

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

# **Licenciatura em Engenharia de Telecomunicações e Informática**

**UC de Electrónica Geral**

Departamento de Electrónica Industrial

*Júlio Martins, Joana Figueiredo, Nuno Ribeiro*

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Escolaridade: 2T + 2PL

## ■ Avaliação

- Serão feitos 2 testes ao longo do semestre (para além do Exame de Recurso) com igual peso ( $\pm 10\%$ ) na classificação final
- Os testes são eletrónicos (efetuados via Blackboard): o exame de Recurso é do tipo convencional
- A nota mínima em cada teste é 6,5 val.
- A classificação da componente laboratorial da UC terá como base a informação obtida nas aulas, que será de 2 tipos:
  - Dados objetivos (assiduidade/pontualidade, forma como os trabalhos são preparados, a ficha de registo de resultados, teste prático, míni-testes, ...)
  - Dados subjetivos (forma como os trabalhos são preparados, a atitude durante as aulas, ...)

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Avaliação (continuação)

- A classificação final da UC (CF) terá em conta os resultados dos testes (CT) e da componente laboratorial (CL), pesados do seguinte modo:

$$CF = (67\% \times CT) + (33\% \times CL)$$

## Notas importantes:

- A frequência de todas as aulas é obrigatória e condiciona a admissão ao exame final (presença mínima em 2/3 das aulas lecionadas)
- Para obter aprovação na UC **é necessário obter pelo menos 6,5 valores** na componente laboratorial
- O não cumprimento de alguns objetivos mínimos (devidamente explicitados no início do semestre) implicará a reprovação na UC, independentemente dos restantes elementos de avaliação

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Aulas de práticas laboratoriais

- A preparação prévia da aula prática é de extrema importância para o funcionamento correto da UC.
  - Os trabalhos têm que ser preparados **ANTES das AULAS**. Para o feito será necessário recorrer ao simulador TINA (ou outro)
- A preparação serve para o aluno se conseguir orientar durante a aula, saber se está a fazer os exercícios corretamente e para poder discutir resultados inesperados com o professor
- Uma preparação completa deve incluir os seguintes elementos:
  - Respostas às questões teóricas presentes no guião
  - Respostas (calculadas e/ou simuladas) às questões experimentais
  - Esquema de montagem dos circuitos na *breadboard*
  - Previsão dos problemas / desafios que podem surgir durante a aula;

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Aulas de práticas laboratoriais (cont.)

- Para cada trabalho existe uma ficha técnica, um guia de montagem e uma folha de registo de resultados. **É obrigatório levar estes para a aula prática.**
- **No início de cada aula deverão ter duas folhas de registo**, uma com os registos da simulação (já preenchida) e respetivos cálculos outra onde vão fazer os registos da observação prática da correspondente à simulação que previamente fizeram.
- **No caso de algum dos dois requisitos referidos anteriormente não serem respeitados não poderão fazer a aula prática**

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Aulas de práticas laboratoriais (cont.)

- Na primeira aula de cada trabalho, poderá haver uma introdução teórica
- O material para os trabalhos é distribuído no início de cada aula
- Caso haja equipamento/componentes danificados ou avariados, o docente deve ser informado da ocorrência
- **Não serão admitidos na sala grupos sem o respectivo guia de trabalho impresso (não é permitido fazer *download* durante as aulas). Basta um guia de trabalho por grupo**

# Calendário

## ■ Datas dos testes

- 1º teste
- 2º teste

# Funcionamento da Disciplina

## ■ Elementos de estudo

- (Disponíveis no Blackboard)
- Apontamentos (parte da disciplina)
- Lista de exercícios propostos
- Cópia da apresentação (PPT) das aulas
- Bibliografia recomendada

## ■ Outros assuntos

- Importância da disciplina de Electrónica
- Requisitos: conhecimentos de
  - Eletromagnetismo
  - Análise de circuitos (CA e CC)
- Assiduidade e controlo de presenças
- Horário e local de atendimento

# Programa

## ■ Apresentação

## ■ Tópicos Preliminares

- Representação de Sinais
- Tipos e Característica de Sistemas
- (Rudimentos de Electricidade)
- (Rudimentos de Magnetismo)

## ■ Componentes Eletrónicos Básicos

- O Díodo Semicondutor
- O Transístor Bipolar
- Transístores de Efeito de Campo (FET's)
- Outros Componentes Básicos

# Programa

## ■ Transdutores?

- Introdução; Características de Transdutores
- Alguns Transdutores Típicos Princípios de Funcionamento e suas Especificações mais Importantes

## ■ Componentes de Sistemas Electrónicos

- Amplificadores
- Conversores analógico ↔ digital
- Comunicação Série / Paralelo; Multiplexers

# Bibliografia

## ■ Livros

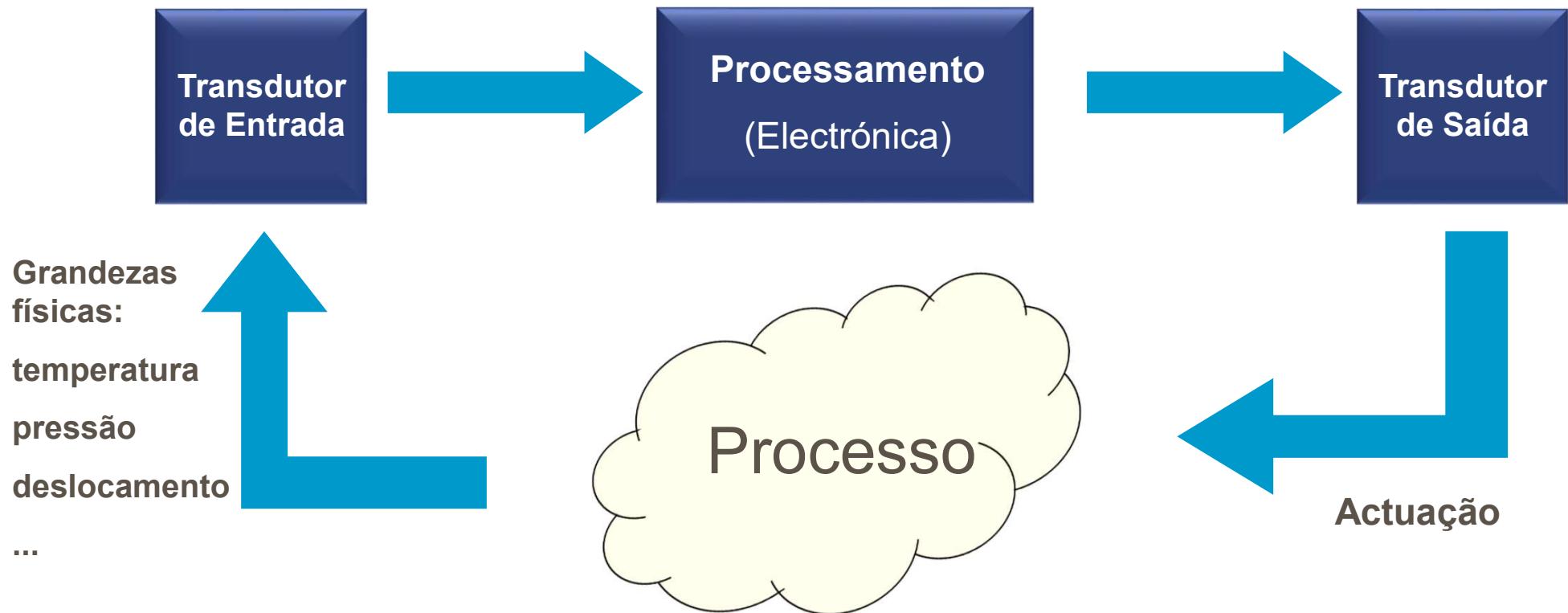
- (Apontamentos da UC.)
- Malvino, Albert Paul, Electrónica, vol.s 1 e 2, Ed. MacGraw-Hill, 2016 (8<sup>a</sup> ed.)
- Boylstead, R. L., Introductory Circuit Analysis. Pearson, 2015 (13<sup>a</sup> ed)
- Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku; Fundamentos de Circuitos Elétricos, Ed. McGraw-Hill, 2008 (3<sup>a</sup> ed.)
- Duncan, Tom, Electronics for Today and Tomorrow. John Murray, 1988.

# Bibliografia

## ■ WWW

- <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/index.html>
- <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/index.html>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- <http://www.educypedia.be/electronics/electronicaopening.htm>
- <http://www.elexp.com/links.htm>
- <http://www.electronics2000.co.uk/>
- <http://www.howstuffworks.com>
- <http://www.about.com>
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia\\_biom%C3%A9dica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia_biom%C3%A9dica)

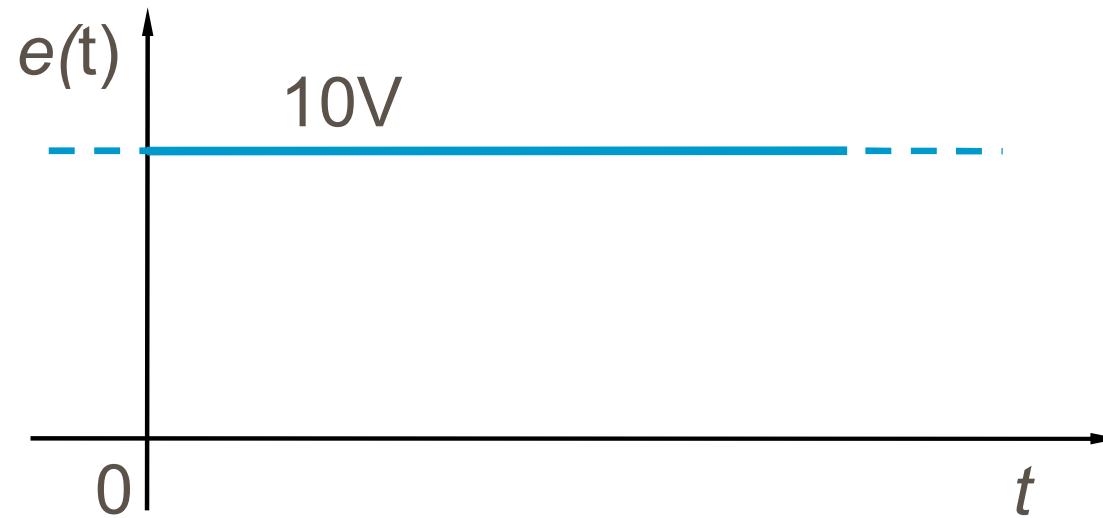
# Sistemas Electrónicos



# Tópicos Preliminares

## ■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

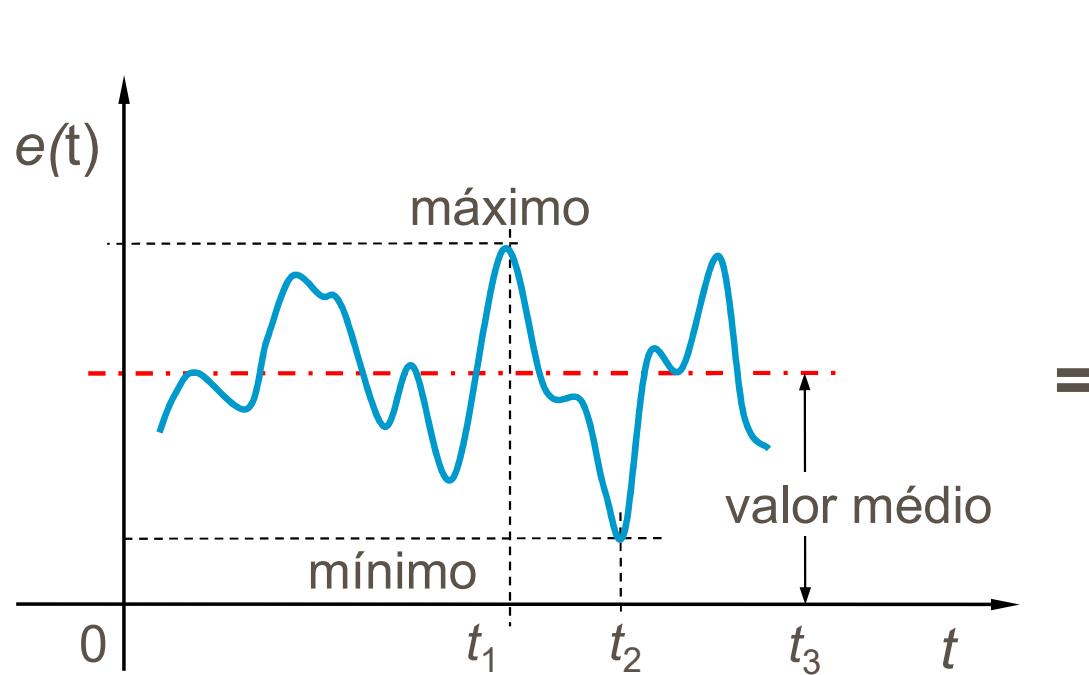
- ... os sinais eléctricos são grandezas (eléctricas) que apresentam uma determinada evolução ao longo do tempo (são função da variável tempo t)...



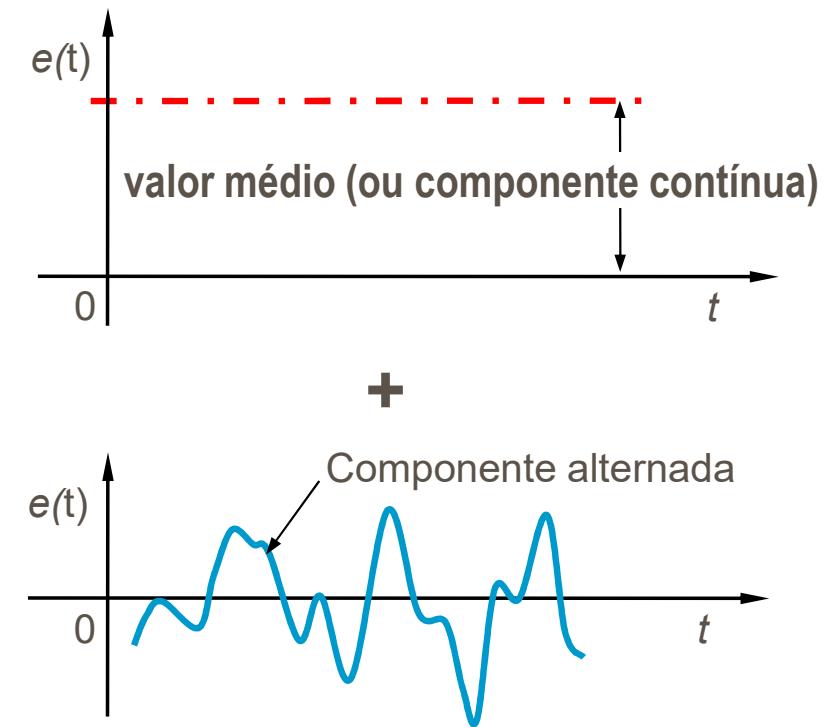
$$e(t) = 10 \text{ V}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)



=



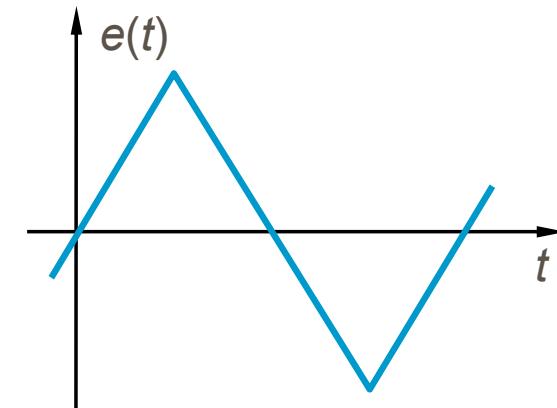
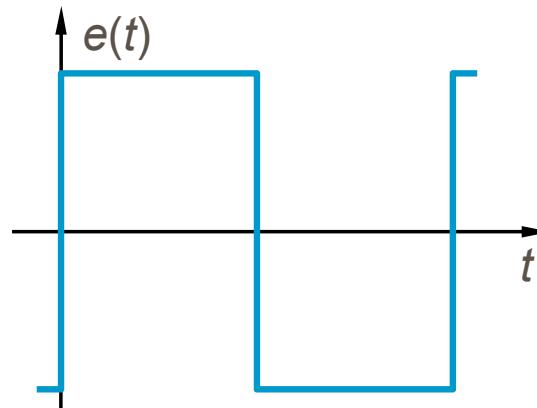
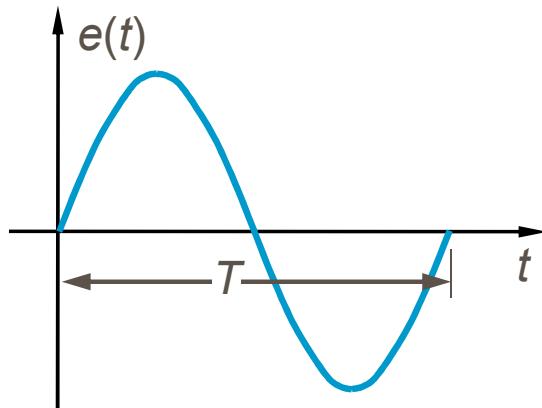
$$e(t) = \text{componente contínua} + \text{componente alternada}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

### ■ Sinais periódicos

$$e(t + T) = e(t)$$



# Tópicos Preliminares

## ■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

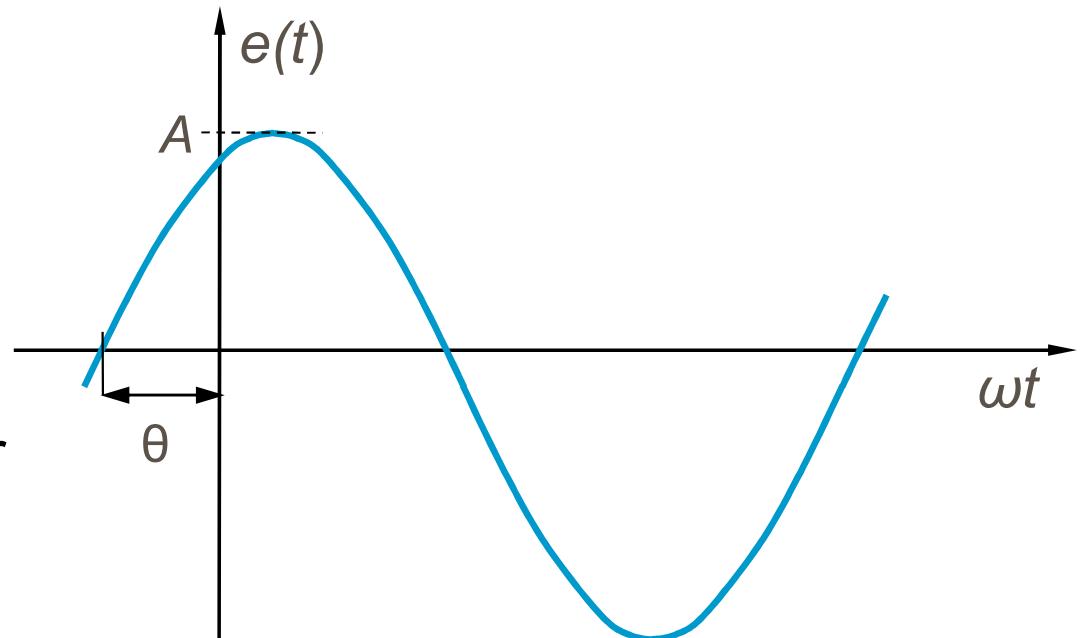
### ■ Sinais sinusoidais

$$e(t) = A \cdot \sin(\omega t + \theta)$$

$\omega = 2\pi f \rightarrow$  frequência angular

$A \rightarrow$  amplitude

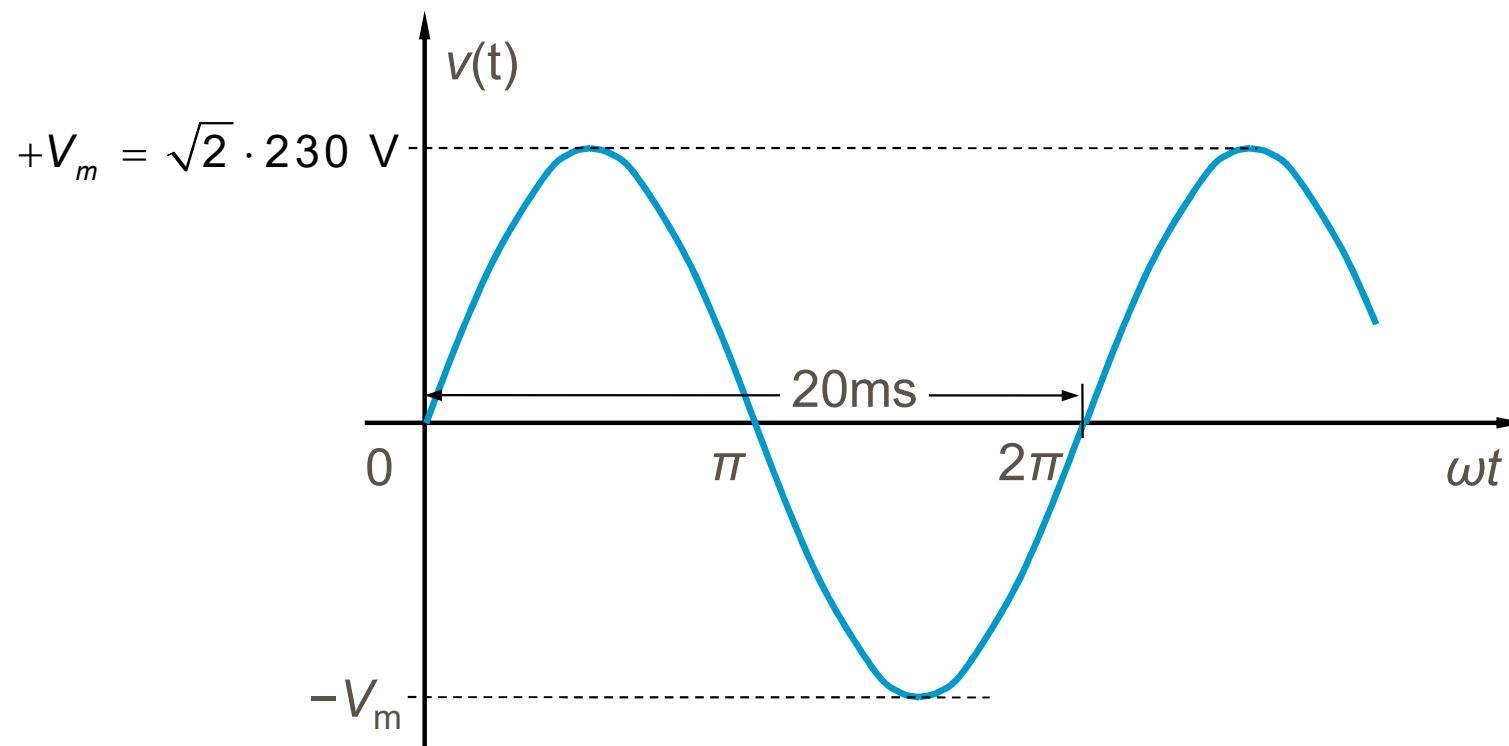
$\theta \rightarrow$  fase



# Tópicos Preliminares

## ■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

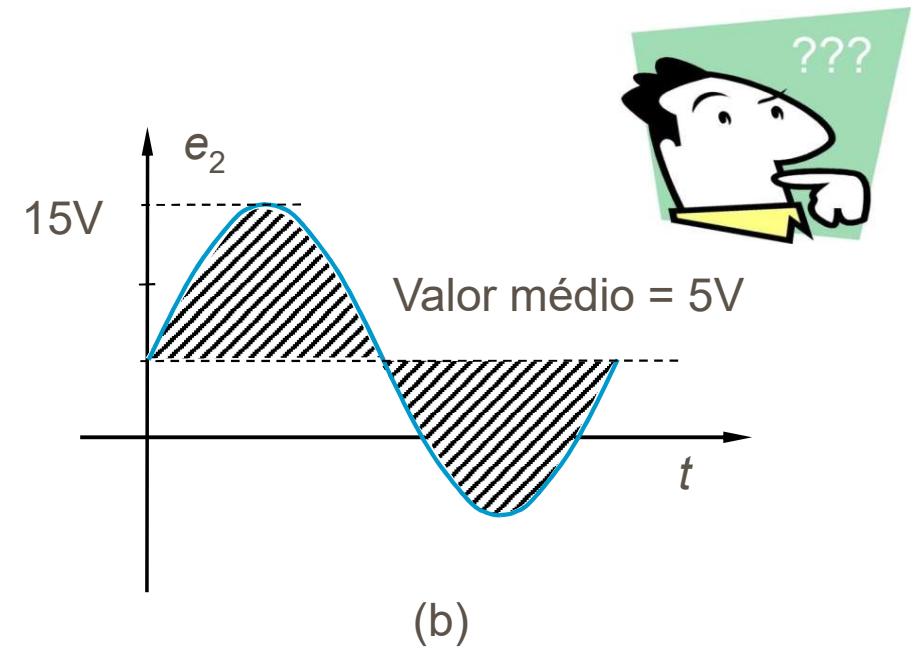
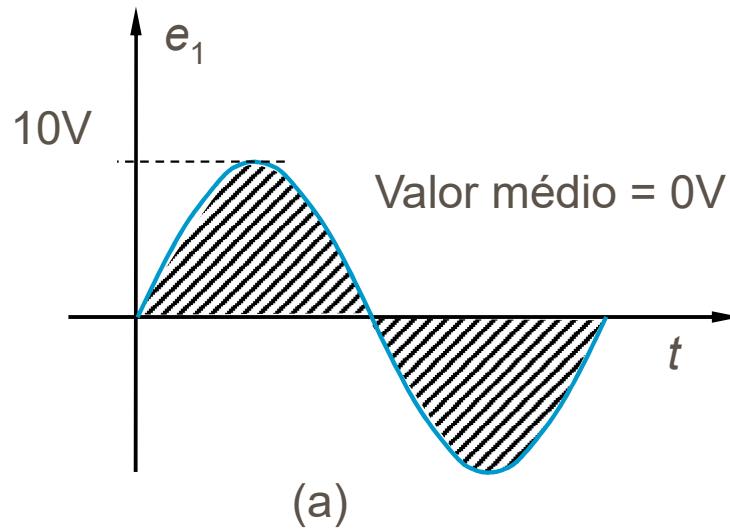
### ■ Sinais sinusoidais



Forma de onda da tensão na rede de energia eléctrica

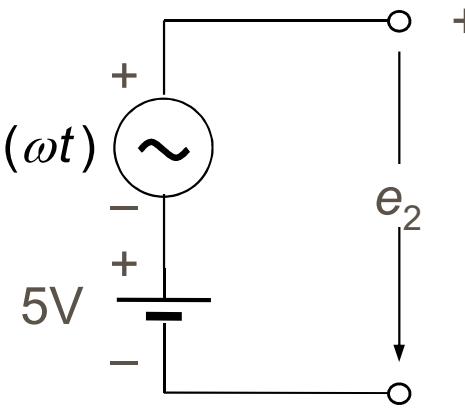
# Tópicos Preliminares

## ■ Valor Médio



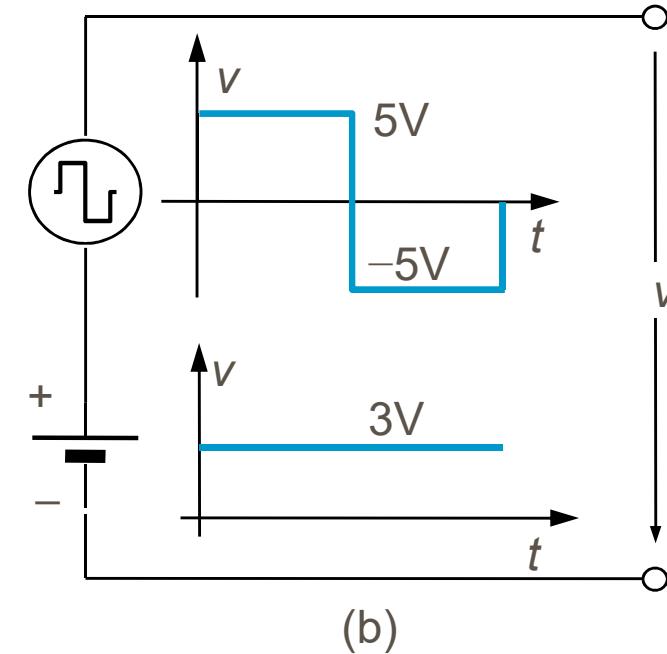
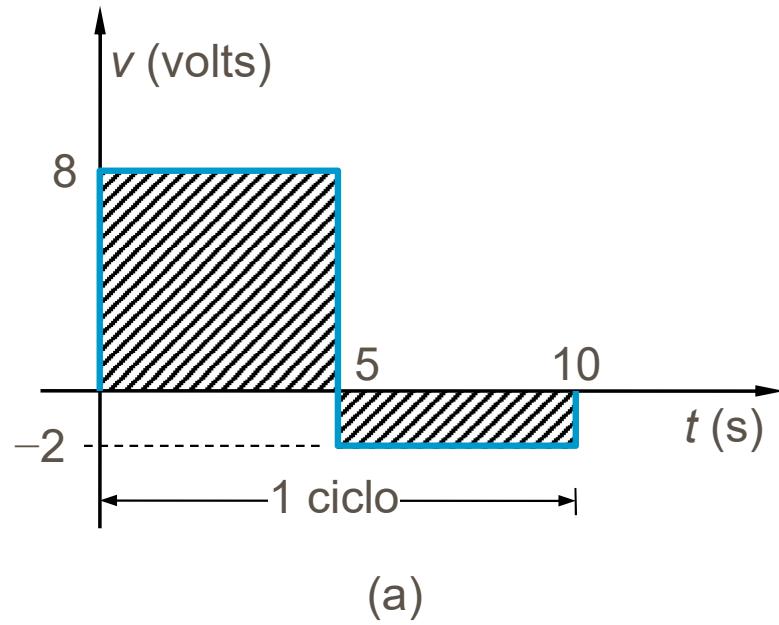
$$e_1 = 10 \operatorname{sen}(\omega t)$$

(c)



# Tópicos Preliminares

## ■ Valor Médio



$$G \text{ (valor médio)} = \frac{\text{área (soma algébrica)}}{T \text{ (período)}}$$

$$G = \frac{A_1 - A_2}{T} = \frac{(8\text{ V})(5\text{ s}) - (2\text{ V})(5\text{ s})}{10\text{ s}} = \frac{30}{10} = 3\text{ V}$$

## ■ Valor Médio (cálculo para o caso geral)

$$G = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t) dt$$

## ■ Valor Eficaz

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t)^2 dt}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Exemplo: valor eficaz da sinusóide

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t)^2 dt}$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2(wt) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\alpha A^2 \sin^2(\varphi) d\varphi}$$

$$E_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\alpha A^2 \sin^2(\varphi) d\varphi = \frac{A^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} (1 - \cos(2\alpha)) d\alpha = \frac{A^2}{4\pi} \left[ \alpha - \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right]_0^{2\pi} =$$

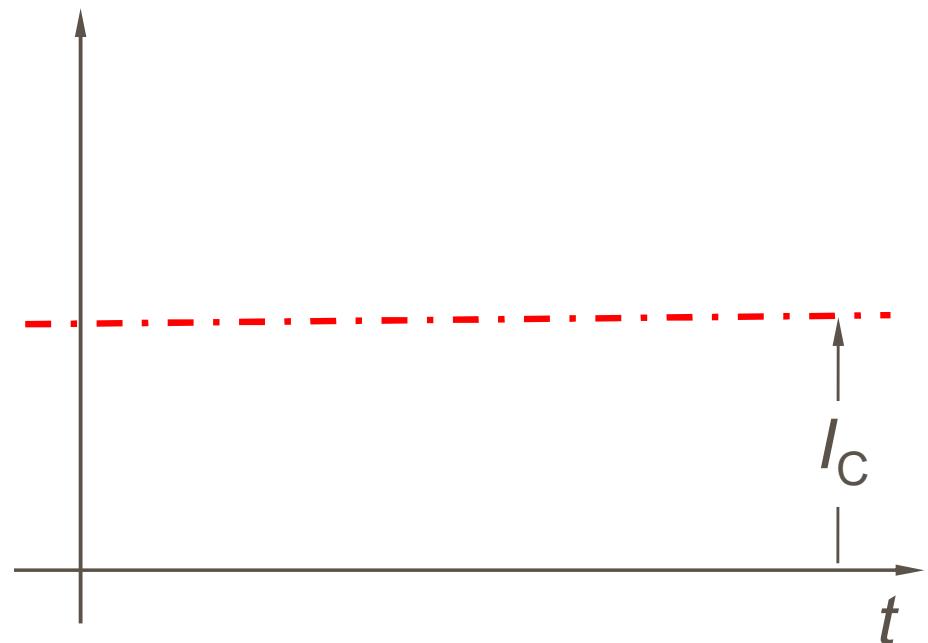
$$= \frac{A^2}{2}$$

$$\rightarrow E_{\text{eff}} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Quantidades em corrente contínua (cc):

Letras maiúsculas para a variável e para o índice ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$ )



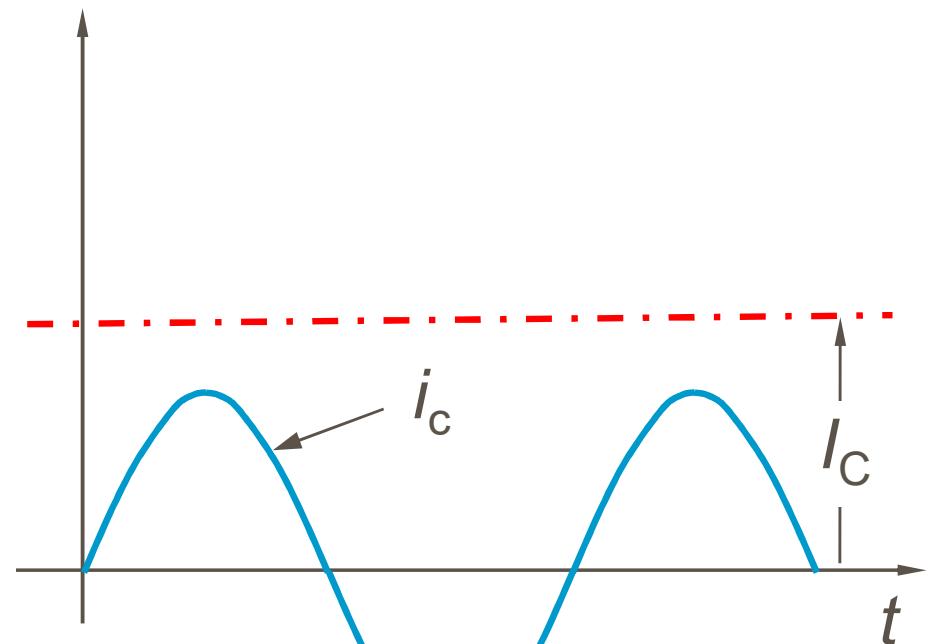
# Tópicos Preliminares

## ■ Quantidades em corrente contínua (cc):

Letras maiúsculas para a variável e para o índice ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$ )

## ■ Quantidades em corrente alternada (ca):

Letras minúsculas para a variável e para o índice ( $i_b$ ,  $i_c$ ,  $v_{ce}$ )



# Tópicos Preliminares

## ■ Quantidades em corrente contínua (cc):

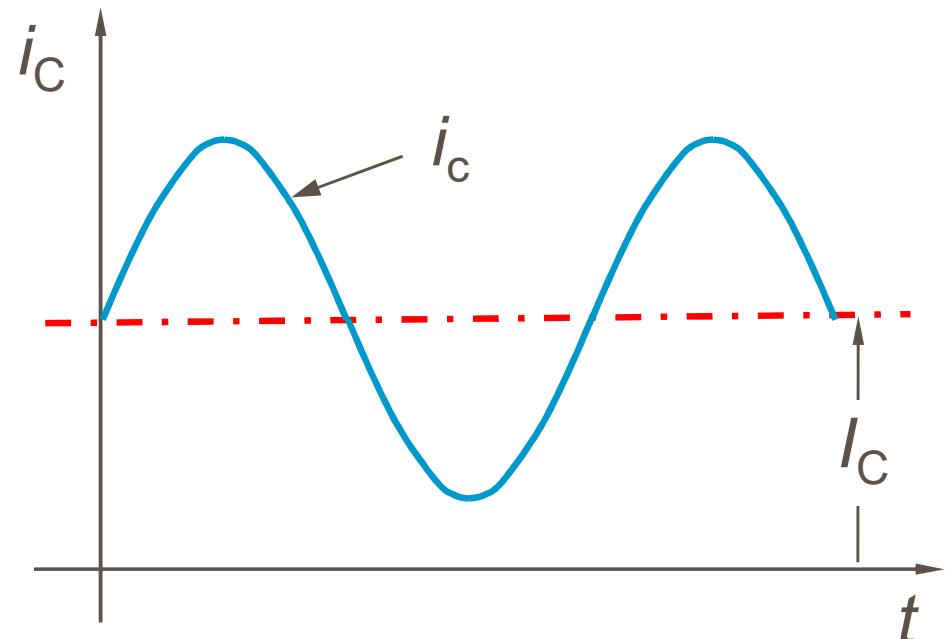
Letras maiúsculas para a variável e para o índice ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$ )

## ■ Quantidades em corrente alternada (ca):

Letras minúsculas para a variável e para o índice ( $i_b$ ,  $i_c$ ,  $v_{ce}$ )

## ■ Quantidades totais (cc + ca):

Letras minúsculas para a variável e maiúscula para o índice ( $i_B$ ,  $i_C$ ,  $v_{CE}$ )



# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier

### ■ Série de Fourier

- De acordo com a teoria desenvolvida por *Joseph Fourier* (1768 – 1830), qualquer função periódica  $f(t)$ , de período  $T$ , pode ser representada por uma série infinita da forma ...

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$



- Os coeficientes de *Fourier*  $a_0, \dots, a_n$ , e  $b_0, \dots, b_n$ , são dados por ...

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier

### ■ Série de Fourier

#### ■ Expressão alternativa:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t + \delta_n), \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$c_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$\delta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right), \quad n = 1, 2, \dots$$

#### ■ A representação gráfica da amplitude ( $c_n$ ) e da fase ( $\delta_n$ ) em função da frequência denomina-se espectro do sinal $f(t)$ (espectro de amplitudes e espectro de fases)

# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier

### ■ Série de Fourier – Exemplo (onda quadrada)

Como  $f(t)$  é uma função ímpar (o mesmo acontecendo a  $\cos(n\omega t)$ ):

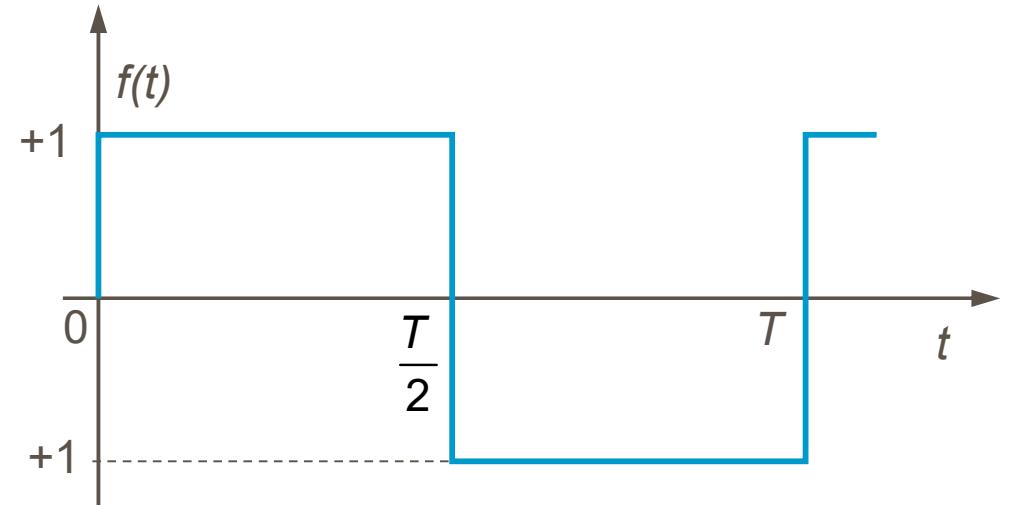
$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0 \quad n = 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left( \int_0^{T/2} \sin(n\omega t) dt - \int_{T/2}^T \sin(n\omega t) dt \right) =$$

$$= \begin{cases} \frac{4}{n\pi} & \text{para } n \text{ ímpar} \\ 0 & \text{para } n \text{ par} \end{cases}$$

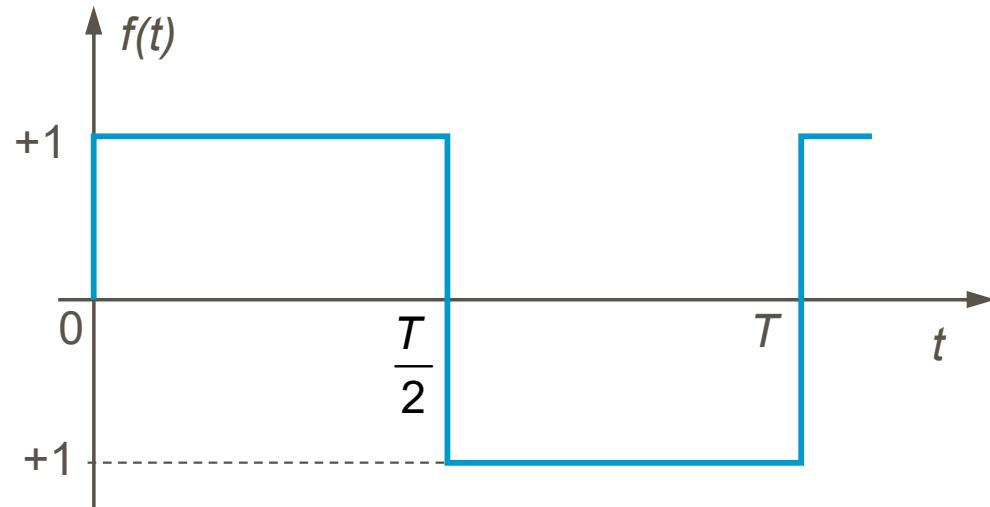
$$\rightarrow f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right)$$



$$f(t) = \begin{cases} +1, & 0 \leq t < T/2 \\ -1, & T/2 \leq t < T \end{cases}$$

# Tópicos Preliminares

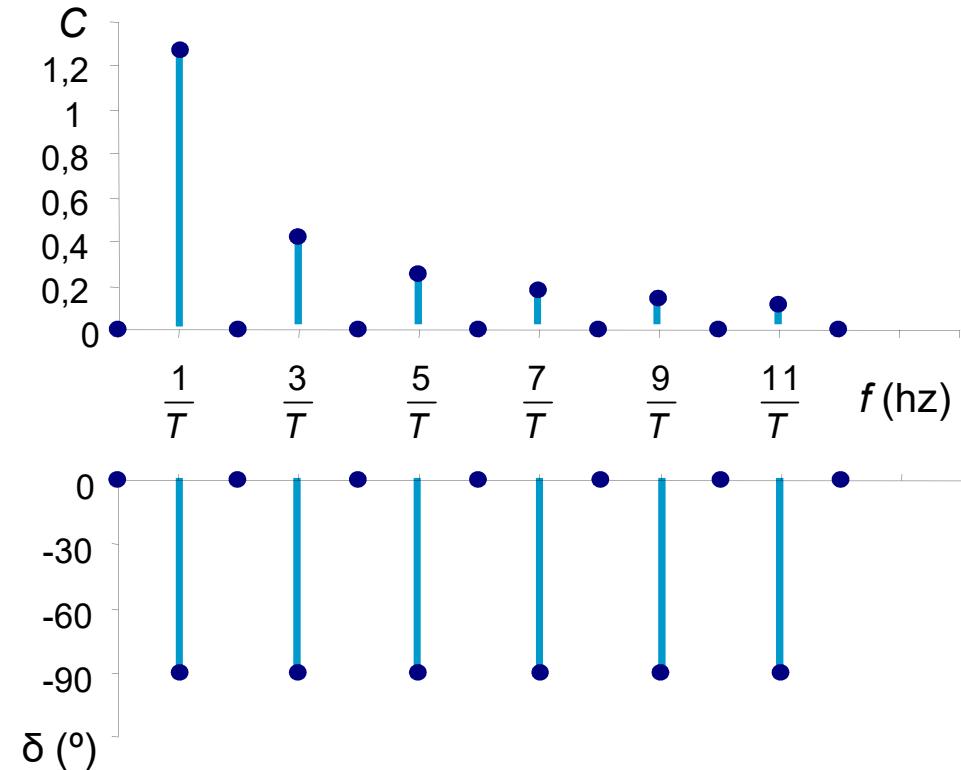
## ■ Análise de Fourier



Representação  $f(t)$  no domínio do tempo

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = b_n = \frac{4}{n\pi} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

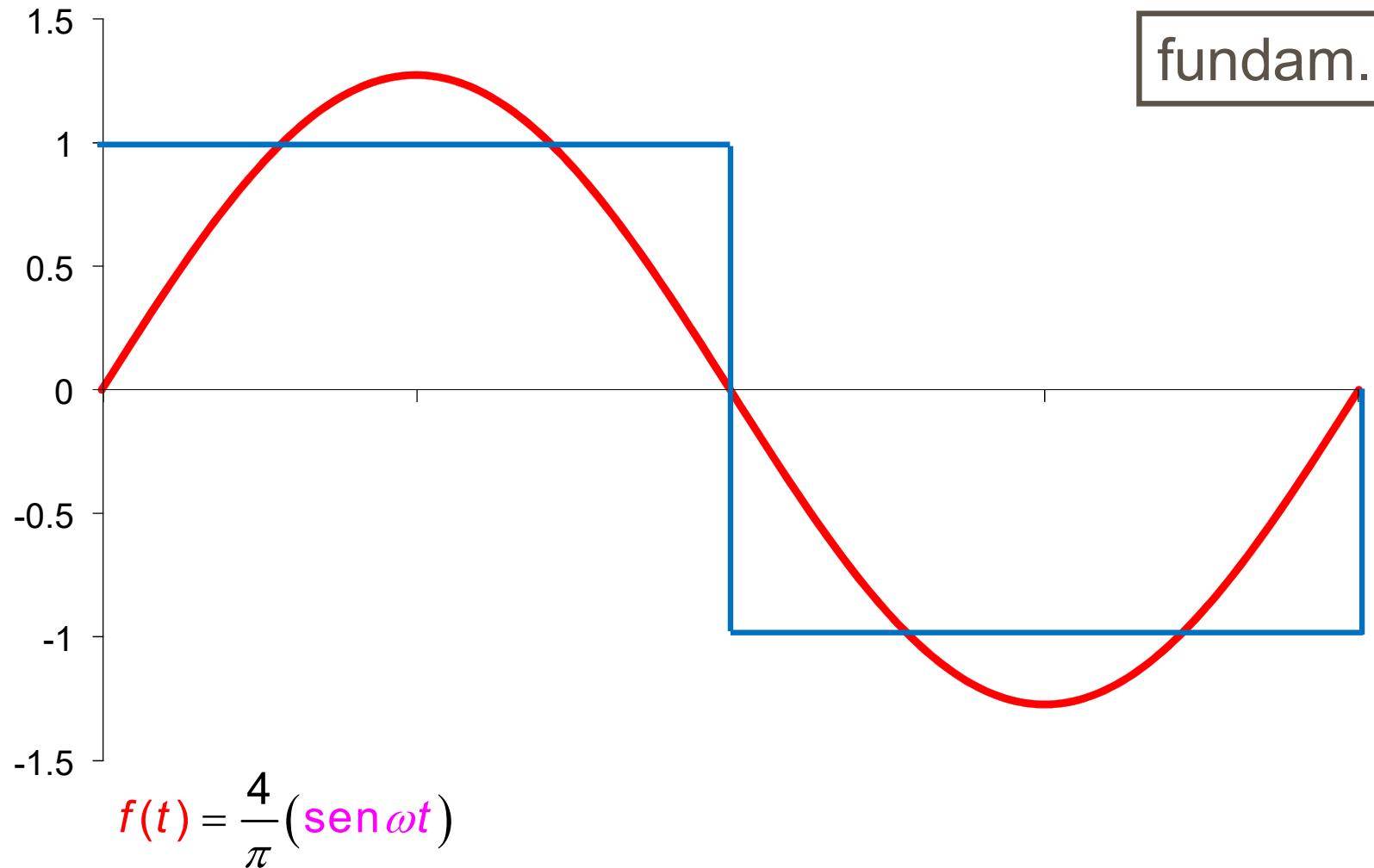
$$\delta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) = \begin{cases} -90^\circ & \text{para } n \text{ ímpar} \\ 0^\circ & \text{para } n \text{ par} \end{cases}$$



Representação  $f(t)$  no domínio da frequência:  
espectros de amplitudes (C) e de fases ( $\delta$ )

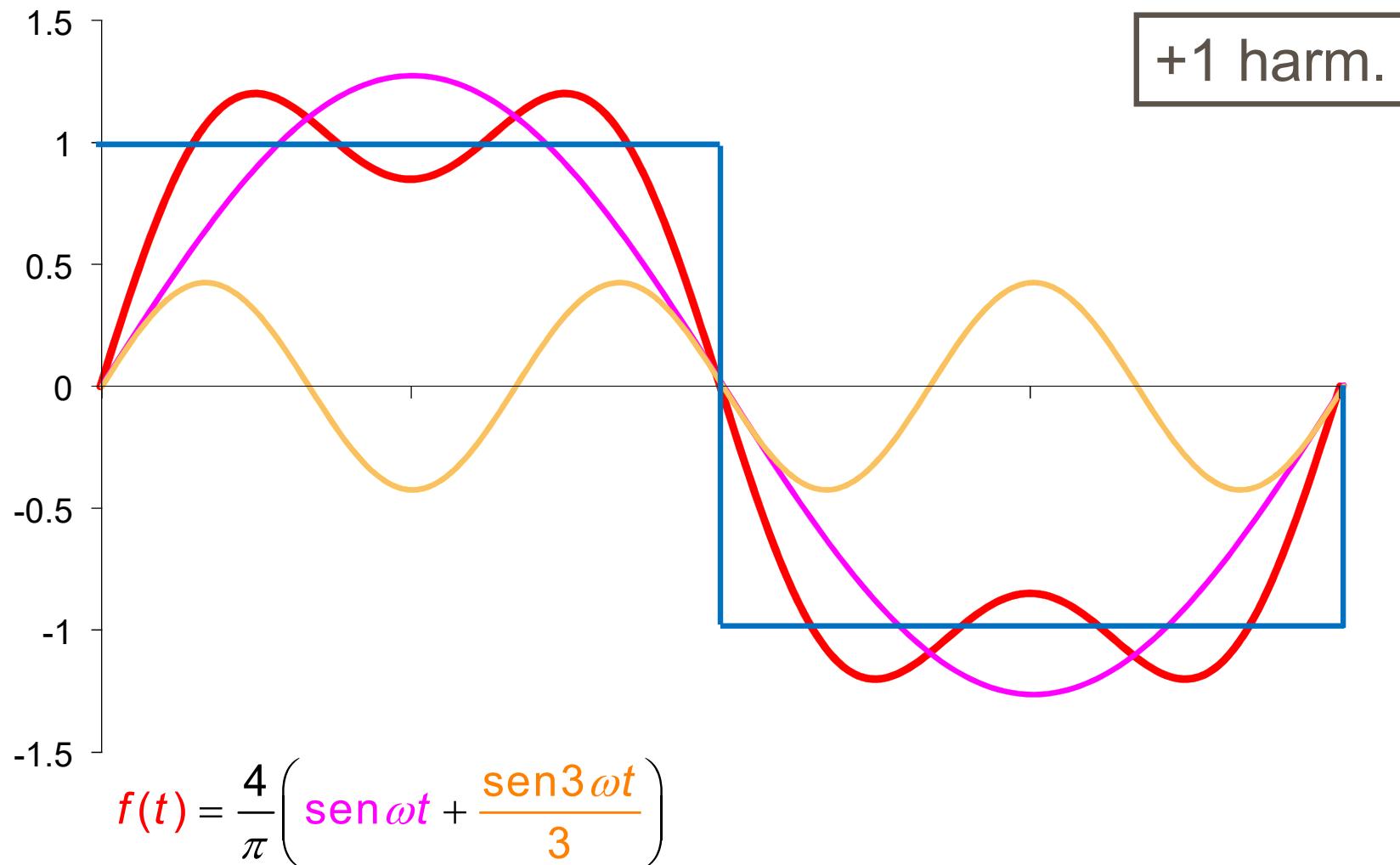
# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



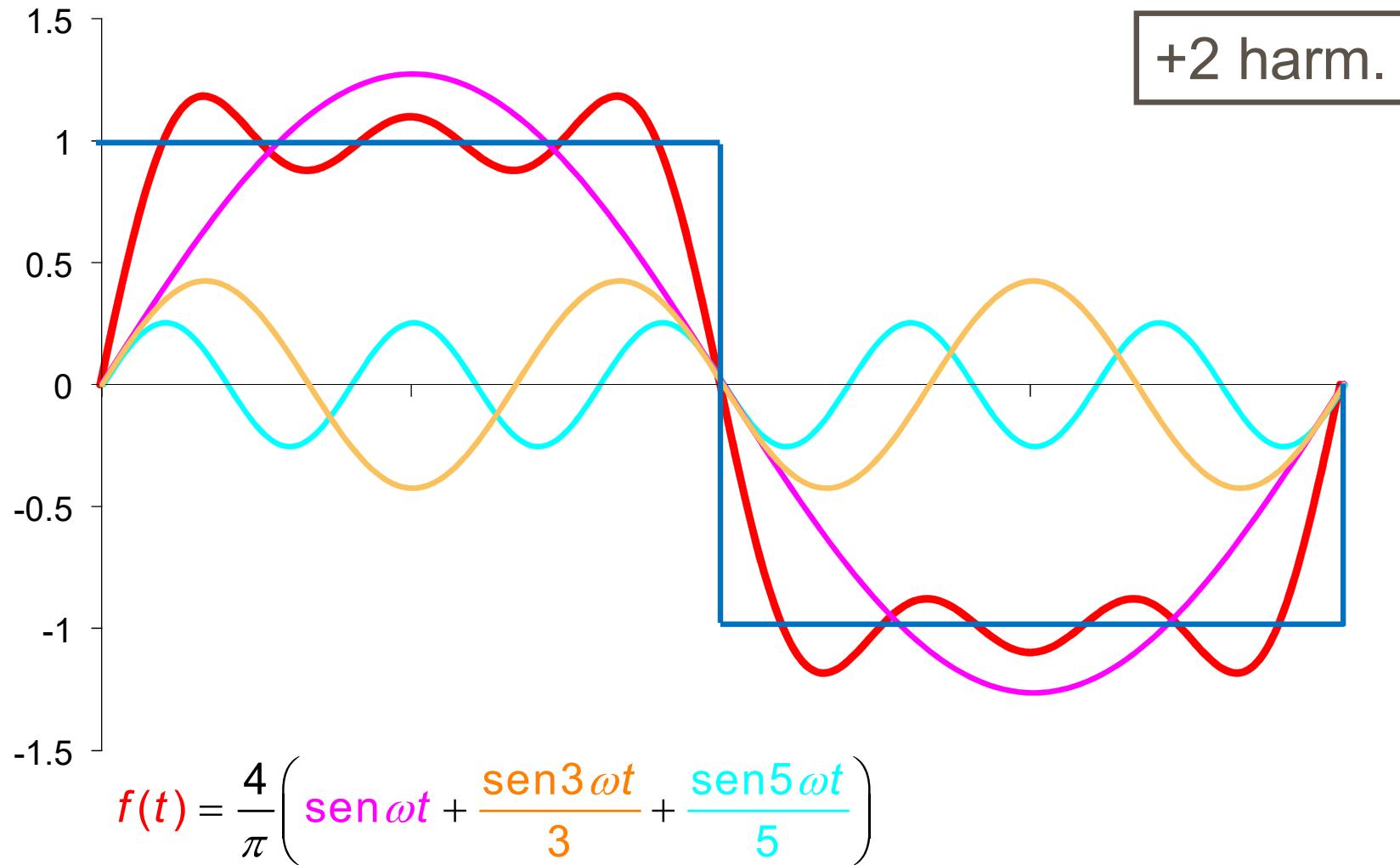
# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



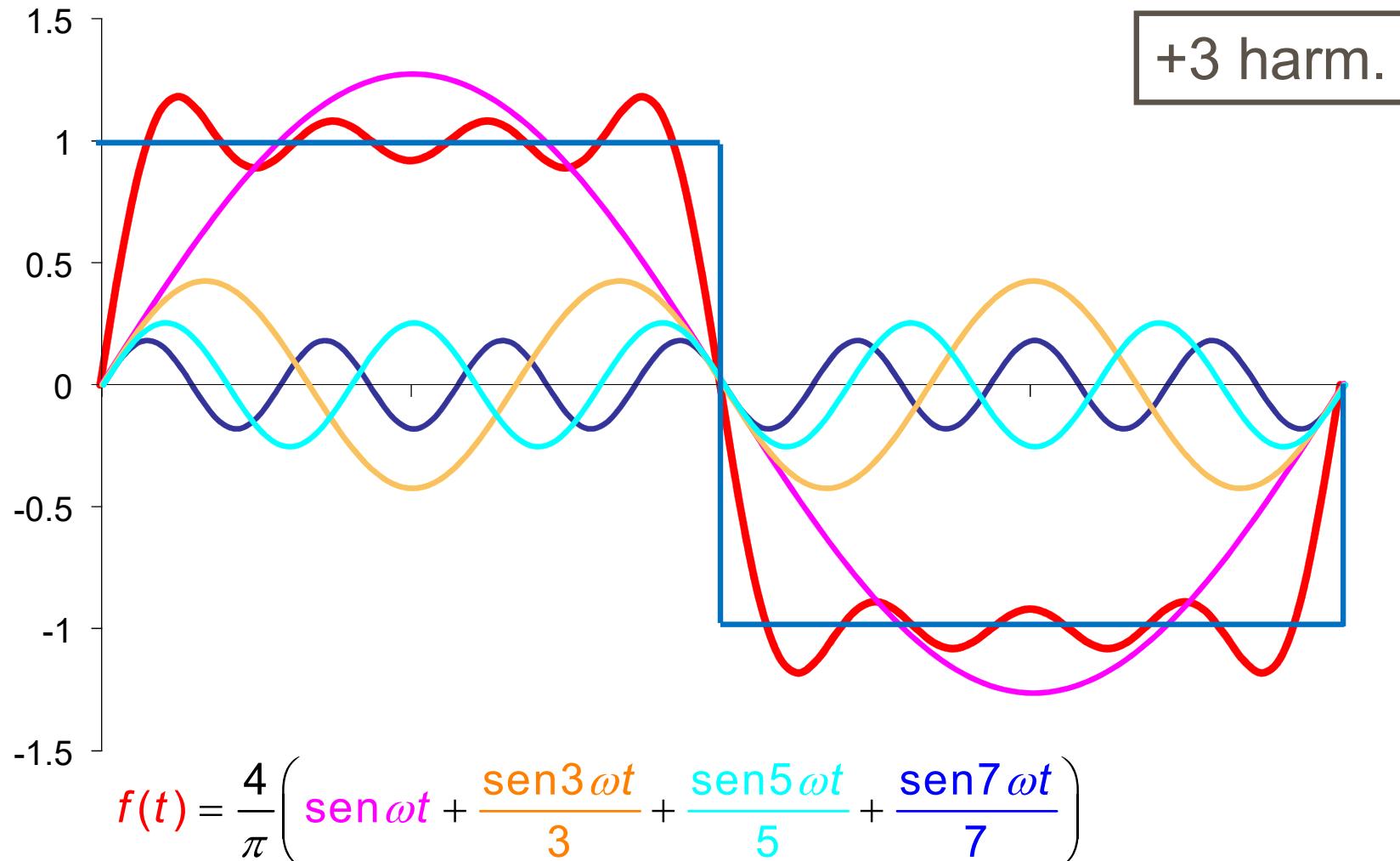
# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



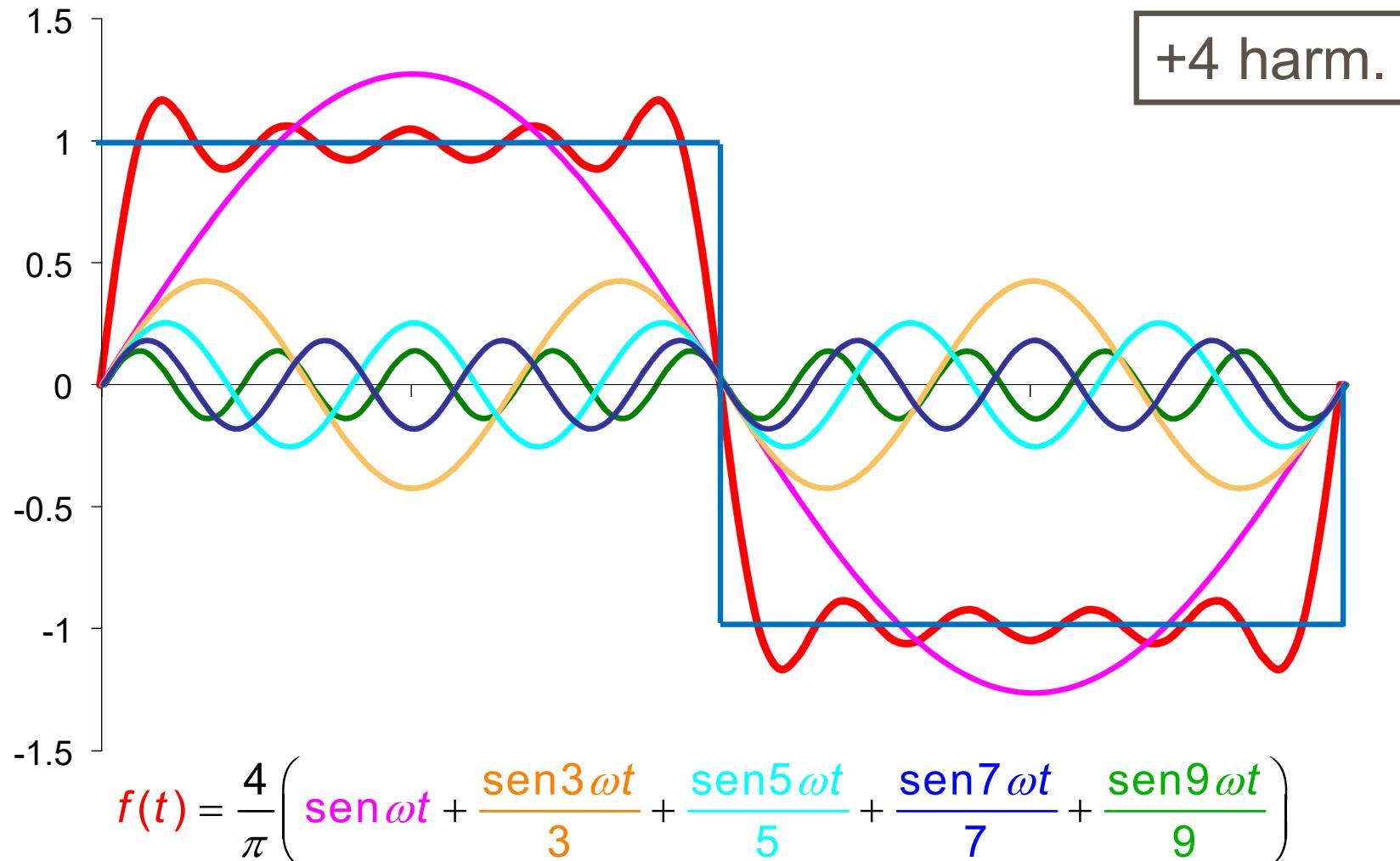
# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



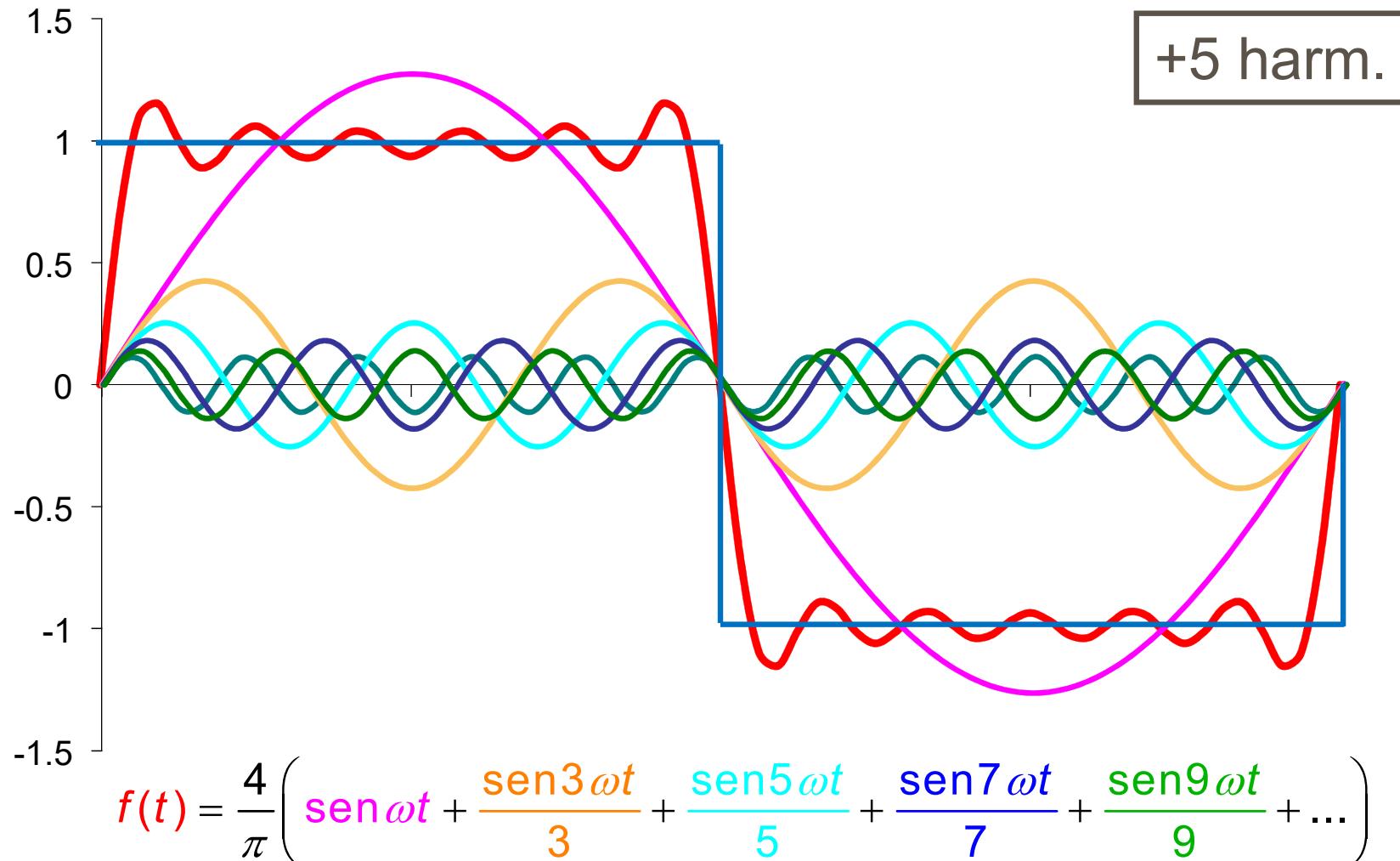
# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier



# Tópicos Preliminares

## ■ Análise de Fourier (WWW)

- Making waves: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/fourier-making-waves>

Outros exemplos:

- <http://falstad.com/fourier/>
- <http://www.jhu.edu/~signals/fourier2/index.html>

# Tópicos Preliminares

## ■ Sistemas electrónicos

- ... sistemas eletrónicos ... trata-se dum **conjunto de componentes** (a maior parte dos quais eletrónicos) **ligados de forma a funcionar como um todo**, que desempenham uma determinada função, solicitados por sinais de controlo específicos ...

## ■ “Caixa preta”



# Tópicos Preliminares

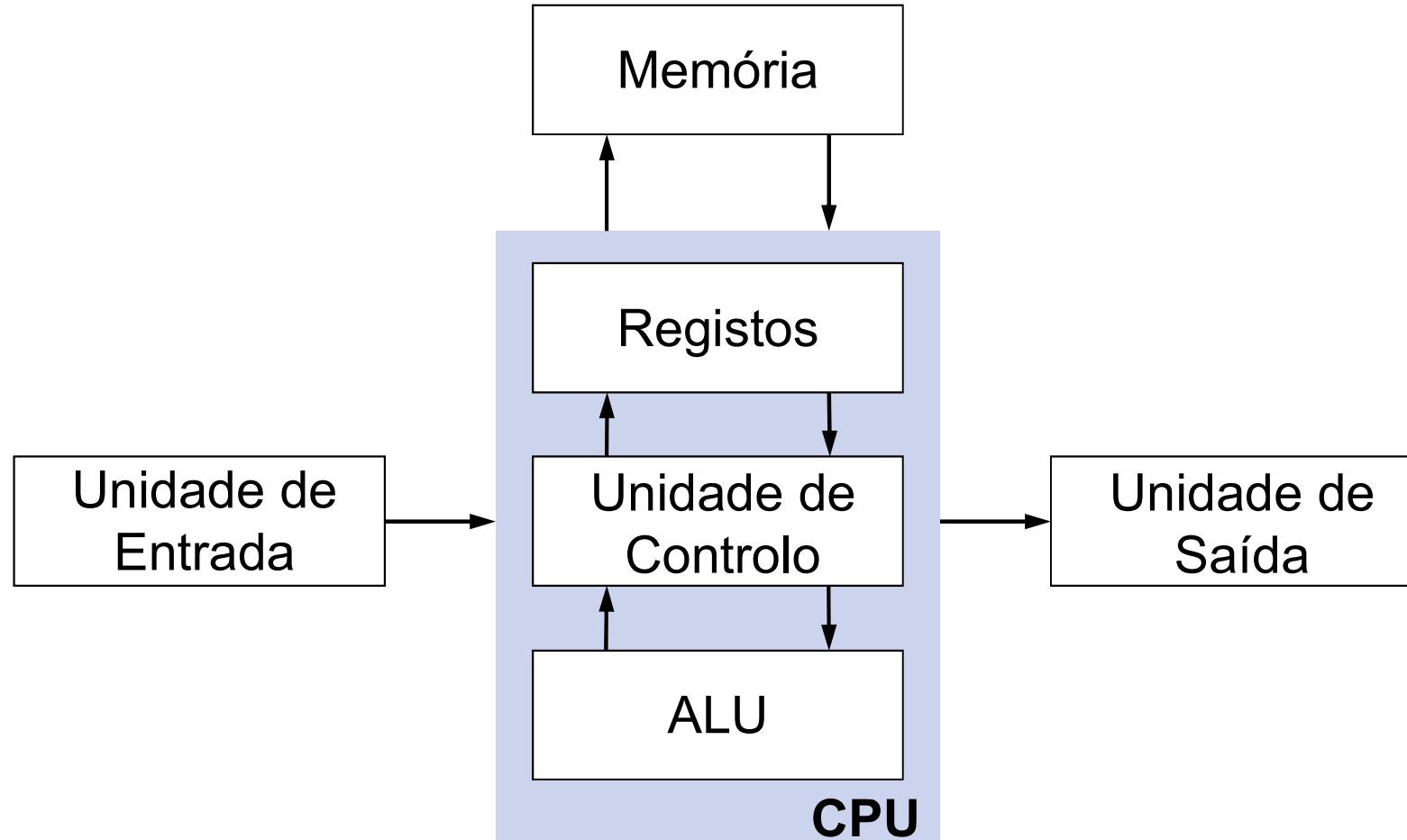
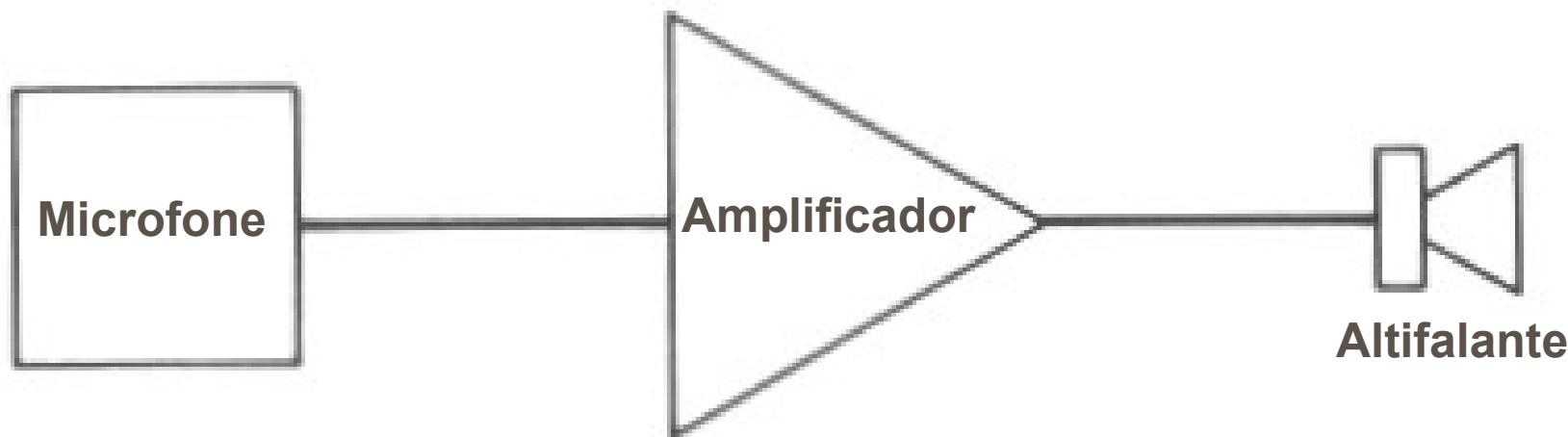
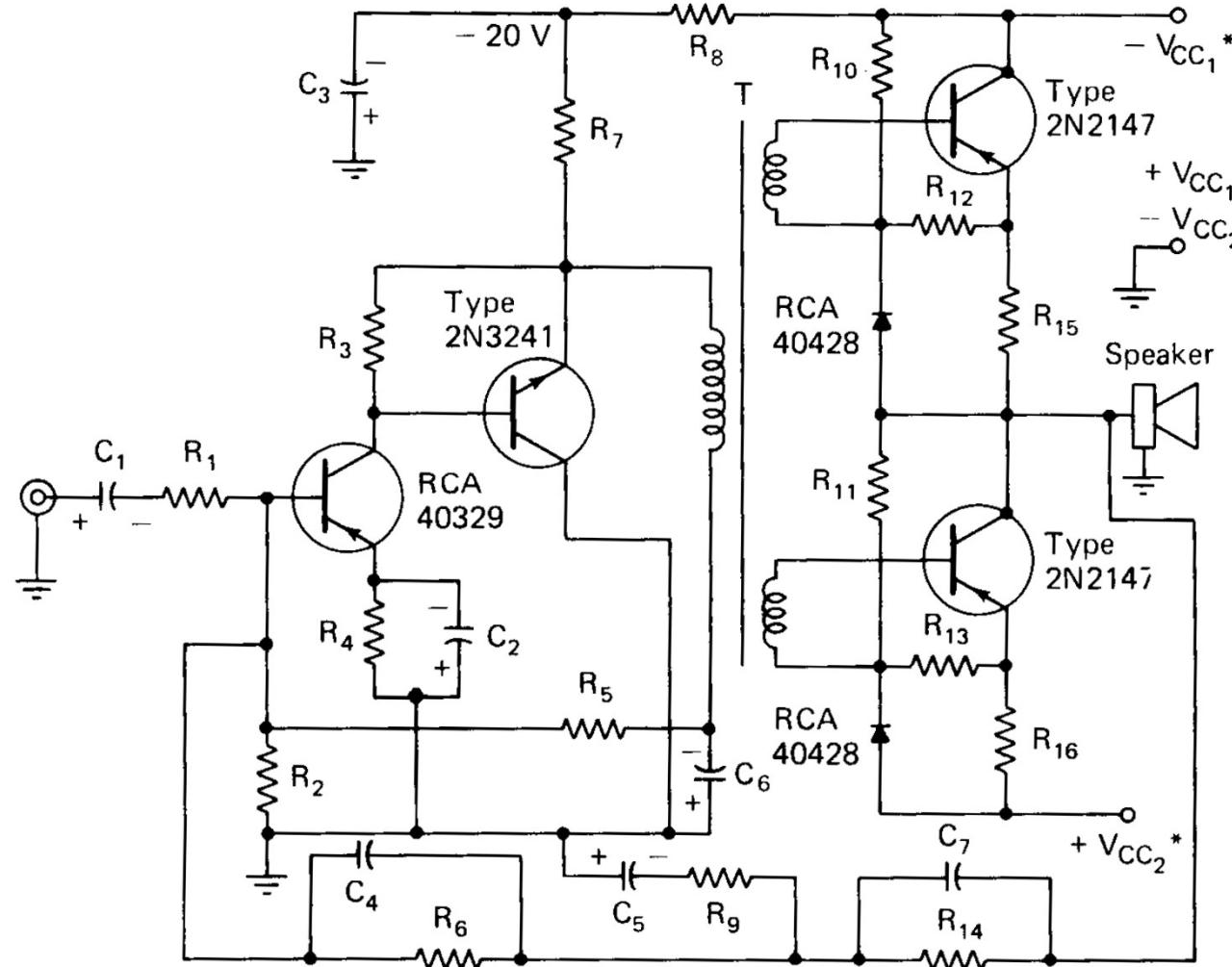


Diagrama de blocos de um computador

# Tópicos Preliminares



# Tópicos Preliminares



# Tópicos Preliminares

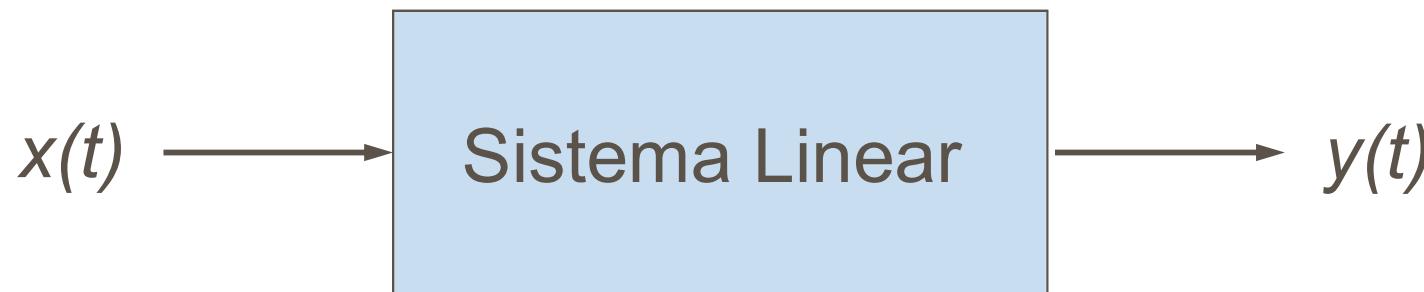
Parâmetro	Microfone	Amplificador	Altifalante	Sistema
Impedância	50kΩ	Entrada: 10MΩ Saída: 8Ω	8Ω	—
Resposta em frequência ( $\pm 3\text{dB}$ )	40–9000Hz	20–15000Hz	30–12000Hz	—
Potência	—	30W (max.)	30W	30W
Tensão de saída	100μV	15,5V max	—	—
Ganho de tensão	—	155000	—	—
Distorção harmónica	—	1%	—	—
Alimentação	—	~230V, 50Hz	—	~230V, 50Hz

Especificações do sistema PA e seus componentes

## ■ Tipos de Sistemas

... é a natureza da relação entre a entrada e a saída que determina a classificação de qualquer sistema ...

## ■ Lineares, Não Lineares

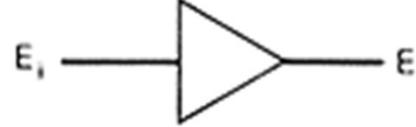


$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0$$

# Tópicos Preliminares

## Sistemas Lineares:

- É válido o princípio da sobreposição
- Não produzem novas frequências ...

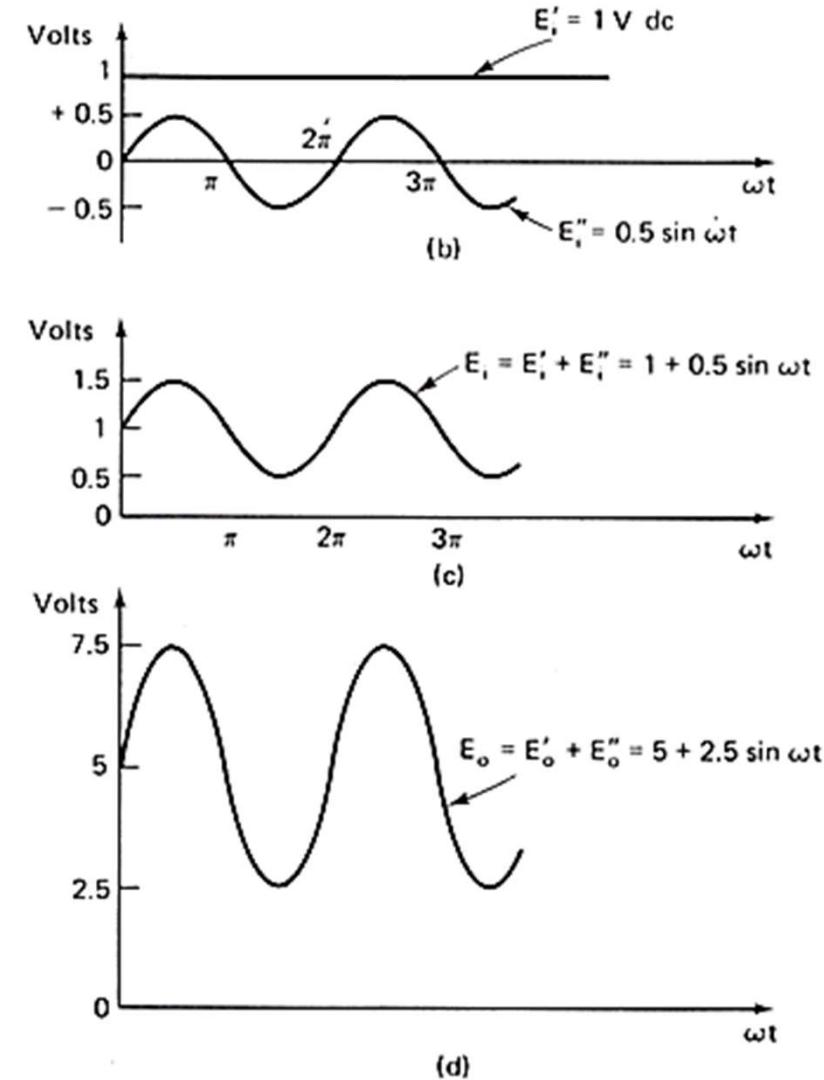
a)  $A = E_o / E_i$              $\frac{E_o}{E_i} = 5$

b) Linha recta       $E'_i = 1V$

Sinusóide       $E''_i = 0.5 \sin(\omega t)$

c)  $E_i = E'_i + E''_i = 1 + 0.5 \sin(\omega t)$

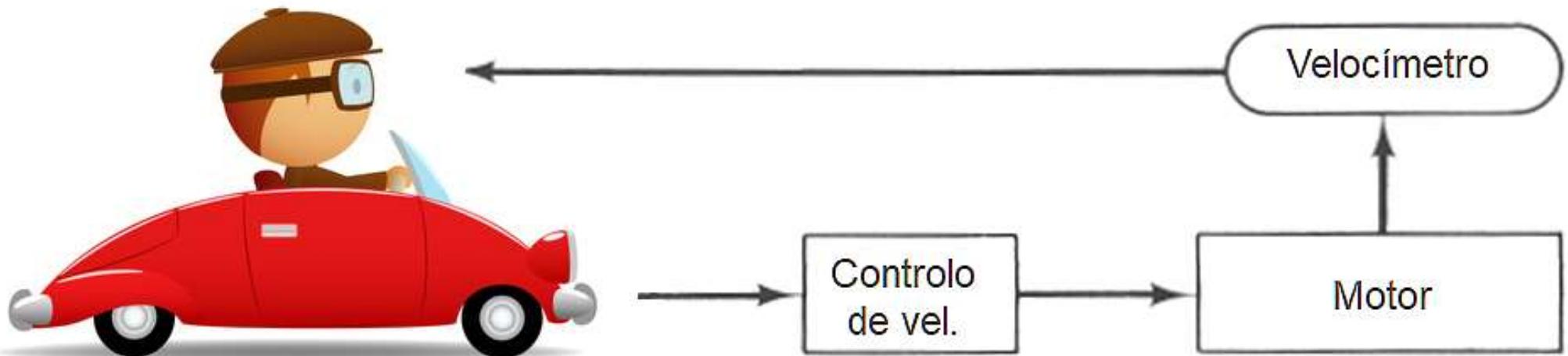
d)  $E_o = E'_o + E''_o = 5 + 2.5 \sin(\omega t)$



# Tópicos Preliminares

## ■ Malha Aberta, Malha Fechada

... um sistema em malha-fechada é aquele onde a saída depende não só da entrada, mas também de uma medida da sua própria saída ...



cartoon: <http://clipart-library.com/>

Sistema em malha fechada: automóvel e condutor

# Tópicos Preliminares

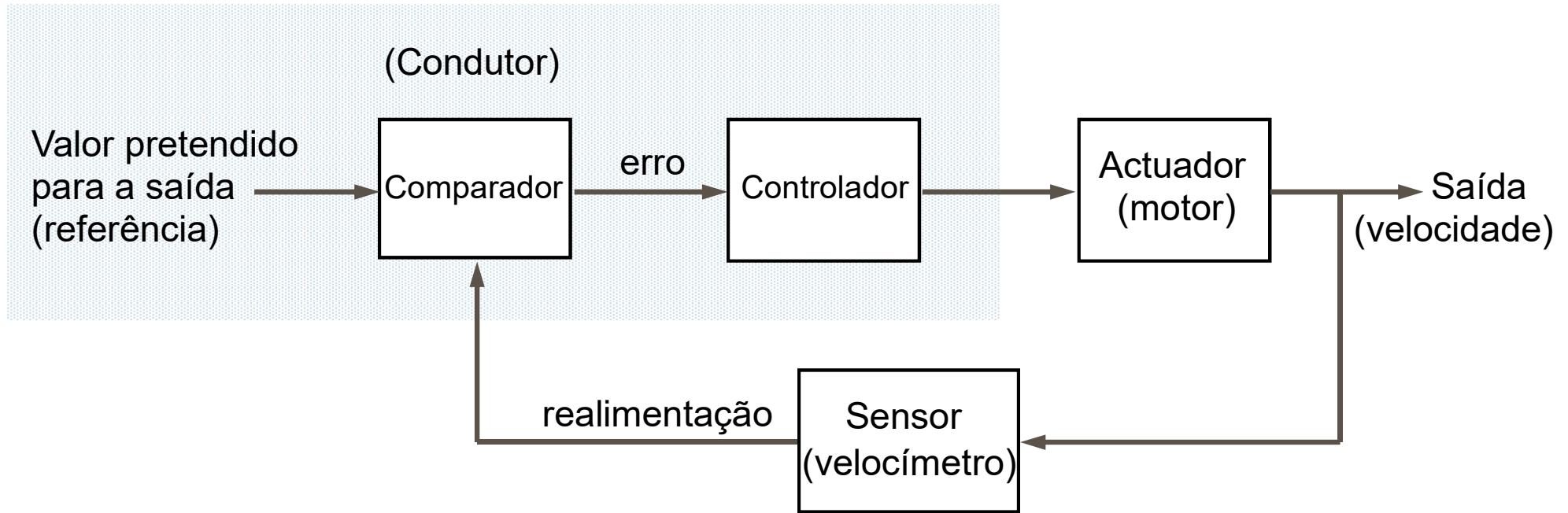


Diagrama de blocos de um sistema em malha-fechada

# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

### ■ Precisão

... a precisão de um sistema é uma medida de como o desempenho do sistema se aproxima das expectativas ...

Define-se normalmente através do seu inverso (erro):

$$\text{Erro}(X)\% = \frac{|X - X_{real}|}{X_{real}} \times 100\%$$

**Erro relativo** → **Erro absoluto**

# Tópicos Preliminares

... Se for conhecido o erro máximo ( $Erro_{max}$ , ou erro no fim de escala  $X_{max}$ ):

$$Erro(X)\% = Erro_{max}\% \frac{X_{max}}{X}$$

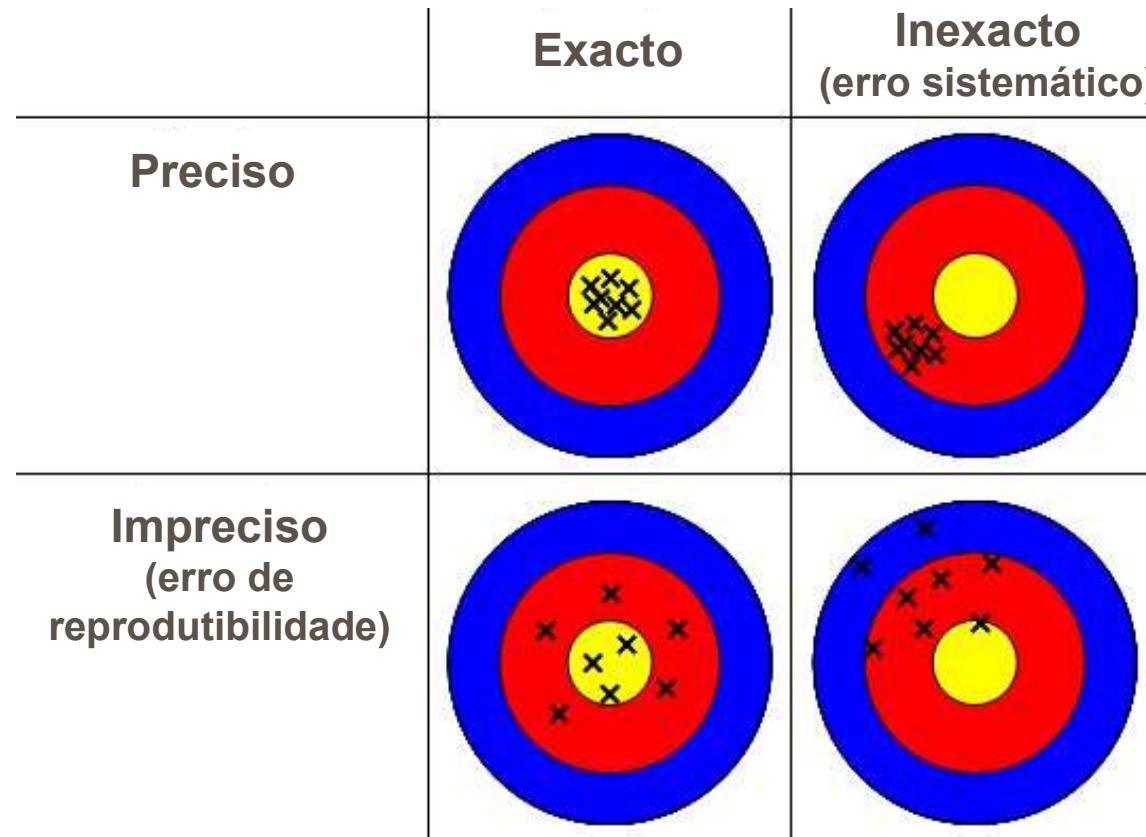


Errado

Certo

# Tópicos Preliminares

“Precisão” versus “Exactidão” (ou acurácia) ...



- A precisão é um pré-requisito da exactidão, embora o contrário não seja verdade (um aparelho pode ser preciso e não ser exacto)

## ■ Características de Sistemas

### ■ Sensibilidade

... A sensibilidade dum sistema é uma indicação de qual a variação de entrada que é necessária para produzir a variação de saída desejada ...

$$\text{sensibilidade} = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

### ■ Resolução

... define-se como a quantidade mais pequena que um sistema é capaz de distinguir ...

- Pode exprimir-se em valor absoluto ou em % do valor máximo
- A resolução pode ser referida à entrada ou à saída

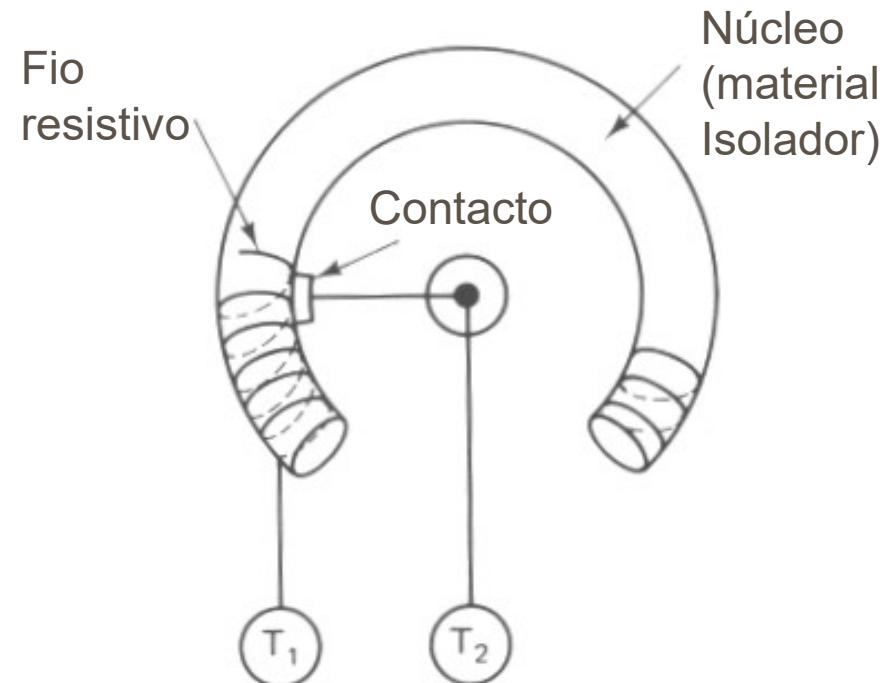


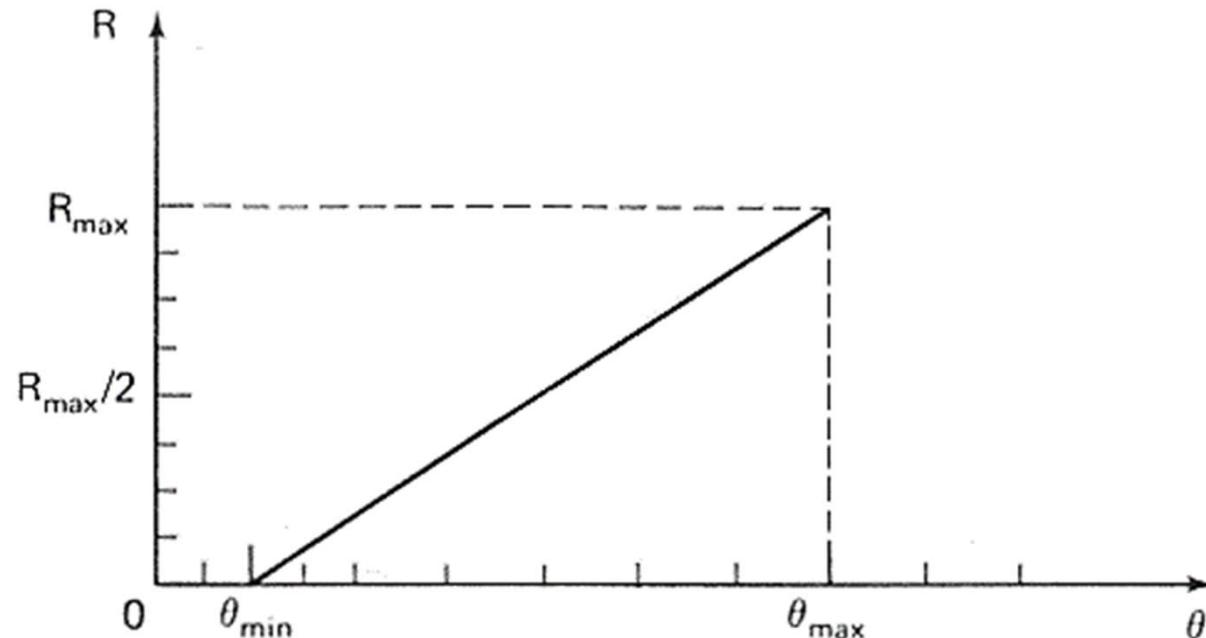
Diagrama simplificado duma resistência bobinada variável

# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

### ■ Linearidade

... pode definir se como o desvio da relação entre a entrada e a saída de uma linha recta ...

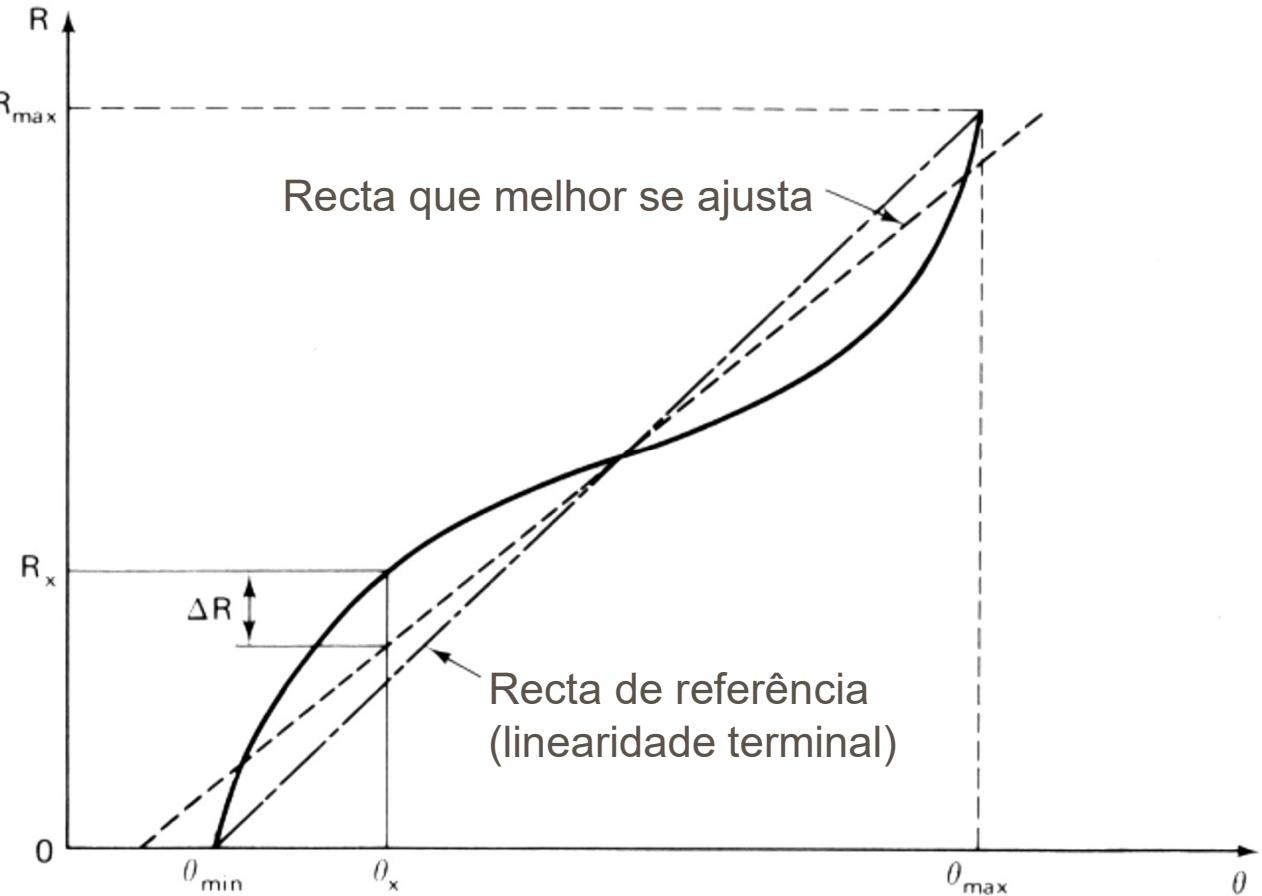


Resistencia *versus* posição angular do veio para uma resistência variável - relação linear

# Tópicos Preliminares

$$\% \text{linearidade} = \frac{\Delta R}{R_{\max}} \times 100$$

$$\% \text{linearidade} = \frac{\Delta R}{R_x} \times 100$$



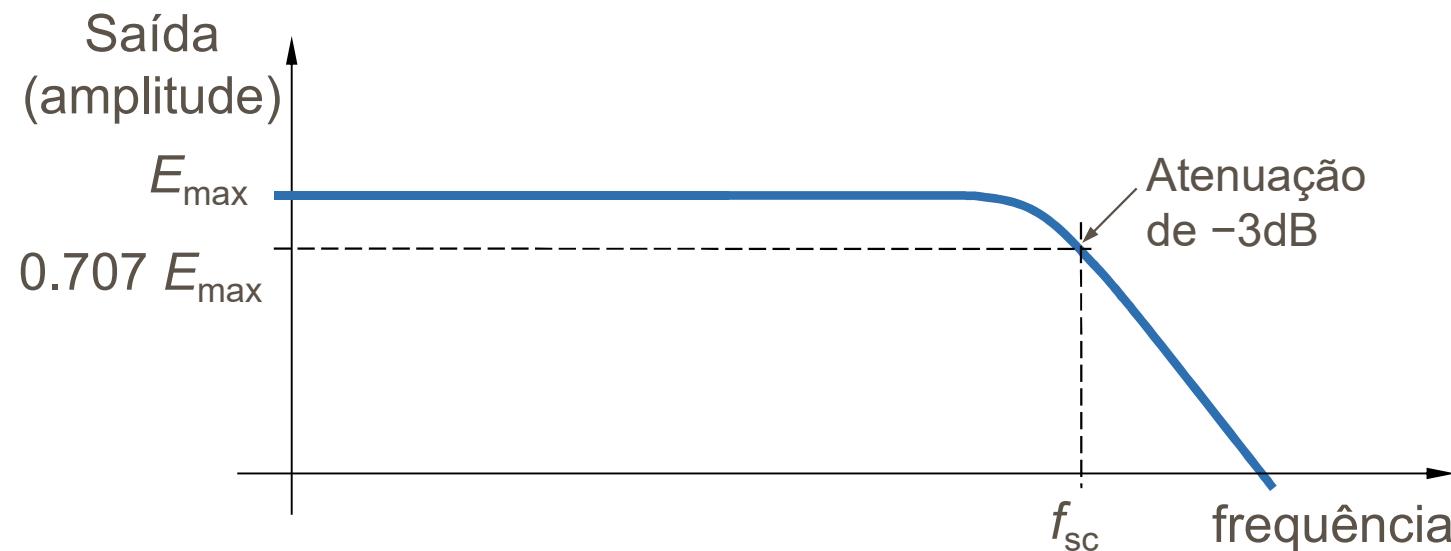
Resistência *versus* posição angular do veio para uma resistência variável - relação não-linear

# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

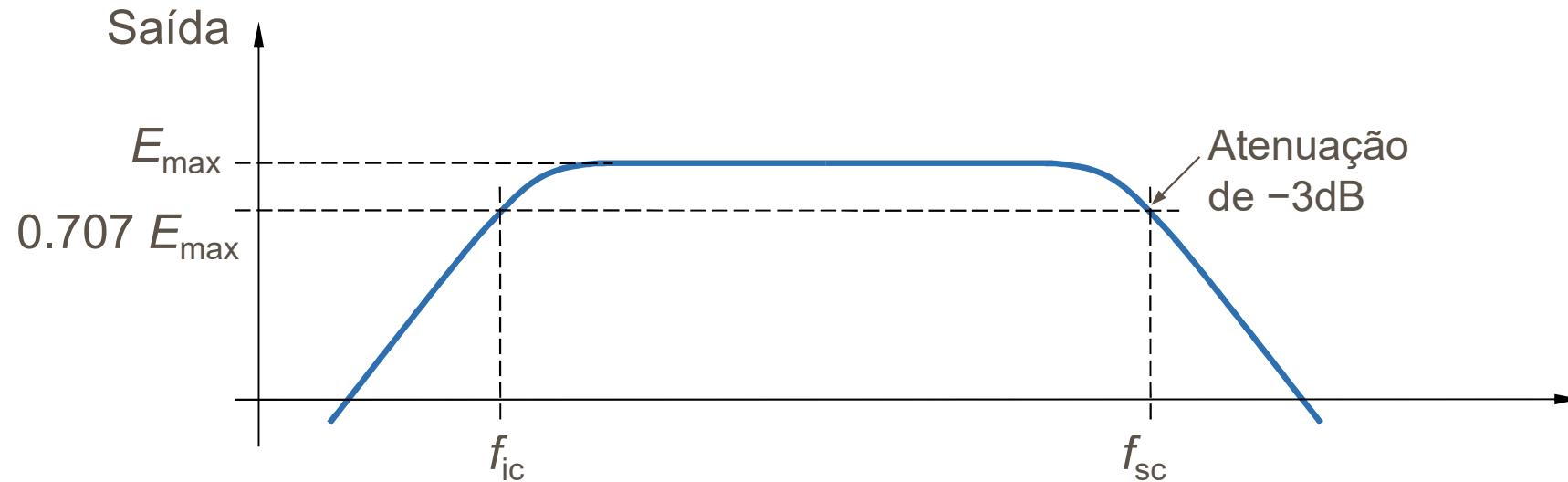
### ■ Resposta em Frequência

... tem a ver com o comportamento do sistema perante estímulos (entradas) sinusoidais de diferentes frequências ...



Curva de resposta em frequência

# Tópicos Preliminares



Curva de resposta em frequência (limitada a altas e baixas frequências)

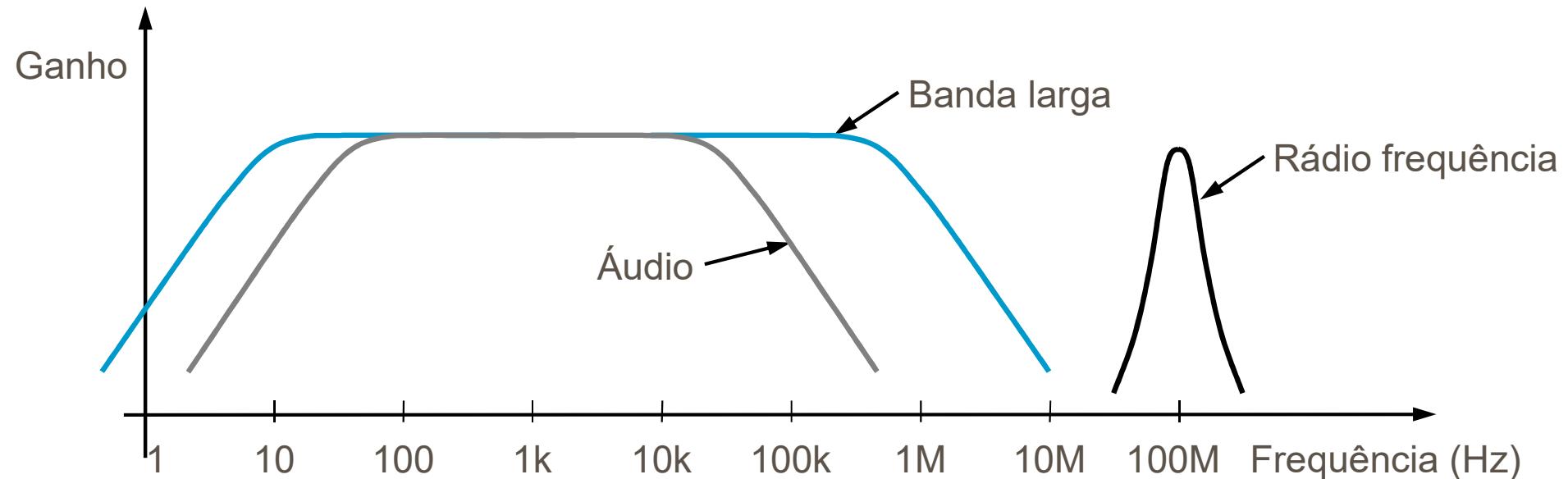
$$\text{largura de banda} = f_{sc} - f_{ic} \quad (\text{Hz})$$

$$X_{DB} = 20 \times \log_{10}(X)$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

- Resposta em frequência (exemplos)

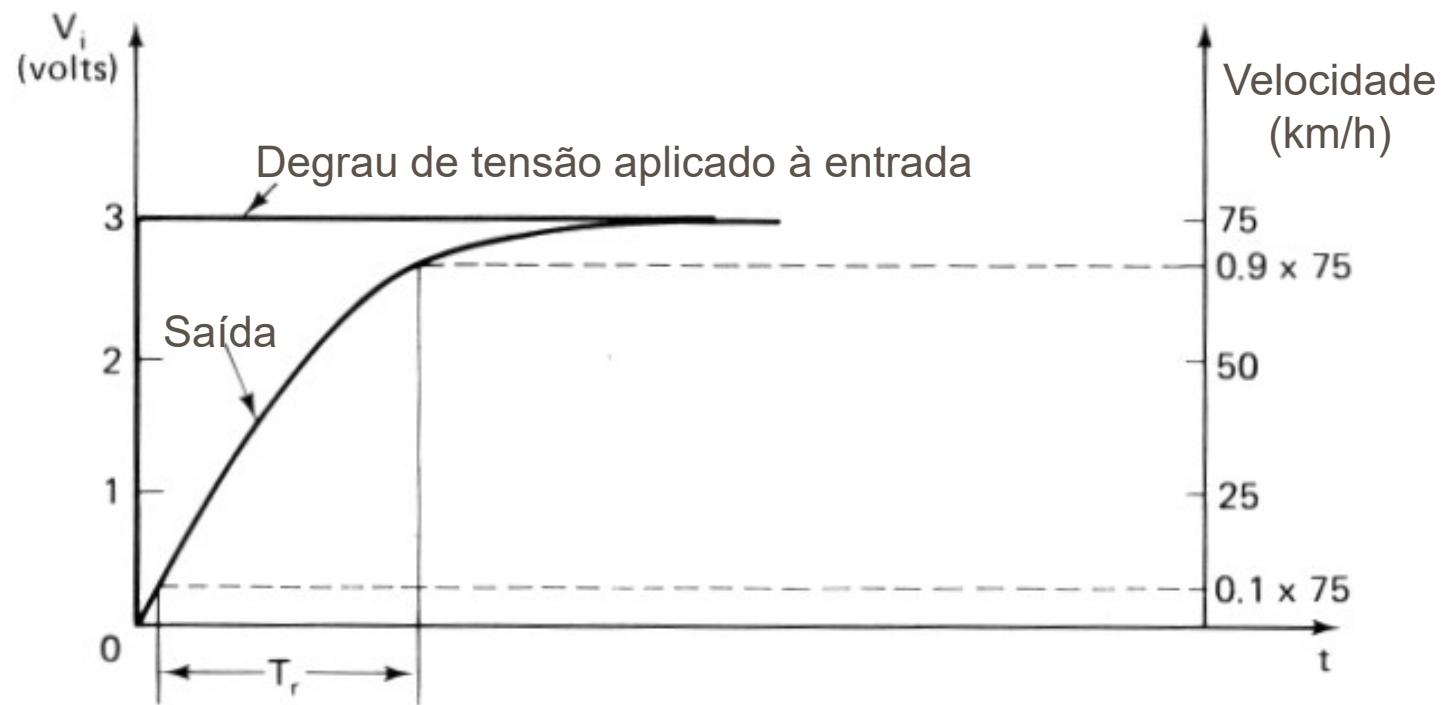


# Tópicos Preliminares

## ■ Características de Sistemas

### ■ Tempo de resposta

... tem a ver com a rapidez com que um sistema responde a variações do sinal de entrada ...

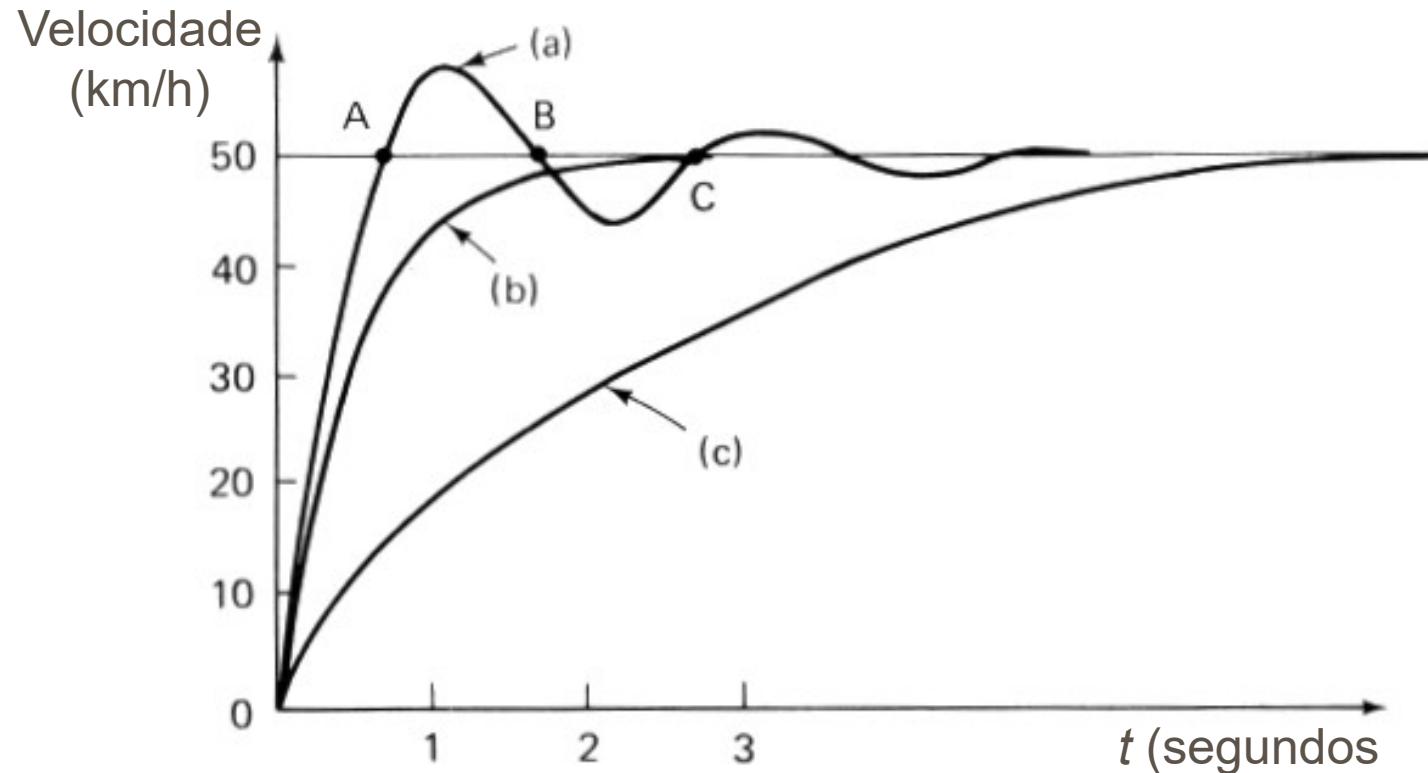


$$T_r = \frac{0.35}{f_{SC}}$$

Resposta do sistema para uma entrada em degrau

# Tópicos Preliminares

## ■ Característica de Dinâmica

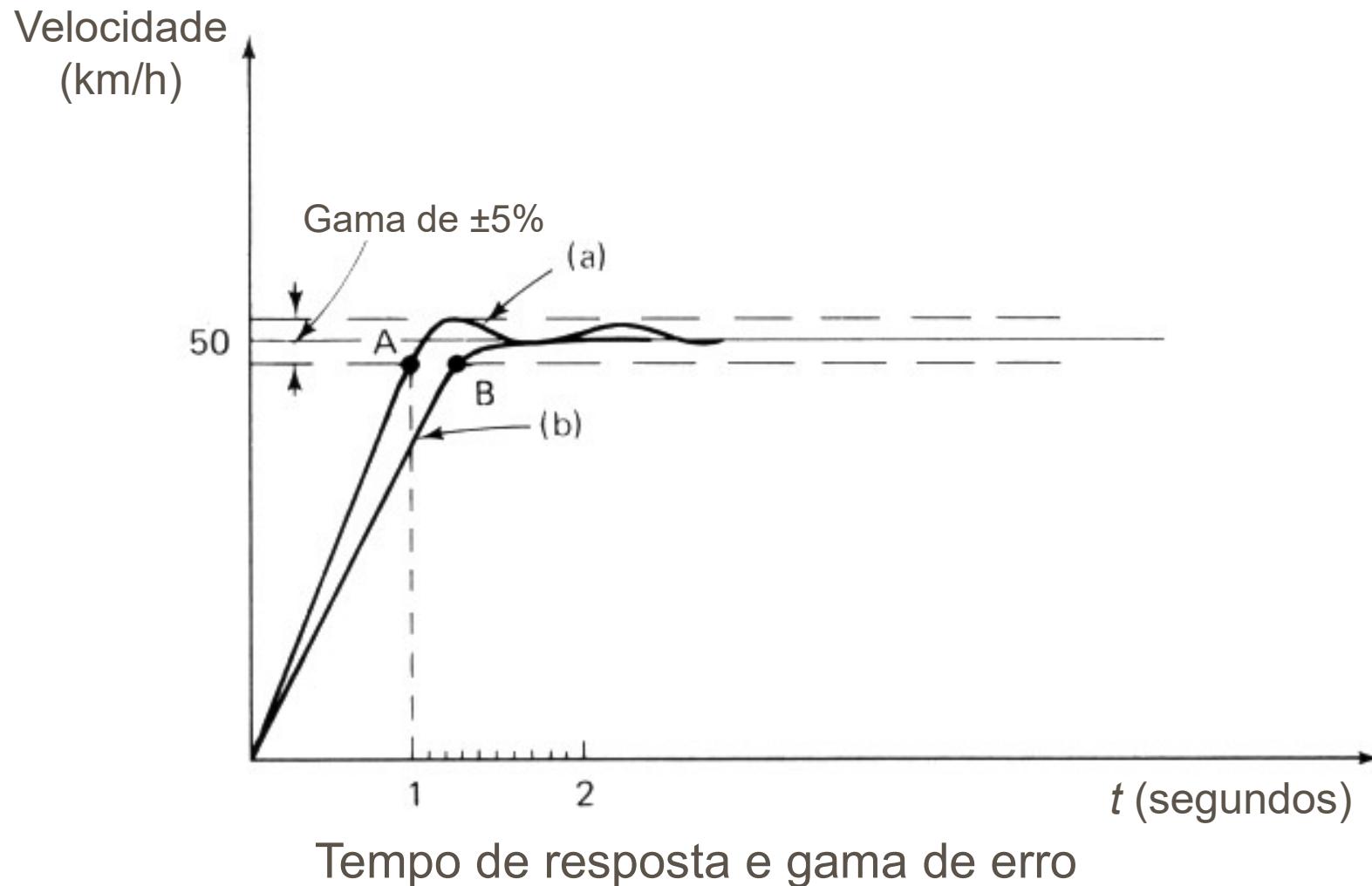


Respostas em regime transitório:

(a) sub-amortecida; (b) criticamente amortecida; (c) sobre-amortecida

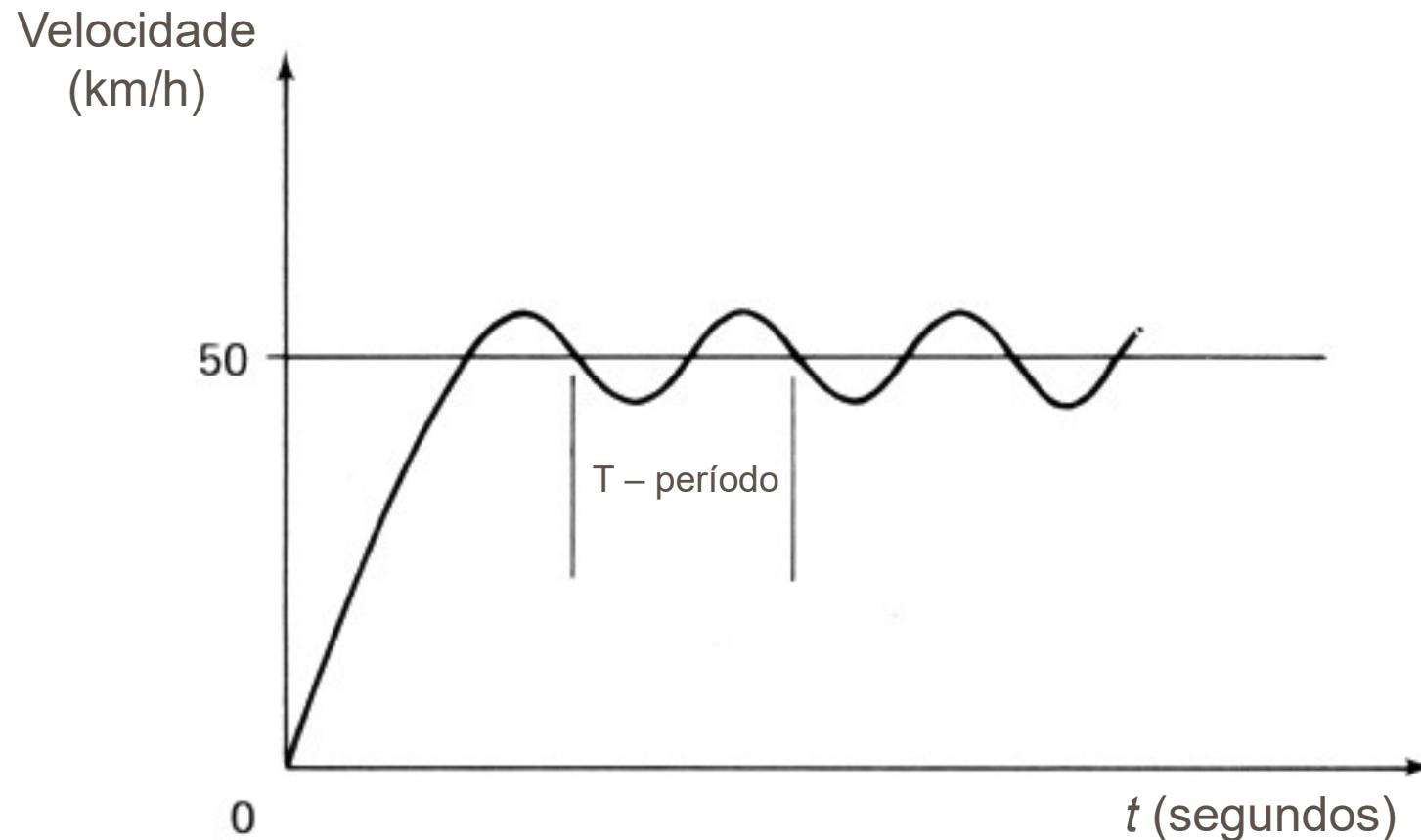
# Tópicos Preliminares

## ■ Característica de Dinâmica



# Tópicos Preliminares

## ■ Característica de Dinâmica



Oscilações não-amortecidas (sistema instável)

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Carga Eléctrica

As cargas eléctricas do protão, do electrão e do neutrão são:

- $Q_p = e = 1.6 \times 10^{-19}$  C (coulomb)
- $Q_e = -e = -1.6 \times 10^{-19}$  C
- $Q_n = 0$

As massas em repouso são:

- $m_p \approx m_n = 1.672 \times 10^{-24}$  g (grama)
- $m_e = 9.11 \times 10^{-28}$  g

Os raios, assumindo-as esféricas, são:

- $r_p \approx r_n \approx r_e = 2.81 \times 10^{-15}$  m (metro)

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Força Eléctrica

... a **Lei de Coulomb** estabelece que duas cargas eléctricas pontuais se atraem ou repelem com uma força cuja intensidade é:

$$F_{xy} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x Q_y}{r^2} \text{ N (newton)}$$

$\epsilon_0$  → permitividade do vazio

$Q_x, Q_y$  → valor absoluto das cargas eléctricas

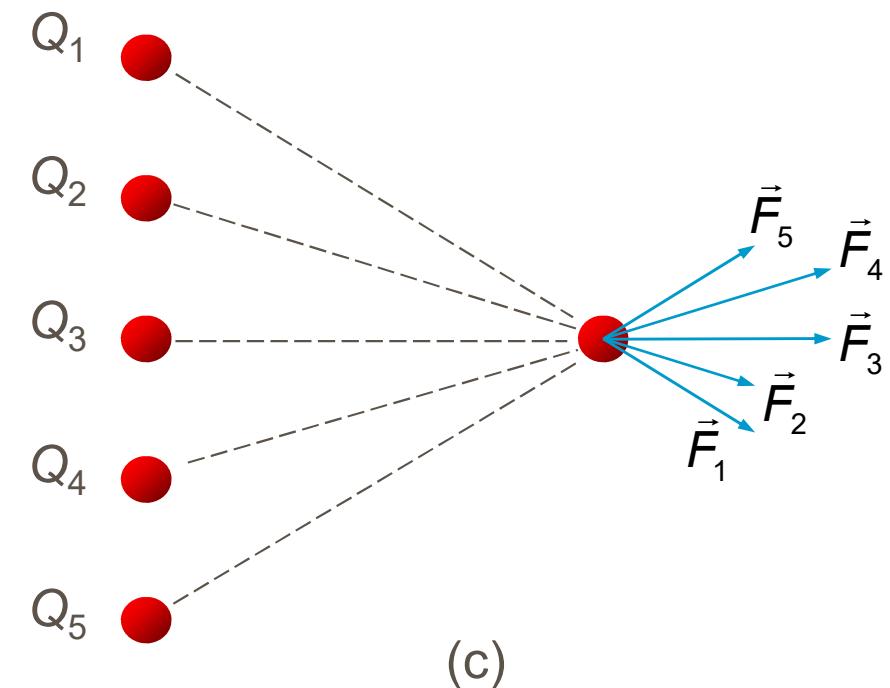
$r$  → distância entre as cargas

Nota: a lei da gravitação universal estabelece que:  $F_{xy} = G \frac{m_x m_y}{r^2}$  N (newton),  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{Kg}^2$

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Força Eléctrica



## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Campo Eléctrico

- O campo eléctrico é uma medida da acção que uma carga exerce sobre as cargas eléctricas localizadas no seu raio de acção. A intensidade do campo eléctrico criado por uma carga pontual é expressa por :

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x}{r^2} \text{ V/m (volt por metro)}$$

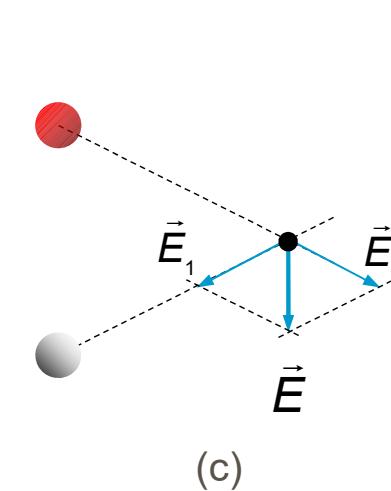
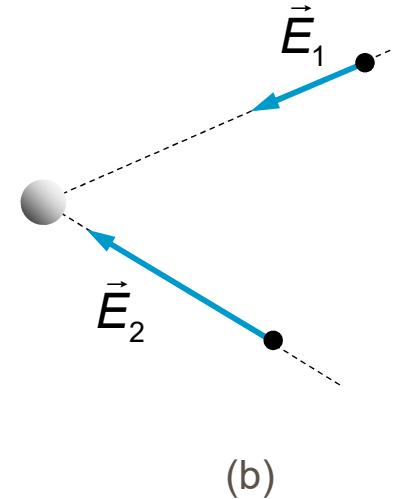
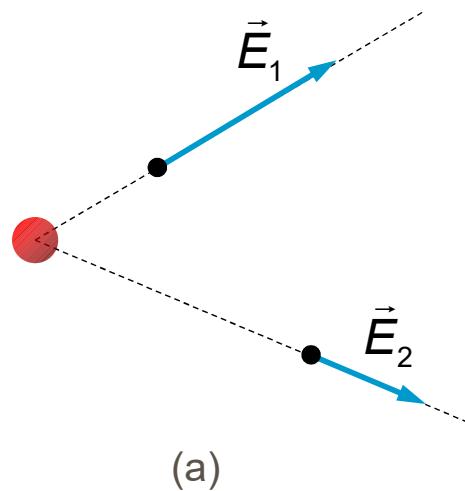
Pelo que,

$$F_{x,y} = E_x Q_y$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

- Campo Eléctrico



## ■ Rudimentos de Electricidade

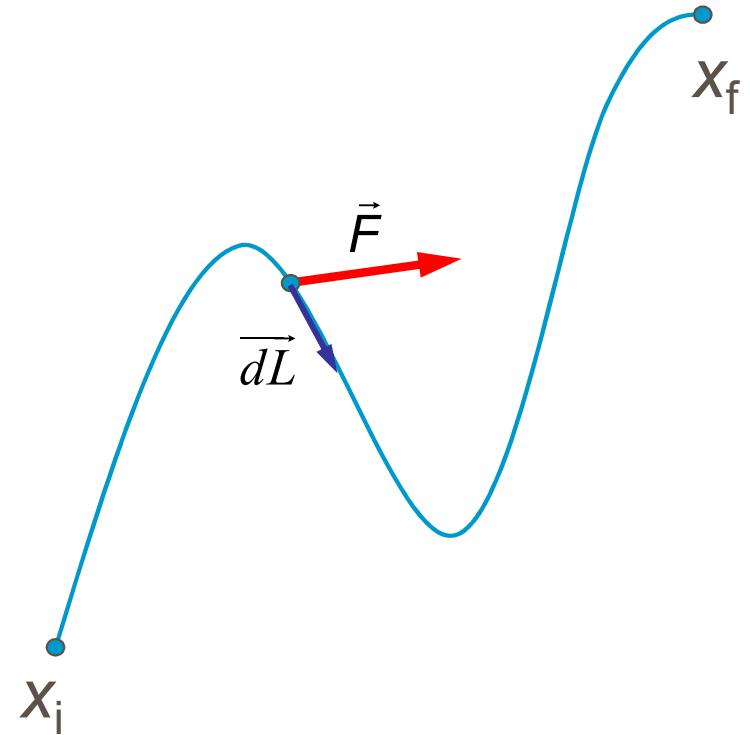
### ■ Energia Potencial (Eléctrica)

- Energia – caso geral do deslocamento de uma massa sob acção de uma força:

$$W = - \int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \bullet \overrightarrow{dL} \text{ J (joule)}$$

- Caso particular da queda de uma massa num campo gravitacional (a força é constante e a direcção coincidente com o deslocamento)

$$W = mgh$$

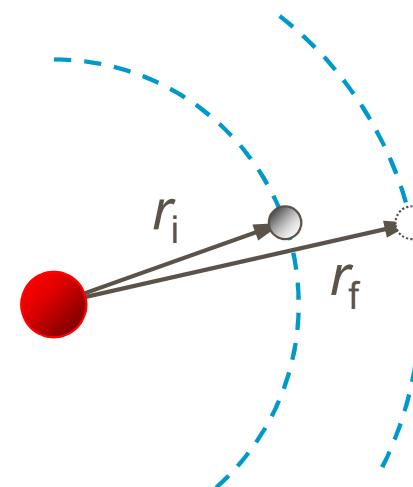


## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Energia Potencial (Eléctrica)

- Considere-se então um átomo de hidrogénio, constituído por um protão e por um electrão. Em face da existência de uma força de atracção entre as duas cargas, o deslocamento do electrão entre órbitas envolve a realização de um trabalho cujo módulo é:

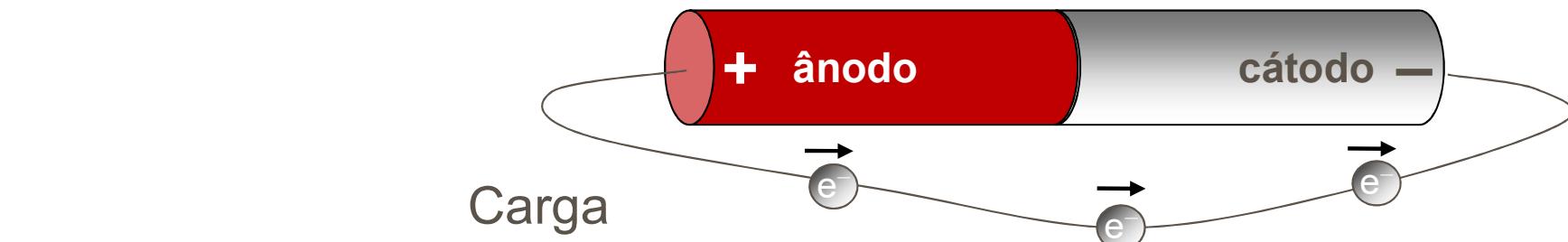
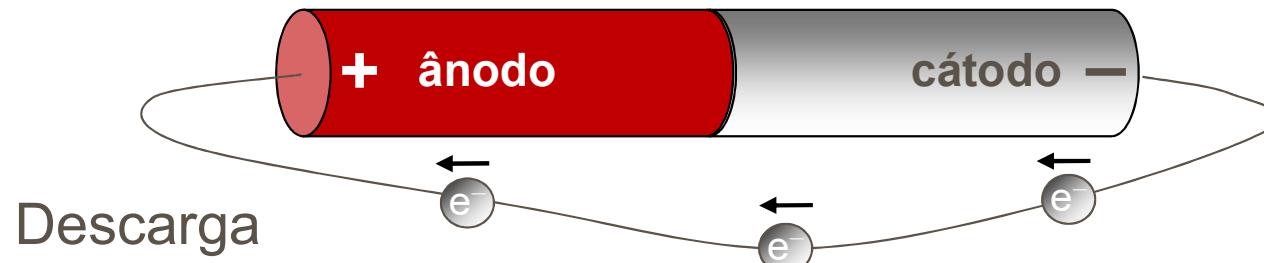
$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} e^2 \left( \frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right)$$



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

- Energia Potencial (Eléctrica)



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Tensão Eléctrica

- A tensão é uma medida da energia envolvida no transporte de uma carga elementar entre dois pontos de um campo eléctrico. É uma quantidade que se mede em **volts** (V) e que coincide com o cociente entre a energia libertada e a quantidade de carga transportada:

$$\text{Tensão} = \frac{W}{Q} \text{ V (volts)}$$

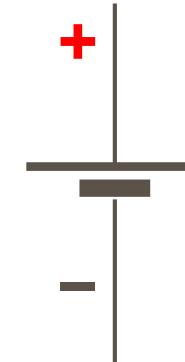
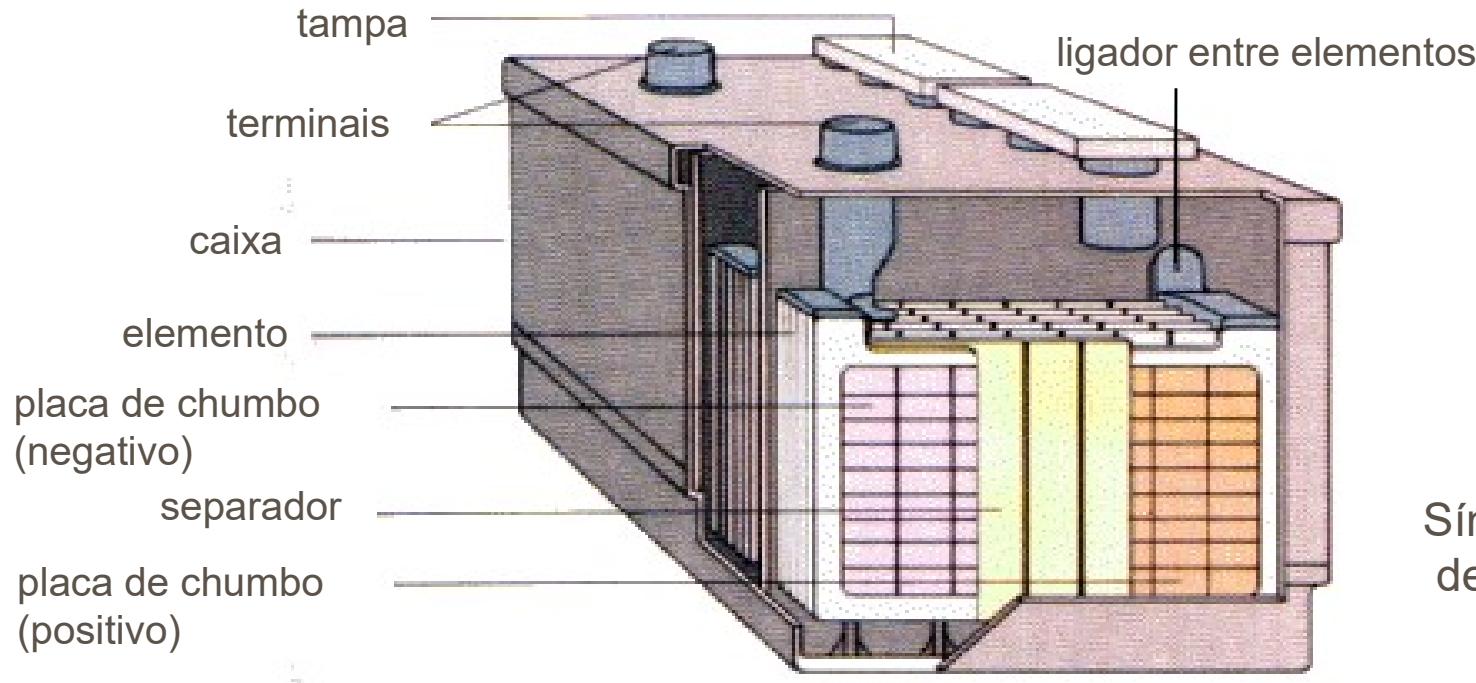
- Tendo em atenção as relações entre trabalho, força e campo eléctrico, verifica-se que,

$$\text{Tensão} = \frac{W}{Q} = \frac{-\int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \bullet d\vec{L}}{Q} = \frac{-\int_{x_i}^{x_f} Q \vec{E} \bullet d\vec{L}}{Q} = \int_{x_i}^{x_f} \vec{E} \bullet d\vec{L}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Fontes de Tensão



Símbolo de uma fonte de tensão de corrente contínua (CC)

Bateria de chumbo

# Tópicos Preliminares

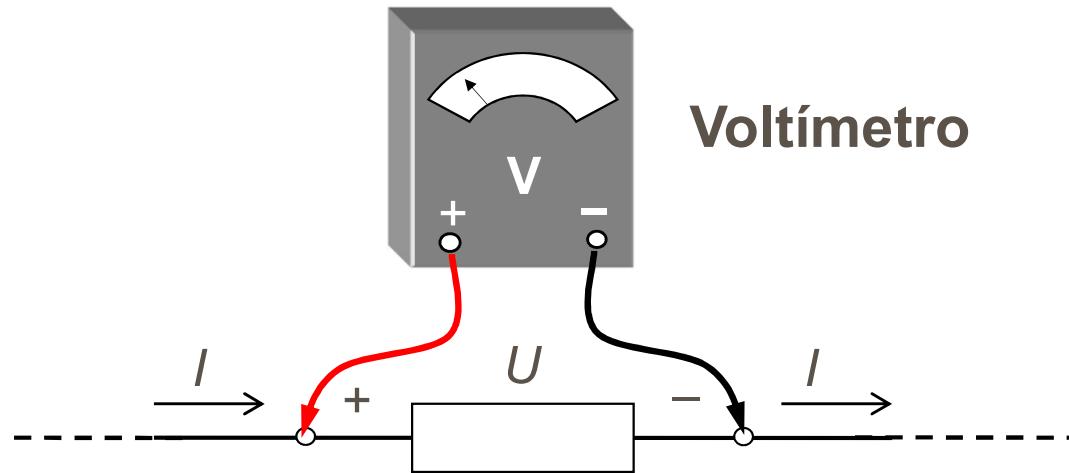
## ■ Rudimentos de Electricidade

- Valor nominal da tensão de fontes bem conhecidas:
  - Tensão gerada pelas células nervosas: cerca de 30 mV
  - Baterias recarregáveis NiMH or NiCd (por cada célula): 1.2 V
  - Bateria de mercúrio 1.355 V
  - Baterias alcalinas (tipo AAA, AA, C e D): 1.5 V
  - Alimentação do sistema eléctrico dos automóveis: 12 V (nominal)
  - Tensão nominal de rede eléctrica doméstica: 230 V (eficazes ou RMS) na Europa, Austrália, Ásia e África, 120 V na América do Norte, 100 V no Japão
  - Tensão de alimentação de comboios de alta velocidade: 25 kV eficazes
  - Linhas de transporte de energia eléctrica em alta tensão: entre 110 kV e 1150 kV eficazes
  - Relâmpago: varia muito, frequentemente à volta de 100 MV.

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Medida de Tensão



Voltímetro

Resistência interna do voltímetro ideal

$$\rightarrow R = \infty \Omega$$



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

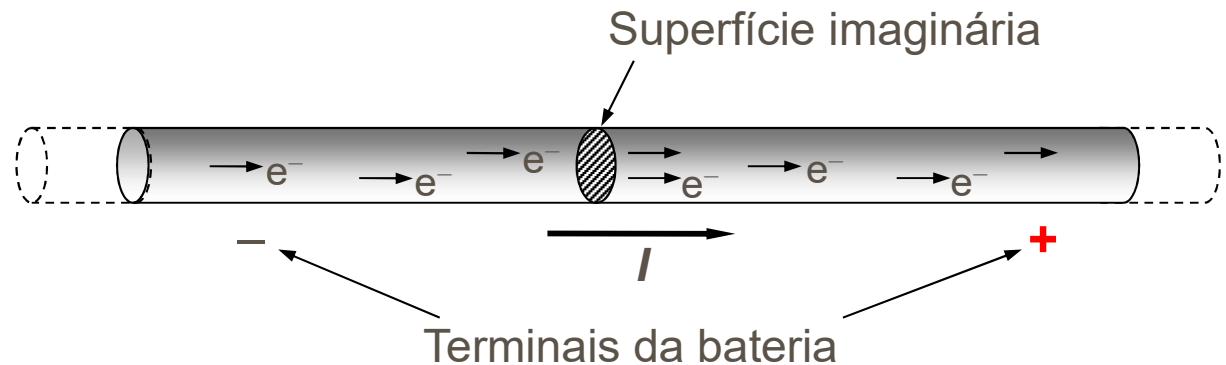
### ■ Corrente Eléctrica

... define-se corrente média como a quantidade de carga eléctrica que na unidade de tempo atravessa uma dada superfície ...

$$I = \frac{Q}{\Delta T} \text{ A (ampere)}$$

$$\rightarrow i(t) = \frac{dq}{dt}$$

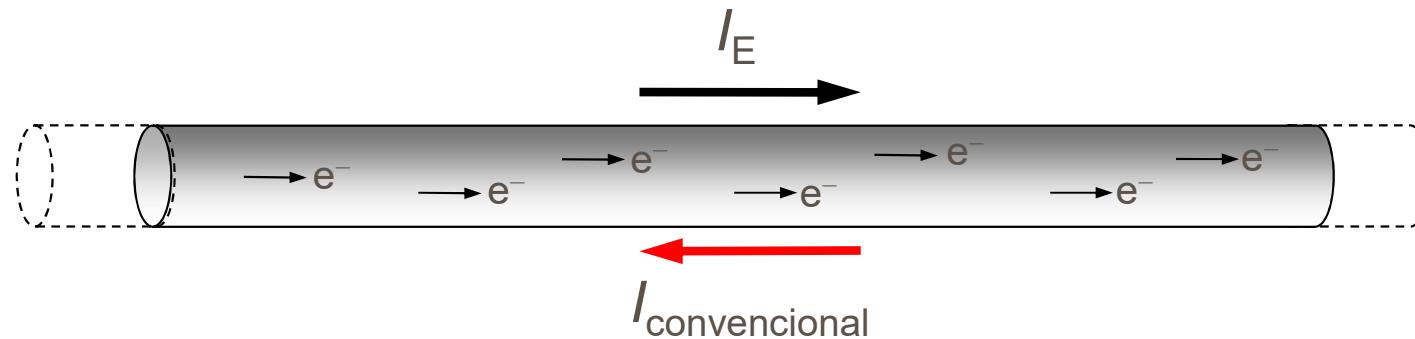
$$\rightarrow q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$$



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

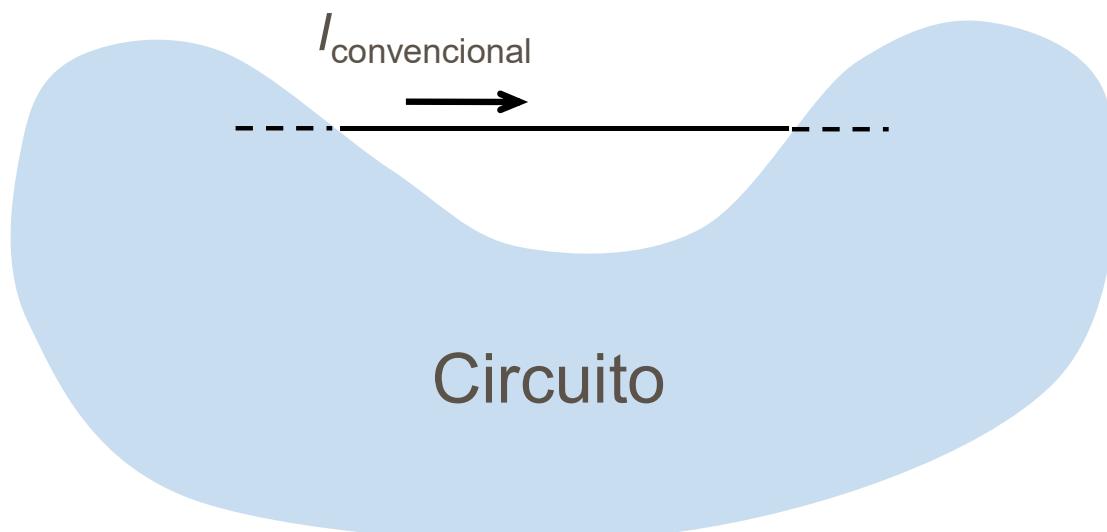
- Corrente Eléctrica
  - Fluxo de electrões *versus* corrente convencional



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

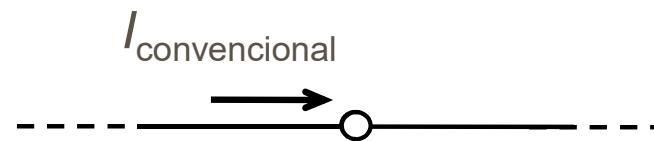
### ■ Medida Corrente Eléctrica



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Medida Corrente Eléctrica



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

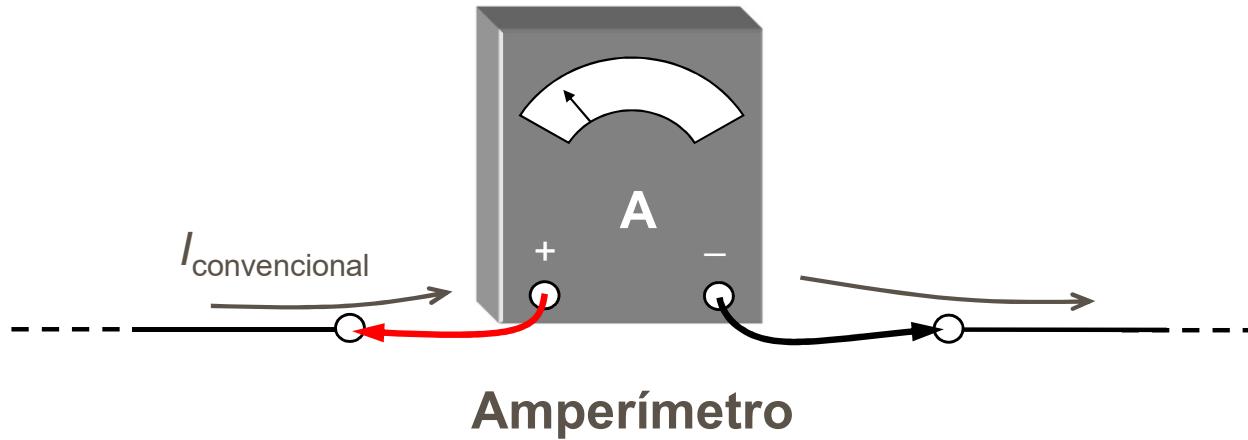
### ■ Medida Corrente Eléctrica



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Medida Corrente Eléctrica



Resistência interna do amperímetro ideal

$$\rightarrow R = 0 \Omega$$



## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Potência Eléctrica

... a potência (caso geral) é uma medida do ritmo a que se dissipa ou acumula energia...

$$P = \frac{W}{\Delta T} \text{ W (watt)}, \quad p(t) = \frac{dw(t)}{dt}, \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)d\tau$$

Tendo em conta as relações entre trabalho, tensão, carga, tempo e corrente eléctrica, a potência eléctrica é dada por (valor médio),

$$P = \frac{W}{\Delta T} = \frac{W}{Q} \frac{Q}{\Delta T} = VI \text{ (W)}$$

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Resistência. Lei de Ohm

... As duas grandezas eléctricas fundamentais – **tensão e corrente** – relacionam-se através de outra grandeza de igual importância: a **resistência** ...

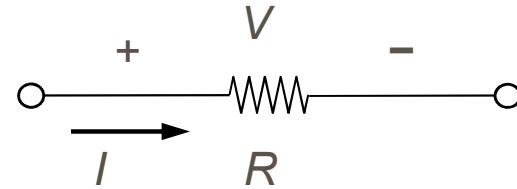
... A relação entre as duas grandezas é descrita pela mais importante das leis dos circuitos eléctricos: a *lei de Ohm*:

$$R = \frac{V}{I} \text{ } \Omega \text{ (ohm)} \quad \rightarrow I = \frac{V}{R}, \quad V = RI$$

# Tópicos Preliminares

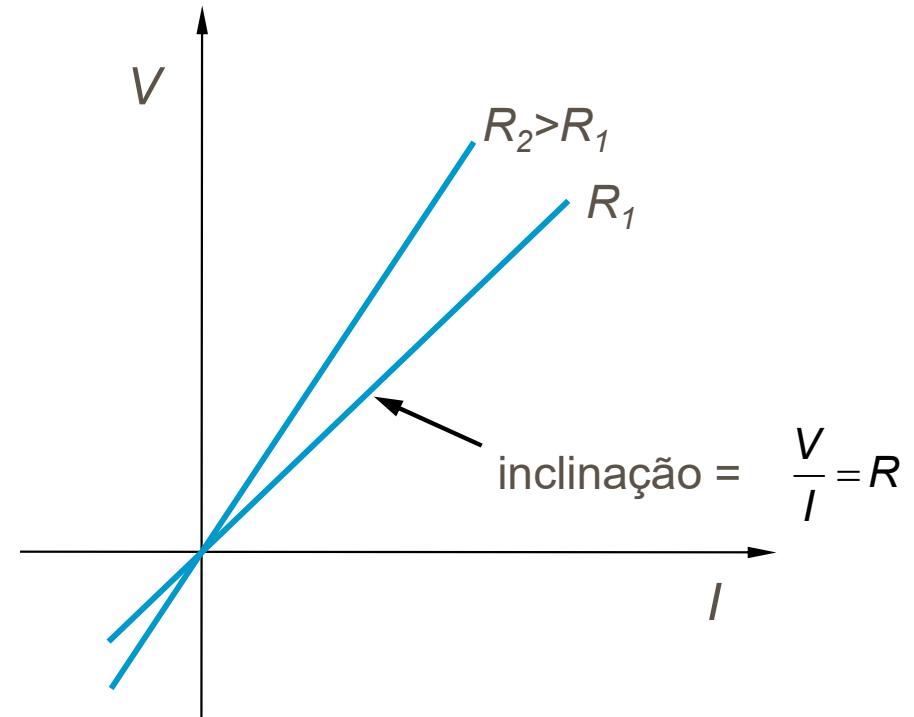
## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Resistência. Lei de Ohm



Símbolo da resistência e polaridades

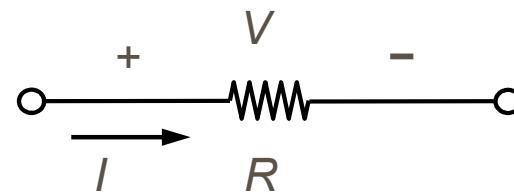
$$V = RI$$



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Resistência. Lei de Joule



... a potência dissipada por *efeito de Joule* numa resistência é dada por:

$$P = V \times I = (R \times I) \times I = R \times I^2$$

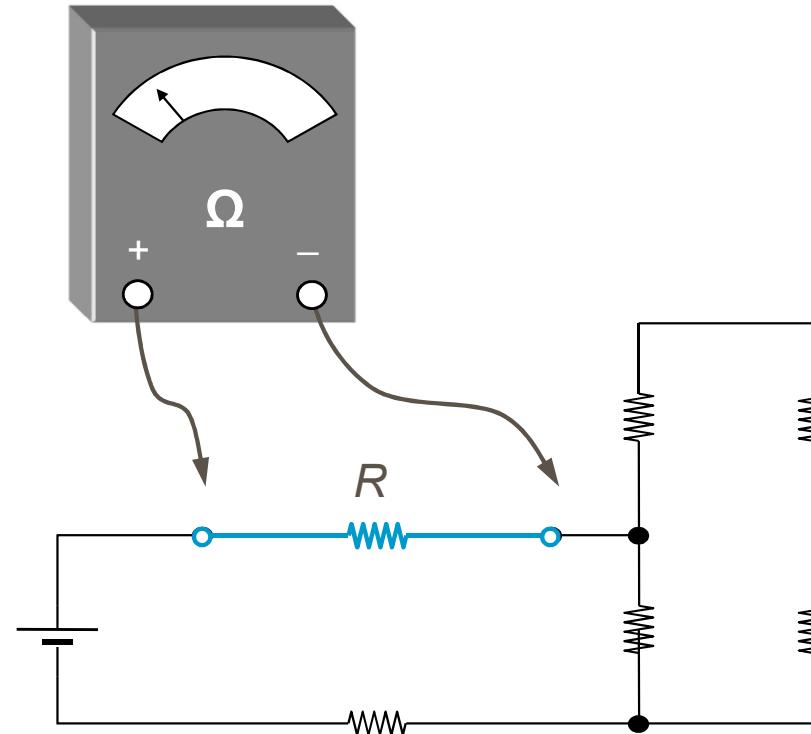
$$P = V \times I = V \times \left( \frac{V}{R} \right) = \frac{V^2}{R}$$

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

- Medida/Especificação de resistências

Ohmímetro

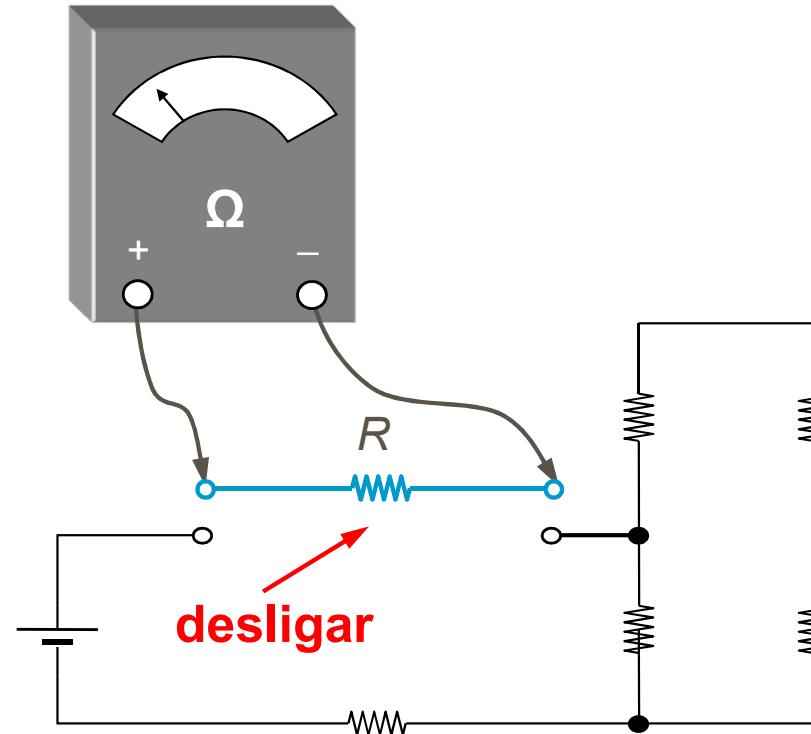


# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Electricidade

- Medida/Especificação de resistências

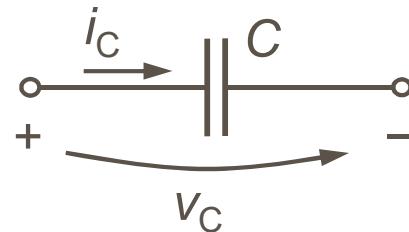
Ohmímetro



# Tópicos Preliminares

## Rudimentos de Electricidade

### Condensadores



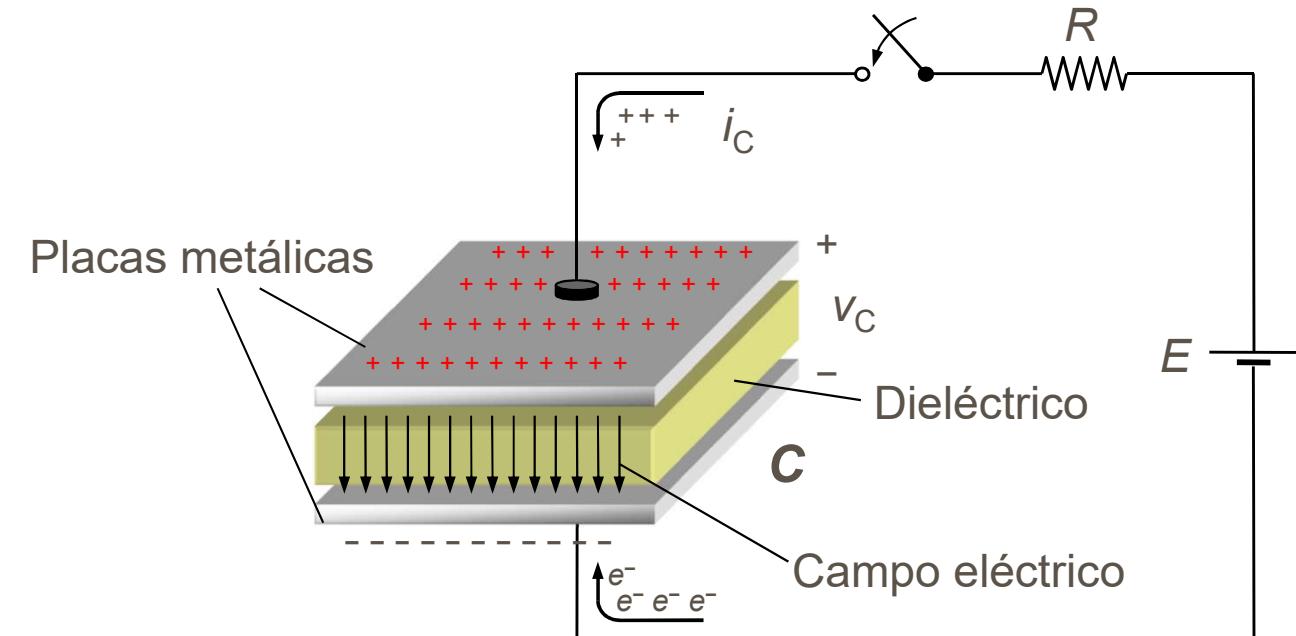
$$Q = C \times V_C$$

$$C = \frac{Q}{V_C} \quad \text{F (farad)}$$

$$i_C = \frac{dq}{dt}$$

$$\rightarrow i_C = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$\rightarrow W_C = \frac{1}{2} C V_C^2$$

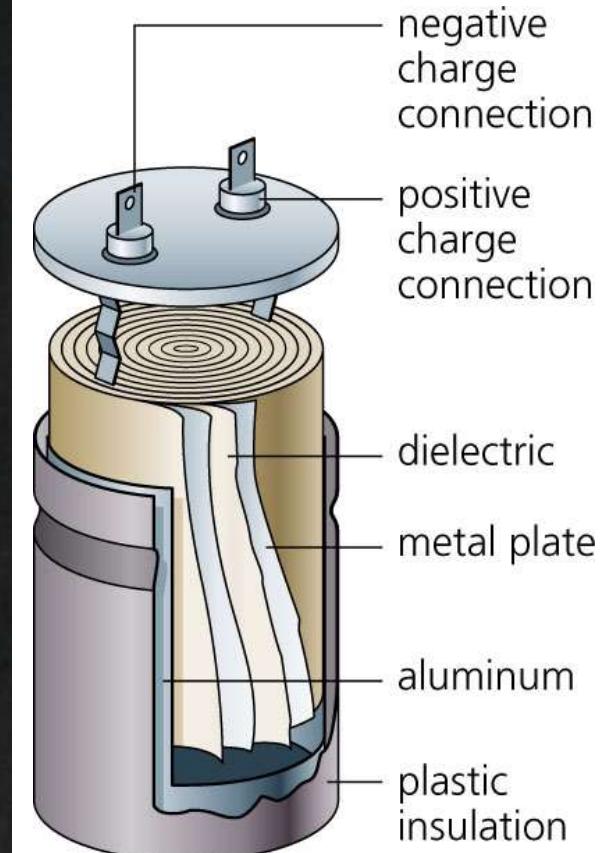


( $W_C$  é a energia armazenada no campo eléctrico do condensador)

# Tópicos Preliminares

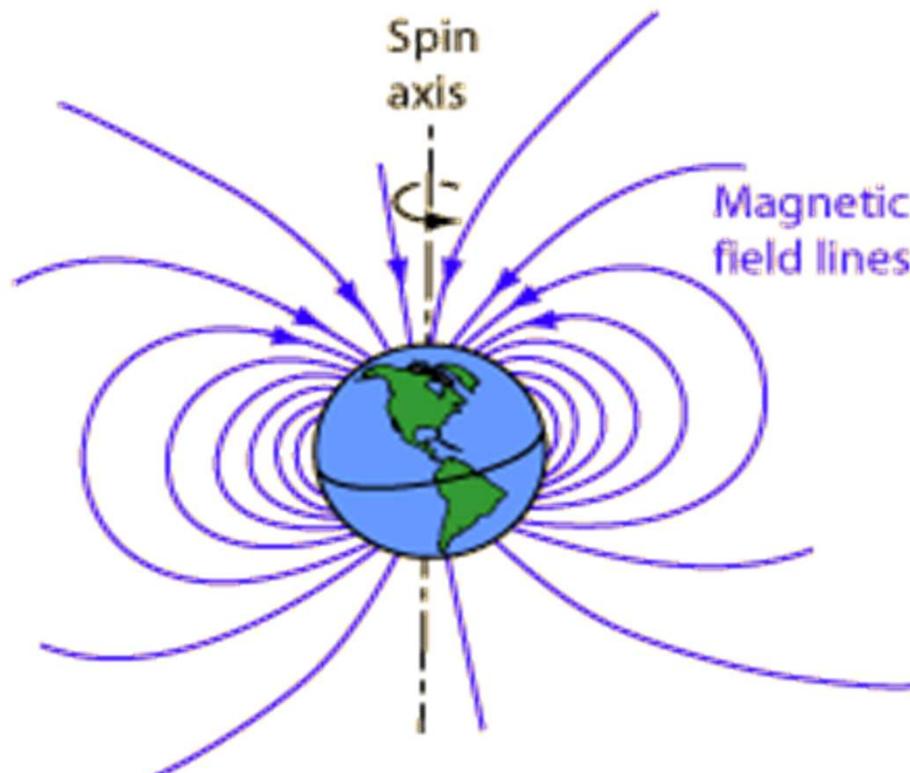
## ■ Rudimentos de Electricidade

### ■ Condensadores

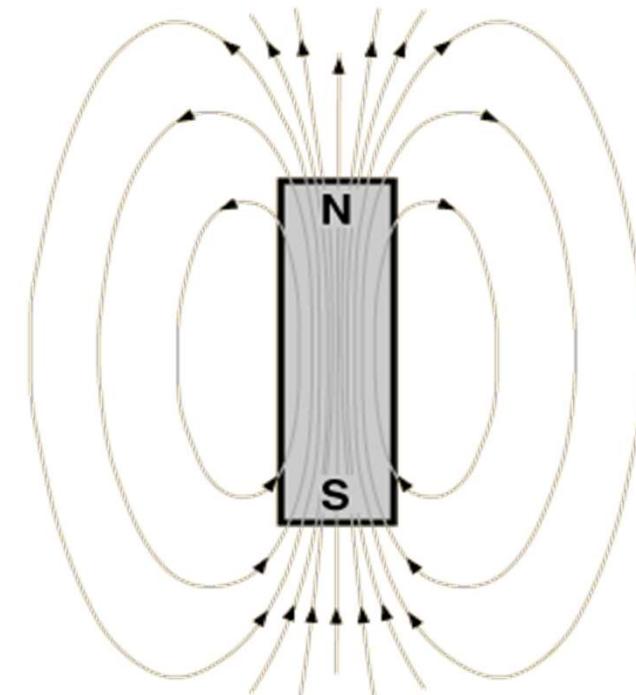


# Tópicos Preliminares

- Rudimentos de Magnetismo
  - Produção de um Campo Magnético



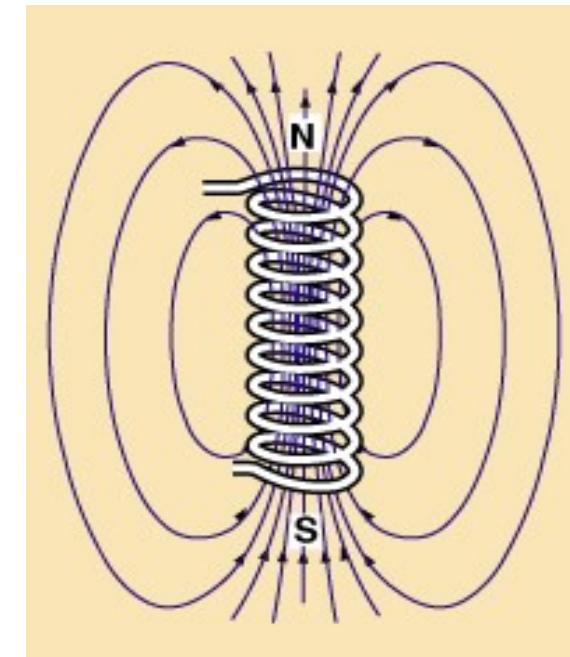
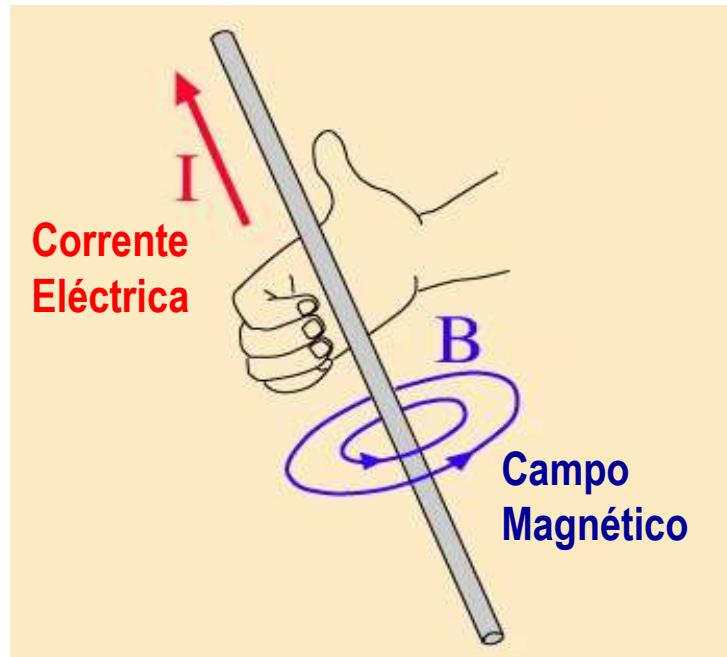
Campo magnético terrestre



Íman permanente

# Tópicos Preliminares

- Rudimentos de Magnetismo
  - Produção de um Campo Magnético



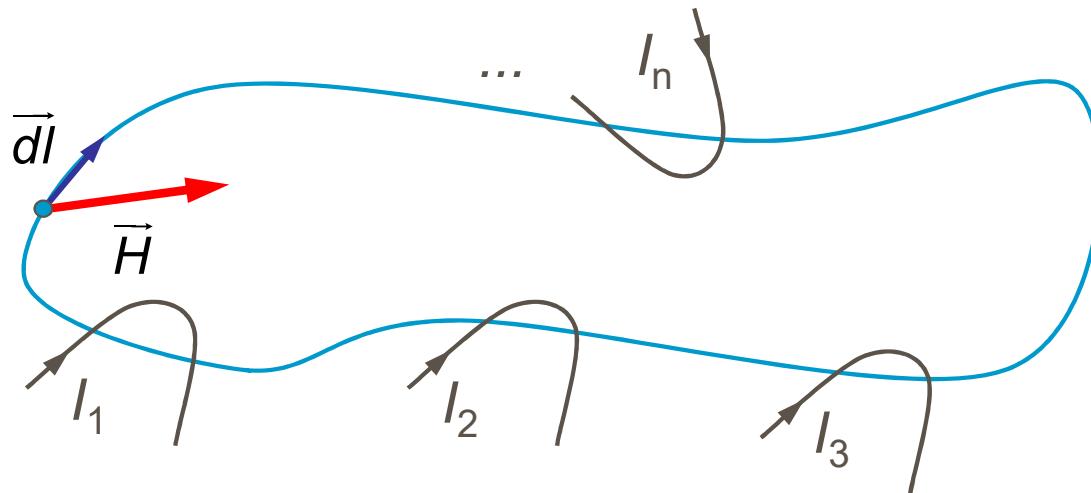
# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Produção de um Campo Magnético

... a lei básica que governa a produção dum campo magnético a partir de uma corrente eléctrica, é a **lei de Ampére**...

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$



$\vec{H}$  → **vector** intensidade do campo magnético (A/m ou amperes · espira/m)

$d\vec{l}$  → **vector** elementar (a direcção coincide com o trajecto)

$\sum I$  → somatório das intensidades das correntes que contribuem para a produção do campo

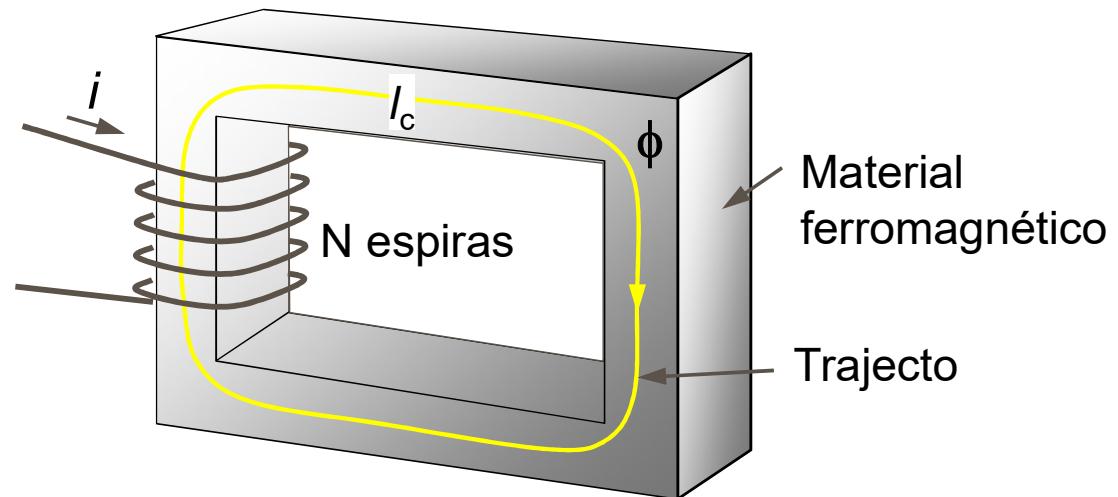
# Tópicos Preliminares

- Rudimentos de Magnetismo
  - Produção de um Campo Magnético

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$$\Rightarrow H I_c = N i$$

$$\Rightarrow H = \frac{N i}{I_c} = \frac{\mathcal{S}}{I_c}$$



$\mathcal{S} = Ni \rightarrow$  Força magnetomotriz (f.m.m.)

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Densidade de Fluxo Magnético

... A relação entre o vector intensidade do campo magnético  $\vec{H}$  e o **vector indução magnética**  $\vec{B}$  (ou densidade de fluxo magnético) resultante, produzida num determinado material, é dada pela expressão,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad \text{T (tesla) ou Wb/m}^2 \text{ (weber/m}^2\text{)}$$

- $\mu$  é a **permeabilidade magnética** do material onde se produz o campo
- $\mu_r$  é a **permeabilidade relativa** do material onde se produz o campo
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do **vazio**:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m (henry/m)}$$

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Densidade de Fluxo Magnético

... a densidade do fluxo magnético produzido num determinado material é o resultado do produto de dois termos:

- $H$ , que depende da intensidade da corrente  $I$  utilizada para estabelecer o campo e da **geometria** do circuito magnético
- $\mu$ , que tem a ver com a maior ou menor facilidade concedida pelo material para o estabelecimento do campo magnético (depende da sua estrutura atómica).

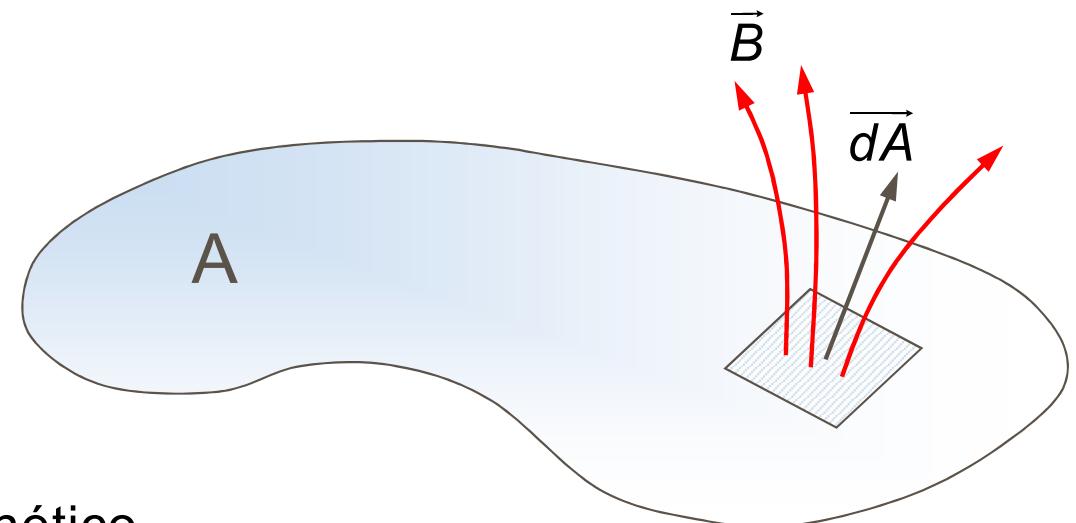
# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Fluxo Magnético

... o **fluxo magnético** através de uma superfície **A** (aberta ou fechada) define-se do seguinte modo:

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{Wb (weber)}$$



$\vec{B}$  → **vector densidade de fluxo magnético**

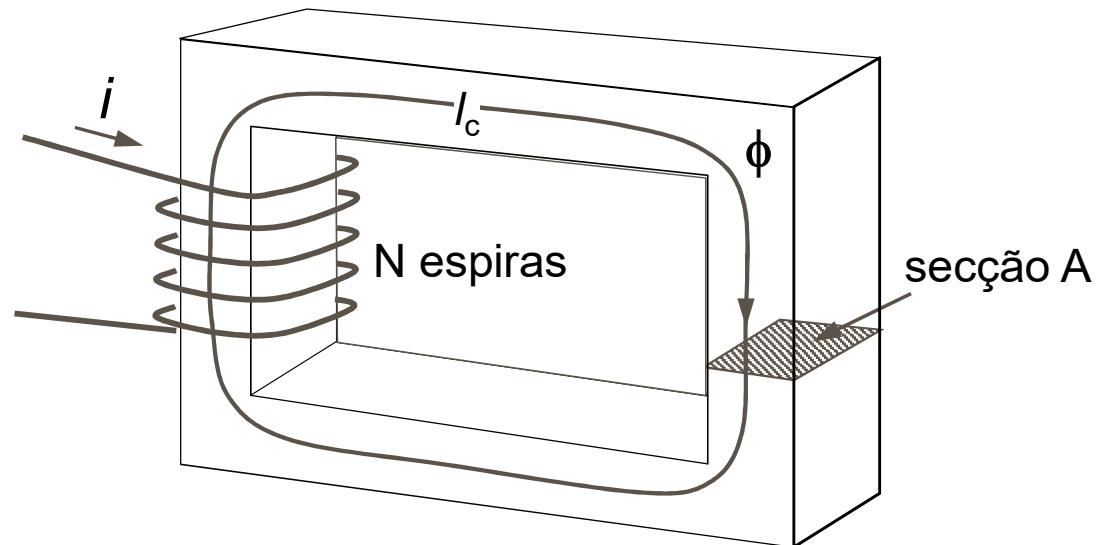
$d\vec{A}$  → **unidade diferencial** de área

# Tópicos Preliminares

- Rudimentos de Magnetismo
  - Fluxo Magnético

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA = \mu HA$$

$$\rightarrow \phi = \frac{\mu NiA}{I_c} = \frac{\mu A}{I_c} \Im$$



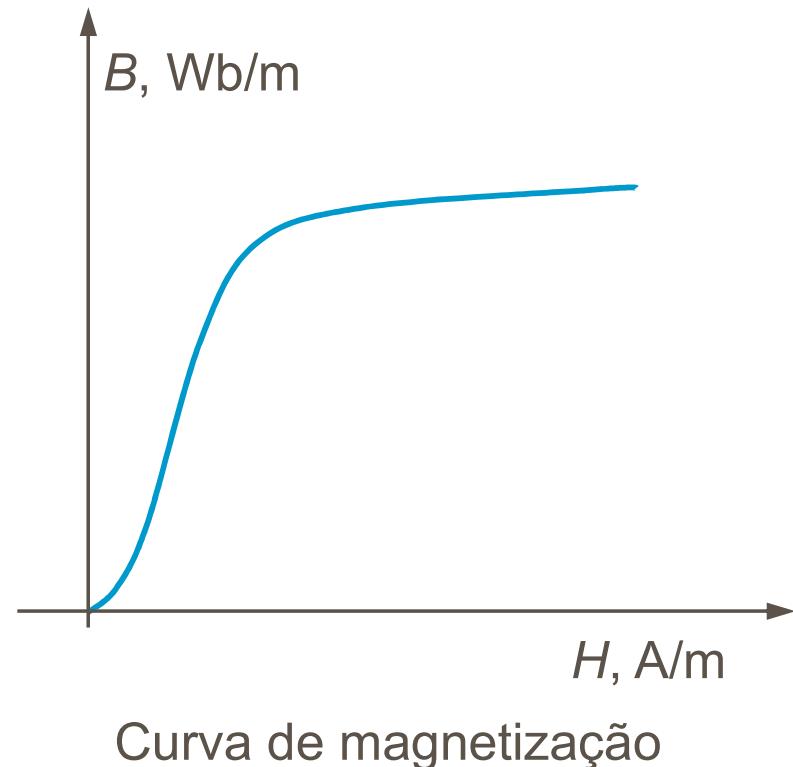
# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Comportamento de Materiais Ferromagnéticos

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

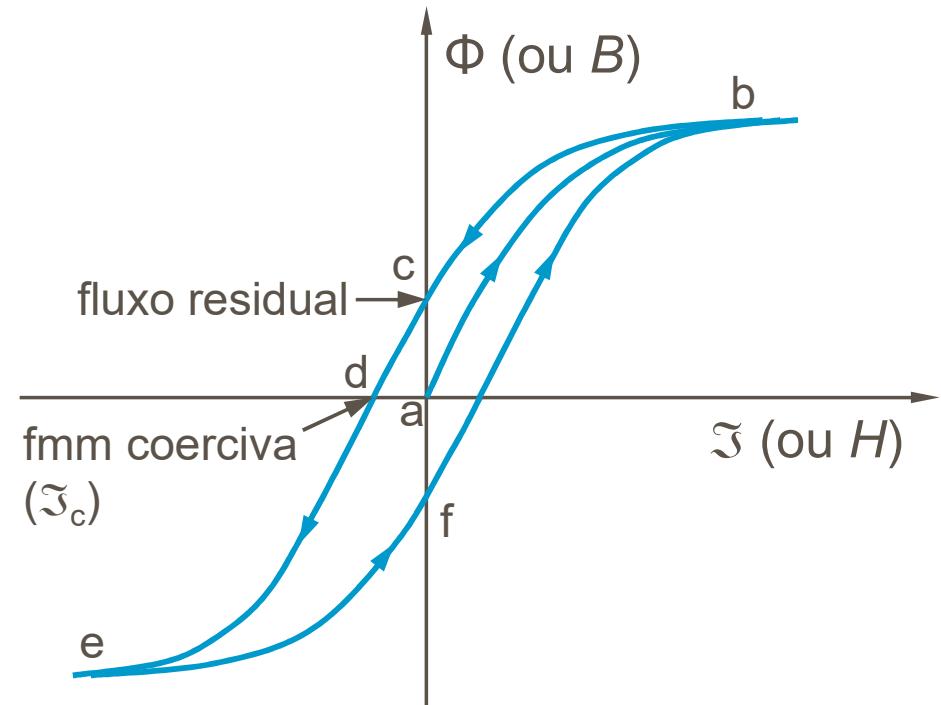
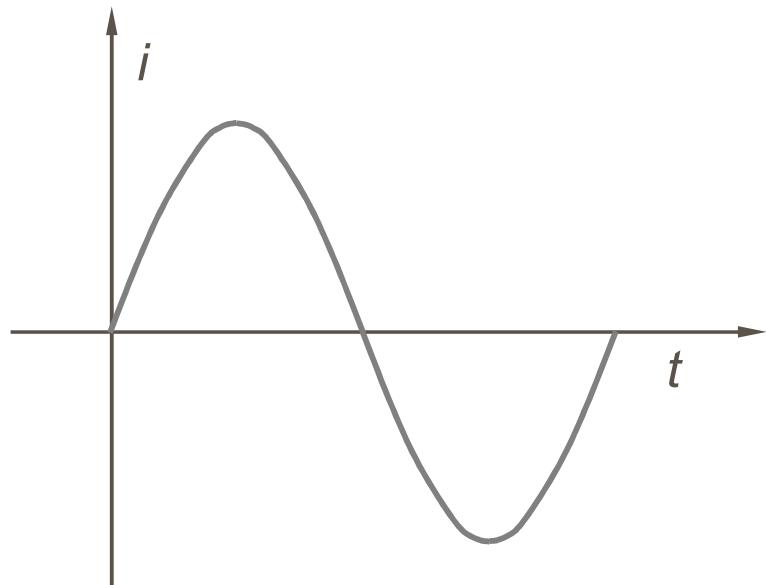
- $\mu$  é constante para o vazio e materiais isotrópicos (a relação entre  $B$  e  $H$  é linear)
- Para os materiais ferromagnéticos  $\mu$  depende do próprio valor da densidade de fluxo magnético (a relação não é linear)



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Perdas nos materiais ferromagnéticos (devidas à histerese)



# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Perdas nos materiais ferromagnéticos (devidas à histerese)

- Perdas por **histerese**

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^{1.5 \text{ a } 2.5} \quad (\text{W/Kg})$$

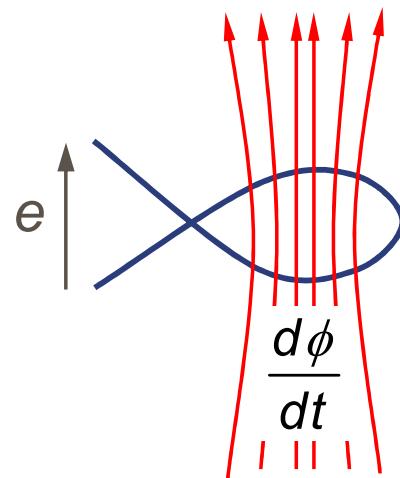
- Perdas devidas às **correntes de Foucault**

$$P_f = K_f \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (\text{W/Kg})$$

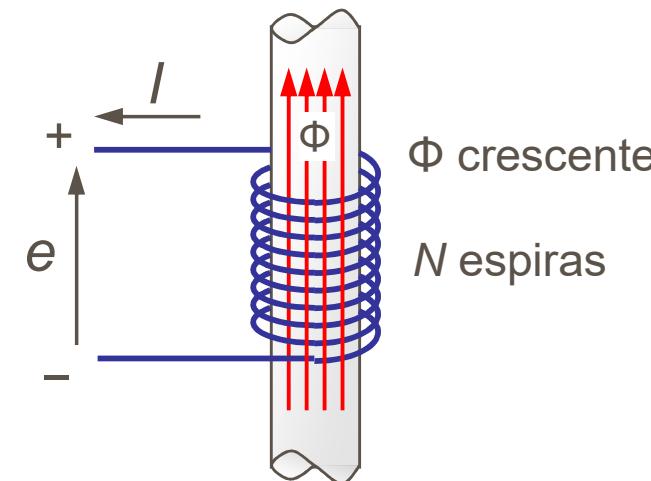
# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Lei de Faraday – f.e.m induzida a partir dum campo magnético variável



$$|e| = \frac{d\phi}{dt}$$



$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{lei de Lenz})$$

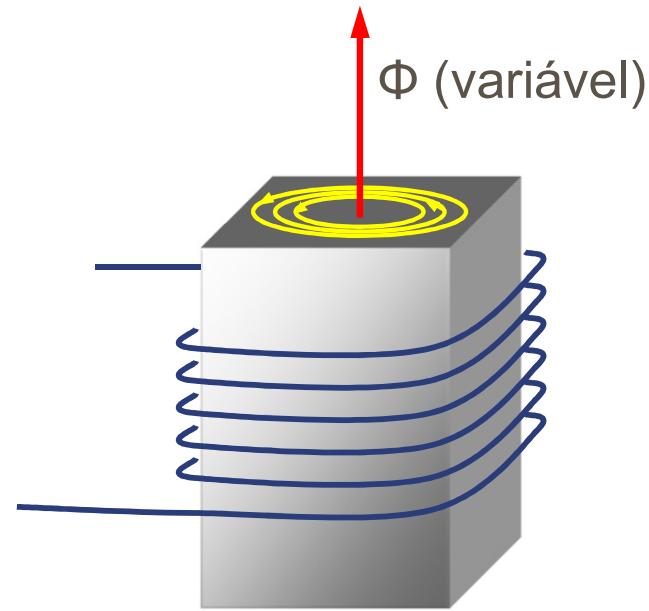
$$\text{para } \psi = N\phi, e = - \frac{d\psi}{dt}$$



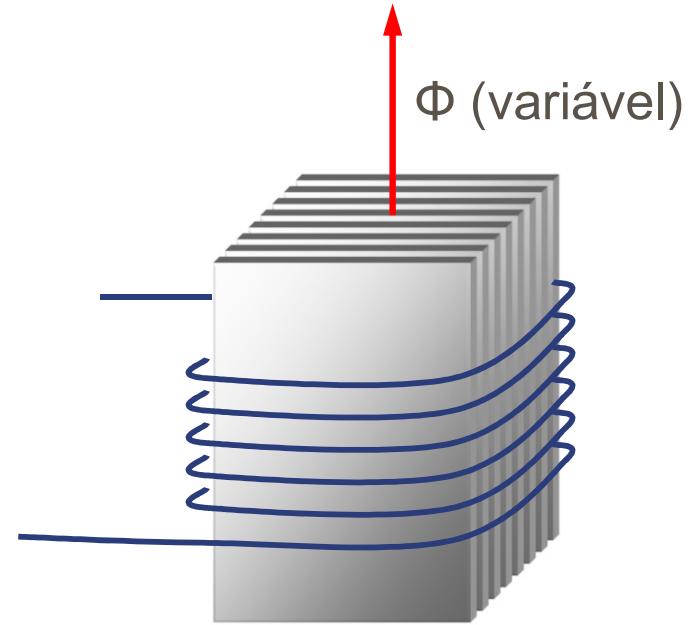
# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Correntes de Foucault



Ferro normal  
(maciço)



Ferro laminado

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Produção de F.E.M num Condutor que se Movimenta num Campo Magnético

... Num condutor que se move no seio dum campo magnético induz-se uma f.e.m que se exprime do seguinte modo:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$$

$\vec{v}$  → velocidade do deslocamento

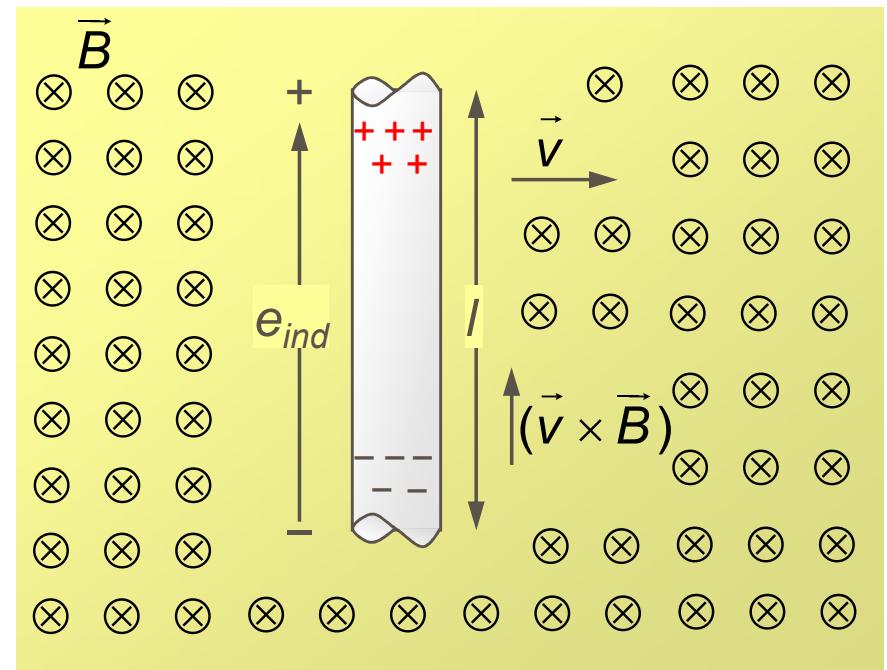
$\vec{B}$  → densidade de fluxo magnético

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Produção de F.E.M num Condutor que se Movimenta num Campo Magnético (exemplo)

$$\begin{aligned} e_{ind} &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = \\ &= v \cdot B \cdot \sin(90^\circ) \cdot l \cdot \cos(0^\circ) \\ &= vBl \end{aligned}$$



## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Produção de Força num Condutor

Um condutor percorrido por uma corrente eléctrica no seio dum campo magnético sofre a acção duma força...

As diferentes grandezas em jogo, relacionam-se do seguinte modo:

$$\vec{F} = i(\vec{I} \times \vec{B})$$

$i$  → intensidade da corrente

$\vec{B}$  → densidade de fluxo magnético

## ■ Rudimentos de Magnetismo

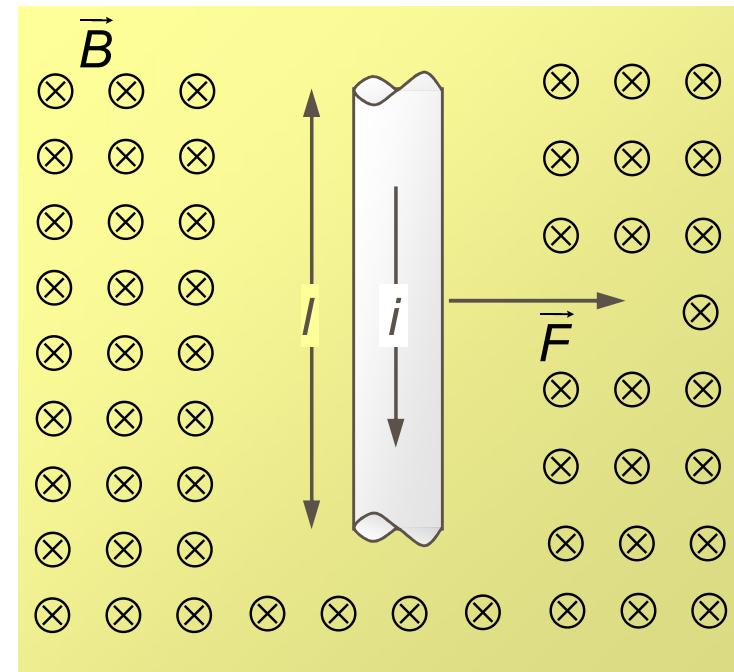
### ■ Produção de Força num Condutor (exemplo)

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B})$$

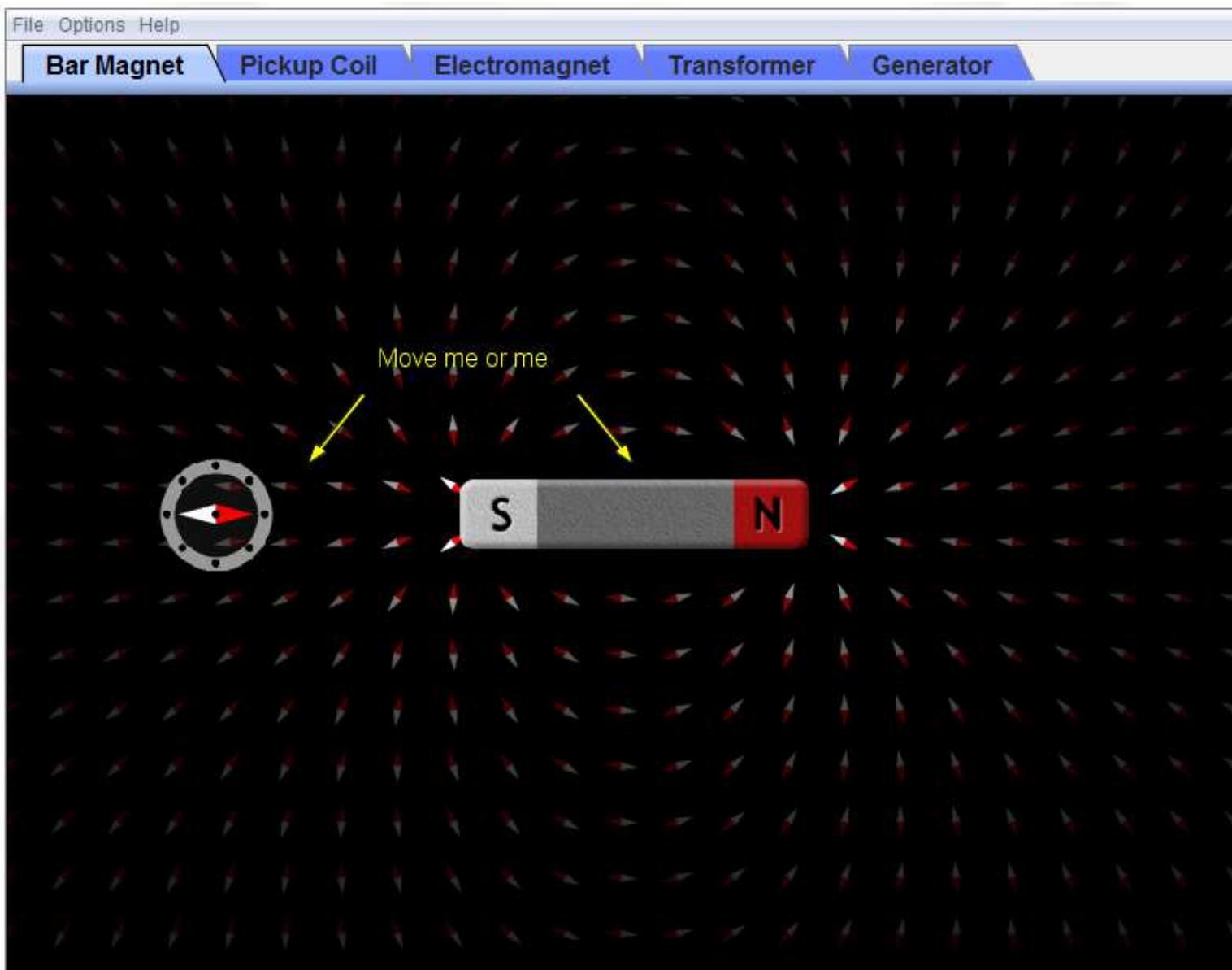
$$= iLB \quad (\text{porque } \vec{l} \perp \vec{B})$$

Caso geral:

$$\vec{F} = iLB \sin(\theta) \quad (\theta = \angle \vec{l}, \vec{B})$$



# “Faraday's Electromagnetic Lab”

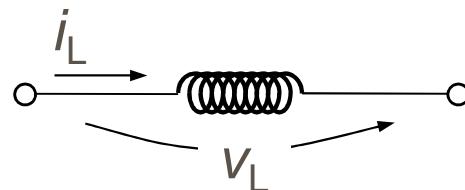


<http://phet.colorado.edu/en/simulation/faraday>

# Tópicos Preliminares

## ■ Rudimentos de Magnetismo

- Bobina (ou Indutor) e Indutância Electromagnética

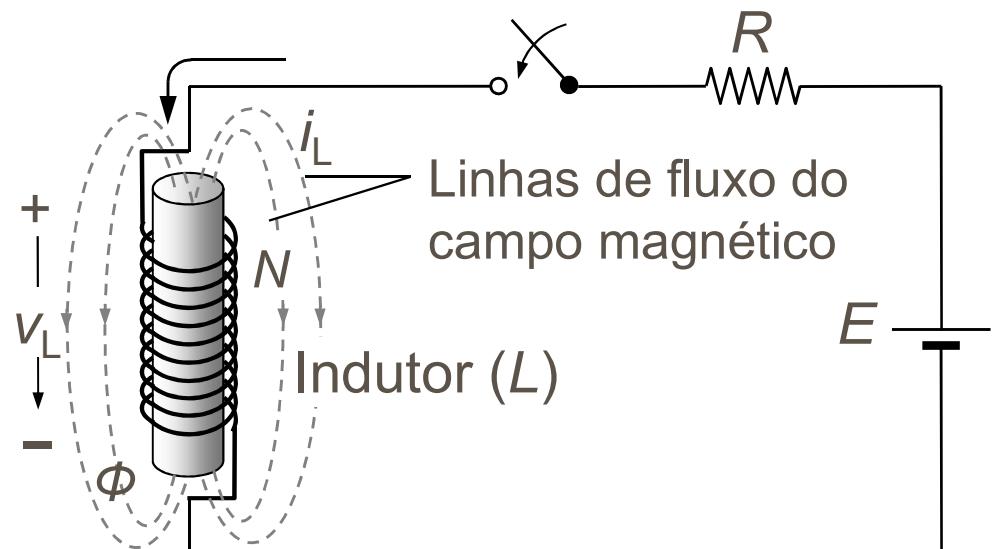


$$N\phi = \psi = Li_L, \quad L = \frac{\psi}{i_L} \quad \text{H (henry)}$$

$$v_L = \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{lei de Faraday})$$

$$\rightarrow v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

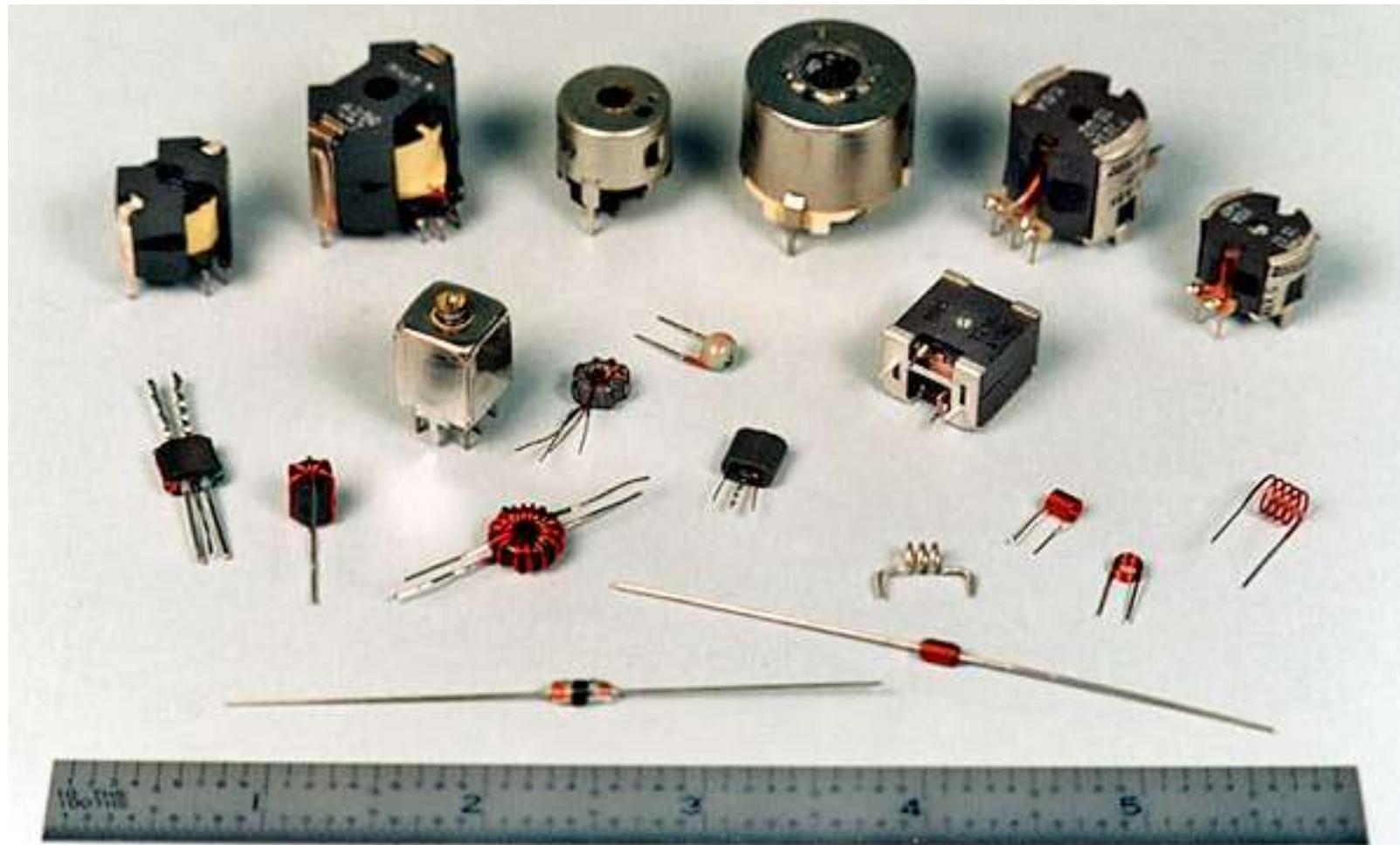
$$\rightarrow W_L = \frac{1}{2} LI_L^2 \quad (W_L \text{ é a energia armazenada no campo magnético da bobina})$$



# Tópicos Preliminares

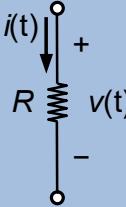
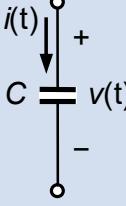
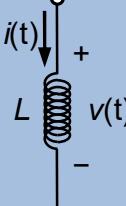
## ■ Rudimentos de Magnetismo

### ■ Indutores



# Tópicos Preliminares

## ■ Componentes Electrónicos Básicos (resumo)

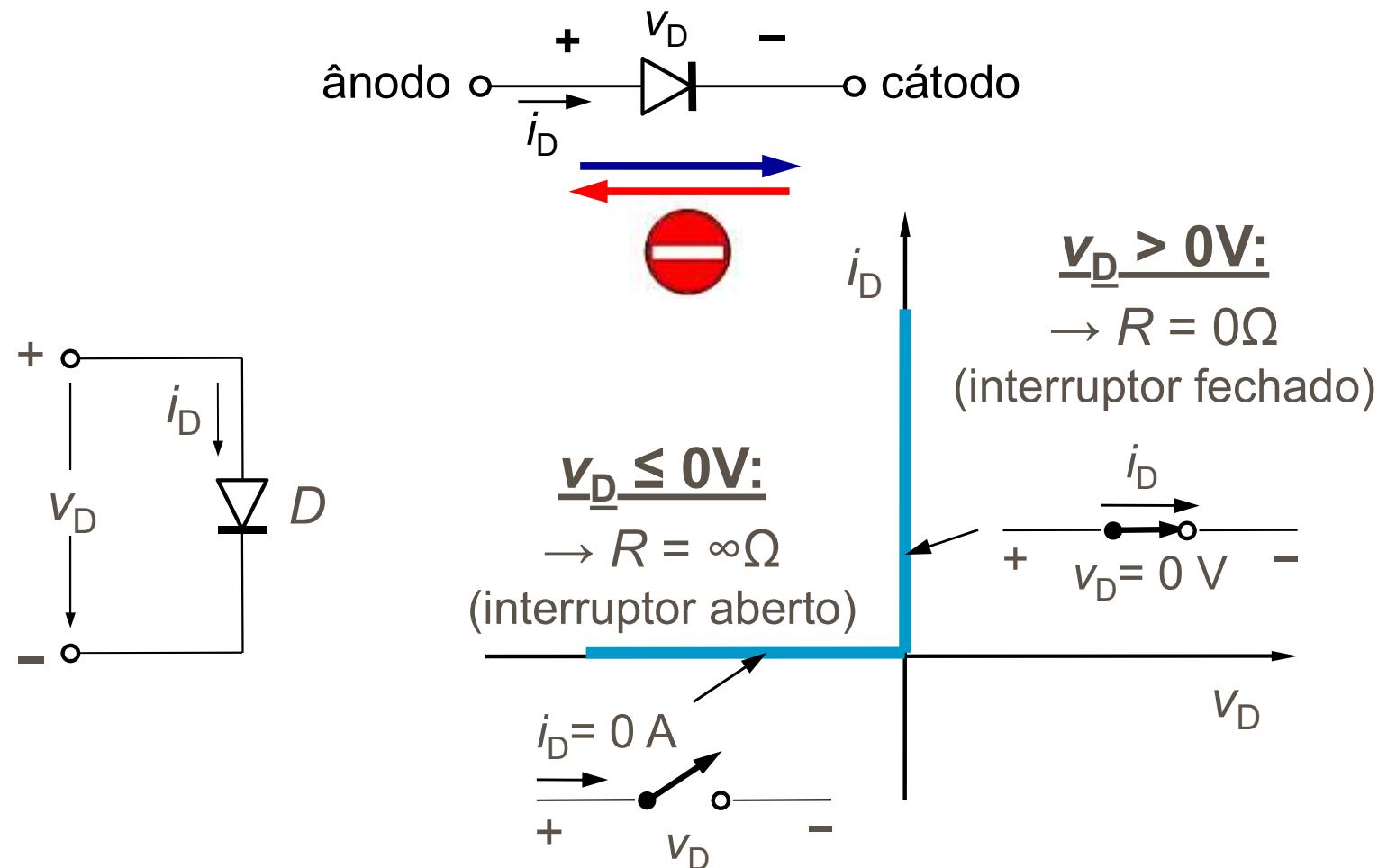
Componente	Relação $v(t)$ / $i(t)$	Comentário
	$v(t) = R \times i(t)$	<b>Dissipa energia (convertida em calor).</b> A potência dissipada é, $P = R \cdot i^2 = \frac{V^2}{R}$
	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$ ou $v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + v(0^+)$	<b>Armazena energia sob a forma de um campo eléctrico:</b> $W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$
	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ ou $i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau + i(0^+)$	<b>Armazena energia sob a forma de um campo magnético:</b> $W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$

# Componentes Electrónicos Básicos

# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Característica $v-i$ do díodo

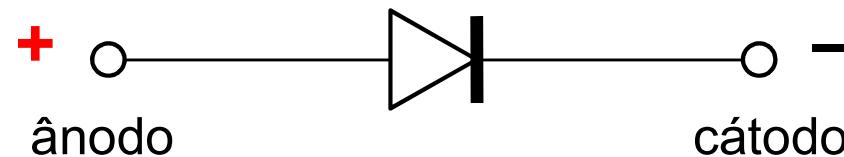


# Díodo Semicondutor

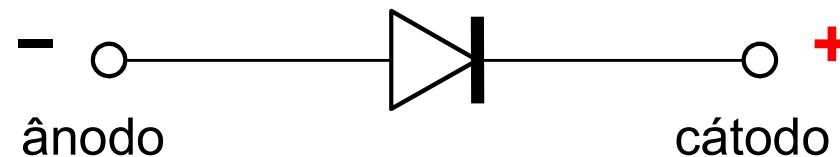
## ■ Comportamento do Díodo Ideal

- Característica  $v-i$  do díodo

Directamente polarizado



Inversamente polarizado



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

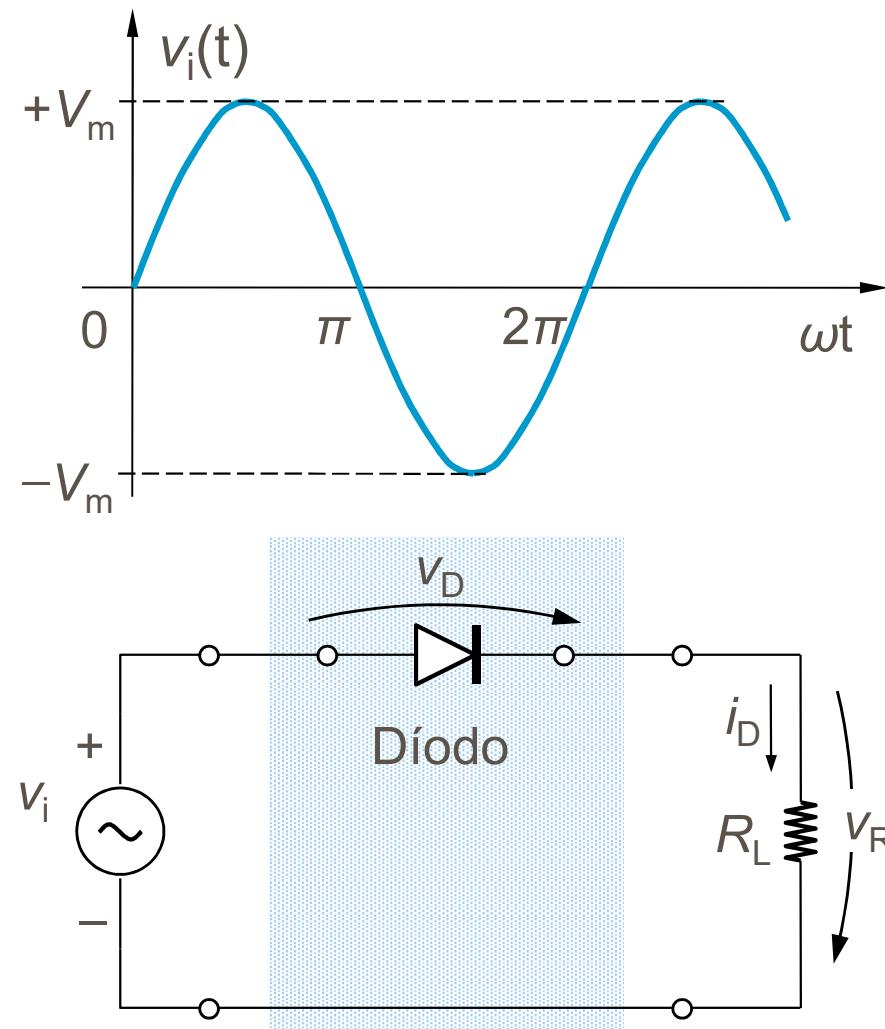
- Análise de circuitos com díodos (exemplo)

$$v_i = V_m \operatorname{sen}(\omega t)$$

$$i_D = ?$$

$$\begin{aligned} v_i(t) &= v_R + v_D \\ v_i(t) &= R_L i_D + v_D \end{aligned}$$

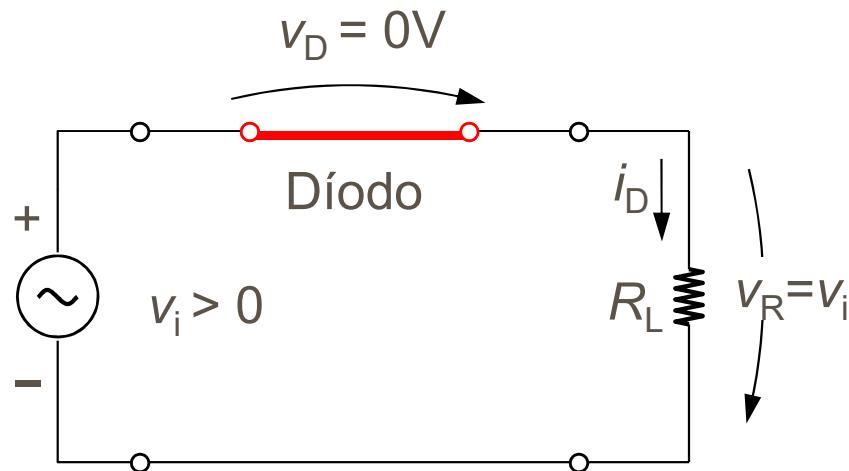
$$i_D = \frac{v_i - v_D}{R_L}$$



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Exemplo



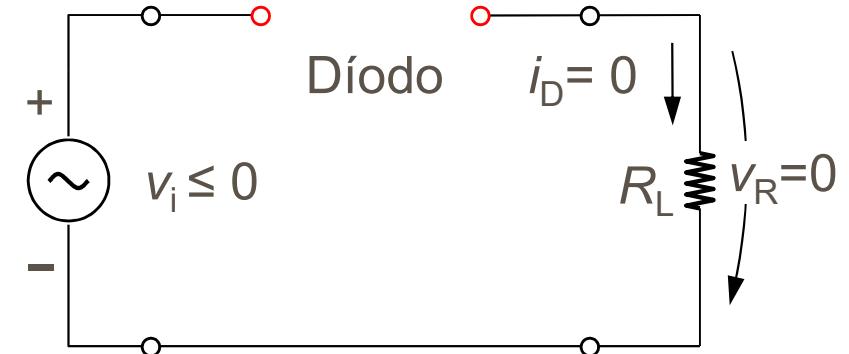
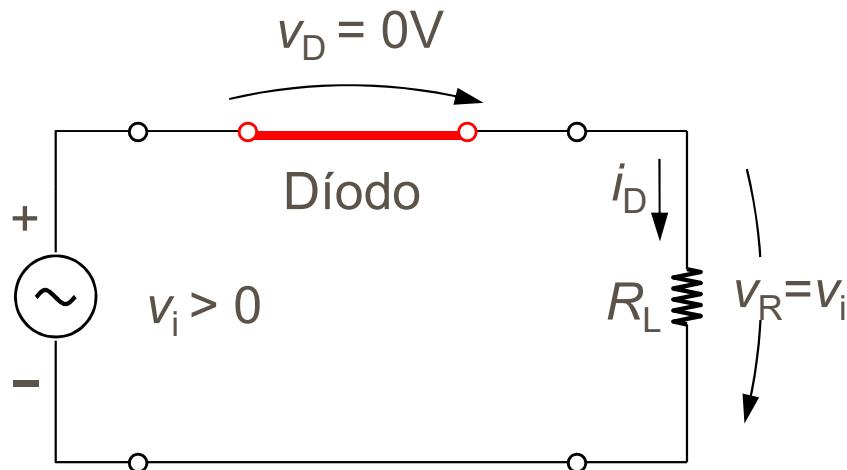
Para  $v_i > 0$ :

$$i_D = \frac{v_i}{R_L} = \frac{V_m}{R_L} \operatorname{sen}(\omega t)$$

# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Exemplo



Para  $v_i > 0$ :

$$i_D = \frac{v_i}{R_L} = \frac{V_m}{R_L} \operatorname{sen}(\omega t)$$

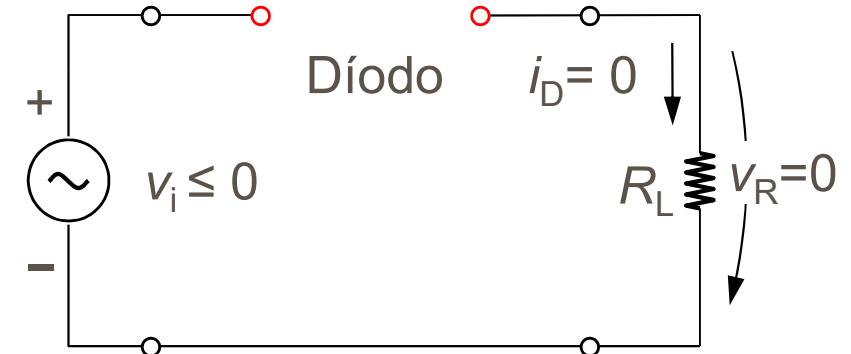
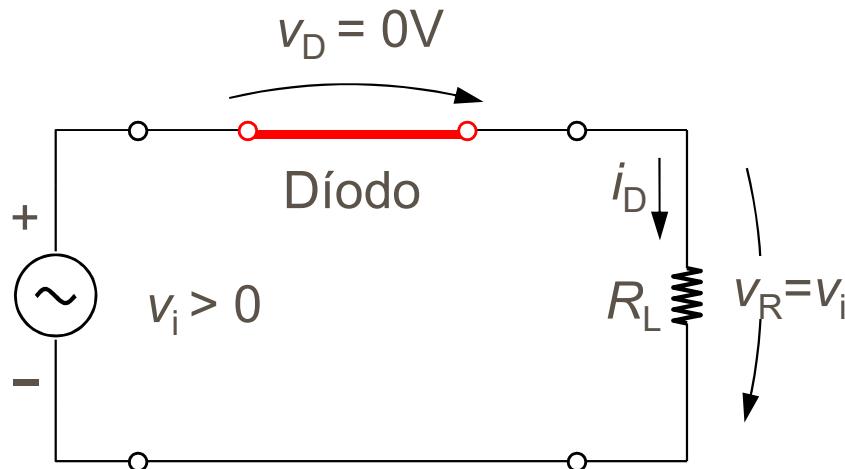
Para  $v_i \leq 0$ :

$$i_D = 0$$

# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Exemplo



Para  $v_i > 0$ :

$$i_D = \frac{v_i}{R_L} = \frac{V_m}{R_L} \operatorname{sen}(\omega t)$$

$$v_R = R_L i_D$$

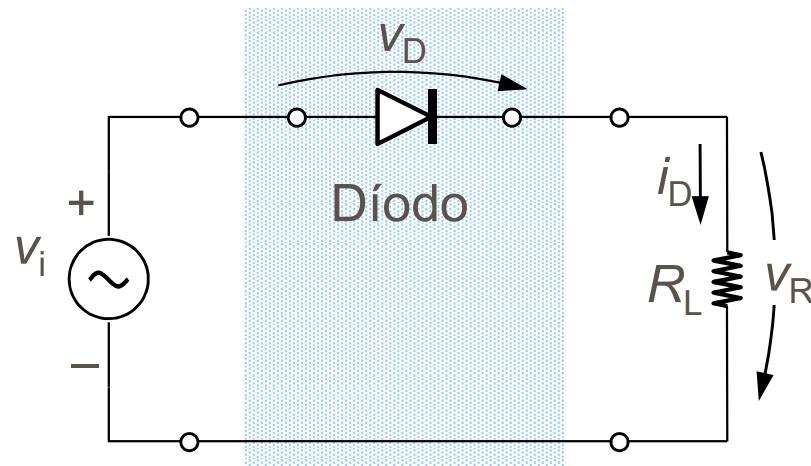
Para  $v_i \leq 0$ :

$$i_D = 0$$

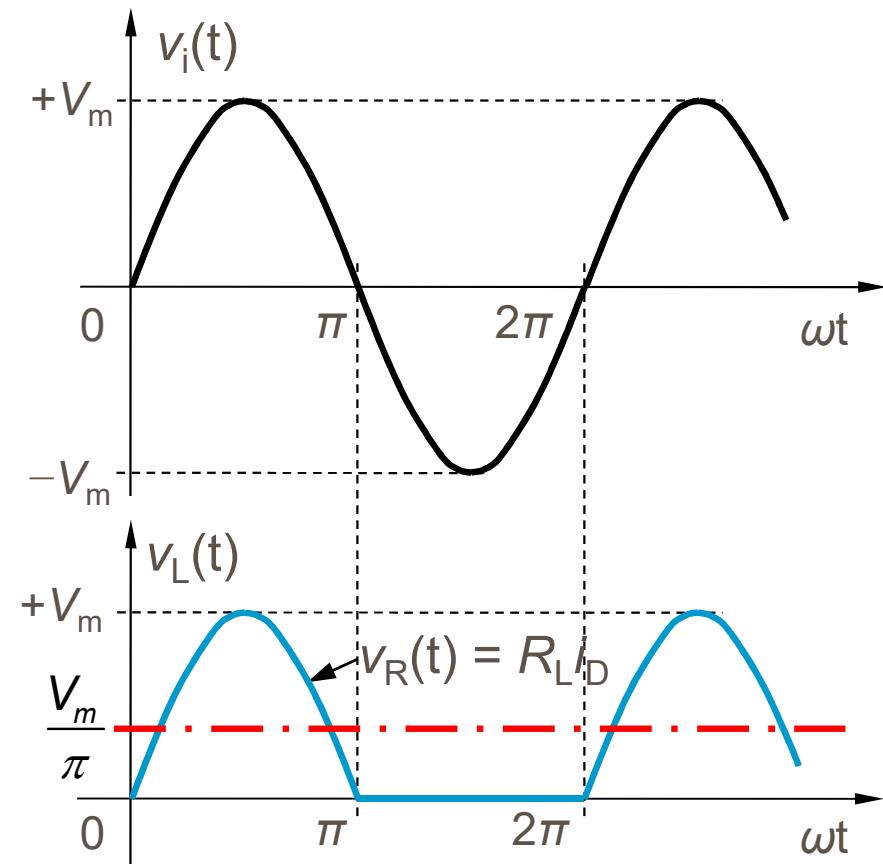
# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Exemplo



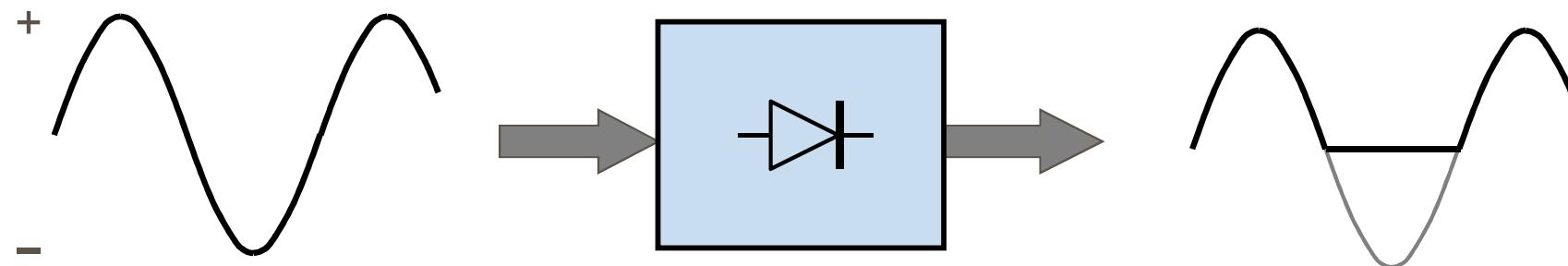
$$V_{Rmed} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \operatorname{sen}(\omega t) dt = \frac{V_m}{\pi}$$



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

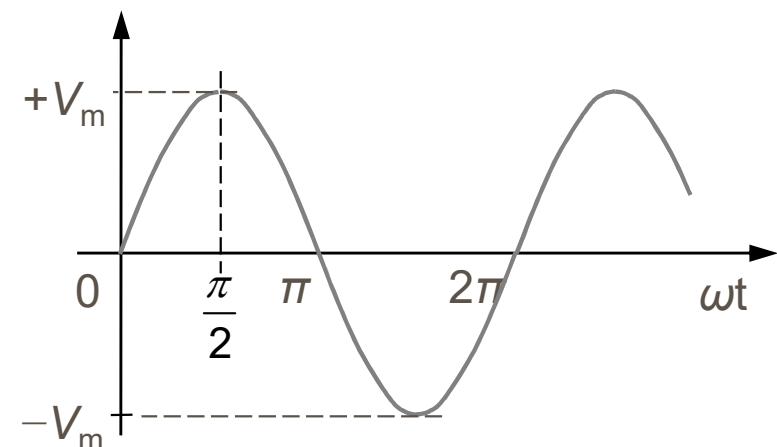
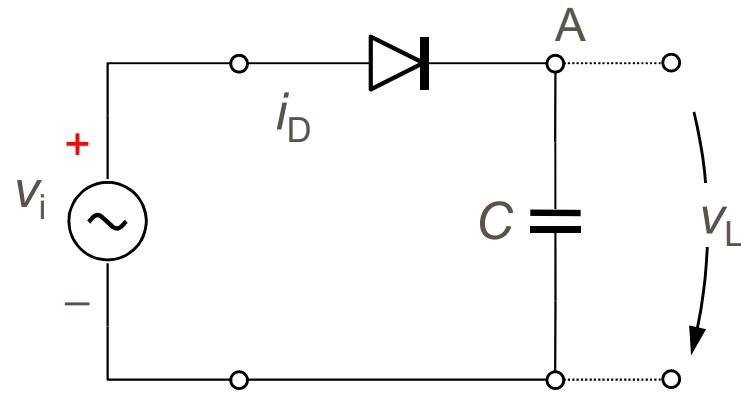
### ■ Bloco Rectificador



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

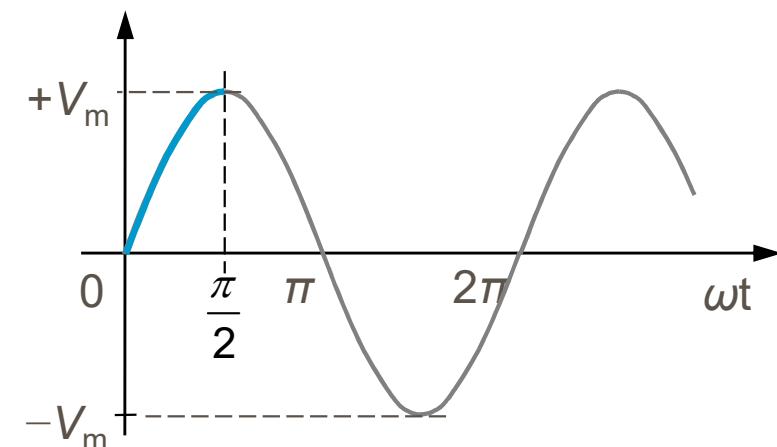
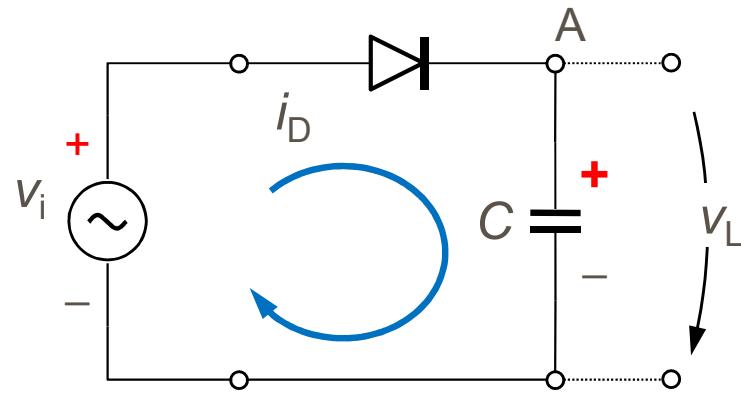
- Detector de Pico



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

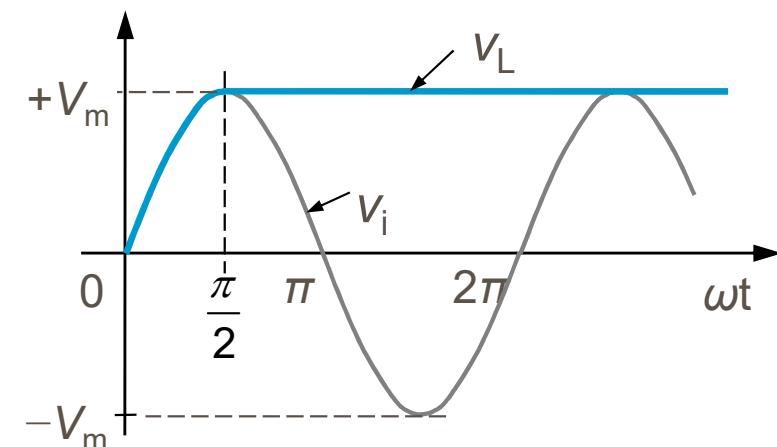
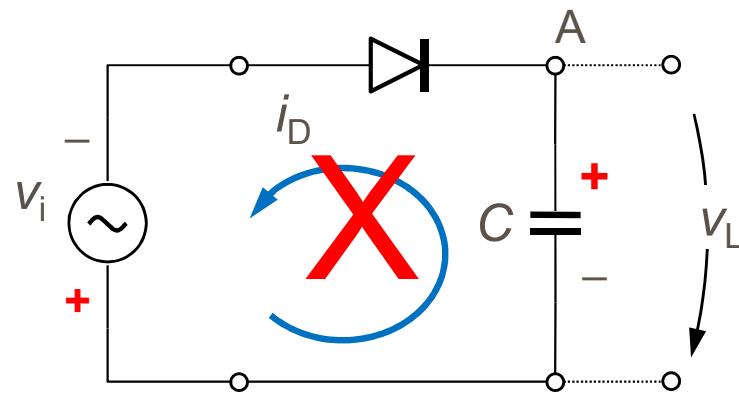
### ■ Detector de Pico



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

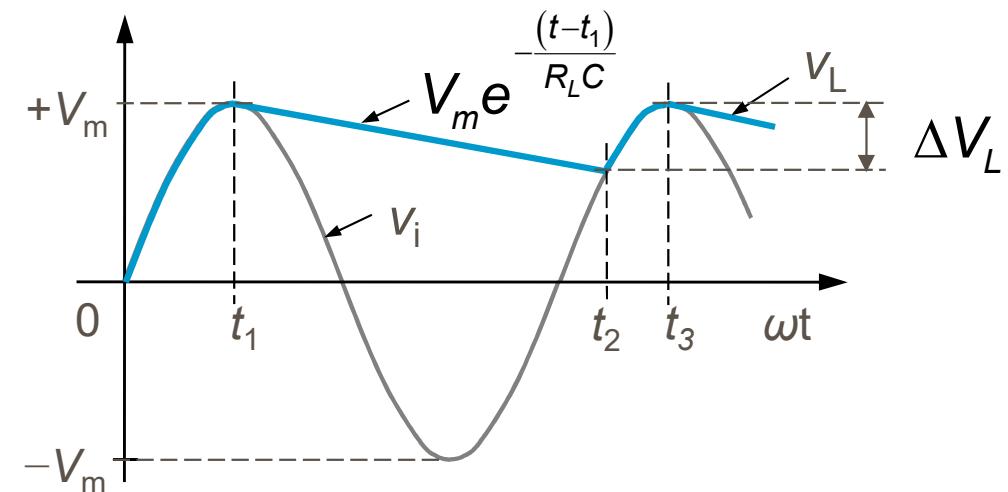
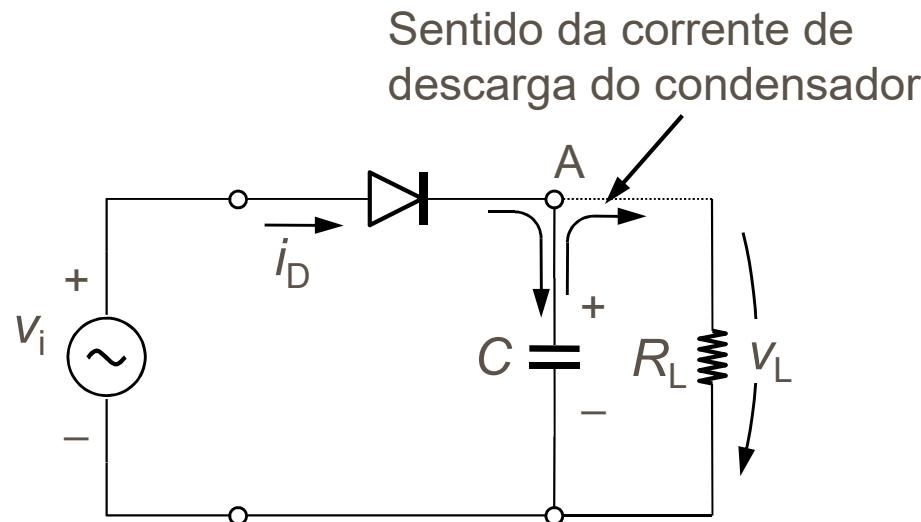
- Detector de Pico



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Ideal

### ■ Detector de Pico (com carga)



Admitindo que  $i_D \approx cte = \frac{V_m}{R_L}$

$$i_D \approx C \frac{\Delta V_L}{\Delta t} \rightarrow \Delta V_L = \frac{i_D}{C} \Delta t \approx \frac{V_m}{f \cdot R_L C}$$

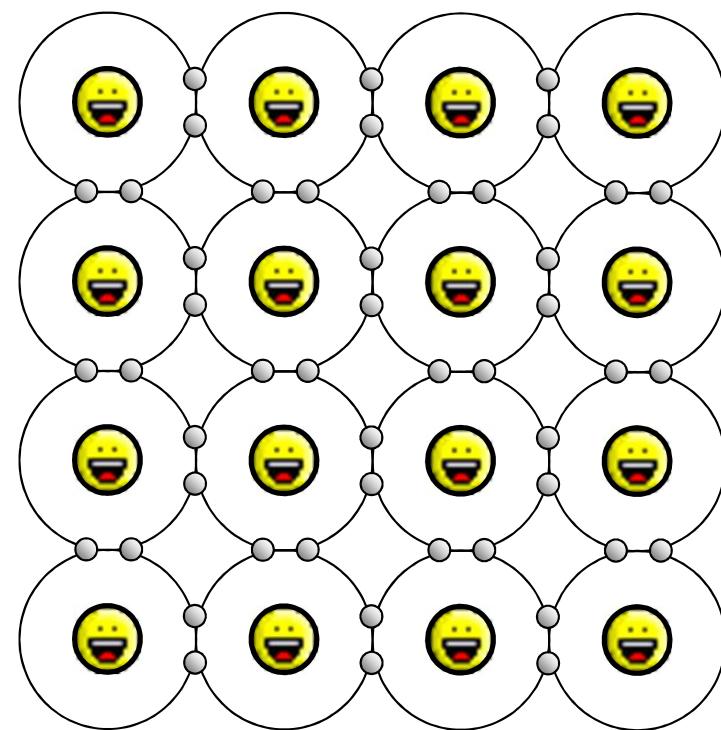
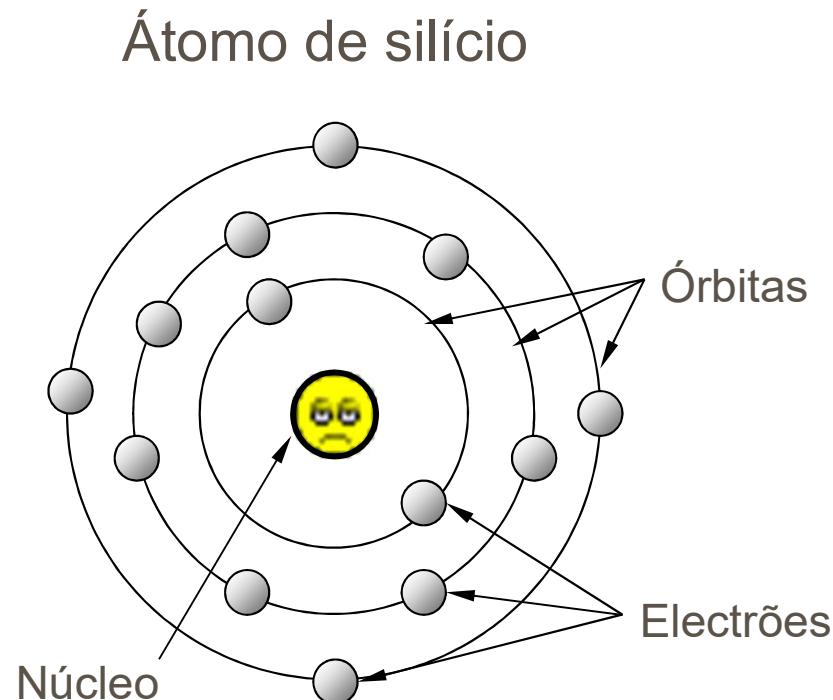
O valor médio da tensão de saída é:

$$\rightarrow V_L \approx V_m - \frac{1}{2} \Delta V_L = V_m \left( 1 - \frac{1}{2f \cdot R_L C} \right)$$

# Díodo Semicondutor

## ■ Princípios de física dos semicondutores

- Funcionamento do díodo semicondutor – junção P-N



Cristal de silício (estrutura)

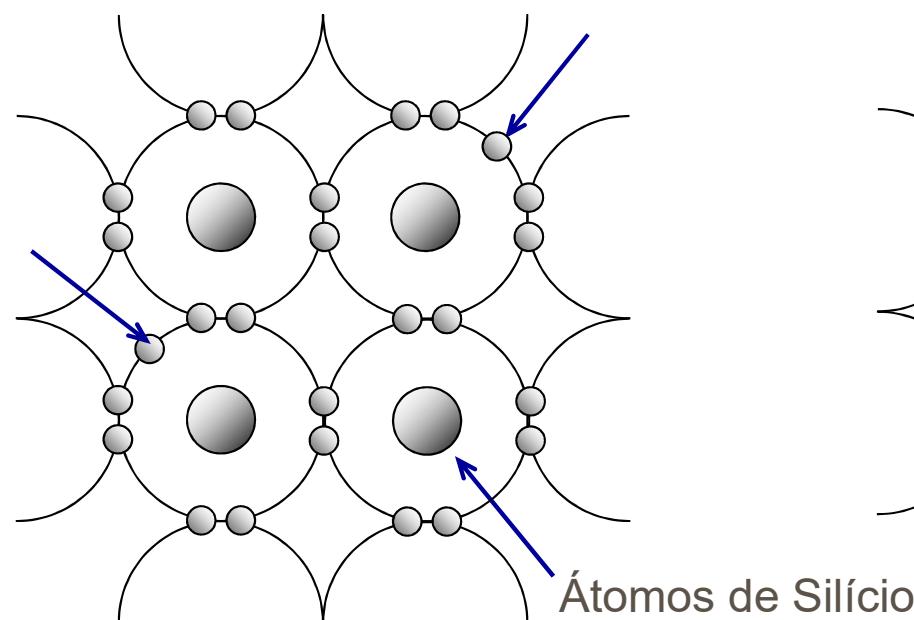
# Díodo Semicondutor

## ■ Princípios de Física dos Semicondutores

### ■ Funcionamento do díodo semicondutor – junção P-N

#### Semicondutor tipo-N

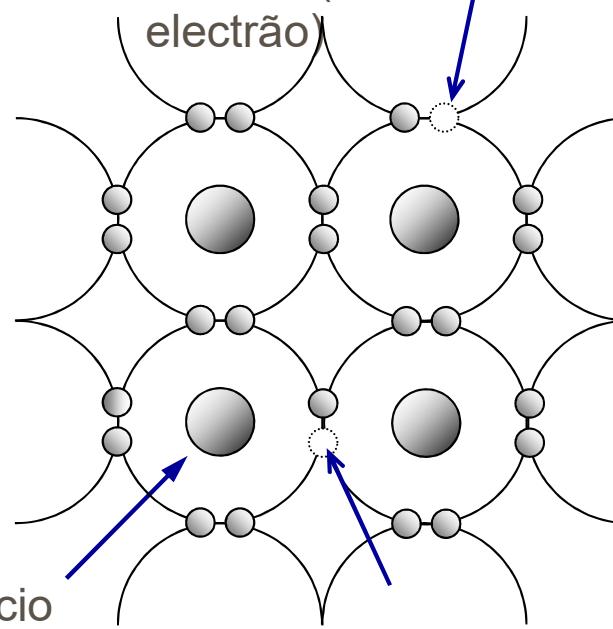
Resultado da dopagem:  
electrões extra



Fósforo

#### Semicondutor tipo-P

Resultado da dopagem:  
lacunas (ausência de um  
electrão)

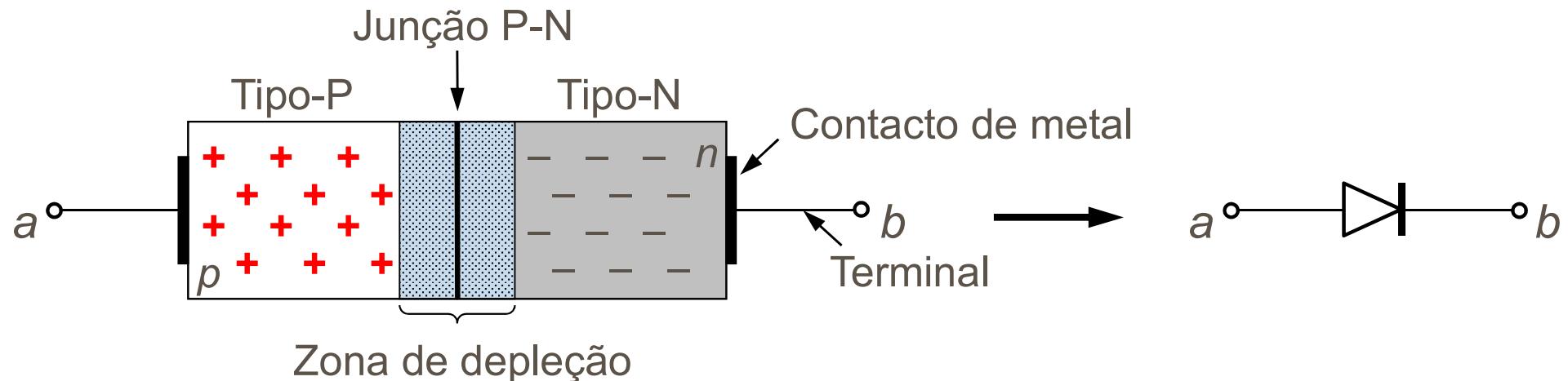


Boro

# Díodo Semicondutor

## ■ Princípios de Física dos Semicondutores

### ■ Funcionamento da junção P-N

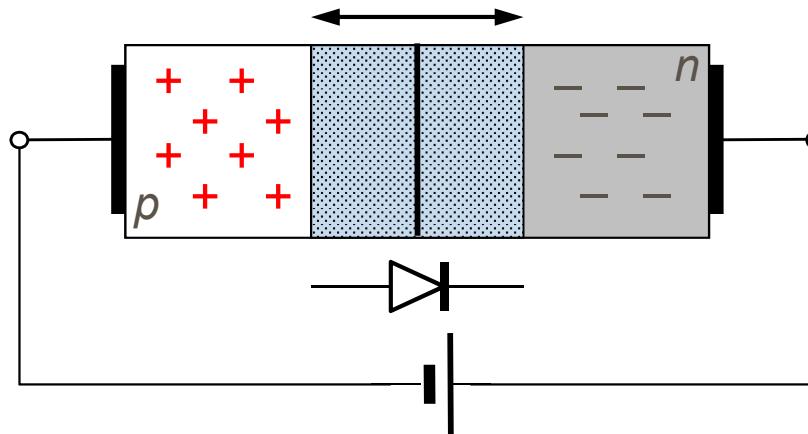


# Díodo Semicondutor

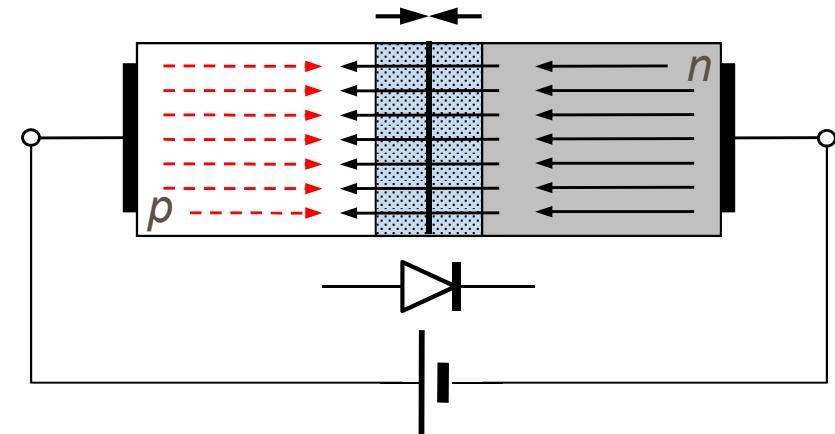
## ■ Princípios de Física dos Semicondutores

### ■ Funcionamento da junção P-N

Junção inversamente polarizada

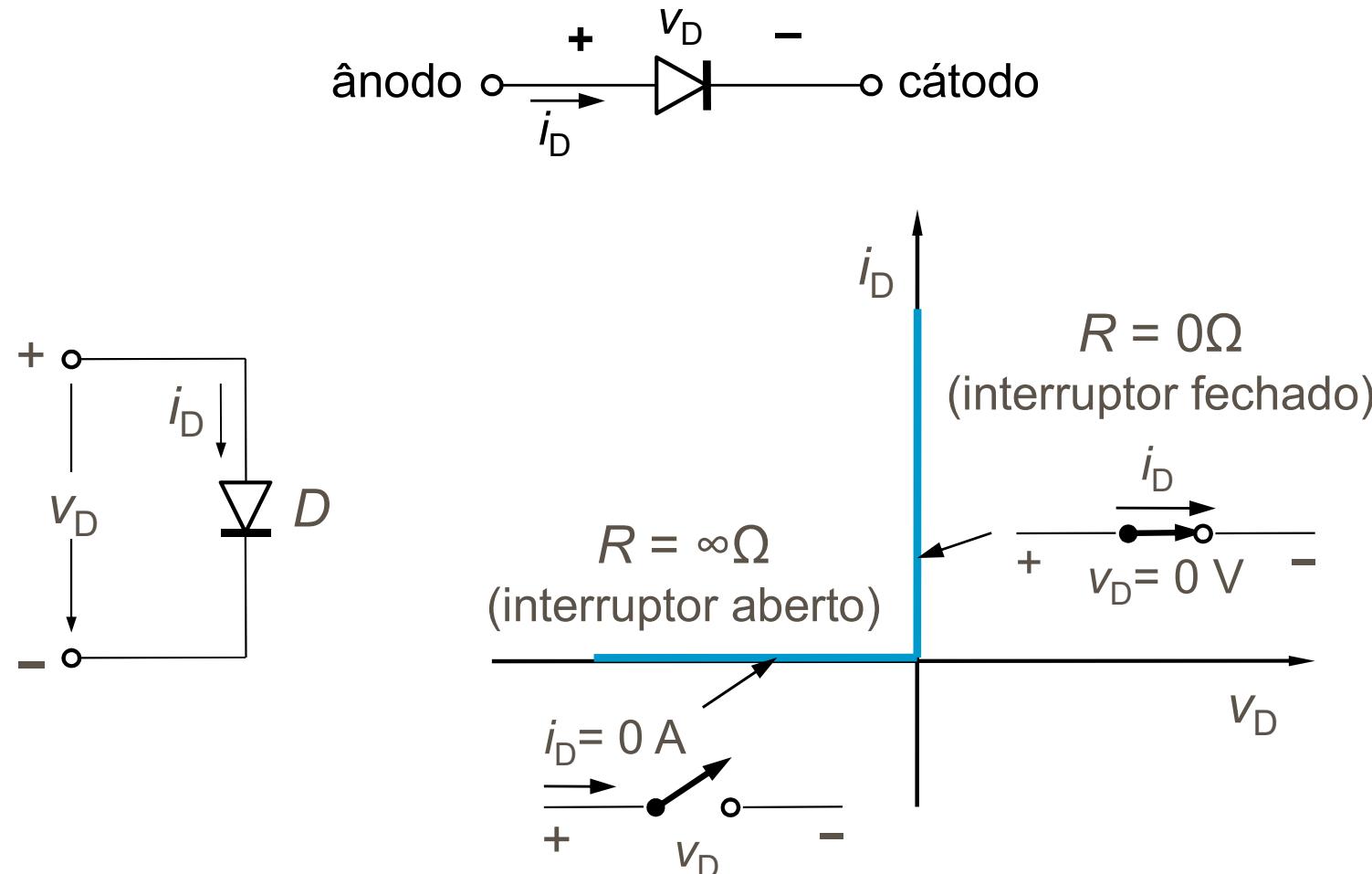


Junção directamente polarizada



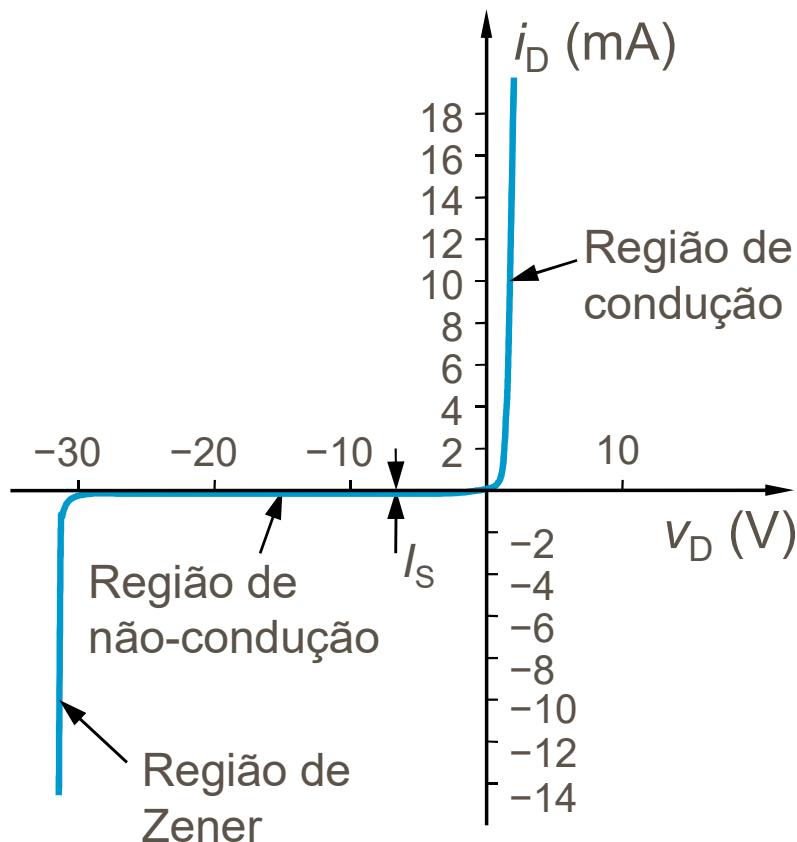
# Díodo Semicondutor

## ■ Característica $v-i$ do Díodo Ideal

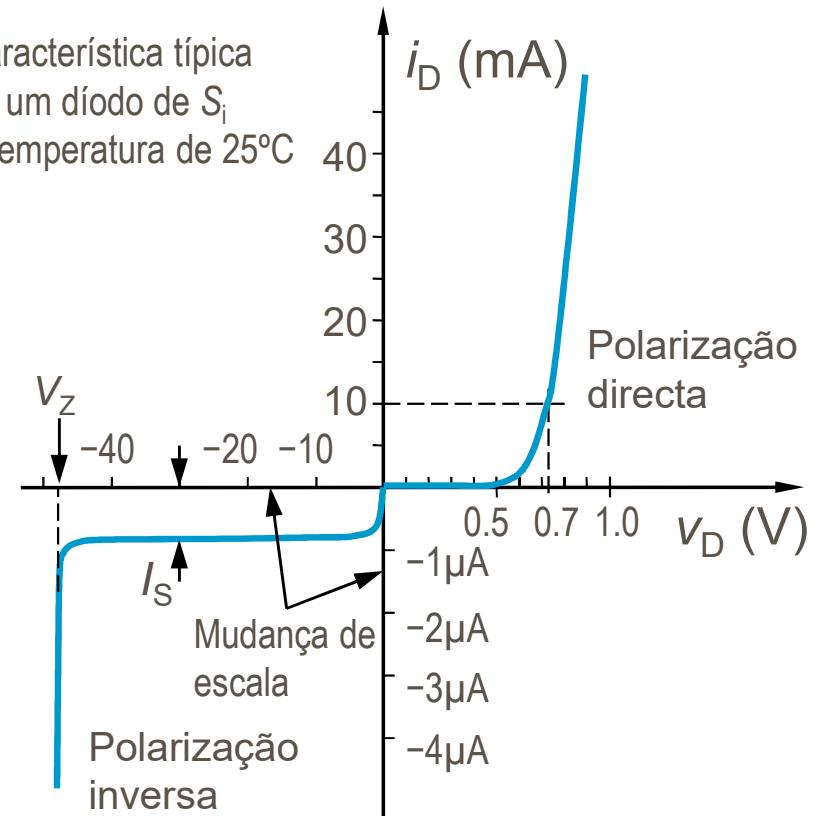


# Díodo Semicondutor

## ■ Característica V-I do Díodo Semicondutor

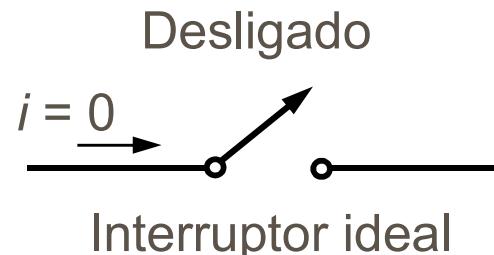


Característica típica  
de um díodo de Si  
à temperatura de 25°C

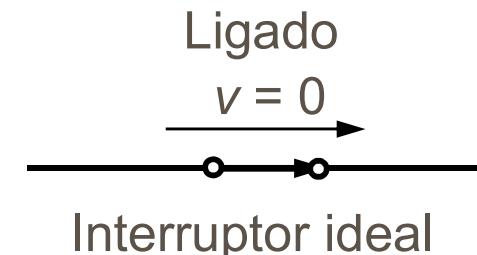


# Díodo Semicondutor

## ■ Característica V-I do Díodo Semicondutor



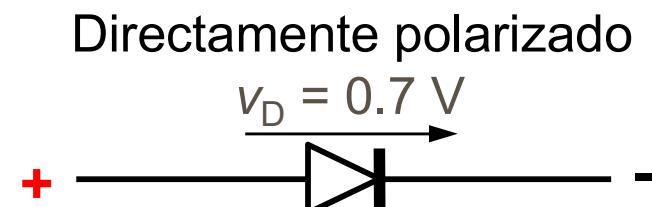
$$p = v \cdot i = v \cdot 0A = 0 \text{ W}$$



$$p = v \cdot i = 0V \cdot i = 0 \text{ W}$$



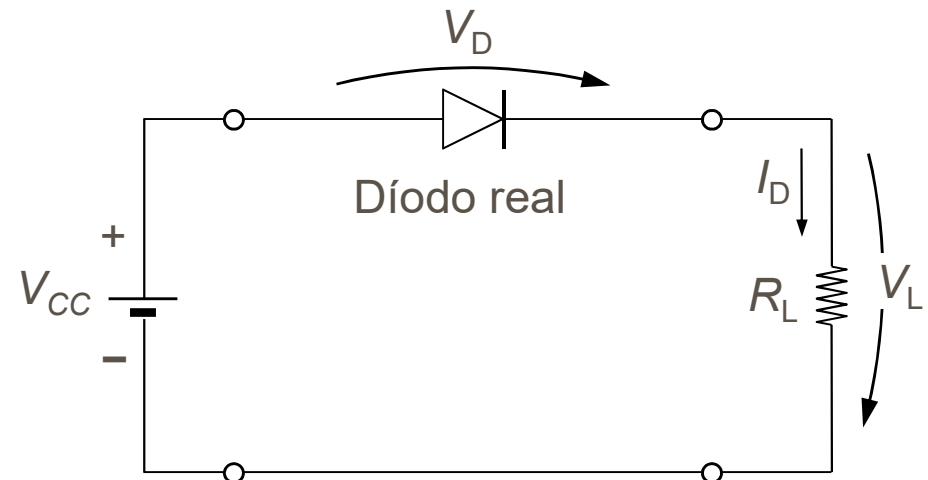
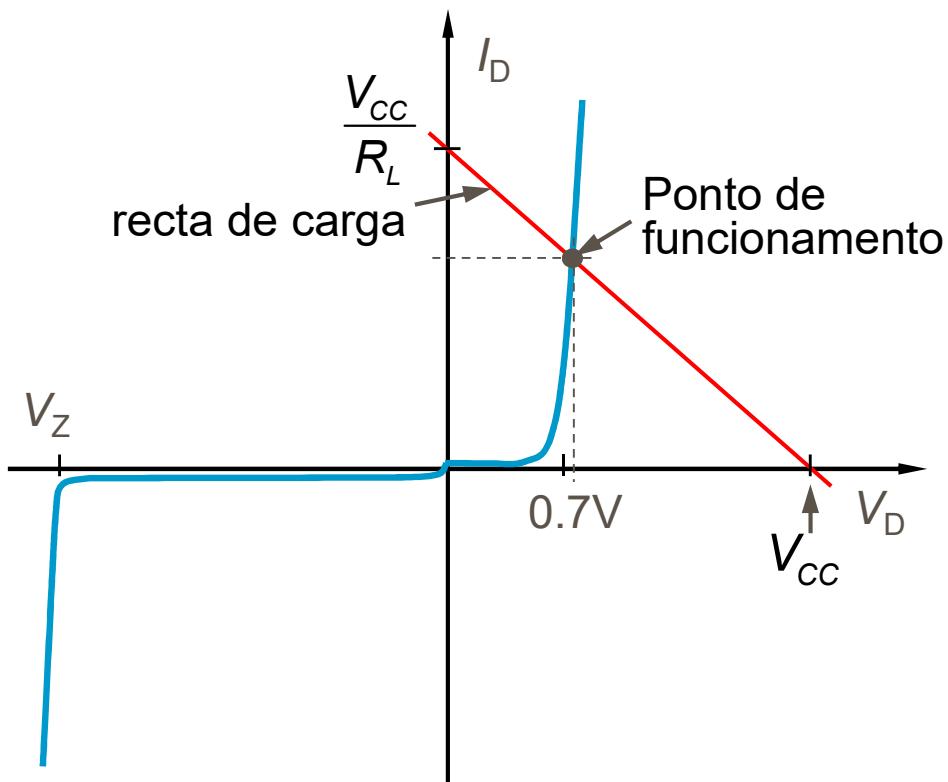
$$p_D = v_D \cdot i_D \approx v_D \cdot 0A = 0 \text{ W}$$



$$p_D = v_D \cdot i_D \approx 0.7V \cdot i_D$$

# Díodo Semicondutor

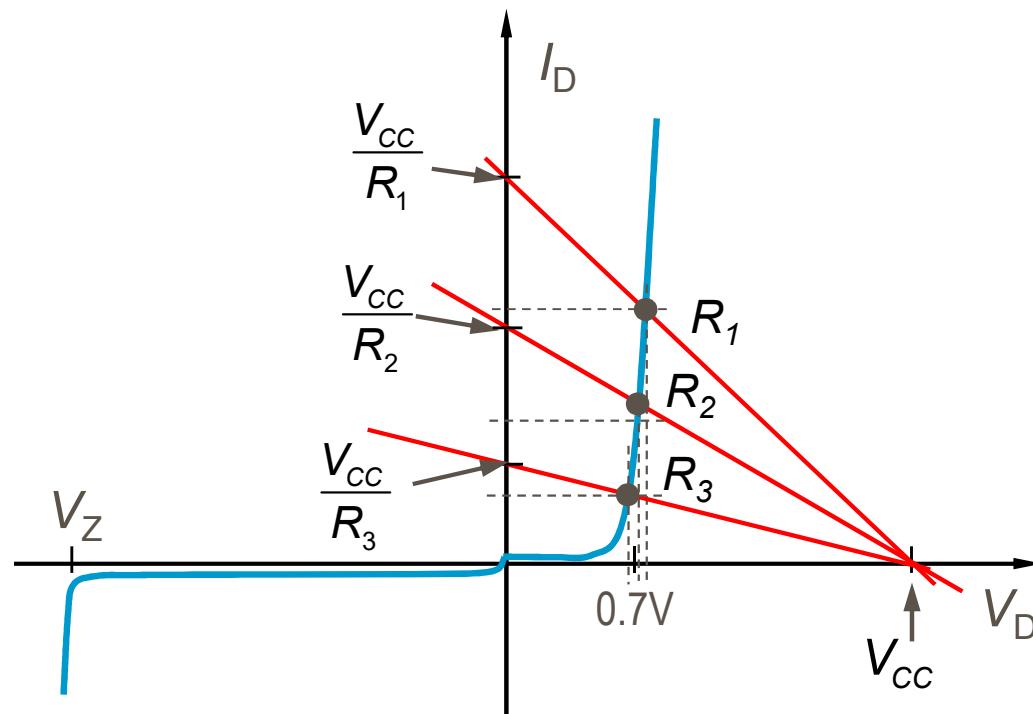
## ■ Polarização do Díodo Semicondutor



$$V_{CC} = R_L I_D + V_D \rightarrow \text{Recta de carga}$$

# Díodo Semicondutor

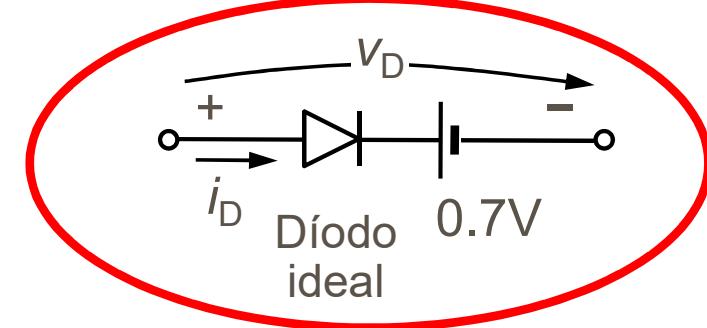
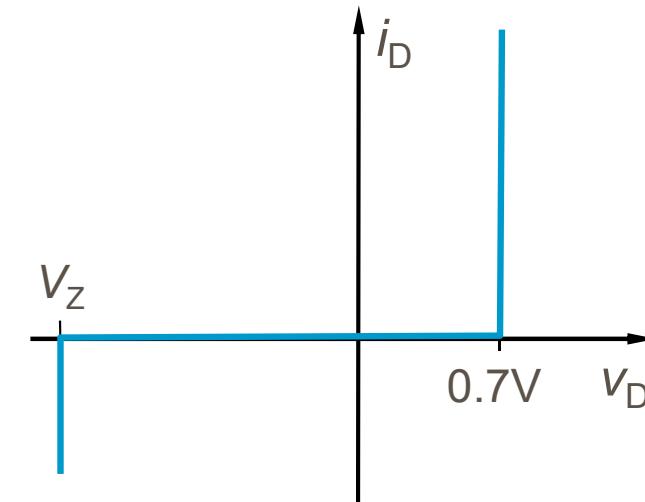
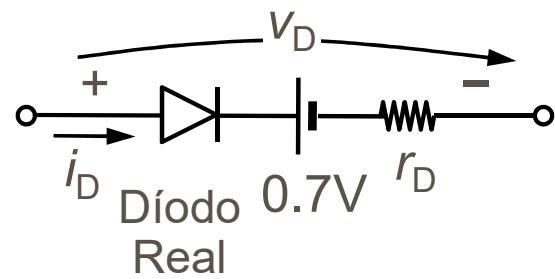
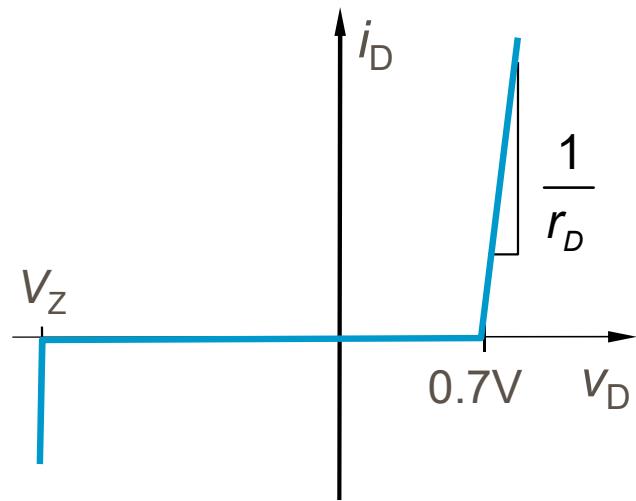
## ■ Polarização do Díodo Semicondutor



$$R_1 < R_2 < R_3$$

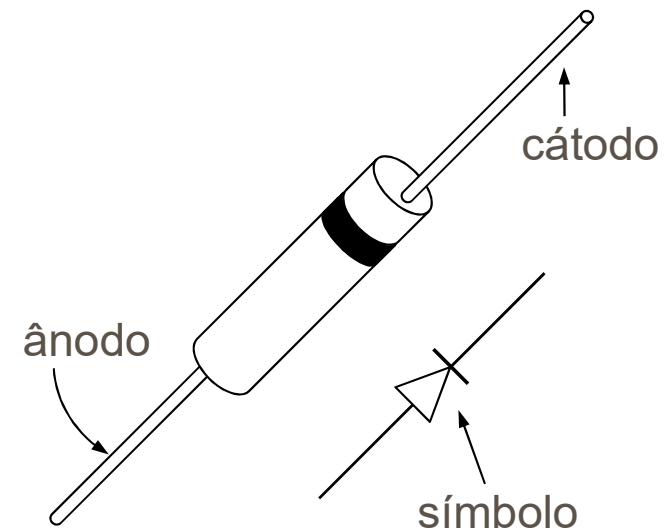
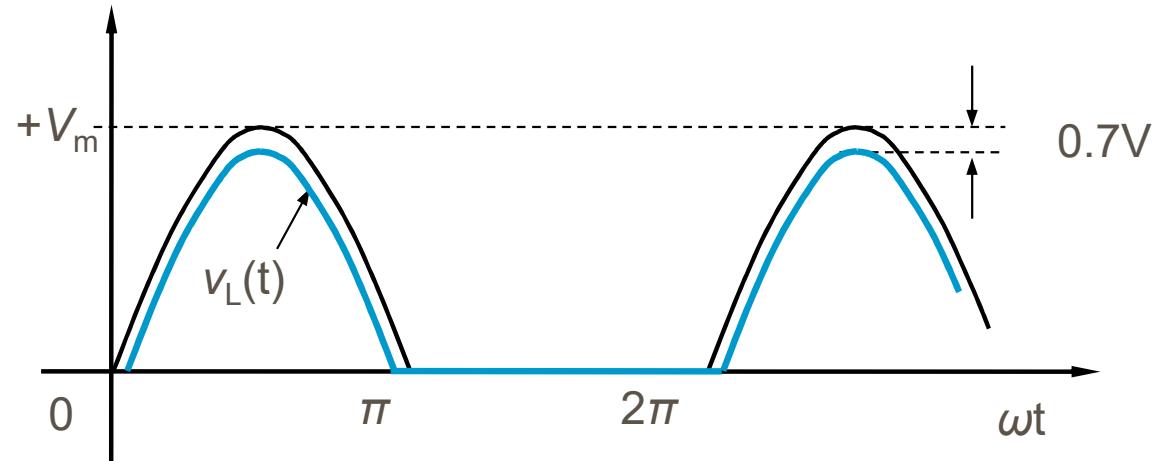
# Díodo Semicondutor

## ■ Aproximações da Característica V-I do Díodo Semicondutor



# Díodo Semicondutor

## ■ Comportamento do Díodo Semicondutor



# Díodo Semicondutor

## ■ Tipos de Díodos

Pequenos Sinais



Díodo de Potência



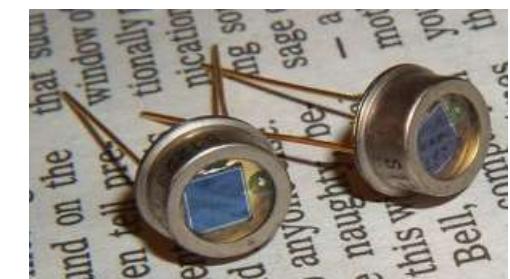
Emissor de Luz (LED)



Díodo de Zener

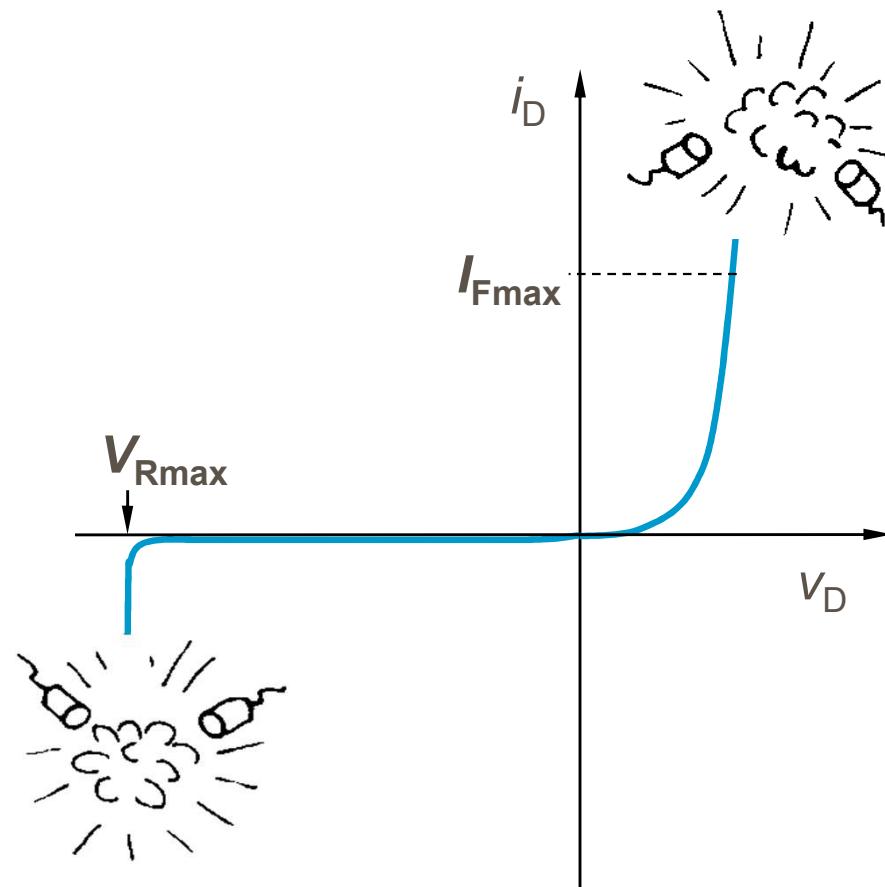


Fotodíodo



# Díodo Semicondutor

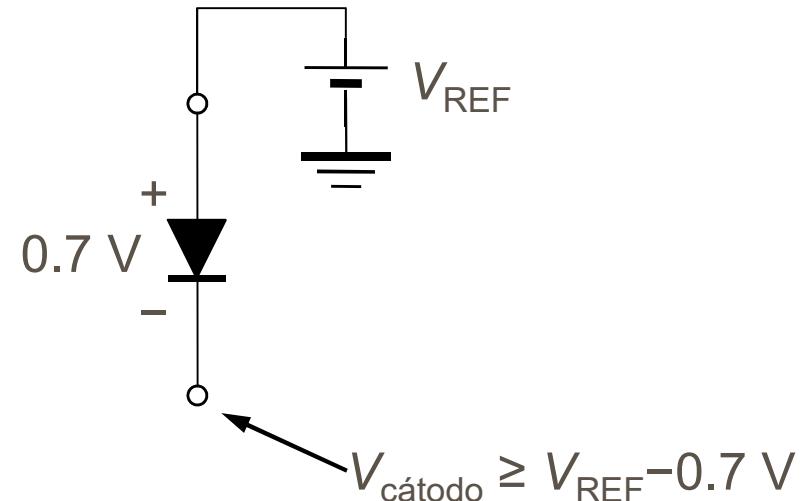
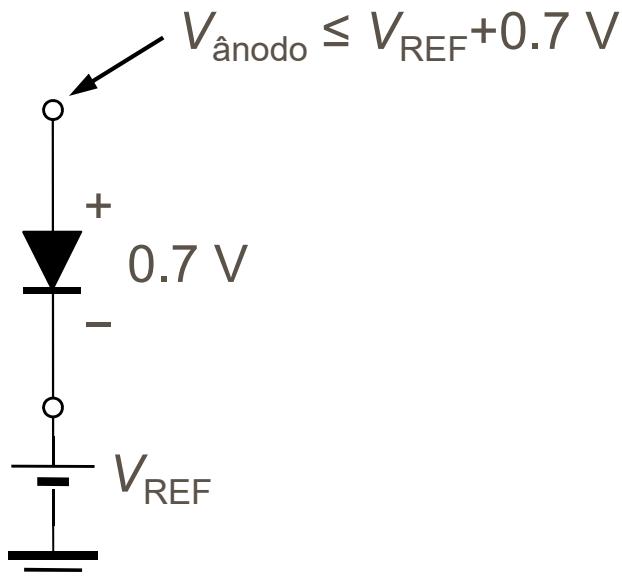
## ■ Limites de Operação dos Díodos



# Díodos – Aplicações Básicas

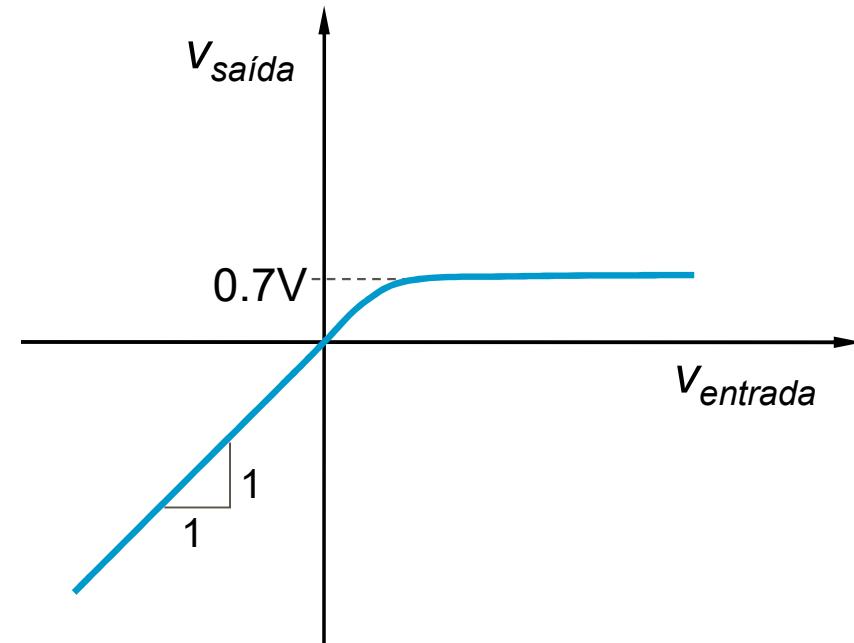
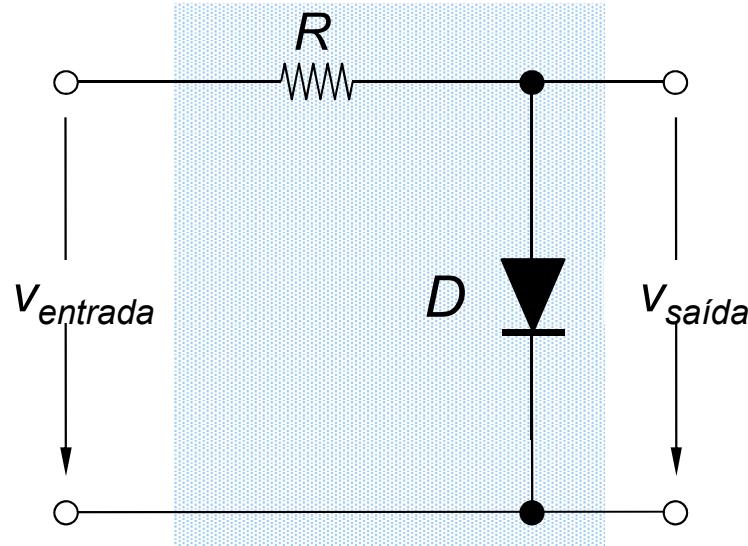
## ■ Circuitos Limitadores (ou *Clipping*)

- Permitem limitar a tensão em determinados pontos de um circuito
- Permitem alterar a forma de onda de um sinal



# Díodos – Aplicações Básicas

## Circuitos Limitadores



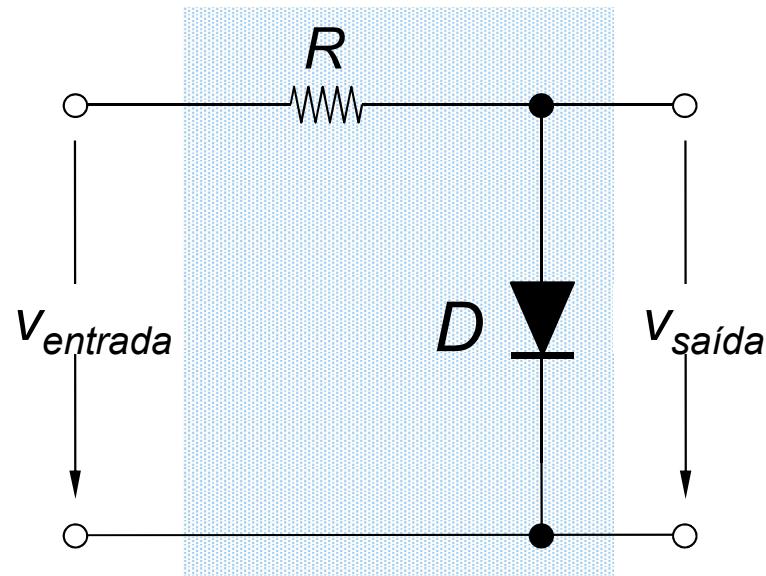
Característica de transferência

$$V_{\text{entrada}} < 0.7 \text{ V} \rightarrow V_{\text{saída}} = V_{\text{entrada}}$$

$$V_{\text{entrada}} \geq 0.7 \text{ V} \rightarrow V_{\text{saída}} = 0.7 \text{ V}$$

# Díodos – Aplicações Básicas

## Circuitos Limitadores

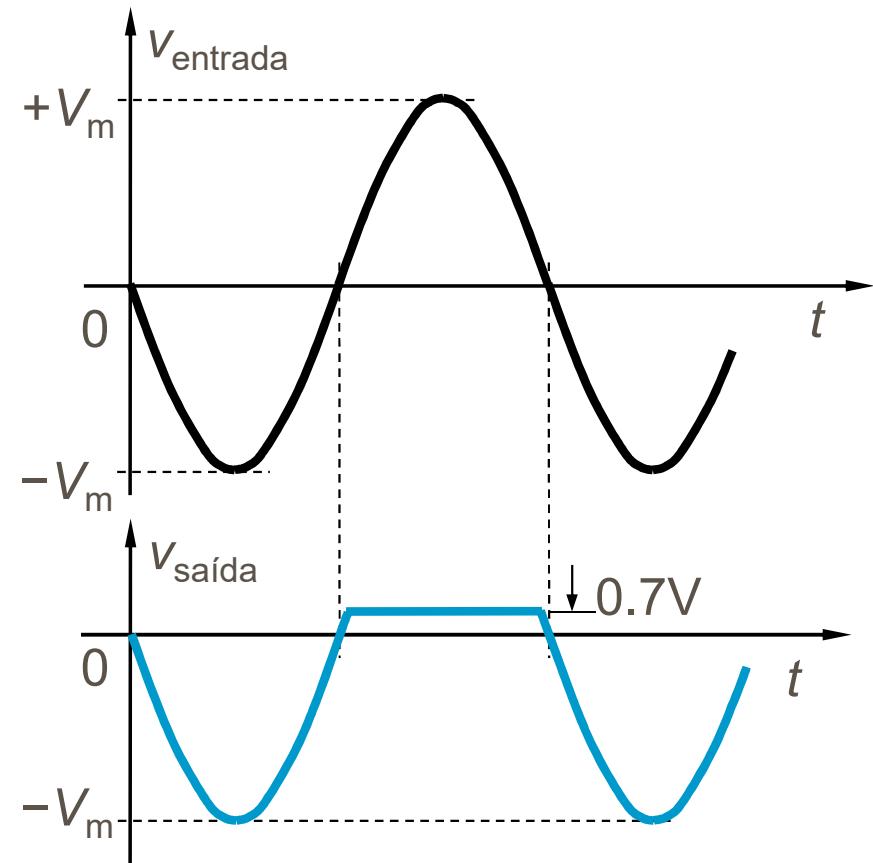


$$V_{\text{entrada}} < 0.7 \text{ V} \rightarrow$$

$$V_{\text{entrada}} \geq 0.7 \text{ V} \rightarrow$$

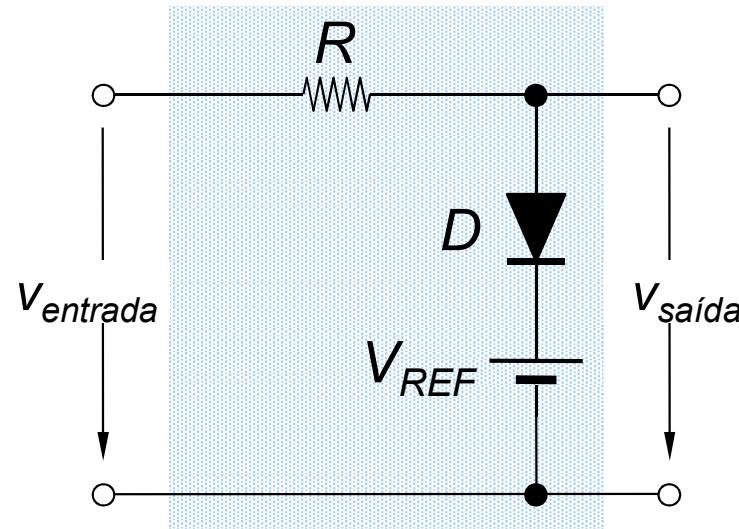
$$V_{\text{saída}} = V_{\text{entrada}}$$

$$V_{\text{saída}} = 0.7 \text{ V}$$



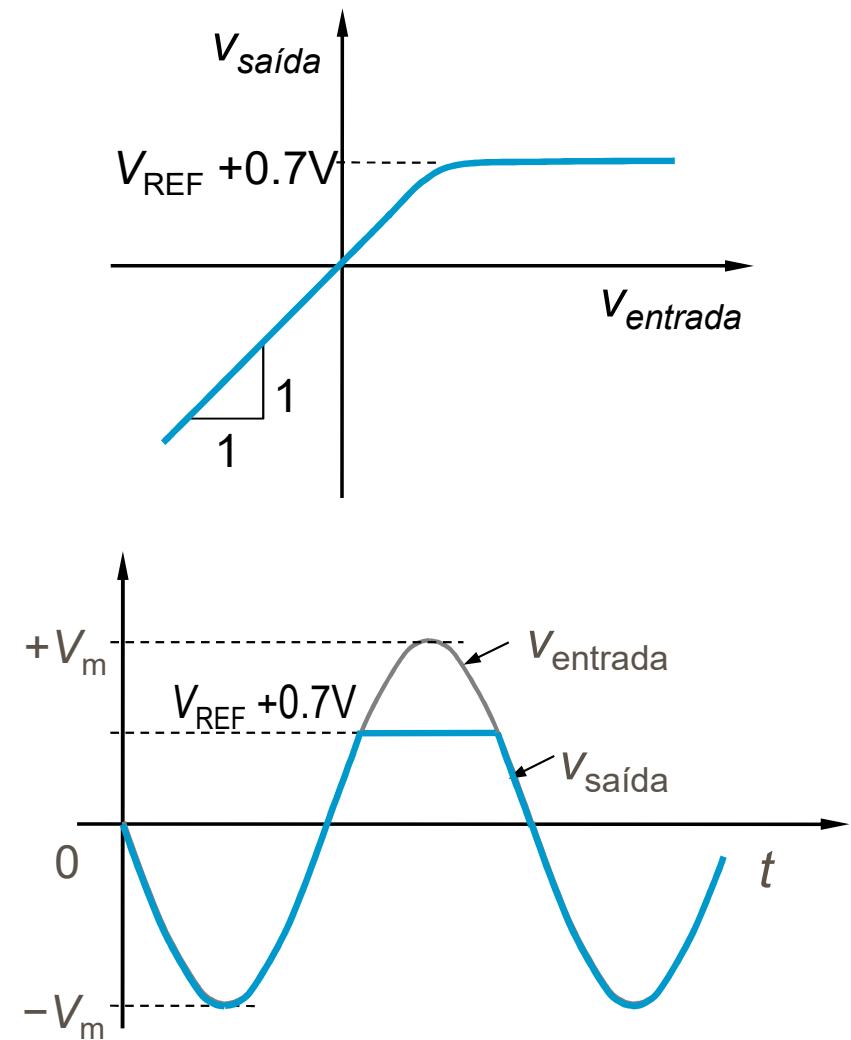
# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Limitadores Polarizados



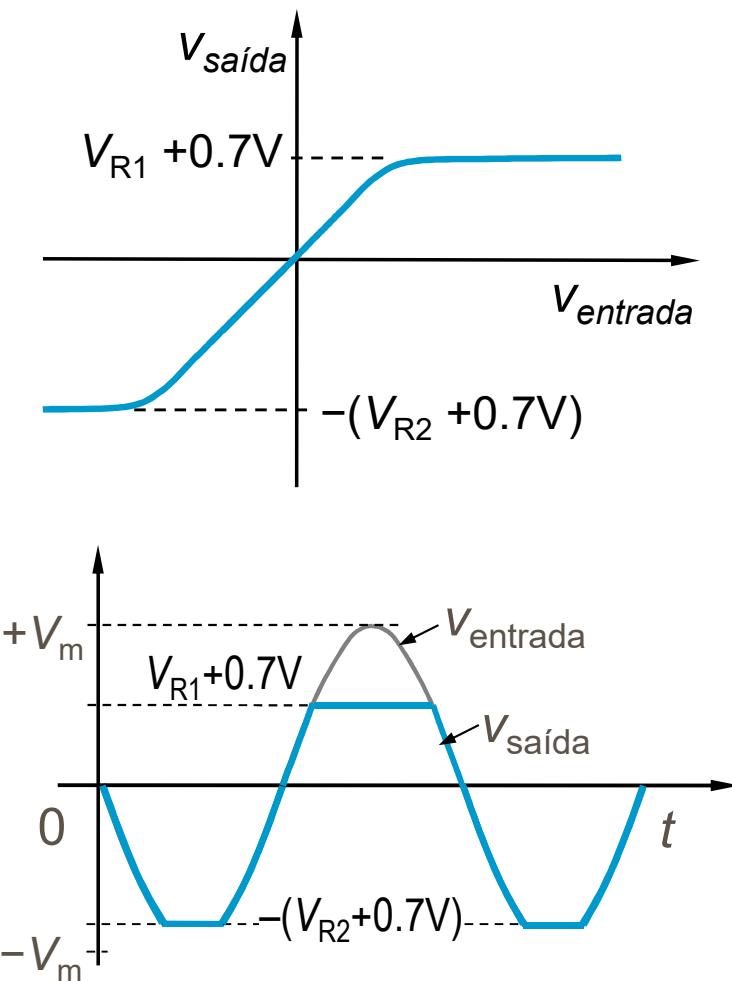
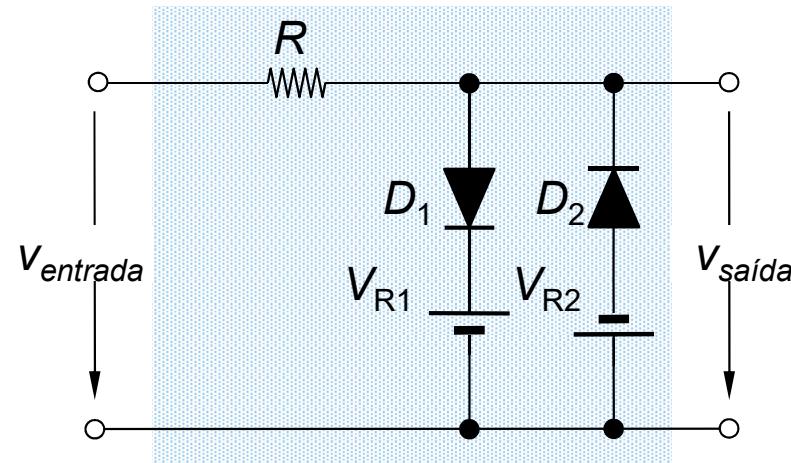
$$V_{entrada} < V_{REF} + 0.7 \text{ V} \rightarrow$$
$$V_{entrada} \geq V_{REF} + 0.7 \text{ V} \rightarrow$$

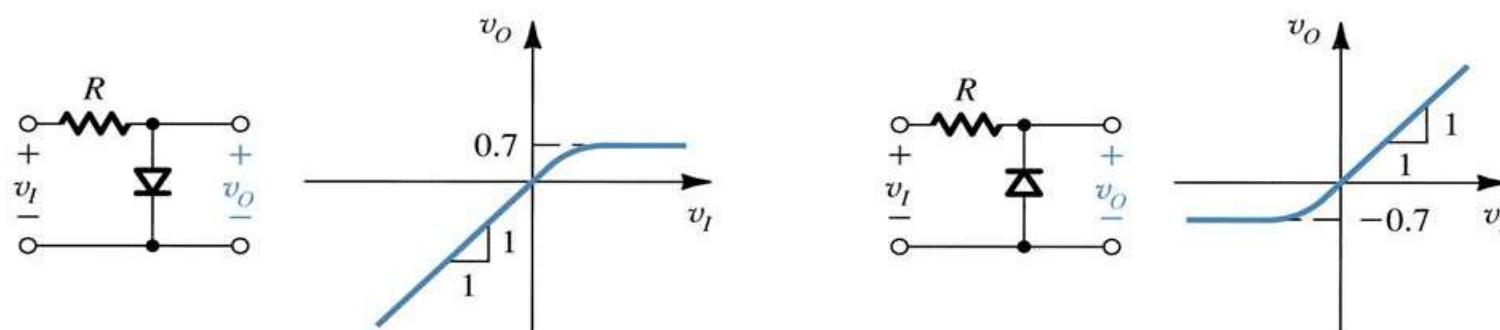
$$V_{saída} = V_{entrada}$$
$$V_{saída} = V_{REF} + 0.7 \text{ V}$$



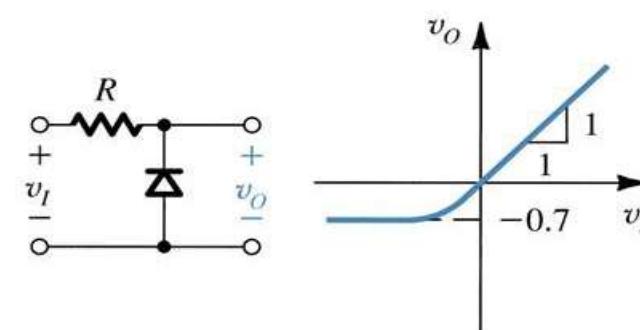
# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Limitação a 2 níveis

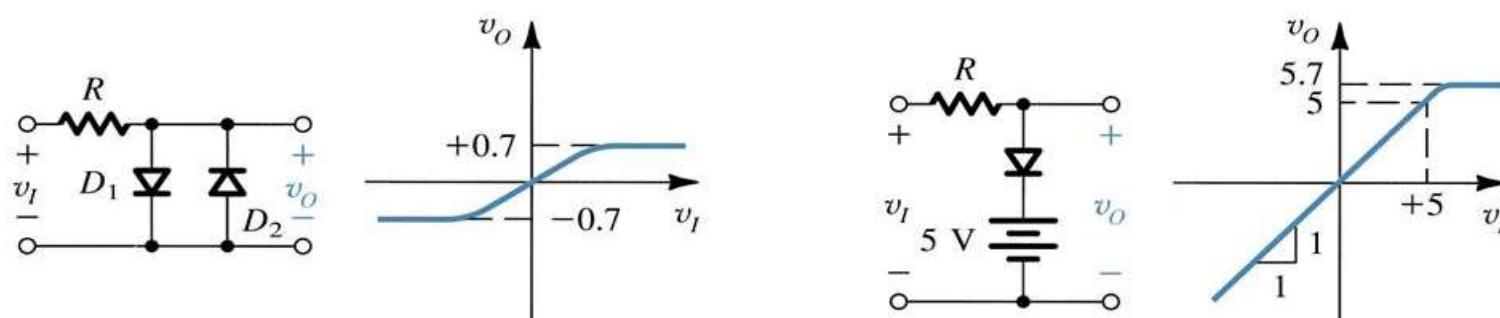




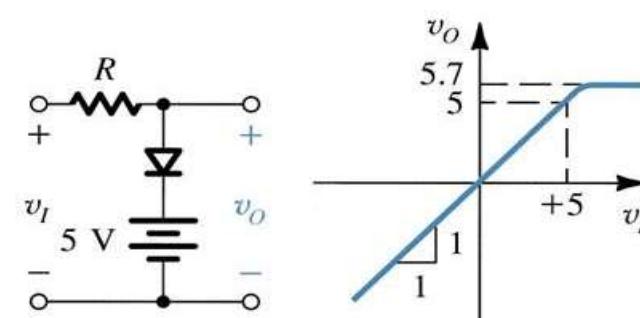
(a)



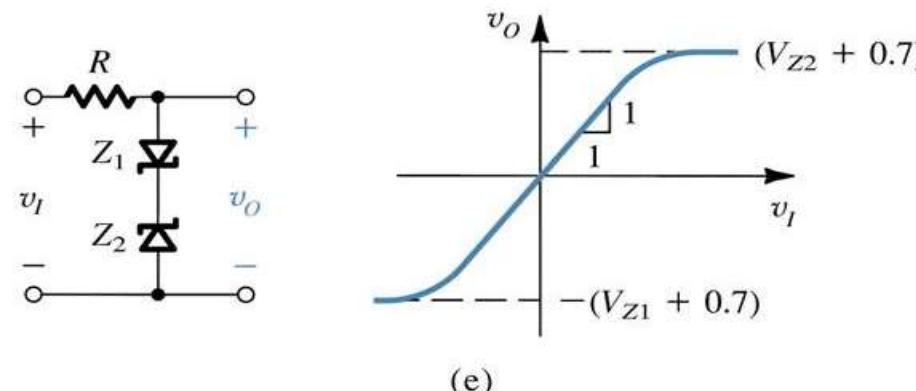
(b)



(c)

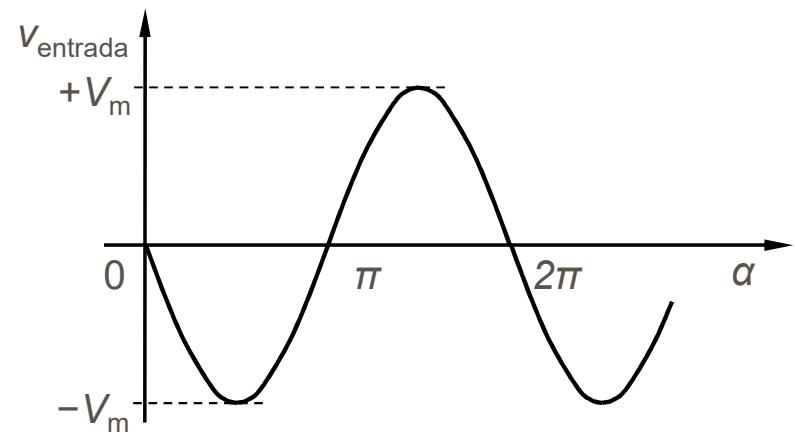
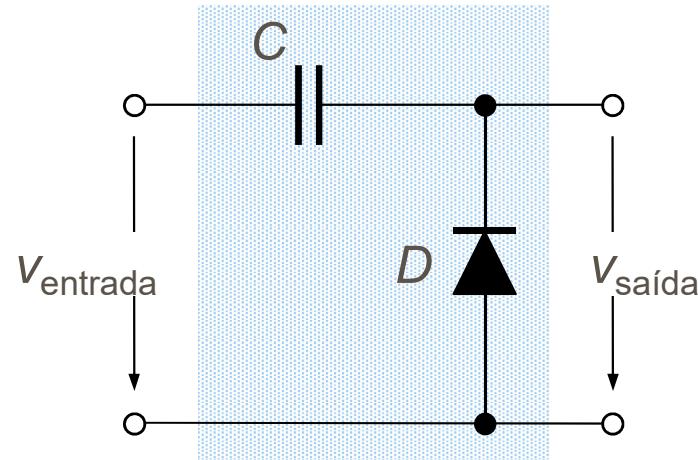


(d)



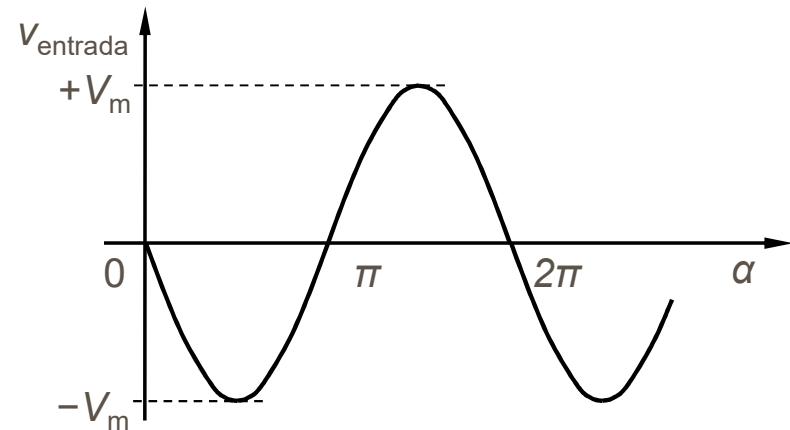
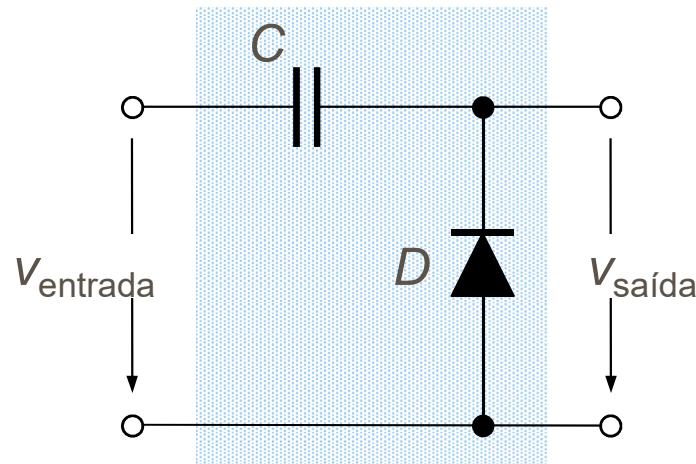
# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Circuitos Fixadores (ou *Clamping*)

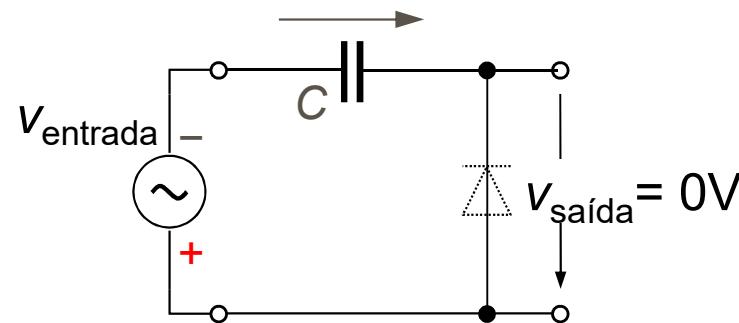


# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Circuitos Fixadores (ou *Clamping*)

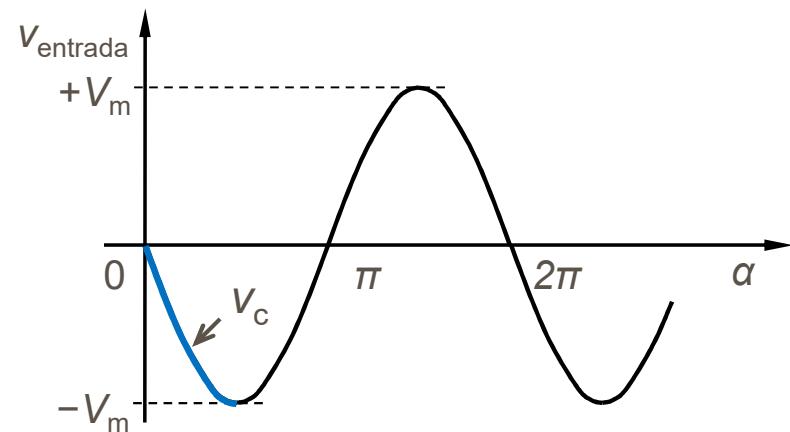
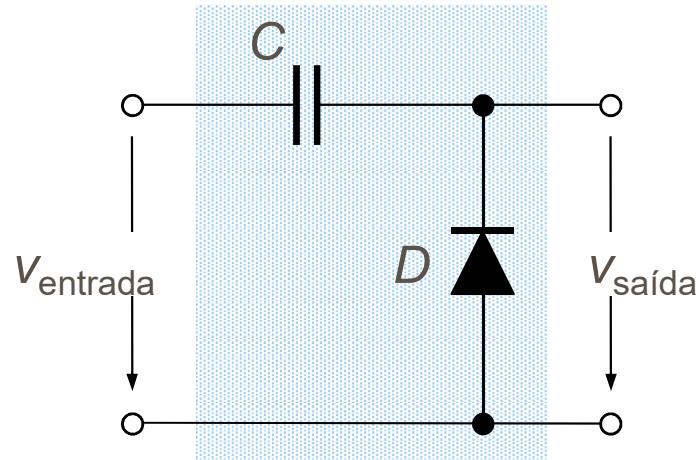


$$V_{\text{entrada}} \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo conduz})$$

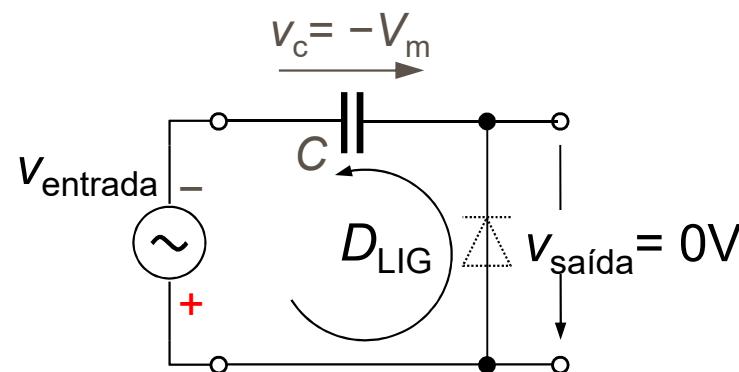


# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Circuitos Fixadores (ou *Clamping*)

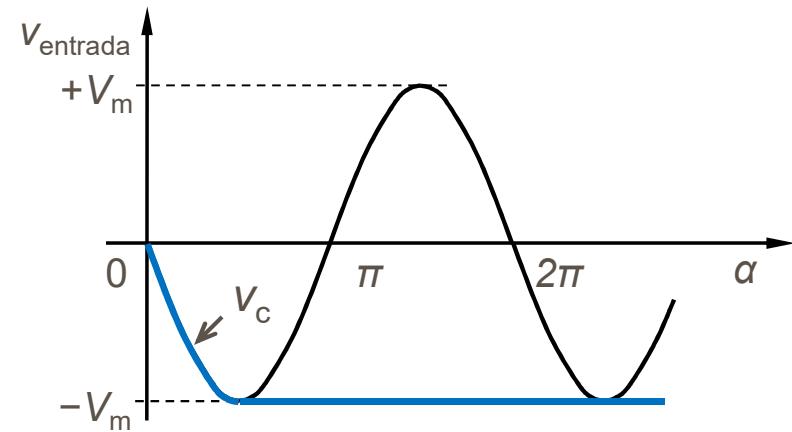
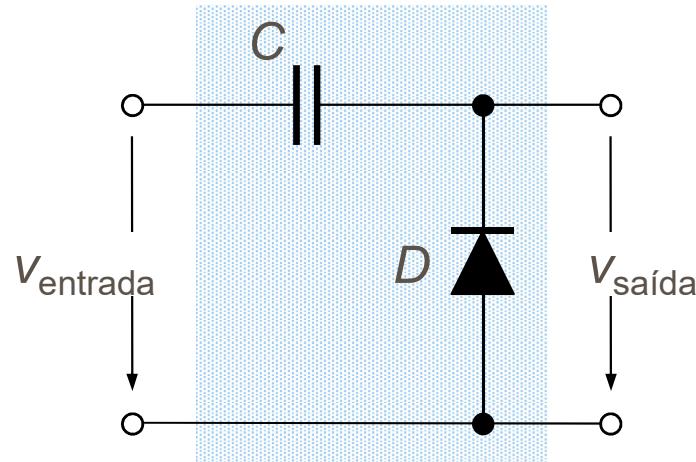


$$V_{\text{entrada}} \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo conduz})$$

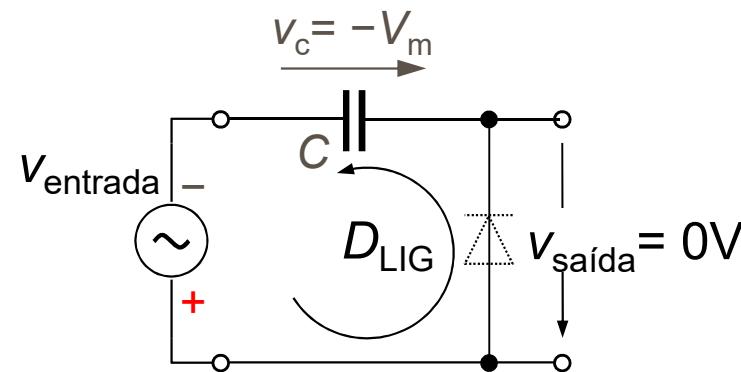


# Díodos – Aplicações Básicas

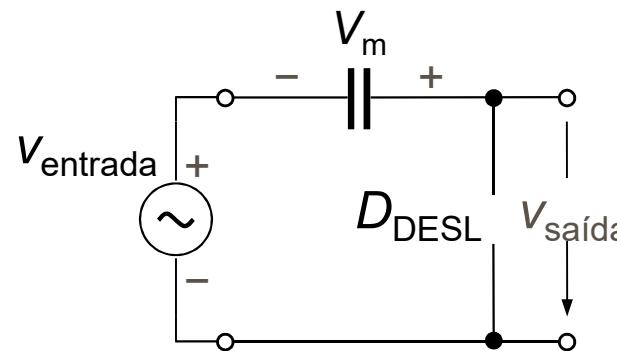
## ■ Circuitos Fixadores (ou *Clamping*)



$$V_{\text{entrada}} \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo conduz})$$

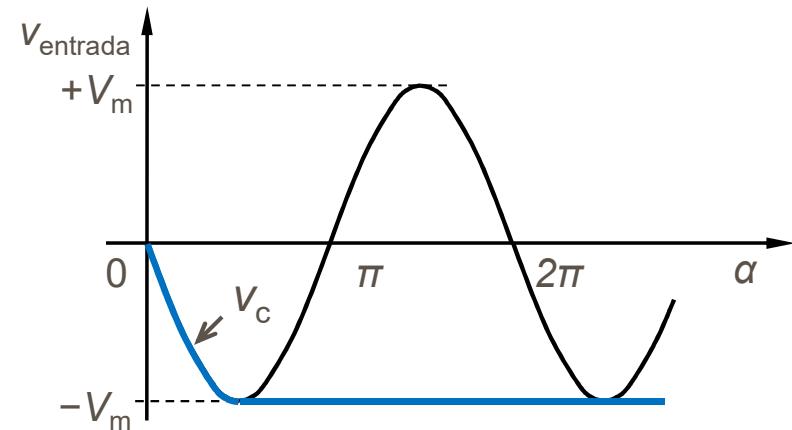
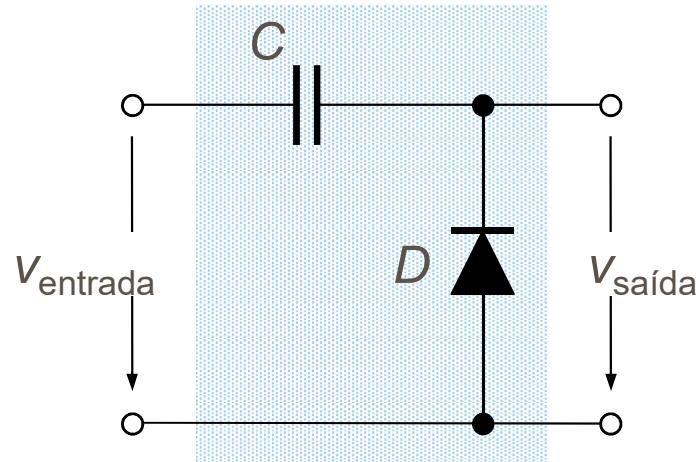


$$V_{\text{entrada}} > \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo não conduz})$$

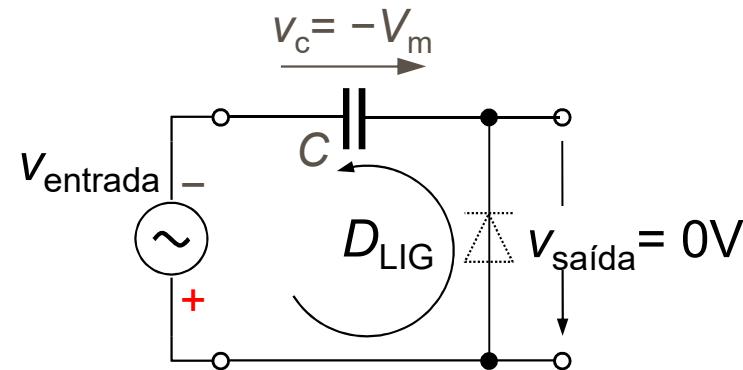


# Díodos – Aplicações Básicas

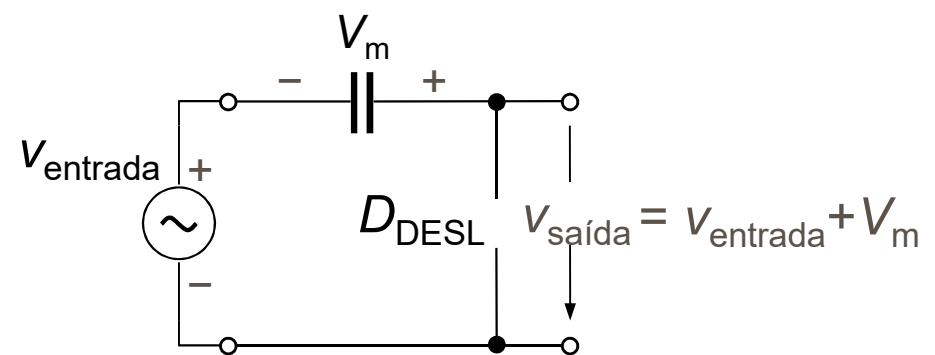
## ■ Circuitos Fixadores (ou Clamping)



$$V_{\text{entrada}} \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo conduz})$$

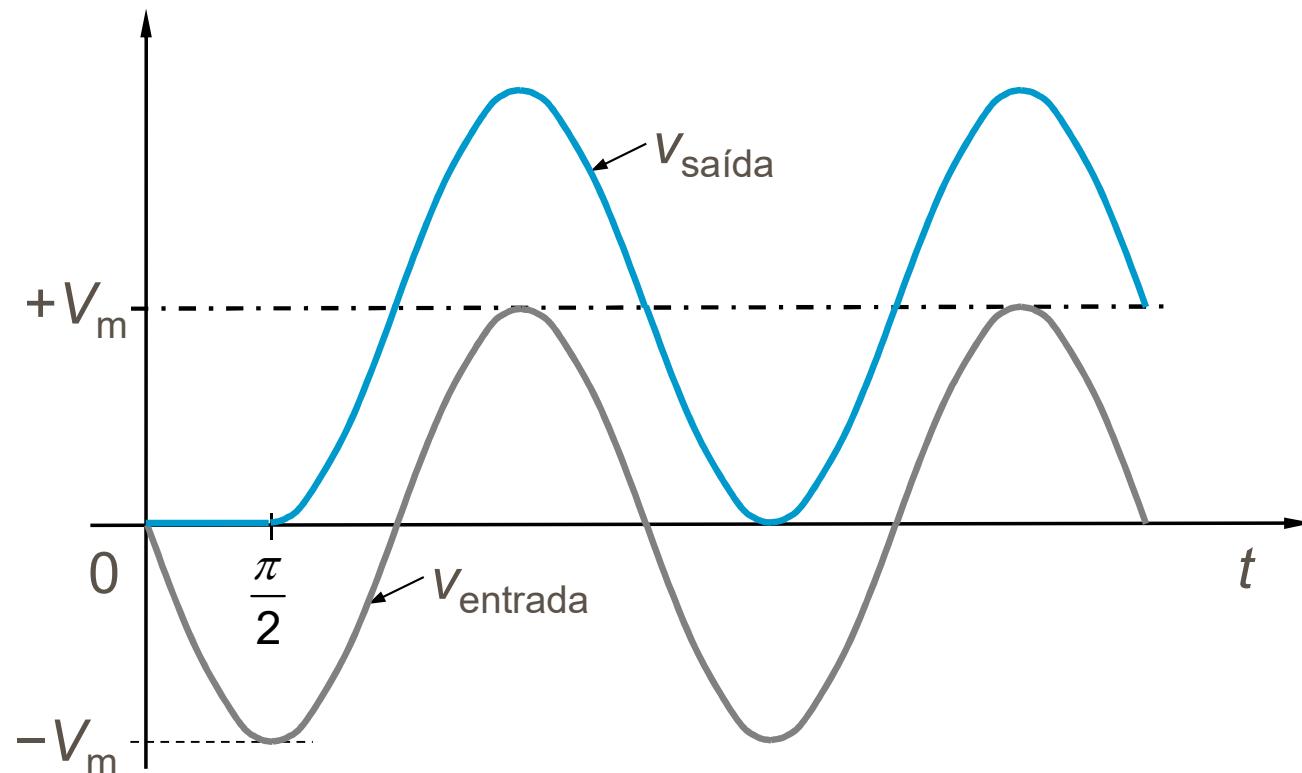


$$V_{\text{entrada}} > \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo não conduz})$$



# Díodos – Aplicações Básicas

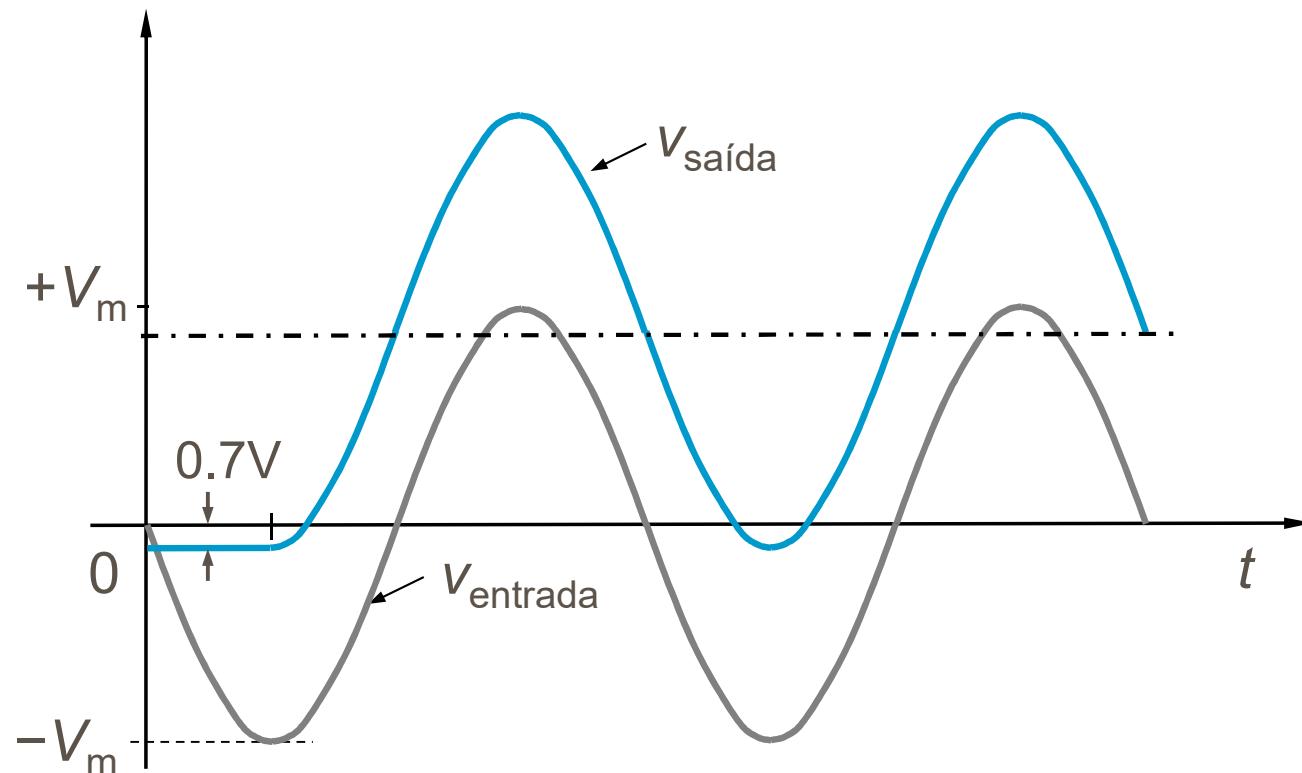
## ■ Circuitos Fixadores



Fixador – formas de onda admitindo díodo ideal

# Díodos – Aplicações Básicas

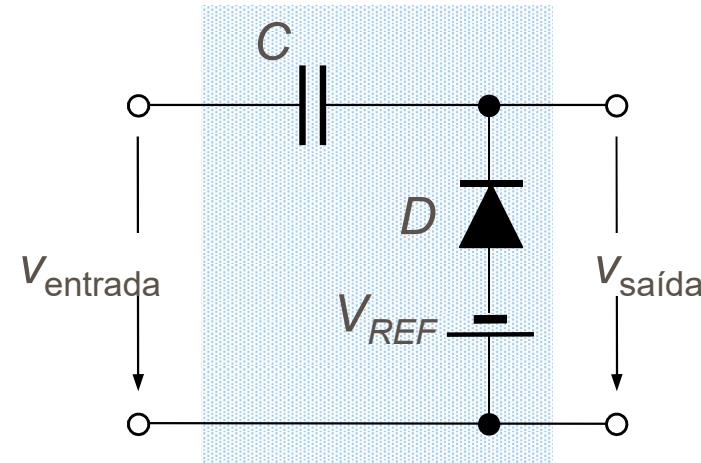
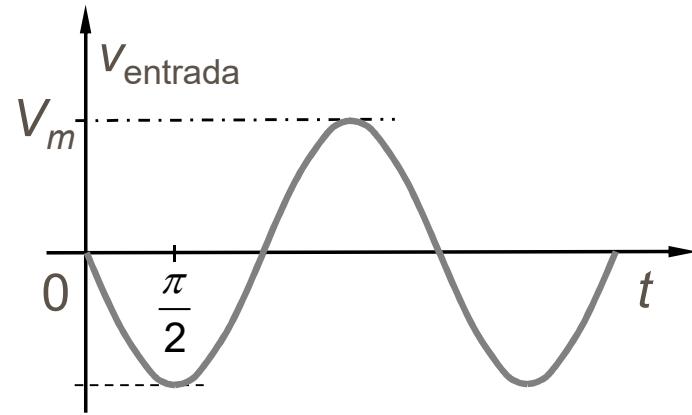
## ■ Circuitos Fixadores



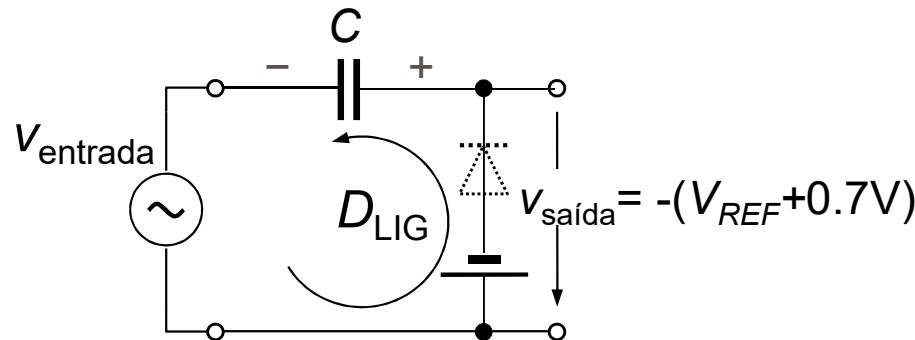
Fixador – formas de onda no caso do díodo real

# Díodos – Aplicações Básicas

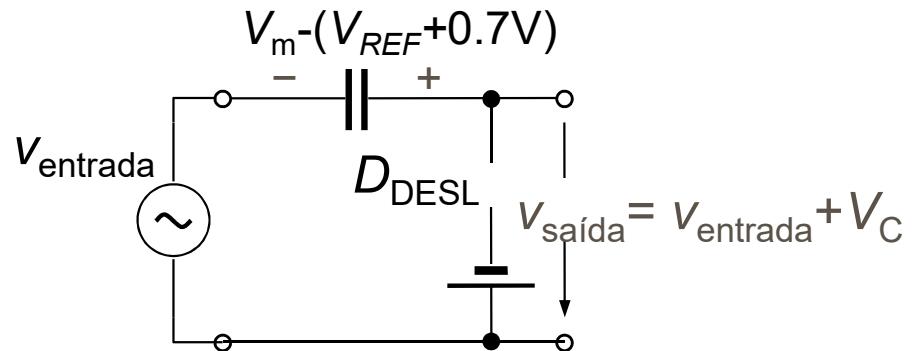
## ■ Circuitos Fixadores (caso geral)



$$V_{\text{entrada}} \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo conduz})$$

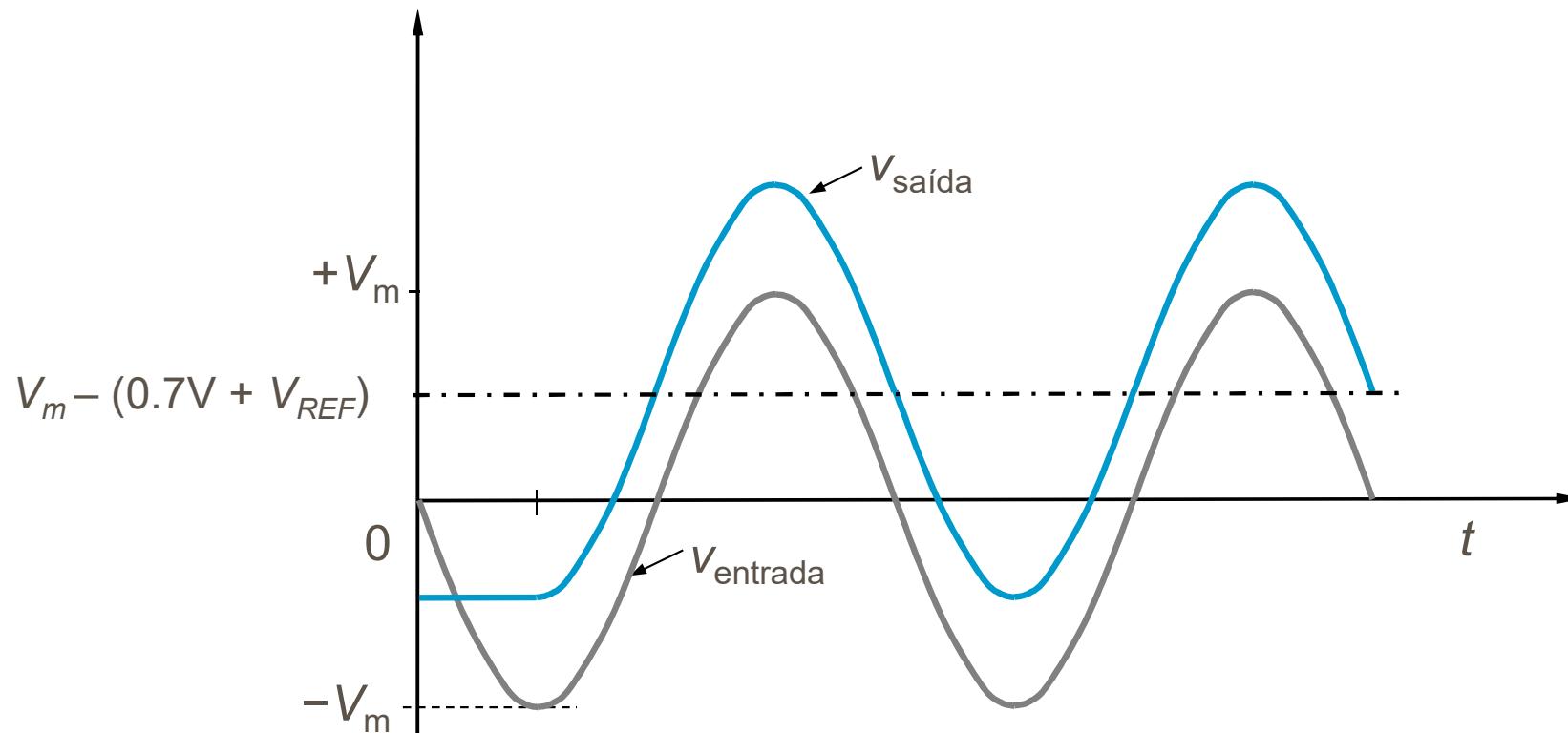


$$V_{\text{entrada}} > \frac{\pi}{2} \quad (\text{díodo não conduz})$$



# Díodos – Aplicações Básicas

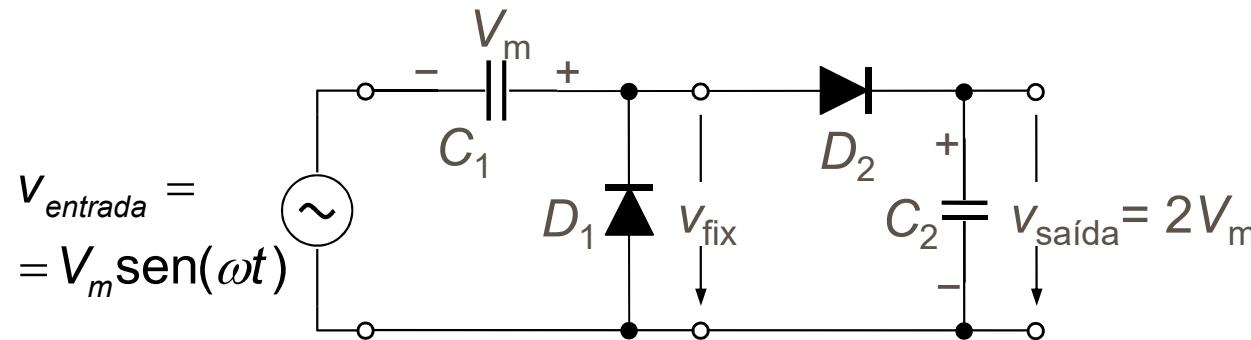
## ■ Circuitos Fixadores (caso geral)



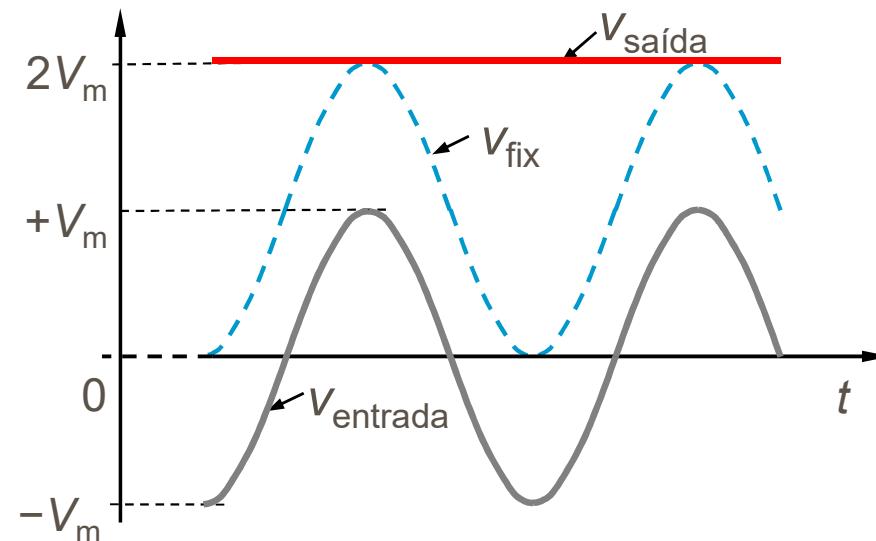
Fixador – formas de onda no caso do díodo real

# Díodos – Aplicações Básicas

## ■ Detector Pico-a-Pico (ou duplicador de tensão)

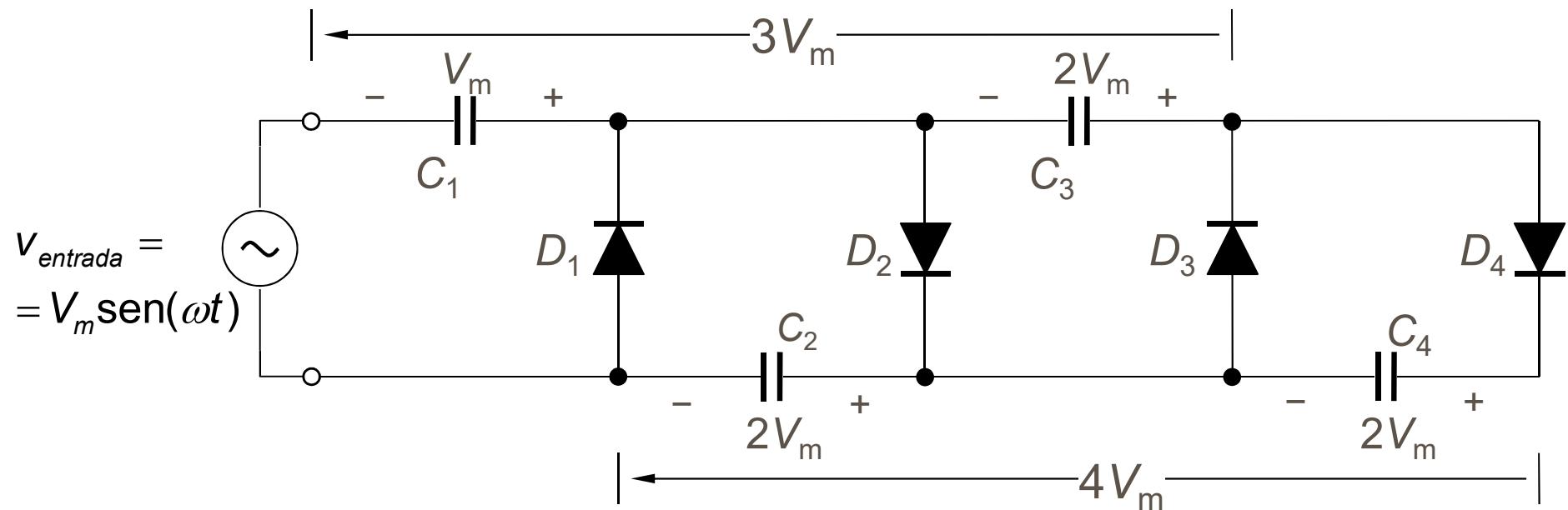


Duplicador – formas  
de onda admitindo  
díodo ideal (reg.  
permanente)



# Díodos – Aplicações Básicas

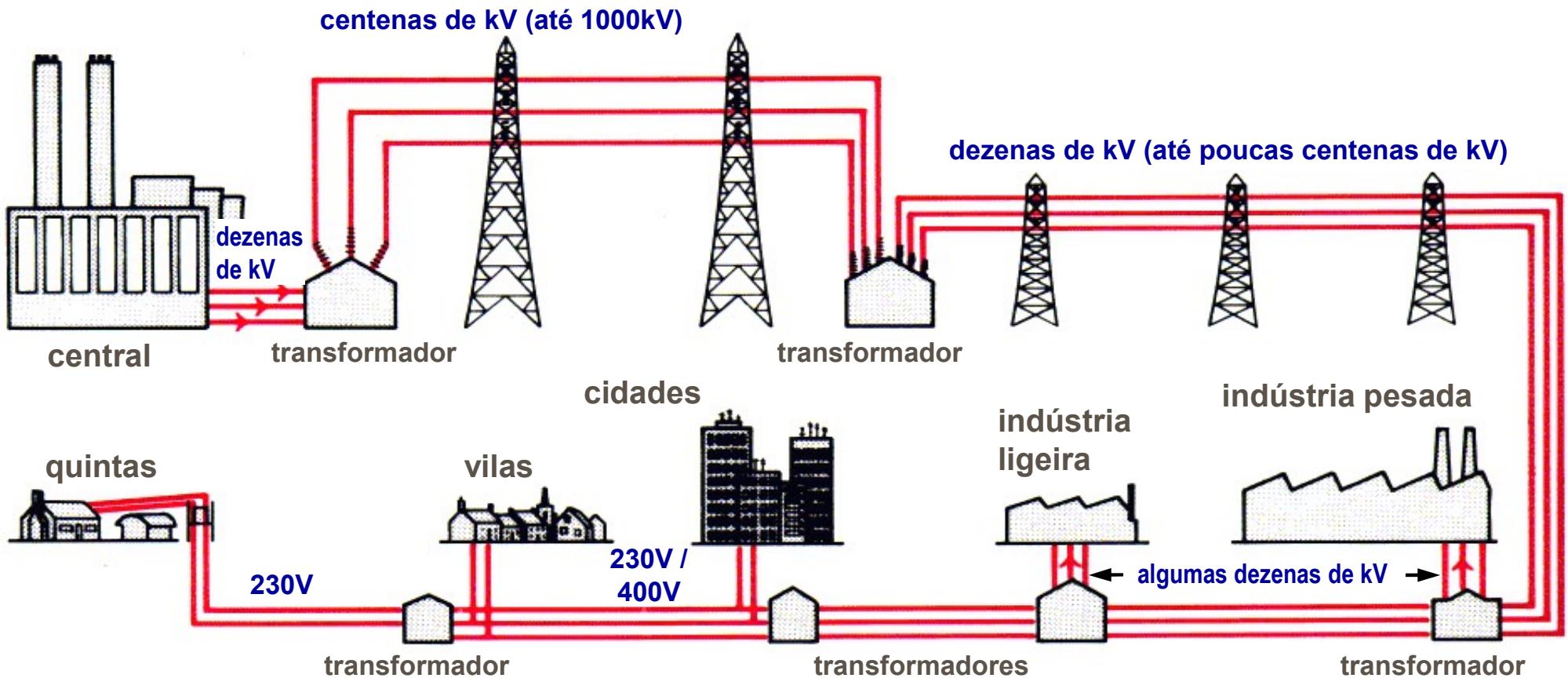
## ■ Multiplicador de tensão



# FONTES DE ALIMENTAÇÃO

# Fontes de Alimentação

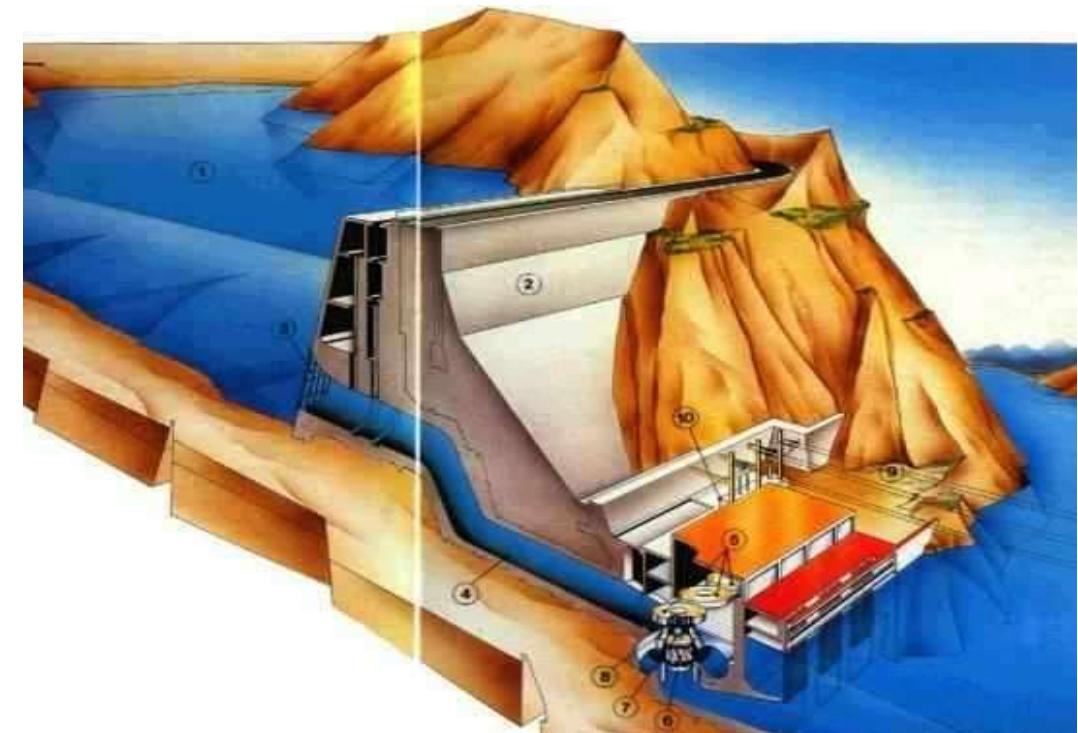
## ■ Produção Transporte e Distribuição de Energia Eléctrica

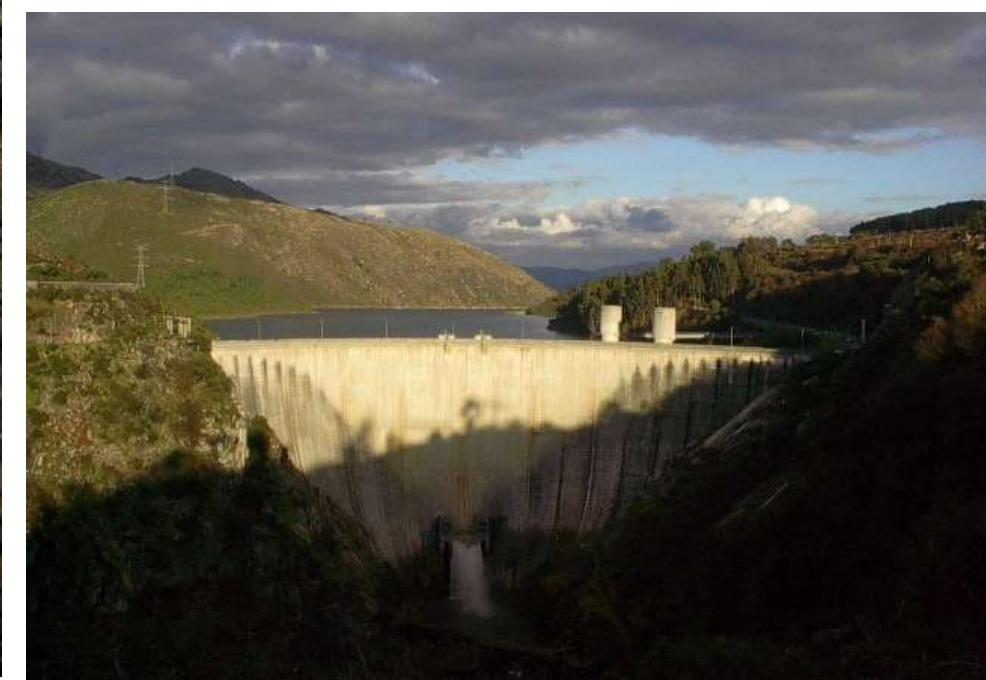
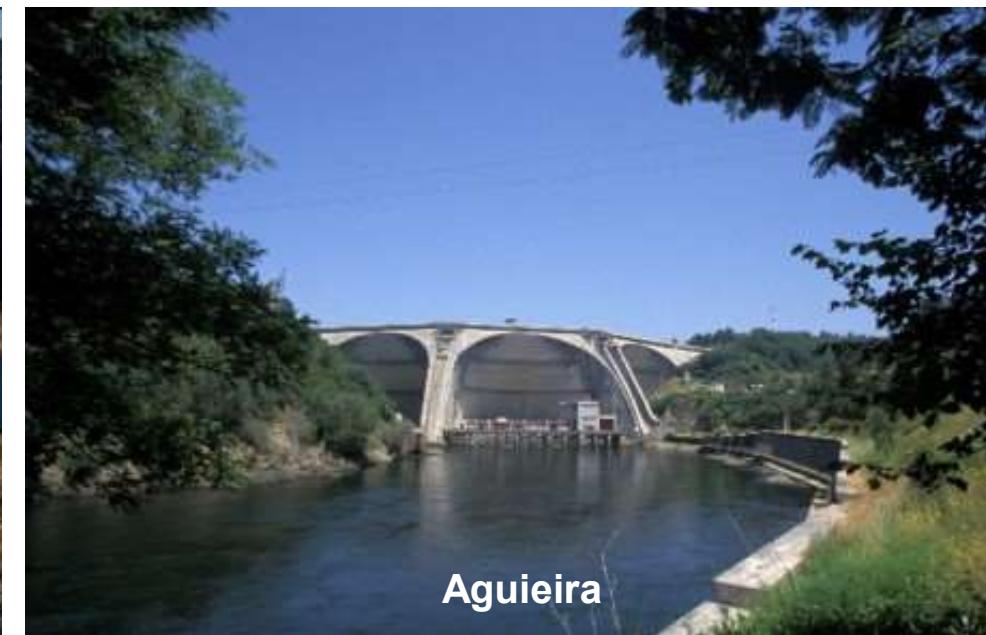
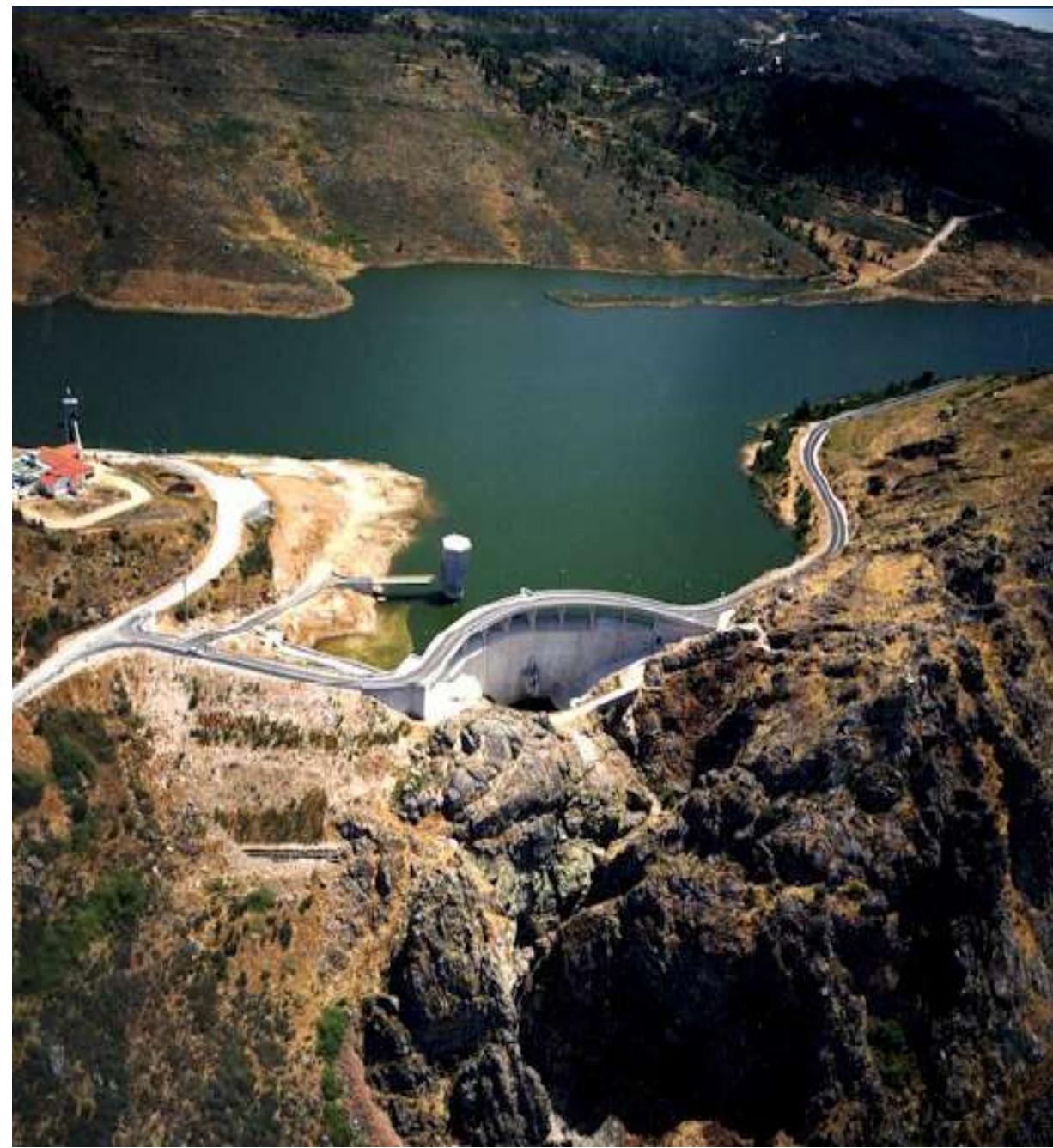


Esquema Tradicional de Produção, Transporte e Distribuição de Energia (PTDE)



Central Térmica





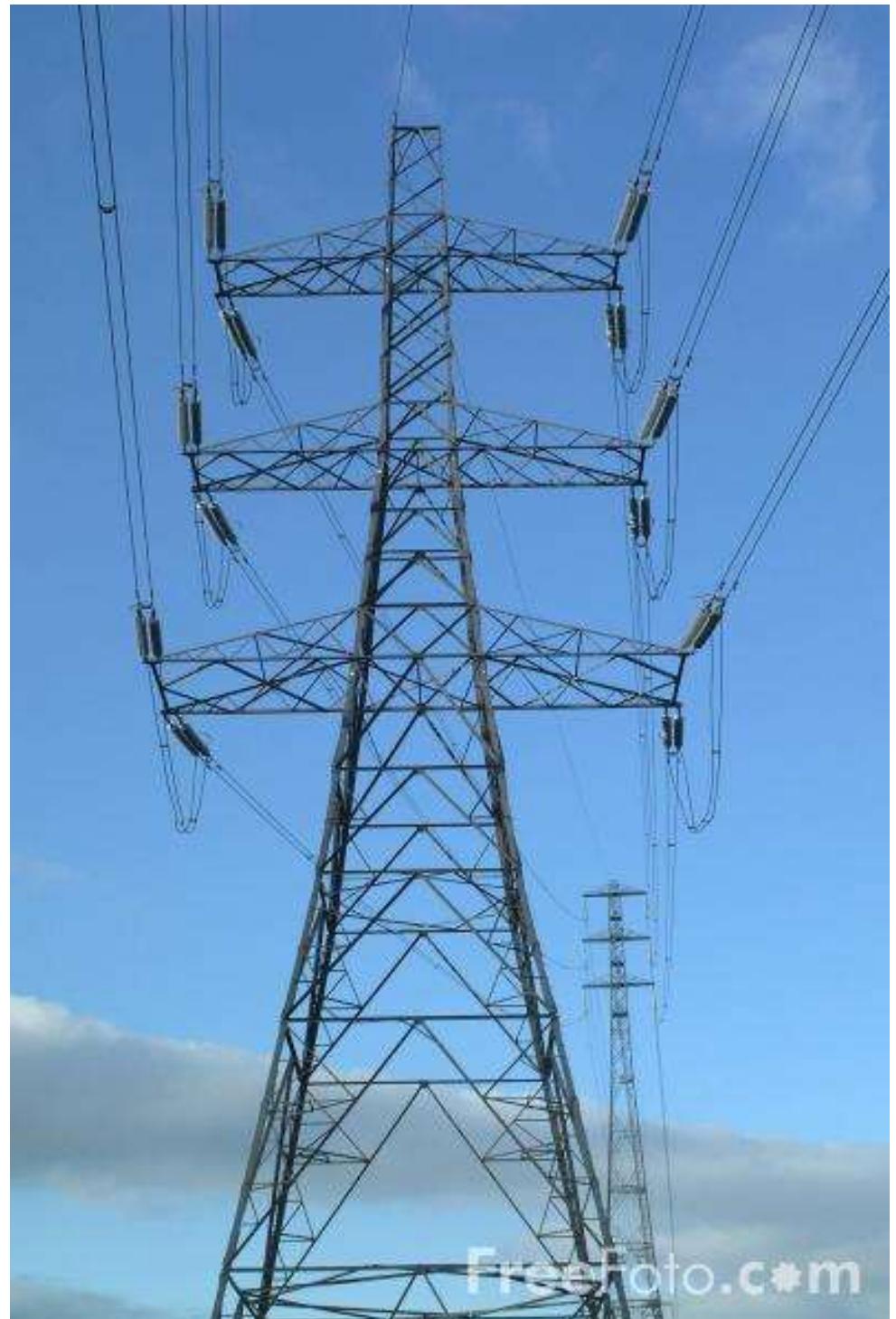
**Alto Lindoso**

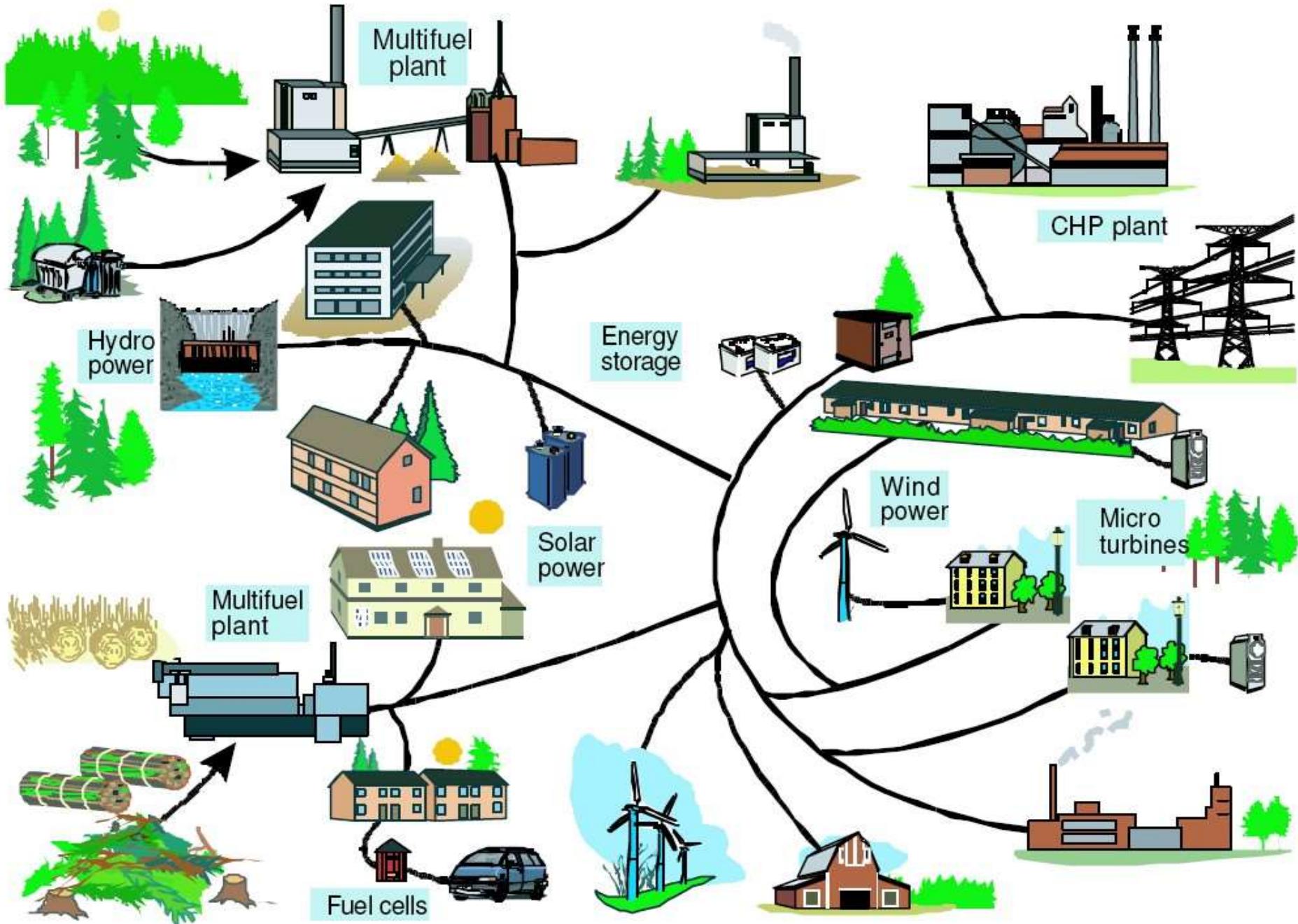


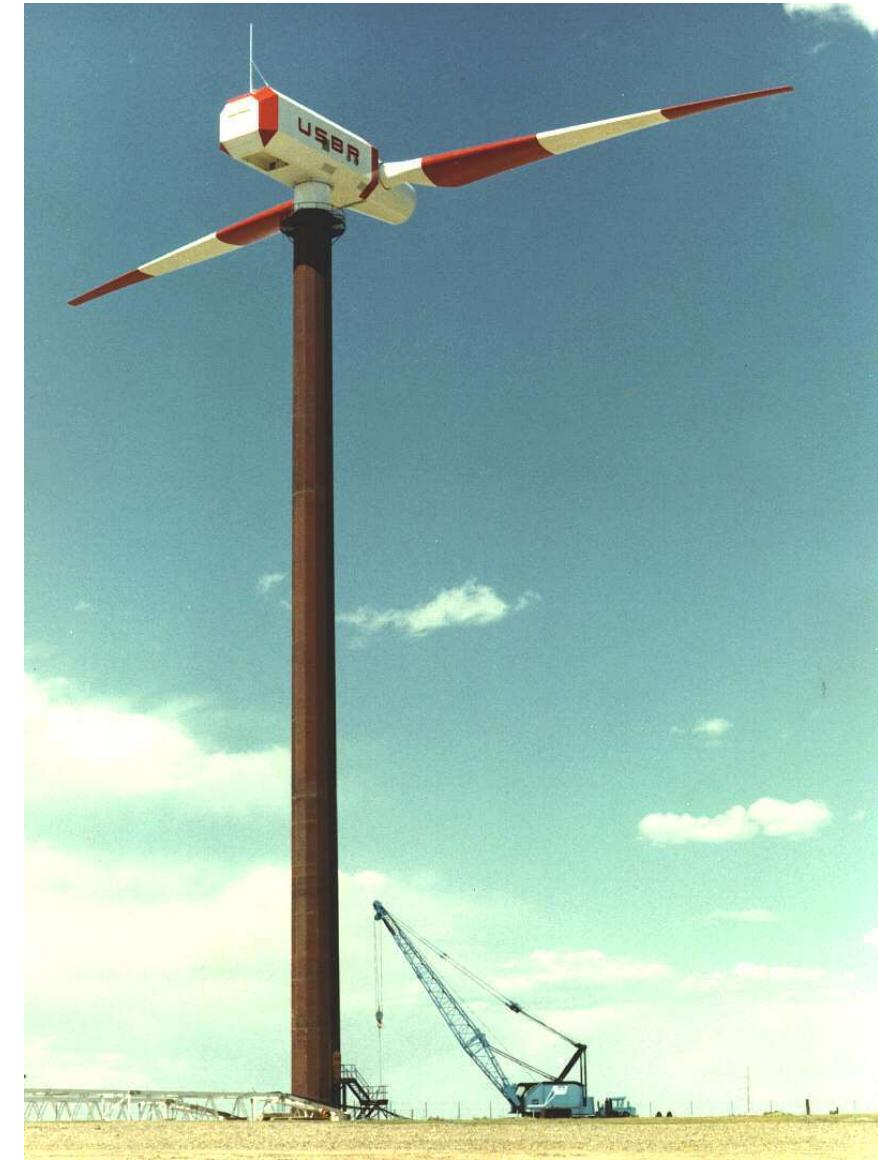
Posto de transformação

Transformador de alta tensão









**1,18 MWp  
10.080 módulos FV**

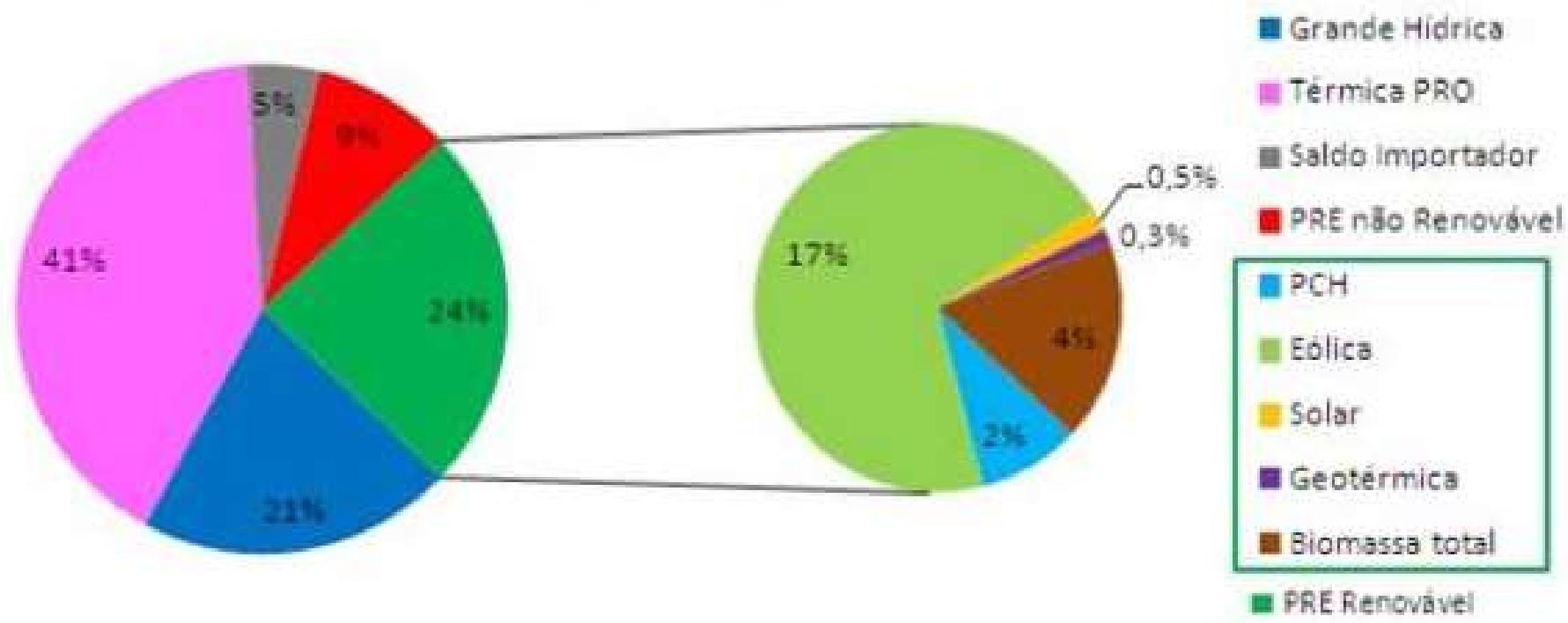


Percentagem de electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis na UE-27 ( Última actualização: 2008-02-13):

- 57,9 - AT - Áustria
- 54,3 - SE - Suécia
- 48,4 - LV - Letónia
- 35,8 - RO - Roménia
- 28,2 - DK - Dinamarca
- 26,9 - FI - Finlândia
- 24,2 - SI - Eslovénia
- 16,5 - SK - Eslováquia
- **16,0 - PT - Portugal**
- 15,0 - ES - Espanha
- 14,1 - IT - Itália
- **14,0 - UE - União Europeia**  
(27 países)
- 11,8 - BG - Bulgária
- 11,3 - FR - França
- 10,5 - DE - Alemanha
- 10,0 - EL - Grécia
- 7,5 - NL - Países Baixos
- 6,8 - IE - Irlanda
- 4,7 - HU - Hungria
- 4,5 - CZ - República Checa
- 4,3 - UK - Reino Unido
- 3,9 - LT - Lituânia
- 3,2 - LU - Luxemburgo
- 2,9 - PL - Polónia
- 2,8 - BE - Bélgica
- 1,1 - EE - Estónia
- 0,0 - CY - Chipre
- 0,0 - MT - Malta

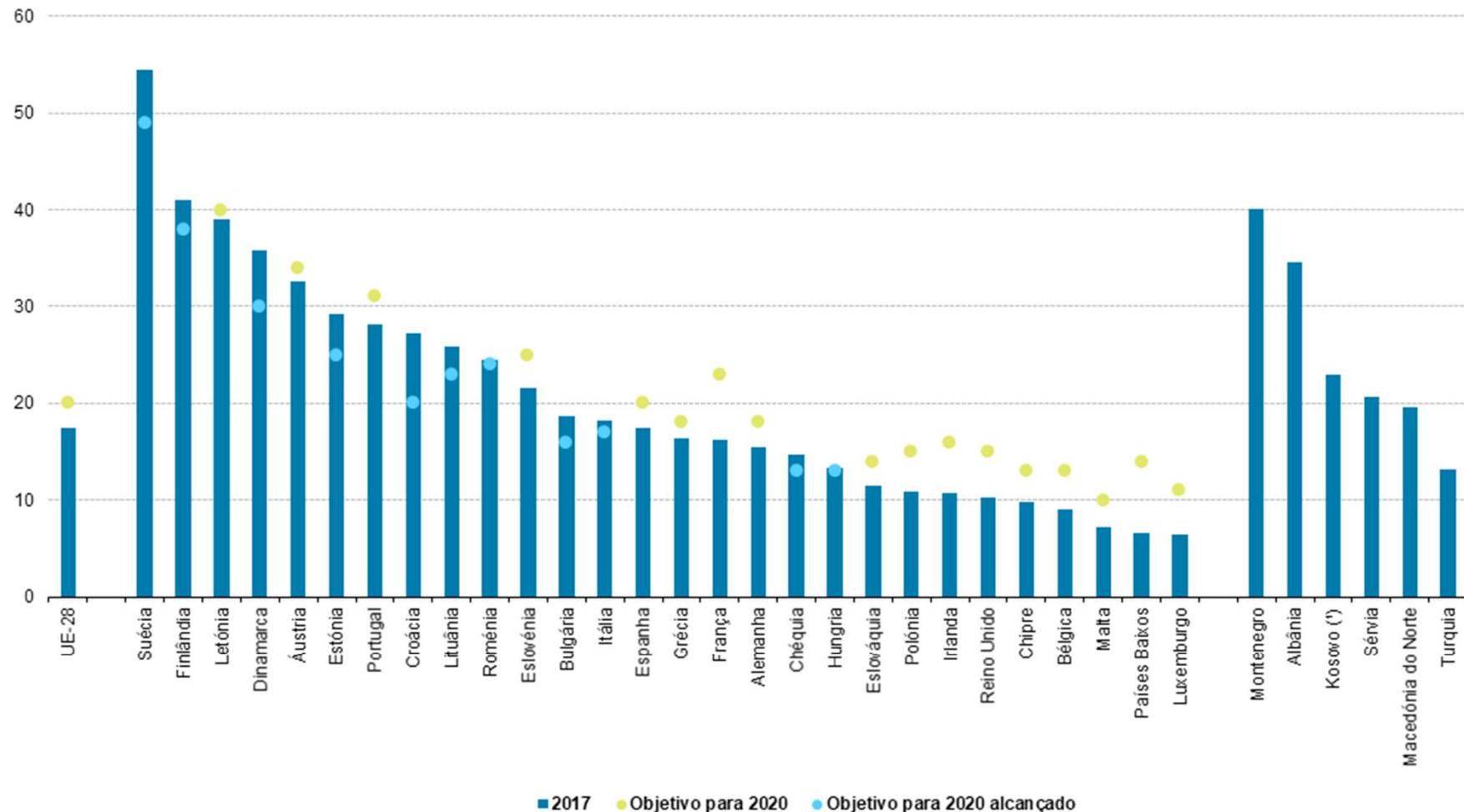
Portugal – quase 25% em 2011

**Peso das fontes de produção corrigida de electricidade em Portugal em 2010  
(com correção de hidraulicidade)**



## Quota de energia proveniente de fontes renováveis, 2017

(% do consumo final bruto de energia)



(\*) Esta designação não prejudica as posições relativas ao estatuto e está conforme com a Resolução 1244 (1999) do CSNU e com o parecer do TJU sobre a declaração de independência do Kosovo.

Fonte: Eurostat (código de dados em linha: nrg\_ind\_ren)

# Fontes de Alimentação



- 63% **Terмоeléctrica**
- 19% **Hidroeléctrica**
- 17% **Nuclear**
- 1% **Outras**

# Fontes de Alimentação



■ Para meditar...

**“... não herdamos a Terra  
dos nossos pais...”**

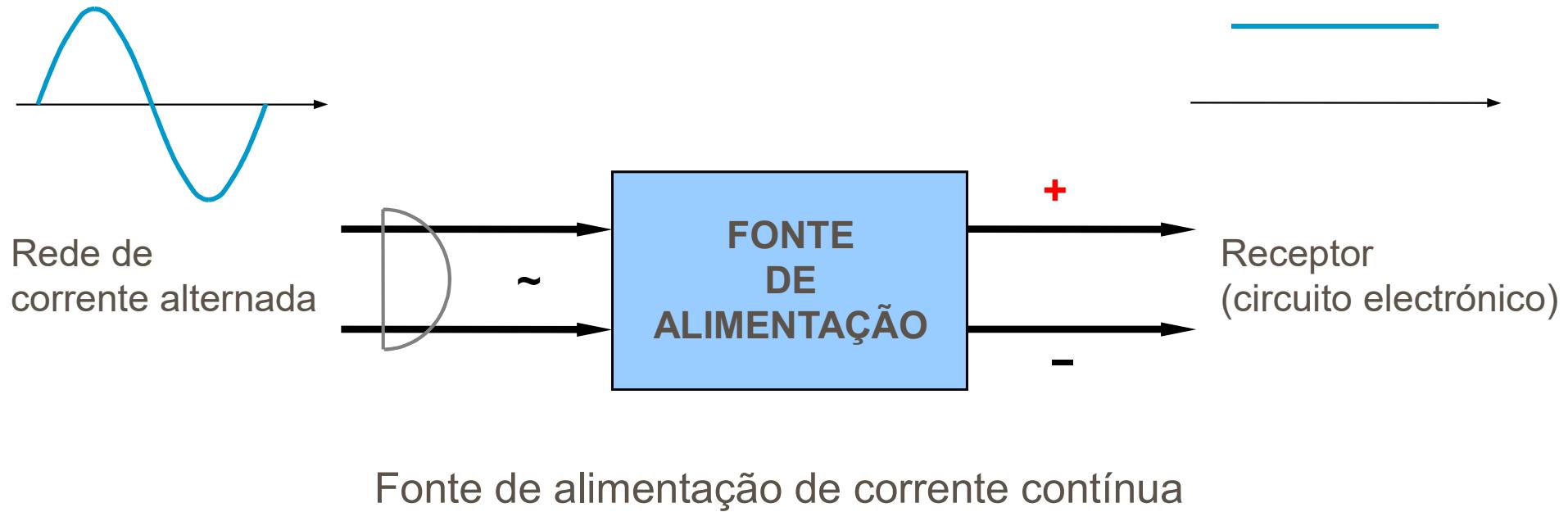
# Fontes de Alimentação



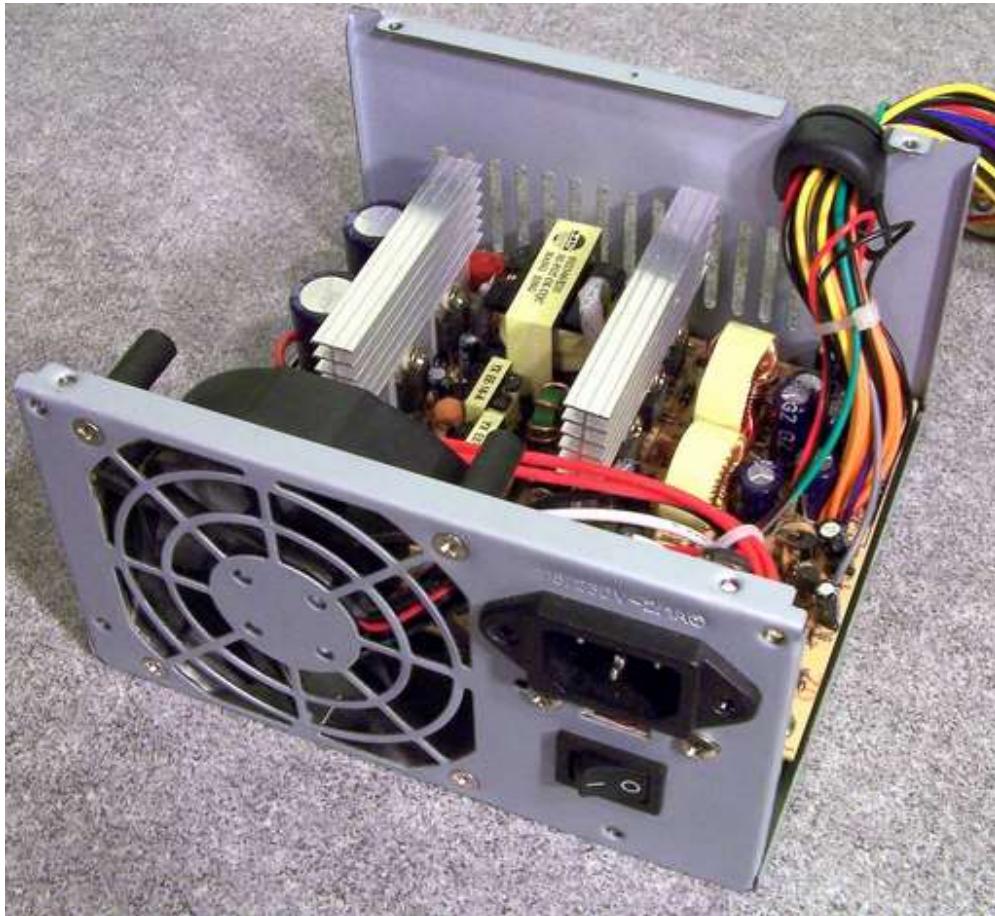
■ Para meditar...

**“... pedimo-la  
emprestada aos nossos  
filhos...”**

# Fontes de Alimentação

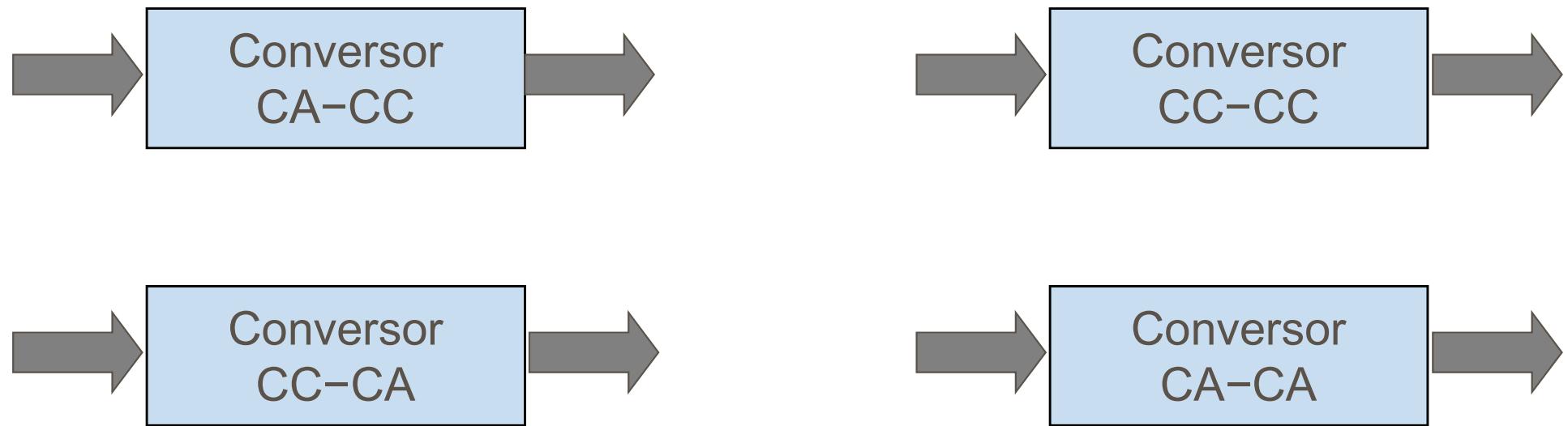


# Fontes de Alimentação



# Fontes de Alimentação

## ■ Outros conversores electrónicos de energia



# Fontes de Alimentação

## ■ Diagrama de blocos



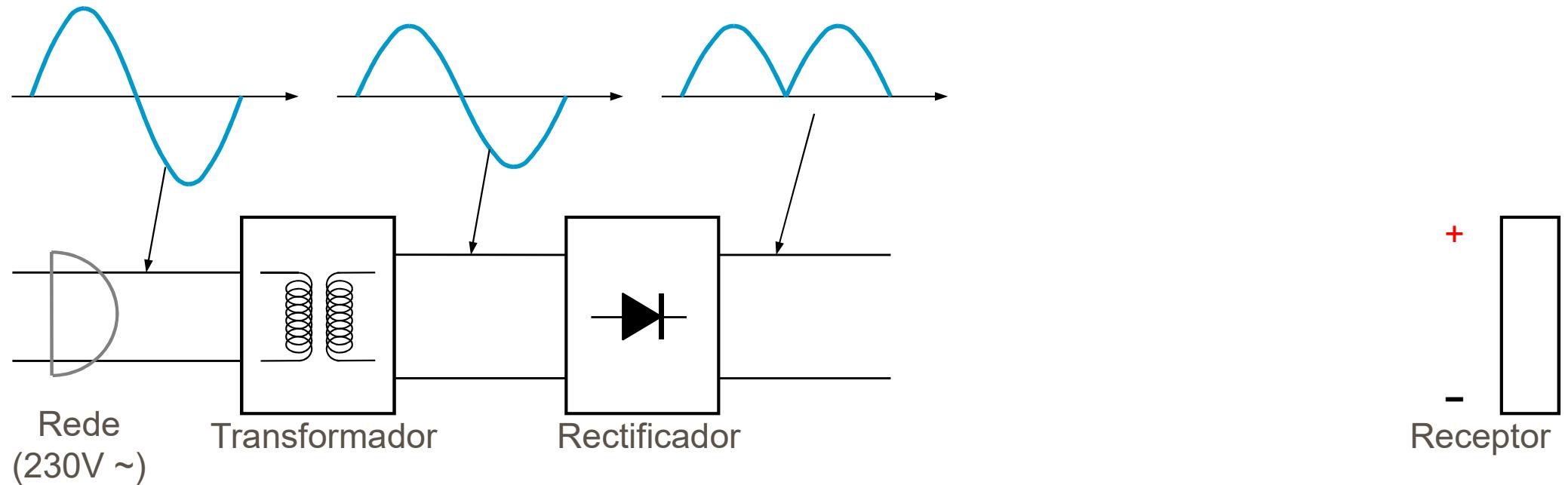
# Fontes de Alimentação

## ■ Diagrama de blocos



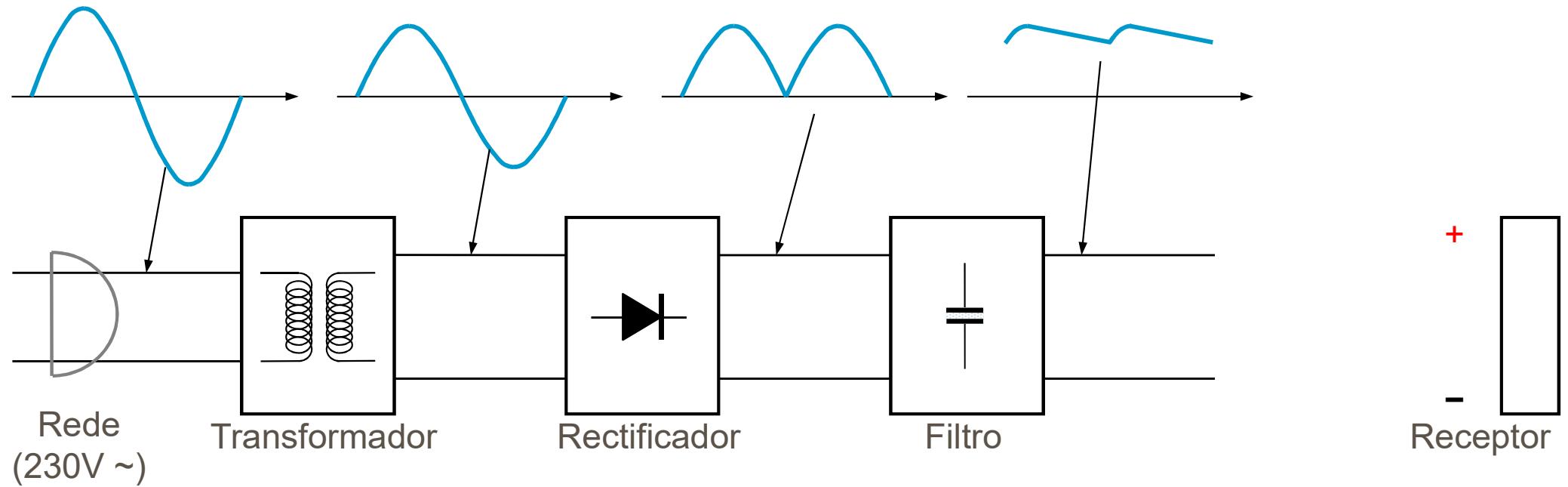
# Fontes de Alimentação

## ■ Diagrama de blocos



# Fontes de Alimentação

## ■ Diagrama de blocos



# Fontes de Alimentação

## ■ Diagrama de blocos

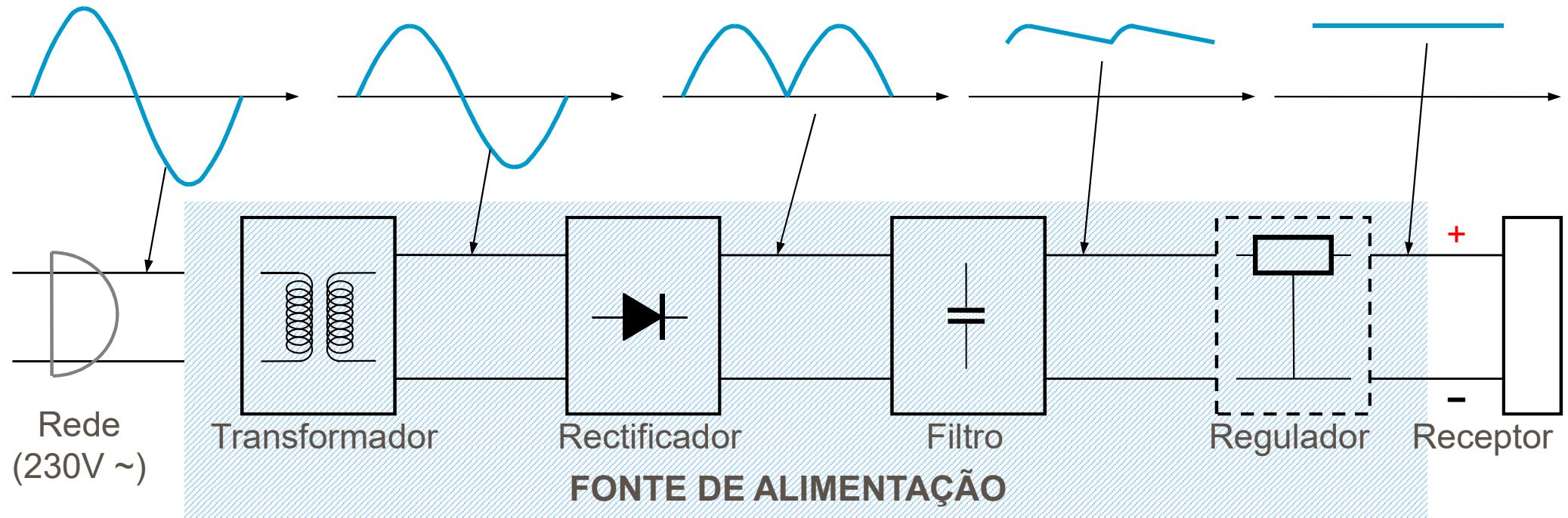
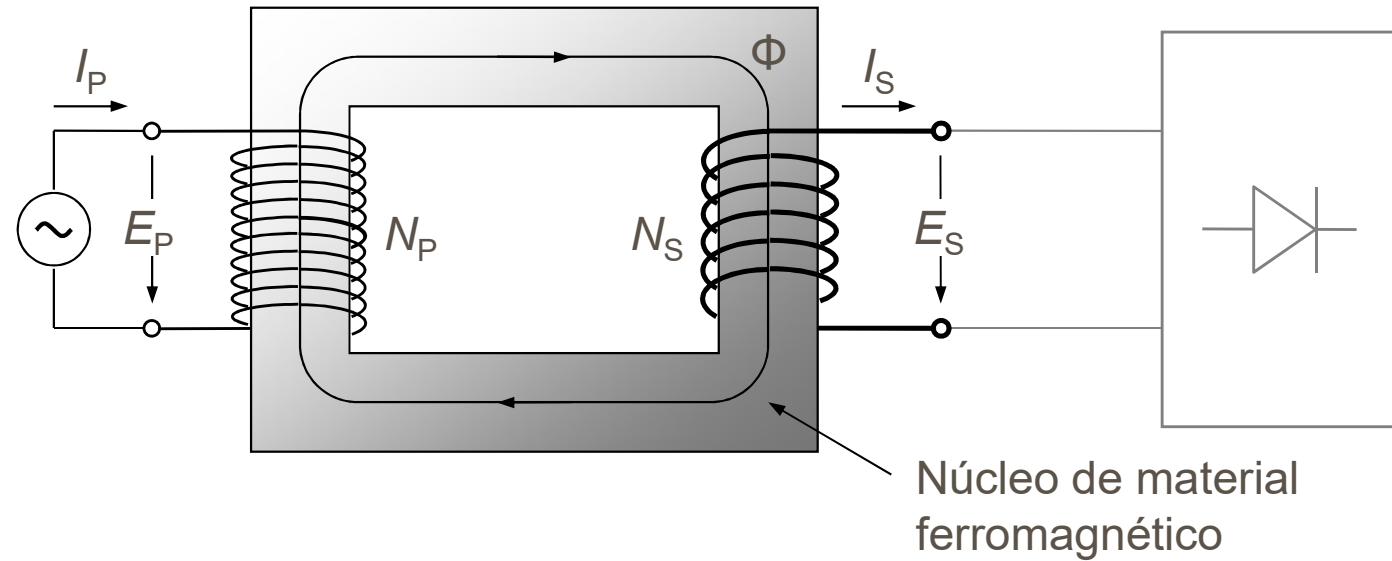


Diagrama de blocos duma fonte de alimentação de corrente contínua

# Fontes de Alimentação

## ■ Transformador



$$E_P = N_P \frac{d\Phi}{dt}, \quad E_S = N_S \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

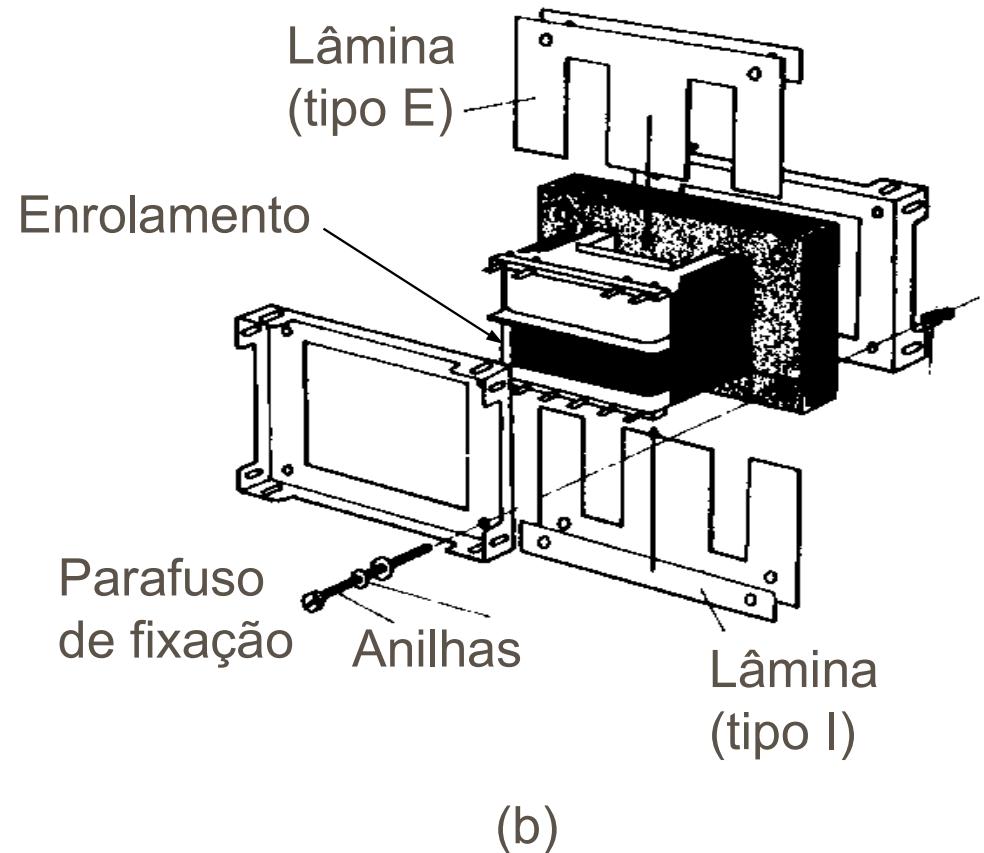
$$P_P = E_P \times I_P = E_S \times I_S = P_S \quad \rightarrow \quad \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a}$$

# Fontes de Alimentação

## ■ Transformador



(a)

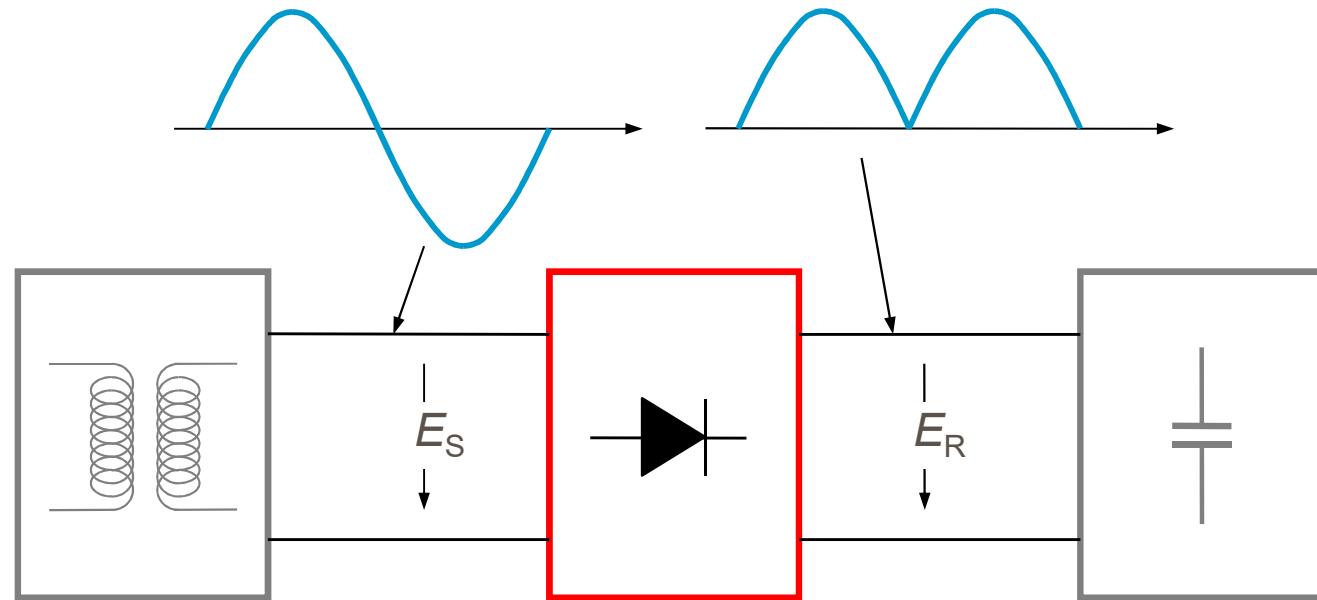


(b)

Transformador para fonte de alimentação:  
(a) aspecto exterior; (b) construção

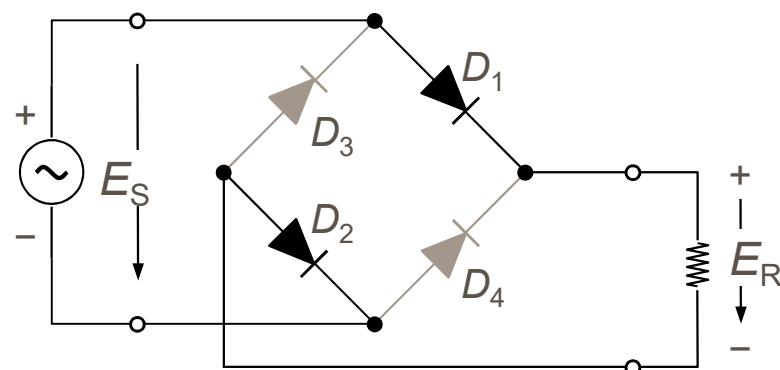
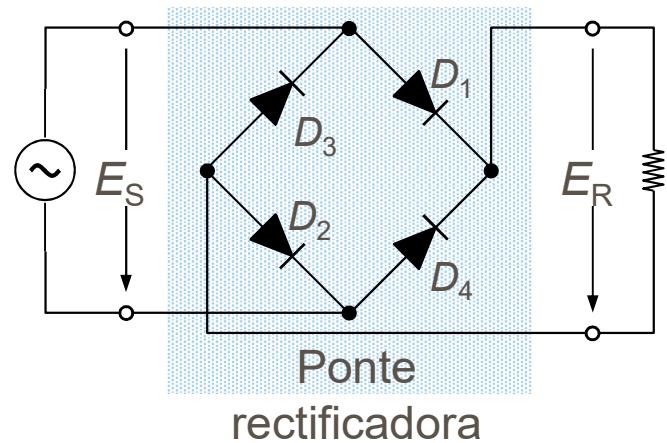
# Fontes de Alimentação

## ■ Rectificador



# Fontes de Alimentação

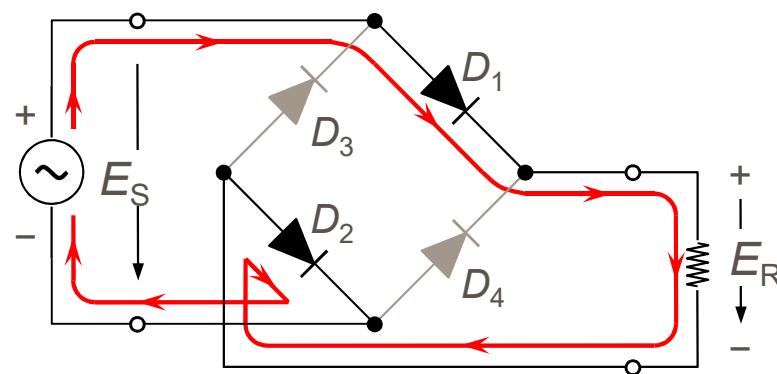
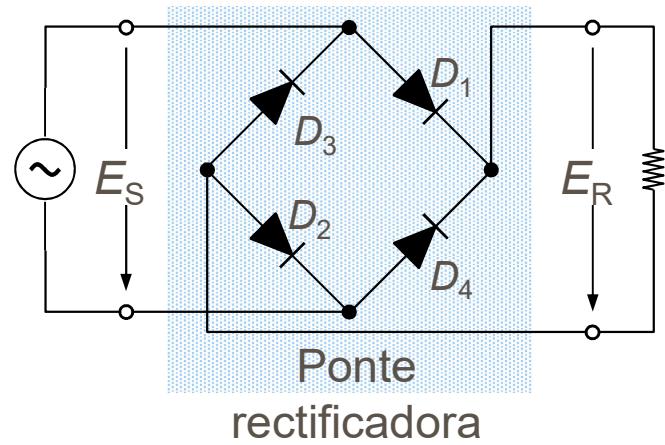
## ■ Rectificador



Funcionamento da ponte rectificadora

# Fontes de Alimentação

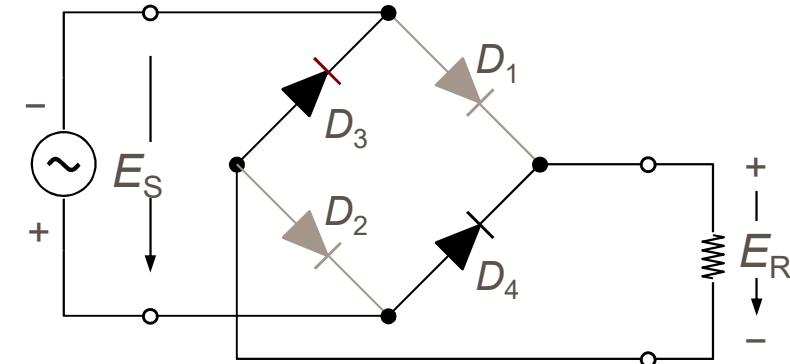
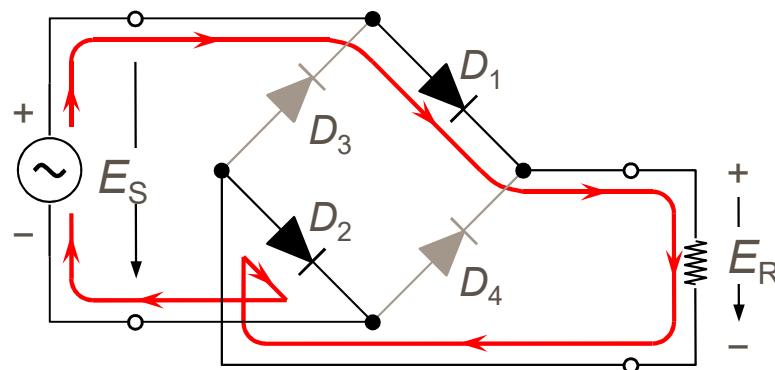
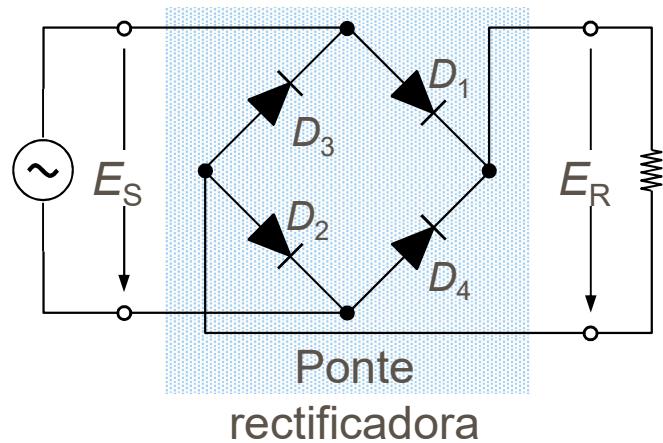
## ■ Rectificador



Funcionamento da ponte rectificadora

# Fontes de Alimentação

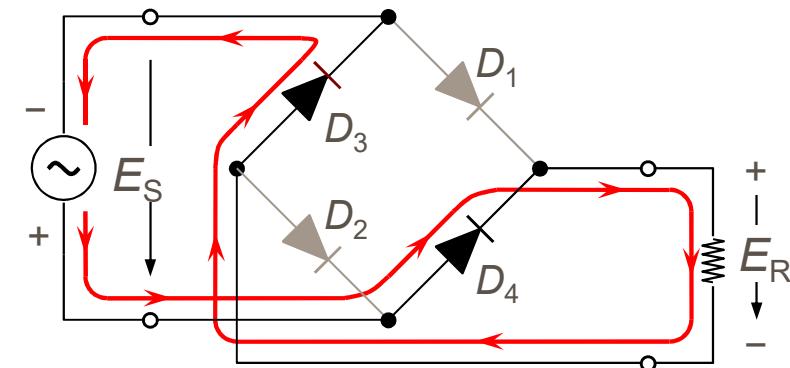
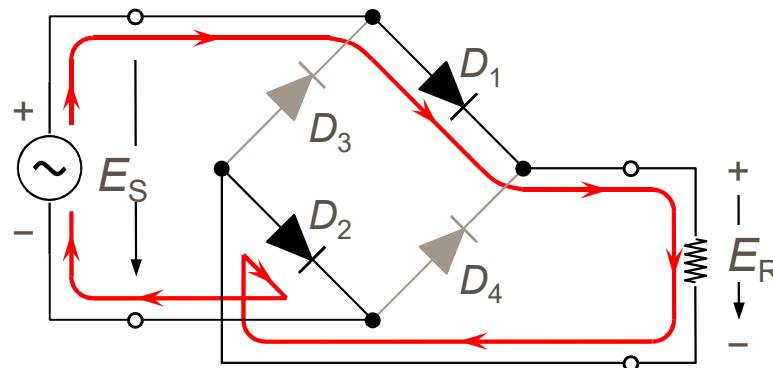
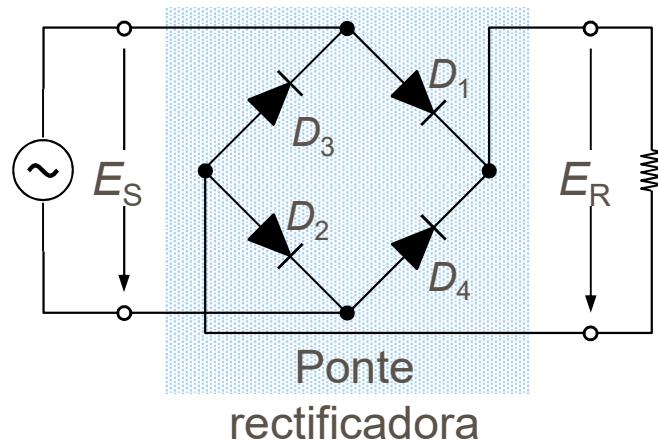
## ■ Rectificador



Funcionamento da ponte rectificadora

# Fontes de Alimentação

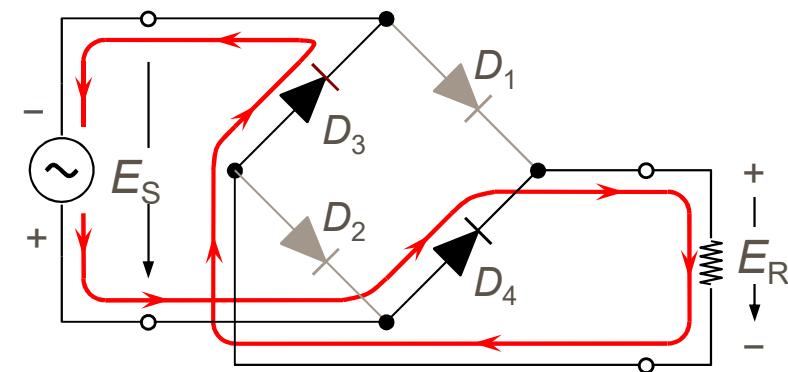
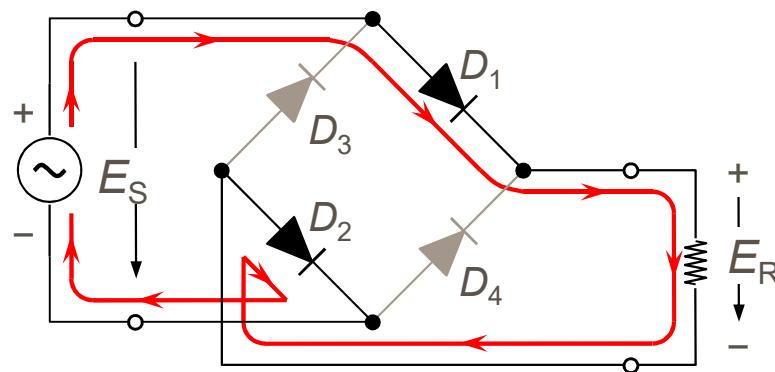
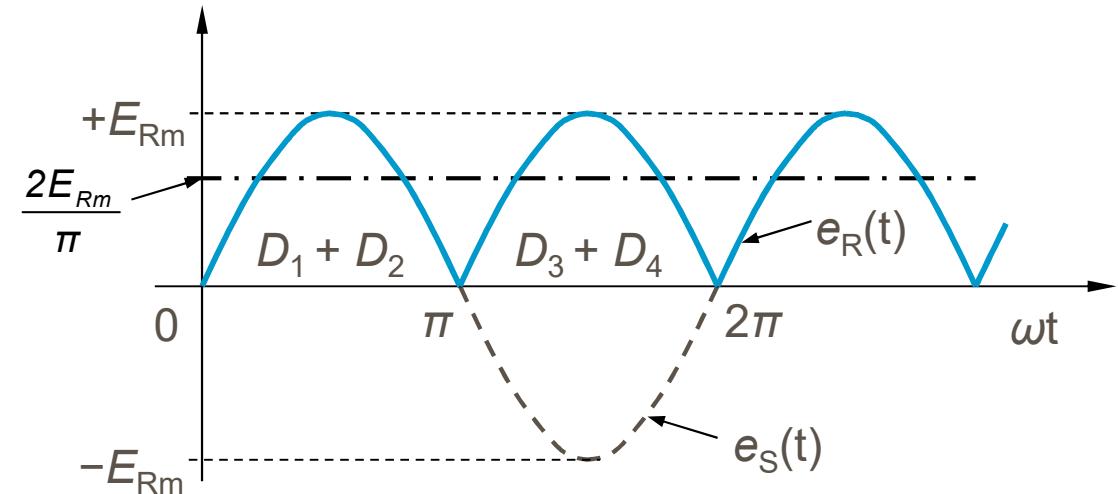
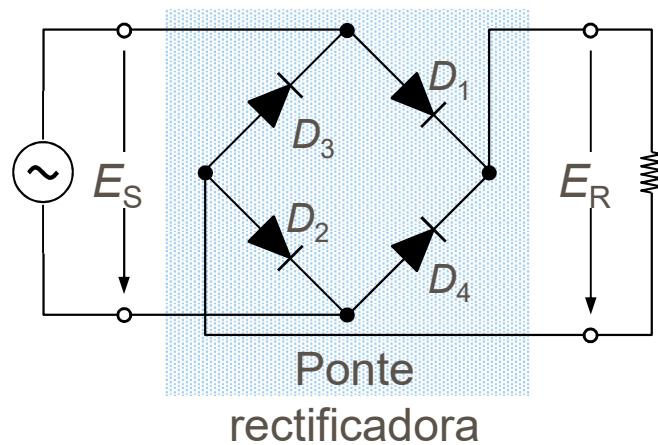
## ■ Rectificador



Funcionamento da ponte rectificadora

# Fontes de Alimentação

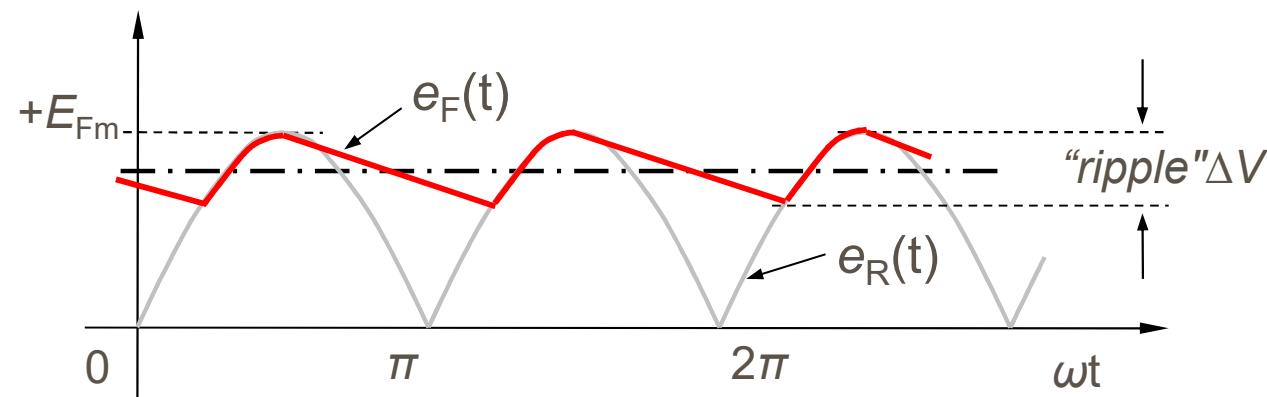
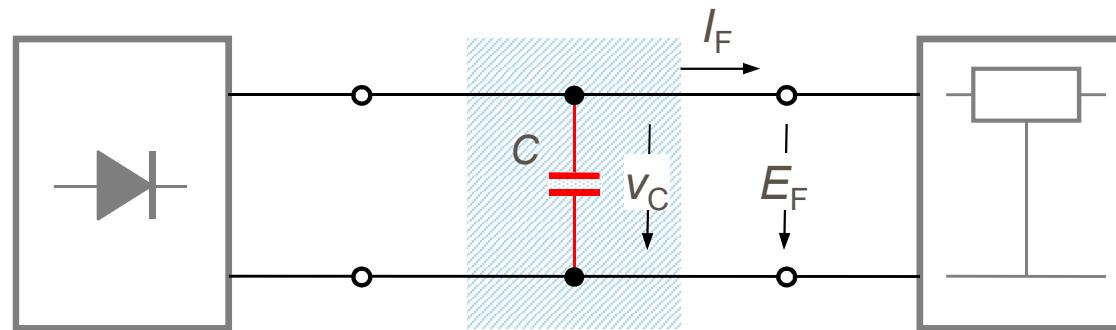
## ■ Rectificador



Funcionamento da ponte rectificadora

# Fontes de Alimentação

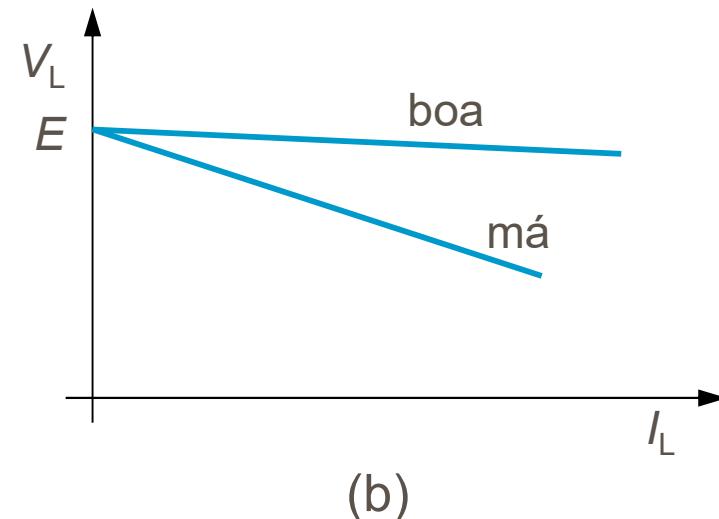
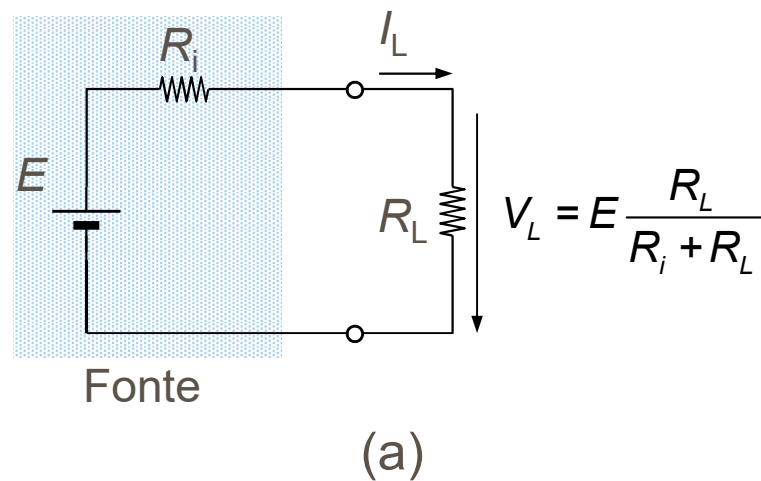
## ■ Filtro



$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} = I_F \approx \text{cte} \rightarrow I_F \approx C \frac{\Delta V_C}{\Delta t} \rightarrow E_{Fr,p-p} = \Delta V_C = \frac{I_F}{C} \Delta t = \frac{I_F}{f \times C}$$

# Fontes de Alimentação

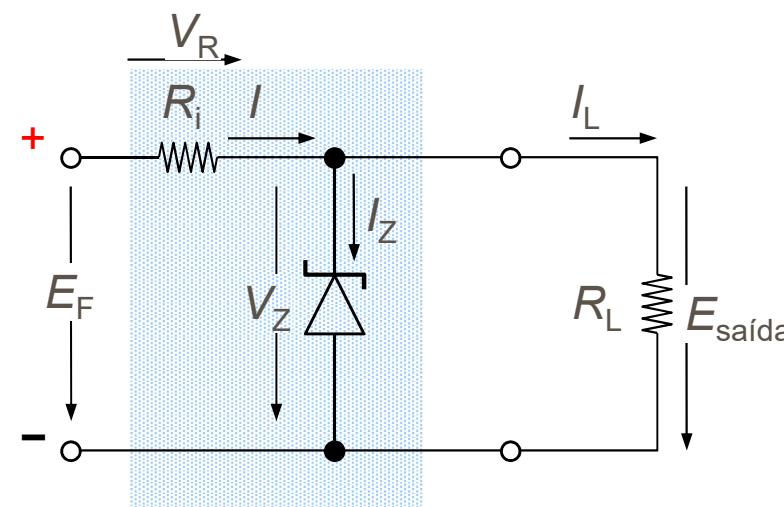
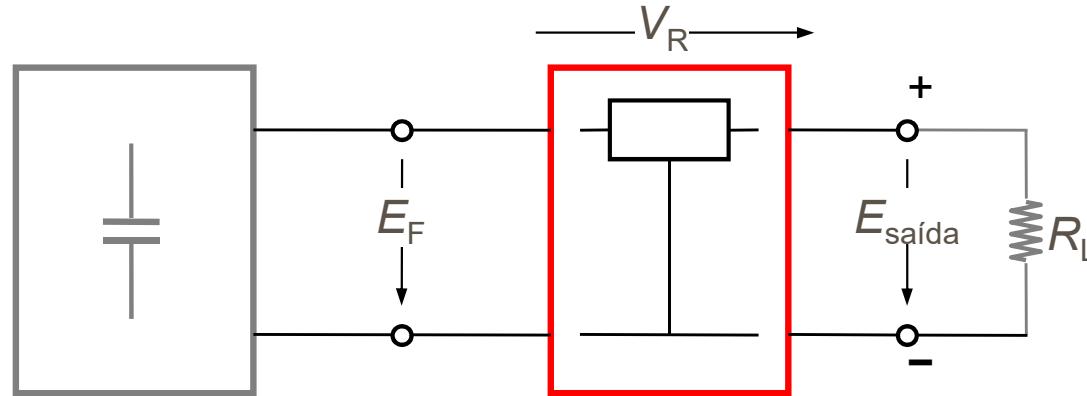
## ■ Regulador



Fonte de alimentação: (a) equivalente de *Thevenin*; (b) curvas de regulação

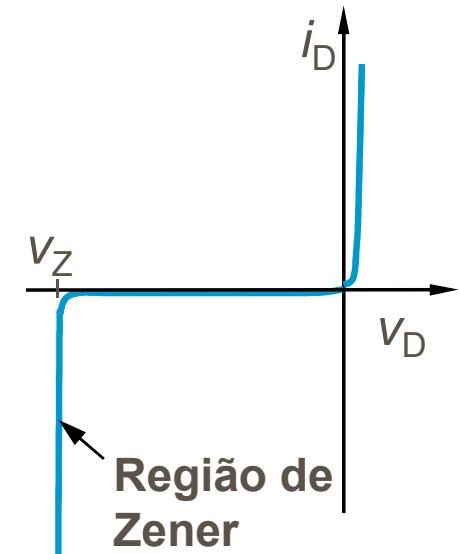
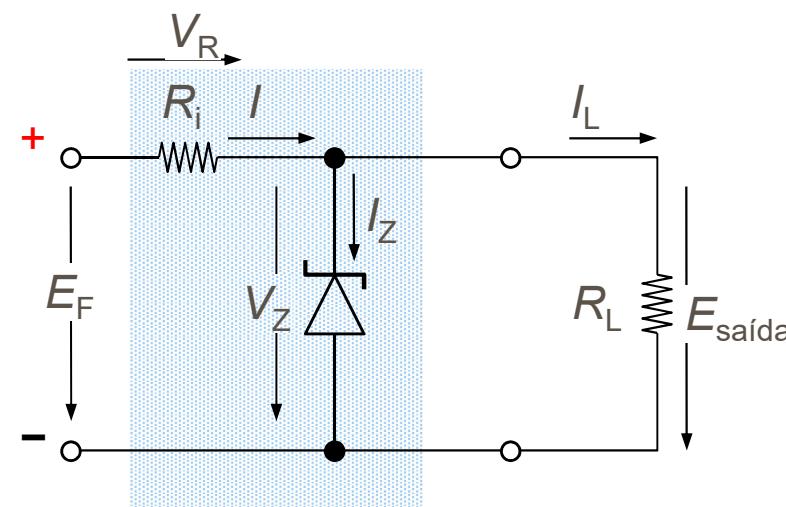
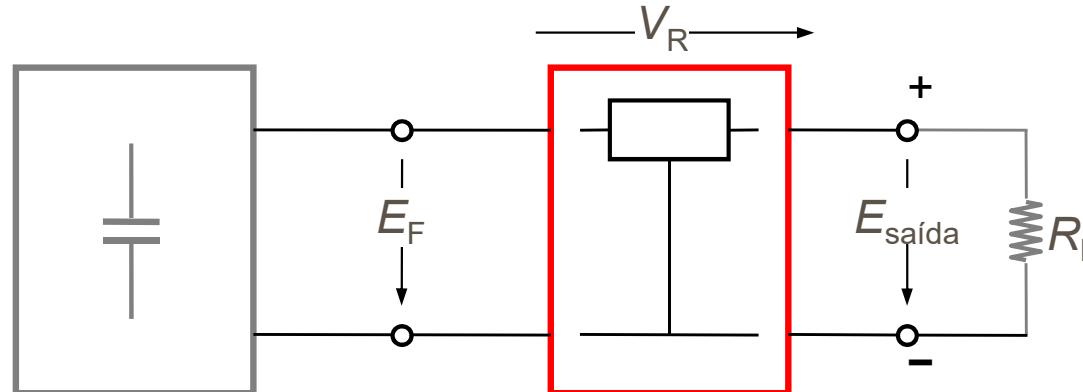
# Fontes de Alimentação

## ■ Regulador



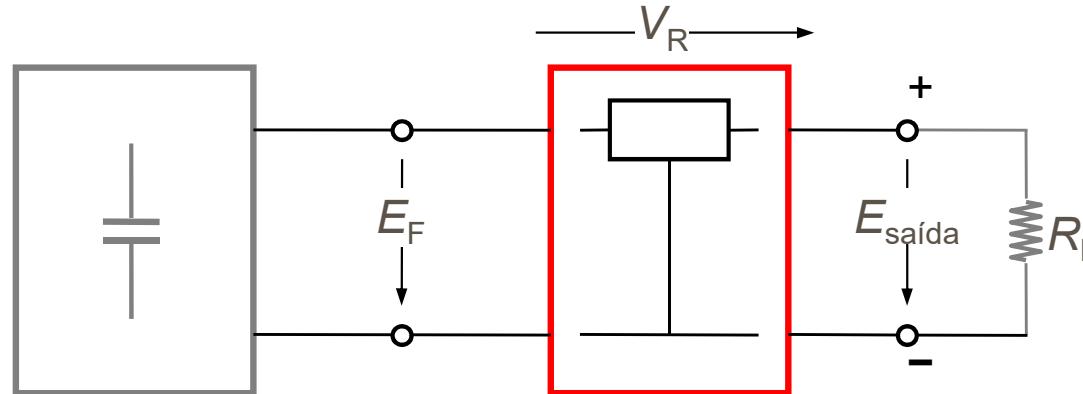
# Fontes de Alimentação

## ■ Regulador



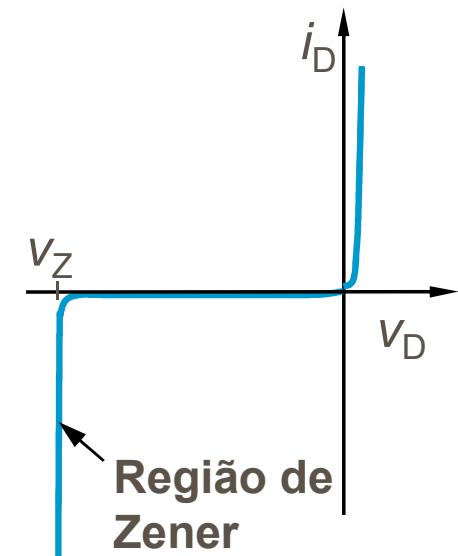
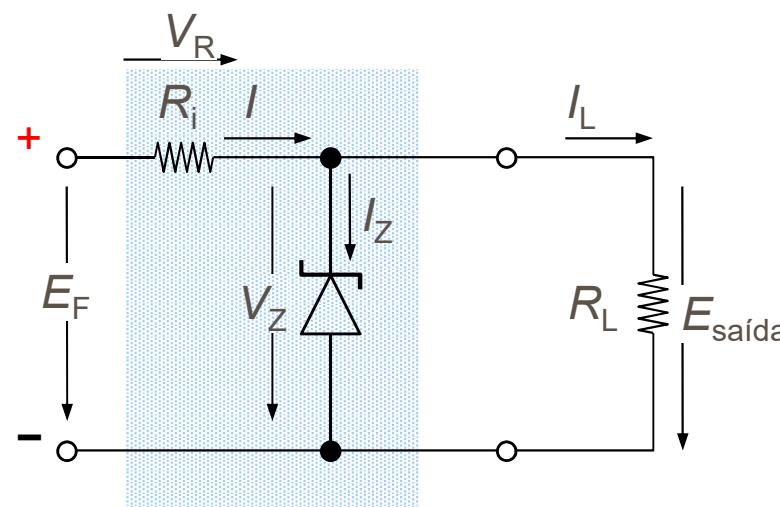
# Fontes de Alimentação

## ■ Regulador



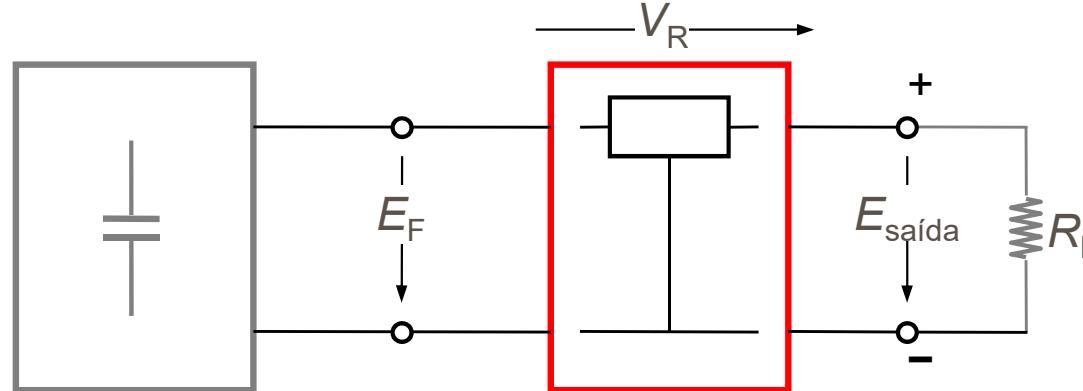
$$E_F = V_R + E_{\text{saída}}$$

$$I = \frac{V_R}{R_i} = \frac{E_F - V_Z}{R_i} \approx \text{cte.}$$



# Fontes de Alimentação

## ■ Regulador



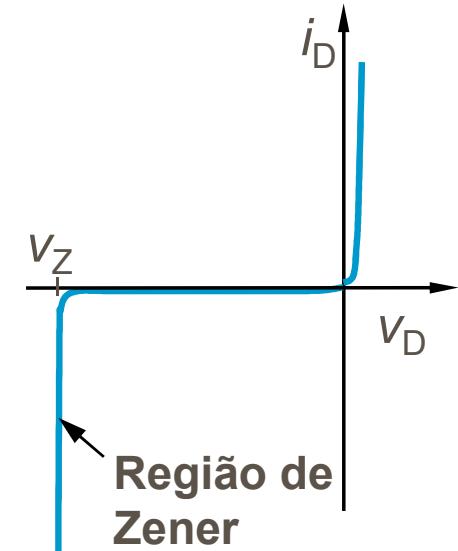
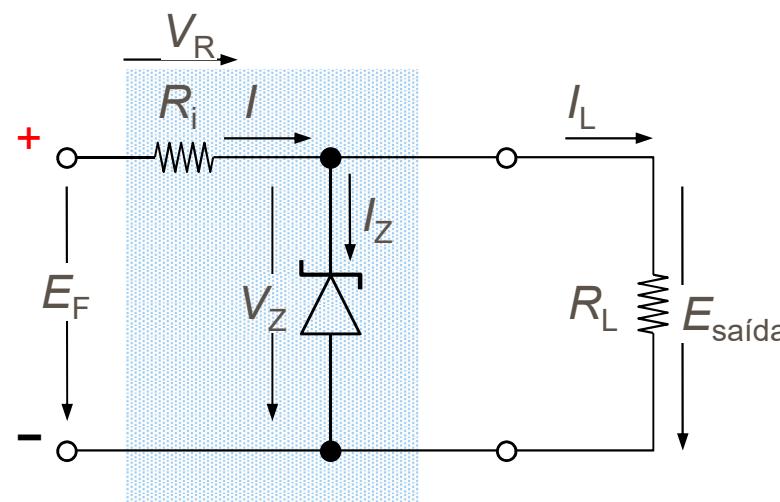
$$E_F = V_R + E_{saída}$$

$$I = \frac{V_R}{R_i} = \frac{E_F - V_Z}{R_i} \approx \text{cte.}$$

$$I = I_Z^\downarrow + I_L^\uparrow \approx \text{cte.}$$

para  $I_Z > 0$

$$\rightarrow E_{saída} = V_Z \approx \text{cte.}$$



# Fontes de Alimentação

## ■ Regulador

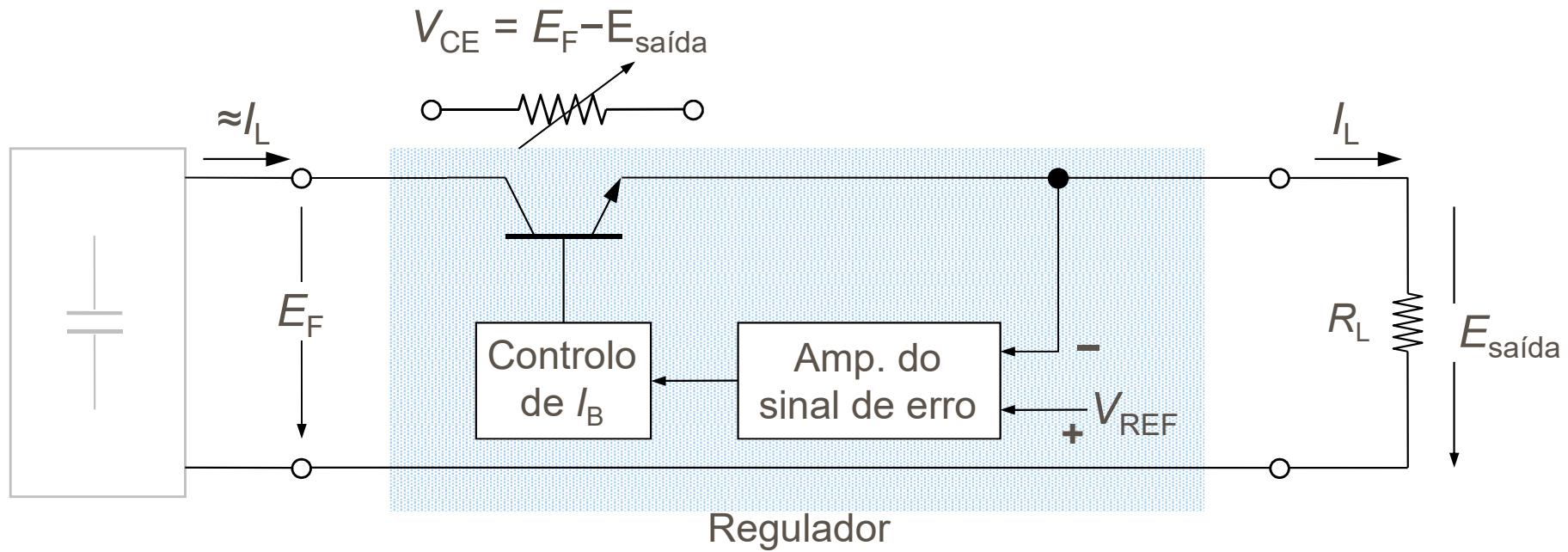
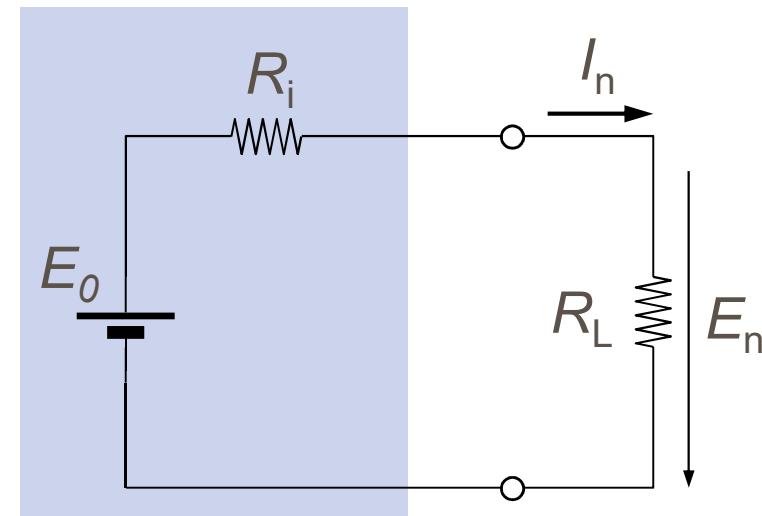


Diagrama de blocos dum regulador de tensão linear

# Fontes de Alimentação

## ■ Especificações

- (Tensão de entrada)
- Tensão nominal ( $E_n$ )
- Corrente nominal ( $I_n$ )
- Potência nominal ( $= E_n I_n$ )

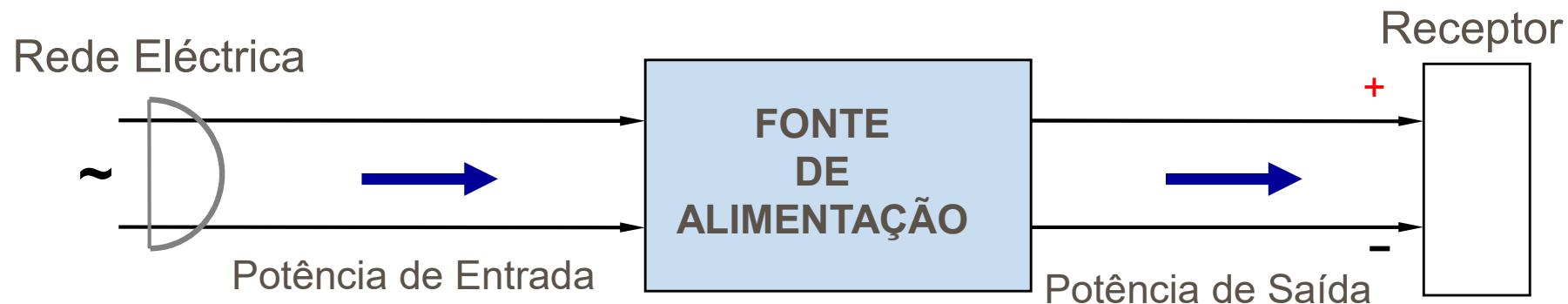


Fonte de Alimentação  
(círcuito equivalente)

# Fontes de Alimentação

## ■ Especificações

### ■ Rendimento



$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de saída (CC)}}{\text{Potência de entrada (CA)}} \times 100\%$$

- Fontes lineares → rendimentos de 30% (típ.)
- Fontes comutadas → rendimento > 70%

# Fontes de Alimentação

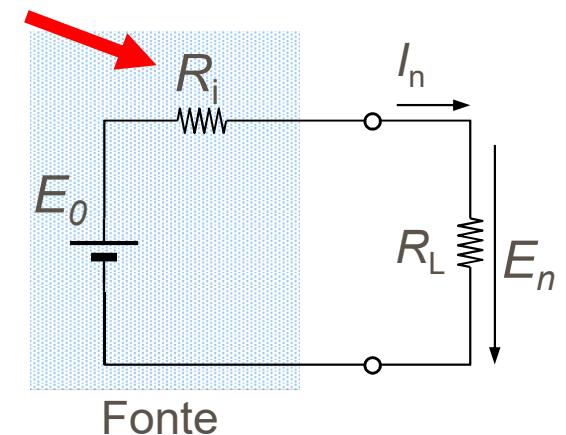
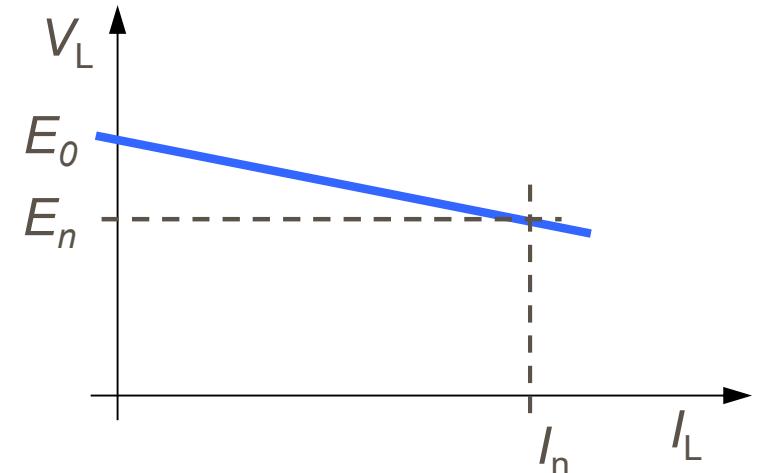
## ■ Especificações

- Regulação na carga

$$\text{Regulação na carga} = \frac{E_o - E_n}{E_n} \times 100\%$$

- Impedância de saída (ou interna)

$$\text{Impedância de saída} = \frac{E_o - E_n}{I_n} \quad (\Omega)$$



# Fontes de Alimentação

## ■ Especificações

### ■ Regulação na entrada

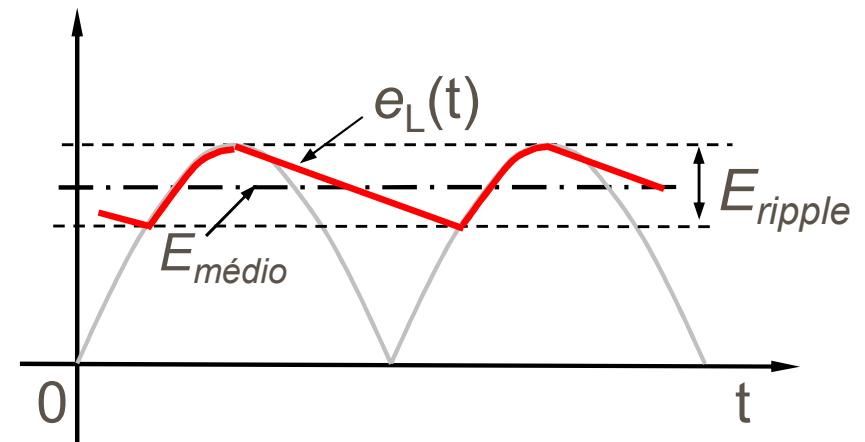
$$\text{Regulação na entrada} = \frac{\frac{E_{saída_{max}} - E_{saída_{min}}}{E_{saída_{min}}} \times 100\%}{\frac{E_{ent_{max}} - E_{ent_{min}}}{E_{ent_{min}}}}$$

# Fontes de Alimentação

## ■ Especificações

- "Ripple" (ou "ondulação")

$$\text{Factor de "ripple"} = \frac{E_{\text{ripple}}}{E_{\text{médio}}} \times 100\%$$



- Rejeição do "ripple" (bloco regulador)

$$\text{Rejeição do "Ripple"} = 20_{10} \log \left( \frac{E_{r_{\text{saída}}}}{E_{r_{\text{ent}}}} \right) dB$$

# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo

Uma fonte de alimentação possui as seguintes características:

- Tensão de entrada: entre 200V e 240V
- Tensão de saída: 12V (em vazio)
- Corrente de saída 2A (máximo)
- Impedância de saída:  $0.1\Omega$
- Regulação na entrada: melhor do que 0.2%
- "Ripple": menos de 10mVp-p (à plena-carga)

Calcular:

- a) a regulação na carga
- b) o factor de "ripple" à plena carga (2A)

# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo

a)

$$E_n = 12V - (0.1\Omega)(2A) = 11.8 \text{ V}$$

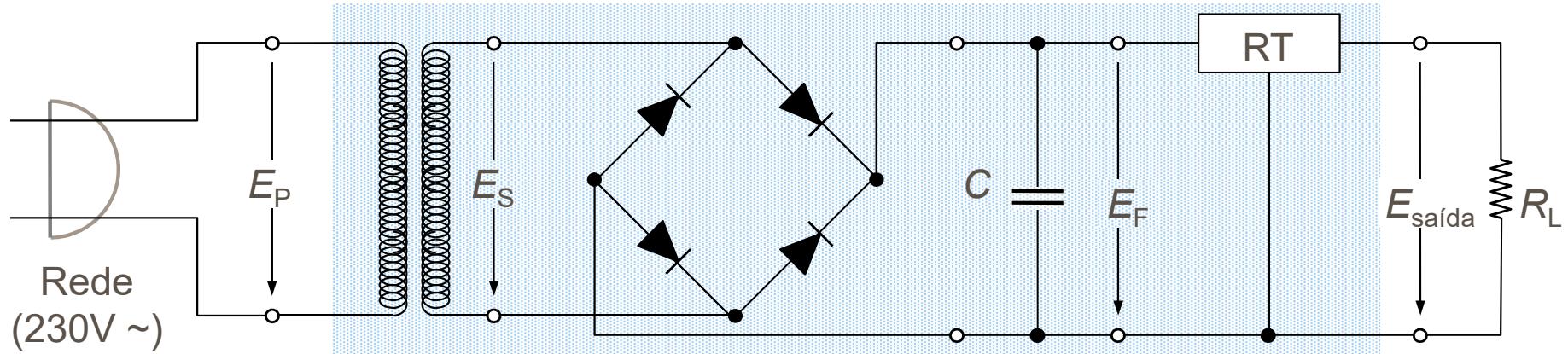
$$\frac{E_0 - E_n}{E_n} \times 100\% = \frac{12V - 11.8V}{11.8V} = 1.7\%$$

b)

$$\text{factor de "ripple"} = \frac{10\text{mV}}{11.8\text{V}} \times 100\% = 0.08\%$$

# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo



Características do regulador (RT):

- Tensão de entrada: entre 7V e 20V
- Tensão de saída (nominal): 5V
- Corrente de saída (máxima) 1.5A
- Regulação na carga: 2%

## ■ Exemplo

A tensão na rede é **230V/50Hz**, a razão de transformador é **a = 20**, e capacidade do condensador do filtro é **C = 3300μF**. Uma vez ligada a fonte ao receptor, mediu-se aos seus terminais uma tensão de **4.95V** para uma corrente de **1A**.

Determinar:

**a)** o valor da resistência de carga; **b)** a tensão à saída do transformador; **c)** o "ripple" à entrada do regulador; **d)** os valores médio e mínimo da tensão à entrada do regulador; **e)** o rendimento da fonte, considerando o transformador ideal e desprezando a queda de tensão nos dióodos.

# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo

a) O valor da resistência de carga é,

$$R_L = \frac{4.95 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 4.95 \Omega$$

b) A tensão no secundário do transformador é,

$$E_s = E_p \frac{N_s}{N_p} = E_p \frac{1}{a} = \frac{230}{20} = 11.5 \text{ V}_{\text{ef}}$$

c) O "ripple" da tensão aos terminais do condensador é,

$$E_{Fr,p-p} = \frac{I_F}{C} \Delta t = \frac{1 \text{ A}}{3300 \mu\text{F}} \times 10 \text{ ms} = 3.0 \text{ V}_{\text{p-p}}$$

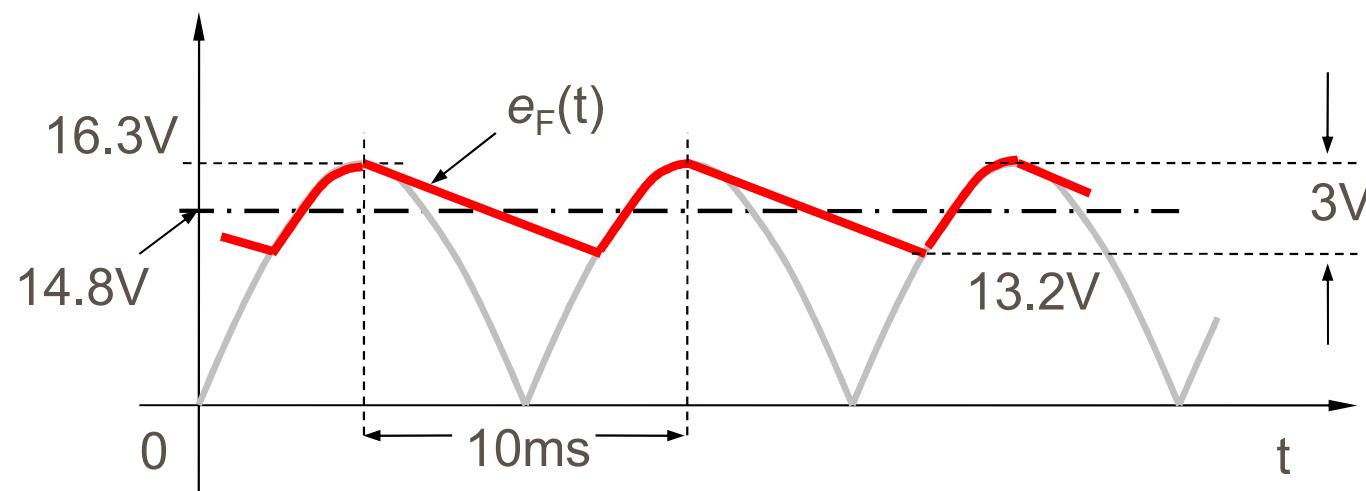
# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo

d) o valor médio da tensão à entrada do regulador é dado por,

$$E_{F\text{máximo}} \approx E_{Rm} - \frac{1}{2}E_{Fr,p-p} = 11.5\sqrt{2} V - \frac{3V}{2} = 14.8 V$$

$$E_{F\text{mínimo}} \approx E_{Rm} - E_{Fr,p-p} = 13.2 V$$



# Fontes de Alimentação

## ■ Exemplo

d) admitindo que, quer o transformador, quer o rectificador, não têm perdas, apenas o regulador dissipava potência. O valor médio das perdas neste bloco é,

$$P_{perdas} = V_{CE} \times I_L = (E_{F_{médio}} - E_{saída})I_L \approx (14.8\text{ V} - 5\text{ V}) \times 1\text{ A} = 9.8\text{ W}$$

Logo o rendimento da fonte é ,

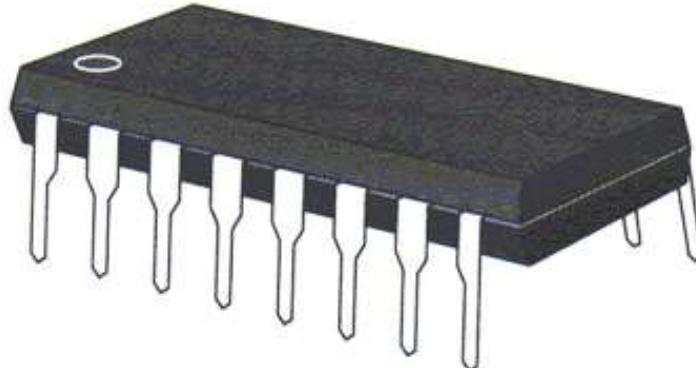
$$\text{rendimento} = \frac{\text{Potência de saída (CC)}}{\text{Potência de entrada (CA)}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} = \frac{5\text{ W}}{5\text{ W} + 9.8\text{ W}} = 33.8\%$$

# Transistor Bipolar

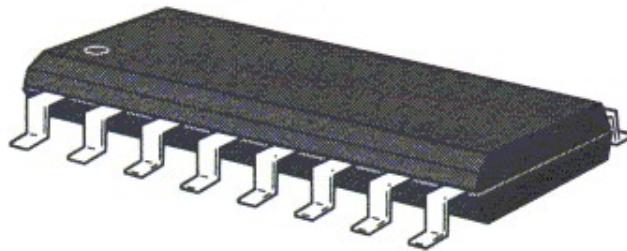
# Transístor Bipolar

## ■ Tipos de Transístores

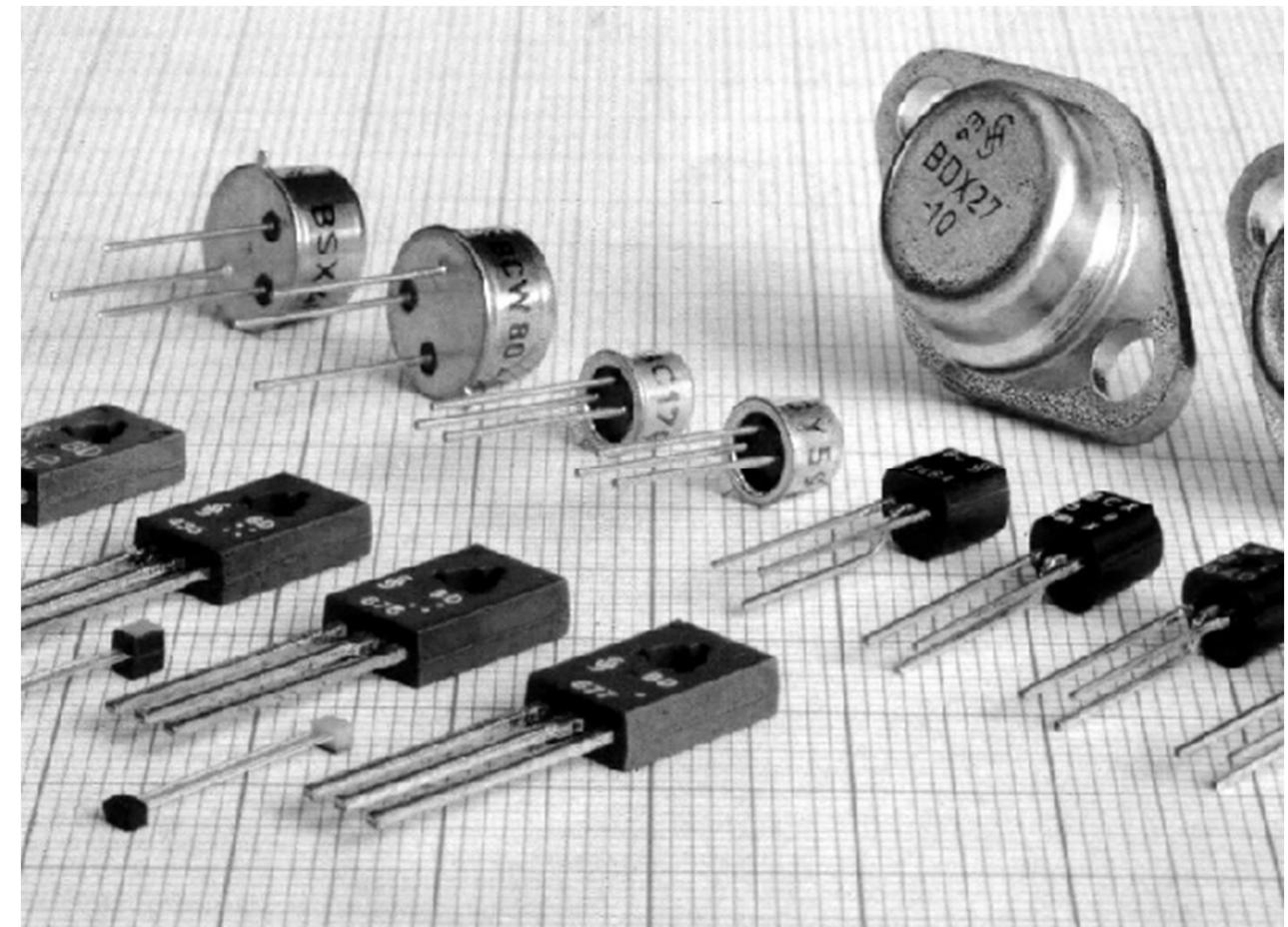
- Bipolares (BJT)
- Efeito de Campo (FET)



(a) Dual-in-line package (DIP)



(b) Small-outline IC (SOIC)



# Transistor Bipolar

The Nobel Prize in Physics 1956

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"



**William Bradford Shockley**

USA

Semiconductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc.  
Mountain View, CA, USA

b. 1910 (in London, United Kingdom)  
d. 1989



**John Bardeen**

USA

University of Illinois  
Urbana, IL, USA

b. 1908  
d. 1991



**Walter Houser Brattain**

USA

Bell Telephone Laboratories  
Murray Hill, NJ, USA

b. 1902  
d. 1987

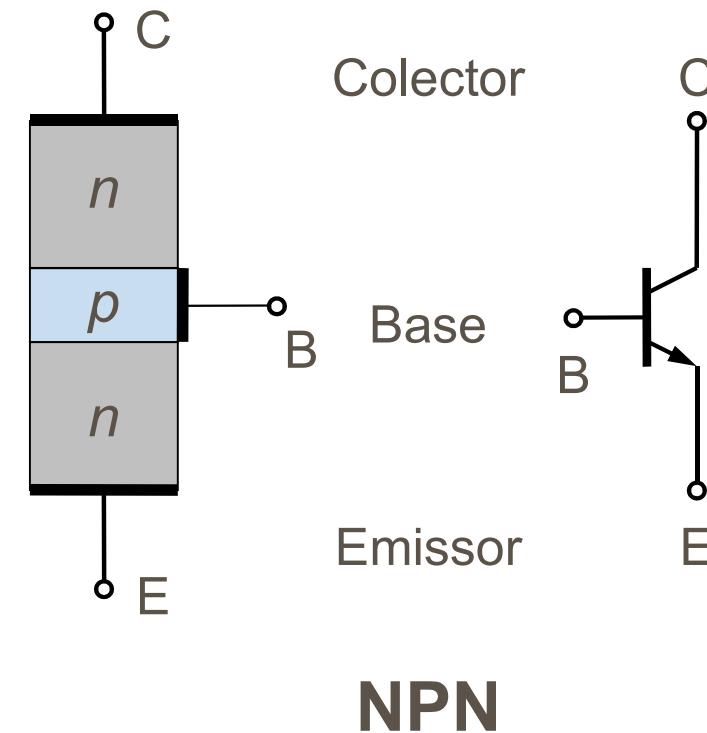
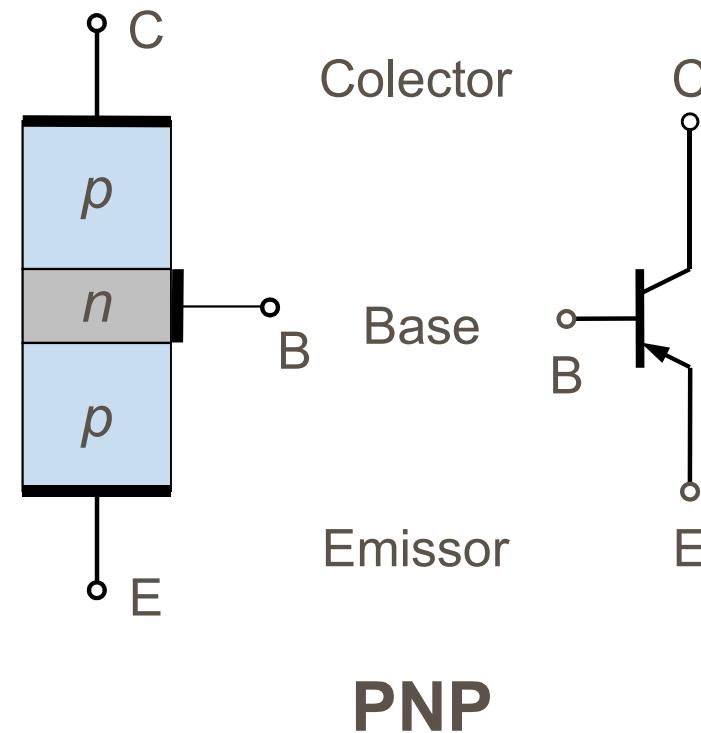
# Transístor Bipolar



Réplica do primeiro transíster

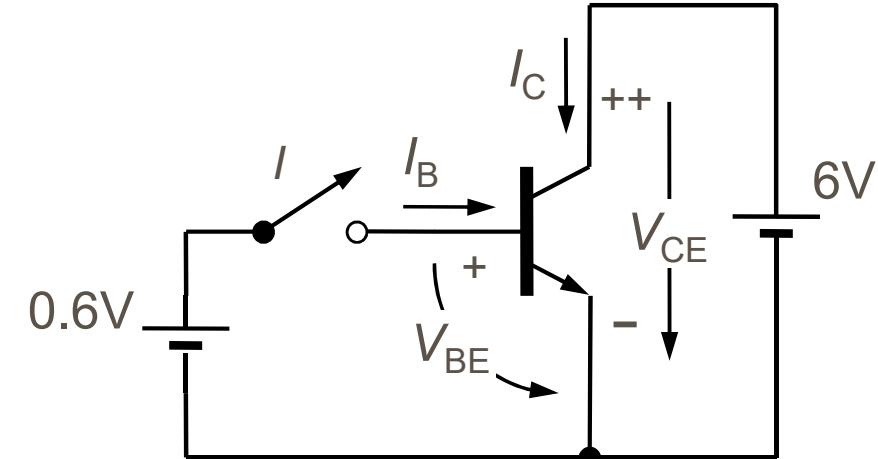
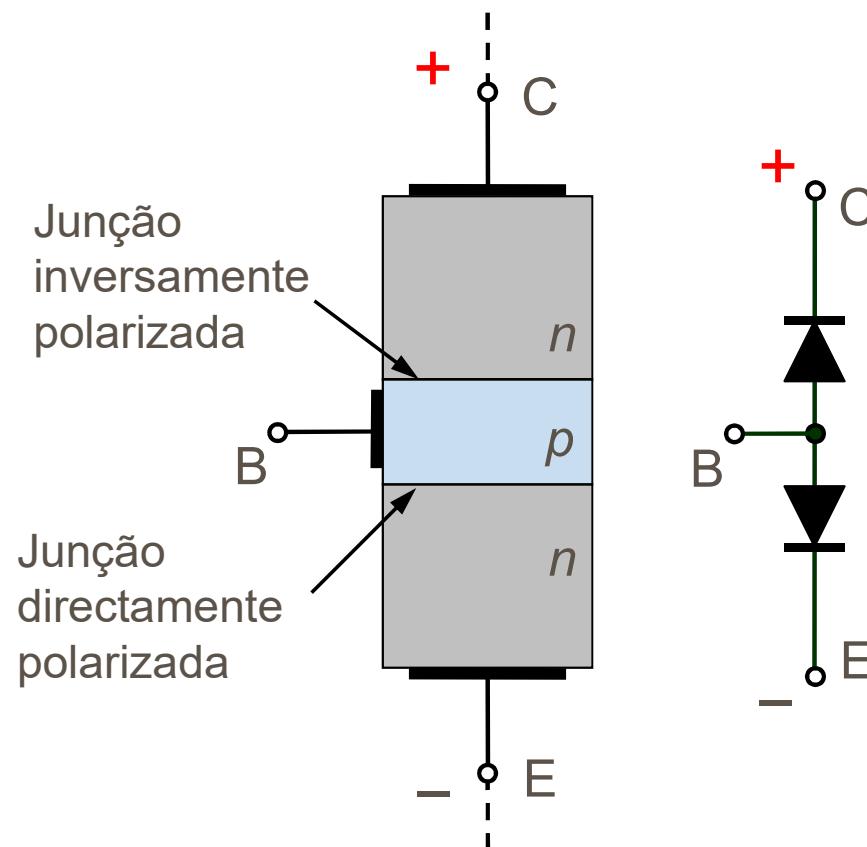
# Transístor Bipolar

## ■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



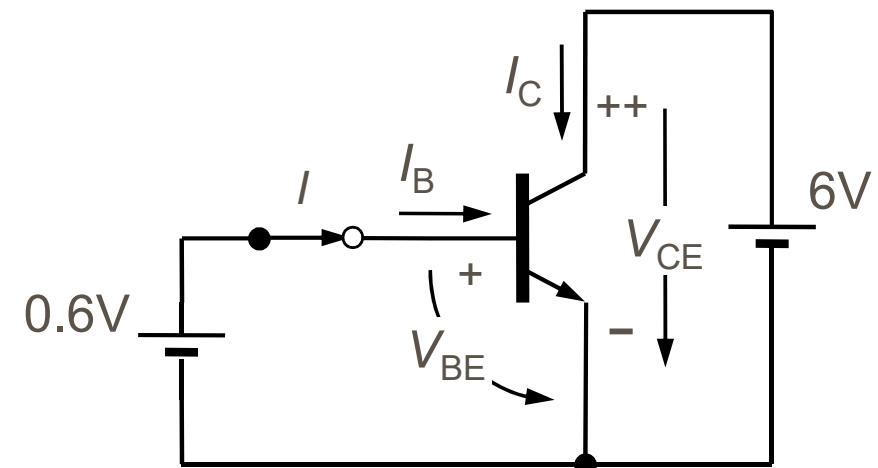
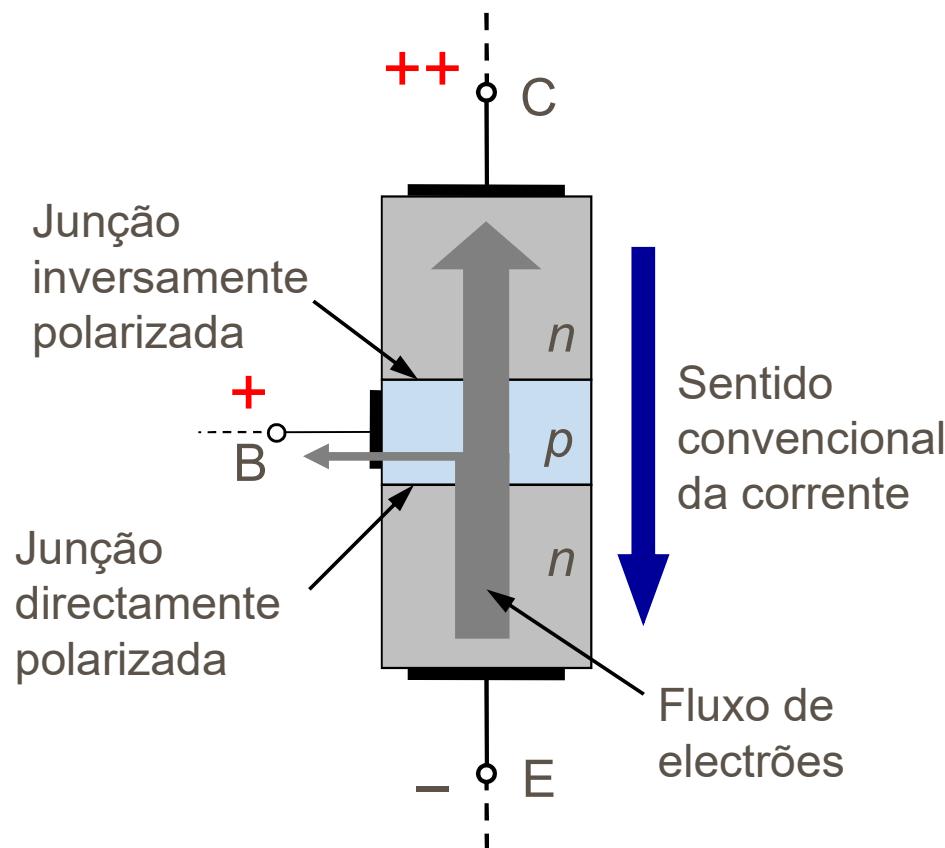
# Transístor Bipolar

## ■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



# Transístor Bipolar

## ■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



# Transístor Bipolar

## ■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar

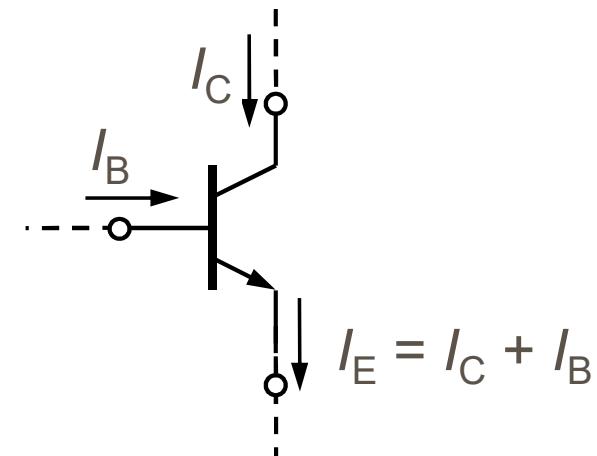
... O transístor bipolar é, basicamente (pelo seu princípio de funcionamento), um amplificador de corrente ...

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}, \quad (I_C = h_{FE} \cdot I_B)$$

$h_{FE} \rightarrow$  **Ganho em corrente contínua**

(também designado por  $\beta$ )

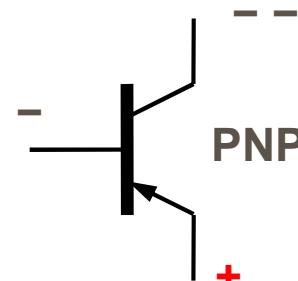
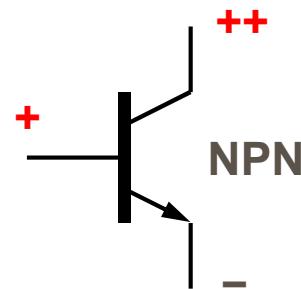
$$I_E = I_C + I_B \approx I_C \quad (\text{uma vez que } I_C \gg I_B)$$



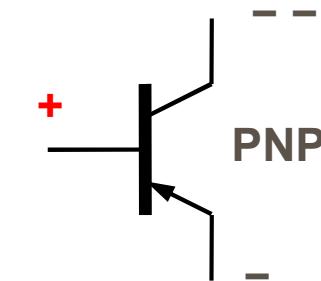
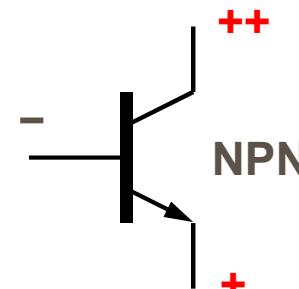
# Transístor Bipolar

## ■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar

... O comportamento do transístor PNP é idêntico ao do NPN (apenas se inverte a polaridade das tensão e o sentido das correntes)...



Conduz



Não conduz

# Transístor Bipolar

## ■ Polarização do Transístor

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}$$

$$1V \approx 10k\Omega \times I_B + 0.6V$$

$$\rightarrow I_B = \frac{1V - 0.6V}{10k\Omega} = 40\mu A$$

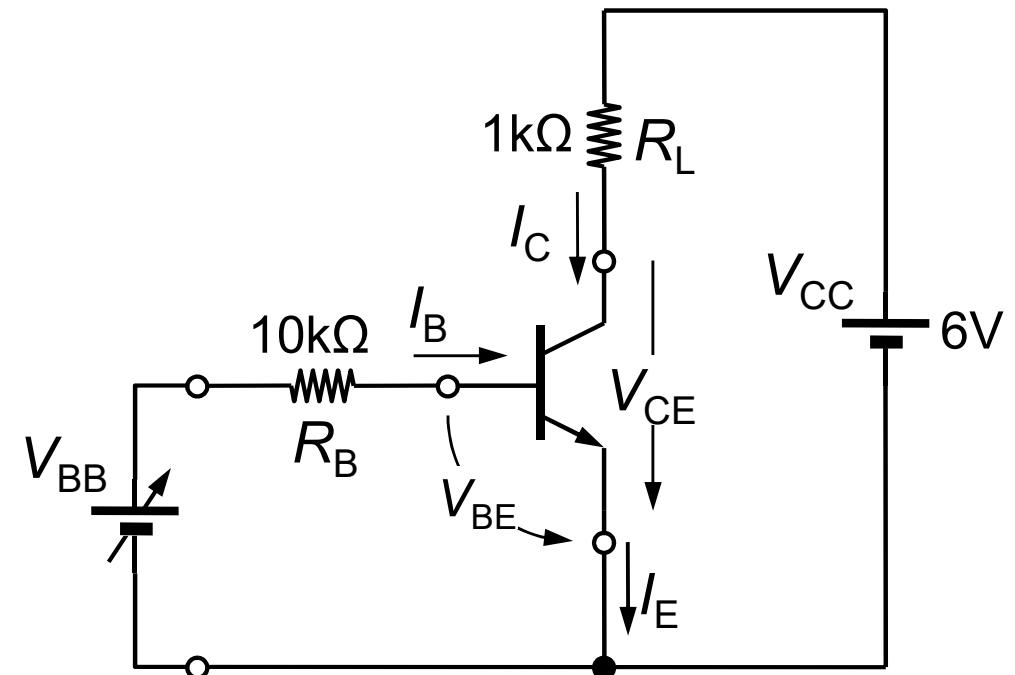
$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 40\mu A = 4mA$$

$$I_E = I_C + I_B = 4.04mA (\approx 4mA)$$

$$V_{CC} = R_L I_C + V_{CE}$$

$$6V = 1k\Omega \times 4mA + V_{CE}$$

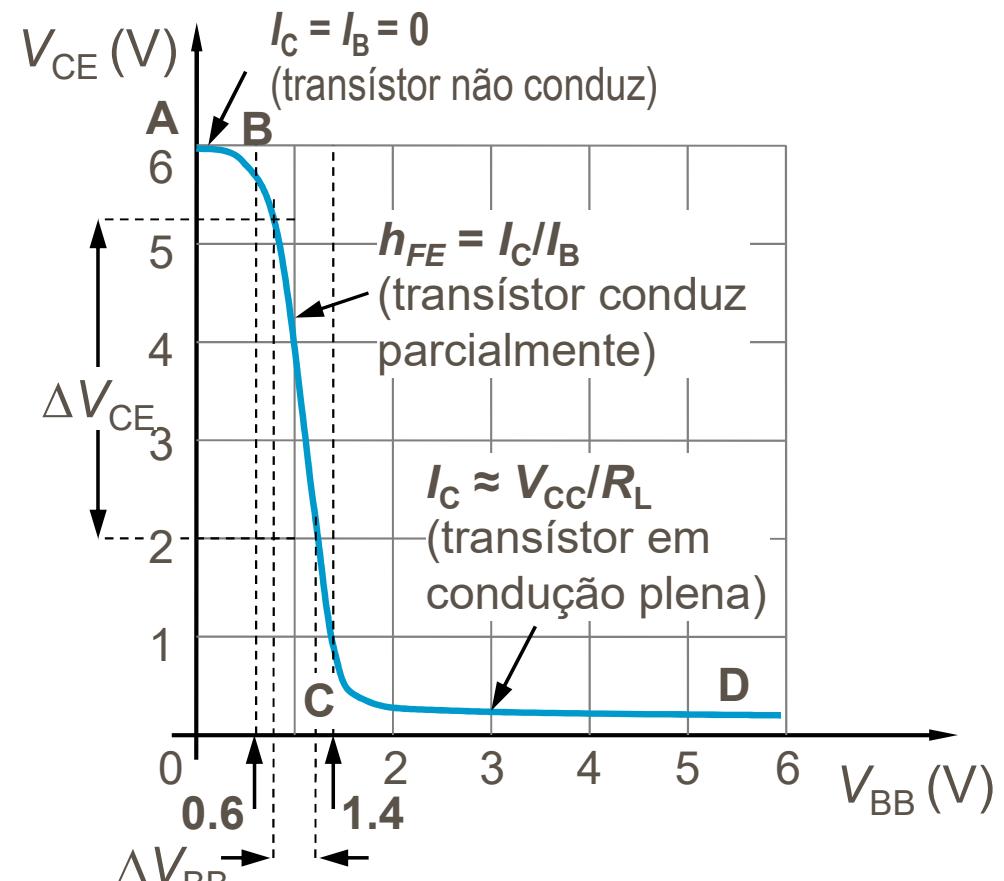
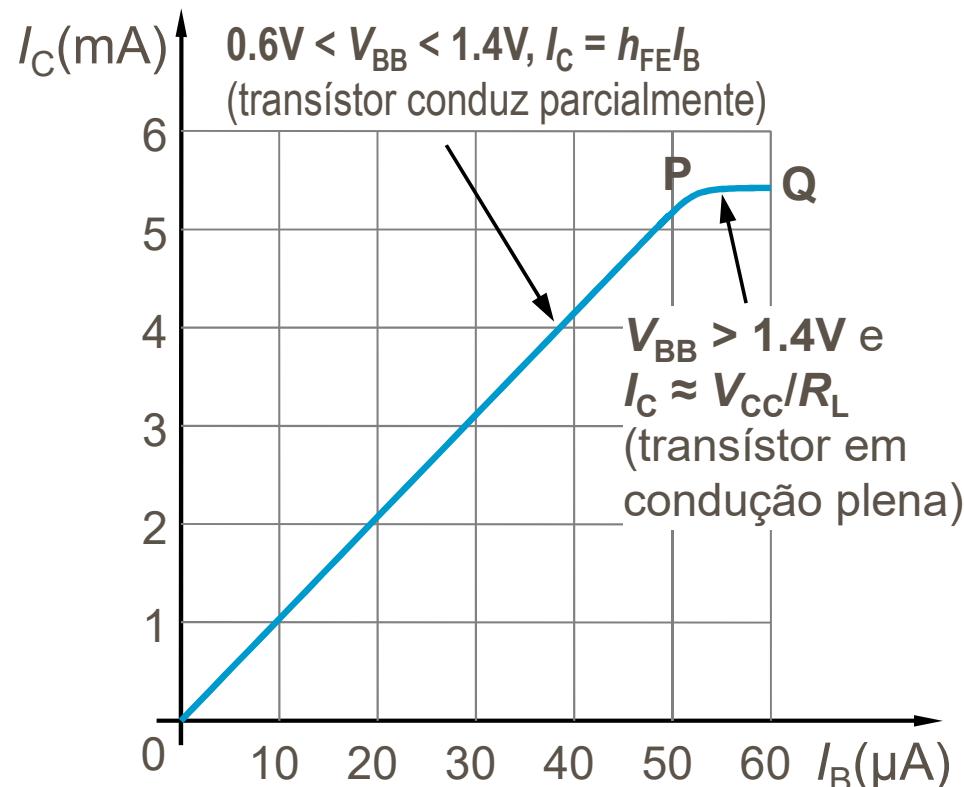
$$\rightarrow V_{CE} = 2V$$



$$V_{BB} \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \quad \rightarrow \quad V_{CE} = V_{CC} - R_L I_C \uparrow$$

# Transístor Bipolar

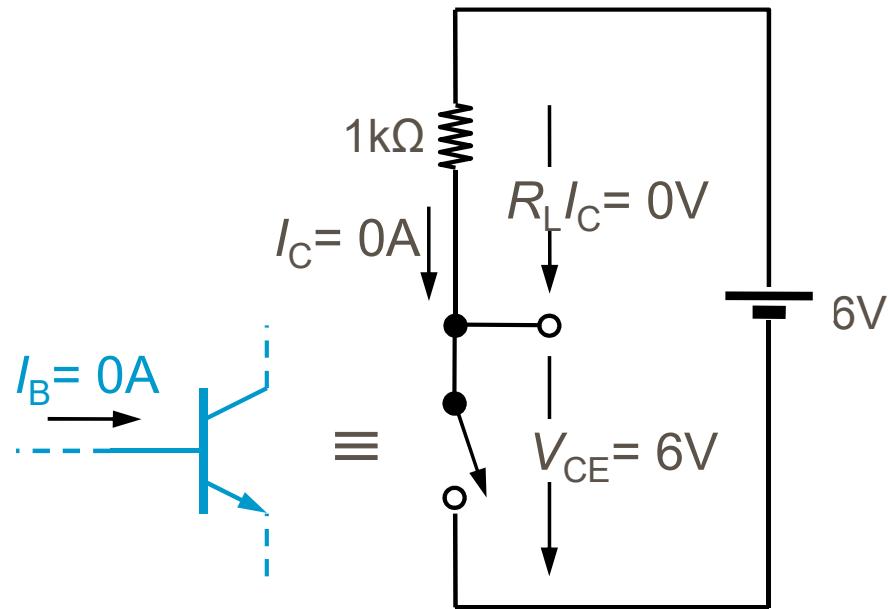
## ■ Polarização do Transístor



$$V_{BB} \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \quad \rightarrow \quad \downarrow V_{CE} = V_{cc} - R_L I_C \uparrow$$

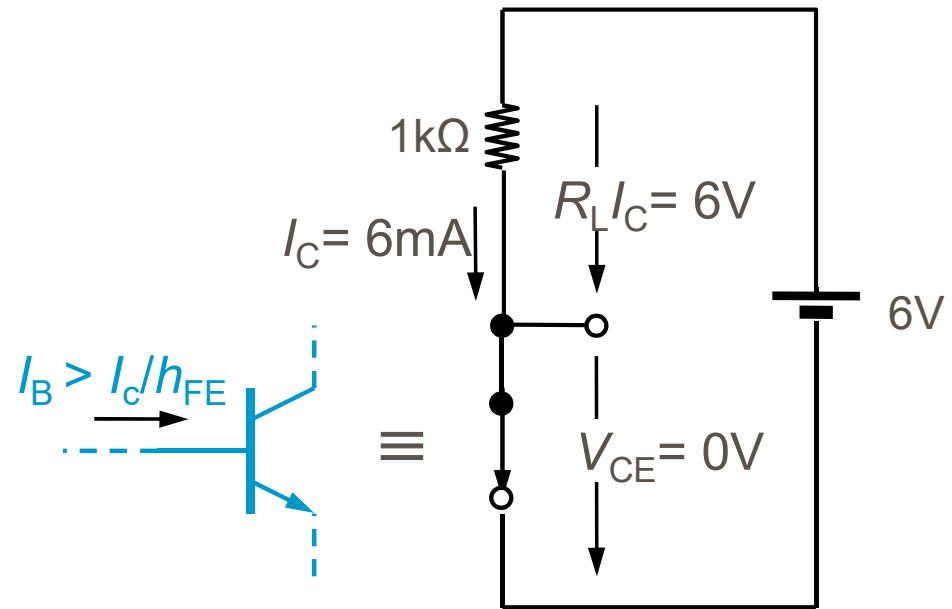
# Transístor Bipolar

## ■ Funcionamento como Interruptor Electrónico



Transístor desligado

$$I_B = 0, \quad I_C = 0, \quad V_{CE} = V_{CC}$$

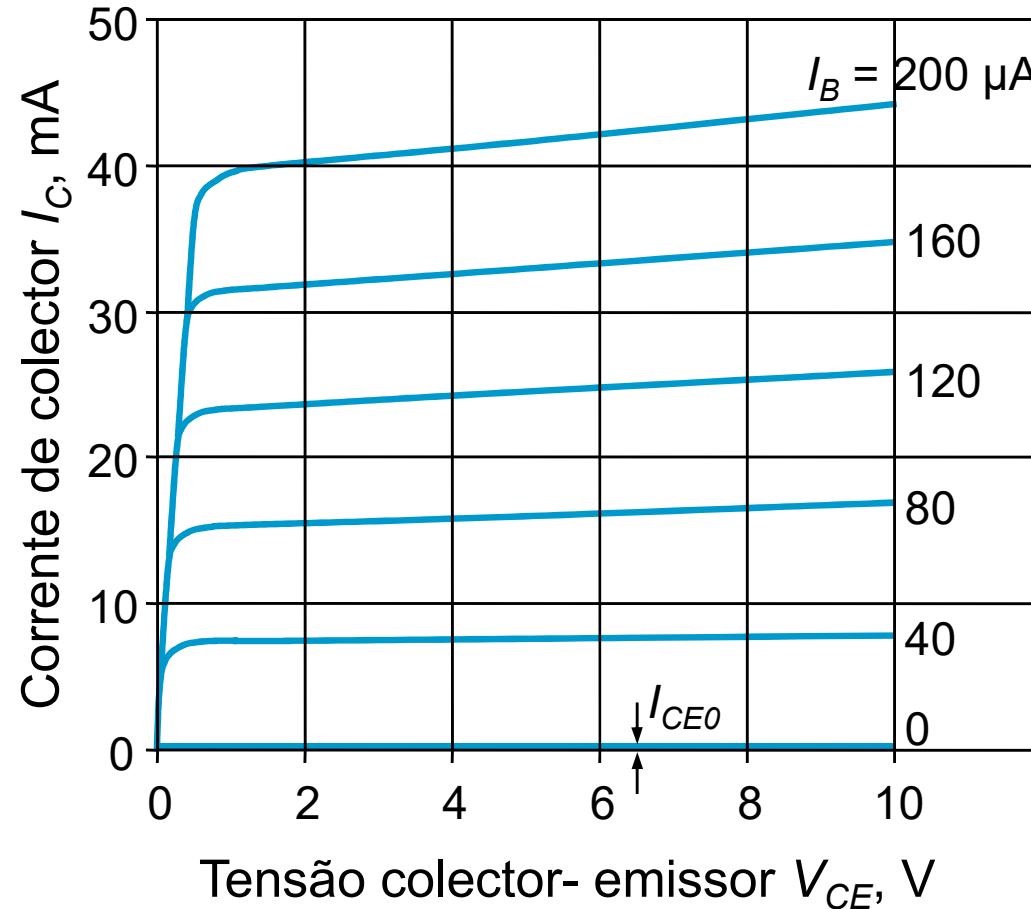
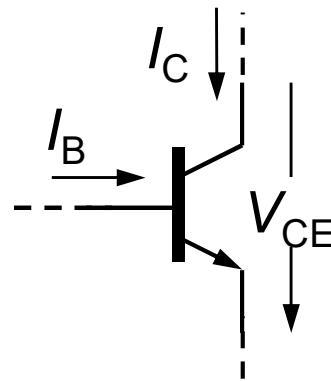


Transístor ligado

$$I_B > \frac{V_{cc}}{h_{FE}R_L}, \quad V_{CE} \approx 0, \quad I_C \approx \frac{V_{cc}}{R_L}$$

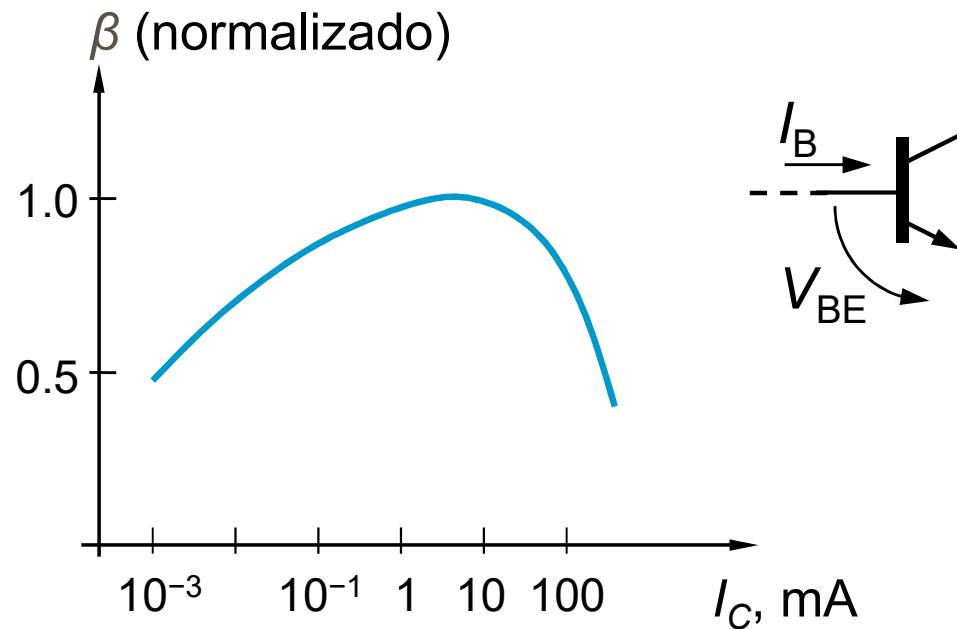
# Transístor Bipolar

## ■ Características entrada Entrada-Saída



# Transístor Bipolar

## ■ Características entrada Entrada-Saída



- O ganho ( $\beta$ ) depende também da temperatura
- $V_{BE}$  diminui cerca de  $2\text{mV}/^\circ\text{C}$

