

PSI3211 – Circuitos I – Aulas 01 e 02

Magno T. M. Silva

Escola Politécnica da USP

Fevereiro de 2019

Vários desses slides foram inspirados nas transparências da
Profa. Denise Consonni

Sumário

1.1 A Engenharia Elétrica e os cientistas

1.2 Validade da teoria de Circuitos Elétricos

1.3 Projeto em Circuitos Elétricos

1.4 Conceitos básicos

Objetivos destas aulas

Ao final destas aulas, você deverá estar apto a:

- ▶ identificar se a teoria de circuitos elétricos é válida, conhecendo-se a maior frequência e a maior dimensão do circuito
- ▶ calcular a corrente a partir da carga elétrica que atravessa um condutor e vice-versa
- ▶ relacionar tensão, corrente, potência, carga elétrica e energia de um bipolo
- ▶ identificar se um bipolo fornece ou recebe potência

1.1 A Engenharia Elétrica

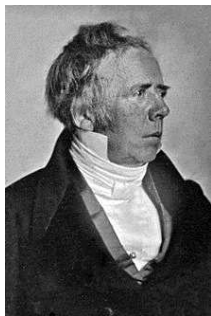
A Engenharia Elétrica visa essencialmente prover **recursos** e **métodos** para promover a

- ▶ Produção
- ▶ Transmissão
- ▶ Distribuição
- ▶ Armazenagem
- ▶ Transformação
- ▶ Processamento

da **energia** e **informação**, aplicações práticas de **fenômenos eletromagnéticos**.

1.1 Alguns cientistas importantes

- ▶ Ørsted (1820): observou que quando a agulha de uma bússola é colocada próxima de uma corrente, essa agulha é desviada de sua posição (**relação entre o magnetismo e a eletricidade**). Essa observação deu início ao Eletromagnetismo.



1.1 Alguns cientistas importantes

- **Faraday (1831):** Lei da indução eletromagnética, que é o efeito da produção da corrente elétrica em um circuito sob efeito de um campo magnético variável ou por um circuito em movimento em um campo magnético constante.



1.1 Alguns cientistas importantes

- ▶ **Henry (1830)**: indução eletromagnética e indutância mútua.



- ▶ **Siemens (1850)**: desenvolvimento do **telégrafo**, criador e fundador da Siemens.



1.1 Alguns cientistas importantes

- ▶ **Maxwell (1861):** **Leis de Maxwell**, que une eletricidade e magnetismo. Juntou a Lei de Ampère, de Gauss e de indução de Faraday.



1.1 Alguns cientistas importantes

- ▶ **Hertz (1888):** radiação eletromagnética. Criou um aparelho que emitia ondas de rádio. Verificou experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas imaginadas por Maxwell.



1.1 Alguns cientistas importantes

- **Padre Landell de Moura (1894):** transmissão de rádio. Realizou antes de Marconi as primeiras transmissões radiofônicas da história. Invento cobria 8 Km que ia da Av. Paulista à Santana.



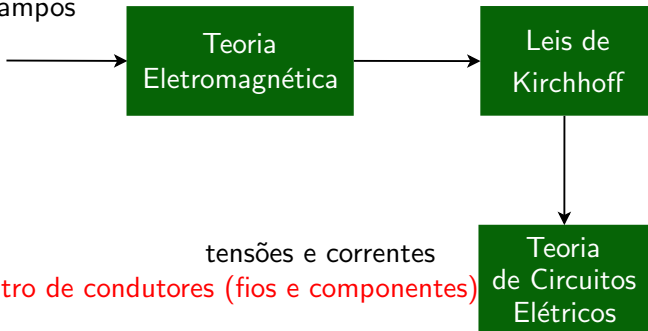
1.1 Alguns cientistas importantes

- ▶ **Marconi (1901)**: patenteou o transmissor de ondas de rádio. Seu experimento cobriu uma distância menor que a distância do experimento do padre brasileiro.



1.2 Validade da teoria de Circuitos Elétricos

interação entre
campos



1.2 Eletromagnetismo × Circuitos

Teoria clássica de Eletromag	Teoria clássica de Circuitos
-------------------------------------	-------------------------------------

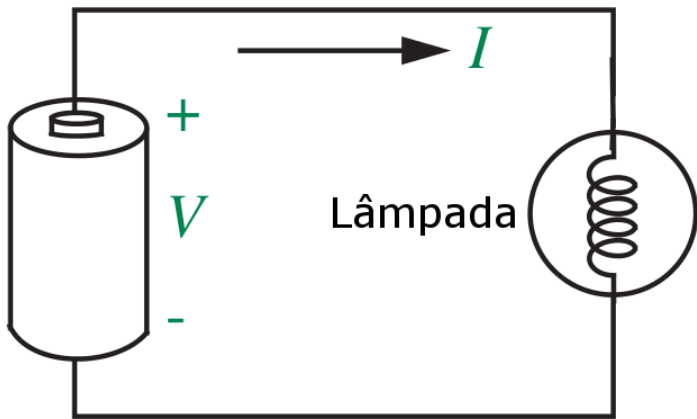
Equações de Maxwell	Leis de Kirchhoff
---------------------	-------------------

Leis que relacionam campos elétricos e magnéticos	Relações entre tensões e correntes em elementos ideais (R,L,C)
--	---

Grandezas vetoriais	Grandezas escalares
---------------------	---------------------

Métodos de solução complicados que exigem aproximações	Métodos de solução bem estabelecidos
---	---

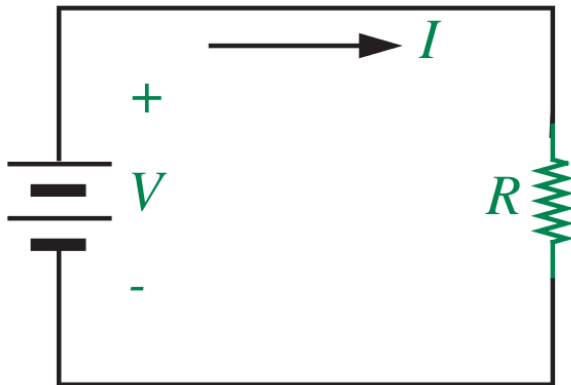
1.2 Abstração em Circuitos Elétricos - Lâmpada



1.2 Abstração em Circuitos Elétricos - Lâmpada

- ▶ Quando a lâmpada é ligada a uma bateria com um par de cabos, a luz se acende
- ▶ Suponha que estamos interessados em saber o valor da corrente elétrica que passa pelos cabos
- ▶ Poderíamos usar as Leis de Maxwell e calcular a corrente a partir de uma análise cuidadosa das propriedades da lâmpada, da bateria e dos cabos
- ▶ Esse caminho é muito complicado
- ▶ Será que poderíamos substituir a lâmpada por um elemento mais simples, por exemplo, por um resistor de resistência R ?
- ▶ Usando a Lei de Ohm, temos $I = V/R$

1.2 Abstração em Circuitos Elétricos - Modelo



- Um **circuito elétrico** é um **modelo matemático** que descreve aproximadamente o comportamento de um **sistema elétrico real**.

1.2 Validade da teoria de Circuitos Elétricos

A teoria de **circuitos elétricos** vale sempre?

- ▶ Ela só pode ser aplicada a sistemas elétricos cuja maior dimensão seja muito inferior a $\lambda_m/4$, em que
- ▶ λ_m é o comprimento de onda no vácuo da onda eletromagnética de maior frequência (f) a ser considerada no sistema.
- ▶ Lembrar que

$$c = \lambda_m \cdot f$$

em que $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo

Em outras palavras,

- ▶ sinais elétricos se propagam com velocidade da luz e
- ▶ se o sistema for suficientemente pequeno em termos físicos, os sinais elétricos o percorrem com tanta rapidez que podemos considerar todos os pontos simultaneamente (**sistema de parâmetros concentrados**).

1.2 Exemplo 1

- ▶ Microprocessador MIPS (*Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages*) – 1984

frequência 20 MHz; chip com dimensão de 1 cm de lado

$$\frac{\lambda_m}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 20 \times 10^6} = 375 \text{ cm}$$

$$1 \text{ cm} \ll 375 \text{ cm}$$

Vale a teoria de Circuitos Elétricos!

1.2 Exemplo 2

► Pentium II – 1998

frequência 400 MHz; chip com dimensão de 1 cm de lado

$$\frac{\lambda_m}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 400 \times 10^6} = 18,75 \text{ cm}$$

$$1 \text{ cm} \ll 18,75 \text{ cm}$$

Vale a teoria de Circuitos Elétricos!

1.2 Exemplo 3

► Pentium IV – 2004

frequência 3,4 GHz; chip com dimensão de 1 cm de lado

$$\frac{\lambda_m}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 3,4 \times 10^9} = 2,20 \text{ cm}$$

1 cm não é muito menor que 2,20 cm

Não vale a teoria de Circuitos Elétricos! Devemos usar o modelo de sistemas distribuídos, baseados em linhas de transmissão ou guias de onda!

1.2 Exemplo 4

► Intel i7 - 5ª geração – 2015

frequência 2,9 GHz; chip com dimensão de 20 mm de lado

$$\frac{\lambda_m}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2,9 \times 10^9} = 25,9 \text{ mm}$$

20 mm não é muito menor que 25,9 mm

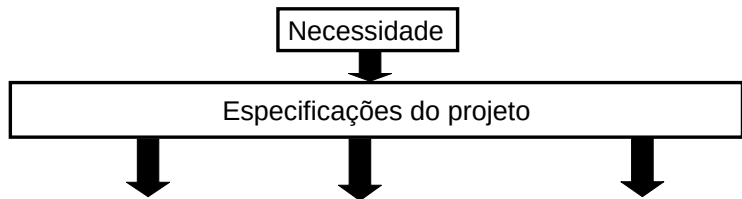
Não vale a teoria de Circuitos Elétricos! Devemos usar o modelo de sistemas distribuídos, baseados em linhas de transmissão ou guias de onda!

1.3 Projeto em Circuitos Elétricos

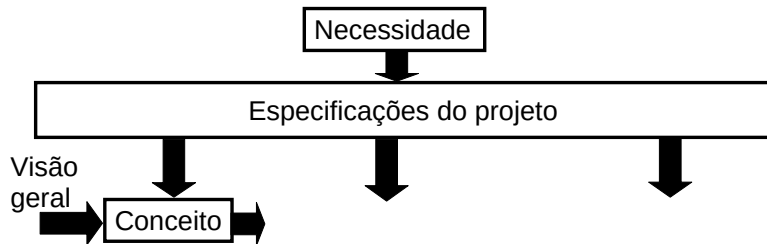
Necessidade



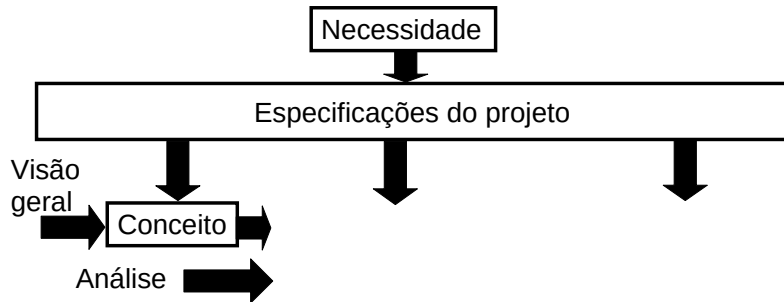
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



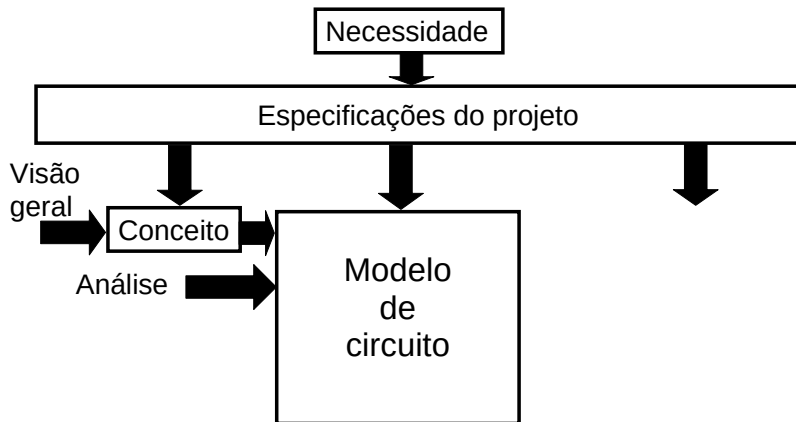
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



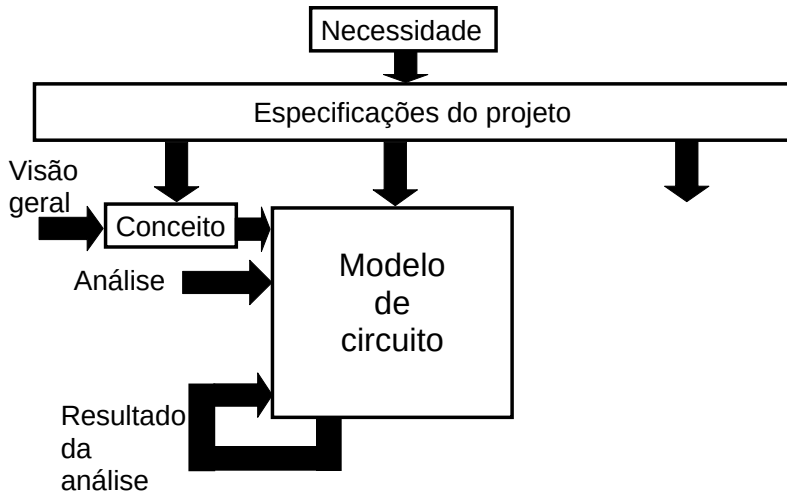
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



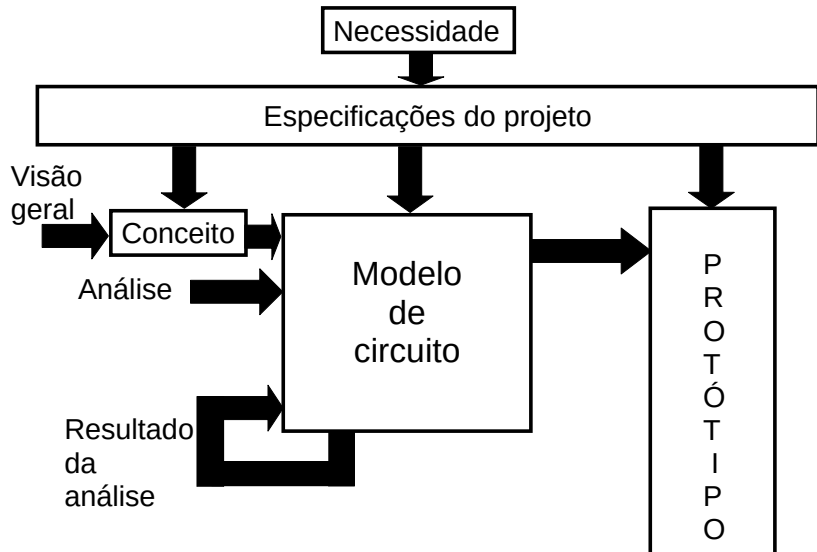
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



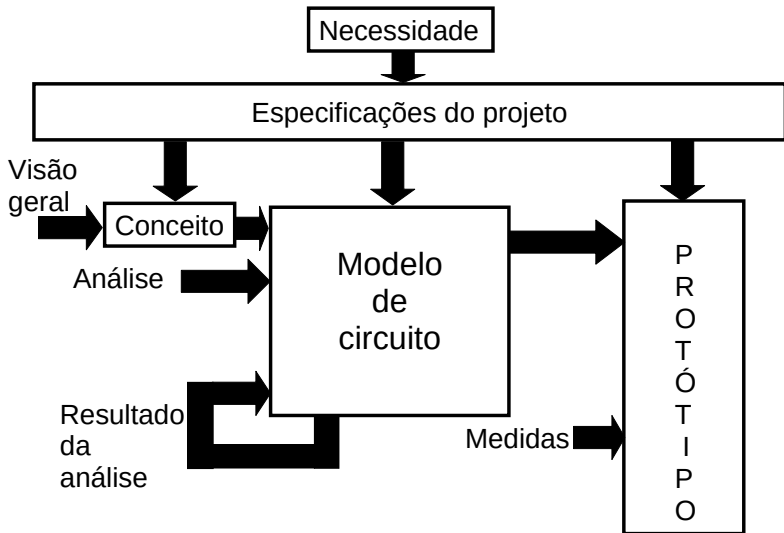
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



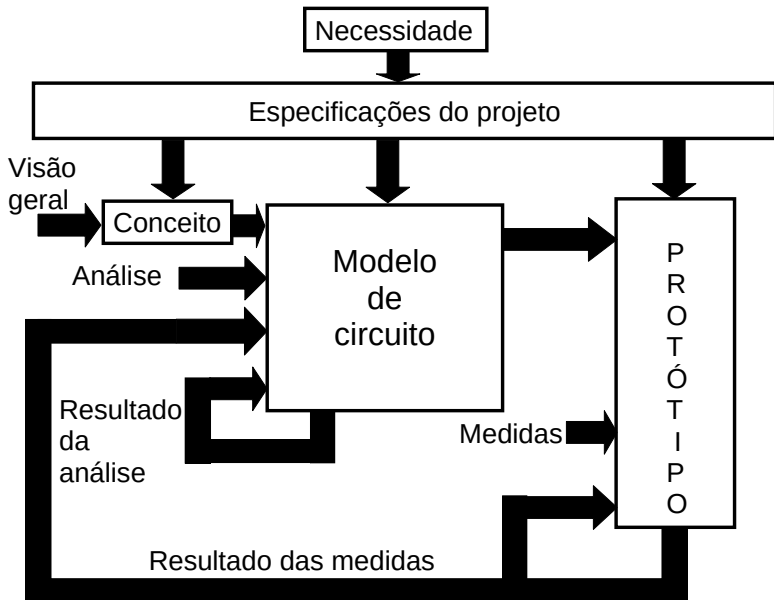
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



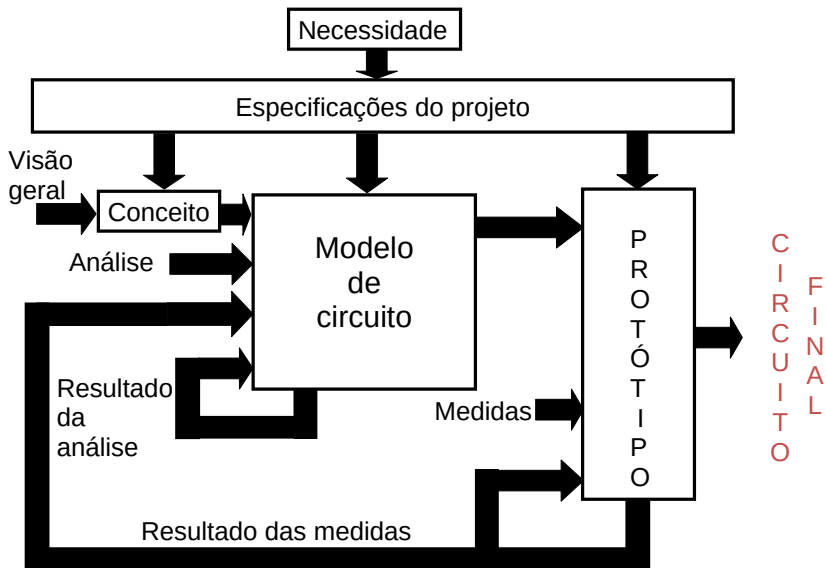
1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



1.3 Projeto em Circuitos Elétricos



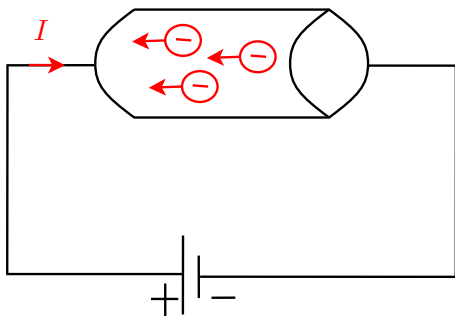
1.4 Carga

Carga elétrica é a grandeza mais básica em circuitos elétricos. É a propriedade elétrica das partículas atômicas que compõem a matéria, medida em coulombs (C).

Observações:

- ▶ **É conservativa**: não se pode criar ou destruir carga, apenas transferi-la.
- ▶ **É quantizada**: são múltiplas de $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ **O coulomb é uma unidade muito grande de cargas**: em 1 C existem $6,24 \times 10^{18}$ elétrons
- ▶ **É bipolar**: cargas negativas e positivas
- ▶ **é móvel ou fixa**
- ▶ **a quantidade e mobilidade das cargas caracterizam o material**: condutores, semicondutores e isolantes

1.4 Corrente elétrica



- ▶ Quando um fio condutor é conectado a uma bateria, as cargas são colocadas em movimento.
- ▶ Cargas positivas se movem em uma direção e as negativas vão para direção oposta.
- ▶ Esse movimento de cargas cria uma **corrente elétrica**.
- ▶ Convencionou-se o fluxo de corrente como sendo o sentido do movimento das cargas positivas (Benjamim Franklin)

1.4 Corrente elétrica

Corrente elétrica é taxa de variação da carga em relação ao tempo e é medida em ampéres (A).

valor médio: $i_m(t) = \frac{\Delta q(t)}{\Delta t}$

$\Delta q(t)$: carga total que atravessou a seção transversal de um condutor durante o intervalo de tempo $\Delta t = t - t_0$

valor instantâneo: $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$

A definição de corrente exigiu a prévia definição de um sentido de referência (indicado por uma flecha ao lado do condutor).

1.4 Corrente elétrica



$+ Q_1$

$- Q_2$



Sentido de Referência



$+ Q_3$

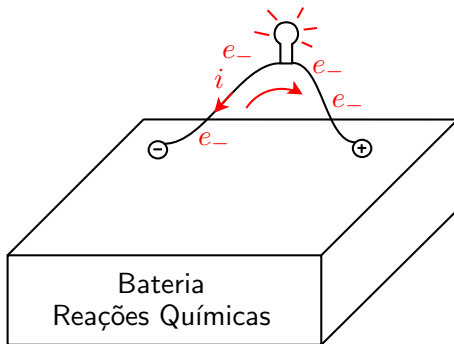
$- Q_4$

$$i_m = \frac{+Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4}{\Delta t}$$

1.4 Corrente elétrica – Exercício

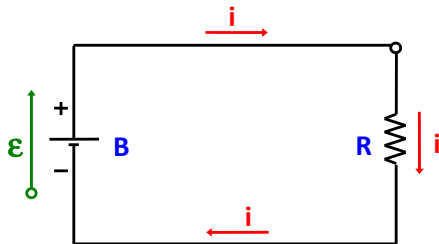
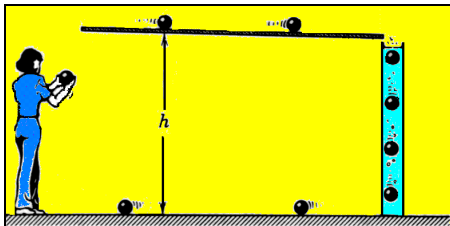
Por meio de um dispositivo semicondutor em regime estacionário, passam por segundo 3×10^{18} partículas com cargas positivas igual a $1,6 \times 10^{-19}$ C da direita para esquerda e 5×10^{17} elétrons da esquerda para direita. Qual o módulo da corrente medida por um miliamperímetro ligado em série com esse dispositivo?

1.4 Tensão elétrica



- ▶ Para que uma carga se desloque num determinado sentido, é necessário uma transferência de energia
- ▶ Se conectarmos dois terminais por meio de um condutor, os elétrons terão energia suficiente para alcançar o terminal positivo para o qual são atraídos, superando colisões com íons e repulsão com outros elétrons do condutor.

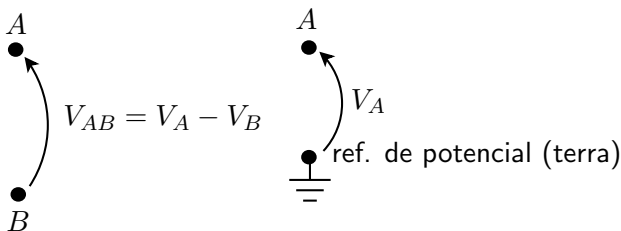
1.4 Tensão elétrica



1.4 Tensão elétrica

Tensão elétrica é a razão entre a energia (trabalho) necessária para separar cargas positivas de cargas negativas (J) pela quantidade de carga a ser separada (C)

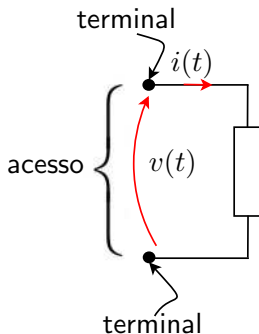
$$v(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (\text{volts})$$



Se V_{AB} for positiva, o terminal A está a um potencial mais elevado que o terminal B .

1.4 Bipolos eléctricos

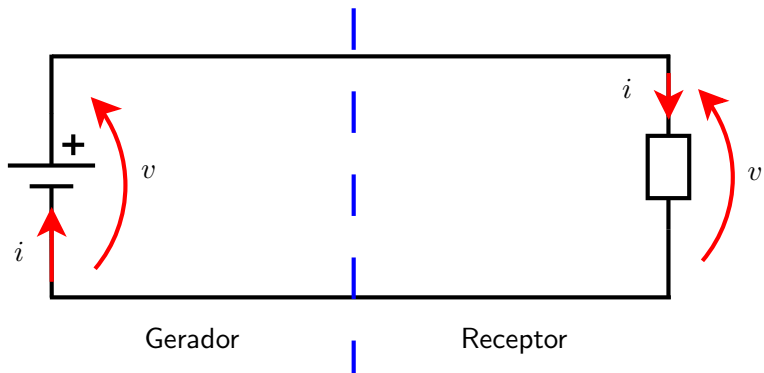
Dispositivo com dois terminais acessíveis através do qual pode circular corrente eléctrica.



Exemplos

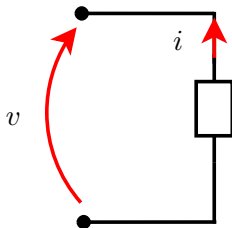


1.4 Convenções no bipolo

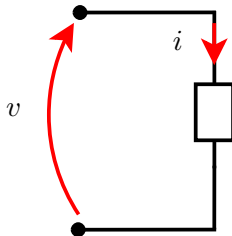


1.4 Convenções no bipolo

- Convenção do gerador



- Convenção do receptor



1.4 Potência elétrica

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (\text{watts})$$

Como

$$dw(t) = v(t) \underbrace{dq(t)}_{i(t)dt},$$

então

$$p(t) = \frac{v(t)dq(t)}{dt} = \frac{v(t)i(t)dt}{dt} = v(t)i(t) \quad (\text{watts})$$

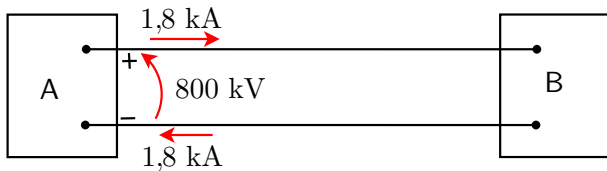
1.4 Potência elétrica e convenções

Para saber se a potência está sendo **recebida** ou **fornecida**, é preciso fixar convenções:

Convenção	Produto $v \cdot i$	Bipolo fornece ou recebe?
Gerador	$v \cdot i > 0$	fornece
Receptor	$v \cdot i > 0$	recebe

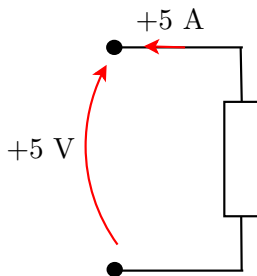
Exercício:

Uma linha de transmissão de corrente contínua de alta tensão entre as cidades A e B opera com uma tensão de 800 kV e uma corrente de 1800 A. Calcule a potência (em MW) na cidade A e indique o fluxo de potência.



1.4 Potência elétrica e convenções - Exercícios

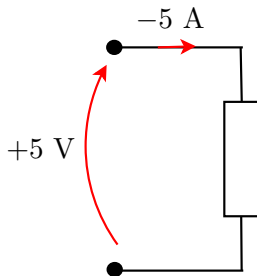
Para o bipolo abaixo determine o valor da potência e se essa potência está sendo recebida ou fornecida



- ▶ Convenção do gerador
- ▶ $p = 5(5) = 25\text{ W} > 0$
- ▶ O bipolo fornece 25 W de potência.

1.4 Potência elétrica e convenções - Exercícios

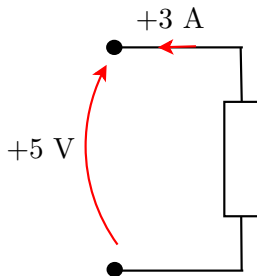
Para o bipolo abaixo determine o valor da potência e se essa potência está sendo recebida ou fornecida



- ▶ Convenção do receptor
- ▶ $p = 5(-5) = -25\text{ W} < 0$
- ▶ O bipolo fornece 25 W de potência.

1.4 Potência elétrica e convenções - Exercícios

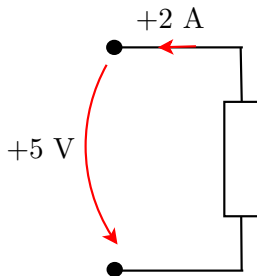
Para o bipolo abaixo determine o valor da potência e se essa potência está sendo recebida ou fornecida



- ▶ Convenção do gerador
- ▶ $p = 5(3) = 15\text{ W} > 0$
- ▶ O bipolo fornece 15 W de potência.

1.4 Potência elétrica e convenções - Exercícios

Para o bipolo abaixo determine o valor da potência e se essa potência está sendo recebida ou fornecida



- ▶ Convenção do receptor
- ▶ $p = 5(2) = 10\text{ W} > 0$
- ▶ O bipolo recebe 10 W de potência.

1.4 Energia elétrica

Lembrando que $p(t)dt = dw$, a energia recebida ou fornecida por um bipolo no intervalo de tempo $[t_0, t]$ vale

$$w = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t v(\tau) i(\tau) d\tau \quad (\text{joules})$$

Unidade prática: quilowatt-hora (kWh) [$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$]

Exercício:

Deseja-se decidir qual bateria usar em um projeto de celular em termos de energia armazenada. Dispõe-se das seguintes baterias:

(i) níquel cádmio (NiCd) de 6 V e 950 mA-h e (ii) de íons-lítio (Li-Ion) de 7,2 V e 900 mA-h. Qual delas armazena mais energia?