencial de 4 horas semanais, correspondentes a 1 aula teórica de 1 hora (T), e uma aula laboratorial de 3 horas (P).

A esta carga horária acrescem, "grosso-modo", 4 horas de trabalho autónomo semanal, ou seja, para além carga horária letiva "presencial" será de esperar que o aluno trabalhe para esta UC o correspondente a 1 hora por dia (o equivalente a cerca de 4 horas por semana).

O conhecimento adquirido/trabalhado no âmbito desta UC (como em todas as outras) não deve ser obtido em escassas ou esporádicas, mesmo que muito intensas, doses de estudo, e/ou em sessões muitas vezes realizadas na véspera dos exames/períodos de avaliação.

O conhecimento adquirido desta forma pode servir para passar à cadeira, mas, em regra, não persiste por muito tempo, e a fração que acaba por perdurar apresenta, na maioria das vezes, intermitências e/ou lacunas que impossibilitam ou dificultam, frequentemente, o seu uso em tarefas futuras (subsequentes UCs), nomeadamente no que se refere à boa compreensão de novos conceitos e/ou à resolução de problemas. A resolução de problemas novos fica mais difícil.

Atividades laboratoriais:

É fundamental que o aluno prepare previamente as sessões em que vai participar. A preparação prévia das **atividades laboratoriais irá refletir-se no desempenho em sala de aula, podendo ter, por essa via, um peso** significativo na avaliação final da componente laboratorial.

Simulador PSPICE 9.1

Como ferramenta auxiliar das aprendizagens e de execução das tarefas previstas no programa iremos usar o simulador de circuitos elétricos e eletrônicos PSPICE 9.1. O simulador PSPICE 9.1 deve ser usado na preparação prévia (antes da aula) das atividades a realizar no laboratório (usando os valores nominais indicados nos guias de apoio aos trabalhos, e que caracterizam os componentes e as fontes/geradores de tensão).

Nas aulas laboratoriais o PSPICE será usado de forma recorrente durante as atividades para simular os circuitos a montar usando agora os valores reais (valores medidos) das grandezas físicas que caracterizam os componentes que vão ser usados na montagem e teste dos circuitos usando as placas de teste.

Recomendo que procedam desde já à instalação do simulador PSPICE nos vossos computadores e que comecem a ambientar-se com a utilização do mesmo. A PL da desta semana (18/09 a 22/9) será dedicada à introdução ao uso do PSPICE.

O PSPICE só corre em ambiente Windows. Está instalado nos computadores dos laboratórios da UC e também está disponível nos computadores nos espaços da Faculdade destinados aos alunos. Nas atividades de trabalho autónomo, os alunos podem usar outros simuladores, mas não podem contar com o apoio efetivo dos docentes para a resolução de dificuldades que possam surgir com o uso dos mesmos.

O Sistema Internacional (SI) de Unidades

Unidades fundamentais:

- metro (m), quilograma (kg), segundo (s), **ampere (A)**, kelvin (K), mole (mol), e candela (cd)

Unidades derivadas (**grandezas elétricas**):

- trabalho ou energia: joule (J)
- potência (taxa de realização de trabalho): watt (W), $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
- Tensão, queda de tensão, ou diferença de potencial: volt (V)
- Resistência elétrica: ohm (Ω)
- Condutância elétrica: siemens (S)

[https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino Teaching SI.html](https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html)

Prefixos: SI e PSpice

Qualquer medida/valor de uma grandeza física dever ser expresso em termos da unidade ou da unidade com um prefixo. (SI: sistema internacional de unidades)

Fator	Nome SI	Símbolo SI	PSpice
10^{-12}	pico	p	p ou P
10^{-9}	nano	n	n ou N
10^{-6}	micro	μ	u ou U
10^{-3}	mili	m	m ou M
10^3	quilo	k	k ou K
10^6	mega	M	mega /Mega
10^9	giga	G	Giga /Giga

USAR A NOTAÇÃO CIENTÍFICA e/ou na notação de engenharia.

Ser comedido no uso do número de casas decimais ... e ter em atenção aos algarismos que são realmente significativos.

Exemplos: $12.3 \text{ mW} = 0.0123 \text{ W} = 1.23 \times 10^{-2} \text{ W}$

Maus exemplos: $12,32394675 \text{ mW}$ ou $1,232394675 \times 10^{-2} \text{ W}$

https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/NOTACAO_CIENTIFICA_out2019.pdf

https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/Ensino_Teaching_SI.html

Revisão de conceitos abordados em Física A:

Corrente elétrica, tensão e fontes de tensão, resistência e lei de Ohm, circuitos elétricos, e leis (de Kirchhoff) que descrevem a tensão e a corrente num circuito

Tensão (diferença de potencial) vs corrente

Em geral, para haver corrente entre dois pontos de um dado circuito elétrico tem de haver uma diferença de potencial elétrico entre esses dois pontos.

Essa diferença de potencial elétrico é assegurada (e/ou mantida) por dispositivos designados fontes de tensão.

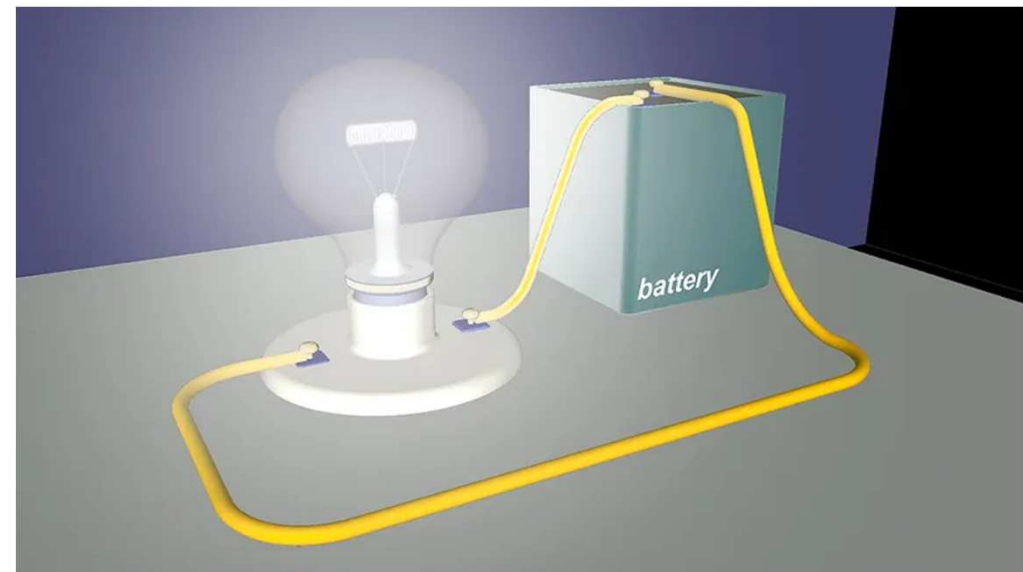
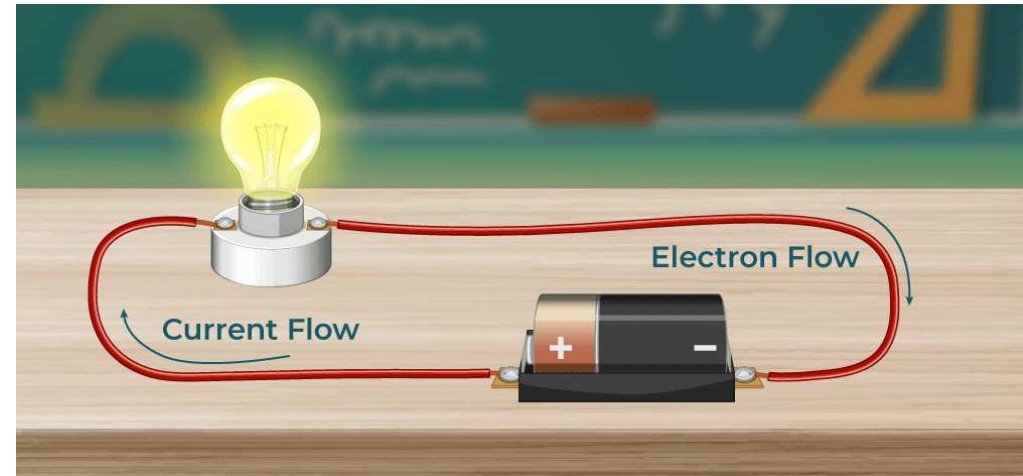
Como exemplos de fonte de tensão temos as baterias e as pilhas.

As fontes de tensão

Ver também:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Gerador_de_tens%C3%A3o

https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_eletromotriz



Tensão elétrica

Pode entender-se a tensão elétrica como a "força" responsável pela movimentação de cargas elétricas (em geral, elétrons).

O potencial elétrico mede a força que uma carga elétrica experimenta no seio de um campo elétrico, expressa pela lei de Coulomb. A tensão é como que a *tendência* que uma carga tem de ir de um ponto para o outro. Normalmente, num circuito elétrico toma-se um ponto que se considera de tensão=zero (comum/terra do circuito) e mede-se a tensão dos outros pontos do circuito relativamente a este.

Tensão elétrica (denotada por ΔV), também conhecida como **diferença de potencial** (ddp, DDP), é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos ou a diferença em energia potencial elétrica por unidade de carga elétrica entre dois pontos. A unidade de medida SI da tensão é o volt – homenagem ao físico italiano Alessandro Volta.

A diferença de potencial (ou tensão) é igual ao trabalho que deve ser feito, por unidade de carga contra um campo elétrico para se movimentar uma carga qualquer.

https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o_el%C3%A9trica

Tensão elétrica

Uma diferença de potencial pode representar tanto uma fonte de energia (força eletromotriz), quanto pode representar energia "perdida" ou armazenada (queda de tensão).

A tensão elétrica pode ser causada por campos elétricos estáticos, por uma corrente elétrica sob a ação de um campo magnético, por campo magnético variáveis ou uma combinação de todos os três.

Um voltímetro pode ser utilizado para se medir a DDP entre dois pontos de um circuito elétrico, sendo que usualmente considera-se que num dado ponto do circuito o potencial (ou tensão) é 0 V.

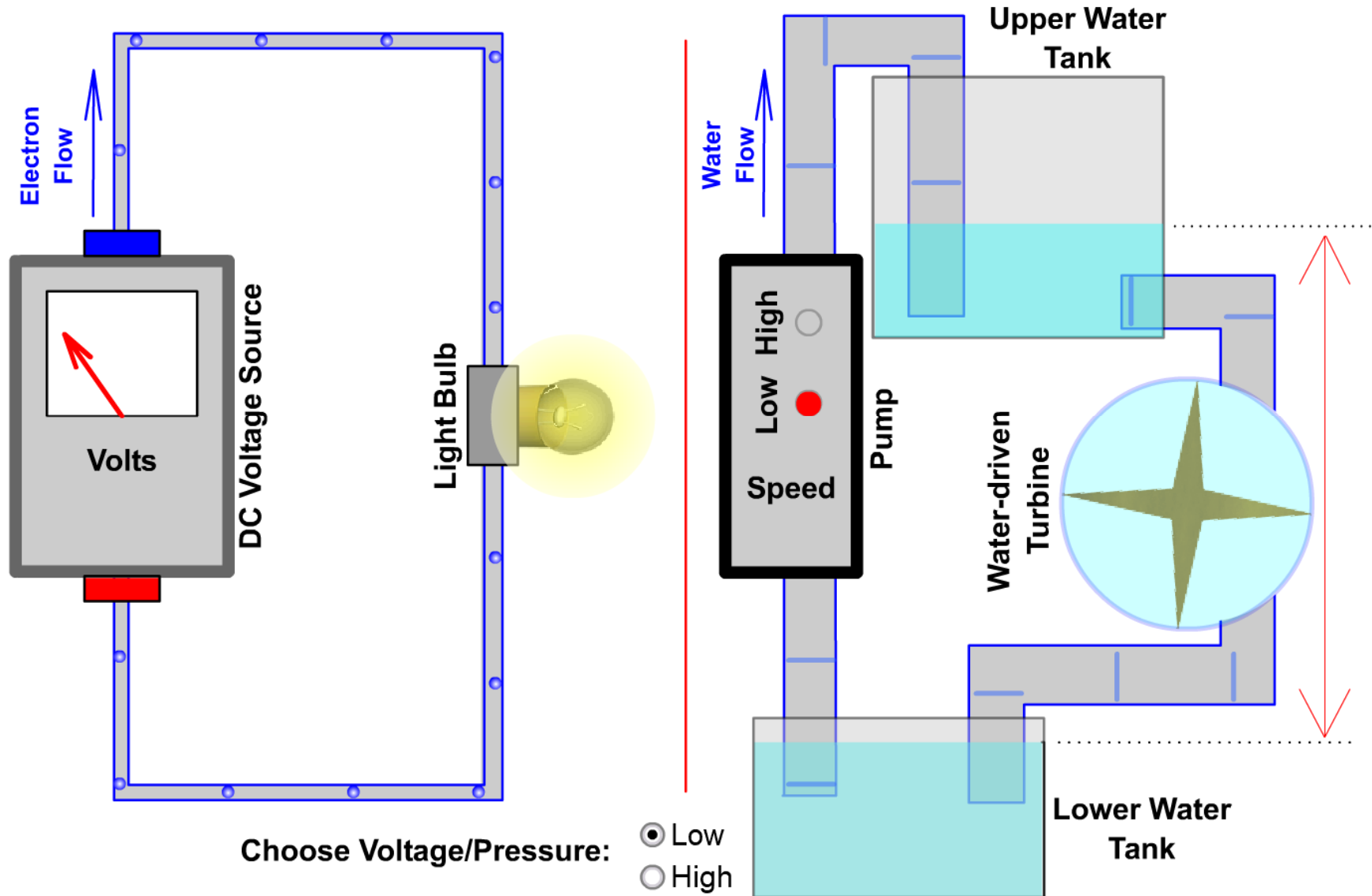
A definição/localização deste ponto é muitas vezes arbitrária. Este ponto designa-se por comum (ou terra) do circuito.

Contudo, normalmente o termo “terra” designa um ponto do circuito com certas especificidades – ver slides adiante.

https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o_el%C3%A9trica

Circuitos elétricos - analogia c/ circuitos hidráulicos

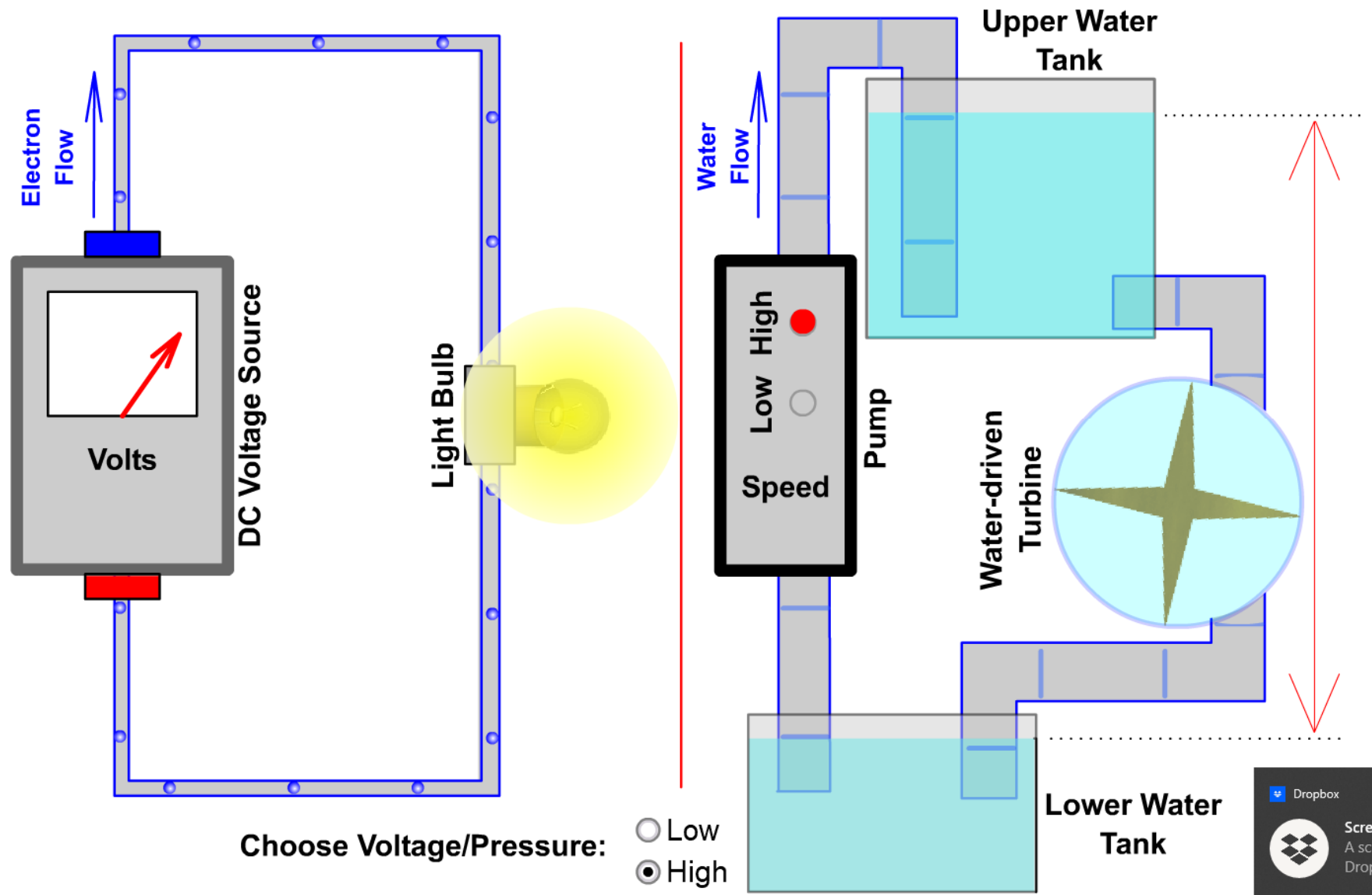
Comparing a DC Circuit to the Flow of Water



<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/WaterAnalogy.swf>

Circuitos elétricos - analogia c/ circuitos hidráulicos

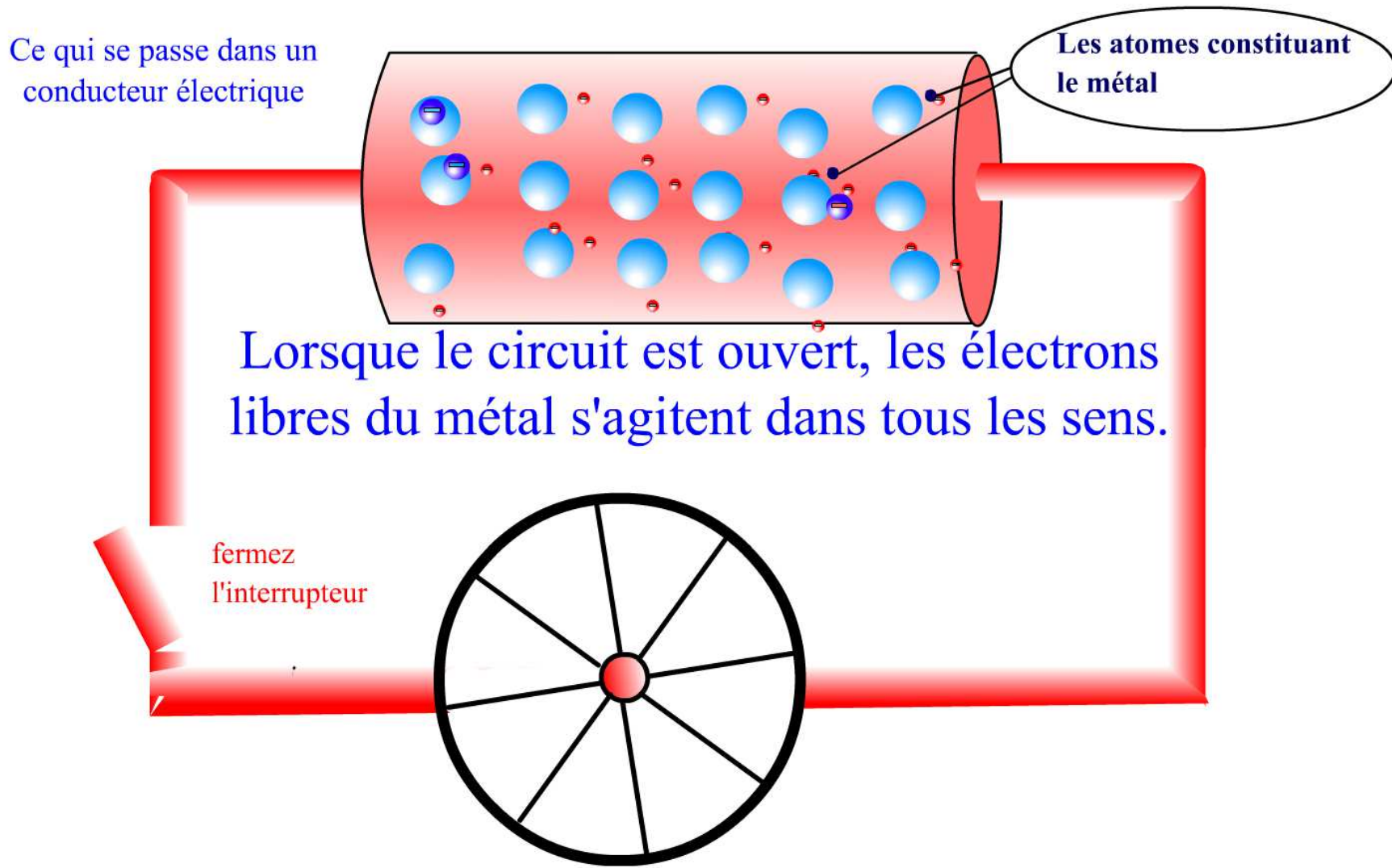
Comparing a DC Circuit to the Flow of Water



<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/WaterAnalogy.swf>

Bons condutores de eletricidade

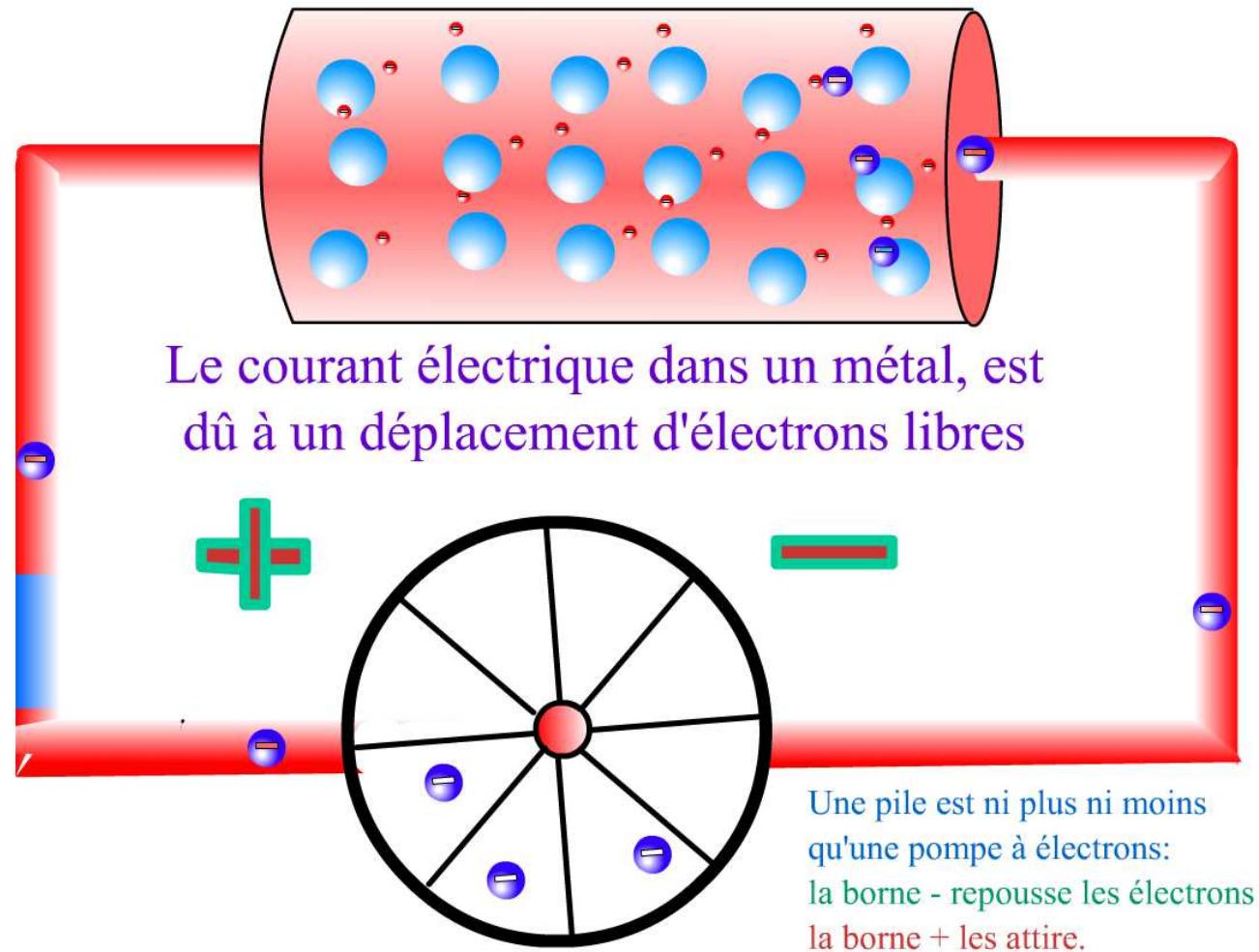
Mesmo que haja uma diferença de potencial entre dois pontos, para haver corrente o circuito tem de corresponder a percurso fechado.



<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/corrente-condutorelectrico.swf>

Bons condutores de eletricidade

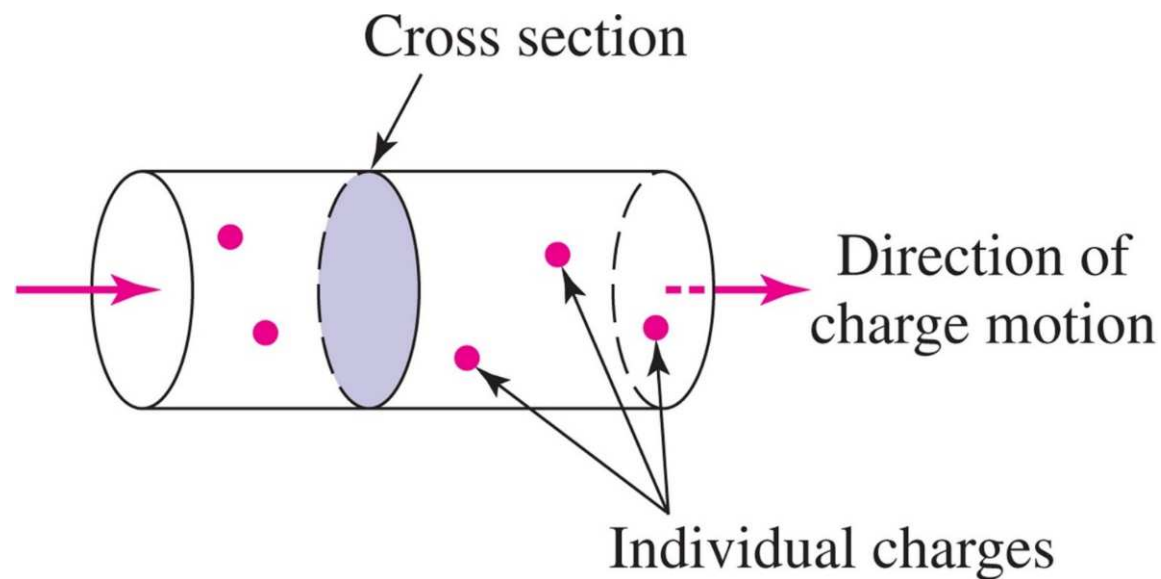
Mesmo que haja uma diferença de potencial entre dois pontos, para haver corrente o circuito tem de corresponder a percurso fechado.



<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/corrente-condutorelectrico.swf>

Corrente elétrica e carga elétrica₁

A corrente elétrica num ramo / fio / componente de um circuito corresponde à **taxa de fluxo da carga elétrica q** que atravessa uma seção desse ramo / secção de fio / componente.



Unidade SI de intensidade de corrente elétrica / é o ampere (A)
unidade SI de carga elétrica q é o coulomb (C)

$$1 \text{ ampere} = 1 \text{ coulomb/segundo (ou } 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s)}$$

Carga elétrica

A quantidade de carga elétrica é **conservada**: não pode ser criada ou destruída.

Símbolo de carga elétrica: Q ou q ; unidade é o coulomb (C).

A quantidade de carga mais pequena que pode existir isoladamente é a correspondente à carga elétrica de um eletrão $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

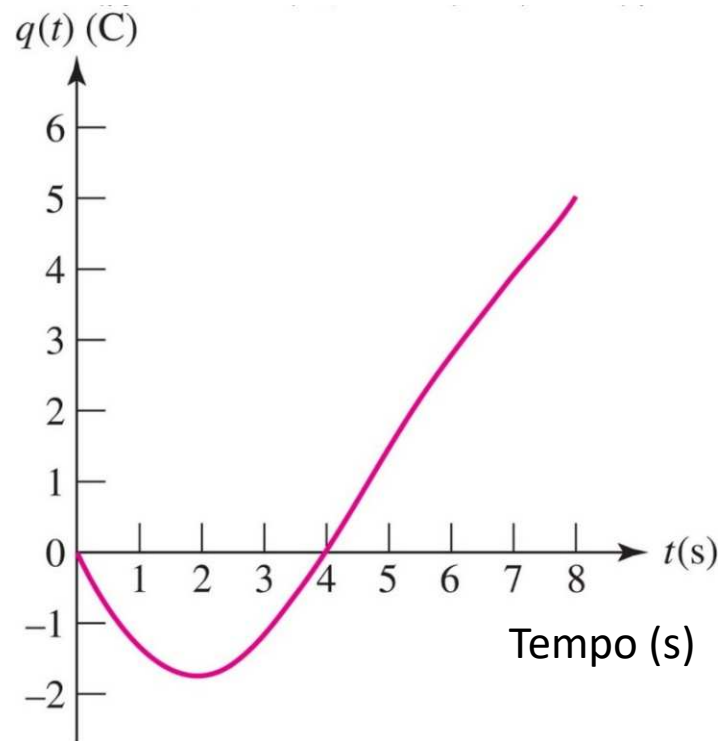
ou de um próton $+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Na grande maioria dos materiais bons condutores de eletricidade e, portanto, nos circuitos elétricos, o fluxo de carga elétrica (corrente elétrica) corresponde ao **movimento de eletrões, que é oposto ao sentido adotado convencionalmente,**
- **Sentido convencional da corrente: sentido oposto aos das cargas negativas - a corrente tem sempre o sentido *do potencial maior para o potencial menor – ver adiante.***

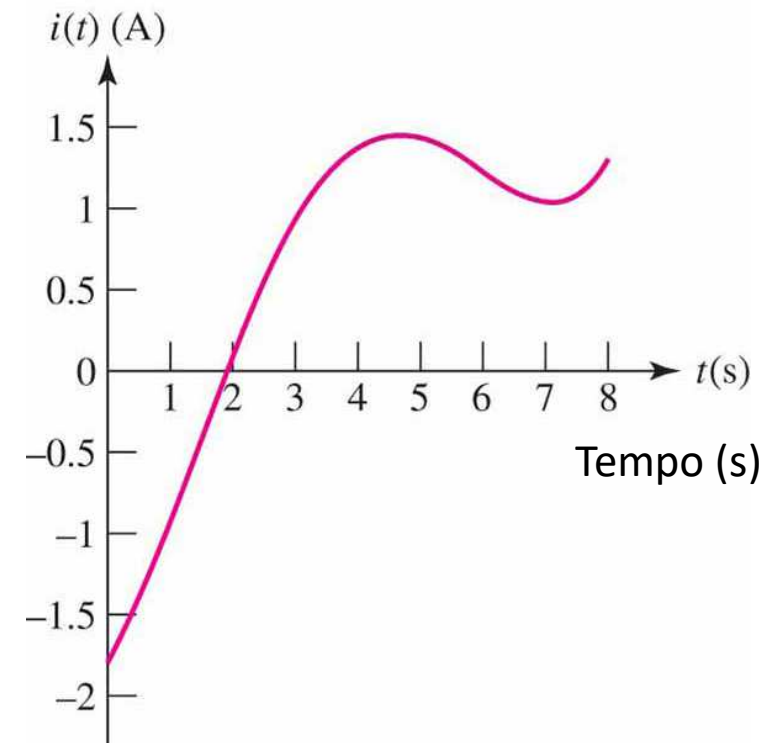
Corrente e carga elétrica: $I = dq/dt$

$I = dq/dt$: taxa de fluxo da carga elétrica

Carga elétrica



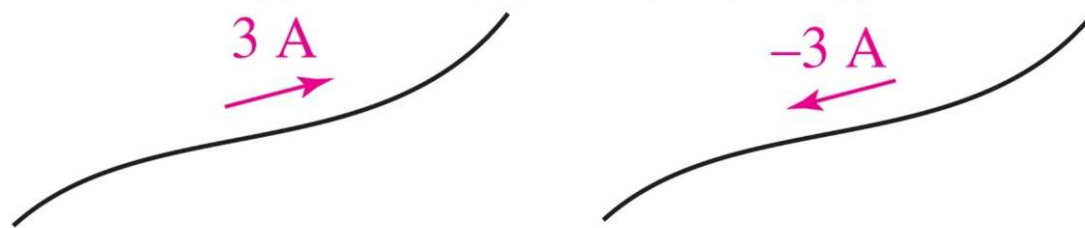
Corrente elétrica



-> Relembrar o comportamento de um condensador em corrente contínua (circuito-aberto).

Caracterização da intensidade de corrente₁

- Corrente (representada por I ou i) é a **taxa temporal do fluxo de carga** através de uma seção de um condutor/elemento.
- A corrente só fica bem definida se for indicado o seu **sentido** e o seu **valor** (magnitude/amplitude)
- As duas representações abaixo correspondem à mesma corrente, i.e., representam a mesma intensidade de corrente elétrica.



- Duas representação incompletas e uma representação completa

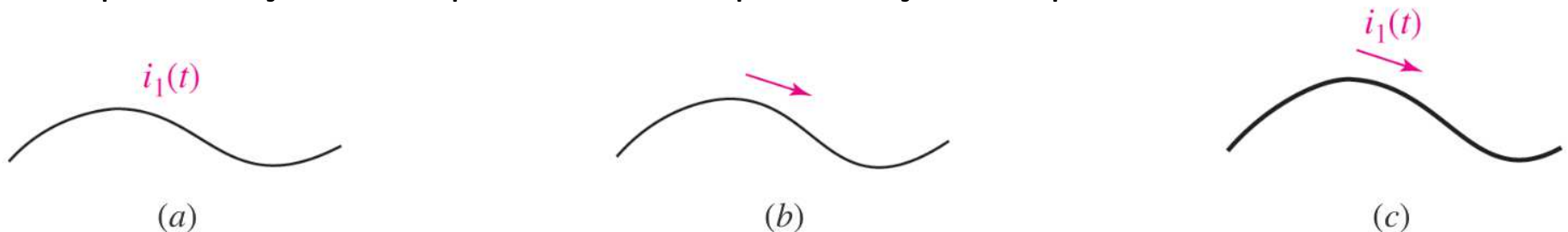
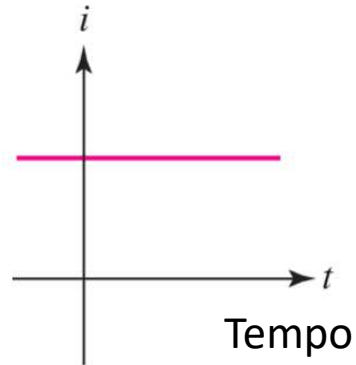


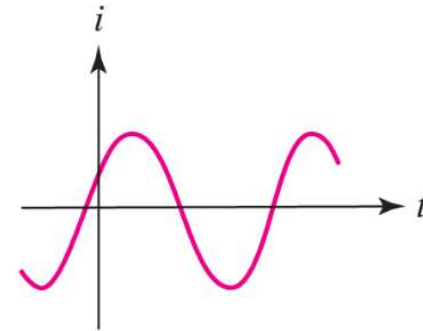
FIGURE 2.6 (a, b) Incomplete, improper, and incorrect definitions of a current. (c) The correct definition of $i_1(t)$.

Exemplos de formas de onda de corrente

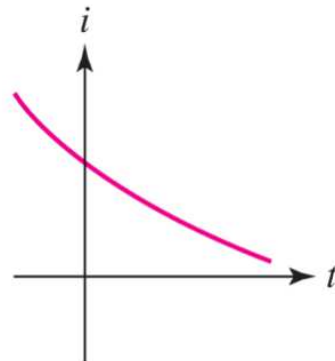
Corrente elétrica



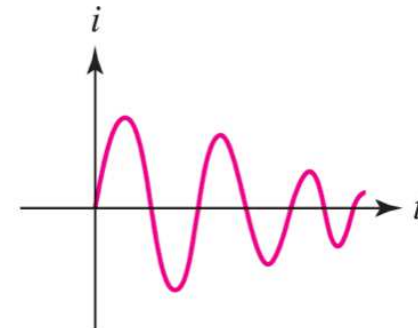
(a)



(b)



(c)

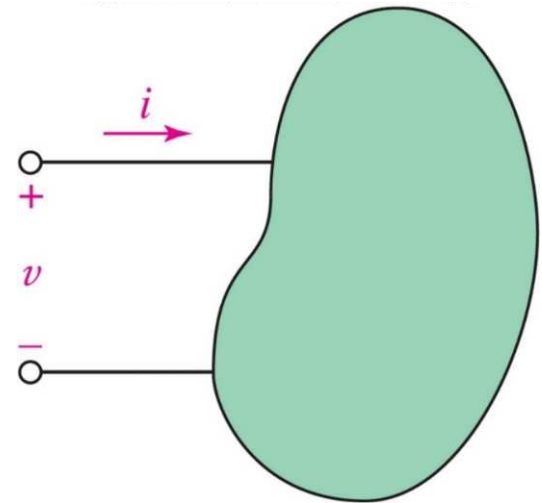


(d)

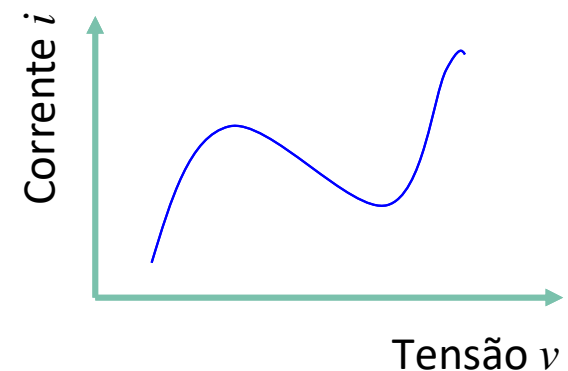
FIGURE 2.4 Several types of current: (a) Direct current (dc). (b) Sinusoidal current (ac). (c) Exponential current. (d) Damped sinusoidal current.

Elementos de um circuito elétrico

- Os componentes mais comuns de um circuito têm normalmente dois terminais (resistências, condensadores, bobinas) fontes de tensão e de corrente, etc.) que são ligados por materiais (fios metálico, e.g., cobre/pistas metálicas) bons condutores de eletricidade.
- Há, contudo, outros elementos de dois ou mais terminais, muitos dos quais são componentes **ativos**.
- A relação entre a **tensão** v aos seus terminais e a **corrente** i que o atravessa ($i=f(v)$): característica corrente-tensão ou curva I-V) determina o modelo (**linear ou não-linear**) usado para representar o elemento.
- Os **componentes passivos** só podem absorver e/ou armazenar energia.
- Os elementos ativos podem afetar o sinal elétrico, por exemplo, alterando os seus parâmetros (e.g., amplitude).

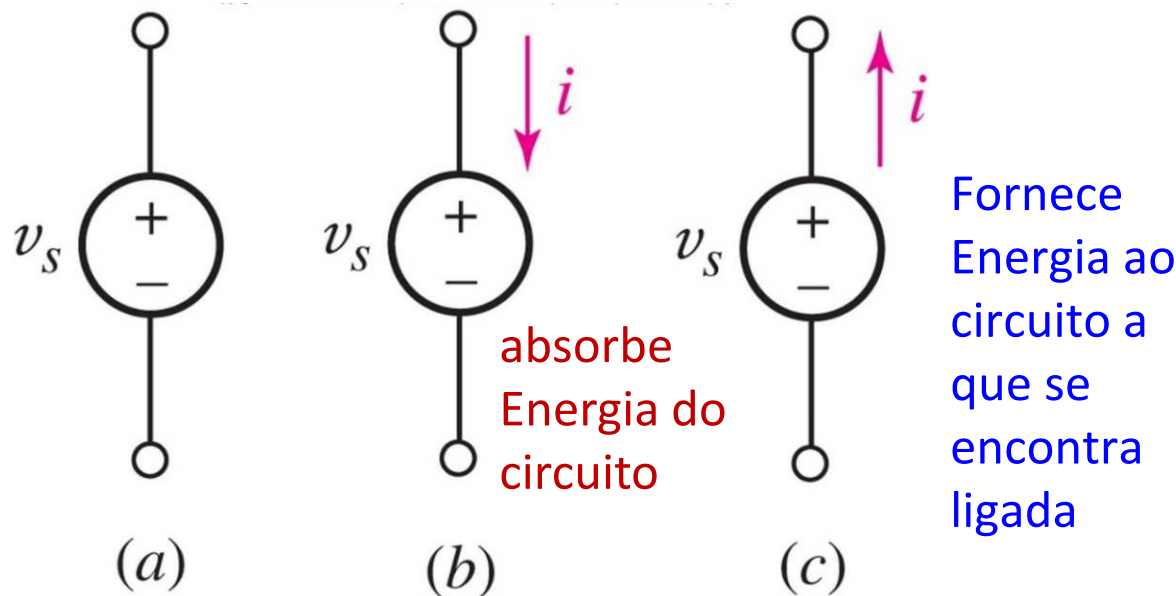


**Característica corrente-tensão
ou curva I-V**



Fontes de tensão

- Uma **fonte de tensão ideal** é um **elemento ativo** do circuito mantém uma dada tensão (ou força eletromotriz) v_s aos seus terminais, independentemente da magnitude da corrente i que o atravessa.
- A magnitude da corrente i será determinada pelos restantes elementos do circuito.

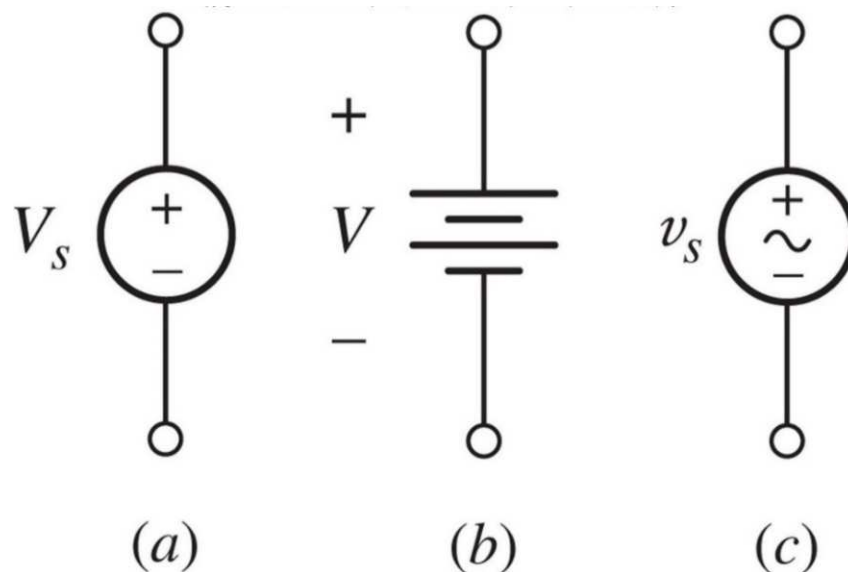


Quem determina a i ?

Símbolo de fonte de tensão independente. Ver discussão no manual acerca dos sentidos da corrente indicados e a convenção de sinais para elementos passivos e fontes.

Fontes de tensão independentes

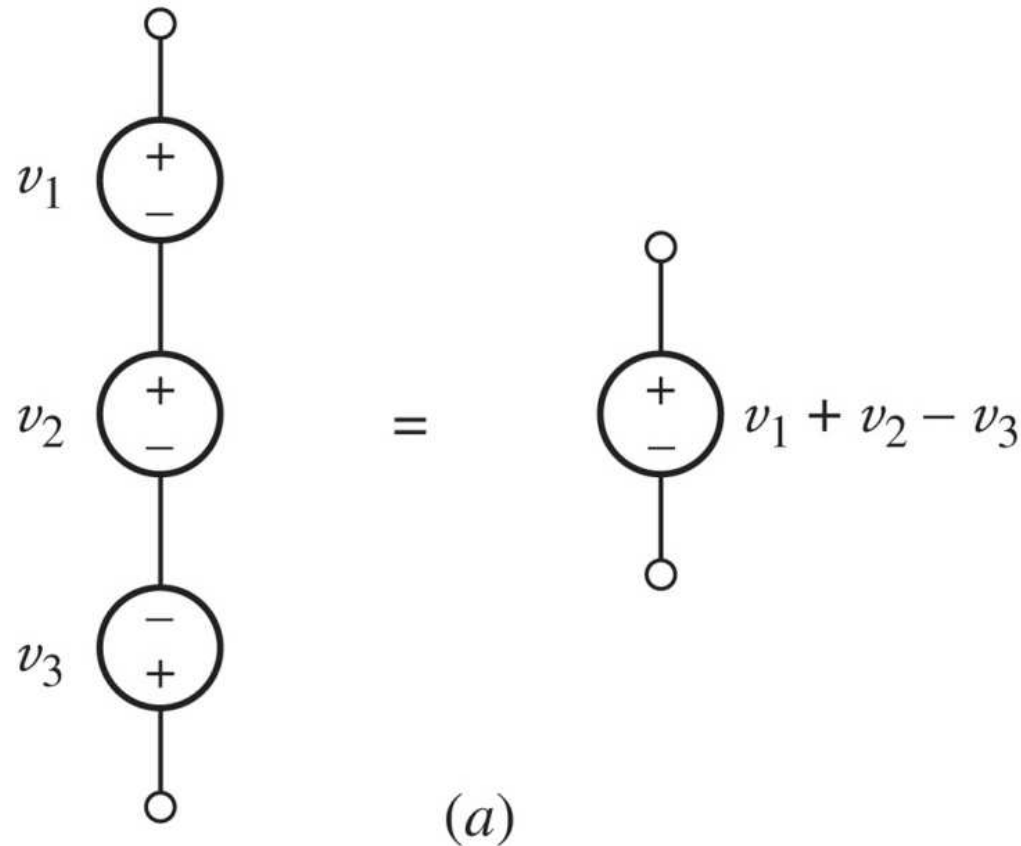
- Uma fonte de **tensão ideal** é uma **idealização** (a corrente que pode debitar não tem **limite**) e uma generalização (a magnitude da tensão pode ser variável no tempo) de uma bateria.
- Uma bateria ideal garante uma tensão “dc” V constante, independentemente do valor da corrente que a percorre.
- Na prática, uma **bateria real NÃO** garante uma tensão “dc” V constante, e não pode fornecer uma potência superior a um dado valor, o que limita o valor da corrente ou a vida da bateria. **Uma bateria real tem resistência interna (é equivalente uma bateria ideal em série com uma resistência).**



Questão: dê um exemplo de uma fonte de tensão “natural”.

Associação de fontes de tensão em série

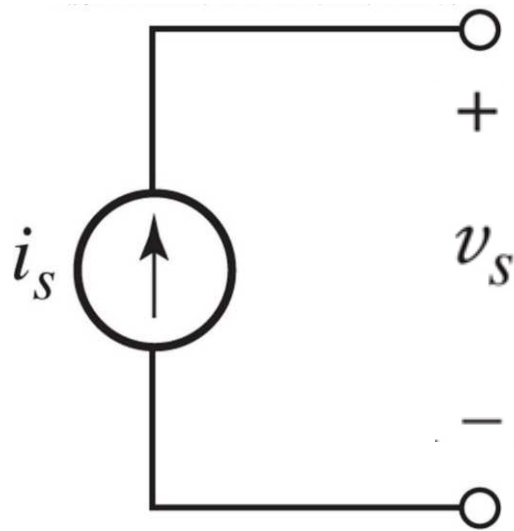
Fontes de tensão ligadas em série podem ser substituídas por uma fonte de tensão equivalente:



A associação de fontes de tensão em paralelo é possível apenas certas condições.

Fonte de corrente (são menos comuns)

- Uma fonte de **corrente ideal** é um elemento ativo do circuito que mantém uma corrente específica i_s através dos seus terminais.
- A tensão v_s (magnitude e polaridade) aos seus terminais é determinada pelos outros elementos do circuito.
- Uma fonte de corrente real não mantém a corrente. A corrente que debita depende do circuito que está a alimentar.
- Geralmente, as fontes de corrente reais são obtidas a partir de circuitos alimentados por uma ou mais fontes de fonte de tensão.

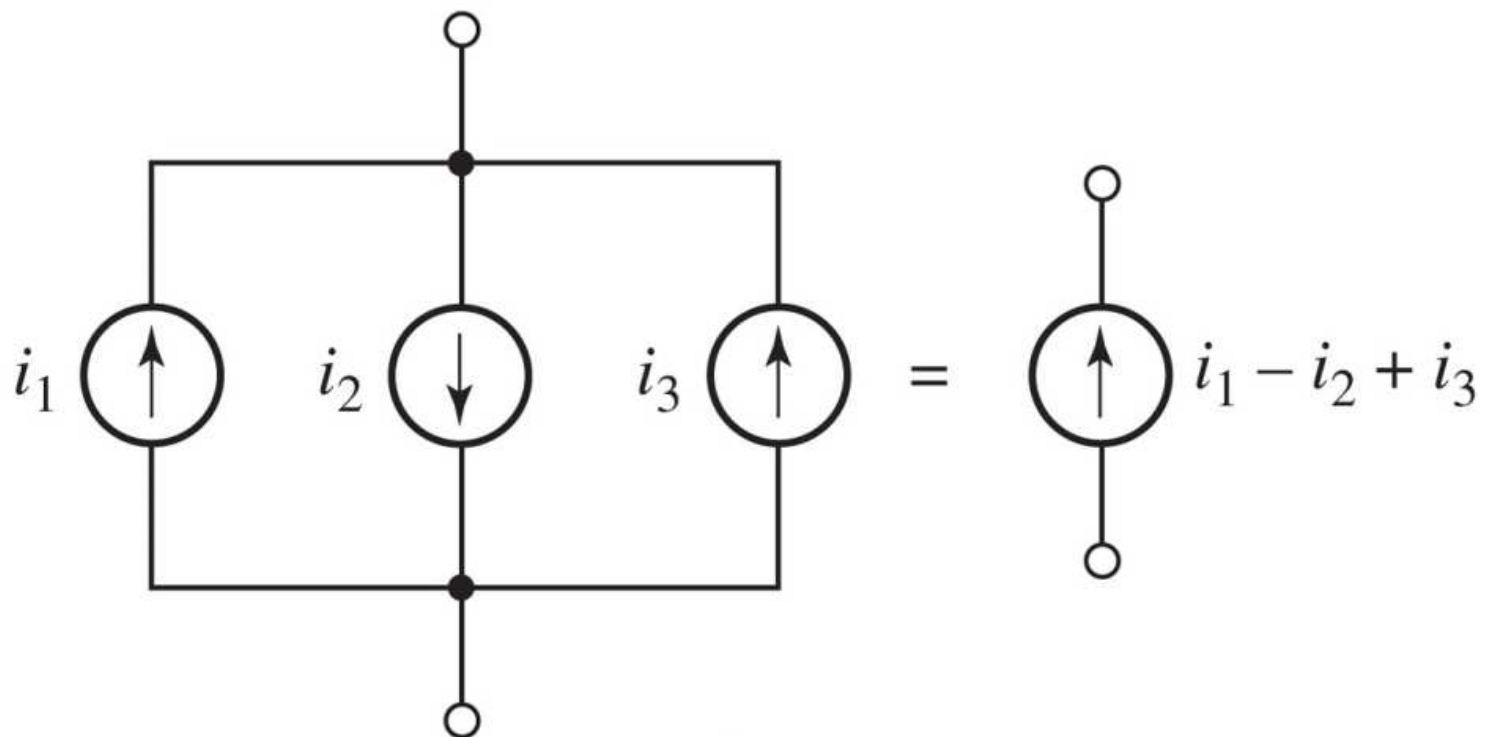


Quem determina a v_s ?

Questão: conhece algum exemplo de uma fonte de corrente “natural”?

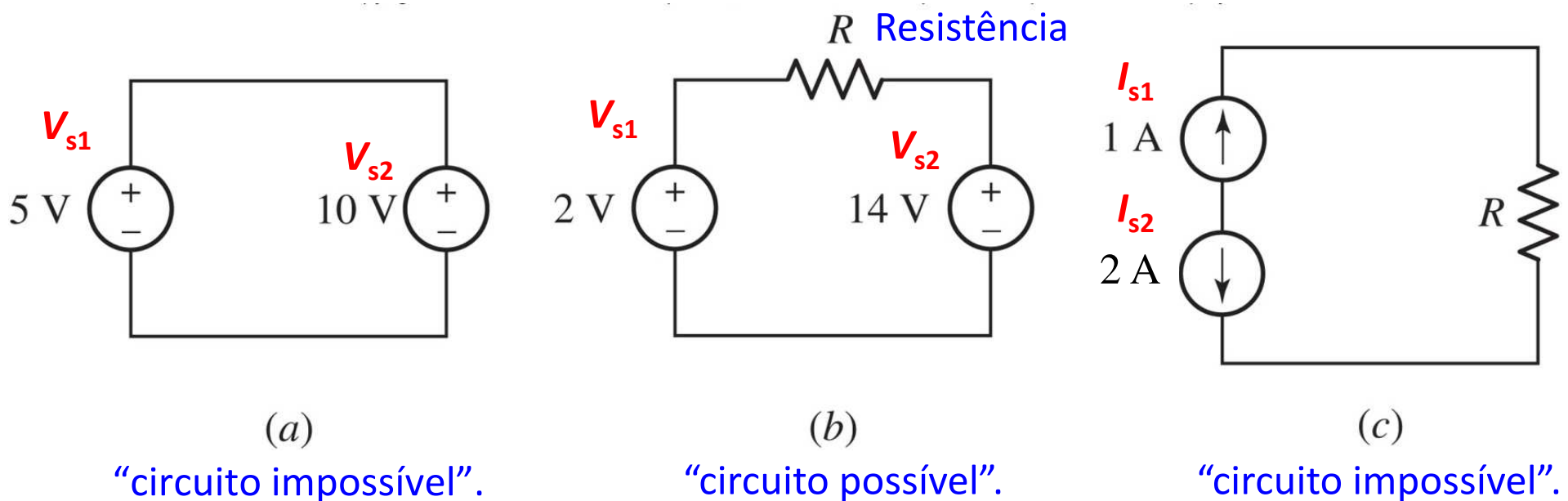
Associação de fontes de corrente em paralelo

Fontes de corrente ligadas em paralelo podem ser substituídas por uma fonte de corrente equivalente:



Circuitos impossíveis

Ter sempre em atenção/presente que os modelos dos circuitos que usamos são **idealizações de circuitos reais**, que por vezes podem levar a **aparentes absurdos** do ponto de vista físico:



Fontes de tensão V_s em paralelo (a) e fontes de corrente I_s em série (c) podem levar a "circuitos impossíveis".

Ter em atenção que na prática uma fonte (de tensão ou de corrente) tem sempre associada uma resistência interna.

Tensão ou diferença de potencial (ddp), v ou V

O termo **voltagem** está interdito. ... o termo correto é tensão ou ddp.

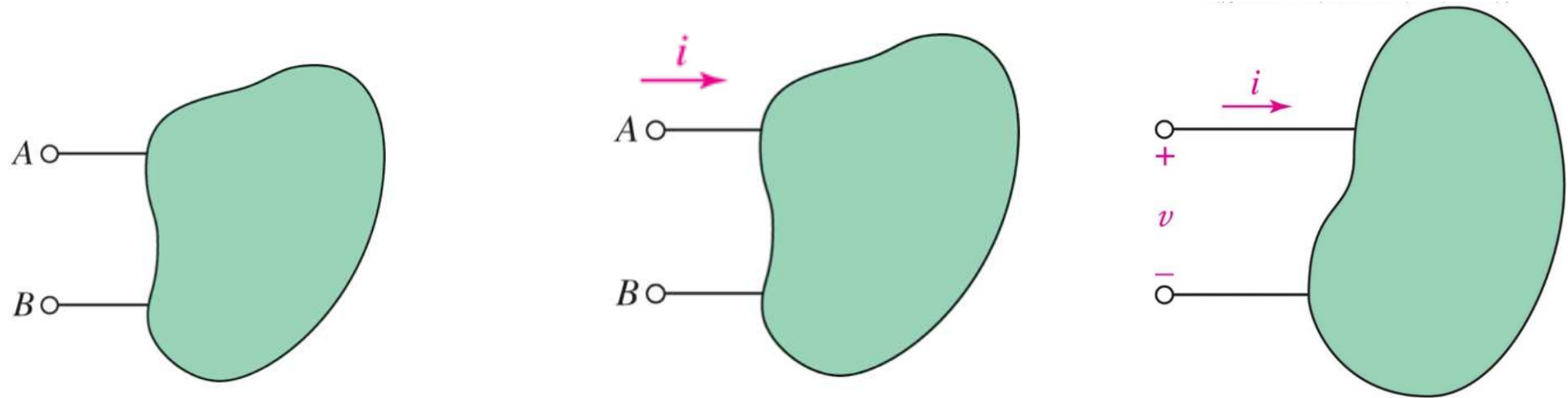


FIGURE 2.8 A general two-terminal circuit element.

- Se a corrente i entrar pelo terminal A, a tensão em A é superior à tensão em B: A está a um potencial superior (i.e. está positivo) relativamente a B.
- A **tensão ou diferença de potencial** v entre os pontos A e B é igual a 1 V quando é necessário realizar o trabalho de 1 J para mover a carga de 1 C da posição A para a posição B através do elemento/componente.

Representação da tensão ou ddp

- A indicação da tensão (V ou v) ao terminais de um elemento requiere sempre a informação do seu valor e/ou símbolo e da sua polaridade (par de sinais algébricos positivo-negativo).

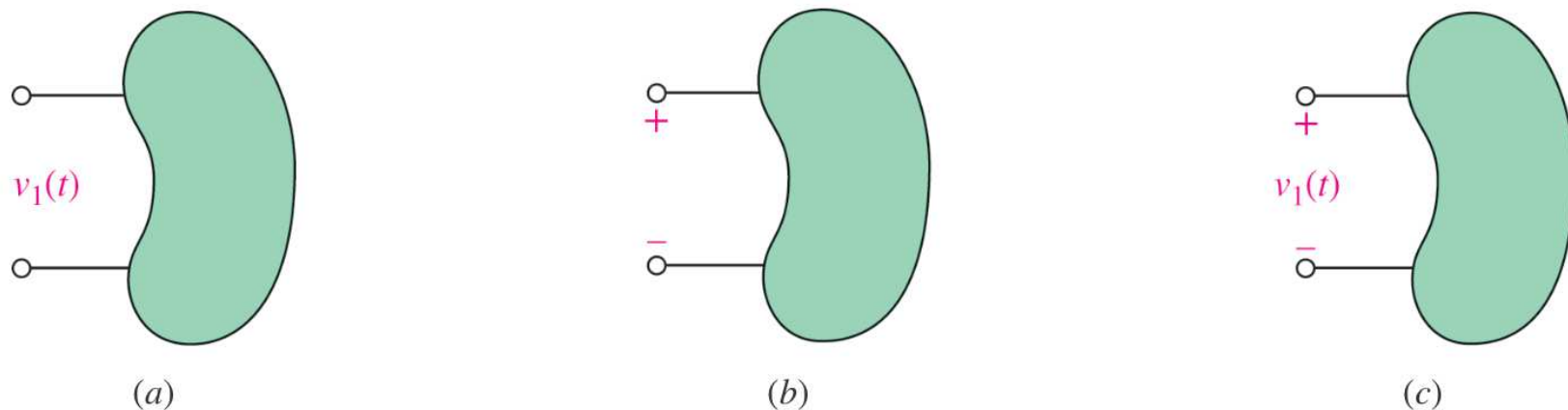
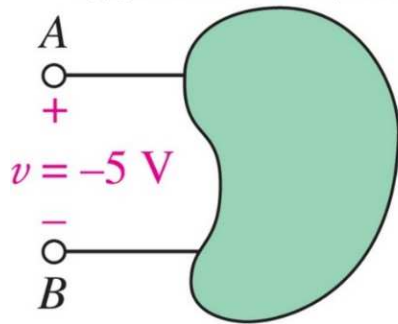


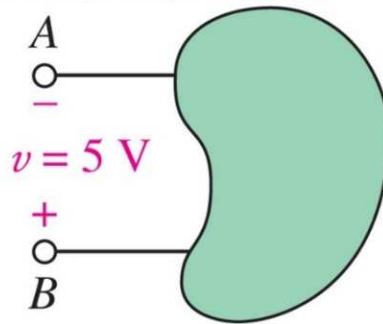
FIGURE 2.10 (a, b) These are inadequate definitions of a voltage. (c) A correct definition includes both a symbol for the variable and a plus-minus symbol pair.

Exercício: representação da tensão ou ddp

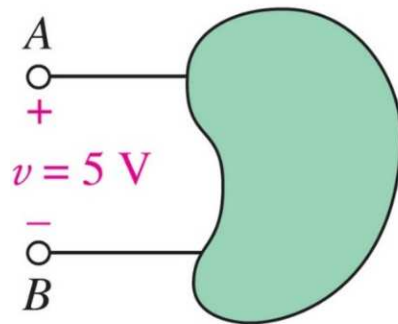
Indique se os esquemas abaixo representam situações equivalentes.



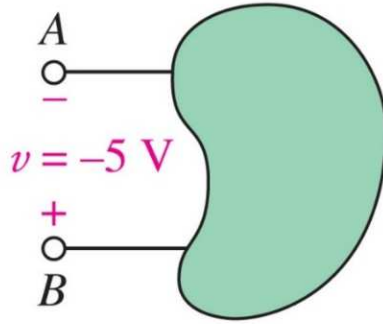
(a)



(b)

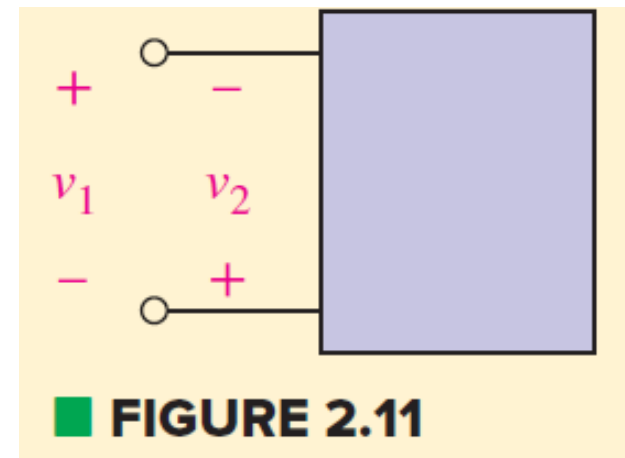


(c)



(d)

- Se v_1 for 20 V, qual será o valor de v_2 ?



Resposta: (a)=(b) – o terminal B está 5 V positivo relativamente a A; (c)=(d) A está 5 V positivo relativamente ao terminal B

Potência: $p = v \cdot i$

Em física, **potência** (p , P) é a grandeza física que caracteriza a quantidade de energia fornecida por uma fonte ou consumida por um componente ou dispositivo por unidade de tempo. Por outras palavras, o valor da potência traduz a rapidez (taxa temporal) com a qual uma certa quantidade de energia é fornecida ou transformada; caracteriza a rapidez com que trabalho é realizado. A unidade de potência no Sistema Internacional de Unidades é o watt.^[1]

Nos sistemas elétricos a potencia fornecida ou absorvida por um elemento é obtida multiplicando a tensão (diferença de potencial aos terminais do elemento) e pela corrente que o percorre: $p = v \cdot i$

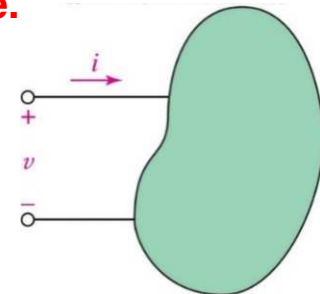
Convenção de sinais para elementos passivos e fontes de tensão/corrente.

- A potência necessária para fazer passar uma corrente i (C/s) através de um elemento com uma diferença de potencial – queda de tensão - v (J/C) – ver figura ao lado – é dada por:

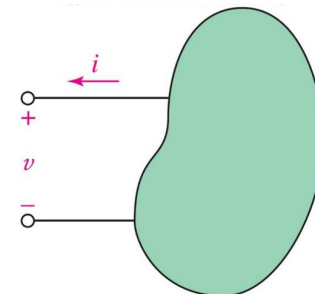
$$p = v \cdot i \text{ (J/s = W)}$$

- Se a potência é positiva, o elemento absorve energia.
- Quando a potência é negativa, o elemento fornece energia ao circuito.

Se a corrente **sair pelo terminal +** e a ddp – queda de tensão - for positiva (como indicado na figura ao lado), a potência é **negativa**, i.e., o elemento **fornece** energia ao restante o circuito.



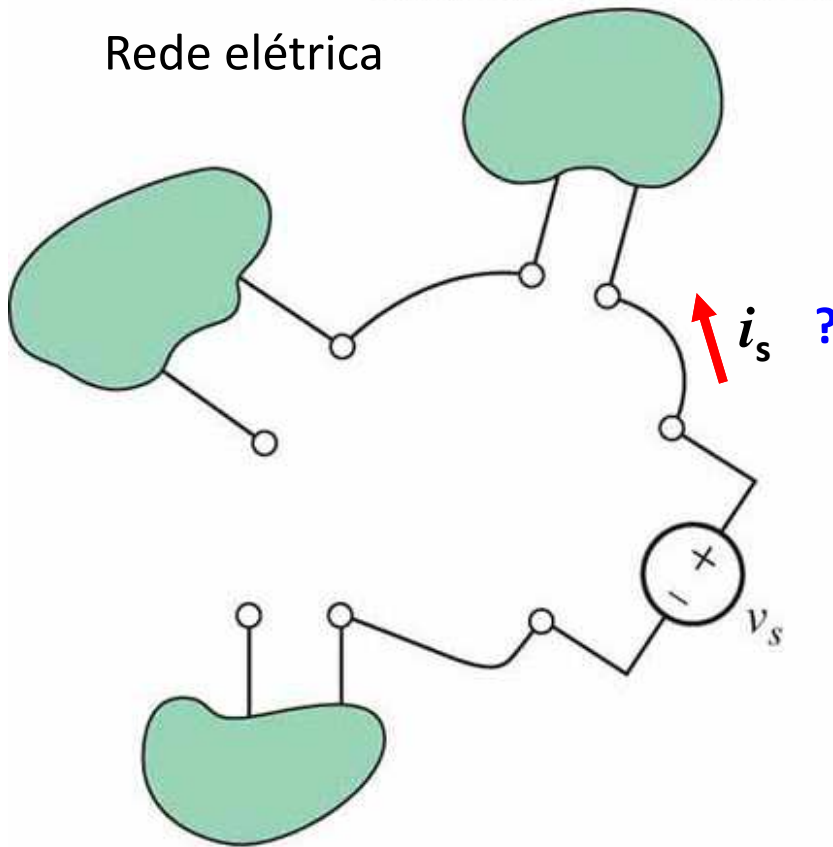
Se a corrente **entrar pelo terminal +** e a ddp – queda de tensão - for positiva (como indicado na figura acima), a **potência é positiva**, i.e., o elemento **absorve** energia do resto do circuito.



Circuitos vs redes/"networks" elétricas

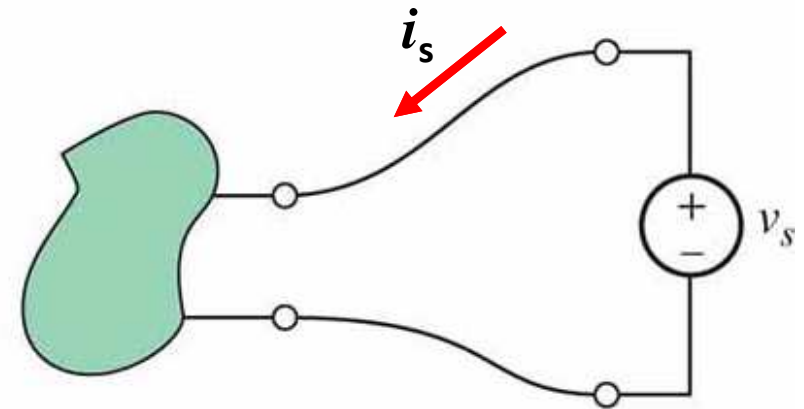
Copyright © McGraw-Hill Education. Permissão

Rede elétrica



ssion required for reproduction or display.

Circuito elétrico



Uma rede elétrica não forma necessariamente um circuito elétrico. Para termos um circuito elétrico tem de haver pelos menos um percurso fechado que permita o fluxo de carga elétrica.

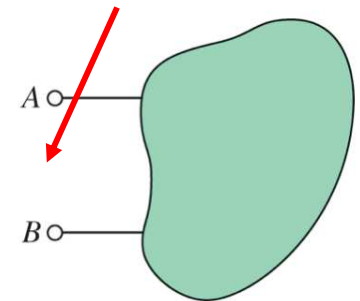
Conceitos importantes:

Circuito aberto, curto-circuito, e terra virtual

Dizer que há um **circuito aberto** entre A e B significa que a corrente entre A e B é zero, i.e., $I = 0$ A.

- A tensão num circuito aberto pode tomar qualquer valor (a definir pelo resto do circuito).
- Um circuito aberto entre A e B é equivalente a ter $R_{AB} = \infty \Omega$.

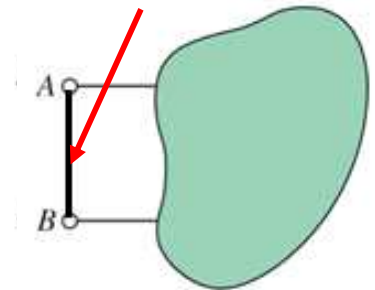
Circuito-aberto



Um **curto-circuito** entre A e B significa que $v_{AB} = 0$ V.

- A corrente através de um curto-circuito pode tomar qualquer valor (a definir pelo resto do circuito).
- Um curto-circuito entre A e B é equivalente a ter $R_{AB} = 0 \Omega$.

Curto-circuito



Podemos ter curto-circuitos virtuais (dois pontos *fisicamente não* curto-circuitados), i.e., estados de um circuito onde as tensões entre dois pontos distintos são idênticas (como num curto-circuito físico) e, portanto, as correntes entre esses dois pontos seriam nulas.

Mais tarde, quando estudarmos os amplificadores operacionais iremos abordar os conceitos *Curto-Circuito Virtual* e *Terra Virtual*.

Terra, terra/comum do sinal, e terra do chassi

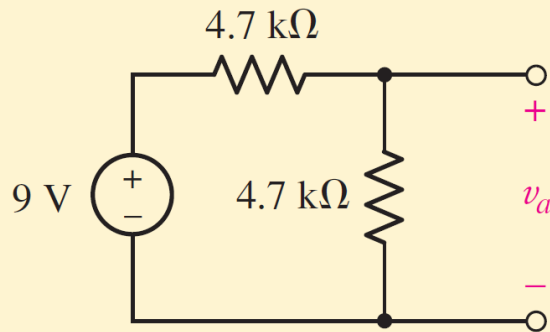
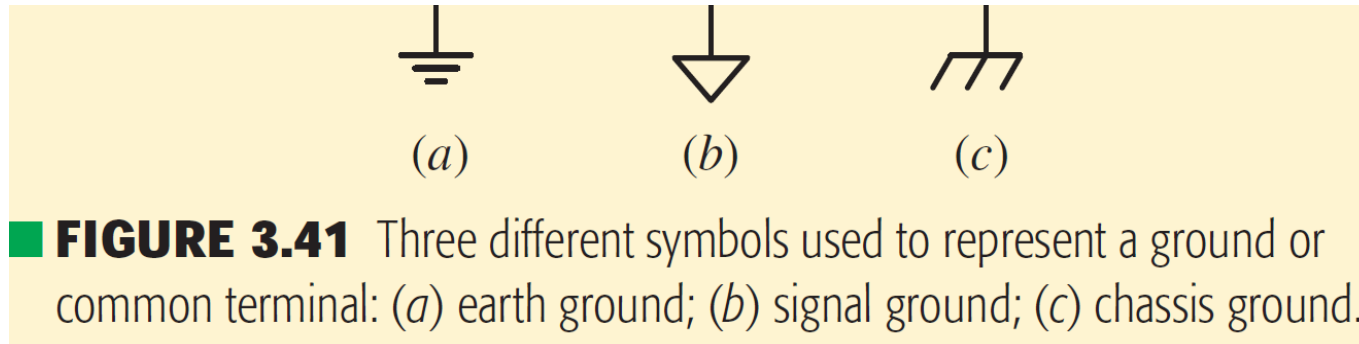


FIGURE 3.40 A simple circuit with a voltage v_a defined between two terminals.

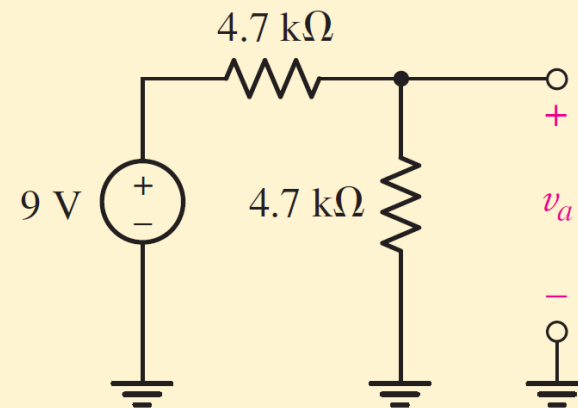


FIGURE 3.42 The circuit of Fig. 3.40, redrawn using the earth ground symbol. The rightmost ground symbol is redundant; it is only necessary to label the positive terminal of v_a ; the negative reference is then implicitly ground, or zero volts.

IMPORTANTE:

em geral, os símbolos de terra/comum não representam percurso para a corrente. São, apenas, os pontos dos circuitos onde se convencionou que o potencial é 0 V, i.e., são os pontos relativamente aos quais são “medidos” os potenciais num circuito.

Terra, terra/comum do sinal, e terra do chassi

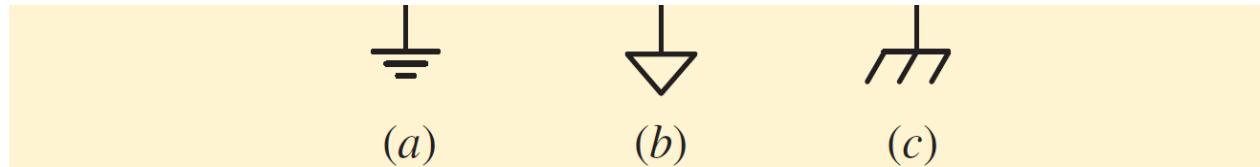


FIGURE 3.41 Three different symbols used to represent a ground or common terminal: (a) e

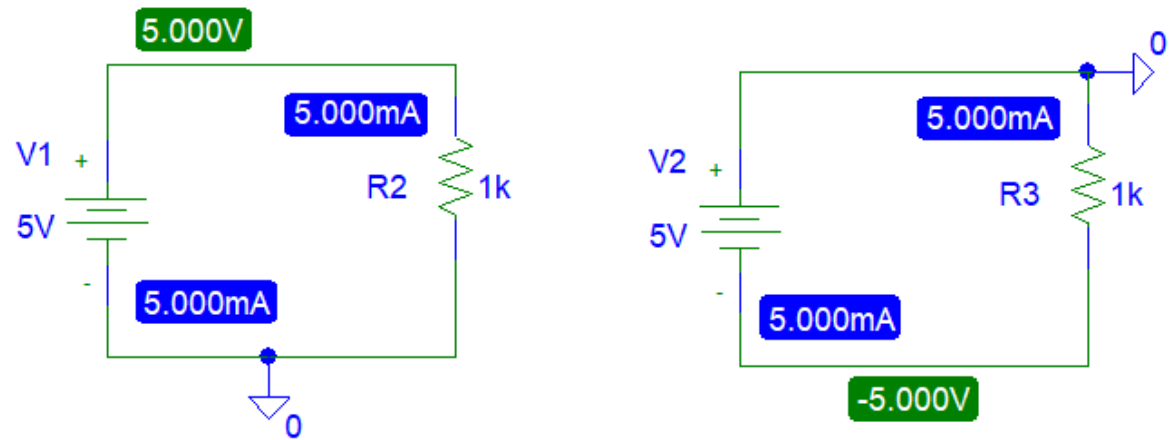
IMPORTANTE:

em geral, os símbolos de terra/comum não representam percurso para a corrente. São, apenas, os pontos dos circuitos onde se convencionou que o potencial é 0 V, i.e., são os pontos relativamente aos quais são “medidos” os potenciais num circuito.

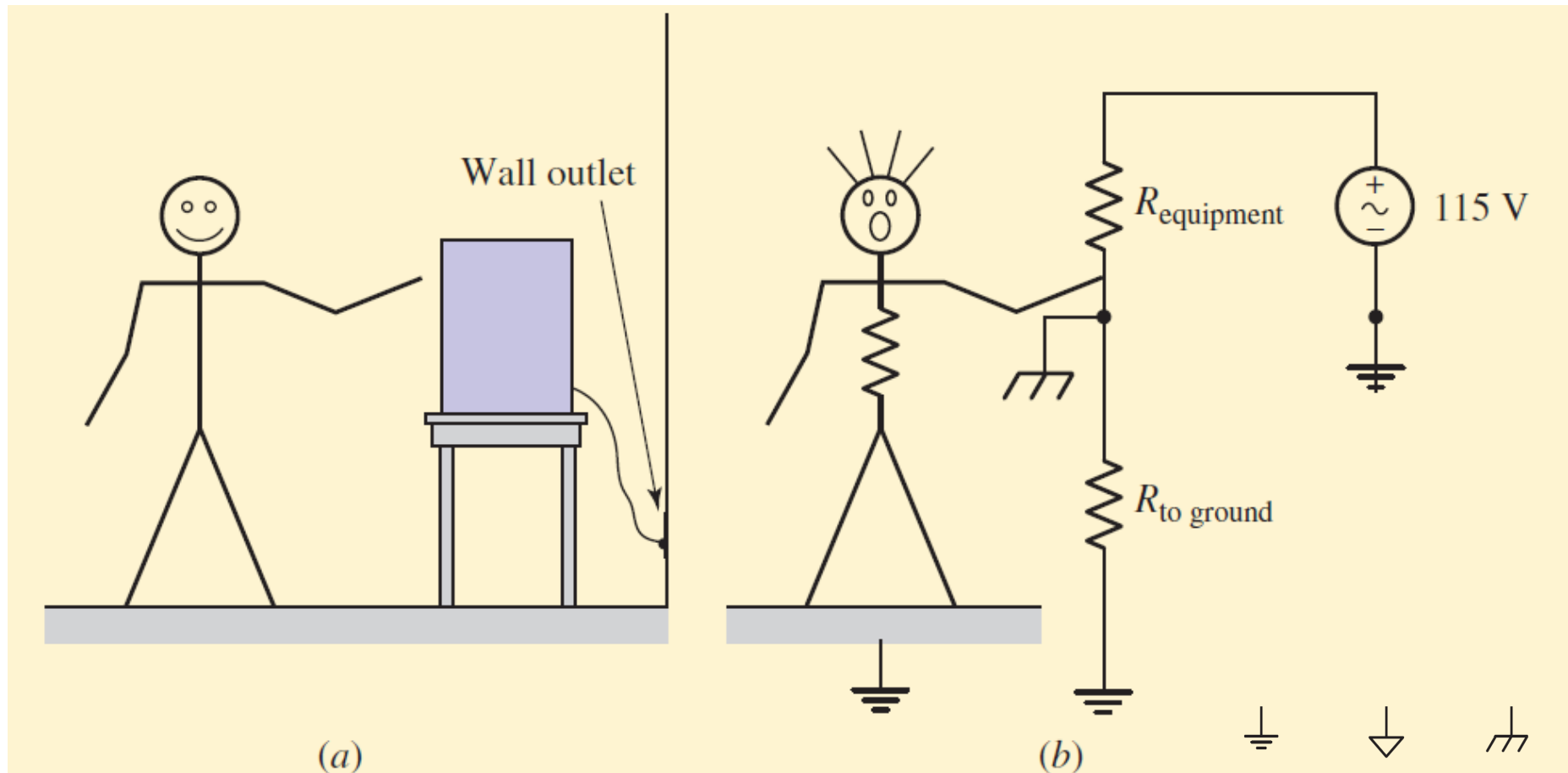
O comum/“terra” de um circuito é apenas um ponto de referência do potencial (tensão), relativamente ao qual se medem os potenciais dos outros pontos. Apenas indica o ponto do circuito onde se considera que o potencial é zero. Pode ser colocado em qualquer ponto do circuito.

Por norma, nos diagramas esquemáticos dos circuitos, como os apresentados acima, o comum (ponto onde se considera que o potencial é nulo (i.e., 0 V) é a parte/ramo mais inferior do esquema, como se pode ver nos circuitos da esquerda. Em muitas situações (não é caso dos simuladores), nem se representa/indica o comum, assumindo-se, como referido atrás, que é o comum está/é ramo do circuito mais inferior.

Ter em atenção que o valor da tensão nos diferentes ramos/nós de um circuito muda se mudarmos o ponto de referência (ponto onde o potencial é 0 V). Contudo, os valores e os sentidos das correntes mantêm-se inalterados, como se pode verificar nos exemplos acima.

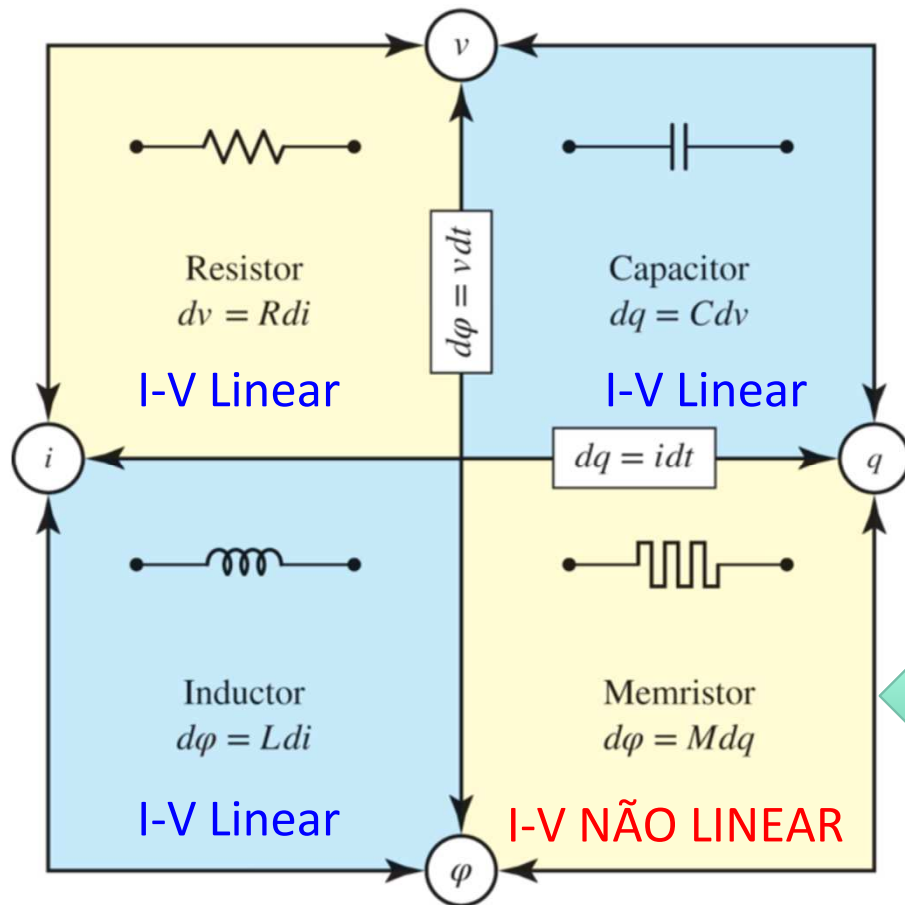


Circuitos de proteções e ligações de terra



■ **FIGURE 3.43** (a) A sketch of an innocent person about to touch an improperly grounded piece of equipment. It's not going to be pretty. (b) A schematic of an equivalent circuit for the situation as it is about to unfold; the person has been represented by an equivalent resistance, as has the equipment. A resistor has been used to represent the nonhuman path to ground.

Elementos básicos de um circuito elétrico



$$\bullet \, dv = R di$$

$$\bullet \, dq = i dt$$

$$\bullet \, dq = C dv$$

$$\bullet \, d\varphi = v dt$$

$$\bullet \, v = L \frac{di}{dt}$$

Novo componente (século XX)
Memristor (memória-resistência) é uma resistência elétrica dependente da carga, no qual o fluxo magnético φ_m entre seus terminais é função do total de carga elétrica q que passa pelo componente.

φ : o fluxo magnético

Novo componente

$$v(t) = M(q(t)) i(t)$$

FIGURE 7.17 A graphical representation of the four basic two-terminal passive elements (resistor, capacitor, inductor, and memristor) and their interrelationships. Note that flux linkage is more commonly represented by the Greek letter λ to distinguish it from flux: then $\lambda = N\varphi$ where N is the number of turns and φ is the flux. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Nature Publishing Group, "Electronics: The Fourth Element," Volume 453, pg. 42, 2008.)

O memristor será usado, com certeza, nos sistemas eletrônicos do futuro, e.g. computação neuromórfica, sistemas IA (inteligência artificial) baseados em hardware, etc..

The fourth element - The missing memristor found

[Dmitri B. Strukov](#), [Gregory S. Snider](#), [Duncan R. Stewart](#) & [R. Stanley Williams](#)

[Nature](#) volume **453**, pages 80–83 (2008) [Cite this article](#)

61k Accesses 6791 Citations 114 Altmetric [Metrics details](#)

A [Corrigendum](#) to this article was published on 25 June 2009

Abstract

Anyone who ever took an electronics laboratory class will be familiar with the **fundamental passive circuit elements: the resistor, the capacitor and the inductor**.
















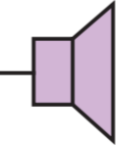






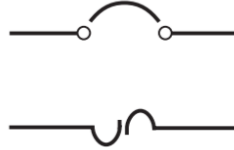



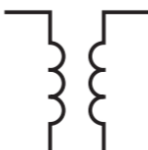

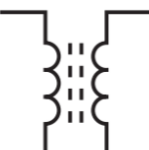

However, in 1971 Leon Chua reasoned from **symmetry arguments** that there should be a **fourth fundamental element**, which he called a memristor (short for memory resistor)^{[1](#)}.

Although he showed that such an element has many interesting and valuable circuit properties, until now no one has presented either a useful physical model or an example of a memristor. Here we show, using a simple analytical example, **that memristance arises naturally in nanoscale systems in which solid-state electronic and ionic transport are coupled under an external bias voltage**.

These results serve as the foundation for understanding a **wide range of hysteretic current–voltage behaviour** observed in many nanoscale electronic devices [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19](#) that involve the motion of charged atomic or molecular species, in particular certain titanium dioxide cross-point switches^{[20,21,22](#)}.

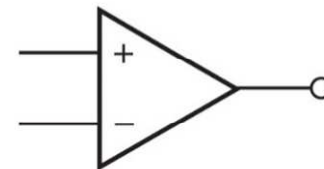
<https://www.nature.com/articles/nature06932>

Símbolos de elementos de um circuito

TABLE 1-7 Schematic Circuit Symbols																					
																					
Single Cell		Multicell		AC Voltage Source		Current Source		Fixed		Variable		Fixed		Variable		Air Core		Iron Core		Ferrite Core	
Batteries								Resistors				Capacitors				Inductors					
																					
Lamp		SPST		SPDT		Microphone		Speaker		Wires Joining		Wires Crossing		Earth		Chassis		Fuses		Fuses	
																					
Circuit Breakers		Voltmeter		Ammeter		Ammeter		Air Core		Iron Core		Ferrite Core		kV							
														Dependent Source							

© Cengage Learning 2013

Amplificador operacional



Díodos

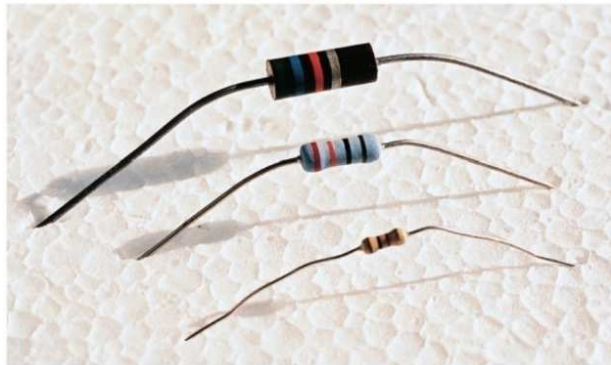


LEDs

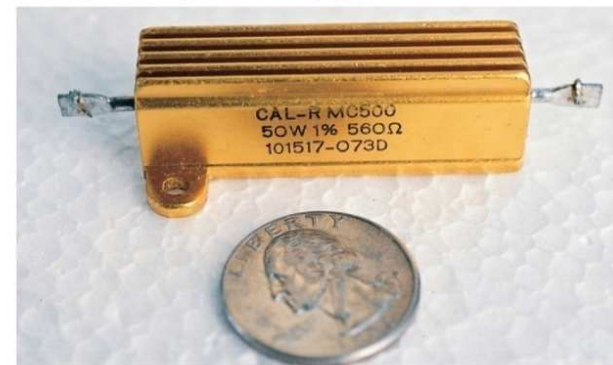


Exemplos de resistências

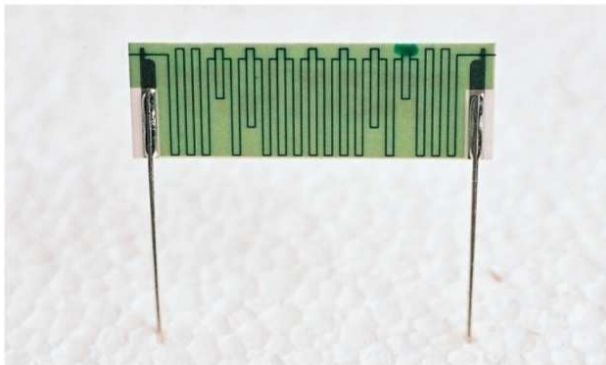
A resistência é o componente elétrico que serve para limitar o valor da corrente num circuito.



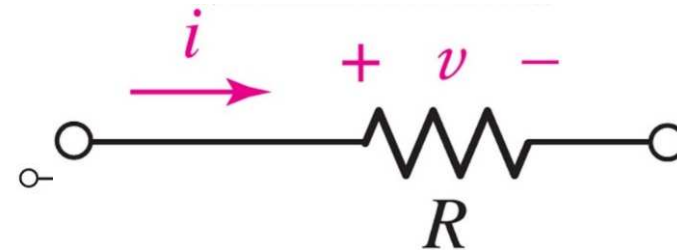
(a)



(b)



(c)



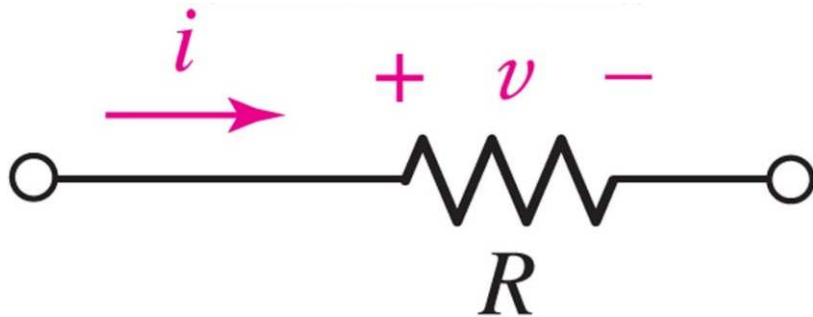
(d)

- (a) Resistência típica (eletrônica, $\frac{1}{4}$ watt)
- (b) Resistência de potência
- (c) Resistência de $10\text{ T}\Omega$
- (d) Símbolo de resistência

Sempre que uma resistência é percorrida por uma corrente, há uma queda de tensão (diferença de potencial) entre os terminais da resistência

Lei de Ohm e resistência elétrica

Uma resistência (linear) é um elemento para o qual a corrente i que o percorre é proporcional à tensão aplicada v aos seus terminais: $i \propto v$



$$i = \frac{v}{R} = G v$$

 \Leftrightarrow

$$v = R i$$

onde o parâmetro R representa o valor da resistência do elemento (oposição à passagem de corrente).

Estas equações representam versões da lei de Ohm.

- A unidade SI de **resistência elétrica** é o **ohm** (símbolo Ω).

SI: sistema internacional de unidades

Condutância

Às vezes é preferível trabalhar com o recíproco da resistência ($1/R$), que é chamada condutância, símbolo G , unidade siemens (S).

Uma resistência R tem condutância $G = 1/R$.

$$G = 1/R$$

A lei de Ohm (equação – característica *corrente-tensão*, ou características *i-v*) de uma resistência pode ser escrita como:

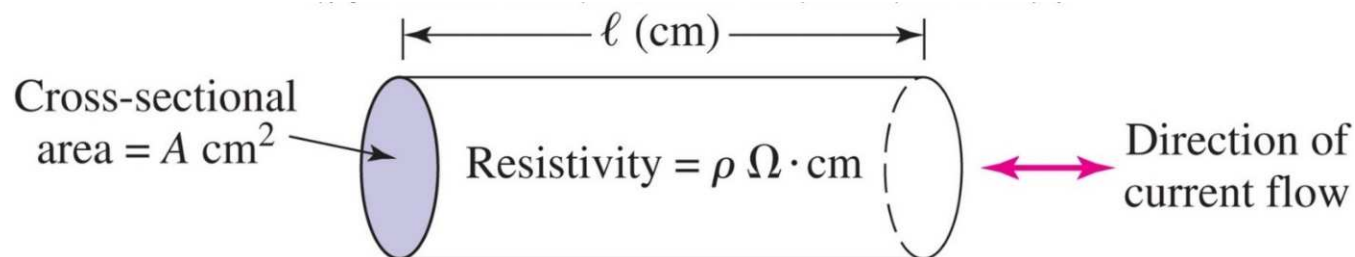
$$i = G \cdot v$$

A unidade da **condutância elétrica** (recíproco da resistência), **símbolo G** , é o **siemens** (símbolo $S = \Omega^{-1}$).

Resistência de um fio condutor

[*American Wire Gauge (AWG)*: Escala americana de bitolas de fios]

A resistência de um fio condutor é determinada pela **resistividade do material** de que é feito, ρ , bem como pela sua geometria:

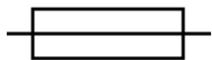


$$R = \rho \frac{l}{A}$$

[Na maioria dos casos, a resistência dos fios num circuito pode ser assumida como sendo 0 (zero) ohm.]

https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_americana_de_bitolas_de_fios

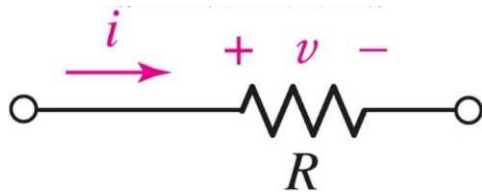
Fusível: fusível é um dispositivo de proteção contra excesso de corrente. Consiste num filamento de um material condutor de baixo ponto de fusão que se coloca num ramo de uma rede elétrica, para que se funda, por efeito Joule, quando a intensidade de corrente elétrica que o percorre superar um determinado valor, quando ocorre um curto-circuito ou uma sobrecarga, por forma a proteger a integridade dos componentes, e evitar o risco de incêndio.



Não se deve substituir um fusível queimado até se perceber porque é que queimou.

Absorção de potência (energia) numa resistência

Efeito e lei de Joule:



Uma resistência absorve energia/potência. Dado que $v = i \cdot R$:

$$p = vi = \frac{v^2}{R} = Ri^2 \geq 0$$

Convenção de sinais para elementos passivos e fontes – ver slides anteriores:

- Valores de potência positivos significa que o elemento/dispositivo está a **absorver energia**.
- A uma resistência absorve (dissipa) sempre energia: a potência é sempre positiva para uma resistência)!

Exercício:

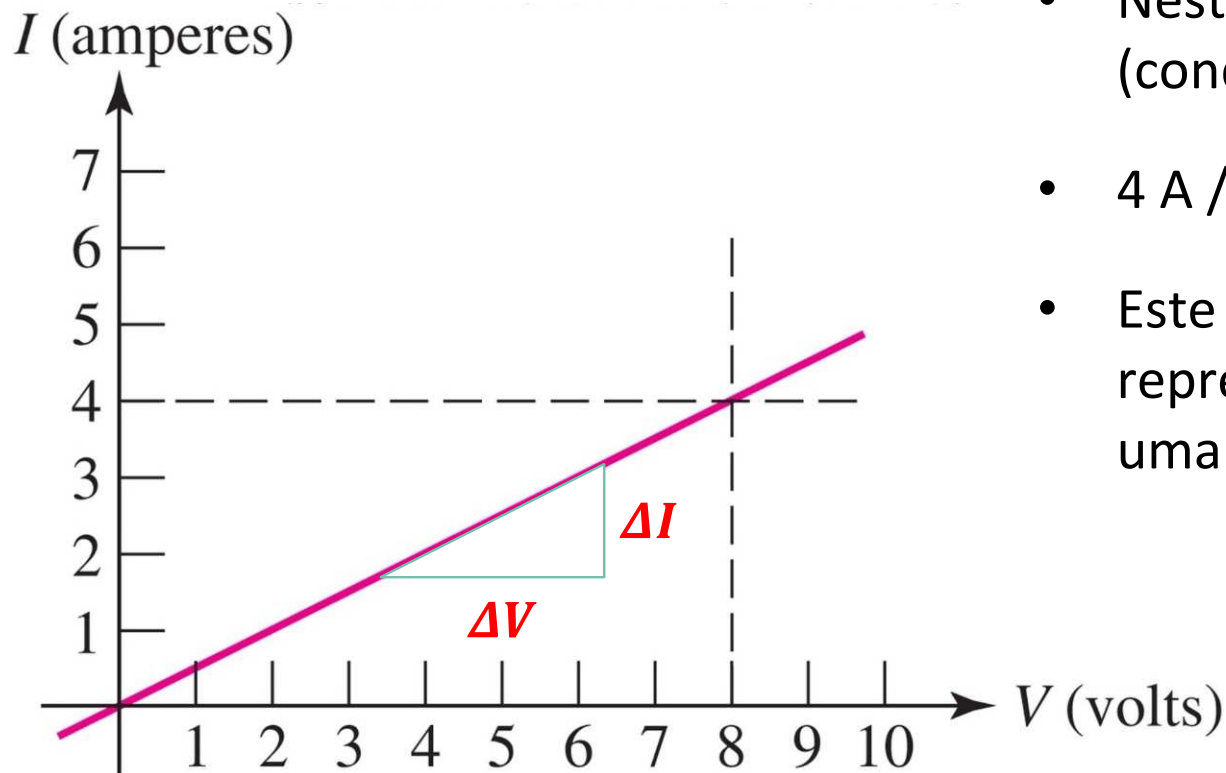
Uma resistência de $560 \, \Omega$ está ligada a um circuito que faz com que seja percorrida por uma corrente de $42.4 \, \text{mA}$. Determinar a tensão aos seus terminais e a potência que ela dissipa.

Lei de Ohm: $v = iR = (0.0424)(560) = 23.7 \, \text{V}$

Lei de Joule: $p = vi = \frac{v^2}{R} = i^2 R$ $p = i^2 R = (0.0424)^2 (560) = 1.007 \, \text{W}$

Caraterística i - v de uma resistência ideal

Para uma resistência ideal, a relação corrente versus tensão é uma “linha reta” (**relação linear**):

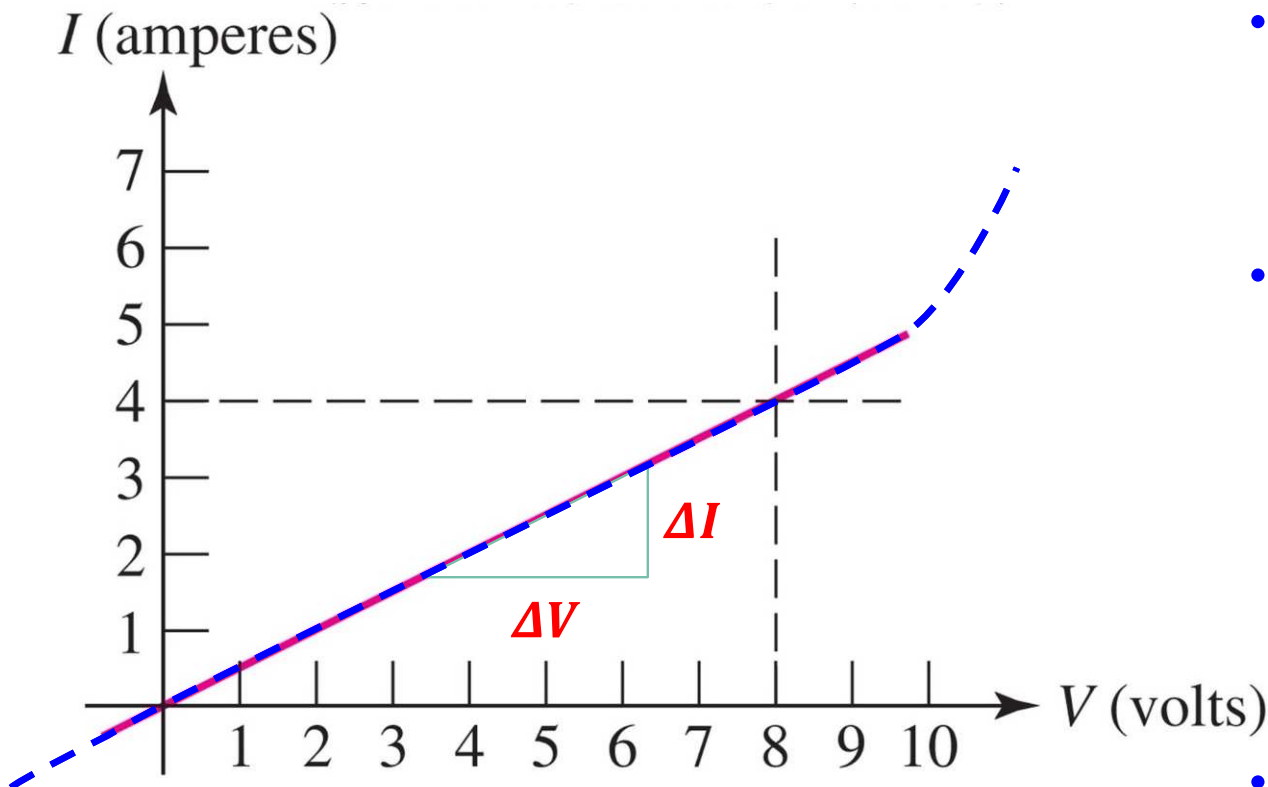


- Neste exemplo, o declive (condutância) é
- $4 \text{ A} / 8 \text{ V}$ ou $0.5 \Omega^{-1}$.
- Este gráfico (característica I-V) representa um elemento com uma resistência de 2Ω .

O inverso da resistência é a condutância (G): $G = \frac{1}{R} = \frac{\Delta I}{\Delta V}$

Caraterística $i-v$ de uma resistência real

Para uma resistência real, a relação corrente versus tensão pode, a partir de determinados valores de tensão ou corrente, deixar de ser uma **relação linear, i.e., a característica I-V pode passar a ser uma relação não linear** :



- O grosso dos circuitos que iremos tratar serão considerados sistemas lineares.
- Alguns circuitos contendo díodos, LEDs, amp-ops são por natureza sistemas não-lineares. Contudo, dentro de determinadas aproximações poderão ser considerados lineares.
- Os circuitos digitais são por natureza não-lineares.

Comparação entre uma função não linear e a aproximação linear dessa função:

exemplo $f(x) = e^x$ e $f(x) = 1+x$

$$f(x) = e^x \longrightarrow f(x) \approx 1 + x$$

Comparison of a Linear Model for e^x to Exact Value

x	$f(x)^*$	$1 + x$	Relative error**
0.0001	1.0001	1.0001	0.0000005%
0.001	1.0010	1.001	0.00005%
0.01	1.0101	1.01	0.005%
0.1	1.1052	1.1	0.5%
1.0	2.7183	2.0	26%

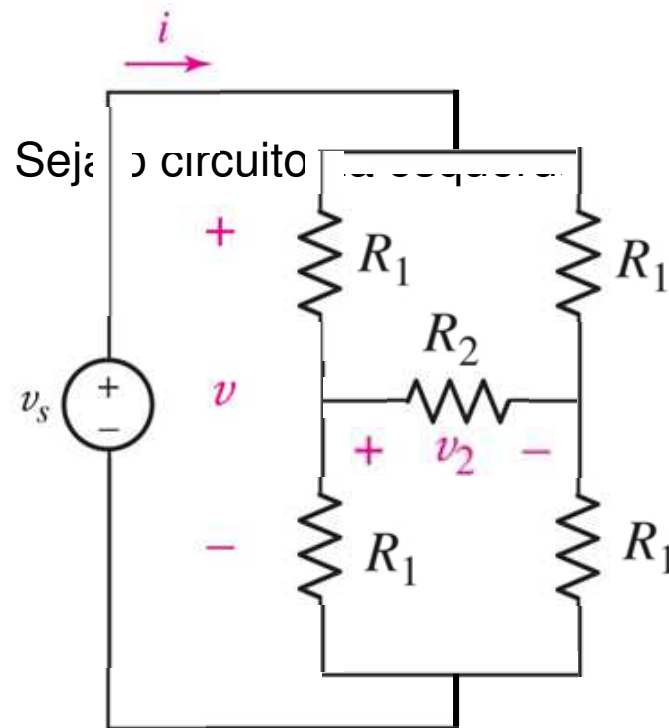
*Quoted to four significant figures.

**Relative error $\triangleq \left| 100 \times \frac{e^x - (1 + x)}{e^x} \right|$

Exemplo de metodologias de análise de circuitos₃

Objetivo:

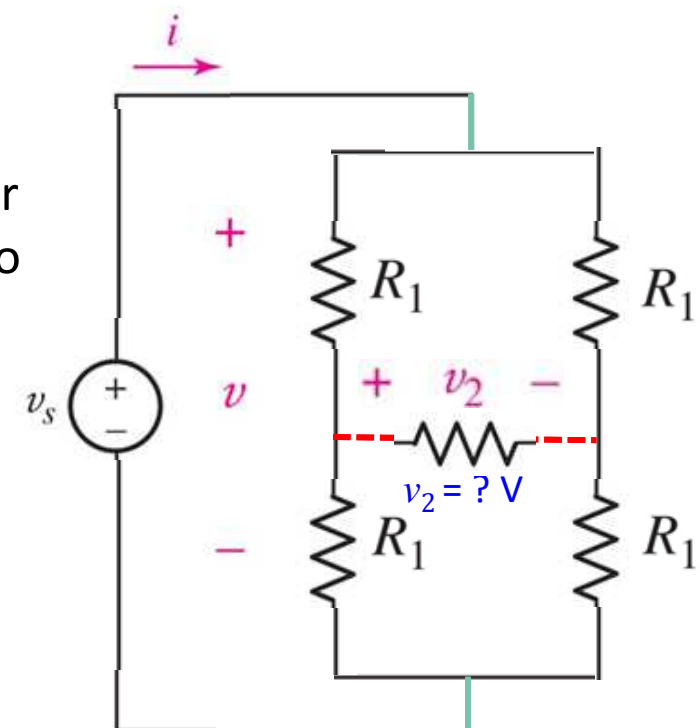
- Determinar v_2 .
- Se v_s for 10 V, qual será o valor da queda de tensão em cada uma das resistências R_1 e o valor da intensidade da corrente nos vários ramos do circuito?



Resolução: análise por inspeção e simetria do circuito.

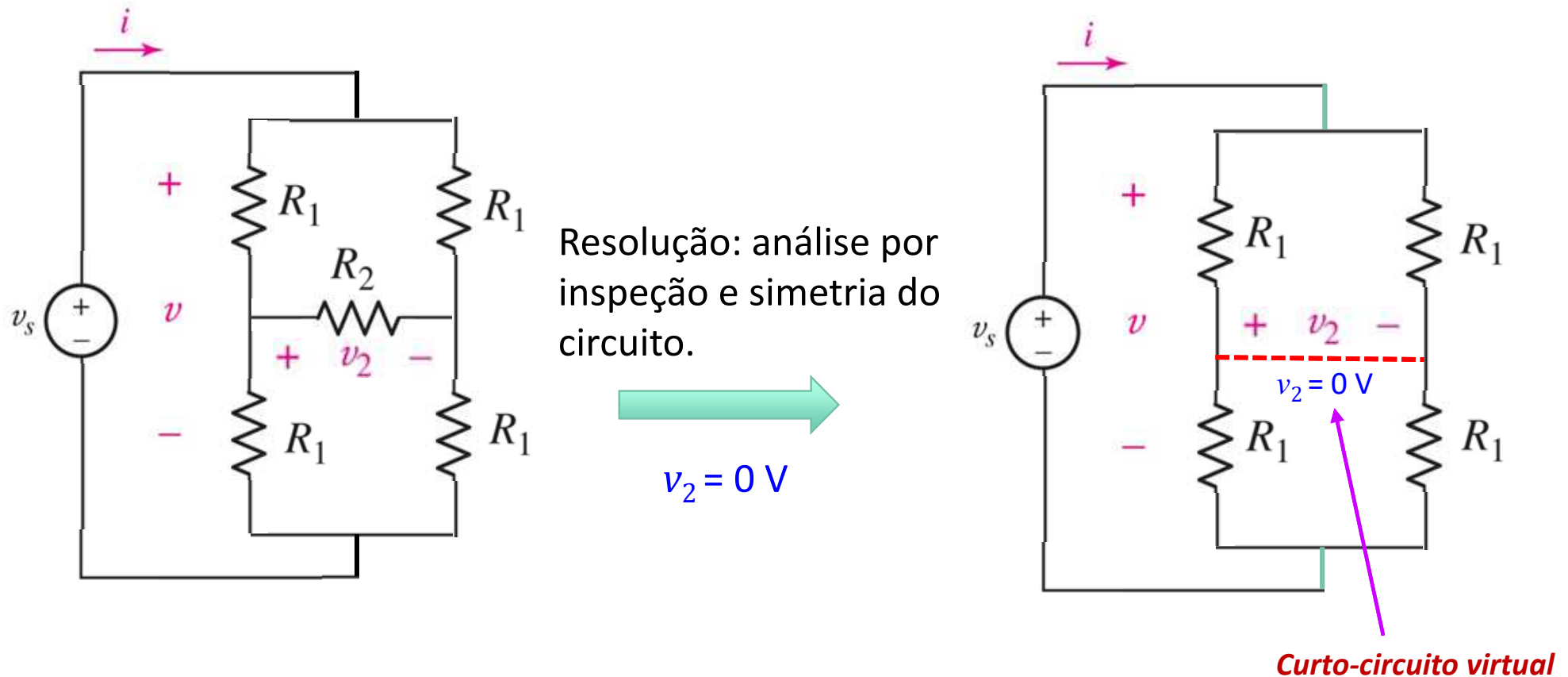


$$v_2 = ? \text{ V}$$



Exemplo de metodologias de análise de circuitos₁

Considere o circuito. Determinar v_2 .



Resolução:

facilmente se conclui através da análise por inspeção (por *analogia com circuito hidráulico*) e da simetria do circuito que a corrente em R_2 deverá ser nula e, por consequência, $v_2 = 0$ V.

Leis de Kirchhoff:

lei dos nó e lei das malhas

* [“Engineering Circuit Analysis,”](#) By William Hayt and Jack Kemmerly and Jamie Phillips and Steven Durbin; McGraw Hill.

Nodos/nós, ramos, malhas, circuitos

Um **circuito elétrico** é um conjunto de condutores, resistências, condensadores, bobines, geradores, recetores, etc., **onde há pelo menos um percurso fechado para fluxo de carga elétrica (corrente).**

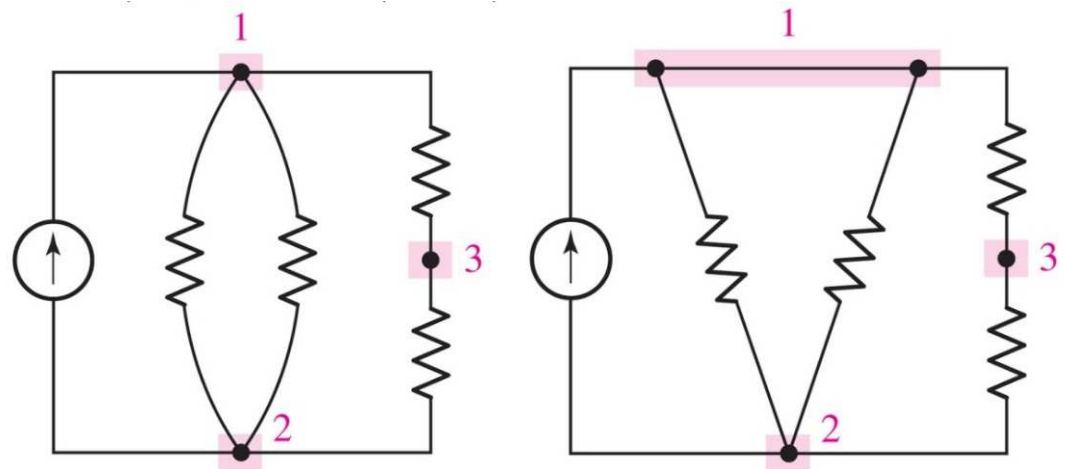
Por vezes, um circuito elétrico é também designado por **rede elétrica** (“**network**”), **se corresponder a** um conjunto de condutores (incluindo resistências, geradores, recetores, etc.) **onde há mais de um percurso para a intensidade de corrente**, podendo os condutores estar ligados *arbitrariamente*.

Estes dois circuitos (*redes*) são equivalentes

Há 3 **nodos*** e cinco 5 **ramos**.

Um caminho/**ramo** é uma sequência de nodos/nós

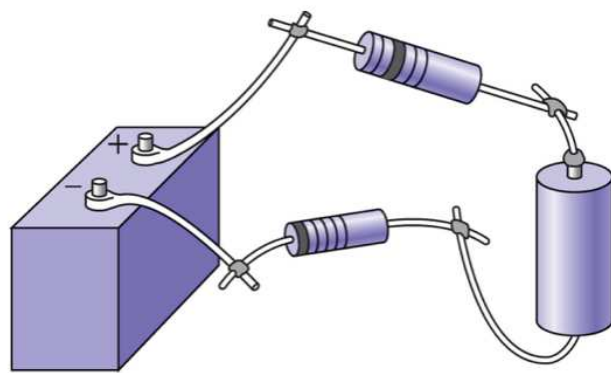
Uma malha é um percurso fechado de um circuito.



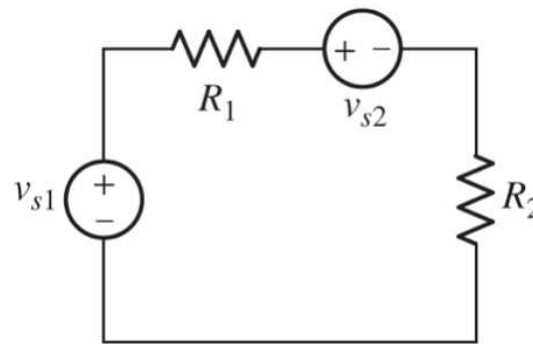
* **Nó ou nodo:** Ponto de um circuito onde concorrem três ou mais condutores. Contudo, por vezes, também designa nó/nodo o ponto de junção/ligação de dois componentes, como é o caso do ponto 3 indicado nos circuitos acima.

Circuito com apenas uma malha

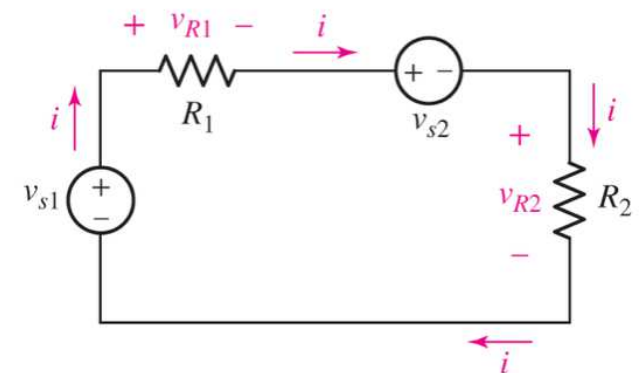
Uma malha é um percurso fechado de um circuito.



(a)



(b)



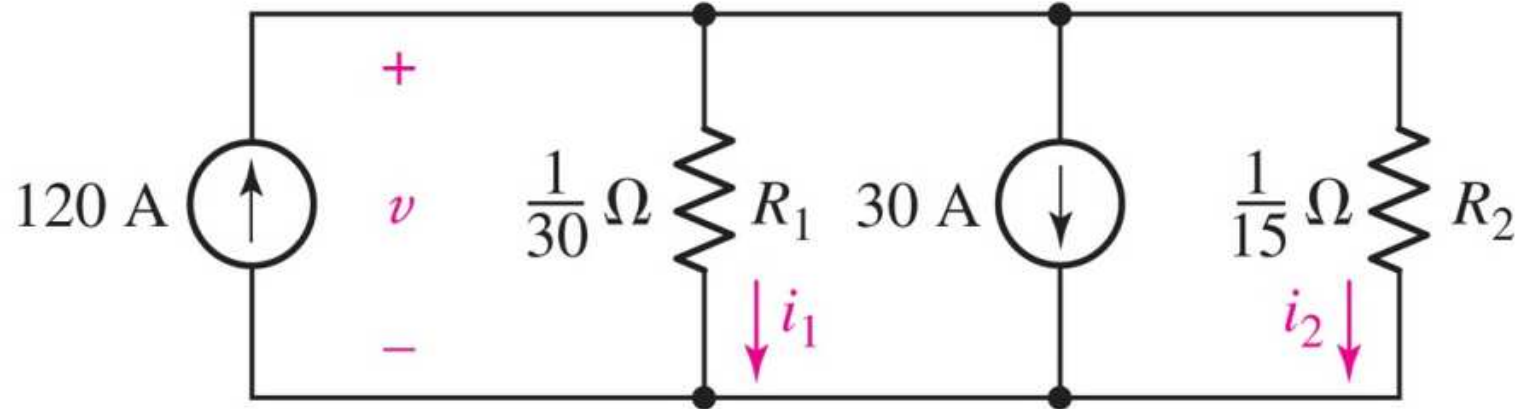
(c)

FIGURE 3.12 (a) A single-loop circuit with four elements. (b) The circuit model with source voltages and resistance values given. (c) Current and voltage reference signs have been added to the circuit.

Circuito com várias malhas

Como determinar a tensão v , as correntes i_1 e i_2 , e a potência fornecida pelas fontes de corrente independentes?

(ver analogia com sistemas hidráulicos)



Na prática este circuito só tem apenas um par de nodos, i.e., 2 nós.

- Resolução: ver adiante
- Resposta: $v = 2 \text{ V}$, $i_1 = 60 \text{ A}$, e $i_2 = 30 \text{ A}$

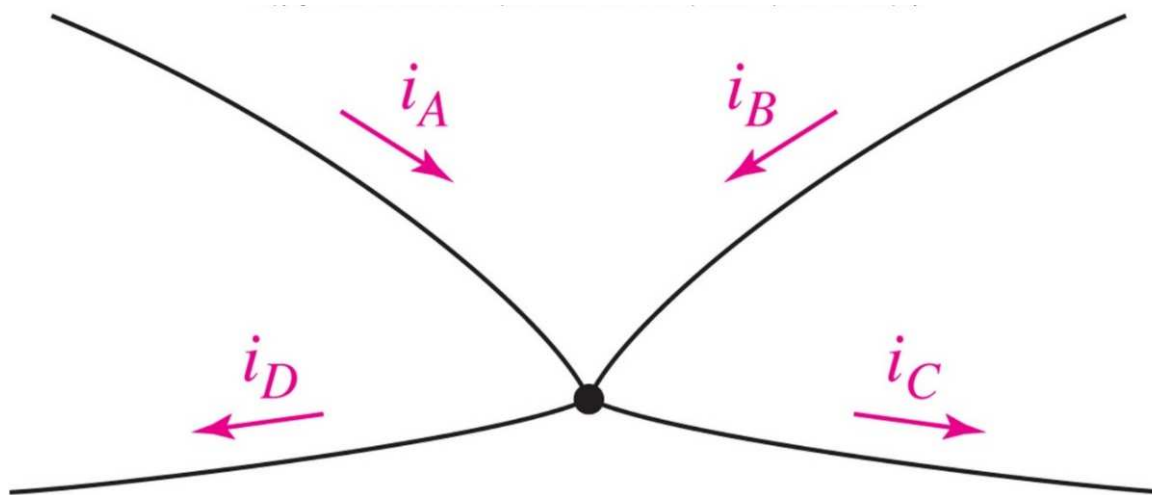
potência fornecida pelas fontes de corrente: - 240 W e 60 W

Lei de Kirchhoff para a corrente – lei dos nós

Lei dos nós - KCL (Kirchhoff Current Law):

a soma algébrica das corrente que entram num nodo qualquer é zero.

(Consequência do princípio da conservação da carga elétrica)

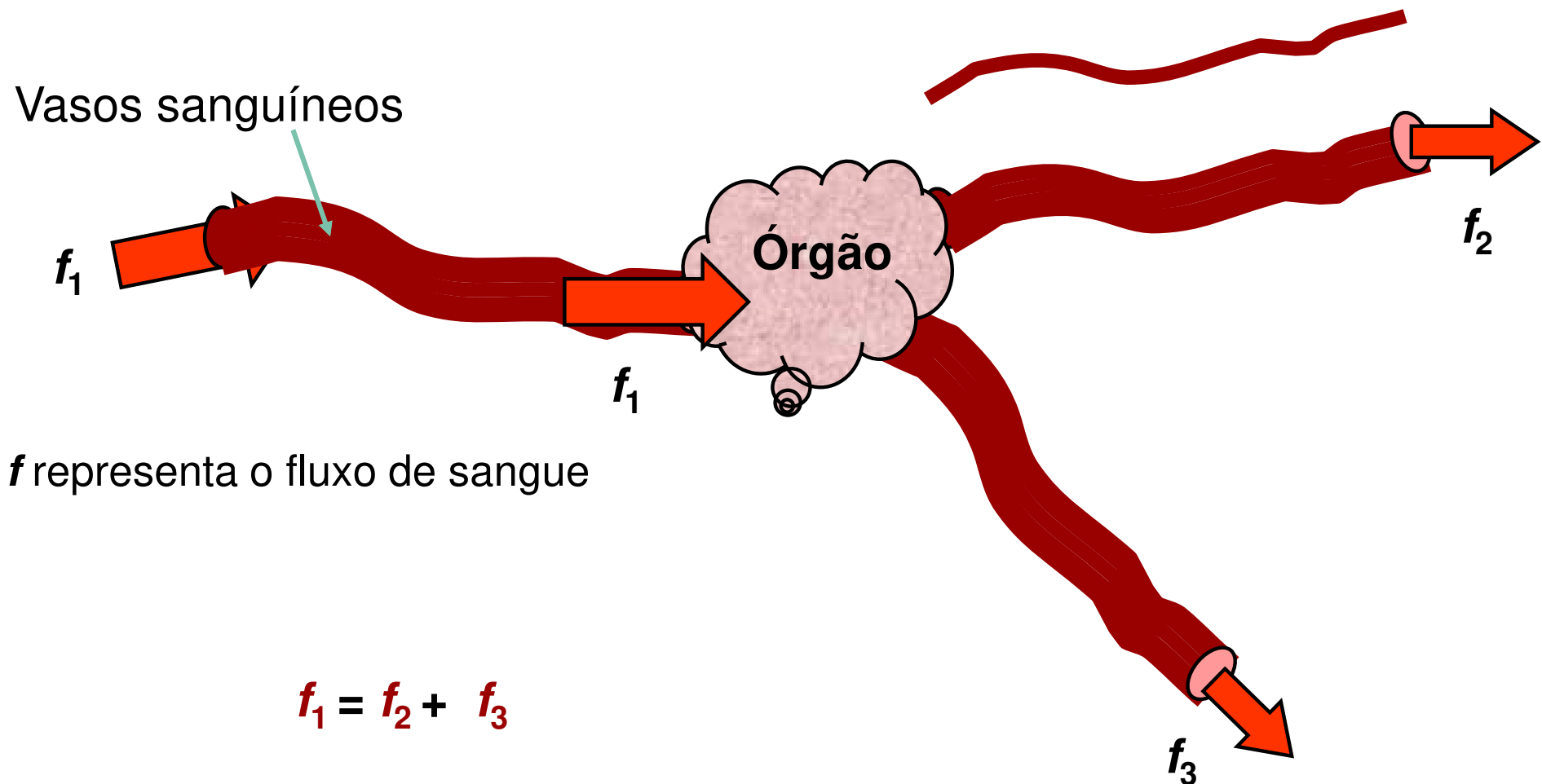


$$i_A + i_B + (-i_C) + (-i_D) = 0$$

A lei de Kirchhoff aplicada ao sistema circulatório

Lei de Kirchhoff dos nós (Kirchhoff's Current Law) aplicada ao Sistema circulatório.

“KCL” para o fluxo de sangue:



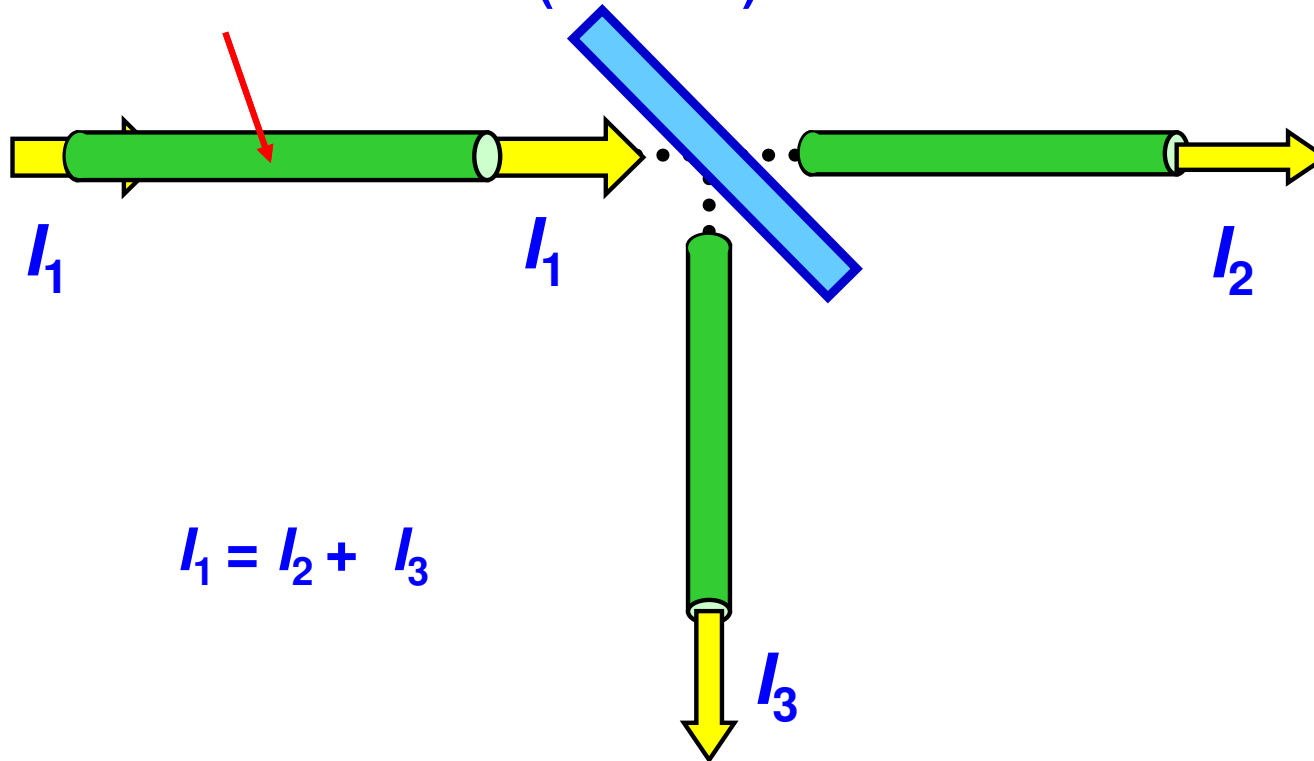
A lei de Kirchhoff aplicada em ótica

A lei dos nós (Kirchhoff's Current Law (KCL)) aplica-se outros tipos de redes e/ou sistemas.

Rede de fibra ótica (Fiber optic network) sem perdas (sem absorção de fótons)

“KCL” para a luz

I representa a **intensidade da luz (watt/m²)**



$$I_1 = I_2 + I_3$$

Formas alternativas da KCL:

As soma das correntes que “**entram**” é zero:

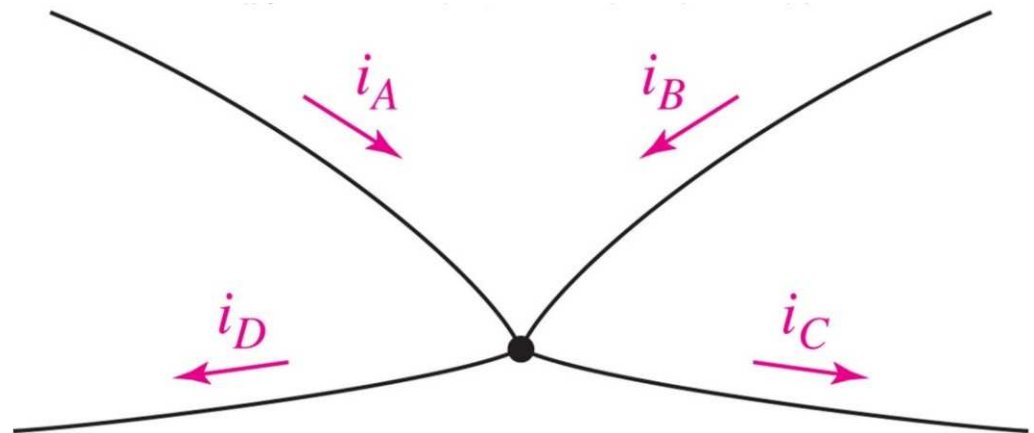
$$i_A + i_B + (-i_C) + (-i_D) = 0$$

- As soma das correntes que “**saem**” é zero:

$$(-i_A) + (-i_B) + i_C + i_D = 0$$

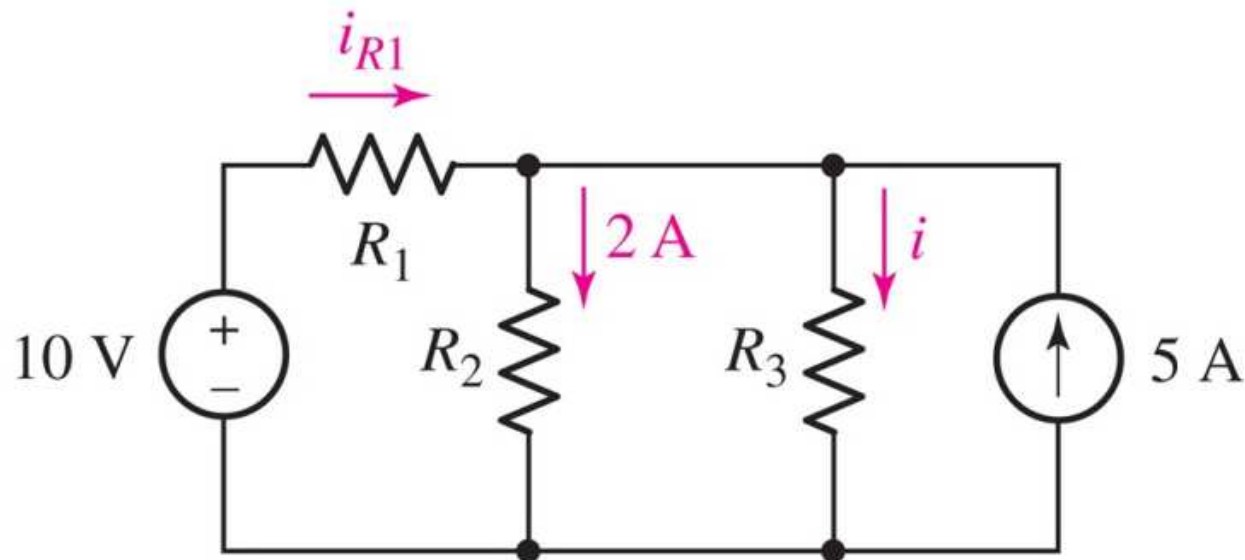
- As somas das correntes que **entram** e das correntes que **saem** são iguais:

$$i_A + i_B = i_C + i_D$$



Exemplo de aplicação da KCL

Exercício: Determinar a corrente através da resistência R_3 assumindo que a fonte de tensão debita uma corrente de 3 A.



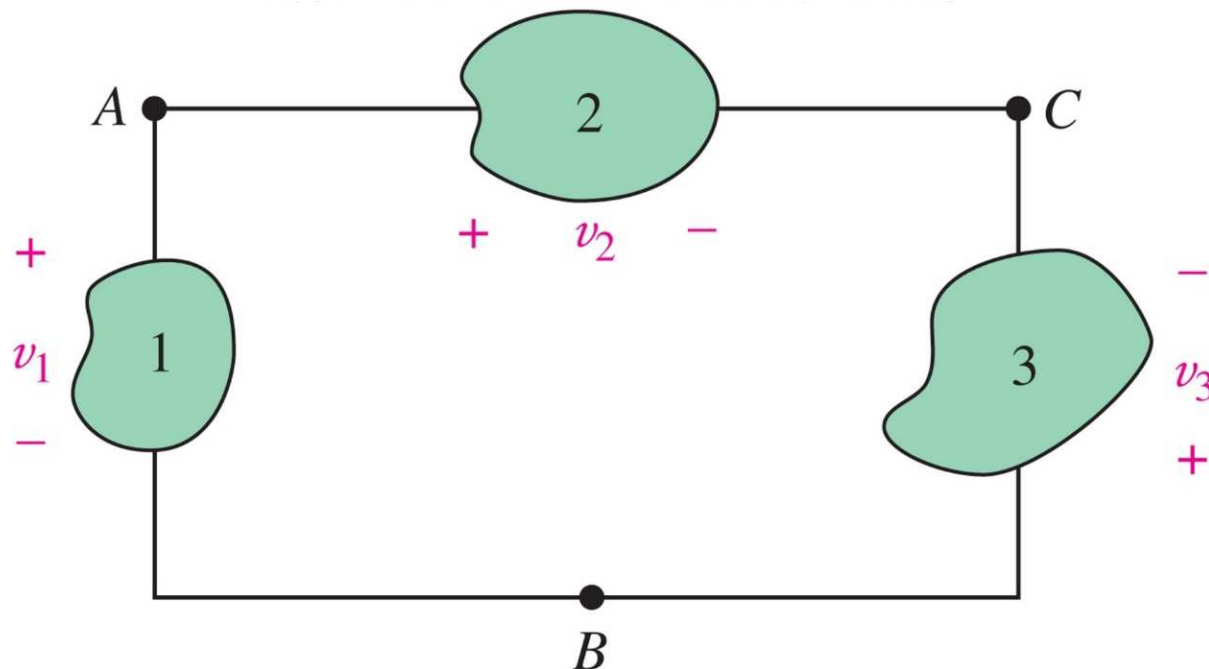
- Resposta: $i = 6\text{ A}$

Lei de Kirchhoff para tensão – lei das malhas

Lei das malhas (KVL (Kirchhoff's Voltage Law)): a soma algébrica das tensões ao longo de uma qualquer percurso fechado é zero.

(Consequência do princípio da conservação da energia)

$$v_1 + (-v_2) + v_3 = 0$$



Formas alternativas da KVL

A soma dos incrementos de tensão é zero (sentido dos ponteiros do relógio a partir de B):

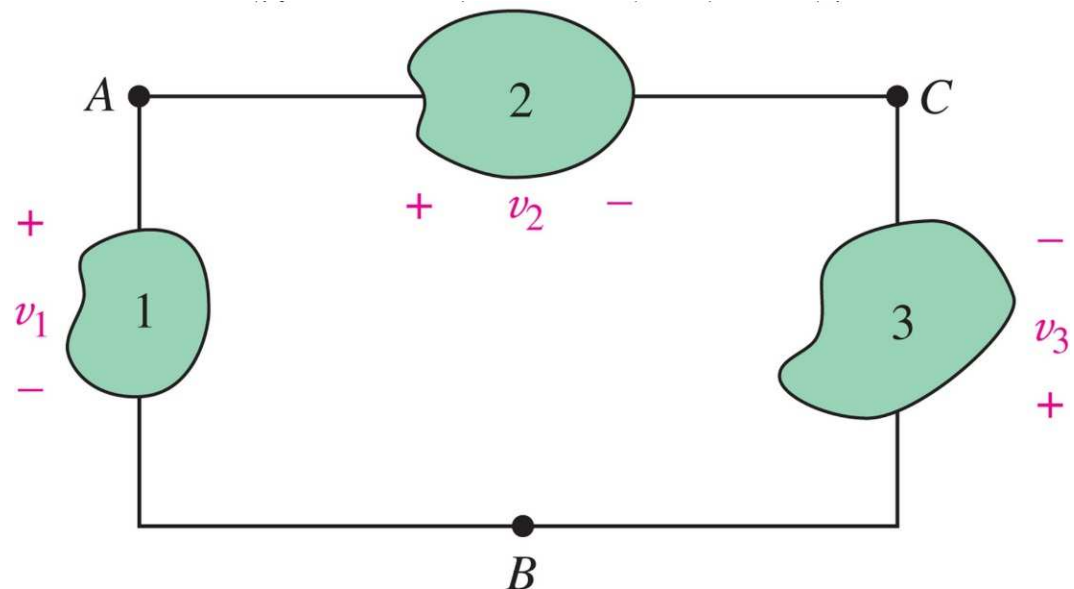
$$v_1 + (-v_2) + v_3 = 0$$

A soma das **quedas de tensão** é zero (sentido dos ponteiros do relógio a partir de B):

$$(-v_1) + v_2 + (-v_3) = 0$$

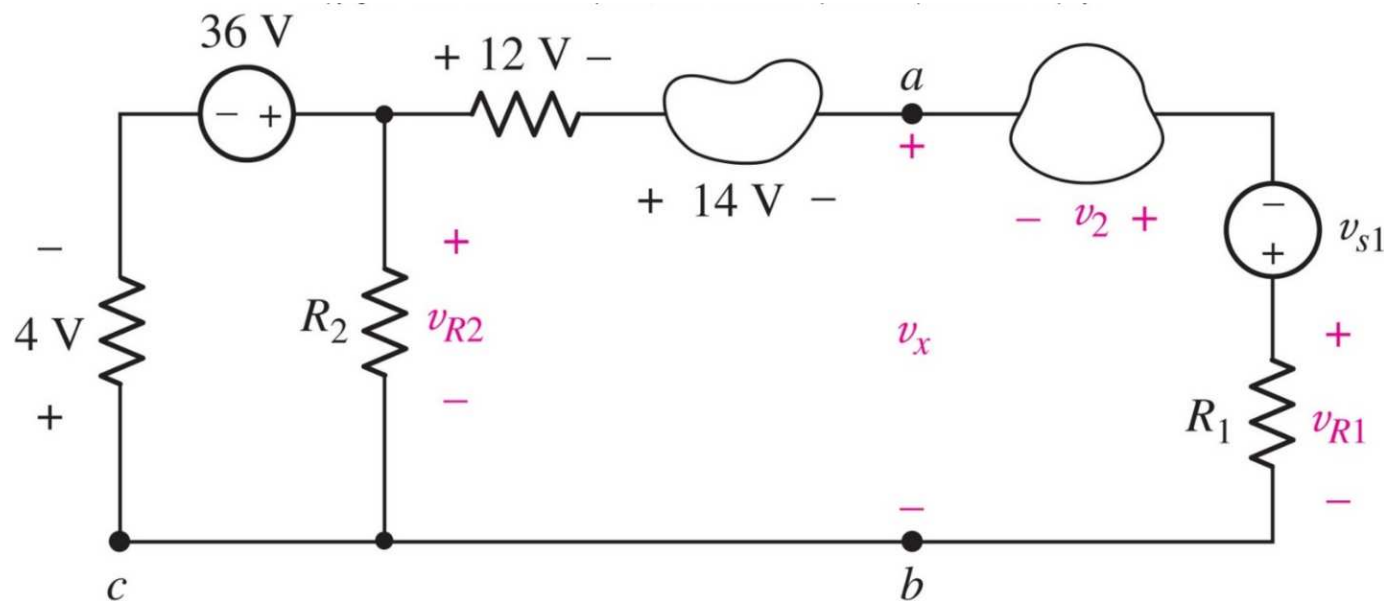
Dois caminhos (de A para B), a mesma tensão:

$$v_1 = (-v_3) + v_2$$



Exemplo de aplicação da KVL

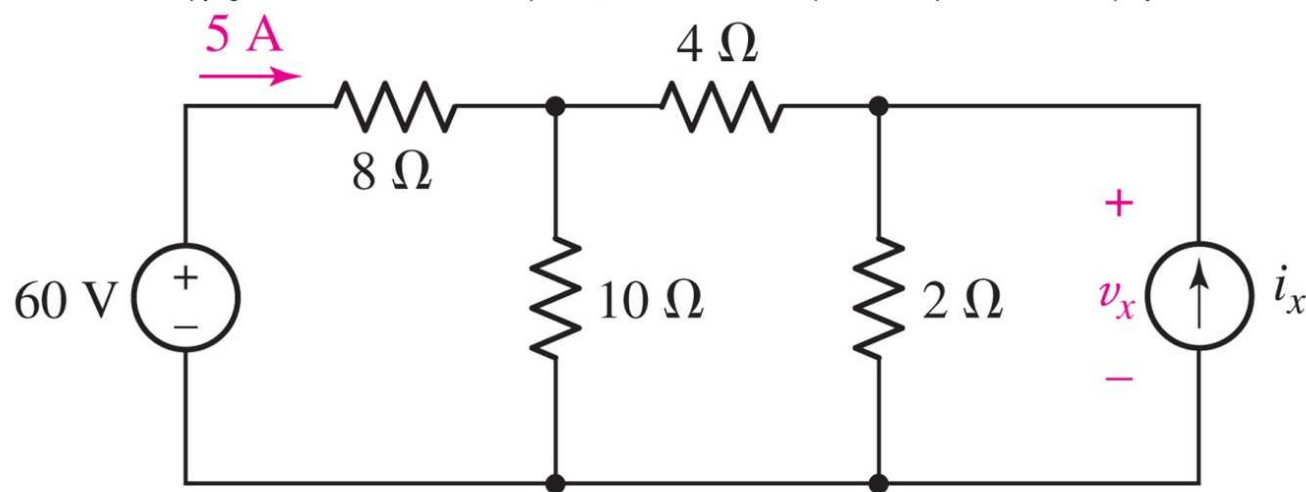
Exercício: Determinar v_{R2} (a tensão através de R_2) e a tensão v_x .



- Resposta: $v_{R2} = 32 \text{ V}$ e $v_x = 6 \text{ V}$.

Aplicação da KCL, da KVL, e da lei de Ohm₂

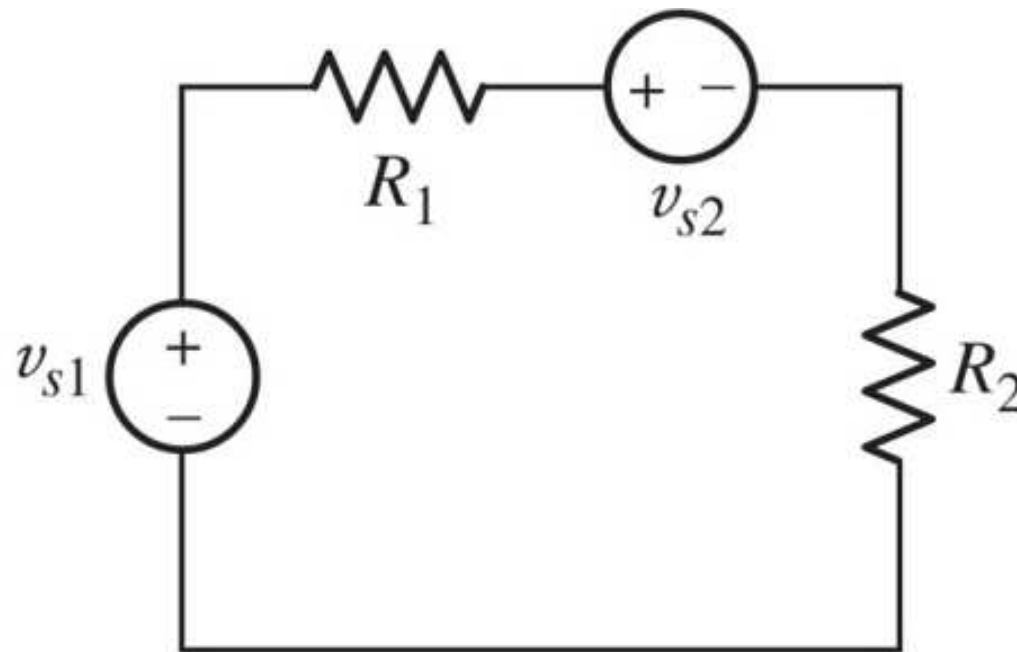
Exercício: determinar v_x e i_x



- Resposta: $v_x = 8\text{ V}$ and $i_x = 1\text{ A}$

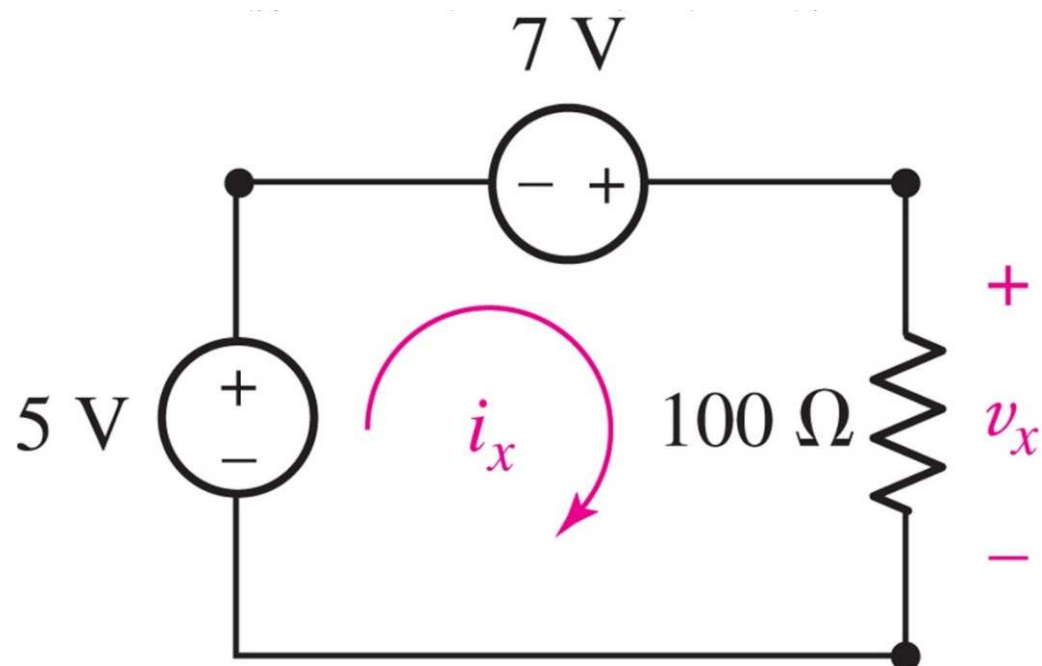
Associação de elementos em série

Todos os elementos de um circuito que são percorridos pela **mesma corrente** estão **associados/ligados em série**.



Aplicação da KCL, da KVL, e da lei de Ohm₁

Exercício: determinar a corrente i_x e a tensão v_x



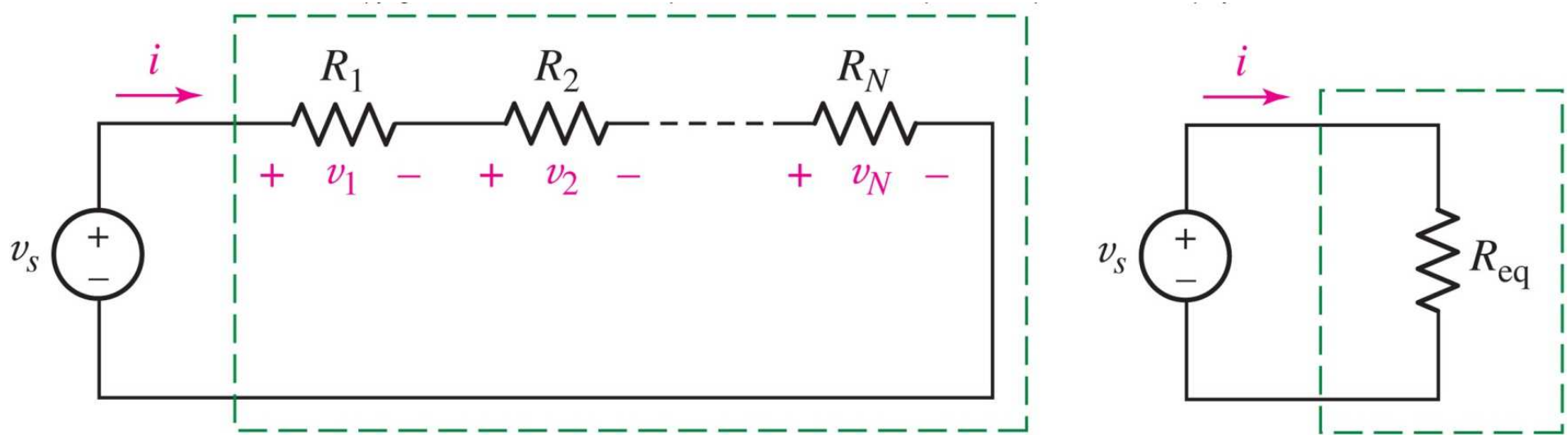
- Resposta: $v_x = 5 \text{ V} + 7 \text{ V} = 12 \text{ V}$ and $i_x = 12 / 100 = 120 \text{ mA}$

Associação de resistências em série

* [“Engineering Circuit Analysis,”](#) By William Hayt and Jack Kemmerly and Jamie Phillips and Steven Durbin; McGraw Hill.

Associação de resistências em série

Trabalho prático n.º 1



- A corrente que percorre as resistências é literalmente a mesma:

$$v_S = R_1 i + R_2 i + R_3 i + \cdots + R_N i = (R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_N) i$$

$$v_S = R_{eq} i$$

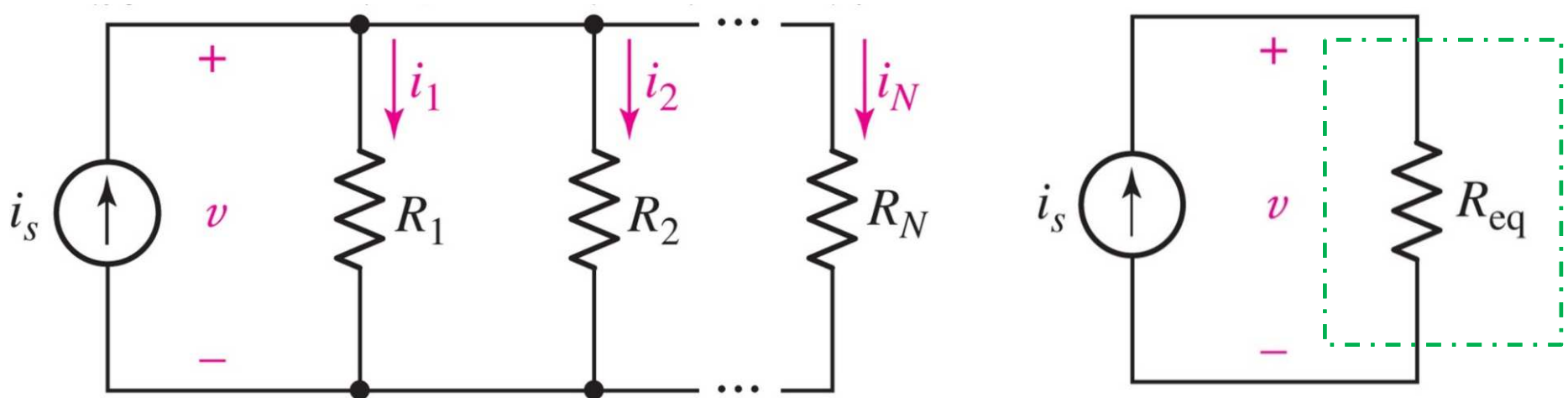
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_N$$

Associação de resistências em paralelo

* “Engineering Circuit Analysis,” By William Hayt and Jack Kemmerly and Jamie Phillips and Steven Durbin; McGraw Hill.

Associação de resistências em paralelo

Trabalho prático n.º 1



- A corrente $i_S = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_N$ e $v = R_i \times i_i$

$$i_S = \frac{v}{R_{eq}} = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} + \frac{v}{R_3} + \dots + \frac{v}{R_N}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N$$

Duas resistências em paralelo

Trabalho prático n.º 1

Duas resistências em paralelo são equivalentes a uma resistência (resistência equivalente) dada pela razão do produto e da soma

$$R_{eq} = \text{produto} / \text{soma}$$

Associação em paralelo

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

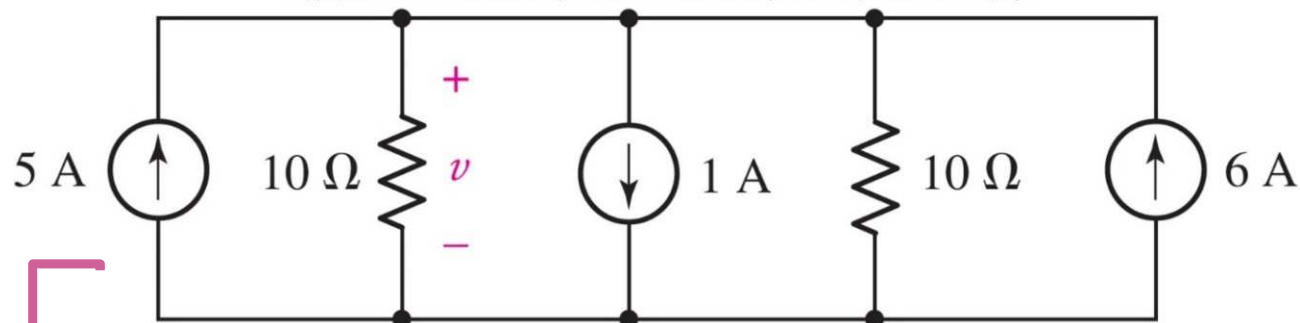
Ligando duas resistências em paralelo obtém-se sempre uma resistência equivalente de valor inferior à resistência de menor valor do paralelo:

$$0.5 \min(R_1, R_2) < R_1 \parallel R_2 < \min(R_1, R_2)$$

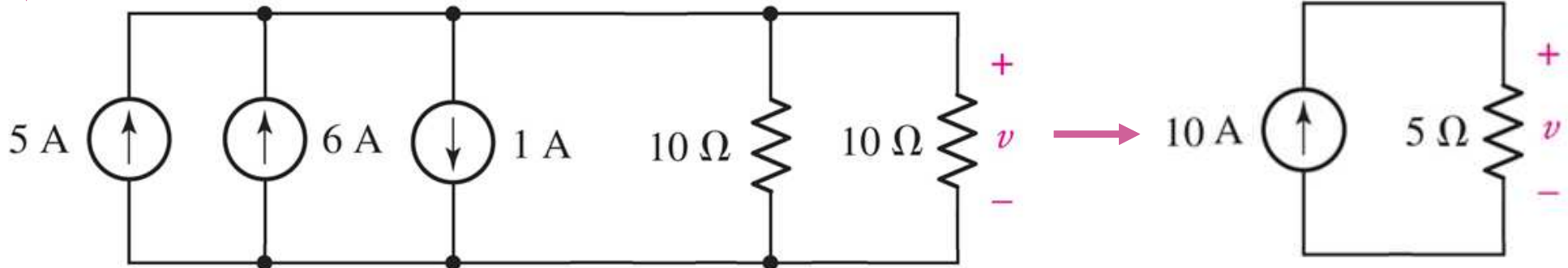
Associação de elementos em Paralelo

Os elementos de um circuito que têm uma tensão comum estão associados/ ligados em paralelo.

(ver analogia com sistemas hidráulicos)



Podemos redesenhar, reorganizando e simplificando (reduzindo) os componentes (juntar os que são do mesmo tipo sempre que possível), obedecendo, e.g., às regras da associação em série e em paralelo.



Exercício: Determinar a tensão v , as correntes *nas resistências*, e as potências fornecida pelas fontes de corrente independentes.

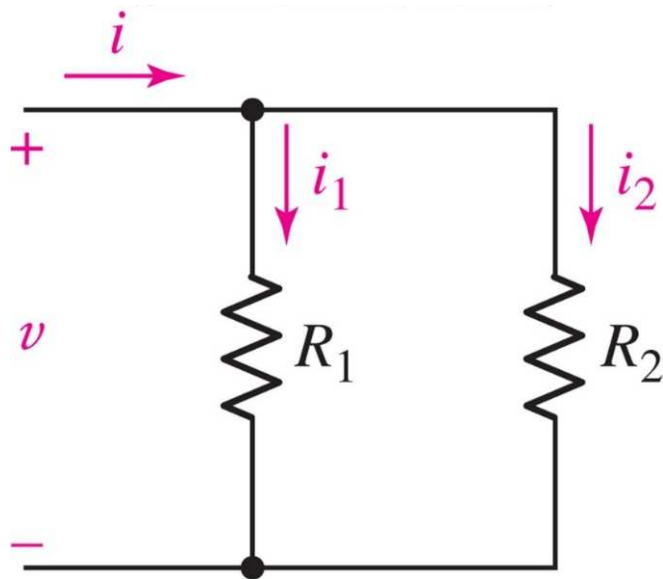
Divisor de tensão e divisor de corrente

* “Engineering Circuit Analysis,” By William Hayt and Jack Kemmerly and Jamie Phillips and Steven Durbin; McGraw Hill.

Divisor de corrente

Trabalho prático n.º 1

Resistências em paralelo repartem/dividem a corrente que atravessa o paralelo:



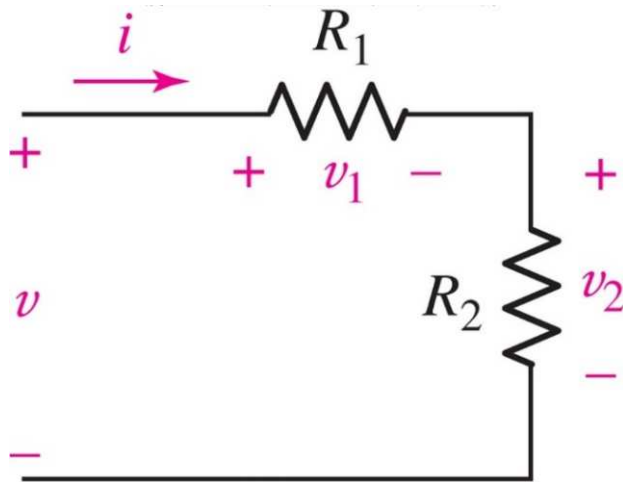
$$i_1 = i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$i_2 = i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Divisor de tensão

Trabalho prático n.º 1

Resistências numa associação em série partilham/repartem a tensão aos terminais da série:



$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v$$

$$v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v$$

Sempre que temos resistências em série, elas dividem a tensão a que o conjunto está sujeito entre si, proporcionalmente ao valor de cada resistência.

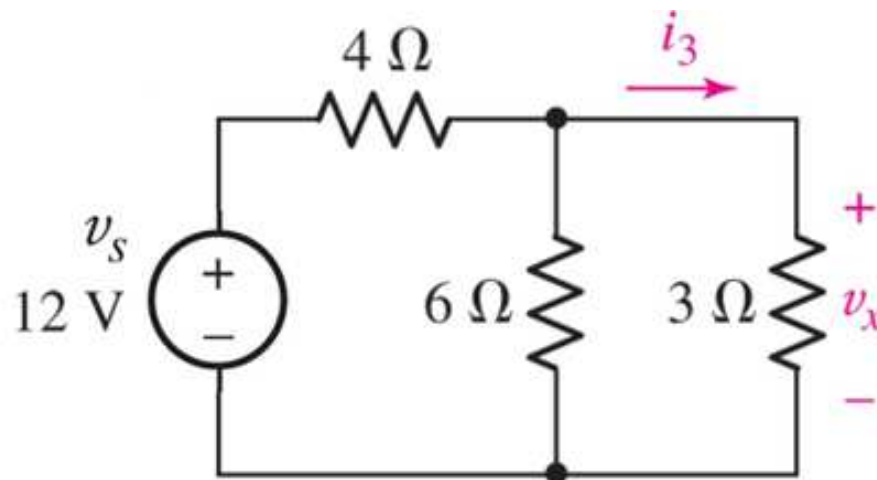
Tendo presente o conceito de divisor de tensão, podemos calcular a tensão a que uma resistência está sujeita, sem ter de determinar a corrente que a percorre.

O conceito de divisor de tensão é muito útil e tem muitas aplicações.

Exercício: Divisores de corrente e de tensão

Trabalho prático n.º 1

Determinar v_x e i_3



- Resposta: $v_x = 4\text{ V}$;
 $i_3 = 4/3\text{ A}$

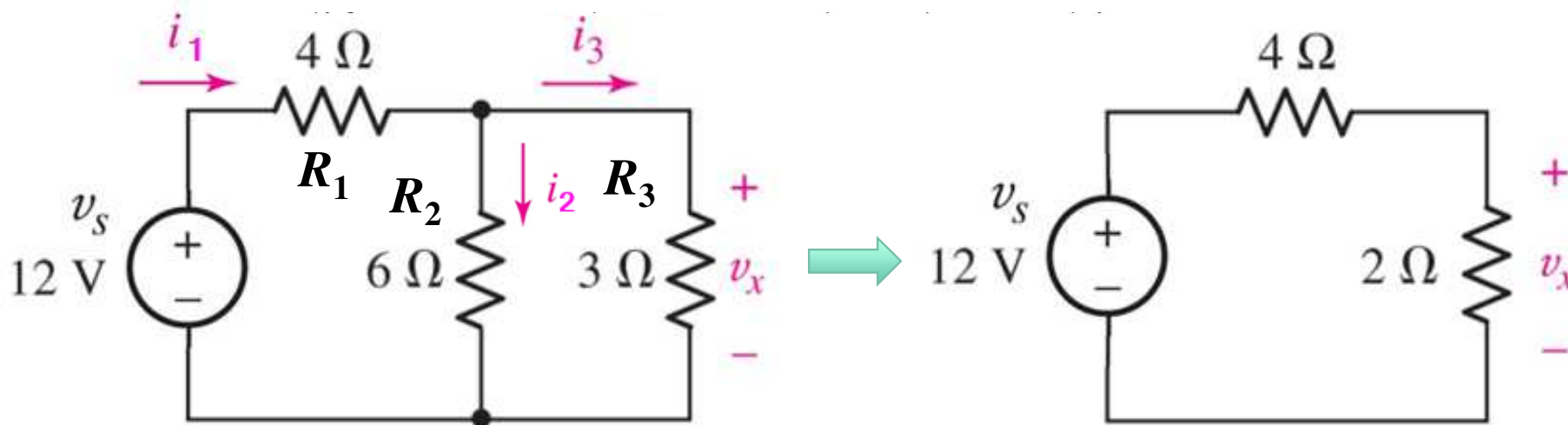
Exercício: Divisores de corrente e de tensão

Trabalho prático n.º 1

Determinar v_x e i_3

Resolução: comece por simplificar o circuito

Simplifica-se o circuito substituindo R_2 e R_3 pelo seu equivalente: $R_{eq} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$



v_x corresponde à queda de tensão no equivalente R_{eq} , que é a mesma em R_2 e R_3 :

$$v_x = v_s \times 2 / (4 + 2) = 24 / 6 = 4 \text{ V.}$$

Para determinar i_3 voltamos ao circuito inicial: $i_3 = v_x / R_3$.

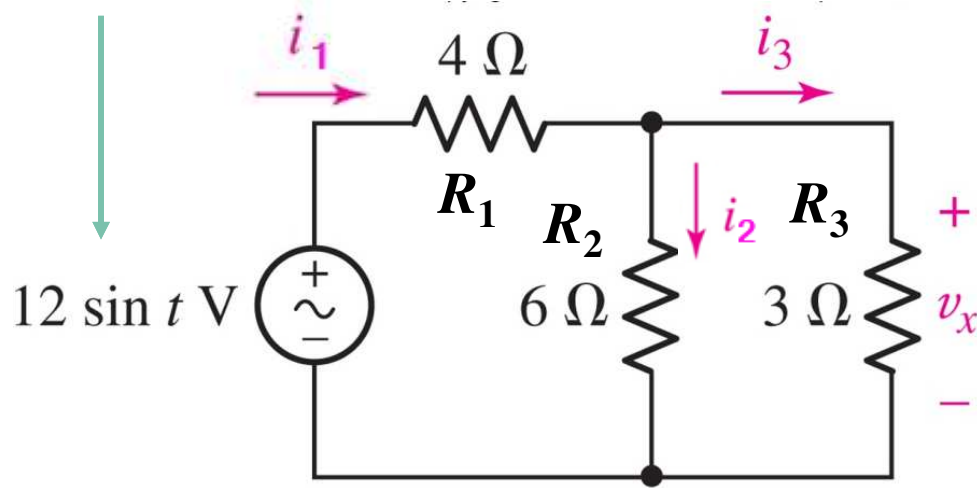
Nota: Para calcular i_3 não foi necessário determinar as correntes i_1 e i_2 .

• Resposta: $v_x = 4 \text{ V};$
 $i_3 = v_x / R_3 = 4 / 3 \text{ A}$

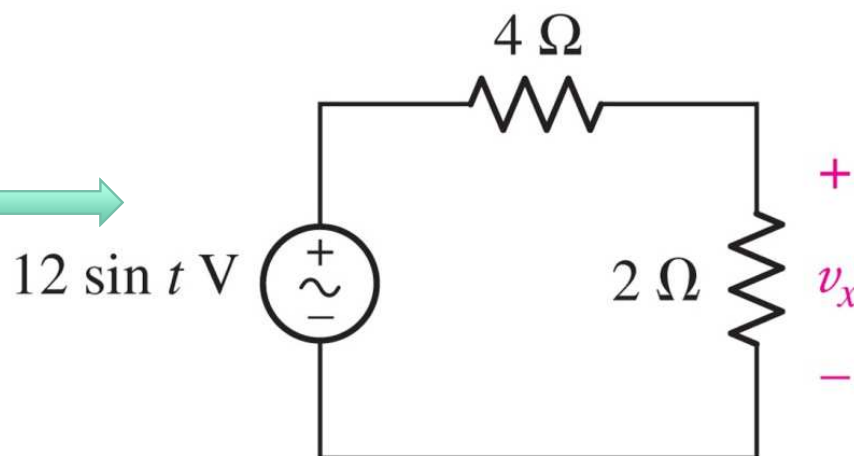
Exercício: Divisores de corrente e de tensão

Determinar v_x e i_3

Corrente alternada (a ver na próxima aula)

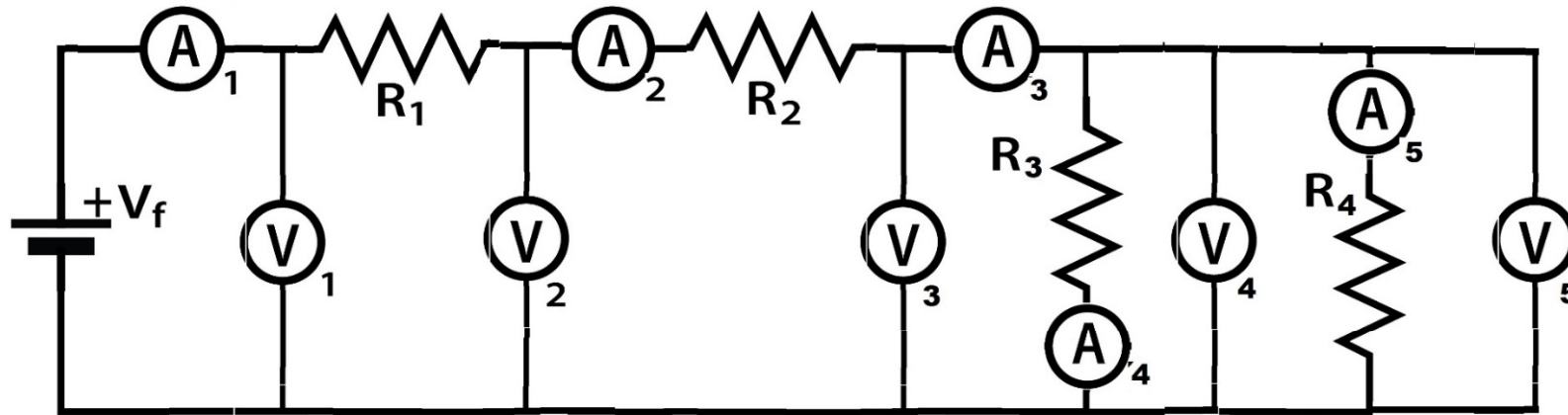


Simplifica-se o circuito substituindo R_2 e R_3 pelo seu equivalente:



- Resposta: $v_x(t) = 4 \sin t \text{ V};$
 $i_3(t) = v_x(t) / R_3 = 4/3 \sin t \text{ A}$
- Resposta: $i_3(t) = 1.333 \sin t \text{ V}$

Exercício: Circuito resistivo



V_f : fonte de força eletromotriz V_f

A: amperímetro

V: voltímetro

R: resistência

O circuito é um circuito resistivo: só tem resistências, para além, claro está, da fonte de tensão V_f .

Considerando os amperímetros e os voltímetros ideais, as resistências R_1 e R_2 estão em série (são percorridas pela mesma corrente); e as resistências R_3 e R_4 estão em paralelo (estão à mesma tensão).

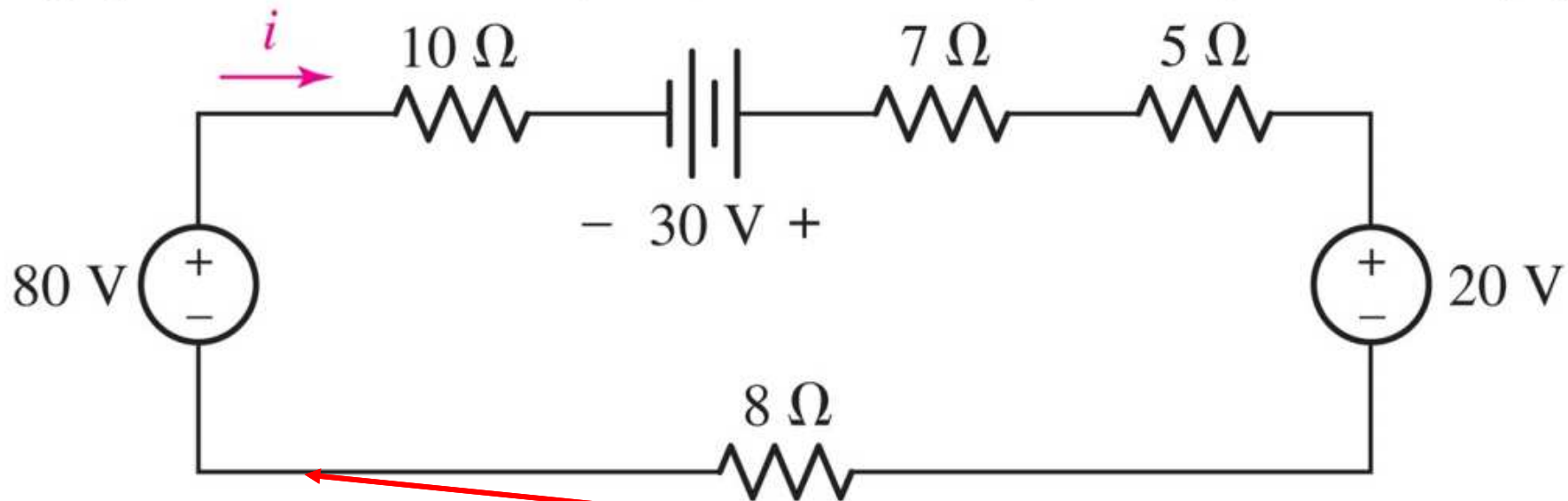
TPC:

Sejam $V_f = 10 \text{ V}$ e $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$. Indicar os valores medidos pelos amperímetros e voltímetros.

Resolução: Podemos simplificar o circuito substituindo o paralelo de R_3 com R_4 , pela resistência equivalente, que fica em série com as resistências R_1 e R_2 ; segue-se a substituição das resistências em série (R_1 e R_2 + a equivalente do paralelo) pelo seu equivalente. Agora pela lei de Ohm determinamos a corrente debitada por V_f : $I_f = 10 \text{ V} / 2.5 \text{ k}\Omega = 4 \text{ mA}$ (corrente medida por A_1 e A_2). Com as resistências do paralelo são iguais, a corrente que percorre R_3 e R_4 é 2 mA (corrente medida por A_4 e A_5). $V_5 = V_4 = V_3 = 2 \text{ V}$; $V_1 = 10 \text{ V}$; $V_2 = 6 \text{ V}$; $V_3 = V_4 = V_5 = 2 \text{ V}$.

Exercício: simplificação de um circuito₁

Determinar i e a potência fornecida pela fonte de tensão de 80 V.



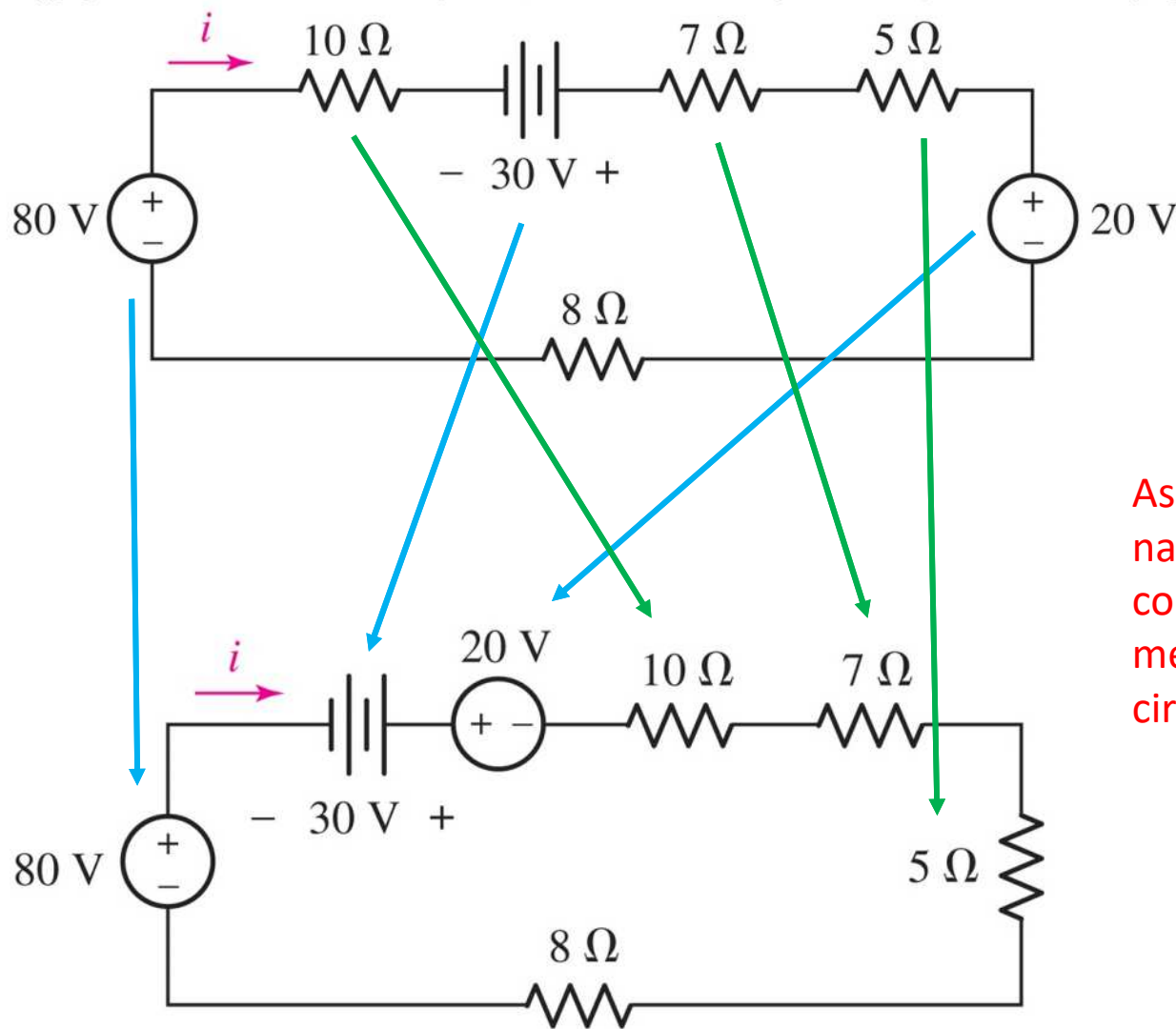
Se necessário, podemos considerar que o ponto que está a **potencial 0 V** é o terminal negativo da fonte de força eletromotriz de 80 V.

Lembrete - potência:

o valor da potência fornecida (valor negativo) ou consumida (valor positivo) por um componente é obtido pela expressão $p = v \cdot i$, onde v representa a diferença de potencial (queda de tensão) aos seus terminais e i é a intensidade de corrente que o percorre.

Exercício: simplificação de um circuito₂

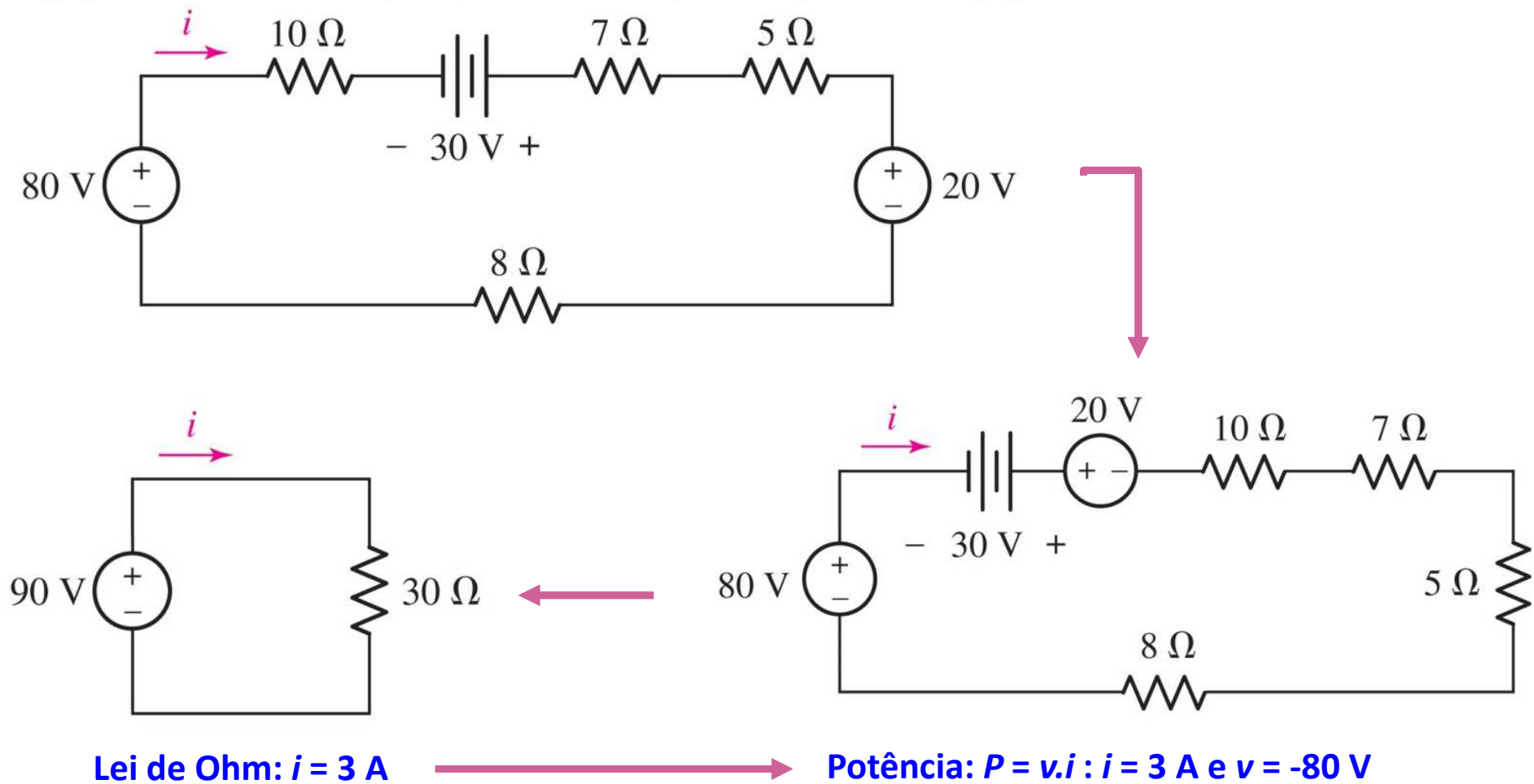
Resolução: Podemos redesenhar, reorganizando e simplificando (reduzindo) os componentes (juntar os que são do mesmo tipo sempre que possível), obedecendo, e.g., às regras da associação em série e em paralelo.



As quedas de tensão nas resistências e a corrente são as mesmas nos dois circuitos.

Exercício: simplificação de um circuito₃

Determinar a corrente i e a potência fornecida pela fonte de tensão de força eletromotriz (f.e.m.) 80 V.



- Resposta: $i = 3\text{ A}$ e $p = 240\text{ W}$ (fornecida)

Potência e energia

Em física, **potência** (p , P) é a grandeza física que caracteriza a quantidade de energia fornecida por uma fonte ou consumida por um componente ou dispositivo por unidade de tempo. Por outras palavras, o valor da potência traduz a rapidez (taxa temporal) com a qual uma certa quantidade de energia é fornecida ou transformada; caracteriza a rapidez com que trabalho é realizado. A unidade de potência no Sistema Internacional de Unidades é o watt (W).^[1]

Nos sistemas elétricos a potencia fornecida ou absorvida por um elemento é obtida multiplicando a tensão (diferença de potencial aos terminais do elemento) e pela corrente que o percorre: $p = v \cdot i$

Potencia (p) e energia (w)

- A potência (p , P) é a taxa temporal de realização de trabalho ou de transferência de energia. Unidade SI de potência: **watt (W)**.
- Unidade de energia (E , w , W): joule (J). Unidades de uso comum em eletricidade: watt-hora (Wh), 1 Wh = 3600 J.
- **A energia w é o integral da potência $p=v \times i$:**

$$w(t) = \int_{t_0}^t p \, dt = \int_{t_0}^t vi \, dt$$
- É a quantidade de energia que determina, por exemplo, quanto tempo a carga de uma pilha/bateria dura:
 - A capacidade de uma bateria é dada, frequentemente, em amp-hora (Ah)
 - A energia armazenada $W = (\text{tensão ou ddp da bateria}) \times (\text{capacidade em Ah})$

A escolha de uma bateria de um carro, por exemplo, deve ter em conta as necessidades de consumo em corrente (ampere) x tempo (horas). Os automóveis comuns usam baterias de 12 V (tensão nominal). **Bateria típica:** 12 V, 70 Ah, 640 A

- Tensão nominal 12 V, capacidade 70 Ah, poder de arranque 640 A.

Pilha NiMH AA (50,5 mm x 14,5 mm): força eletromotriz (fem) 1.2 V, capacidade 2.100 Ah (1 Ah = 3600 C), 2,52 Wh = 9072 J

- Tem uma energia total de 2.52 Wh ~ 9 kJ
- Pode debitar a corrente de 210 mA durante 10 h.

Potência: $p = v \cdot i$

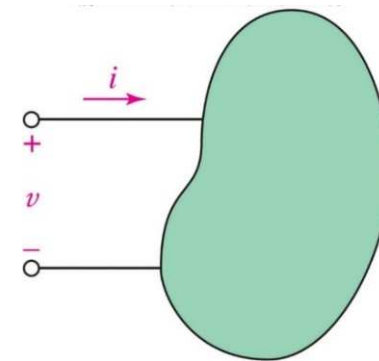
Convenção de sinais para elementos passivos e fontes.

- A potência necessária para fazer passar uma corrente i (C/s) através de um elemento com uma diferença de potencial – queda de tensão - v (J/C) – ver figura – é dada por:

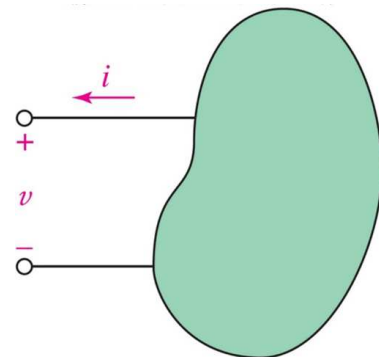
$$p = v \cdot i \text{ (J/s = W)}$$

- Se a potência é positiva, o elemento absorve energia.
- Quando a potência é negativa, o elemento fornece energia ao circuito.

Se a corrente sair pelo terminal + e a ddp – queda de tensão - for positiva (como indicado na figura), o potência é positiva, i.e., o elemento fornece energia ao circuito.

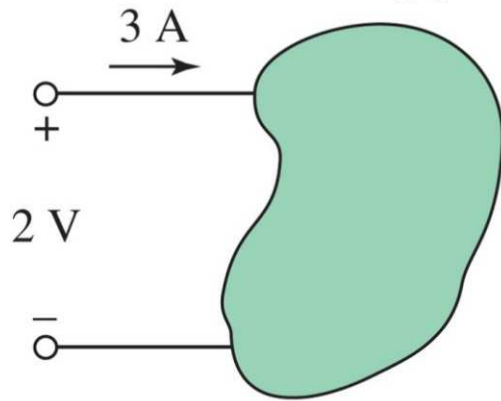


Se a corrente entrar pelo terminal + e a ddp – queda de tensão - for positiva (como indicado na figura), o potência é positiva, i.e., o elemento absorve energia do circuito.

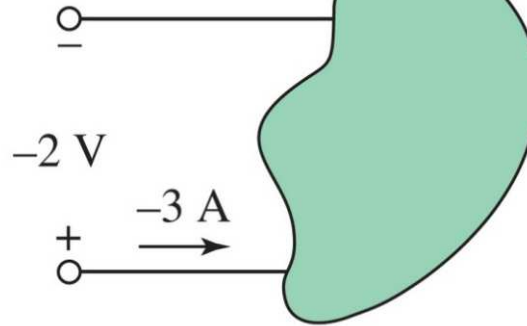


Exemplo: potência absorvida

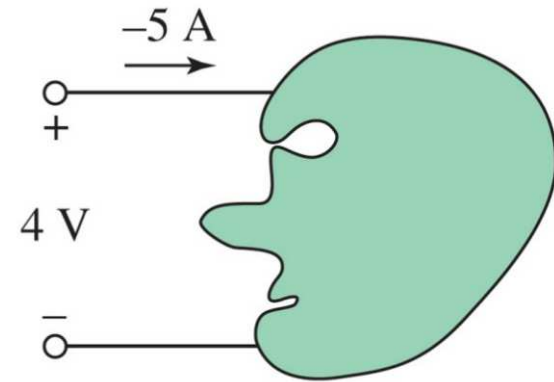
Qual é a potência é absorvida pelos três elementos abaixo representados?



(a)



(b)



(c)

Potência: $p = \text{queda de tensão} \times \text{corrente} = v \times i$

$$P_a = +6 \text{ W}, P_b = +6 \text{ W}, P_c = -20 \text{ W}.$$

Nota: (c) está a fornecer energia (potência) ao circuito.

Teorema de Tellegen

Num circuito a conservação de energia implica que a soma das potências absorvidas pelos elementos iguala a soma da potências fornecidas pelas fontes.

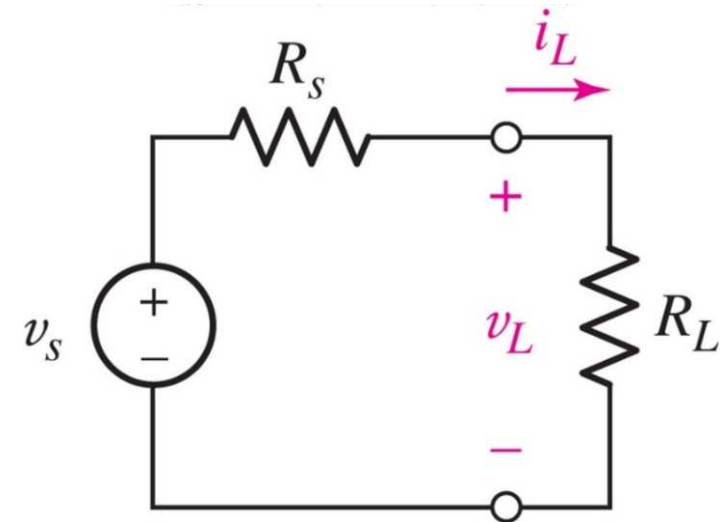
Teorema da máxima transferência de potência

Qual deve ser resistência de carga (resistência R_L) que faz com que uma fonte de tensão real (fonte de tensão com f.e.m. v_s e resistência interna R_s) forneça a máxima potência à carga (resistência R_L)?

Resposta: a potência fornecida à resistência R_L é dada por

$$p_L = i_L \times v_L = i_L \times R_L i_L = R_L i_L^2 = R_L \left(\frac{v_s}{R_s + R_L} \right)^2$$

[para obter o valor máximo determina-se o valor de R_L para o qual $\frac{dp_L}{dR_L} = 0$.]



Resposta: a transferência de potencia (energia) é máxima quando $R_L = R_s$.

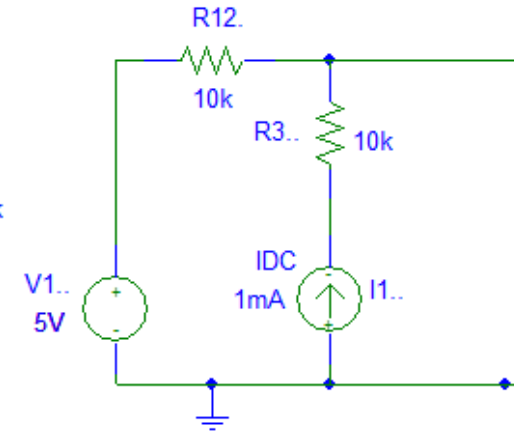
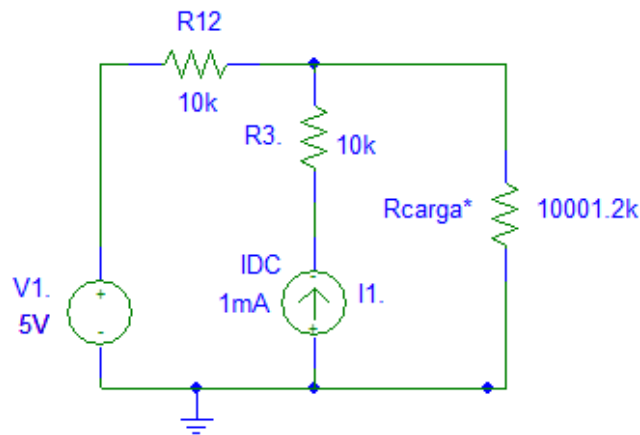
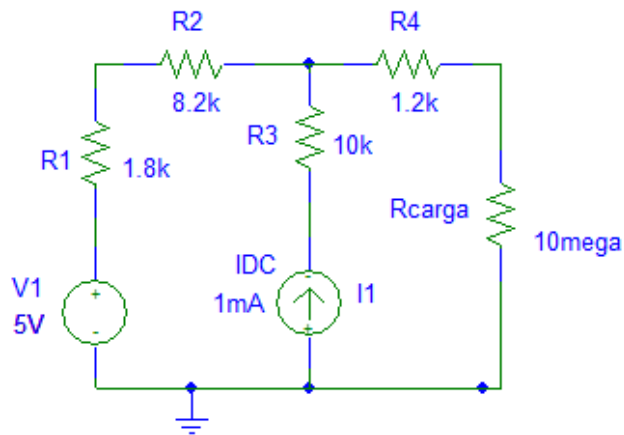
$$\left[\text{Ou: } p_L = i(v_s - iR_s), \text{ fazer } \frac{dp_L}{di} = 0 \text{ e encontrar } i_{\max} = \frac{v_s}{2R_s}. \text{ Portanto, } R_L = R_s \right]$$

Exercício PSPICE: circuito com resistências₁

Ver moodle: Familiarização com o simulador de circuitos elétricos PSPICE

Praticar:

Determinar a intensidade de corrente no ramo que contém a fonte de tensão V1 e a tensão aos terminais da fonte de corrente I1.

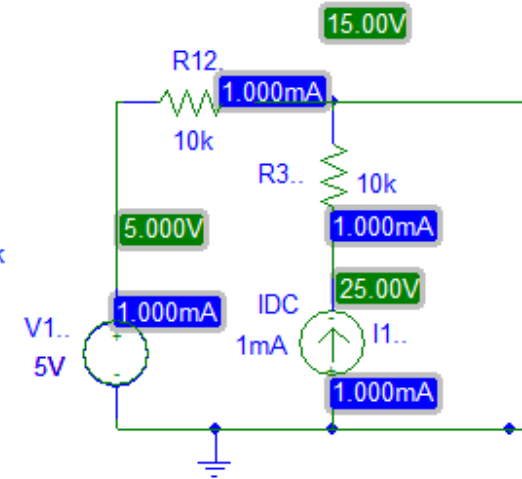
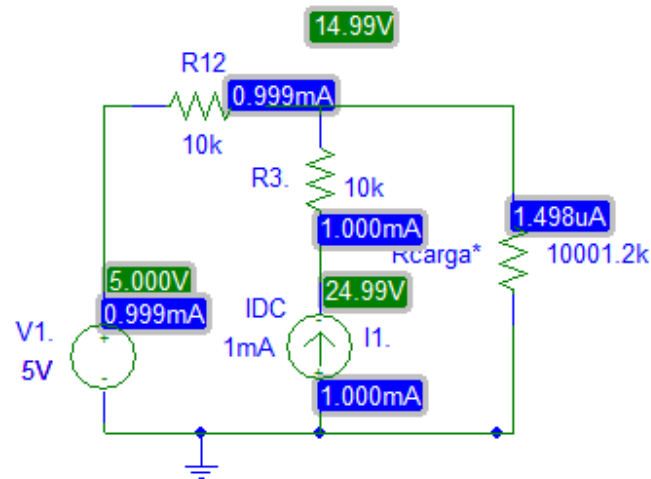
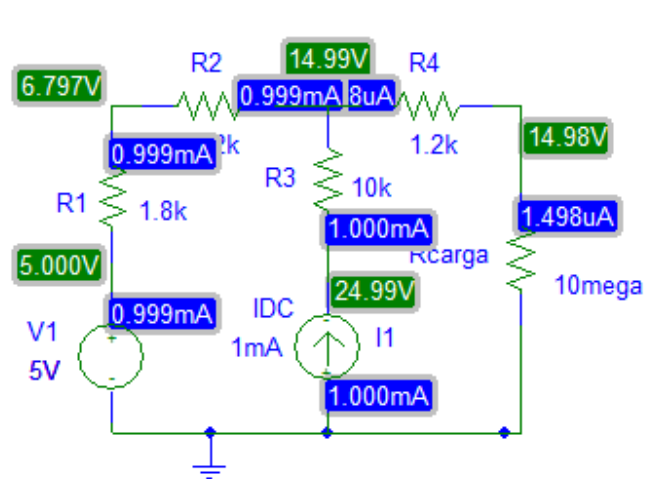


Repetir o exercício considerado agora que $R3=0\ \Omega$.

O que é que se pode concluir do exercício?

Exercício PSPICE: circuito com resistências₂

Intensidade de corrente no ramo que contém a fonte de tensão V1
Tensão aos terminais da fonte de corrente I1



Se $R3=0\ \Omega$:

