



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

# Mestrado Integrado em Engenharia Materiais

## UC Electrónica e Instrumentação

Departamento de Electrónica Industrial

*Júlio S. Martins*



# Bibliografia



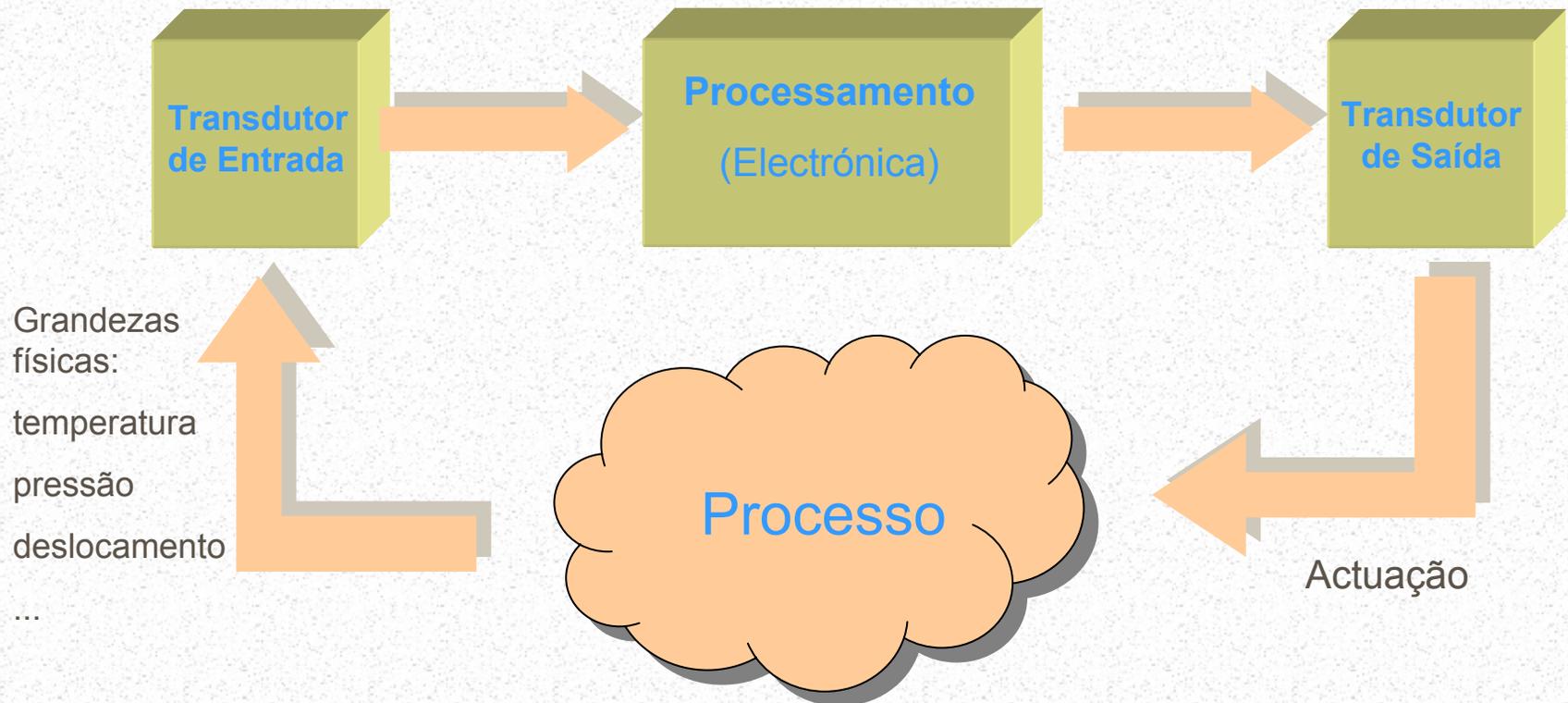
Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Livros

- Electrónica, vol.s 1 e 2, A. Malvino, Ed. MacGraw-Hill
- Microelectronic circuits, Sedra / Smith, Ed. Saunders
- Integrated Electronic, Millman, Ed. MacGraw-Hill
- Zanger, Henry. Electronic Systems - Theory and Applications. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1977
- Duncan, Tom, Electronics for Today and Tomorrow. John Murray, 1988

## ■ WWW

- <http://www.elexp.com/links.htm>
- <http://www.howstuffworks.com>
- <http://www.iguanalabs.com/maintut.htm>





# Programa



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ O Sistema

- Introdução
- Caixa Preta
- Tipos de Sistemas
  - Lineares Não-Lineares
  - Malha Aberta, Malha Fechada
  
- Características de Sistemas
  - Precisão, Sensibilidade, Linearidade
  - Resposta em Frequência, Resposta no Tempo
  - Características Dinâmicas



# Programa



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Transdutores

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

## ■ Componentes de Sistemas Electrónicos

- Componentes Básicos
  - O FET
  - O MOSFET
  - Outros Componentes
  - Circuitos Integrados



# Programa



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Componentes de Sistemas Electrónicos (cont.)

### ■ Fontes de Alimentação

- Introdução
- Bloco Transformador
- Bloco Rectificador
- Filtro
- Bloco Regulador
- Especificações

### ■ Amplificadores

- Introdução
- Especificações
- O Amplificador Operacional – Blocos Básicos



# Programa



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Componentes de Sistemas Electrónicos (cont.)

### ■ Componentes Digitais

- Conceitos Básicos
- Circuitos Combinacionais
- Circuitos Sequenciais
- Famílias Lógicas

### ■ Outros Componentes e Subsistemas

- Conversores analógico ↔ digital
- *Multiplexers*

## ■ Introdução

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

## ■ Caixa preta

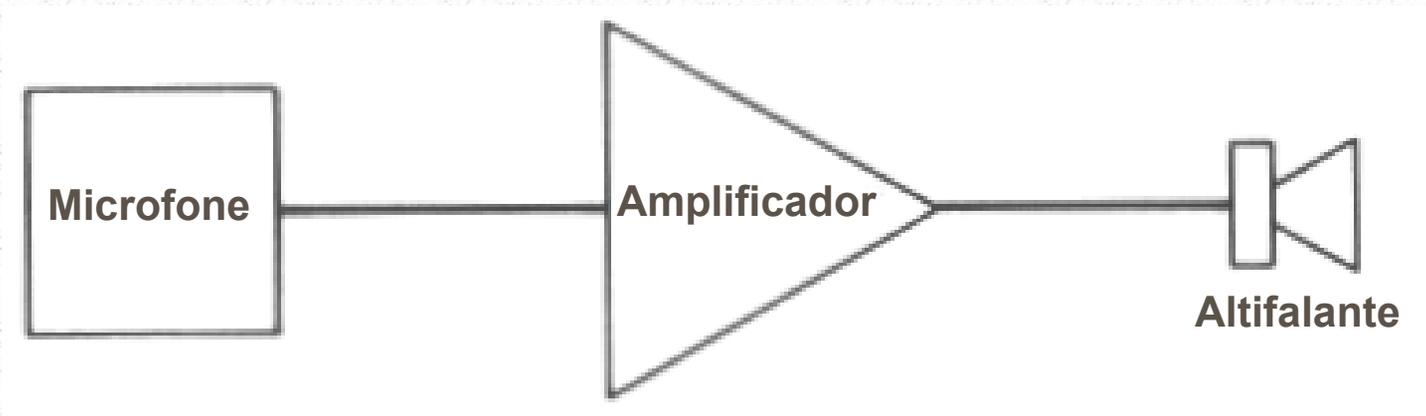




# O Sistema



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial







# O Sistema

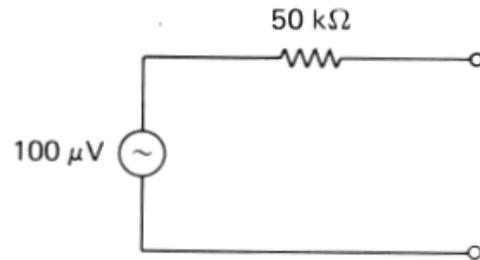


Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

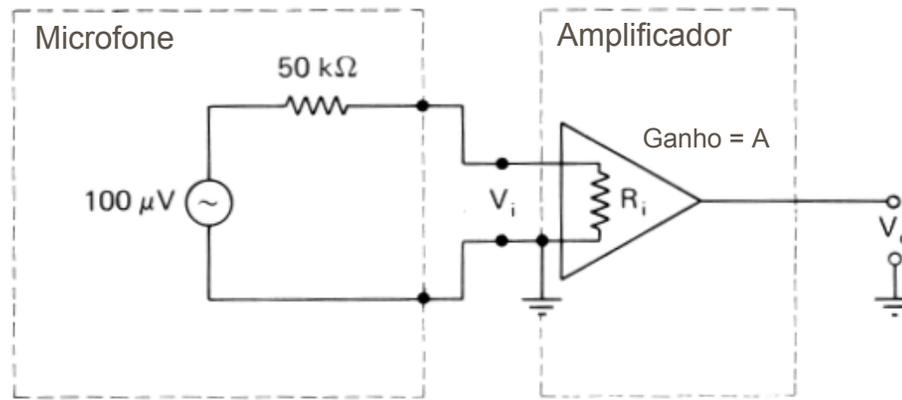
| Parâmetro                            | Microfone    | Amplificador                               | Altifalante | Sistema     |
|--------------------------------------|--------------|--|-------------|-------------|
| Impedância                           | 50k $\Omega$ | Entrada: 10M $\Omega$<br>Saída: 8 $\Omega$ | 8 $\Omega$  | —           |
| Resposta em frequência ( $\pm 3$ dB) | 40–9000Hz    | 20–15000Hz                                 | 30–12000Hz  | —           |
| Potência                             | —            | 30W (max.)                                 | 30W         | 30W         |
| Tensão de saída                      | 100 $\mu$ V  | 15,5V max                                  | —           | —           |
| Ganho de tensão                      | —            | 155000                                     | —           | —           |
| Distorção harmónica                  | —            | 1%   | —           | —           |
| Alimentação                          | —            | ~230V, 50Hz                                | —           | ~230V, 50Hz |

## Especificações do sistema PA e seus componentes

# O Sistema



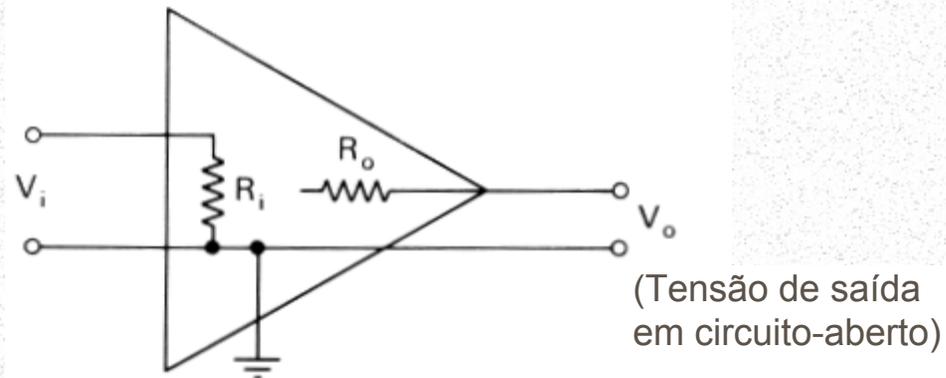
(a)



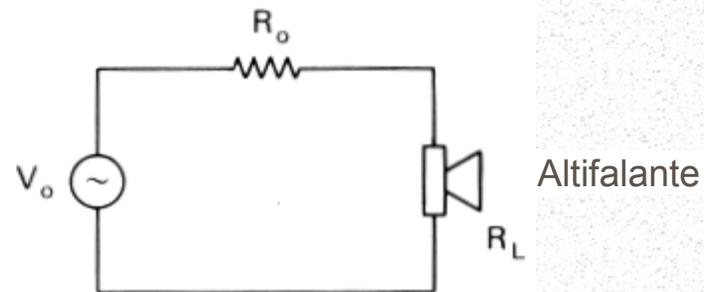
(b)

- (a) Equivalente de Thevenin do microfone  
(b) circuito equivalente da ligação microfone amplificador

# O Sistema



(a)



(b)

- (a) Diagrama de blocos do amplificador
- (b) Ligação do amplificador ao altifalante



# O Sistema



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## Microfone

Impedância: 50 k $\Omega$

Tensão de saída: 100  $\mu$ V (em circuito-aberto, para um nível médio de voz)

## Amplificador

Impedância de entrada: 1M $\Omega$

Ganho: 10000 (em circuito aberto)

$$V_o = (10.000)(V_i)$$

$$V_i = 100 \times 10^{-6} \frac{10^6 \Omega}{10^6 \Omega + 50 \times 10^3 \Omega} = 0,95 \times 10^{-4} V$$

$$\rightarrow V_o = (10.000)(0,95 \times 10^{-4}) = 0.95V$$



# O Sistema



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

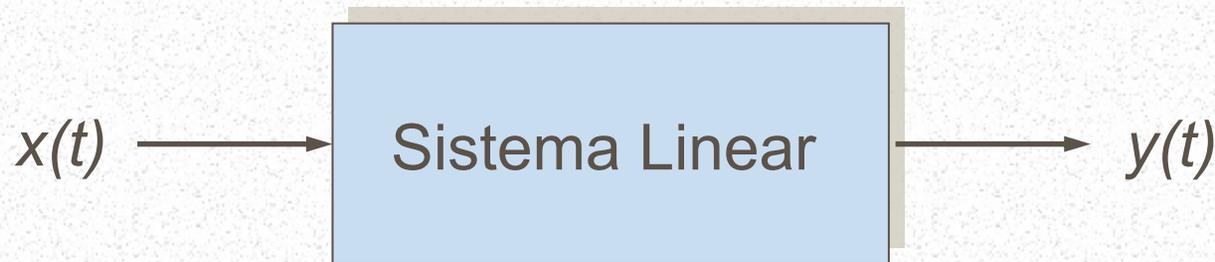
Para um amplificador com uma impedância de  $10\text{ k}\Omega$  em vez de  $1\text{ M}\Omega$ :

$$\begin{aligned}V_o &= (10.000)(V_i) = (10.000)(100 \times 10^{-6}) \frac{10 \times 10^3 \Omega}{10 \times 10^3 \Omega + 50 \times 10^3 \Omega} \\ &= 0,167V\end{aligned}$$

## ■ Tipos de Sistemas

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

### ■ Lineares, Não Lineares

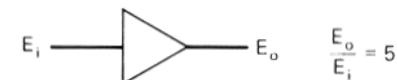


$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0$$

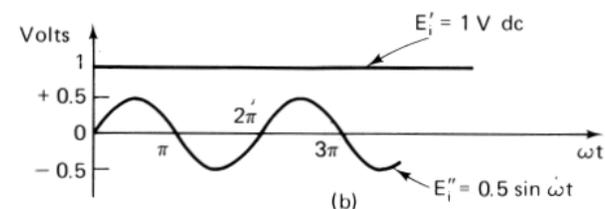
## Características de Sistemas Lineares:

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

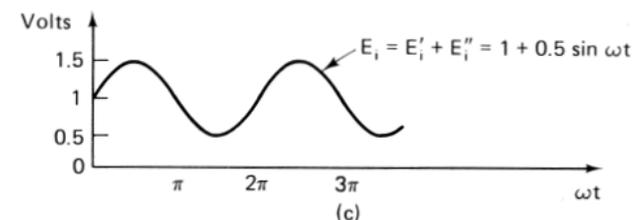
- a)  $A = E_o/E_i$
- b) Linha recta  $E'_i = 1V$   
Sinusóide  $E''_i = 0.5 \text{ sen}(\omega t)$
- c)  $E_i = E'_i + E''_i = 1 + 0.5 \text{ sen}(\omega t)$
- d)  $E_o = E'_o + E''_o = 5 + 2.5 \text{ sen}(\omega t)$



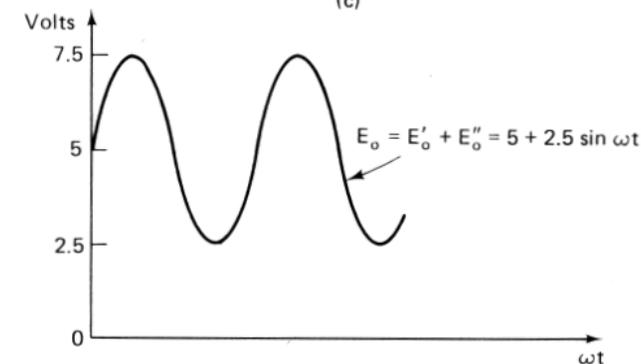
(a)



(b)



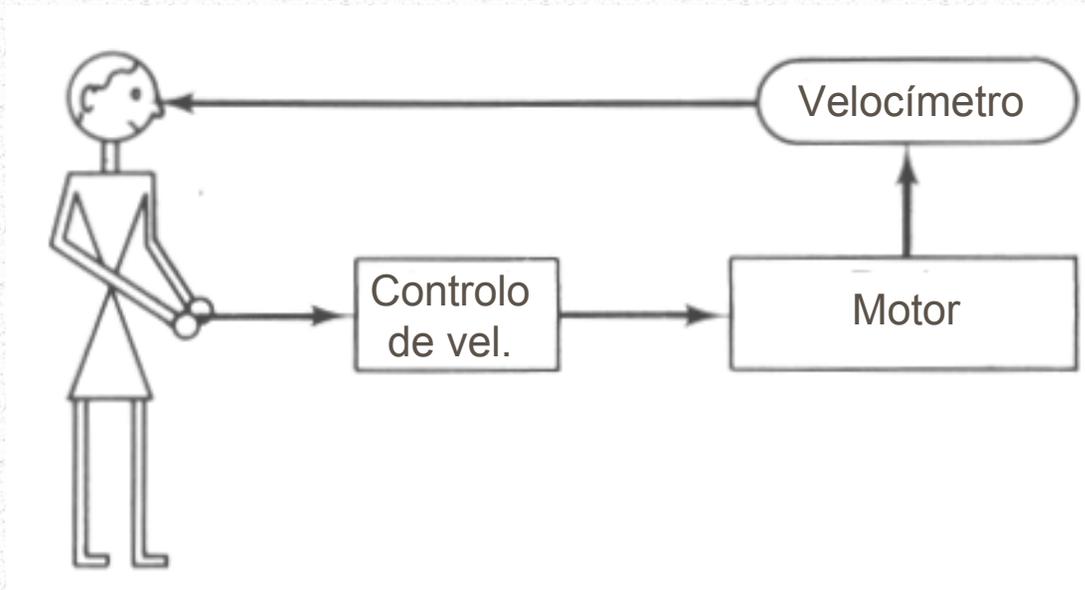
(c)



(d)

## ■ 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 ...



Sistema em malha fechada: automóvel e condutor

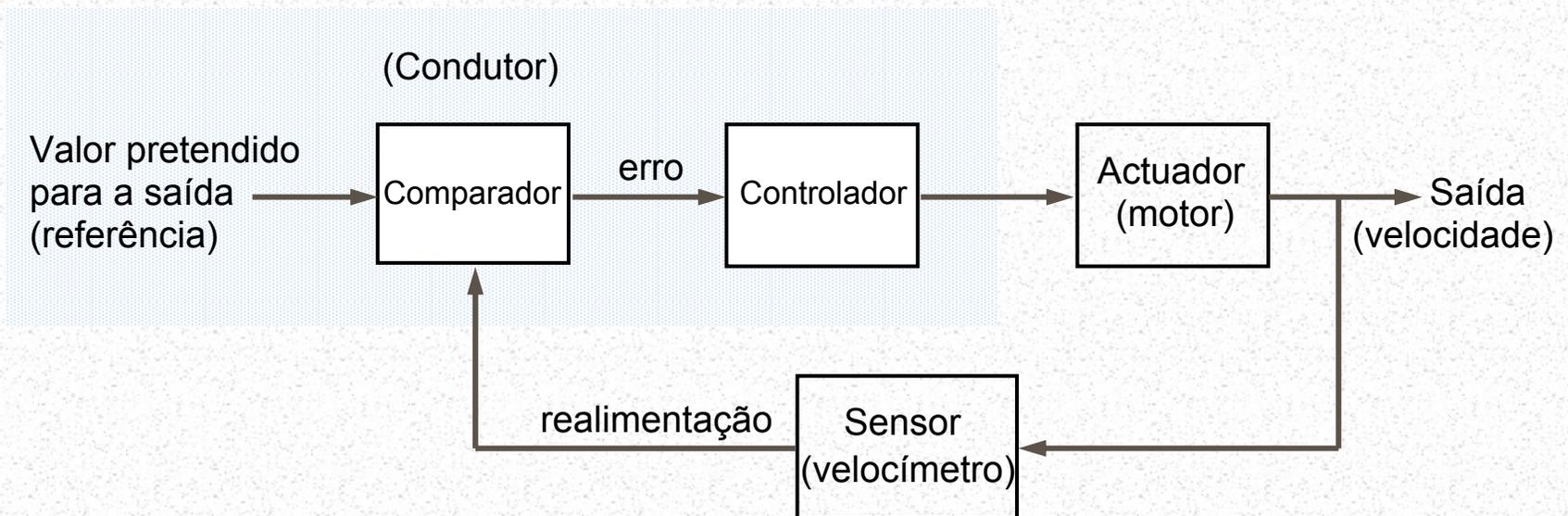


Diagrama de blocos de um sistema em malha-fechada



# O Sistema



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Características de Sistemas

### ■ Precisão

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

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



# O Sistema



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Características de Sistemas (cont.)

### ■ Sensibilidade

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

$$\text{sensibilidade} = \frac{\Delta \textit{saida}}{\Delta \textit{entrada}}$$

## ■ Características de Sistemas (cont.)

### ■ 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

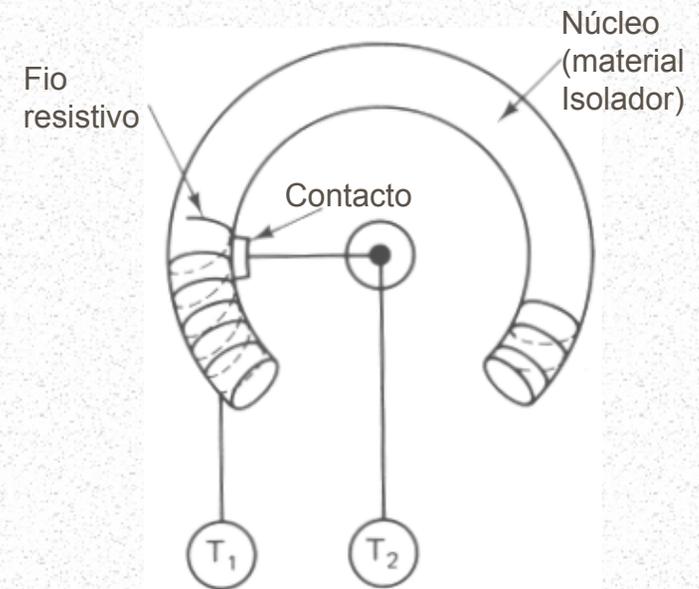
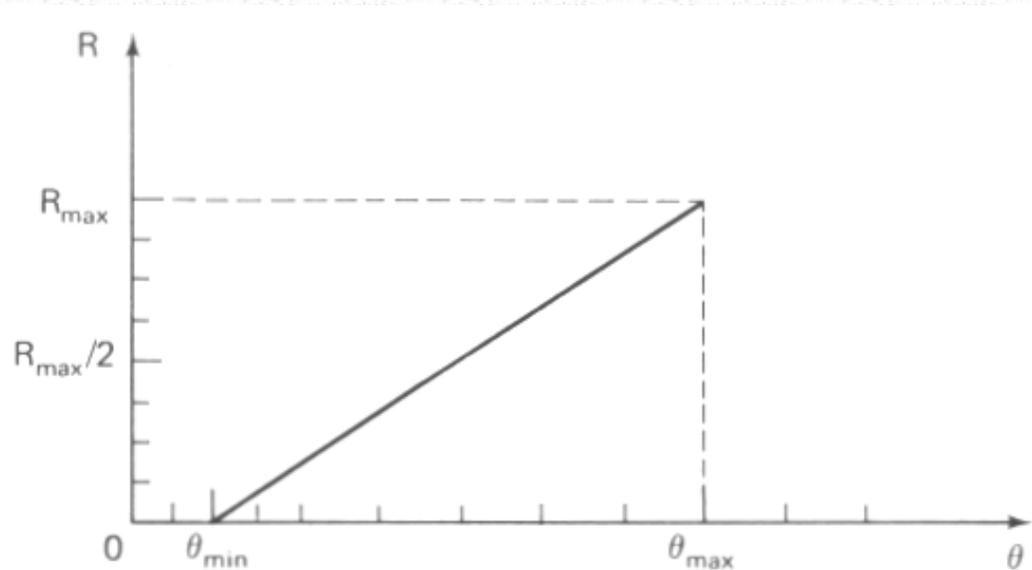


Diagrama simplificado duma resistência bobinada variável

## ■ Características de Sistemas (cont.)

### ■ Linearidade

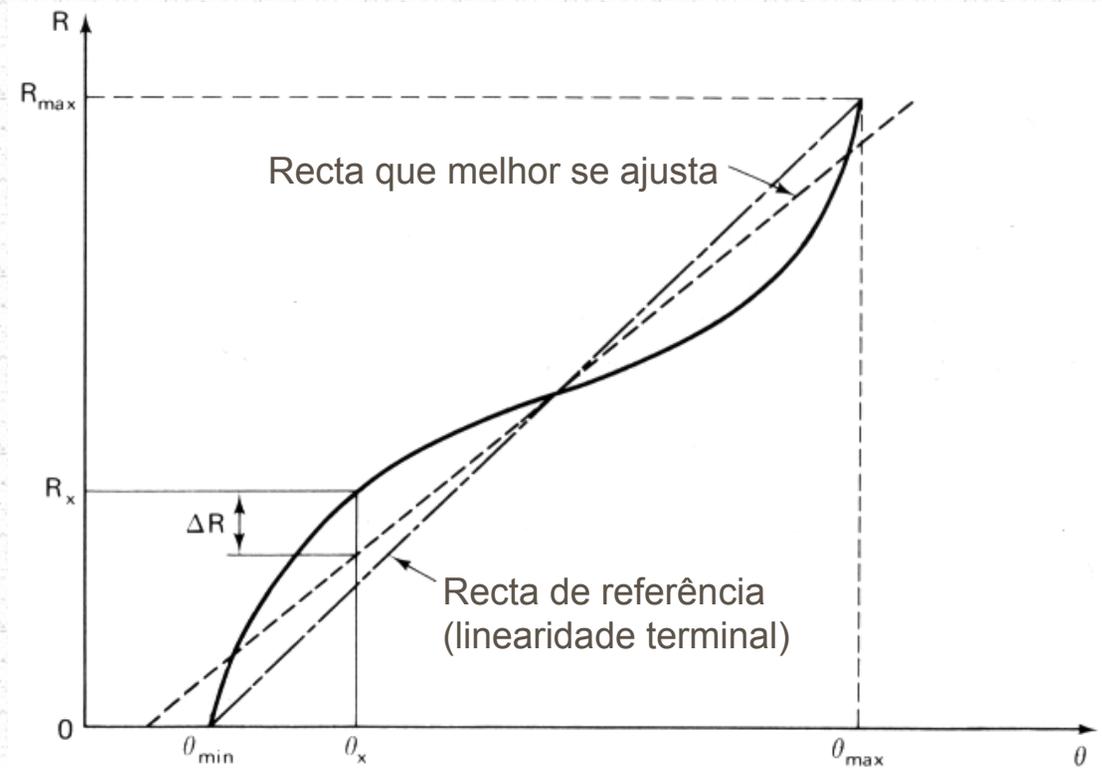
... pode definir se como o desvio da relação entre a entrada e a saída de uma linha recta ...



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

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

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

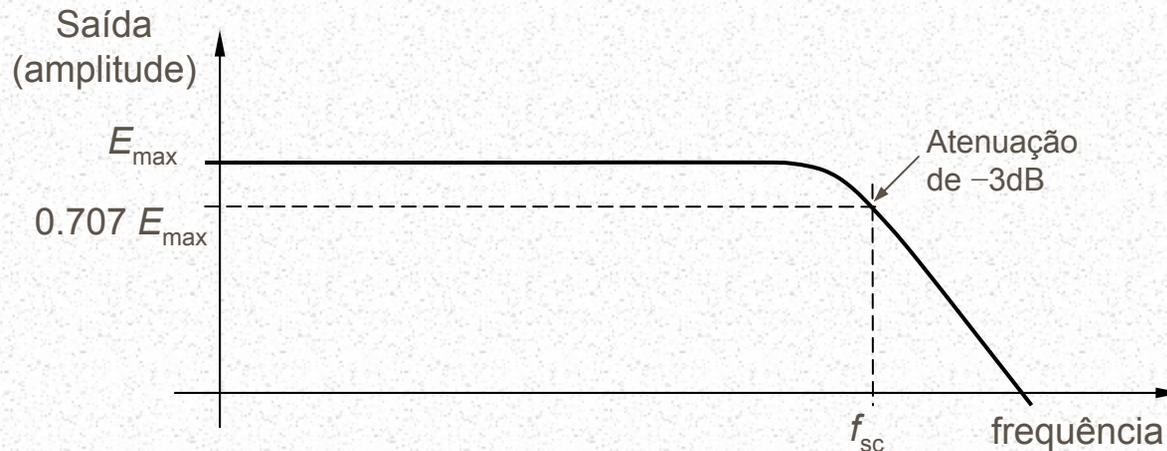


Resistência *versus* posição angular do veio para uma resistência variável - relação não-linear

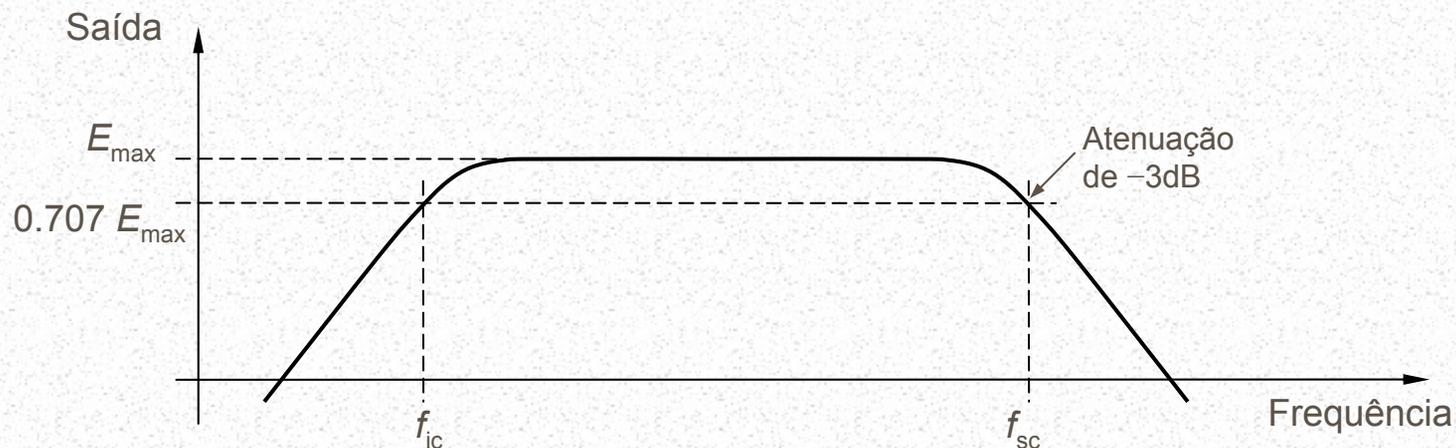
## ■ Características de Sistemas (cont.)

### ■ Resposta em Frequência

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



Curva de resposta em frequência



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

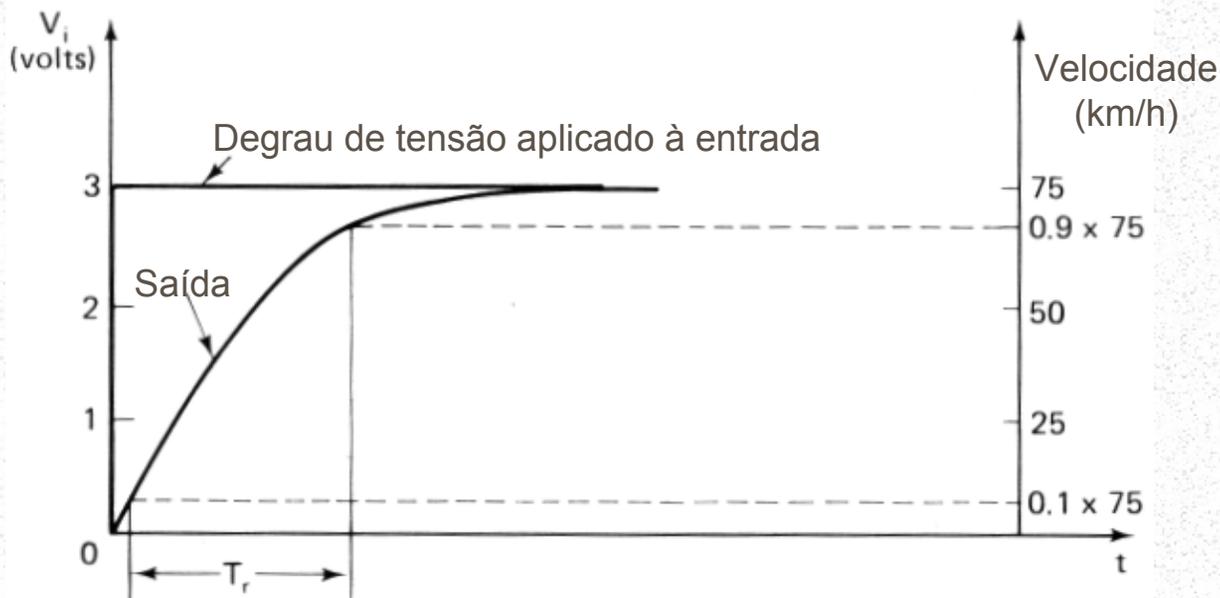
$$\text{largura de banda} = f_{sc} - f_{ic} \quad (\text{Hz})$$

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

## ■ Características de Sistemas (cont.)

### ■ Tempo de resposta

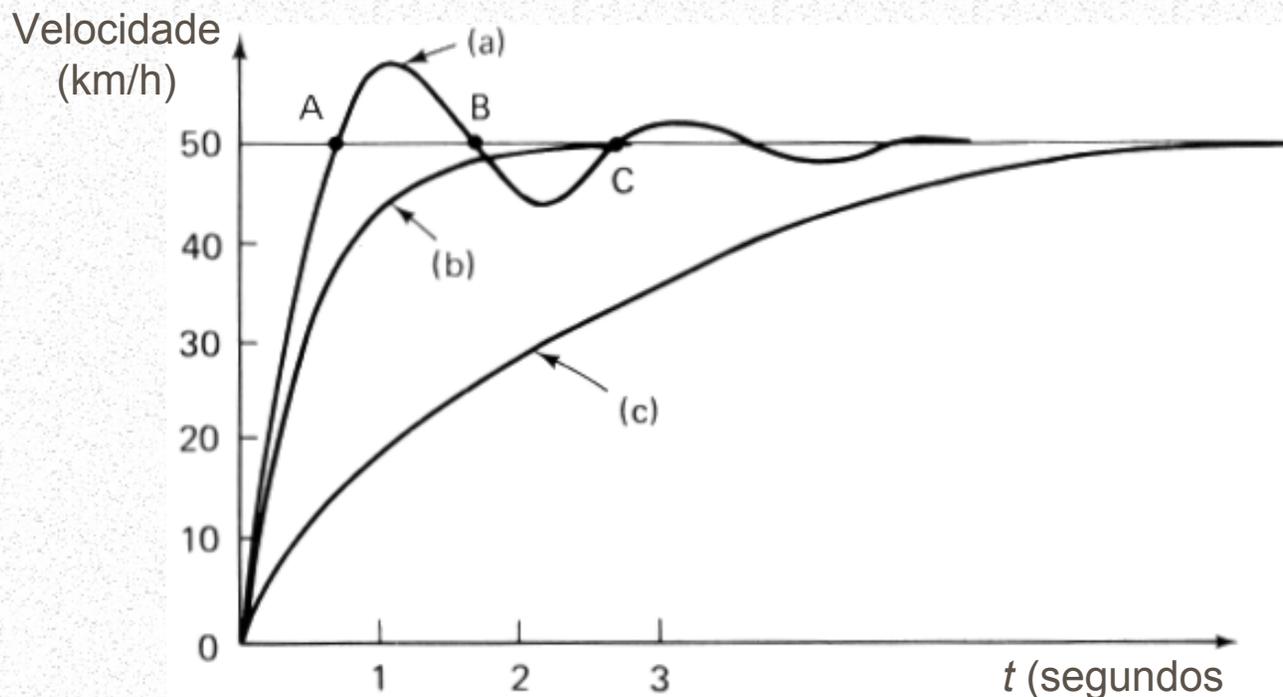
... tem a ver com a rapidez com que um sistema responde a variações do sinal de entrada ...



Resposta do sistema para uma entrada em degrau

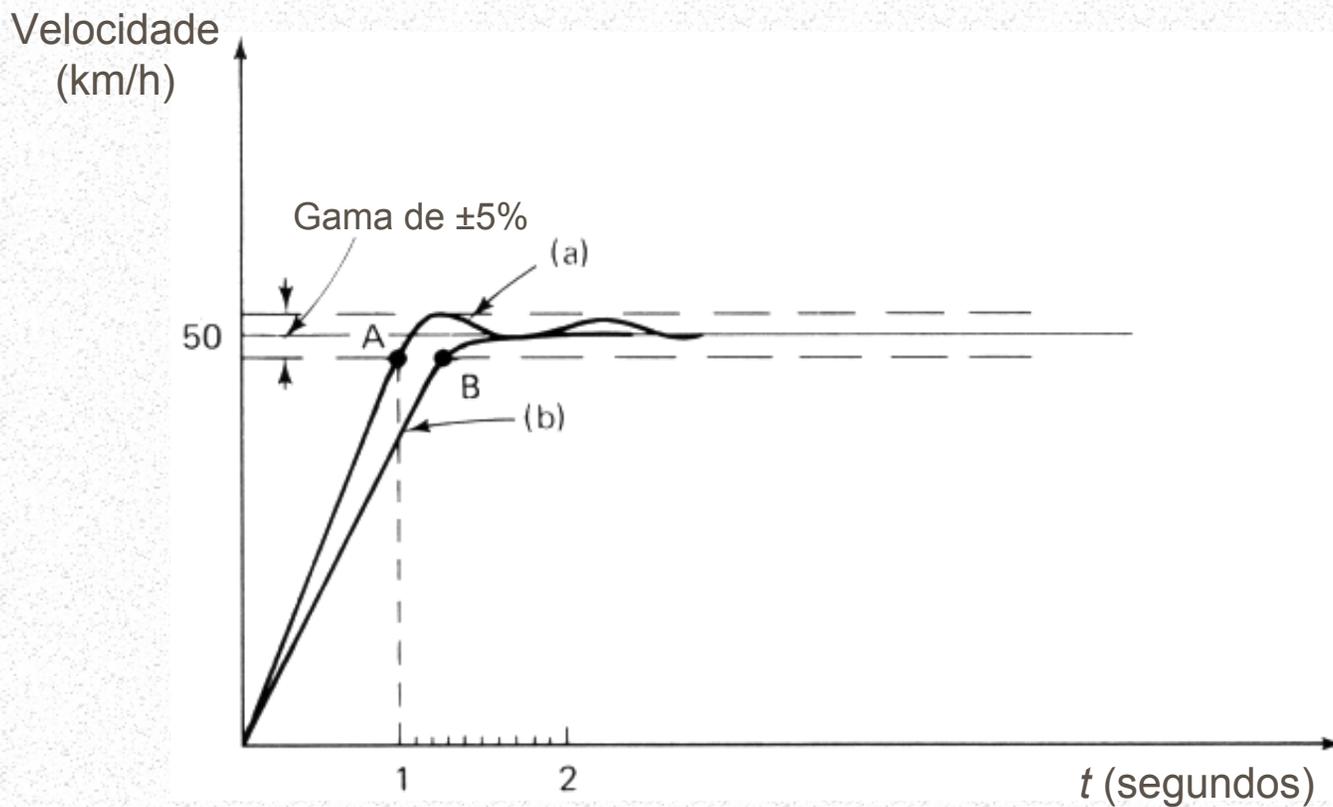
$$T_r = \frac{0.35}{f_{sc}}$$

## ■ Características Dinâmicas



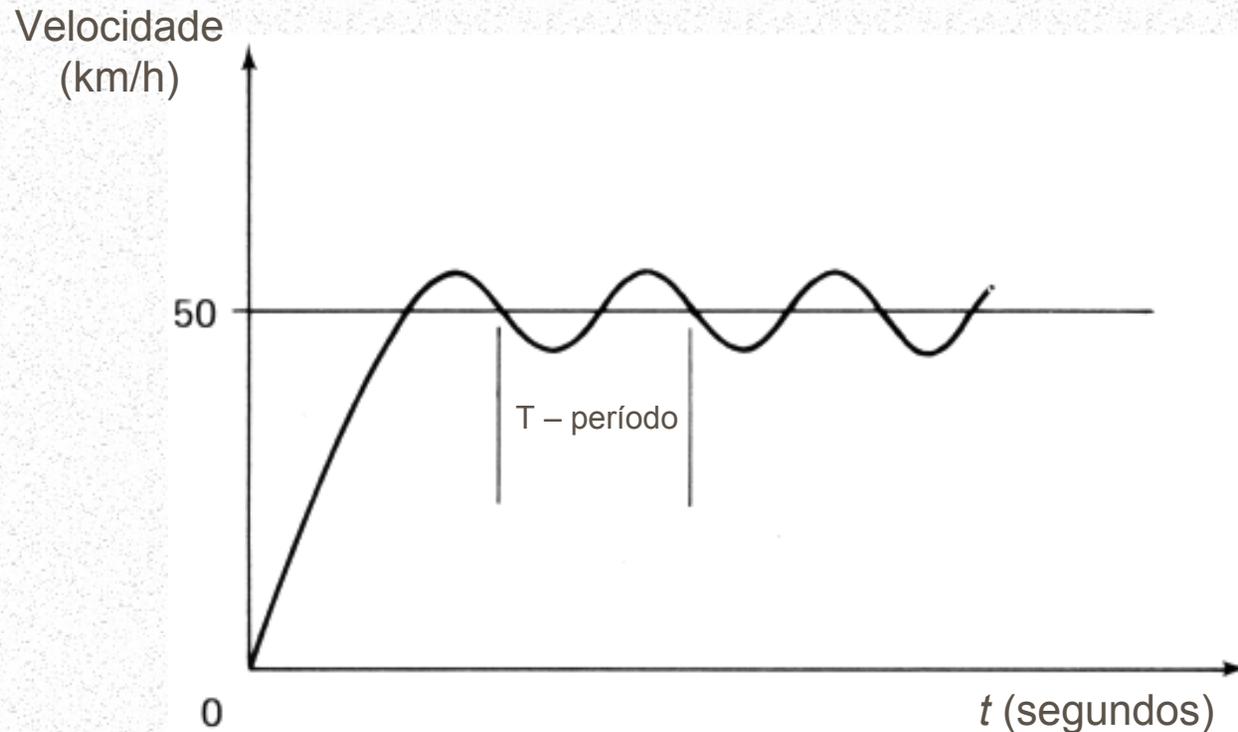
Respostas em regime transitório:

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



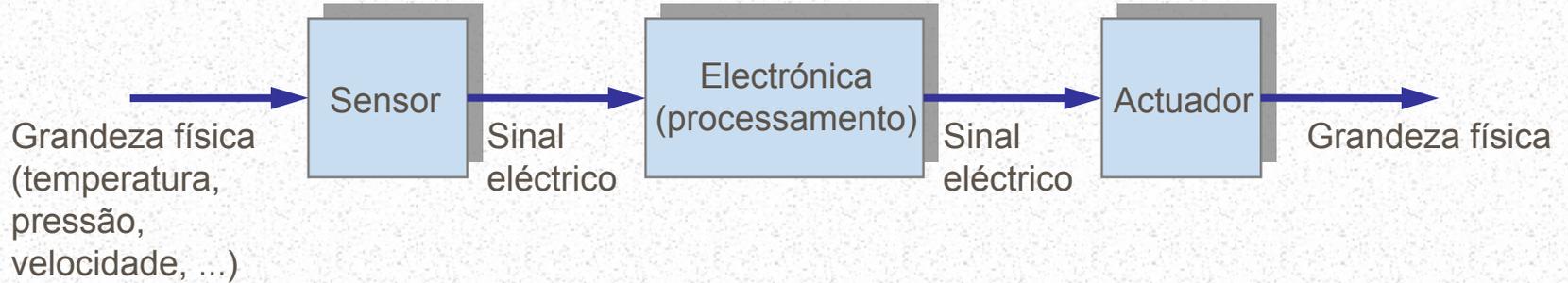
Tempo de resposta e gama de erro

# O Sistema



Oscilações não-amortecidas (sistema instável)

## ■ Introdução



## ■ Introdução

| <b>Tipo</b>         | <b>Entrada</b> | <b>Potência Disponível (W)</b> | <b>Tensão (V)</b> | <b>Corrente (A)</b> | <b>Saída</b> |
|---------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Termopar            | Temperatura    | $0.5 \times 10^{-4}$           | $10^{-3}$         | $10^{-1}$           | Tensão (CC)  |
| Célula fotovoltaica | Luz            | $0.5 \times 10^{-5}$           | $10^{-1}$         | $10^{-4}$           | Tensão (CC)  |
| Extensómetro        | Força          | —                              | —                 | —                   | Resistência  |
| Tacómetro           | Velocidade     | $10^{-3}$                      | $10^0$            | $10^{-3}$           | Tensão (CC)  |
| Microfone           | Som            | $10^{-8}$                      | $10^{-3}$         | —                   | Tensão (CA)  |
| "Pickup" magnético  | Vibração       | $0.25 \times 10^{-6}$          | $10^{-2}$         | $10^{-4}$           | Tensão (CA)  |
| Resolver            | Ângulo         | $10^{-2} - 10$                 | 10                | —                   | Tensão (CA)  |

Transdutores de entrada típicos

## ■ Introdução

| Tipo                             | Potência<br>(W)     | Rendimento<br>(%) | Aplicações                            |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Motor eléctrico                  | $1 - 10^6$          | 75 – 95           | Sistemas de controlo                  |
| Altifalante                      | $1 - 10^2$          | 3 – 10            | Sistemas de som                       |
| Galvanómetro                     | $10^{-6}$ (F.S.D.)* | —                 | Sistemas de medida                    |
| Voltímetro electrostático        | $10^{-6}$ (F.S.D.)* | —                 | Sistemas de medida                    |
| Relé                             | $10^{-4} - 10^{-1}$ | —                 | Sistemas de controlo                  |
| Tubo de raios catódicos<br>(CRT) | $10^{-7}$           | —                 | Sistemas de medida e<br>monitorização |

\* – "Full Scale Deflection" (deflexão no fim de escala)

Transdutores de saída típicos



# Transdutores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

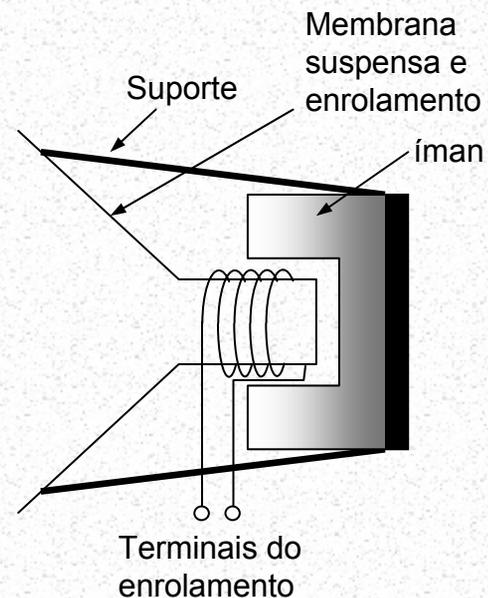
| Tipo                             | Entrada               | Saída                   | Aplicações                                      |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|---|
| Extensómetro                     | Força                 | Variação de resistência | Medida de força, tensão, deslocamento           |
| Célula de carga*                 | Força/pressão         | Variação de resistência | Medida de peso, pressão                         |
| Fotocélula                       | Intensidade da luz    | Tensão                  | Fontes de energia, dispositivos sensíveis a luz |
| Transformador diferencial (LVDT) | Deslocamento (linear) | Variação de indutância  | Medida de deslocamento                          |
| Termopar                         | Temperatura           | Variação de tensão      | Sistemas de controlo e monitor. de temperatura  |
| Termistor                        | Temperatura           | Variação de resistência | Sistemas de controlo e monitor. de temperatura  |
| Tacómetro                        | Velocidade angular    | Tensão                  | Sistemas de controlo de velocidade              |

## Transdutores (miscelânea) – aplicações

## ■ Microfones



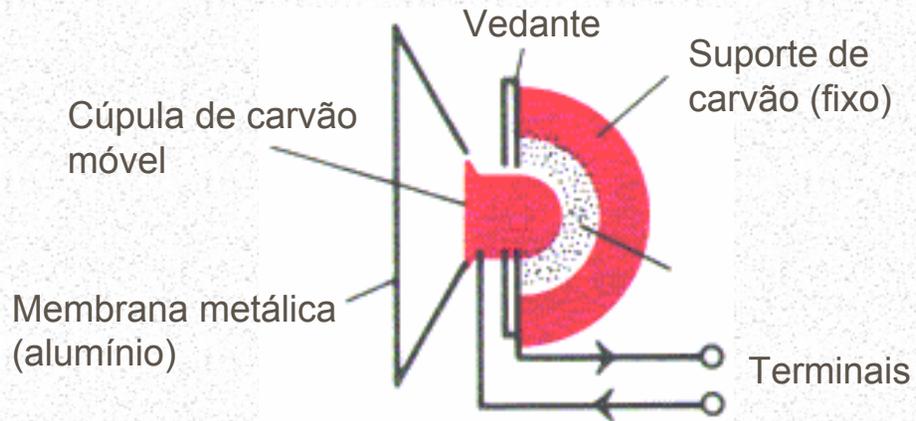
(a)



(b)

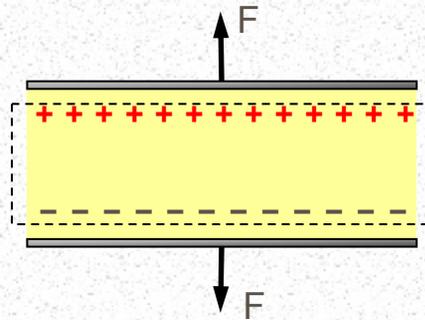
Microfone dinâmico:  
(a) Aspecto exterior  
(b) Estrutura básica

## ■ Microfones

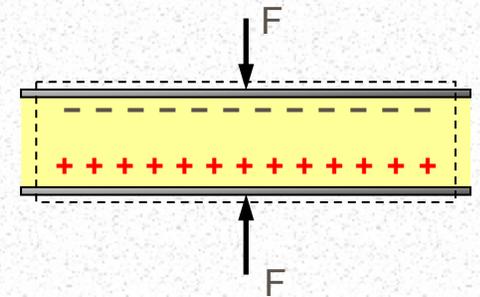


Microfone de carvão

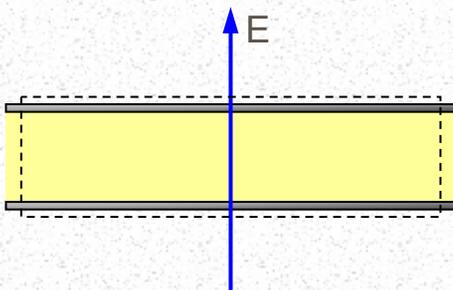
## ■ Efeito Piezoeléctrico



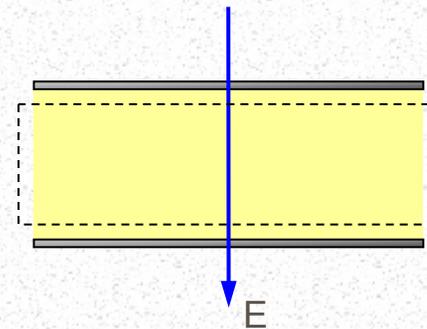
Resultado de um esforço de tracção



Resultado de um esforço de compressão

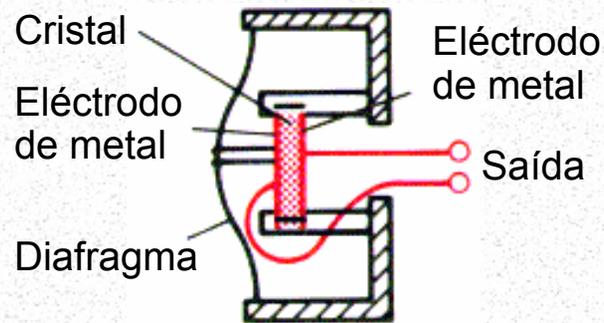


Resultado da aplicação de um campo eléctrico

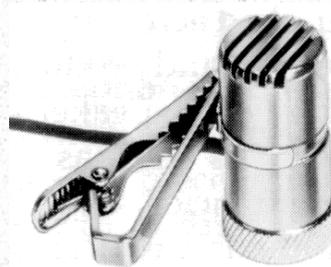


Resultado da aplicação de um campo eléctrico (inverso)

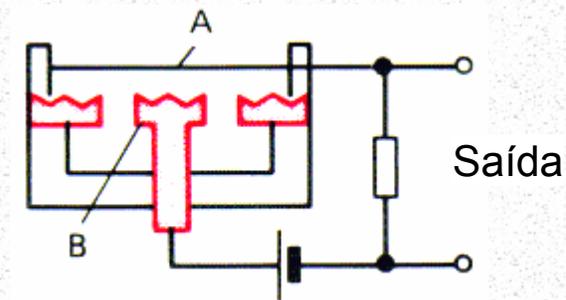
## ■ Microfones



Estrutura básica do microfone de cristal  
(explora o efeito piezoeléctrico)



(a)



(b)

Microfone capacitivo: (a) aspecto exterior (b) estrutura básica



Altifalantes

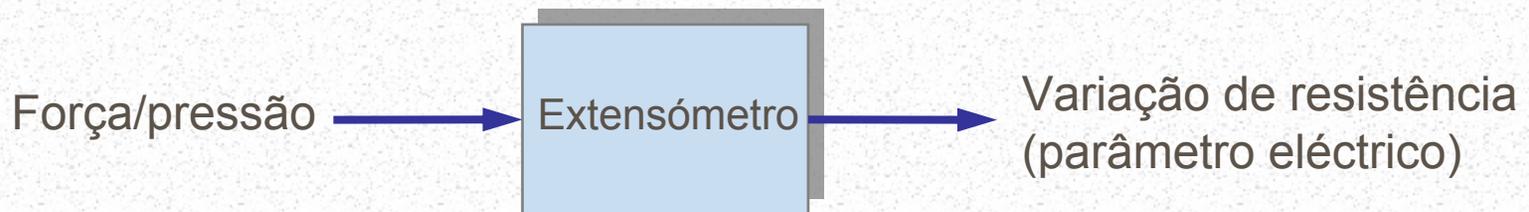
| Tipo       | Impedância   | Resposta em Frequência | Sensibilidade* |
|------------|--------------|------------------------|----------------|
| Dinâmico   | 50k $\Omega$ | 100Hz – 10kHz          | -57dB          |
| Carbono    | 5k $\Omega$  | 100Hz – 9kHz           | —              |
| Cristal    | 1M $\Omega$  | 100Hz – 12kHz          | -55dB          |
| Capacitivo | 600 $\Omega$ | 30Hz – 16kHz           | -70dB          |

\* – Para 1mW de potência de entrada (1dBm); -70dB é equivalente a  $10^{-7} \times 10^{-3} = 10^{-10}W$

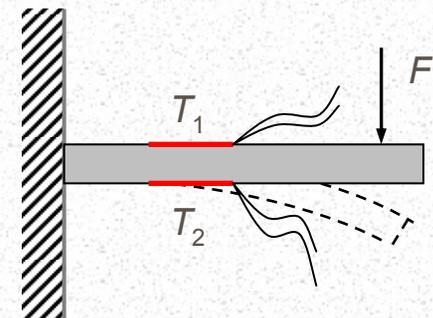
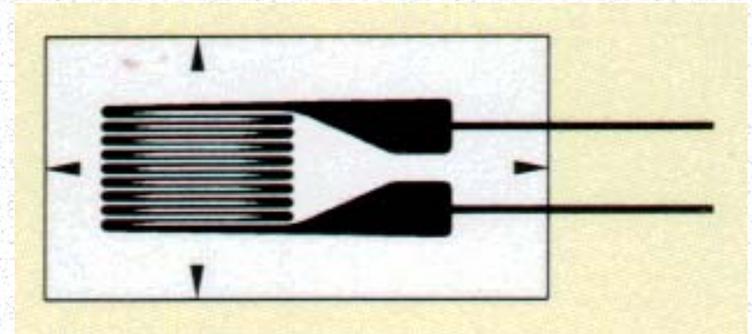
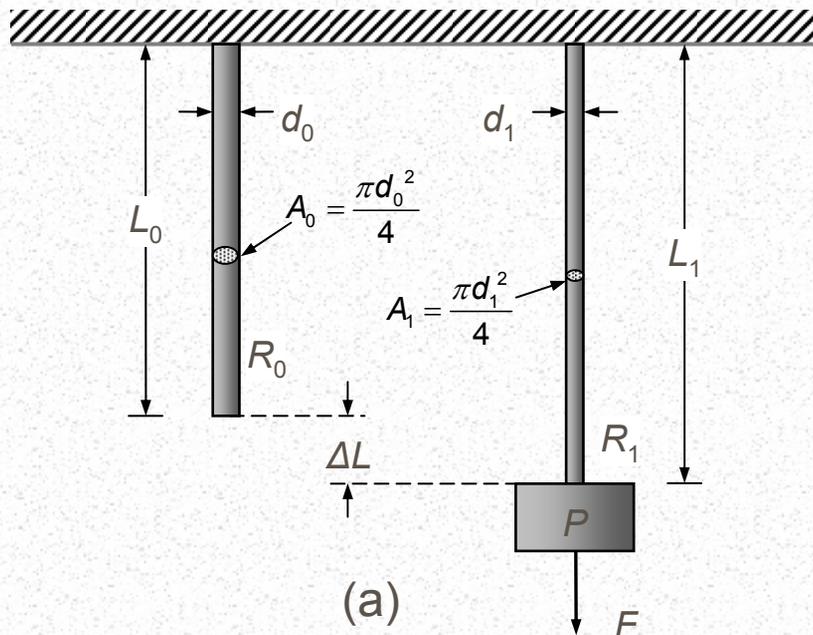
Características de microfones

## ■ Transdutores de força/pressão

- Extensómetros
- Efeito piezoeléctrico
- Efeito da mola

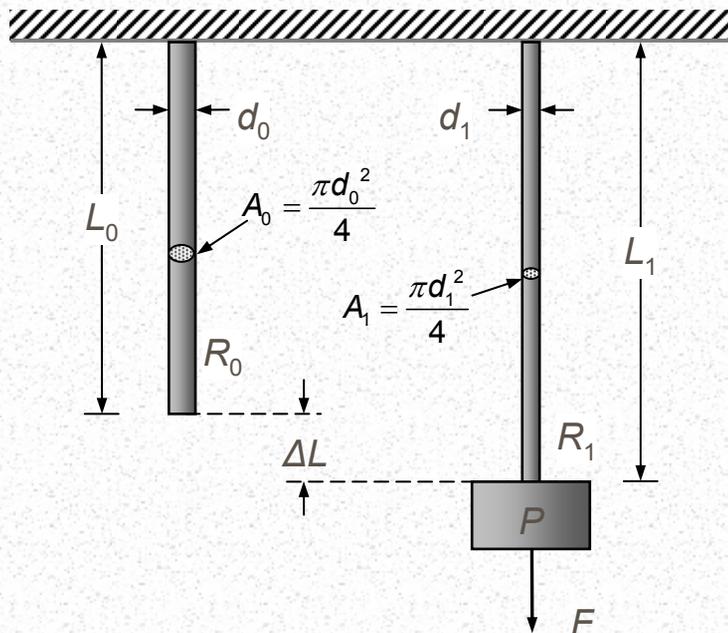


## ■ Transdutores de força/pressão



Extensómetros: (a) princípio do funcionamento;  
(b) aspecto exterior; (c) princípio da célula de carga

## ■ Transdutores de força/pressão



$$L_1 = 1.01L_0 \quad (1\% \text{ de incremento no comprimento})$$

$$A_1 = 0.99A_0 \quad (1\% \text{ de diminuição na secção})$$

$$R_1 = R_0 \cdot \frac{1.01L_0}{L_0} \cdot \frac{A_0}{0.99A_0} = 1.02R_0$$

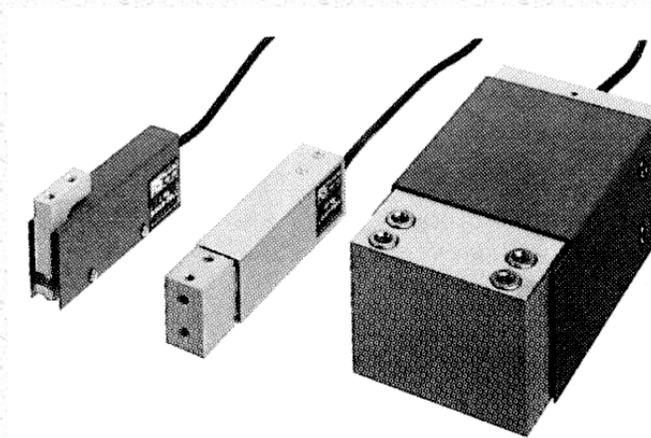
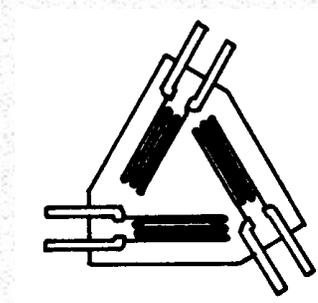
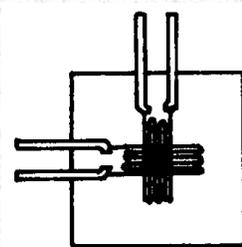
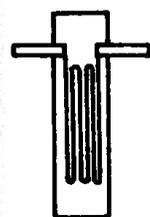
→ 2% de acréscimo na resistência

$$FG = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = 1\% = 0.01, \quad \frac{\Delta R}{R} = 2\% = 0.02$$

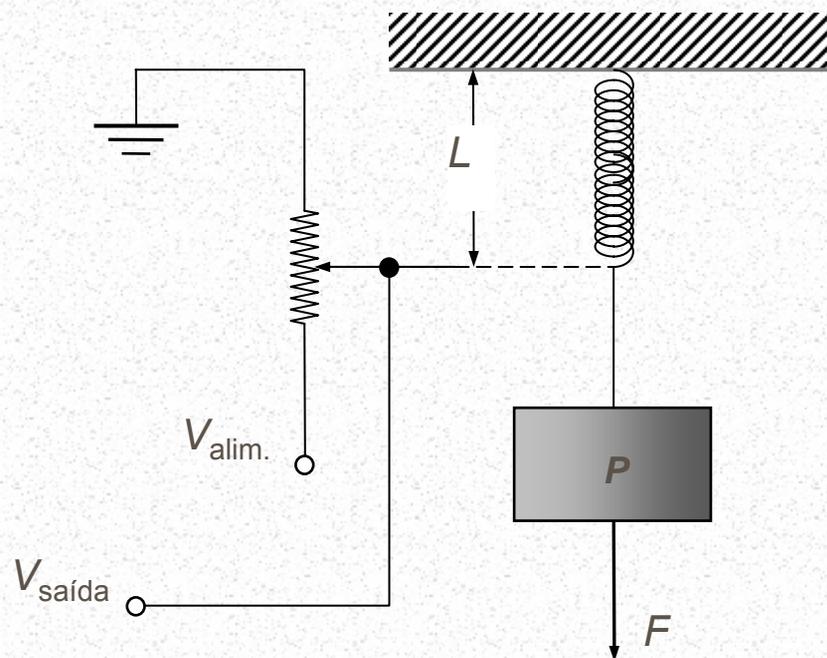
$$\rightarrow FG = \frac{0.02}{0.01} = 2$$

## ■ Transdutores de força/pressão



Células de carga de 2kg, 20kg e 100kg

## ■ Transdutores de força/pressão



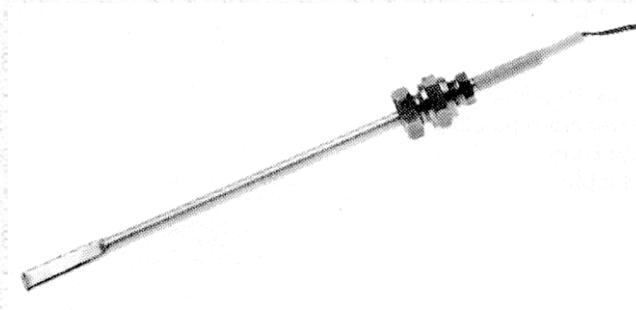
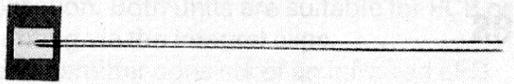
Utilização de uma mola para medir forças

## ■ Transdutores de temperatura

- Termopares
- Termoresistências
- Termístores
- Osciladores de cristal
- Junção semicondutora

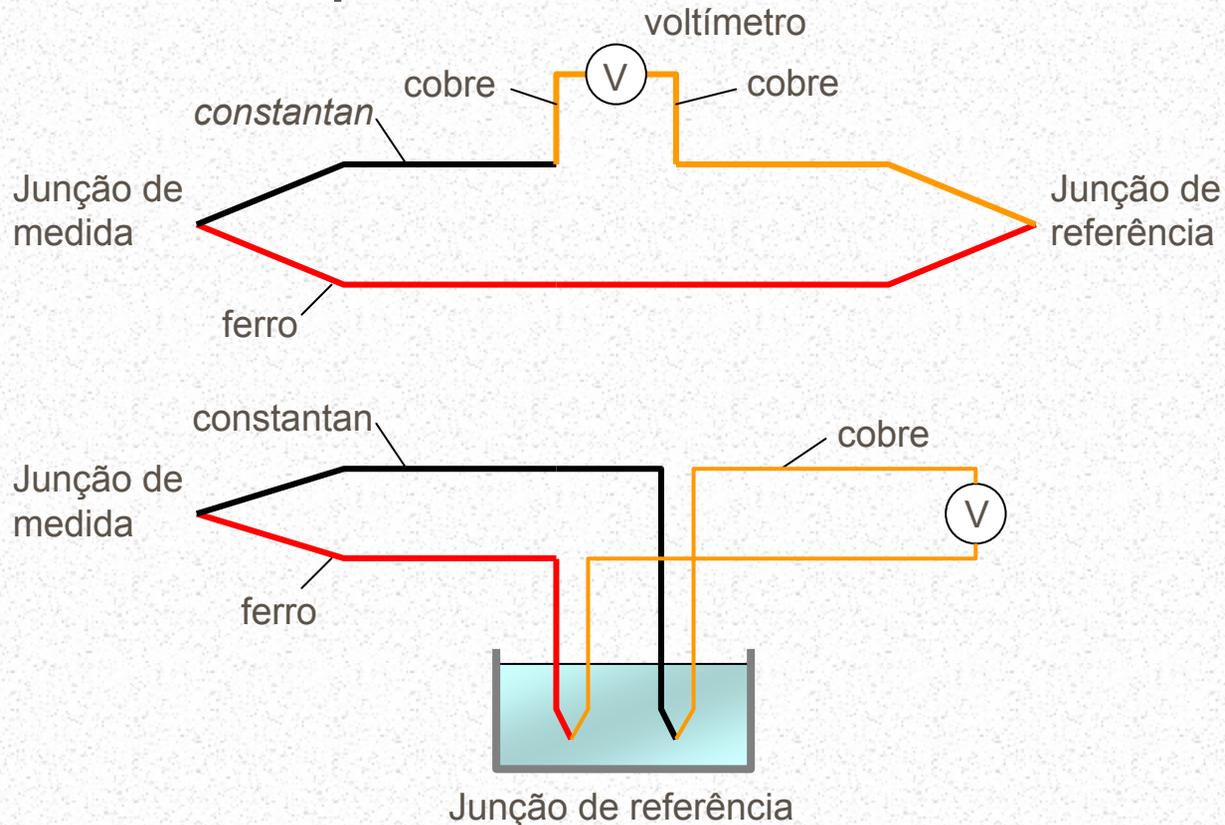


## ■ Transdutores de temperatura



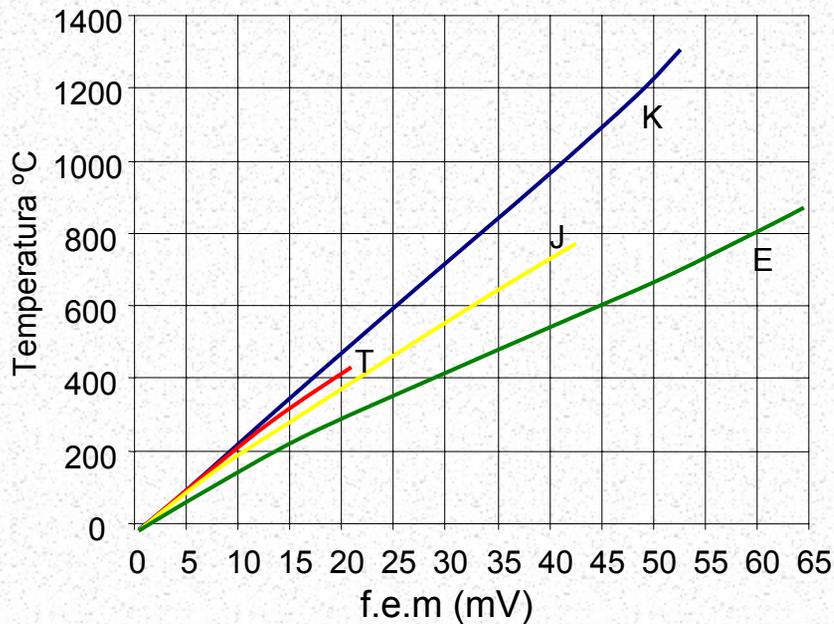
Termopares de diferente tipo

## ■ Transdutores de temperatura



Termopar

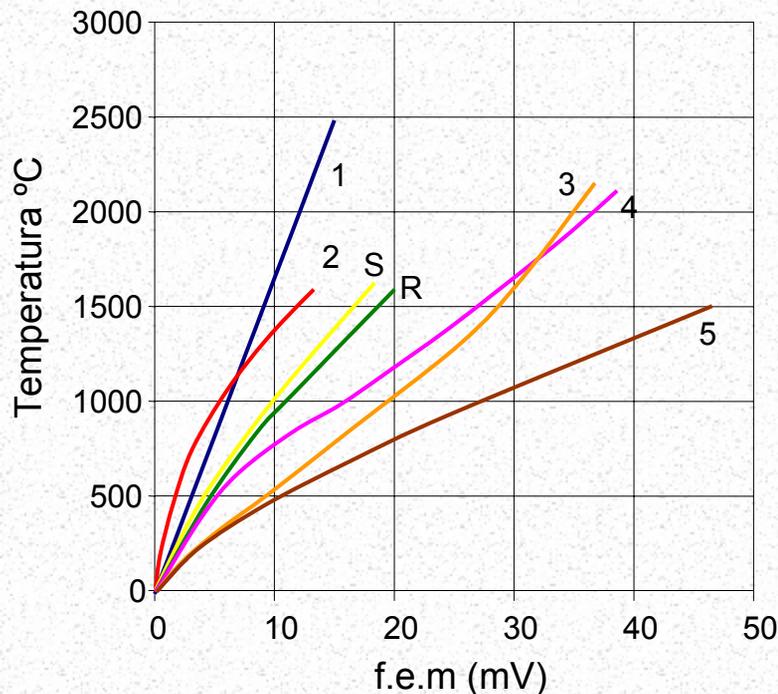
## ■ Transdutores de temperatura



| Tipo | Material<br>(em maiúsculas o material positivo) | Cód. de cores dos condutores |
|------|---|------------------------------|
| K    | CRÓMIO – Alúmen                                 | AMARELO - Vermelho           |
| T    | COBRE – Constantan                              | AZUL - Vermelho              |
| J    | FERRO – Constantan                              | BRANCO - Vermelho            |
| E    | CRÓMIO – Constantan                             | VIOLETA - Vermelho           |

Temperatura vs tensão de saída para termopares  
(materiais para baixas temperaturas)

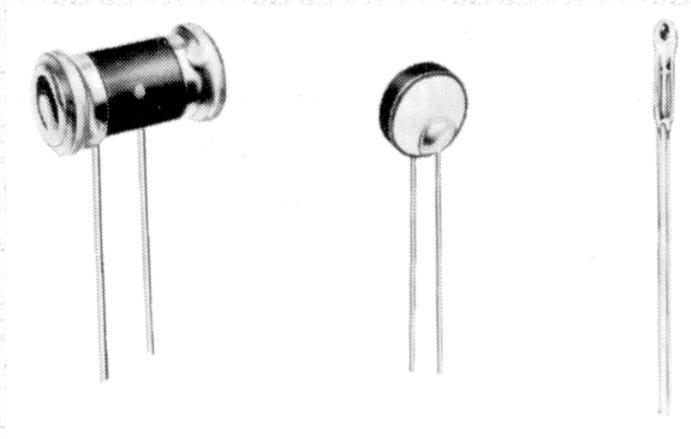
## ■ Transdutores de temperatura



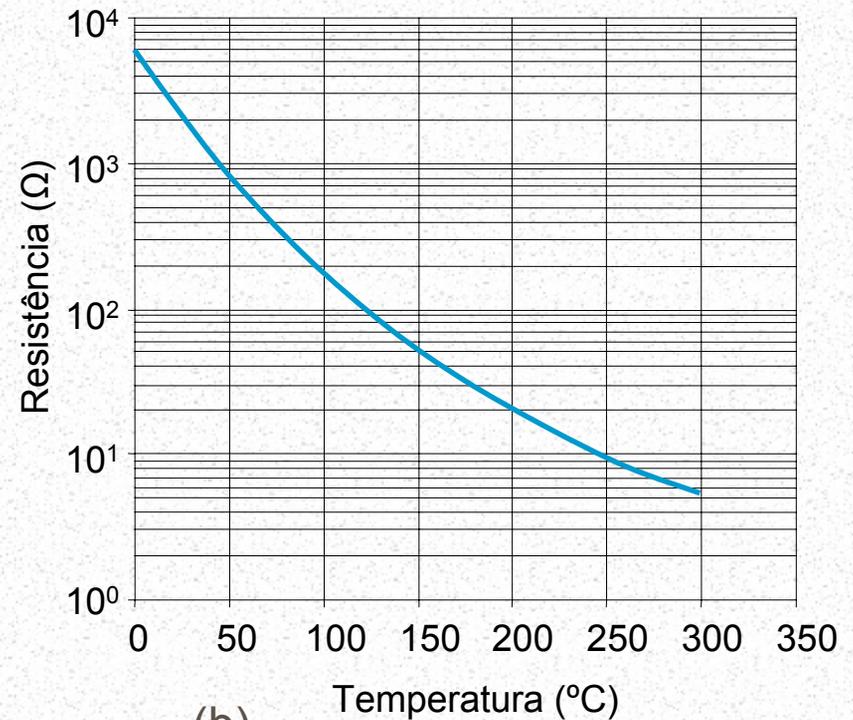
| Tipo | Material (em maiúsculas o material positivo) | Cód. de cores dos cond. |
|------|--|-------------------------|
| 1    | 60% IRÍDIO 40% RÓDIO – Irídio                |                         |
| 2    | PLATINA 30% RÓDIO – Platina 6% Ródio         |                         |
| 3    | TUNGSTÉNIO 5% RÉNIO – Tungsténio 26% Rénio   |                         |
| 4    | TUNGSTÉNIO – Tungsténio 26% Rénio            |                         |
| 5    | PT 5% MOLIBDÉNIO – Pt 0.1% molibdénio        |                         |
| R    | PLATINA 13% RÓDIO – Platina                  | PRETO- Vermelho         |
| S    | PLATINA 10% RÓDIO – Platina                  | PRETO - Vermelho        |

Temperatura vs tensão de saída para termopares  
(materiais para temperaturas elevadas)

## ■ Transdutores de temperatura



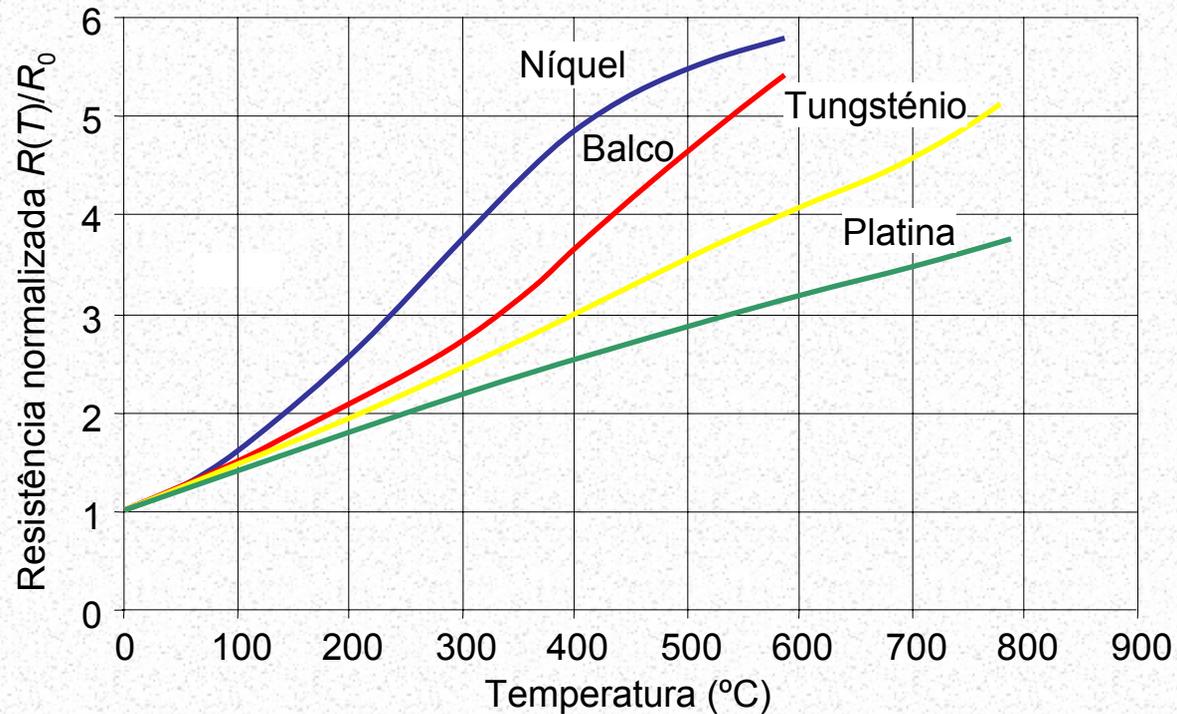
(a)



(b)

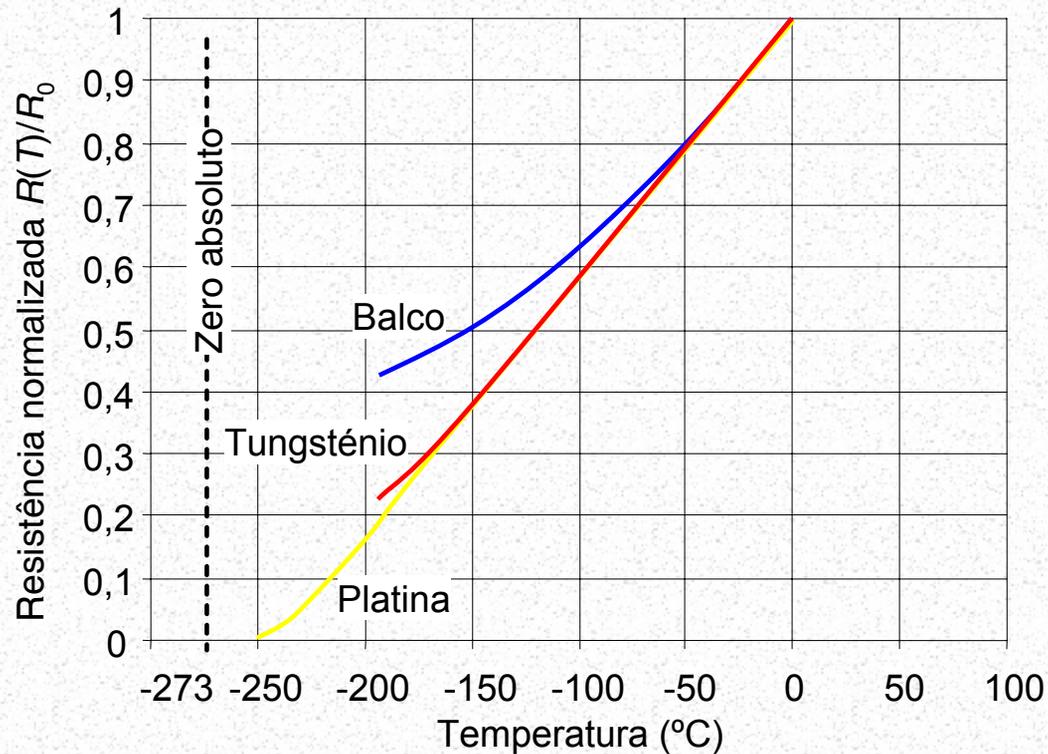
Termistor: (a) aspecto típico; (b) característica resistência vs temperatura

## ■ Transdutores de temperatura



Termoresistências – curvas para altas temperaturas

## ■ Transdutores de temperatura



Termoresistências – curvas para baixas temperaturas

## ■ Transdutores de temperatura

| Características     | Termopar               | Termistor                           | Termoresistência                             |
|---------------------|------------------------|-------------------------------------|--|
| Gama de temperatura | -190°C — 2500°C        | (0 absoluto←) — 320°C               | -270°C — 1200°C                              |
| Linearidade         | 10 — 25%               | 10% — 25%                           | 0.17%: -20°C — 100°C<br>1.62%: -20°C — 420°C |
| Precisão            | 0.1% — 5%              | 5%                                  | 0.01% (facilmente)                           |
| Estabilidade        | Excelente              | Pobre                               | Excelente                                    |
| Nível de sinal      | 40mV/°C (ou menos)     | 500mV/°C — 1V/°C<br>(com uma ponte) | até 200mV/°C<br>(com uma ponte)              |
| Medida dum só ponto | Excelente              | Excelente                           | Pobre  |
| Área de medida      | Pode ser muito pequena | Muito pequena                       | Grande                                       |

Comparação entre alguns dados de instrumentos de medida de temperatura para diferentes transdutores

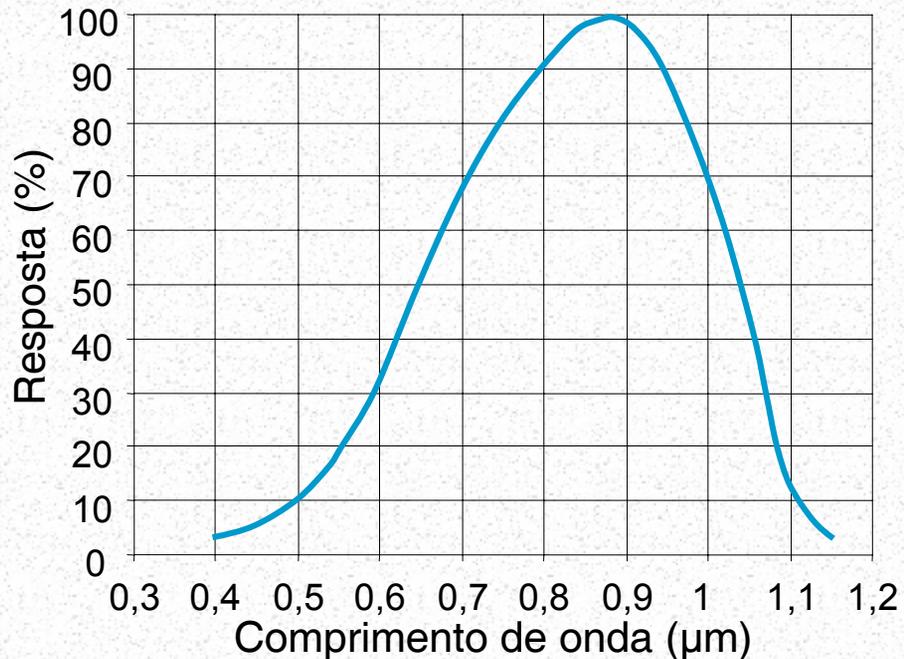
## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

- Fotocondutor (LDR, fotocélula)
- Fotodíodo
- Fototransístor
- Célula fotovoltaica
- Fototubo



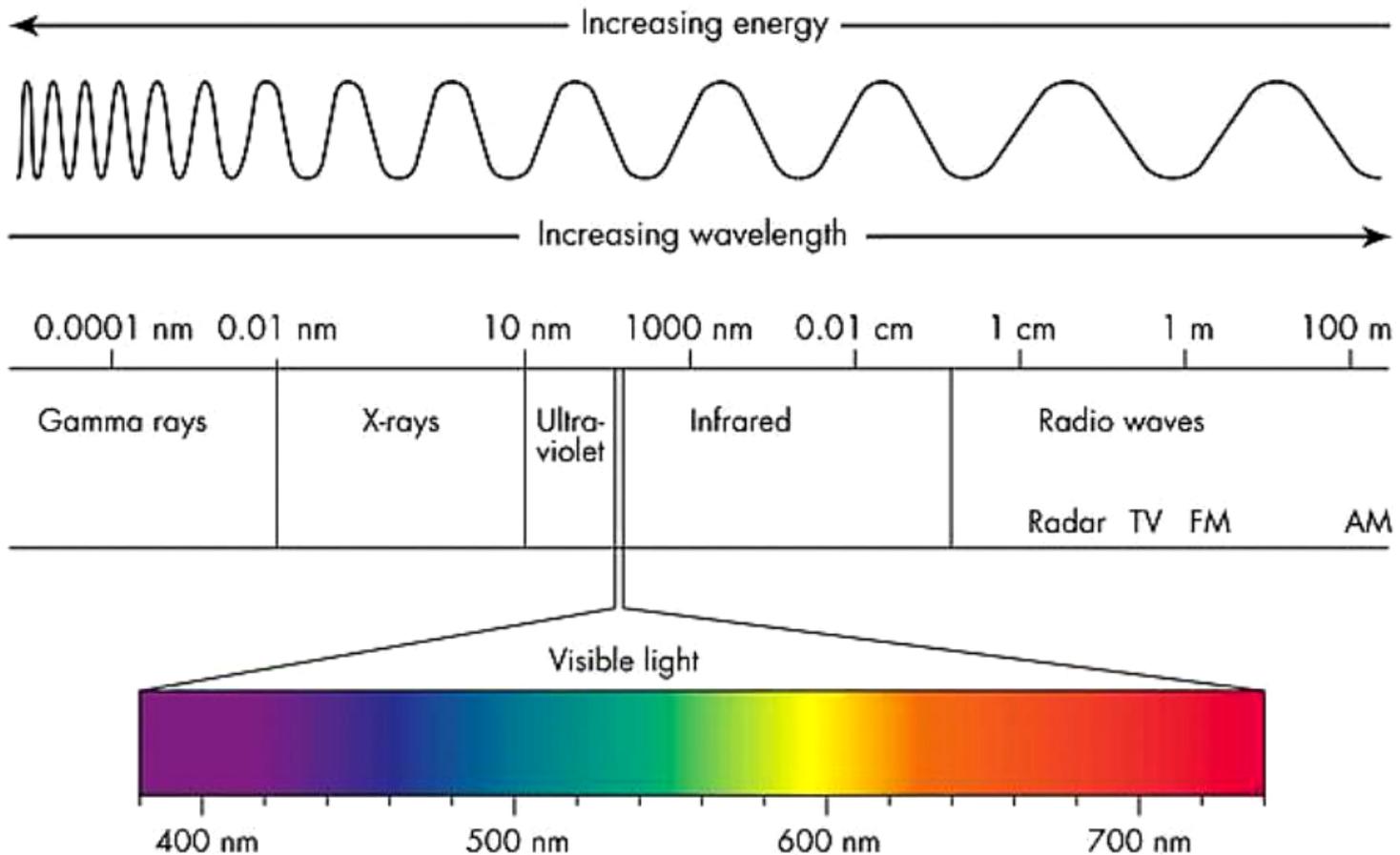
## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

$$f = \frac{c}{\lambda}$$



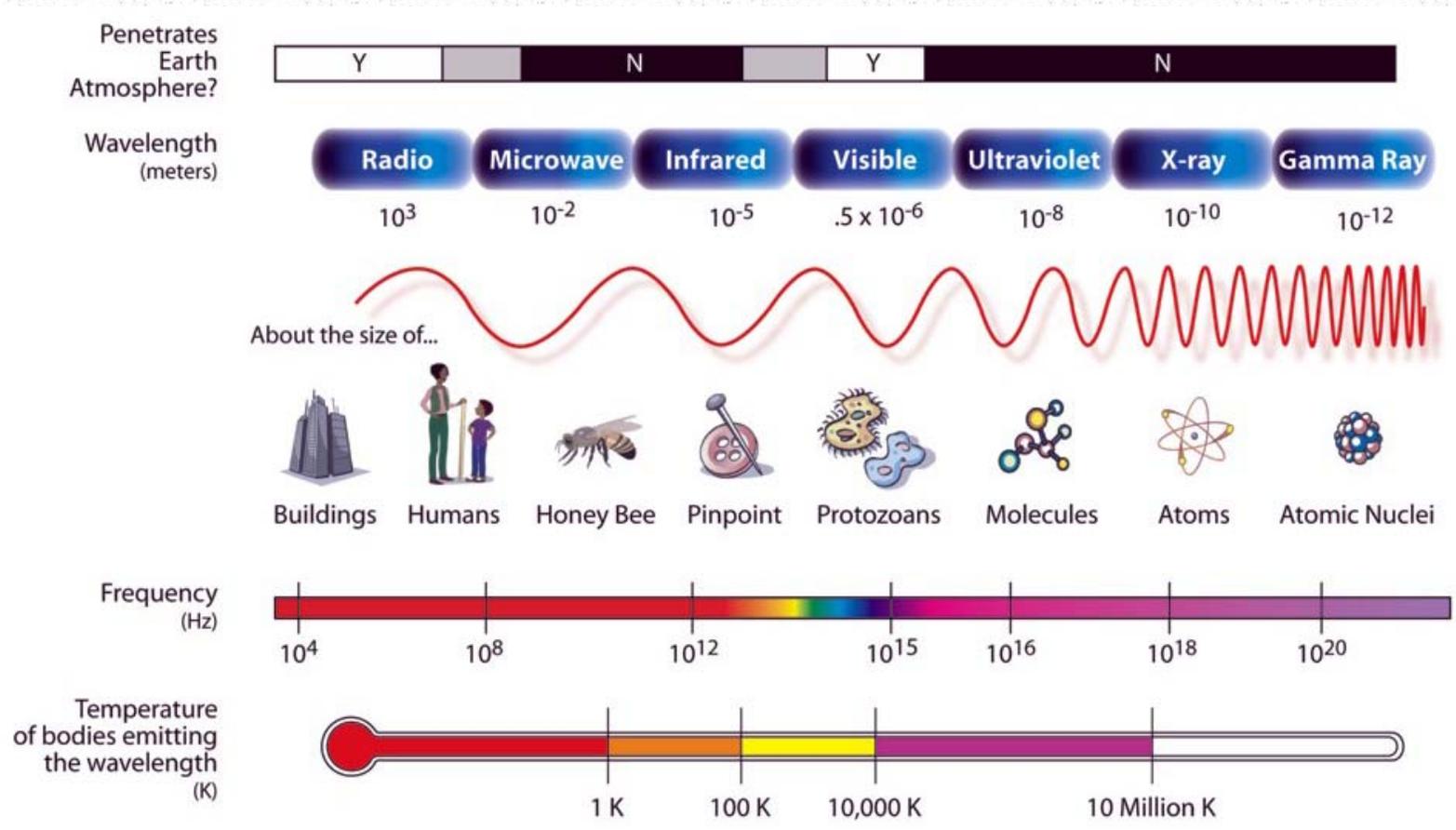
Curva de resposta típica dum fototransístor

# Transdutores



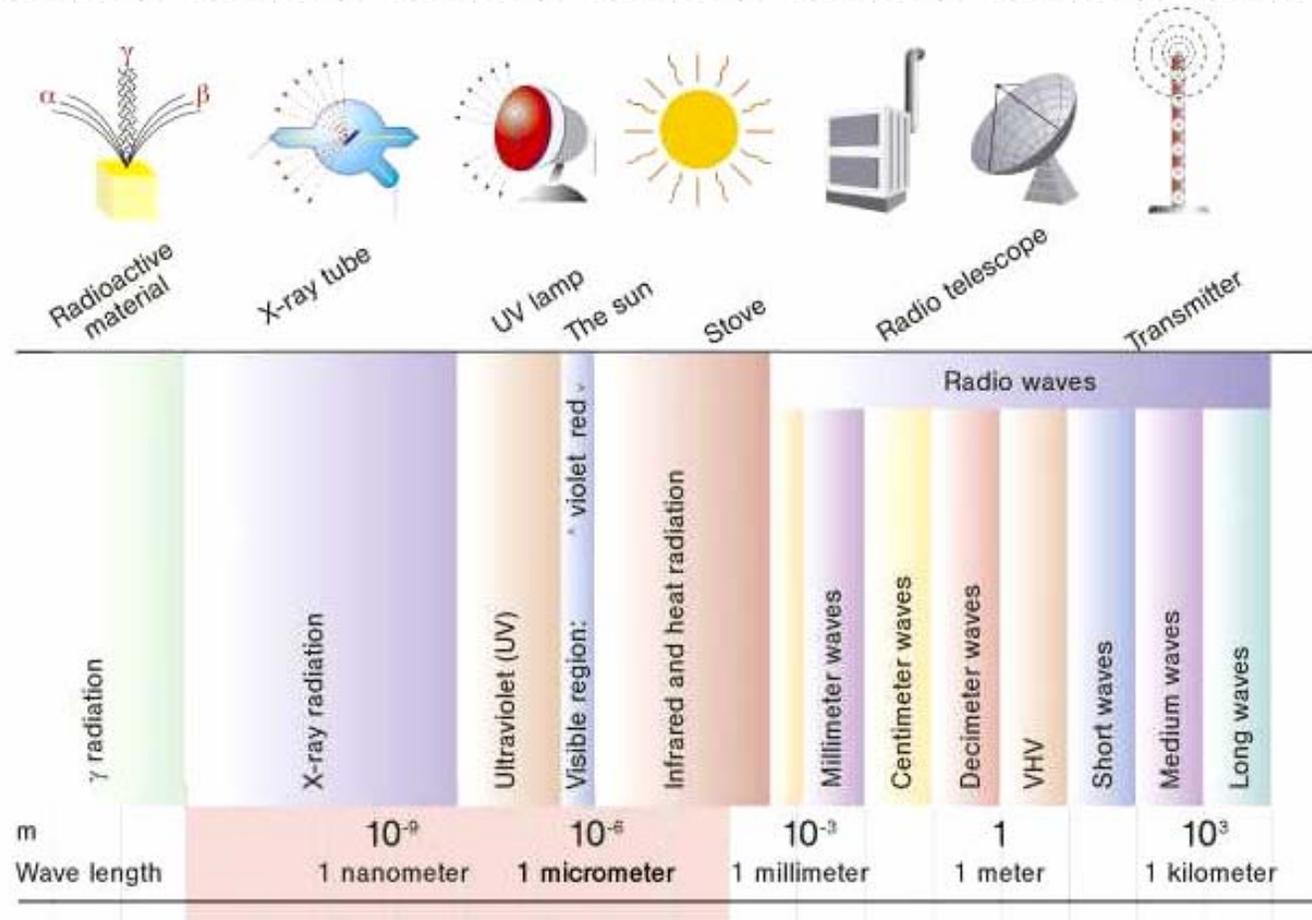
Espectro Electromagnético

# Transdutores



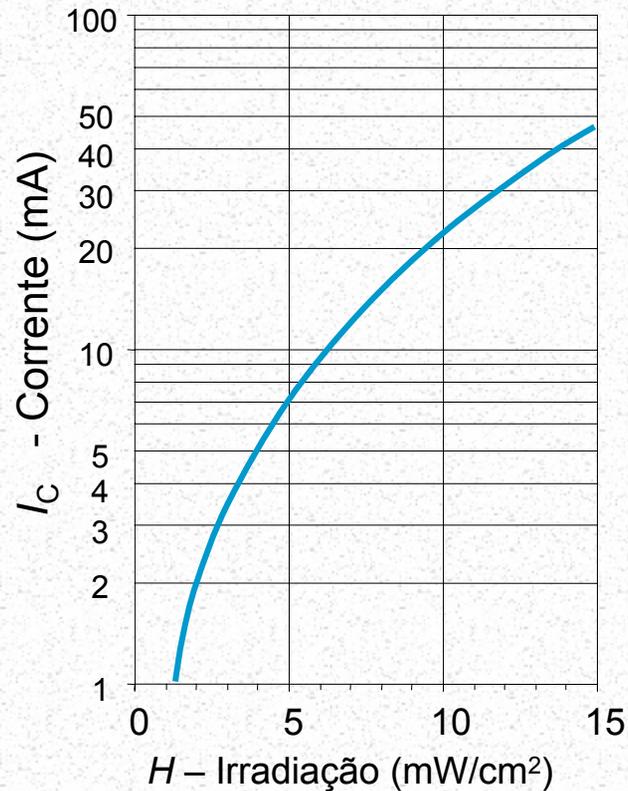
Espectro Electromagnético

# Transdutores



Espectro Electromagnético

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



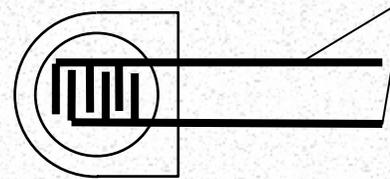
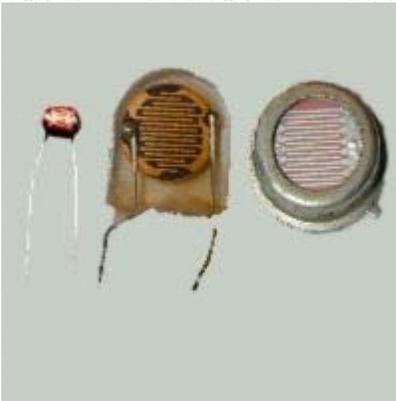
Curva de resposta típica dum fototransístor

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

| Tipo de irradiação                 | Irradiação (Luminância) em mW/cm <sup>2</sup> |
|------------------------------------|---|
| Luz do sol (máximo)                | 14  |
| Luz do sol (céu muito nublado)     | 1.4   |
| Candeeiro de secretária (em média) | 0.1   |
| Luz do luar                        | $2.8 \times 10^{-5}$                          |
| Mínimo detectável pelo olho humano | $1.5 \times 10^{-9}$                          |

Valores de irradiação típicos para o espectro visível

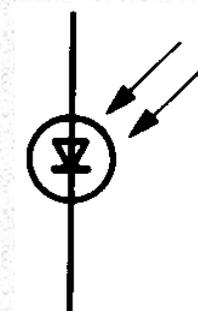
## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



Eléctrodos de metal  
sobre uma superfície de  
sulfureto de cádmio

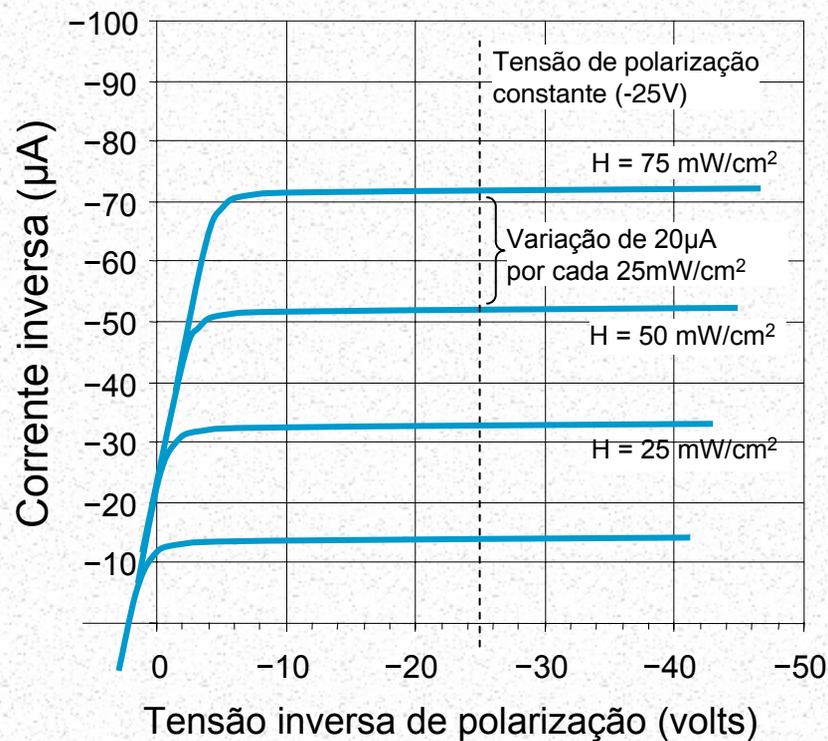
Aspecto e estrutura dum resistênciã fotossensível (LDR)

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



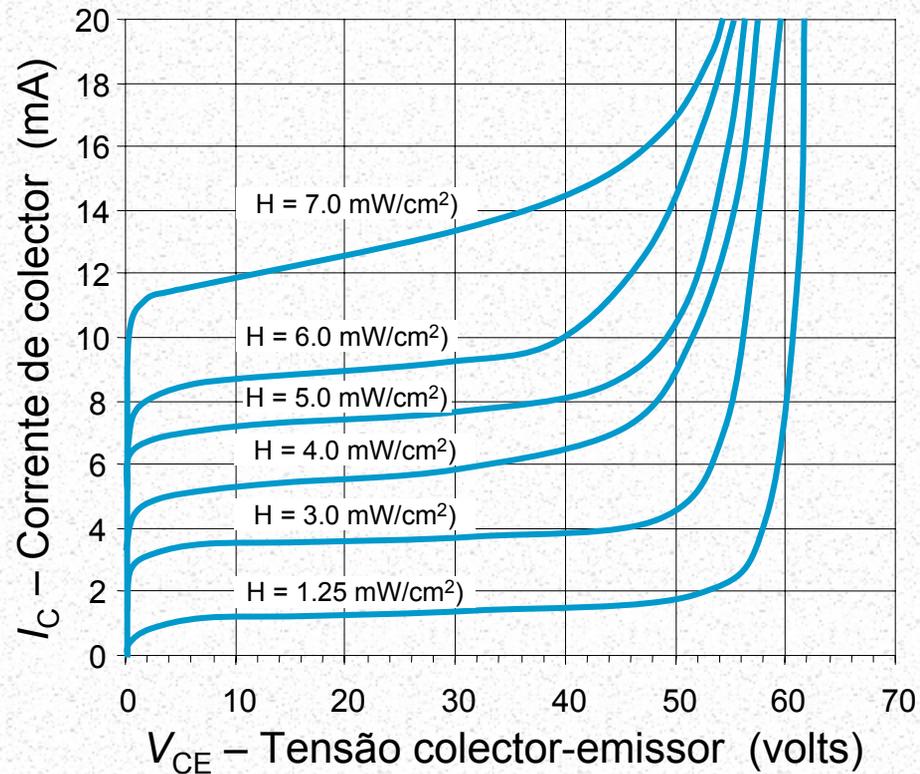
Fotodíodo (aspecto e símbolo).

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



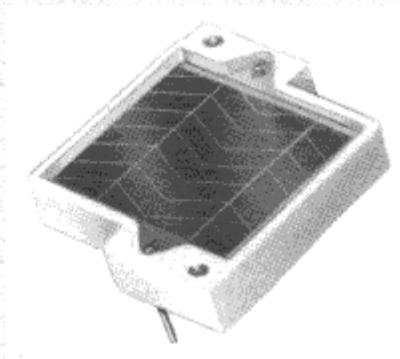
Característica dum fotodíodo

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

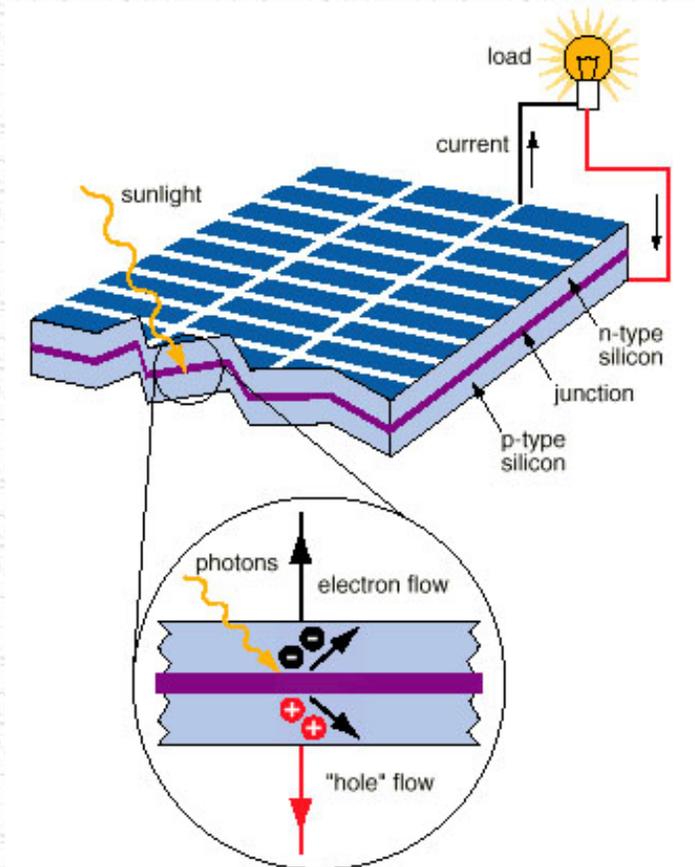


Característica dum fotodíodo

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



Aspecto da célula fotovoltaica



# Transdutores

## ■ Trans



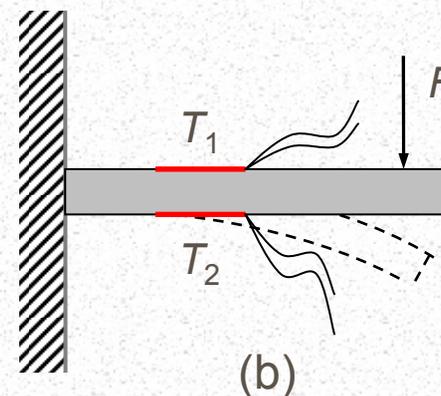
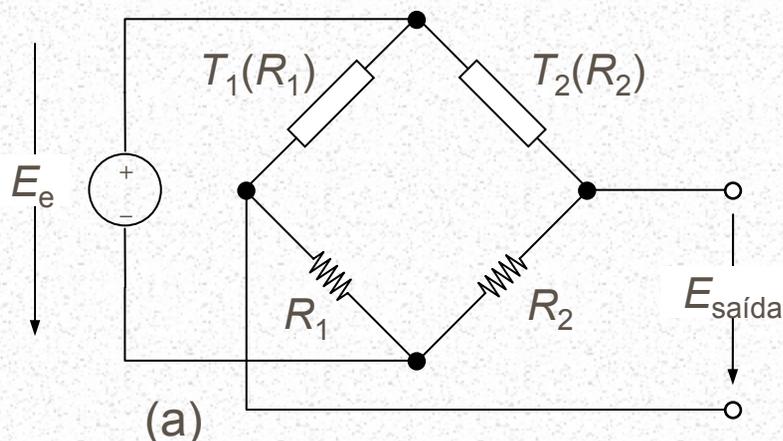
Aspecto e utilização da célula fotovoltaica

## ■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

| Característica                 | Fotocondutor                                      | Fotodíodo     | Fototransistor | Fotocélula    | Fotomultiplicador    |
|--------------------------------|---|---------------|----------------|---------------|----------------------|
| Impedância de saída            | Iluminado: 20k $\Omega$<br>No escuro: 1M $\Omega$ | Muito elevada | Muito elevada  | Muito baixa   | Muito elevada        |
| Corrente (típica)              | 10mA  | ( $\mu$ A)    | 1 – 50mA       | 1mA (ou mais) | 1mA (max.)           |
| Tensão de excitação (típica)   | 100V (max)  | 50V           | 30V            | —             | 1kV (ou mais)        |
| Tempo de subida (típico)       | (ms)  | ( $\mu$ s)    | ( $\mu$ s)     | (ms)          | < 1 $\mu$ s          |
| Sensibilidade                  | Elevada   | Muito elevada | Muito elevada  | Baixa         | Extremamente elevada |
| Custo                          | Muito baixo                                       | Médio-baixo   | Médio          | Baixo         | Elevado              |
| Dimensões                      | Médias  | Muito pequeno | Muito pequeno  | Grande        | Grande               |
| Estabilidade com a temperatura | Pobre   | Boa           | Boa            | Pobre         | Boa                  |
| Linearidade                    | Boa   | Excelente     | Pobre          | Média         | —                    |

Comparação entre diferentes fotossensores

## ■ Circuitos para transdutores



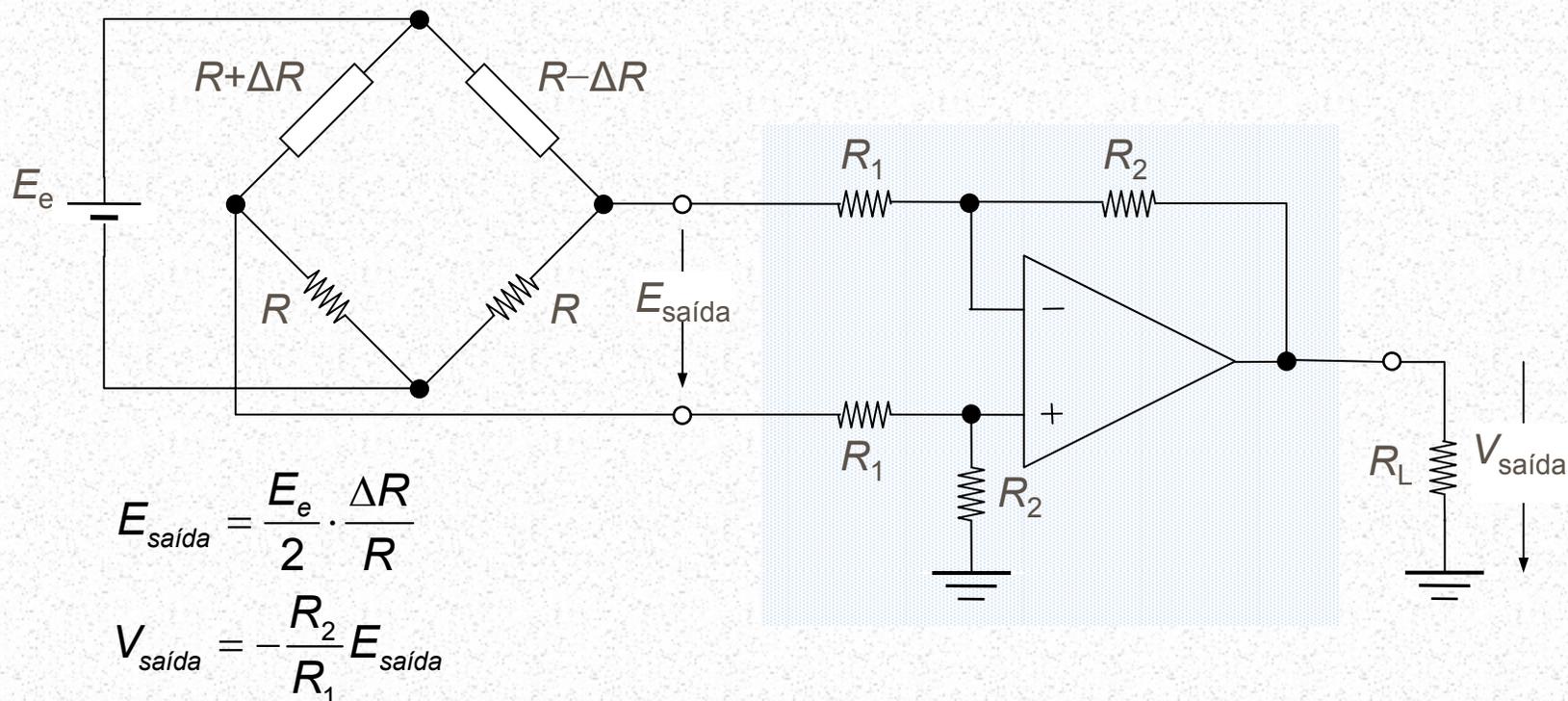
Princípio da utilização de extensómetros: a) ligação em ponte de *Wheatstone*; b) montagem dos extensómetros na barra

$$E_{saída} = \frac{E_e}{4} \left( \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_1}{R_1} \right)$$

Para  $R_1 = R_2$ ,  $|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = |\Delta R|$   
e uma vez que  $\Delta R_1 = -\Delta R_2$

$$\rightarrow E_{saída} = \frac{E_e}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

## ■ Circuitos para transdutores



Amplificação da saída da ponte



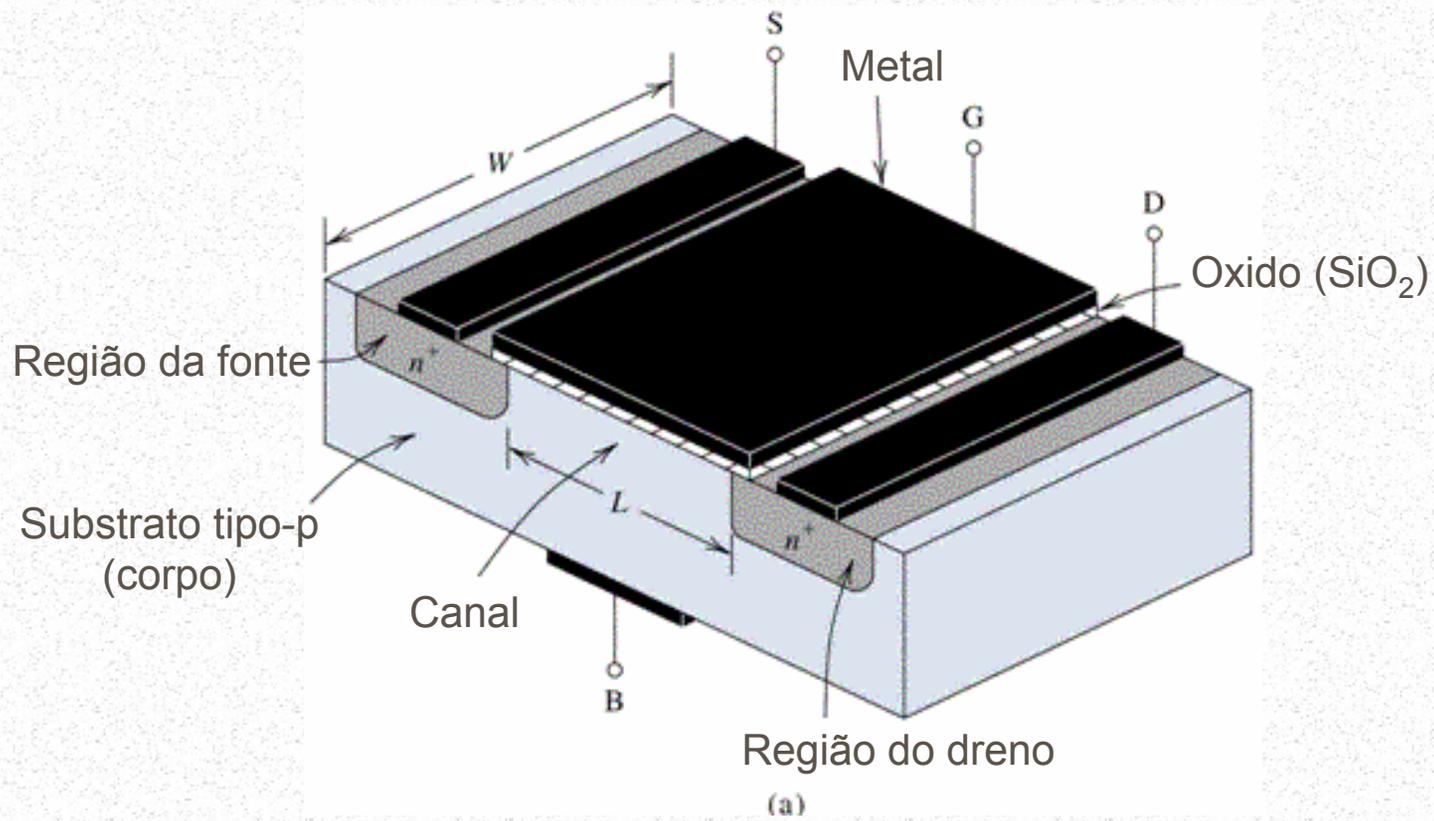
# Componentes Básicos



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

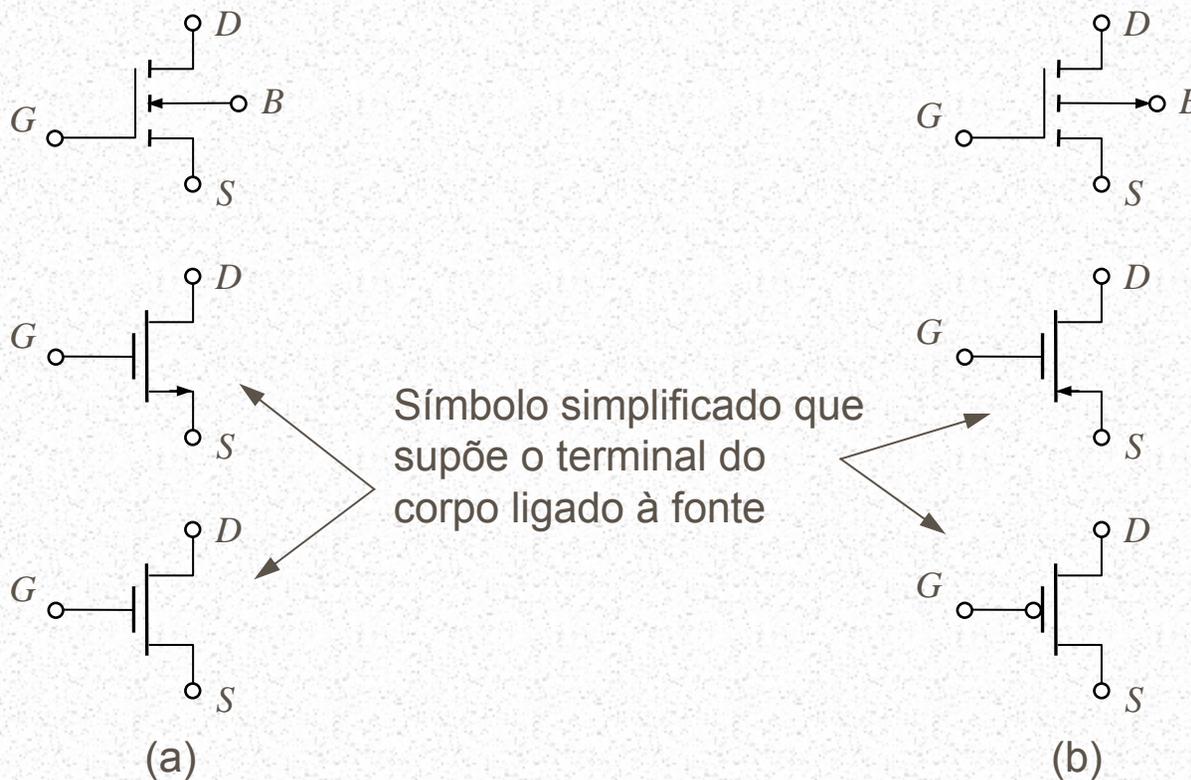
- **O MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)**
  - Dispositivo controlado por tensão
  - Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico
  - Impedância de entrada extremamente elevada (terminal de controlo isolado)
  - Mais simples de construir e ocupa menos espaço que o transístor bipolar
  - Disponível como componente discreto e em circuitos integrados
  - Mais de 90% dos IC's digitais utilizam esta tecnologia

## ■ O MOSFET – estrutura



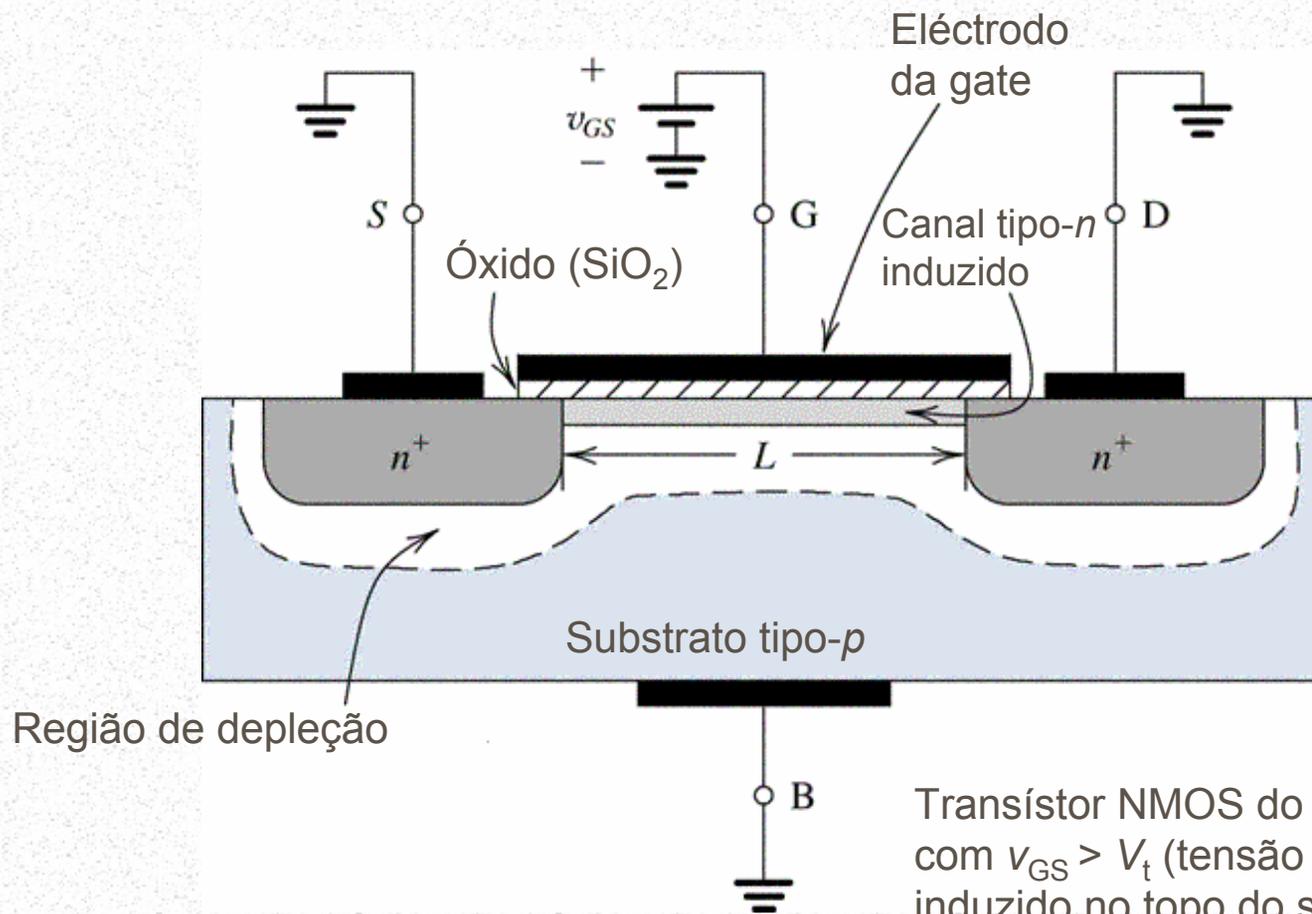
Estrutura física de um transístor NMOS do tipo intensificação

## ■ MOSFET

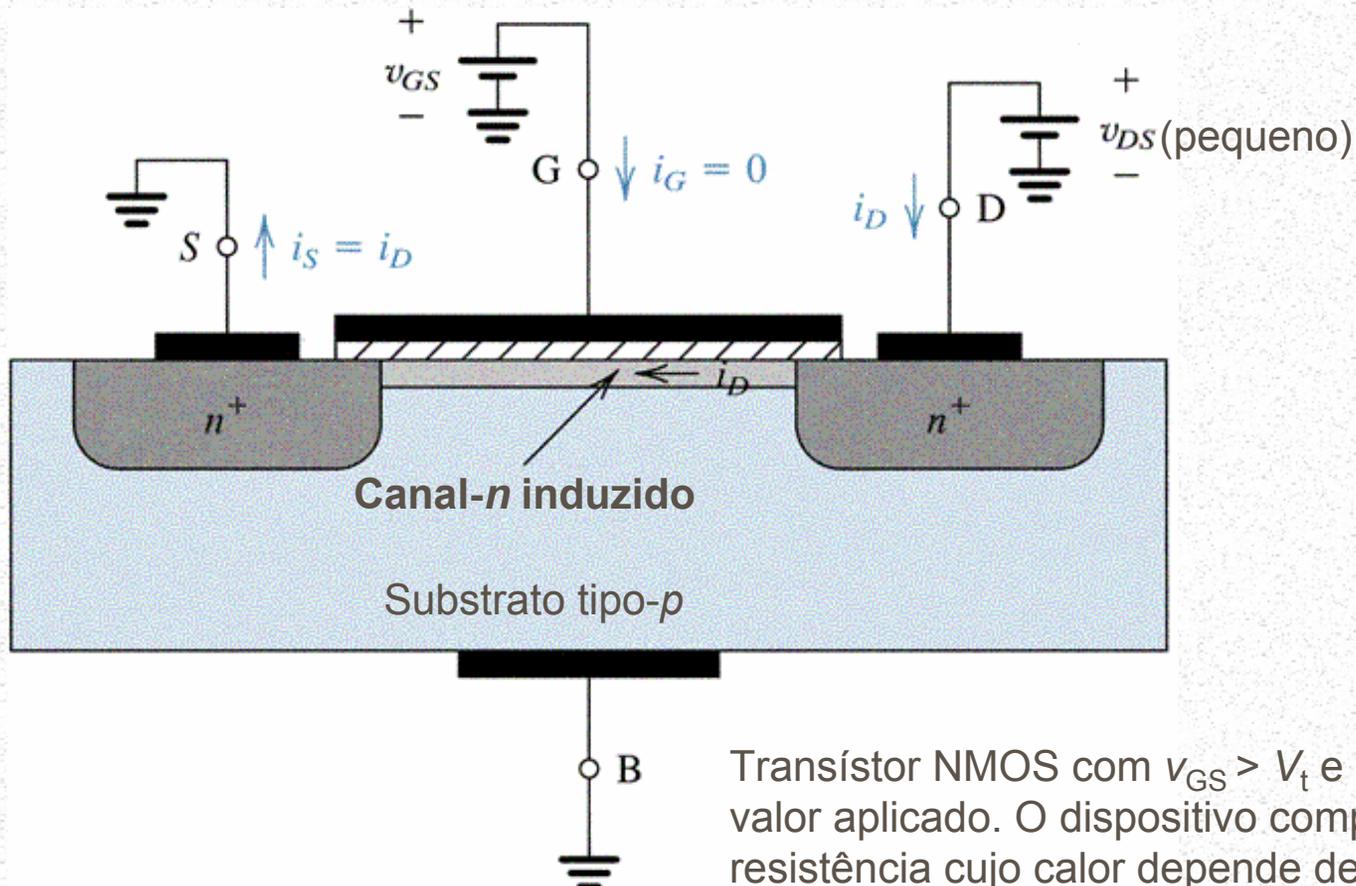


Símbolos do MOSFET do tipo intensificação: (a) NMOS; (b) PMOS

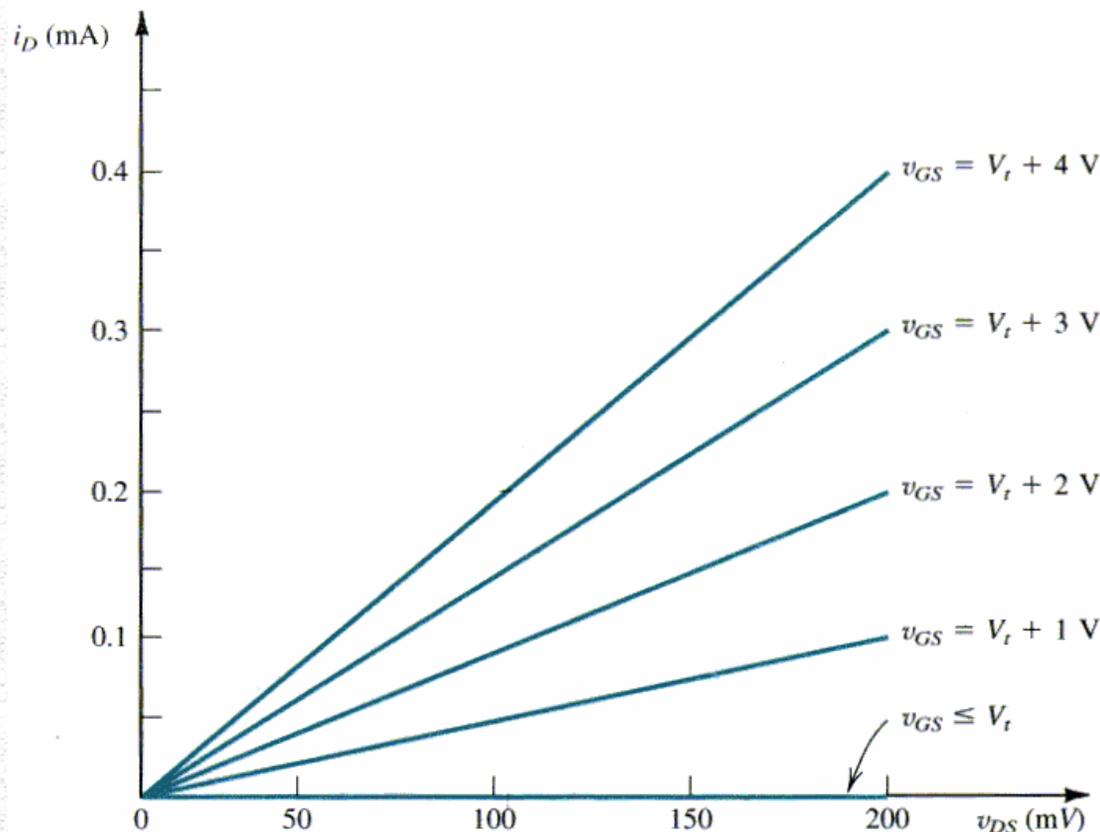
# Componentes Básicos



Transístor NMOS do tipo intensificação:  
com  $v_{GS} > V_t$  (tensão limiar) um canal  $n$  é induzido no topo do substrato (junto à gate)

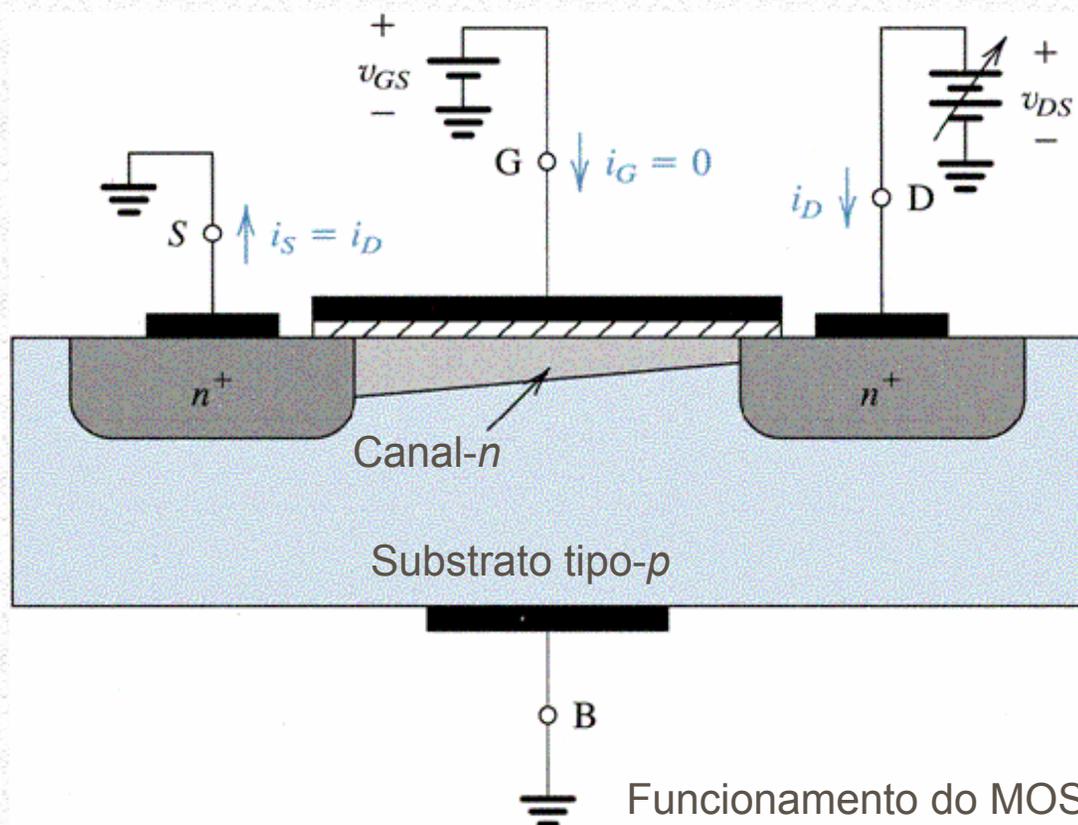


Transístor NMOS com  $v_{GS} > V_t$  e um  $v_{DS}$  de pequeno valor aplicado. O dispositivo comporta-se como uma resistência cujo valor depende de  $v_{GS}$  (a corrente  $i_D$  é proporcional a  $v_{GS} - V_t$ )



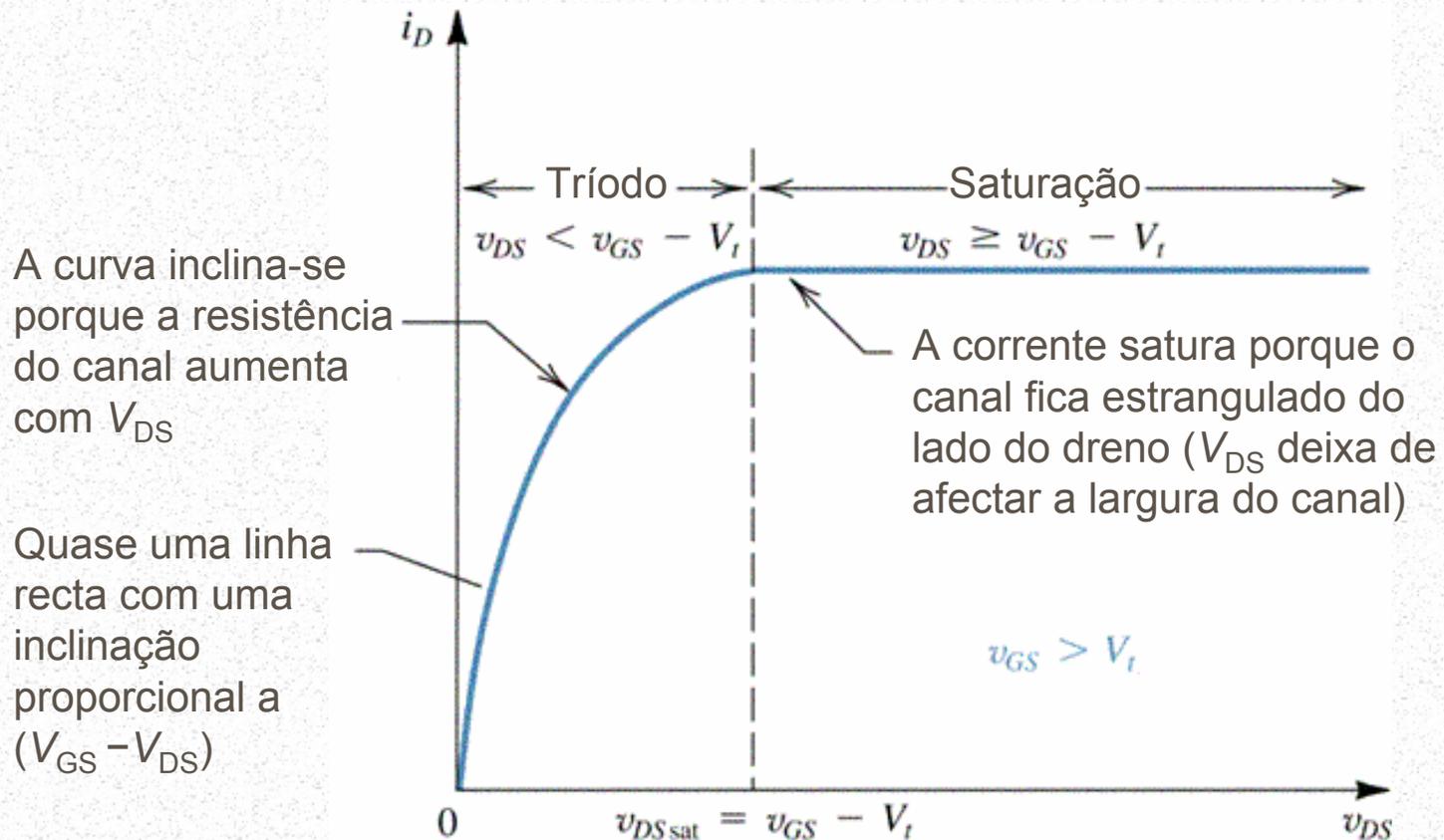
Característica  $i_D$ - $v_{DS}$  do MOSFET de intensificação para pequenos valores de  $v_{DS}$ : o dispositivo comporta-se como uma resistência linear controlada pela tensão  $v_{GS}$ .

# Componentes Básicos



Funcionamento do MOSFET de intensificação quando  $v_{DS}$  aumenta: O canal induzido torna-se afunilado e a sua resistência aumenta. Supõe-se que  $v_{GS}$  é mantido constante (maior do que  $V_t$ )

# Componentes Básicos



MOSFET de intensificação: corrente de dreno  $i_D$  versus  $v_{DS}$  para  $v_{GS} > V_t$

## ■ Característica $i_D$ - $V_{DS}$ do MOSFET de intensificação

### ■ Funcionamento como tródo

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_t)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right]$$

$$\approx k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)V_{DS} \quad (\text{para valores de } v_{DS} \text{ pequenos})$$

### ■ Saturação

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$W = 1$  a  $10 \mu\text{m}$ ,  $L = 2$  a  $500 \mu\text{m}$

$k'_n = \mu_n C_{ox} \rightarrow$  depende tecnologia do processo utilizado no fabrico  
(Constante de transcondutância do processo)

## ■ Característica $i_D$ - $i_{DS}$ do MOSFET de intensificação

---

Mobilidade do electrão:  $\mu_n = 580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

---

Espessura do óxido:  $t_{ox} = 0.02 \text{ a } 0.1 \text{ }\mu\text{m}$

---

Cte. dieléctrica do óxido:  $\epsilon_{ox} = 3.97\epsilon_0 = 3.5 \times 10^{-13} \text{ F/cm}$

---

Capacitância do óxido:  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.75 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  (para  $t_{ox} = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$ )  
 $= 0.35 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  (para  $t_{ox} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ )

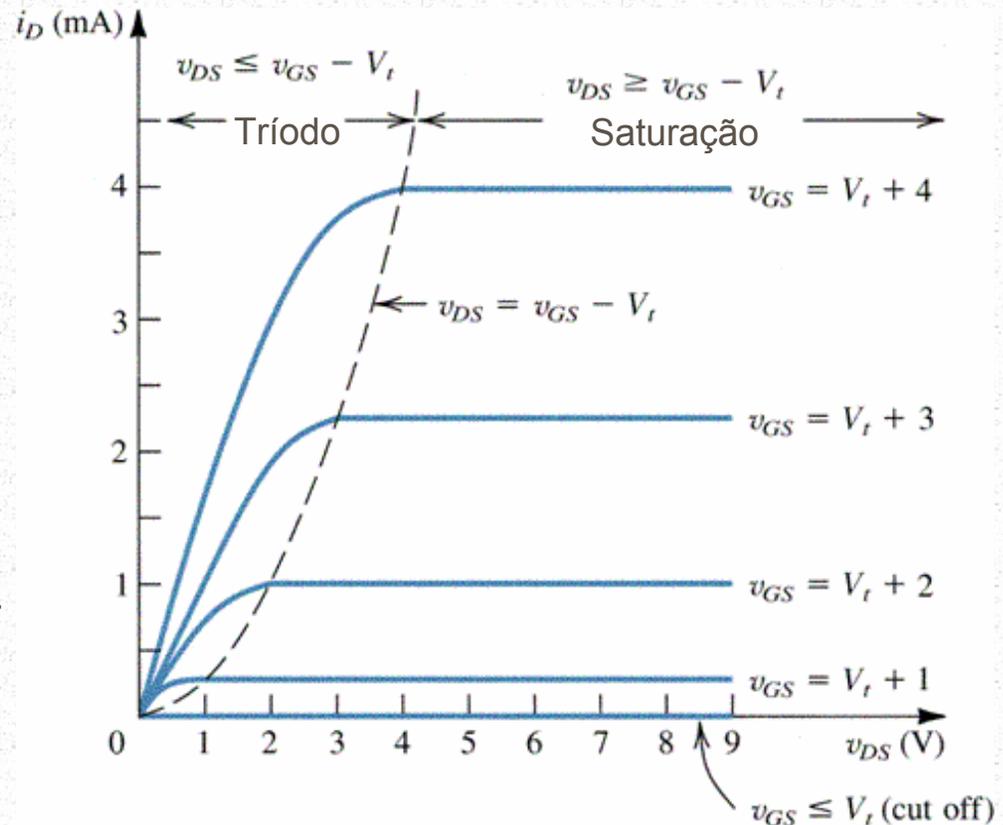
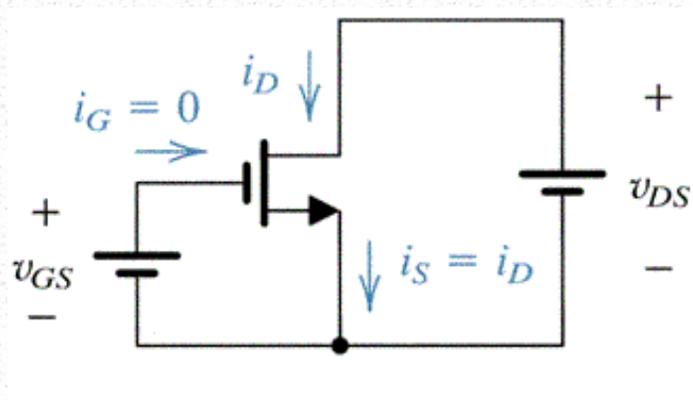
---

Constante de transcondutância:  $k'_n = \mu_n C_{ox}$   
 $\approx 100 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$  (para  $t_{ox} = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$ )  
 $\approx 20 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$  (para  $t_{ox} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ )

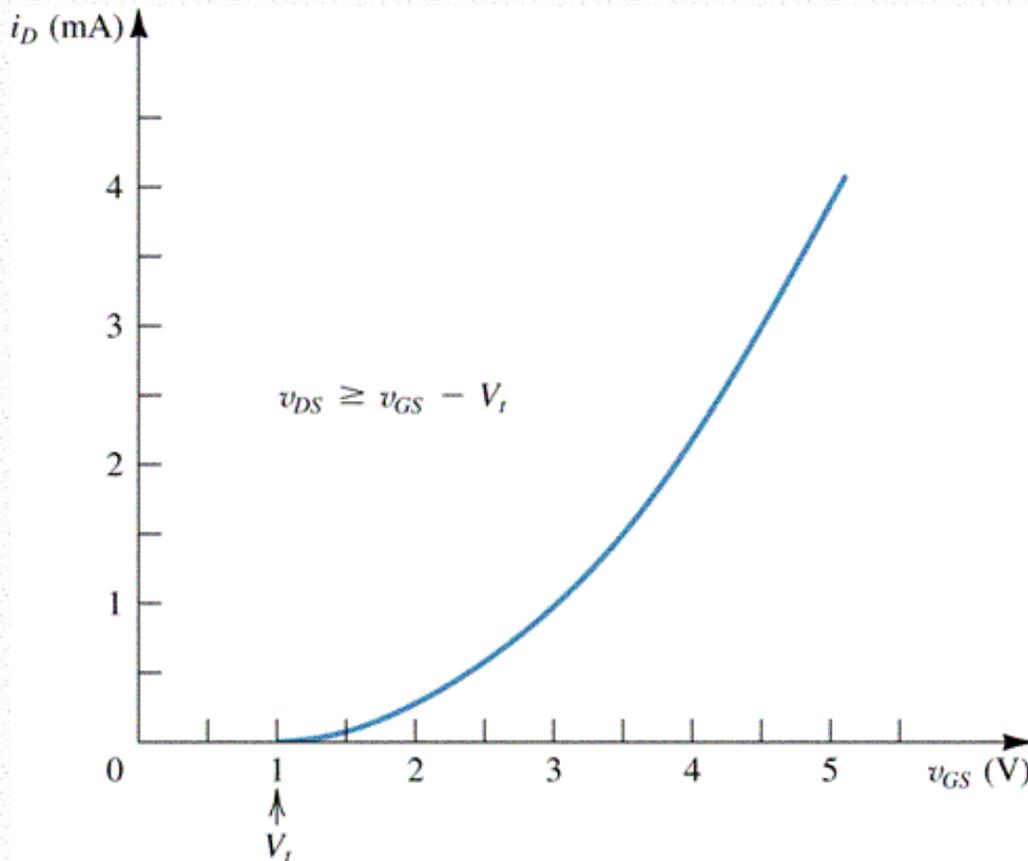
---

Parâmetros relativos ao processo-tecnologia de fabrico que afectam a característica  $i_{DS}$ - $i_{DS}$

## ■ Característica $i_D$ - $v_{DS}$ do MOSFET de intensificação



Característica  $i_D$ - $v_{DS}$  de um  $n$ -MOSFET de intensificação com  $V_t = 1$  V



$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

Característica  $i_D$ - $i_{GS}$  de um  $n$ -MOSFET de intensificação com  $V_p = 1$  V

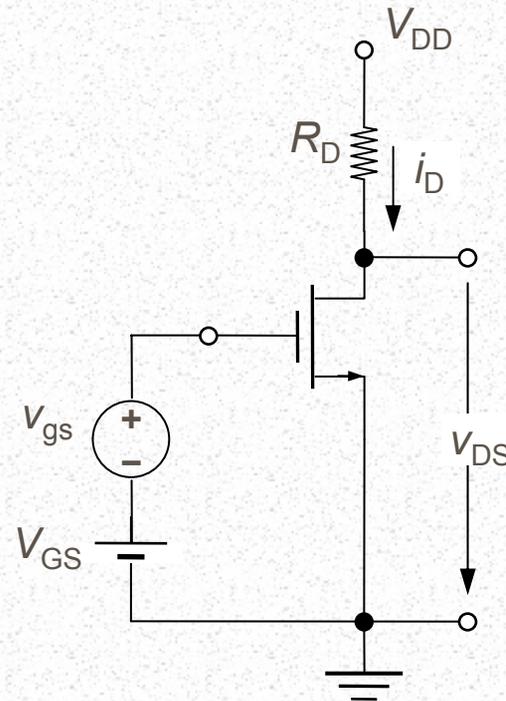
## ■ Funcionamento do MOSFET como amplificador

- O MOSFET deve ser polarizado na zona de saturação, onde:

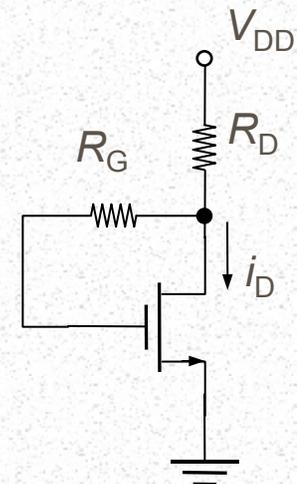
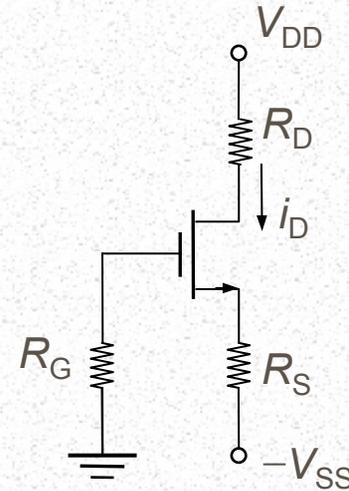
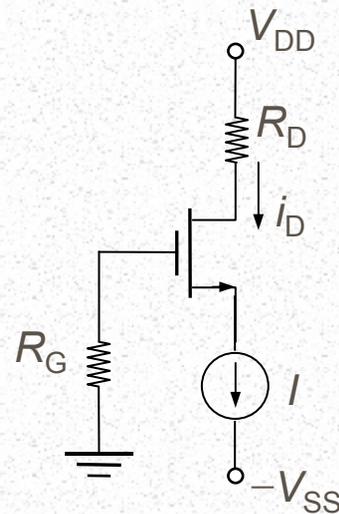
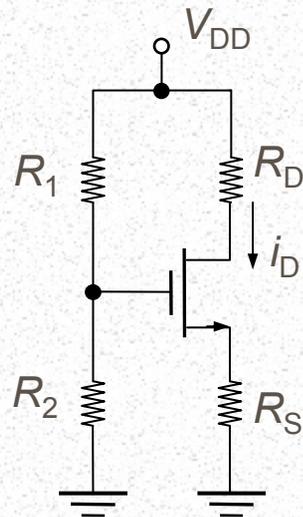
$$\begin{cases} i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \\ V_{DD} = R_D i_D + v_{DS} \end{cases}$$

- Para garantir o funcionamento na zona de saturação deve ser:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$$

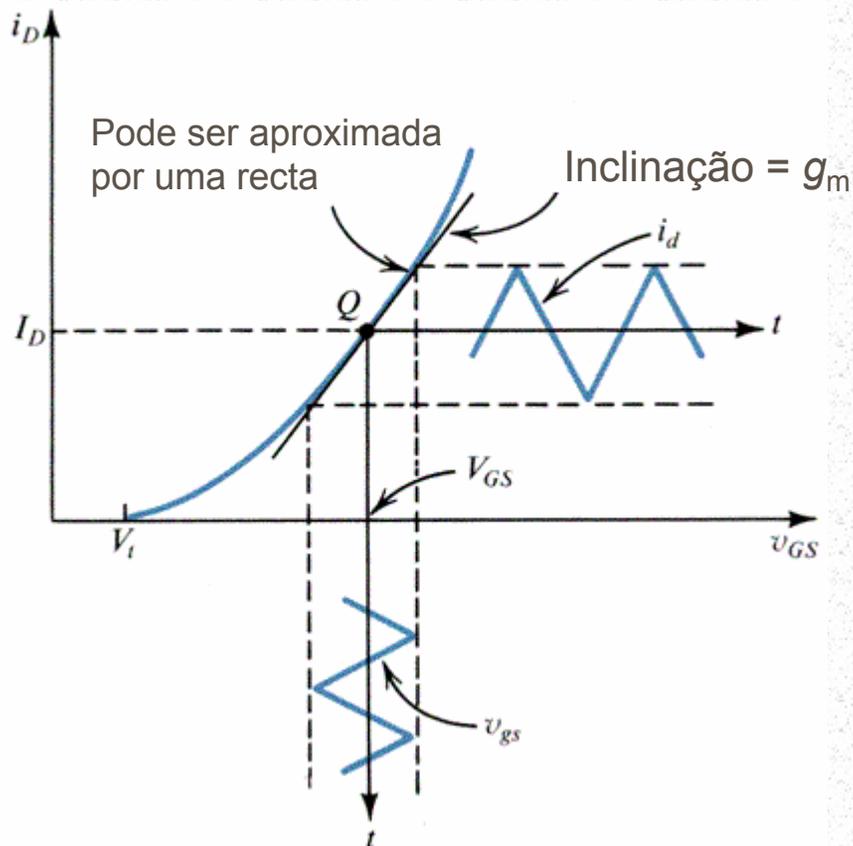


Circuito utilizado para estudar o funcionamento do MOSFET como amplificador



Diversos circuitos para polarização do MOSFET de intensificação

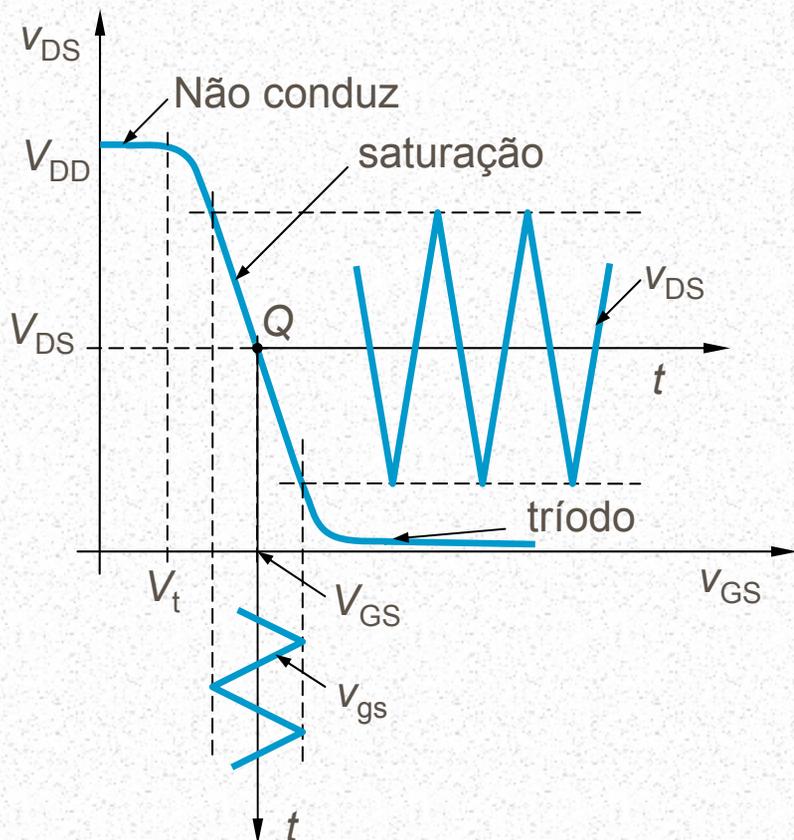
## ■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



**Transcondutância do MOSFET:**

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GS}}$$

## ■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



**Ganho em tensão do MOSFET:**

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

Para pequenos sinais:

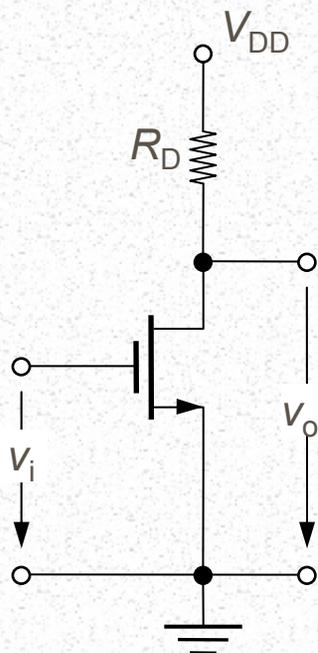
$$V_{DS} = V_{DD} - R_D (I_D + i_d)$$

$$= V_{DS} - R_D i_d$$

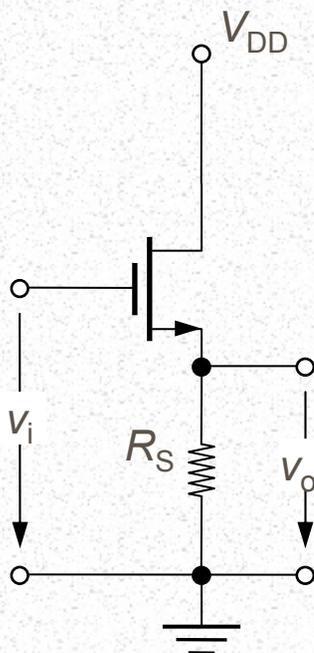
$$v_{ds} = -R_D i_d = -g_m R_D v_{gs}$$

$$\rightarrow \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

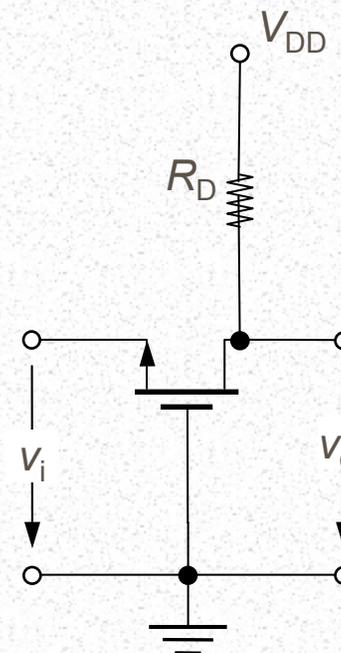
## ■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



(a)



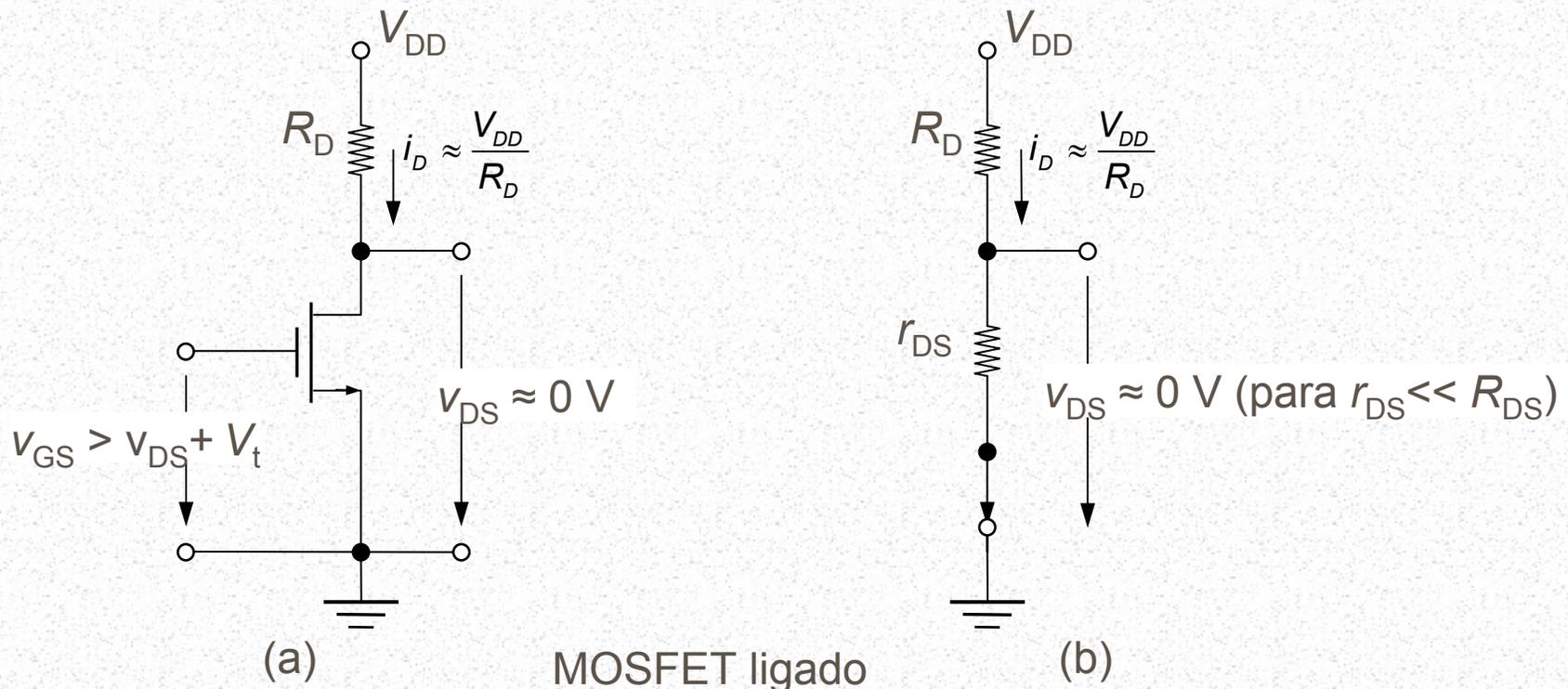
(b)



(c)

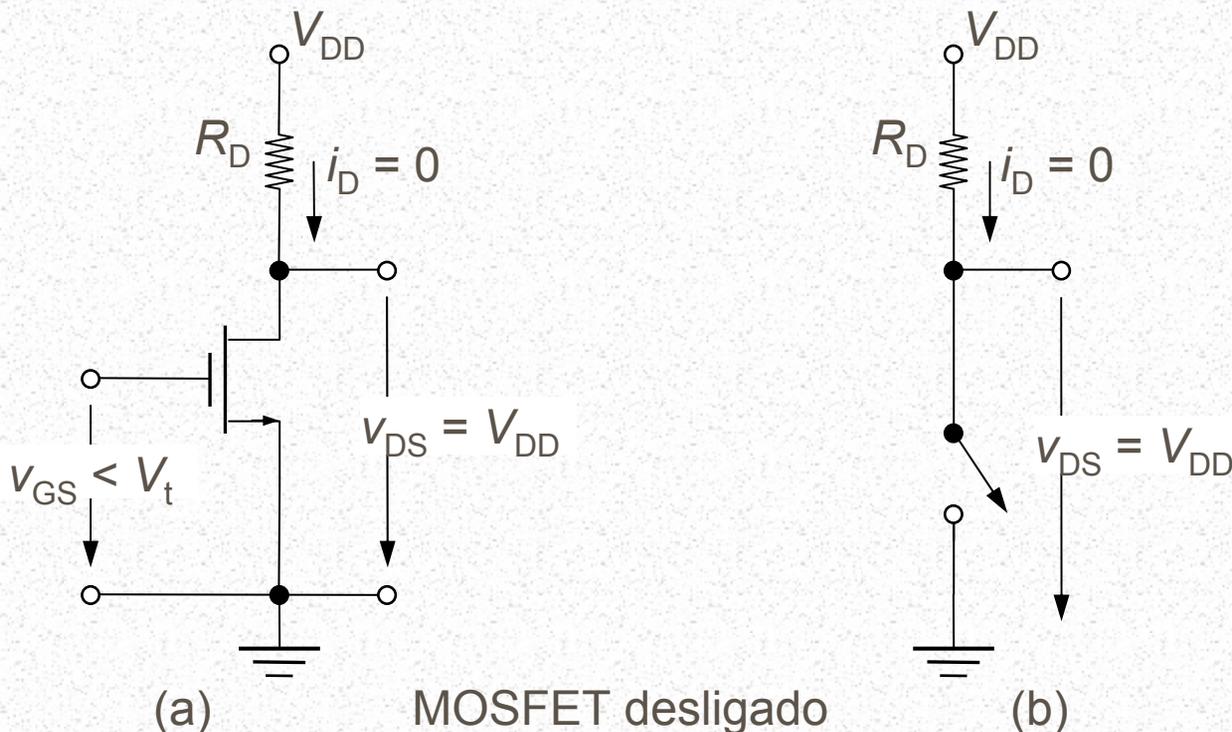
Amplificadores com 'n-MOSFET's – configurações básicas: (a) fonte comum; (b) dreno comum (ou seguidor de fonte); (c) gate comum

## ■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital



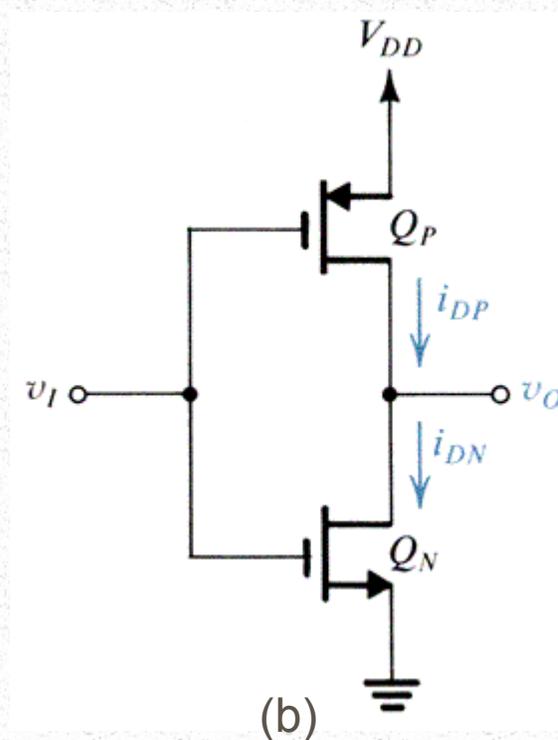
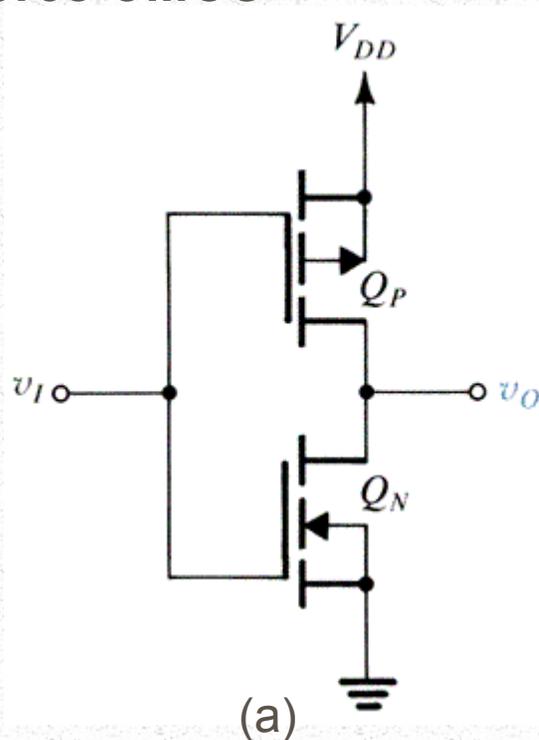
Funcionamento um nível de tensão de entrada ( $v_{GS}$ ) elevado:  
(a) circuito com  $v_{GS} > v_{DS} + V_t$  (1 lógico); (b) circuito equivalente

## ■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital



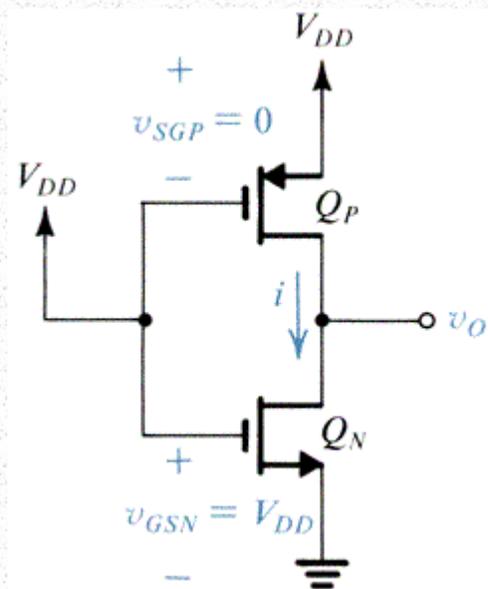
Funcionamento para um nível de tensão de entrada ( $v_{GS}$ ) baixo:  
(a) circuito com  $v_{GS} < V_t$  (0 lógico); (b) circuito equivalente

## ■ Transístores CMOS

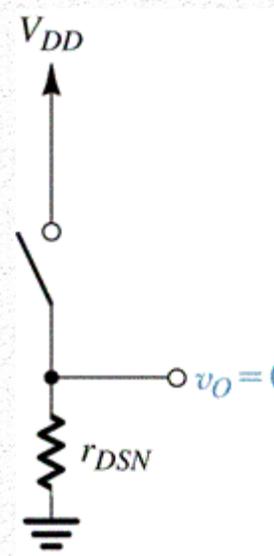


(a) Inversor CMOS; (b) circuito simplificado

## ■ Transístores CMOS



(a)

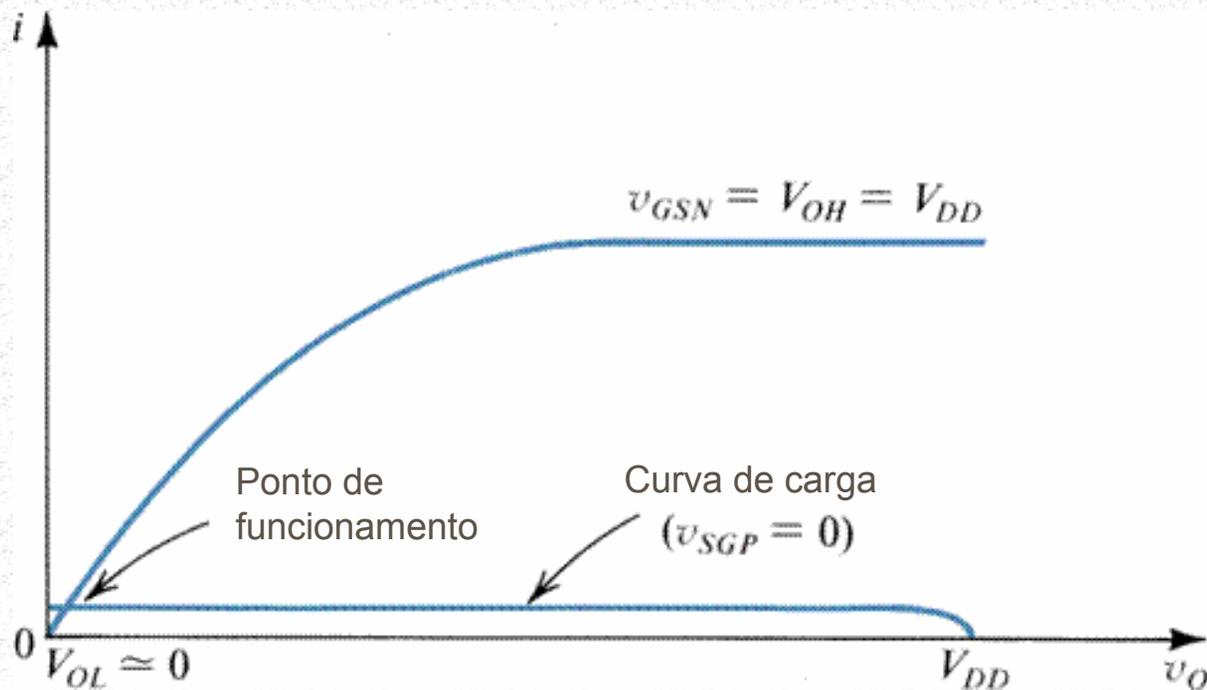


(b)

Funcionamento do inversor CMOS para  $v_i$  elevado:

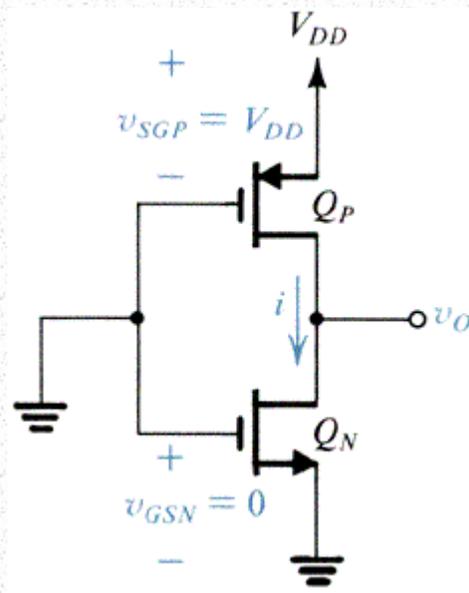
(a) circuito com  $v_i = V_{DD}$  (1 lógico); (b) circuito equivalente

## ■ Transístores CMOS

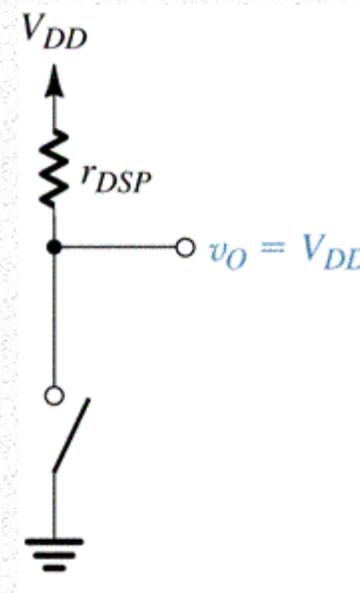


Funcionamento do inversor CMOS para  $v_i$  elevado: modo de obter graficamente o ponto de funcionamento

## ■ Transístores CMOS



(a)

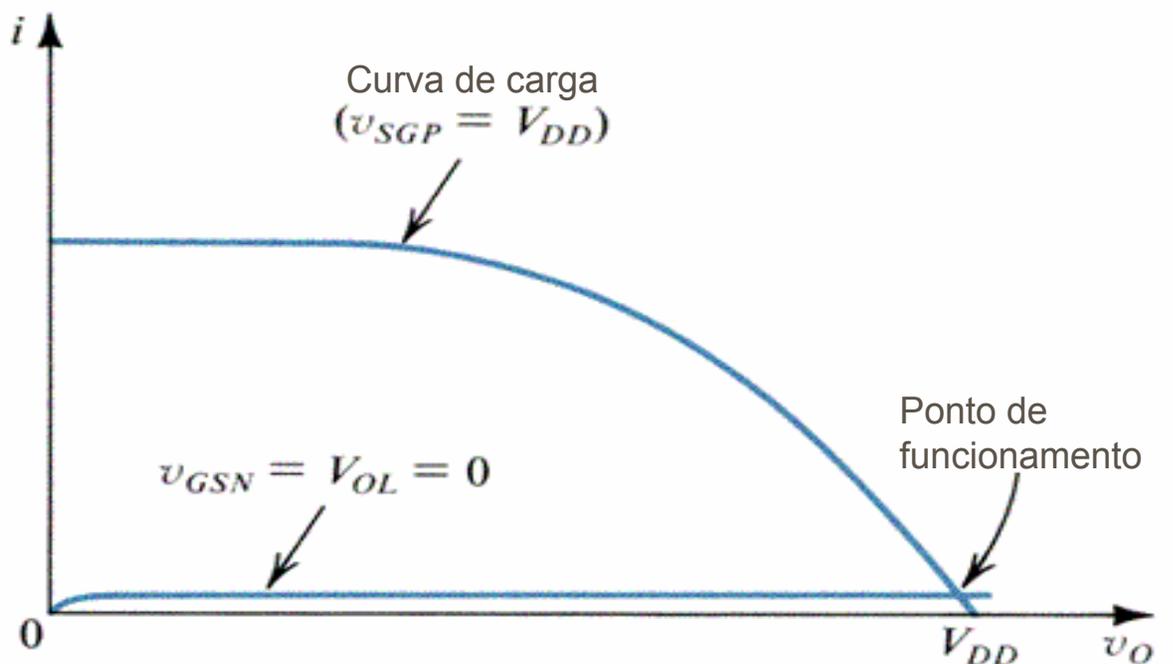


(b)

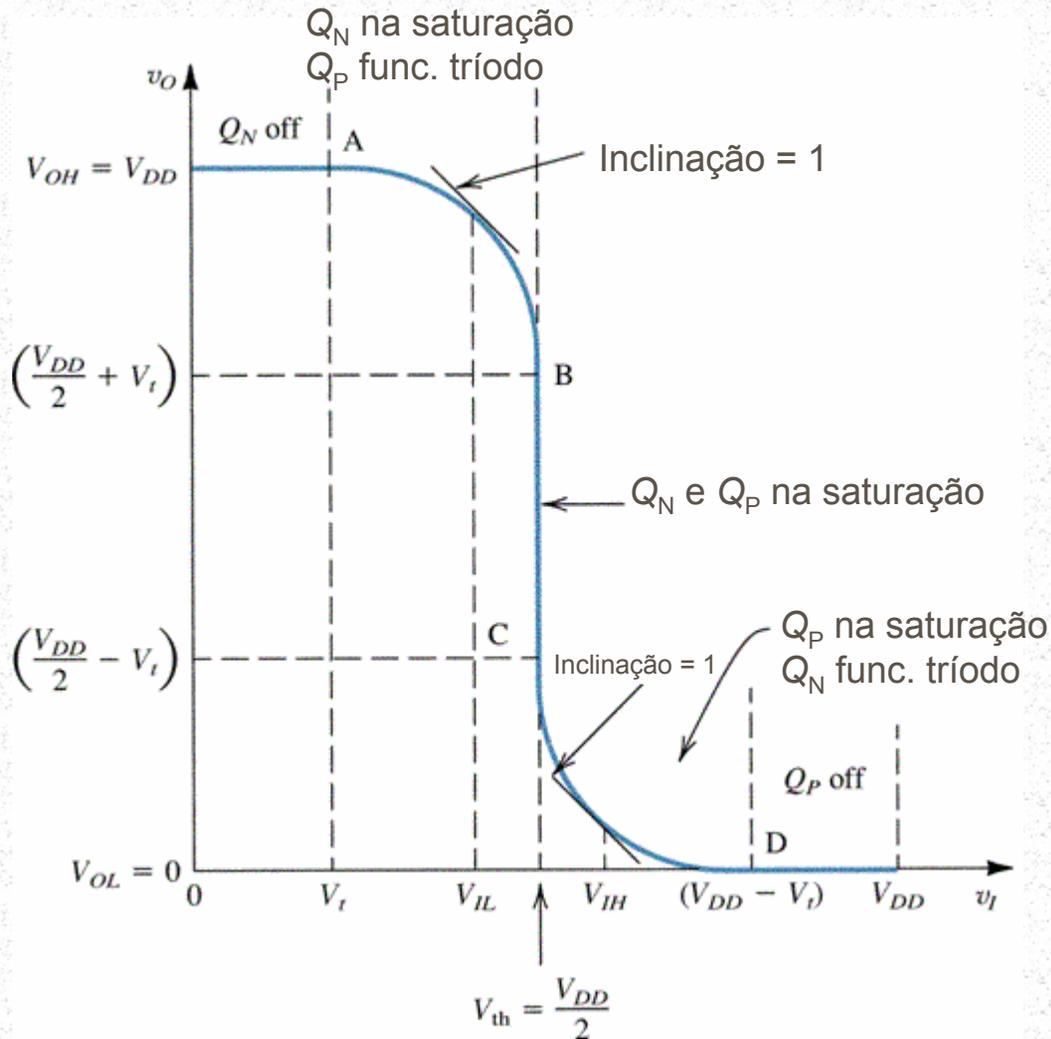
Funcionamento do inversor CMOS para  $v_i$  baixo:

(a) circuito com  $v_i = 0$  V (0 lógico); (b) circuito equivalente

## ■ Transístores CMOS

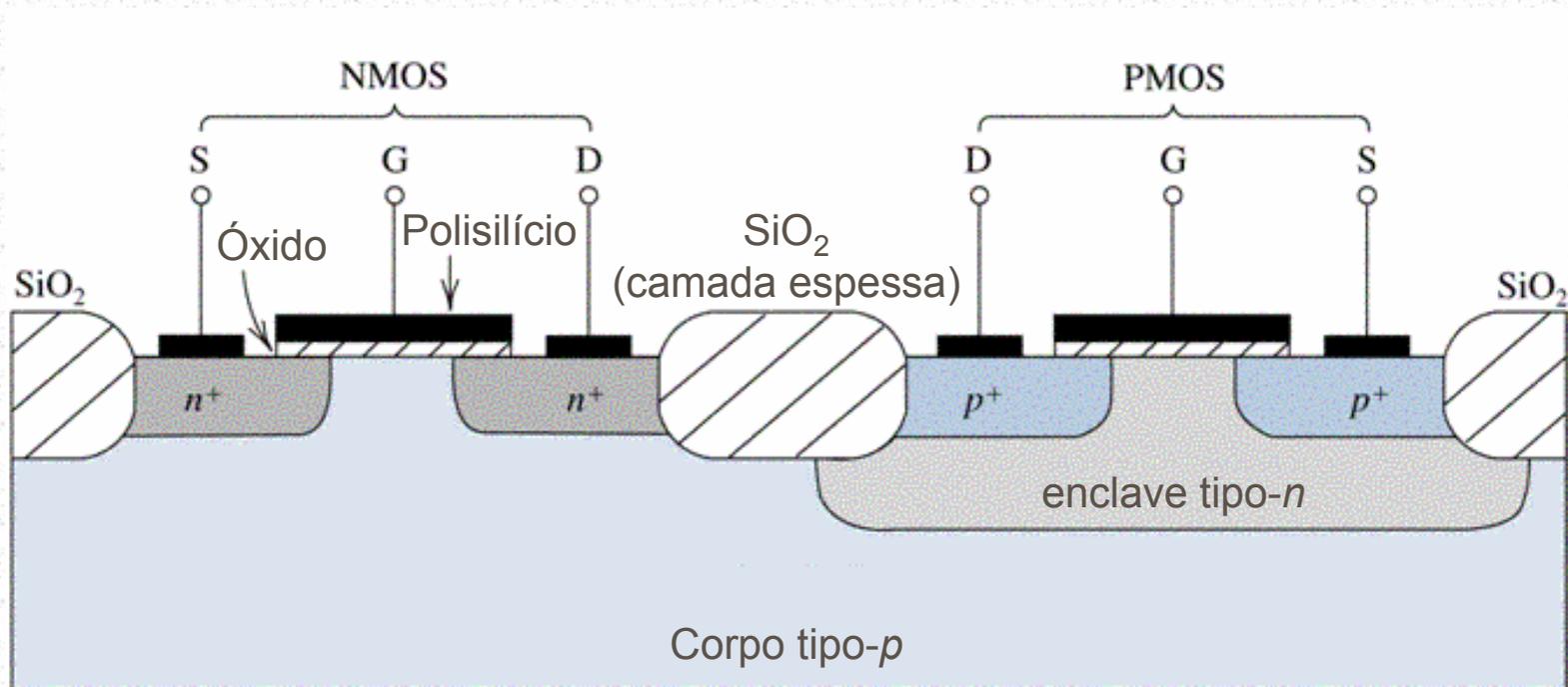


Funcionamento do inversor CMOS para  $v_i$  baixo: modo de obter graficamente o ponto de funcionamento



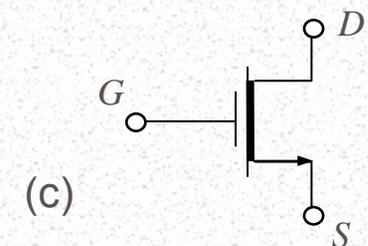
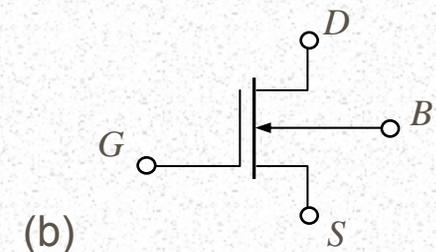
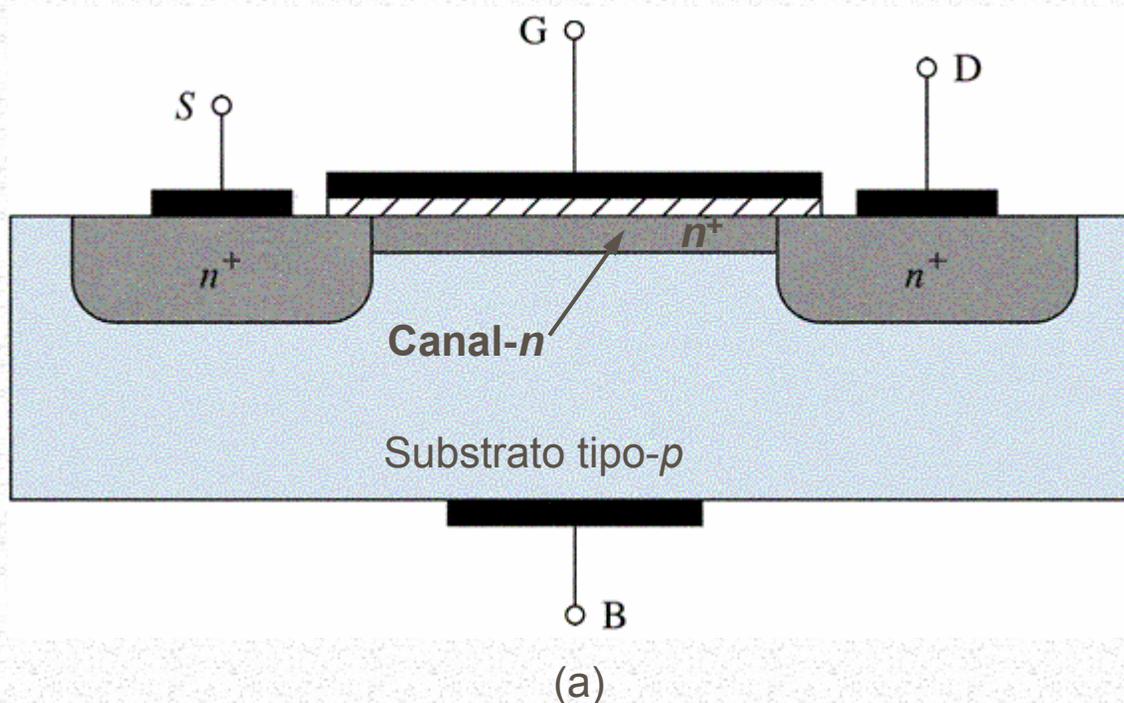
Característica de transferência do inversor CMOS

## ■ CMOS



Estrutura de um par de transístores CMOS

## ■ MOSFET de depleção



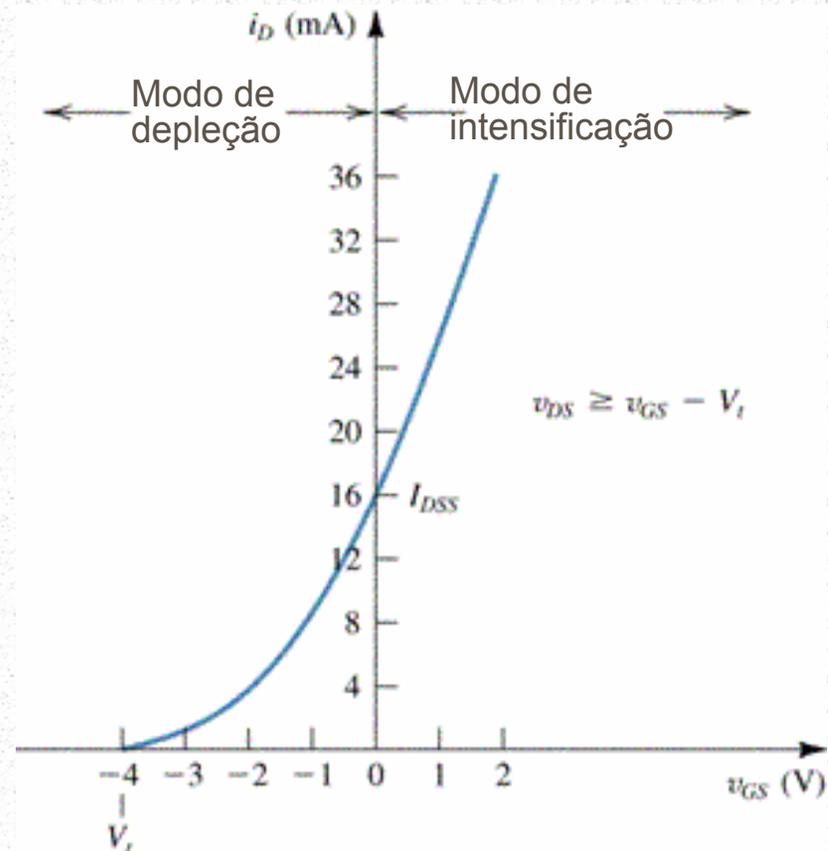
Transístor NMOS do tipo depleção: (a) estrutura física; (b) símbolo; (c) símbolo simplificado admitindo que o terminal do corpo está ligado à fonte

## ■ Característica $i_D$ - $V_{GS}$ do MOSFET de depleção

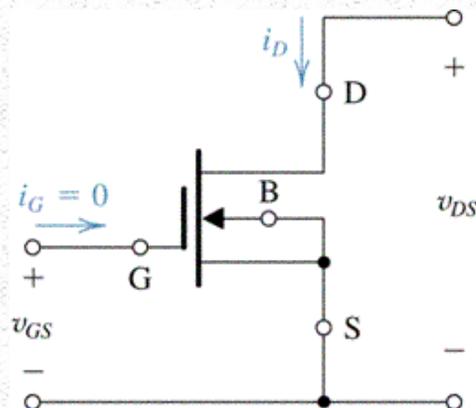
$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2$$

$$I_{DSS} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_t^2$$

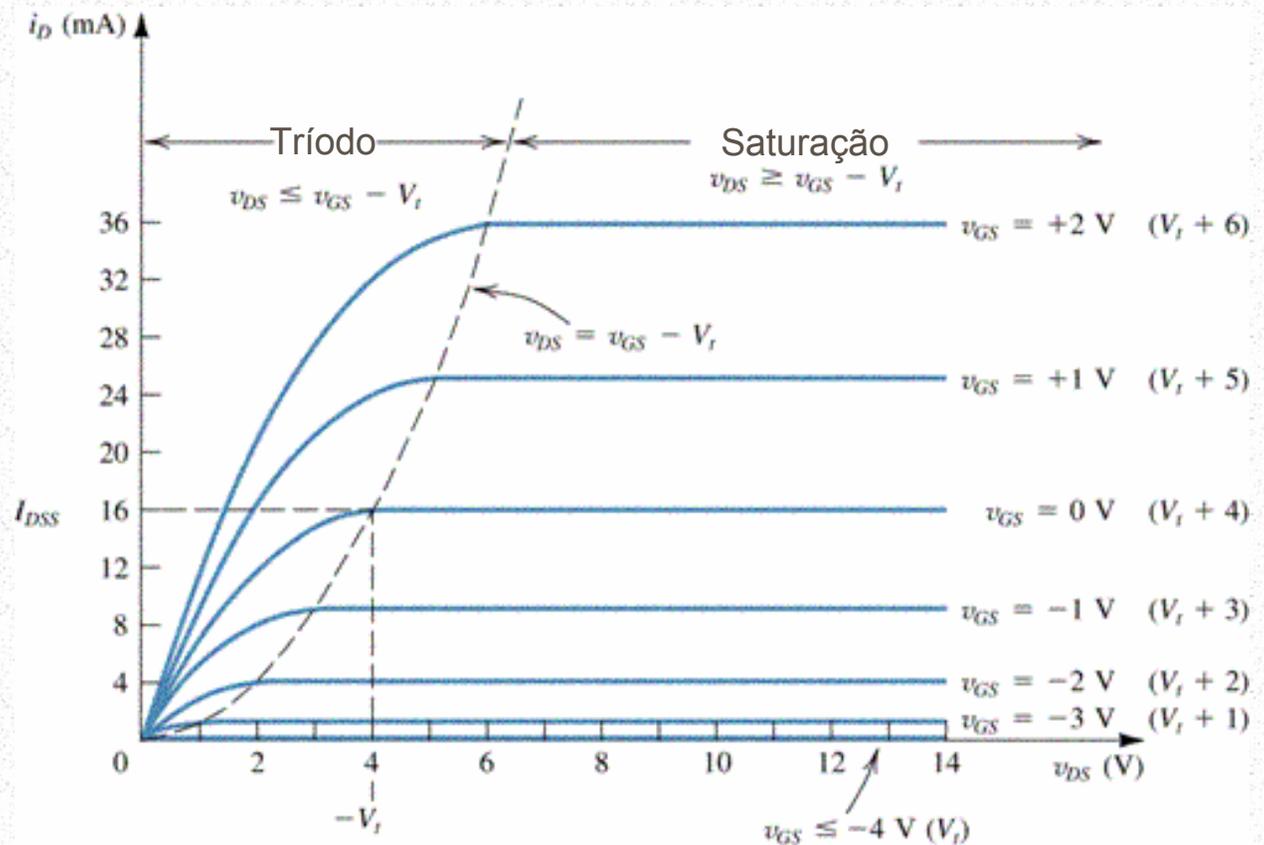
Característica  $i_D$ - $i_{GS}$  de um  $n$ -MOSFET de depleção com  $V_t = -4V$



## ■ Característica $i_D$ - $i_{DS}$ do MOSFET de depleção



Característica  $i_D$ - $i_{DS}$  de um  $n$ -MOSFET de depleção





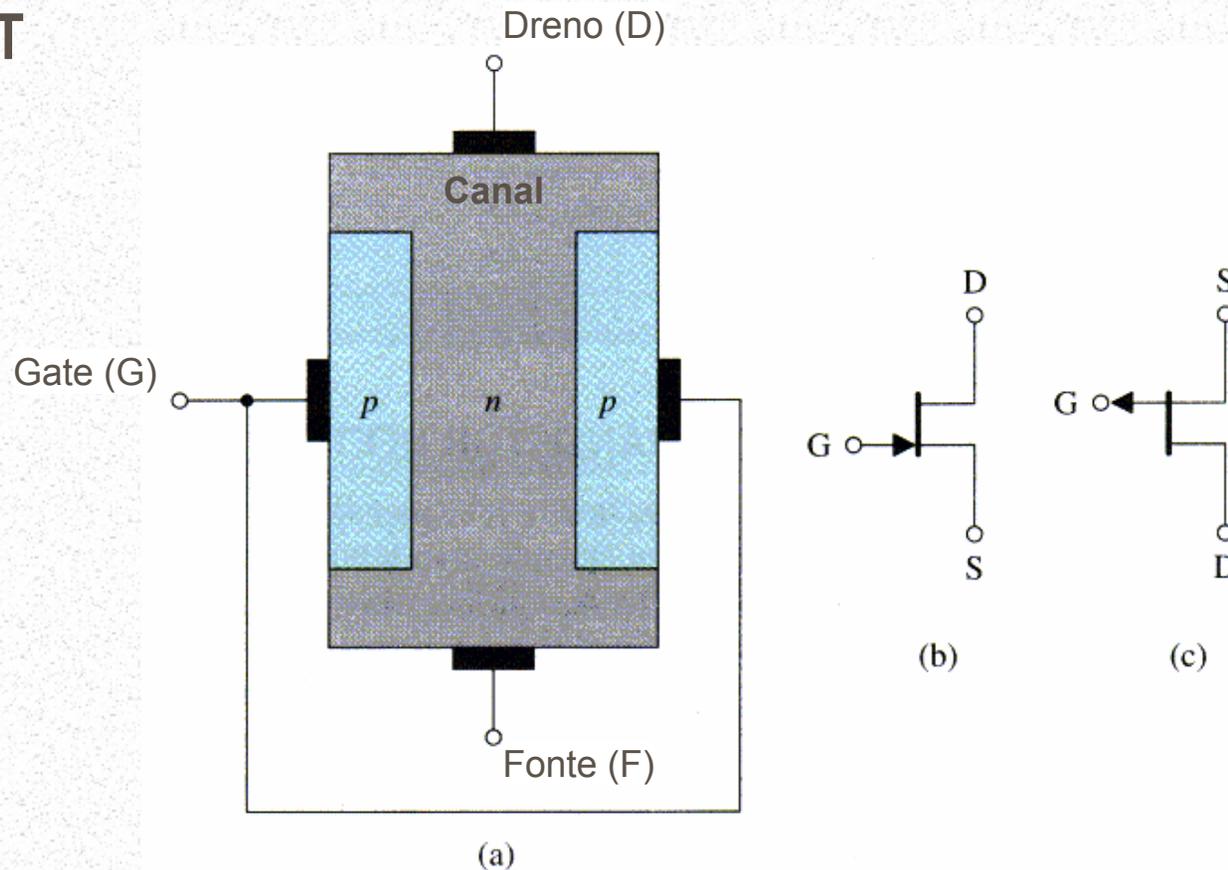
# Componentes Básicos



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

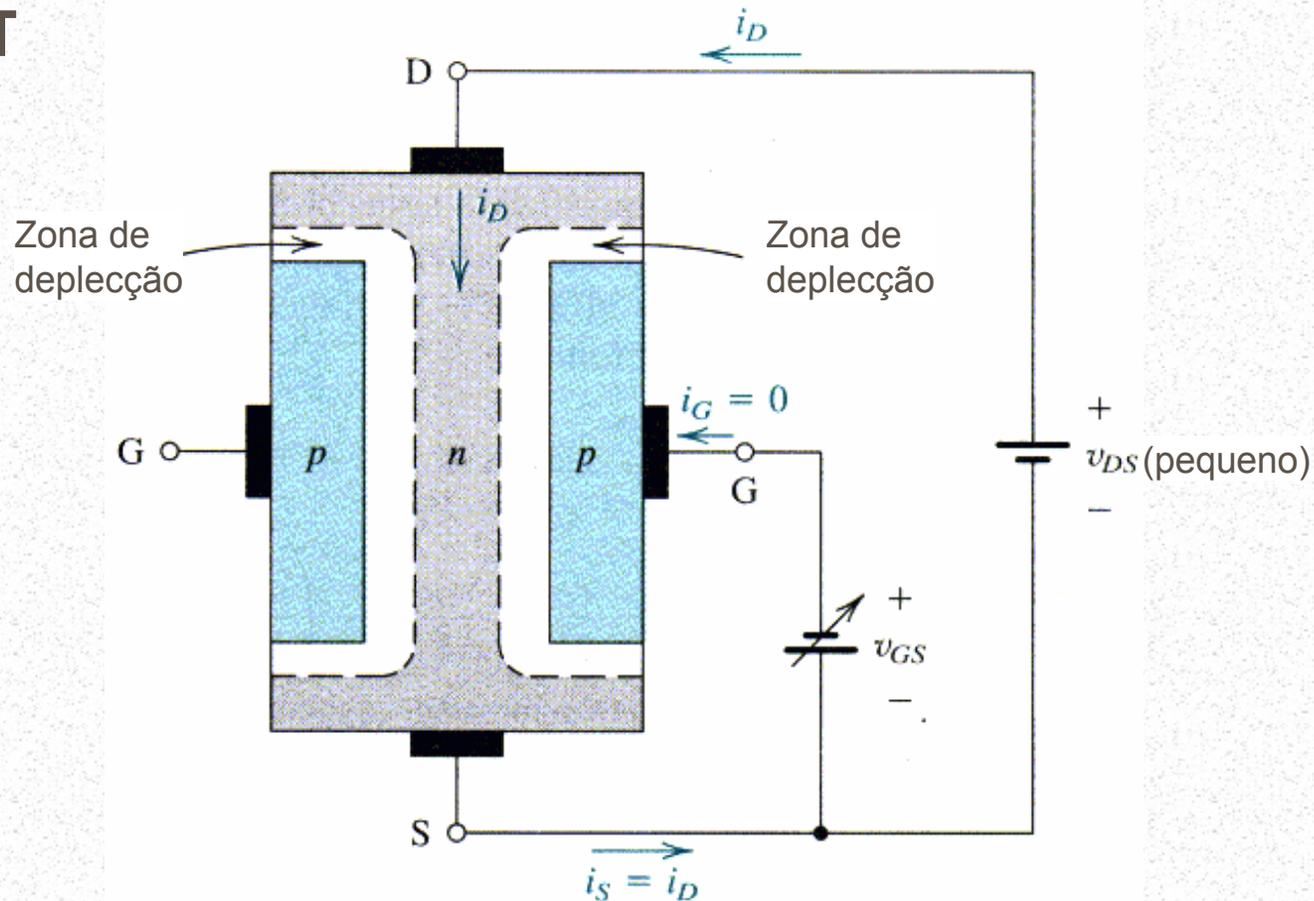
- O JFET (Junction Field-Effect Transistor)
  - Dispositivo controlado por tensão
  - Corrente de entrada desprezável (da ordem do pA ou inferior)
  - Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico

## ■ O JFET



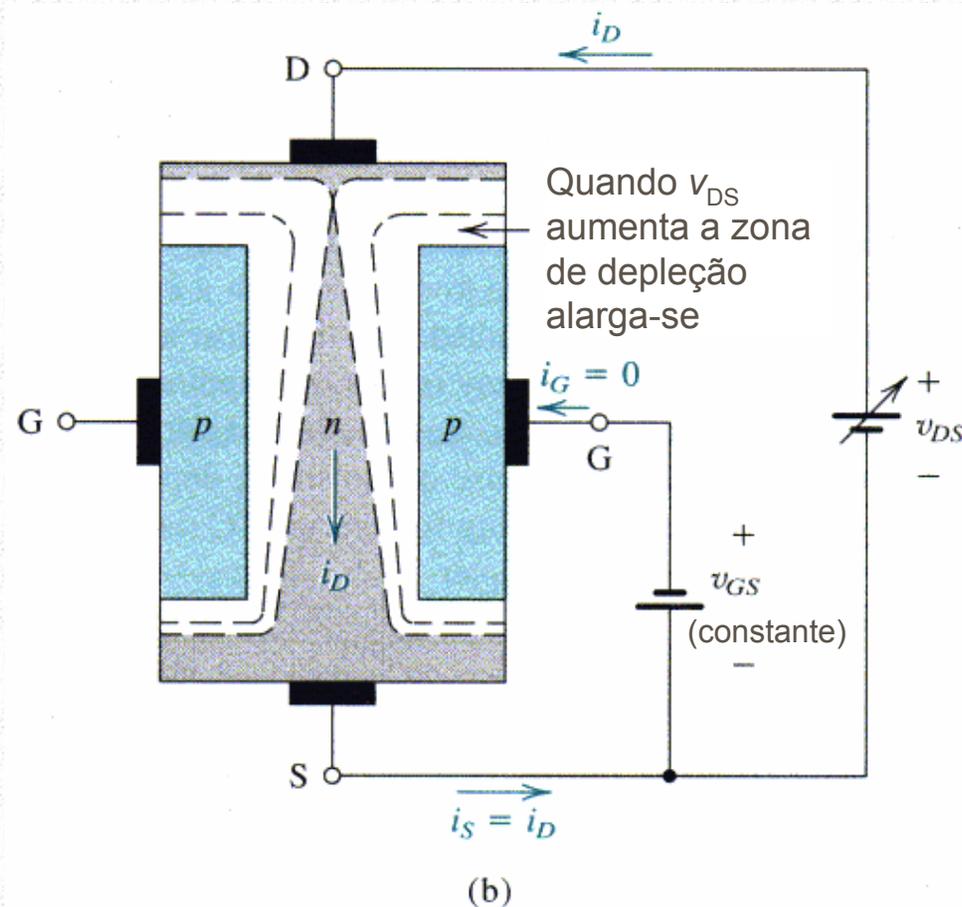
JFET canal-n: (a) Estrutura básica (b) símbolo para o JFET canal-n;  
símbolo para o JFET canal-p

## ■ O JFET



Princípio de funcionamento do JFET canal- $n$ : (a) pequenos valores de  $v_{DS}$

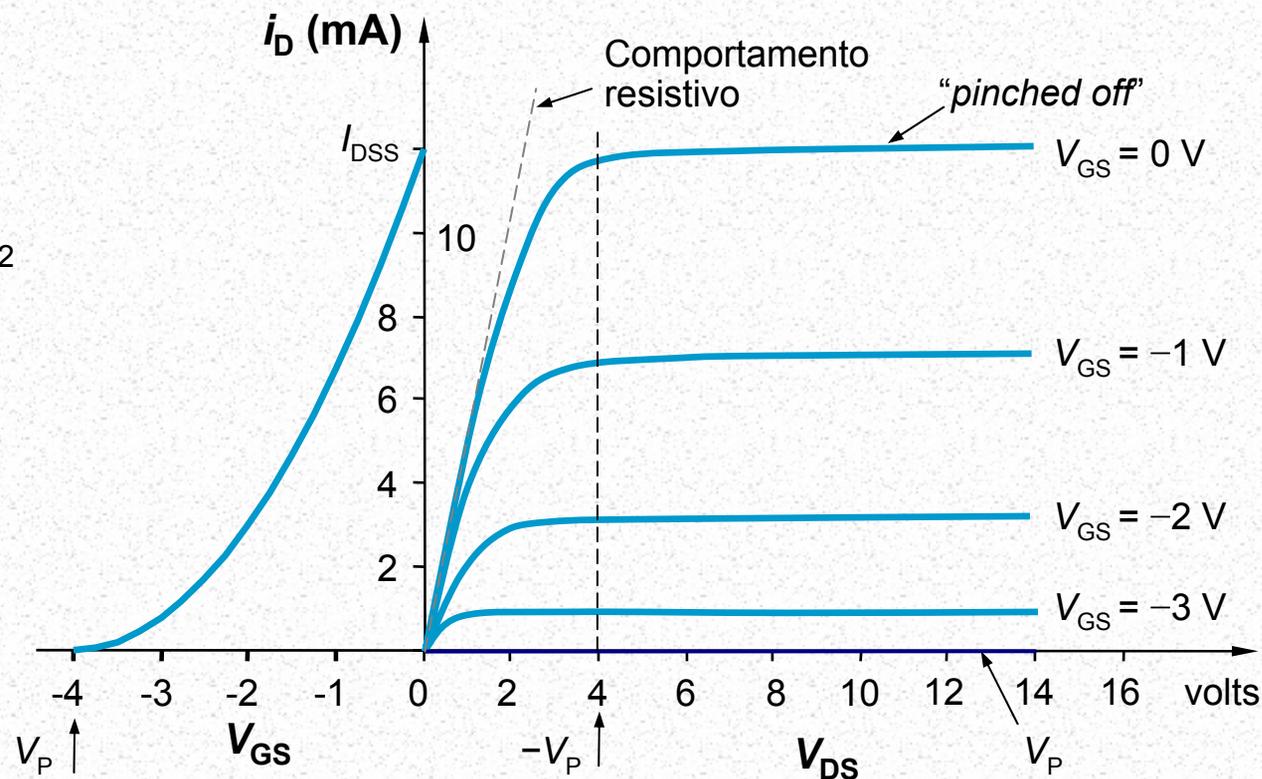
## ■ O JFET



Princípio de funcionamento do JFET canal- $n$ : (b) valores crescentes de  $v_{DS}$

## ■ O JFET

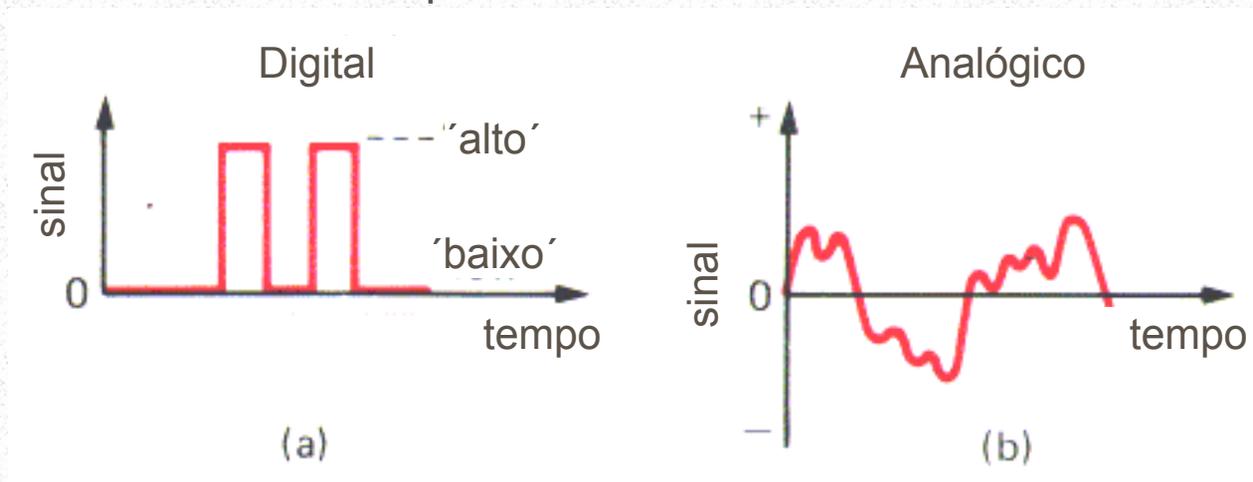
$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$



Características de saída de um JFET canal-n

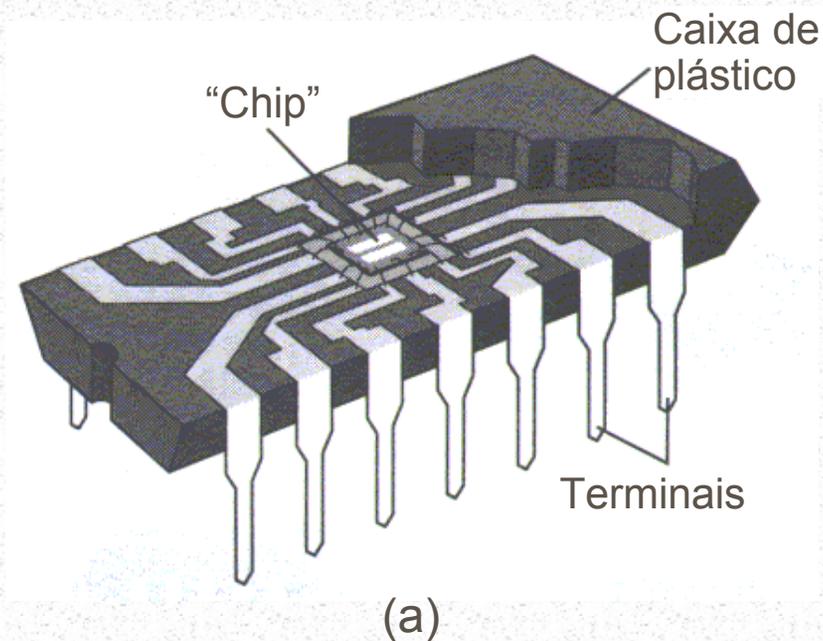
## ■ Circuitos integrados (CI's)

- Miniatura de circuito electrónico “densamente povoado” ...
- CI's analógicos
  - Incluem transístores que funcionam como amplificadores lineares
- CI's digitais
  - Incluem transístores que funcionam como comutadores

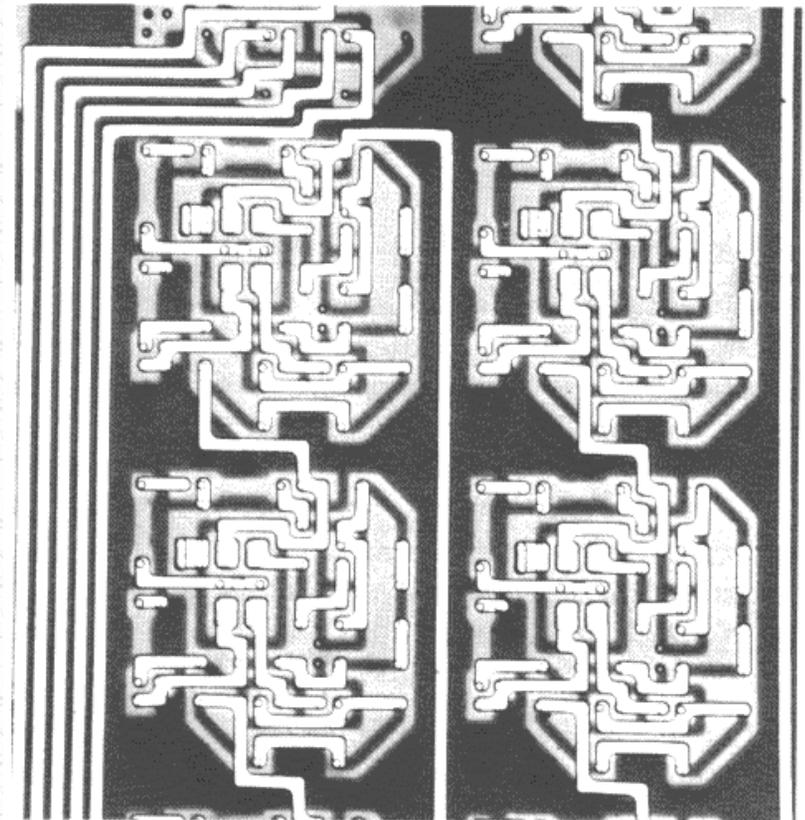


(a) Sinal digital; (b) sinal analógico

## ■ Circuitos integrados

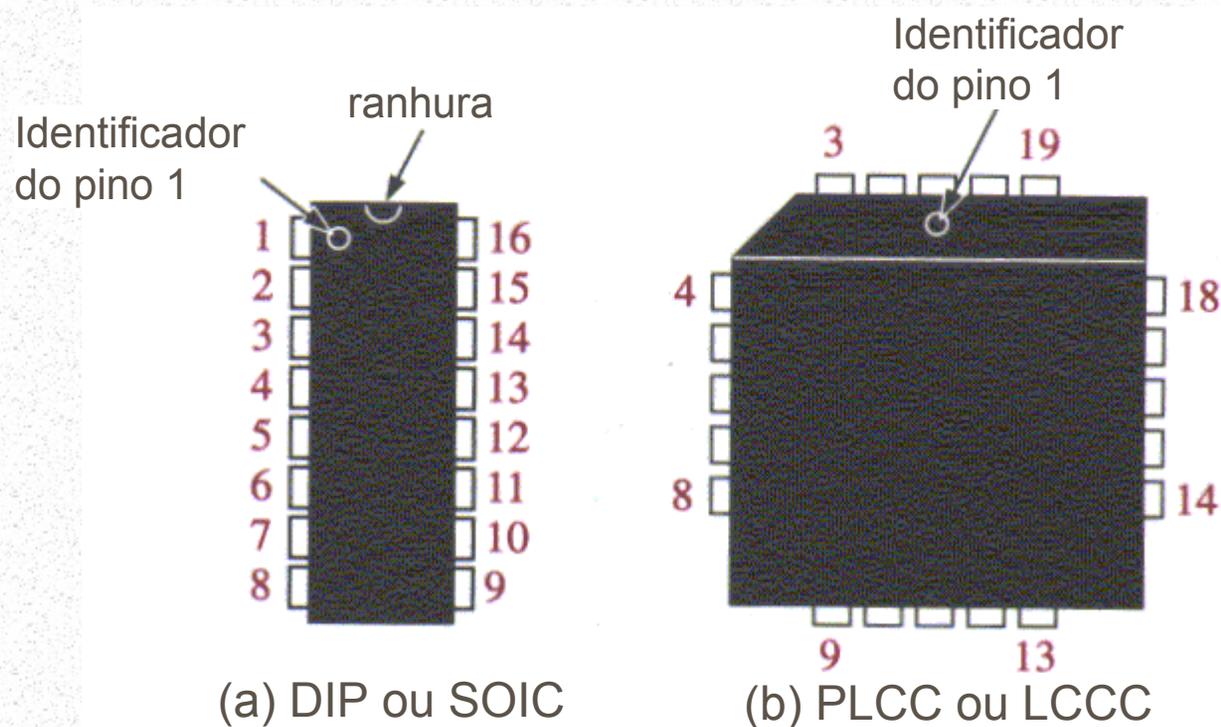


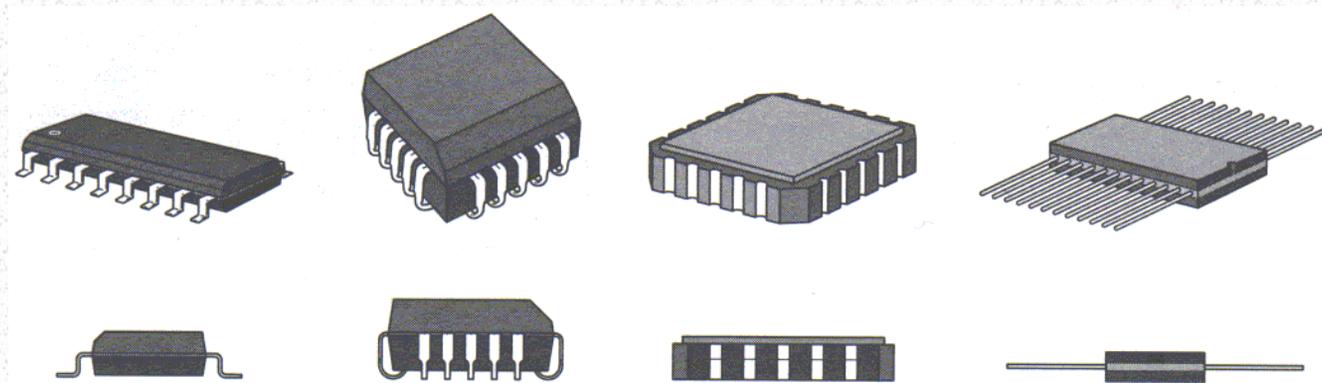
Circuito integrado: (a) caixa;  
(b) vista microscópica do "chip"



(b)

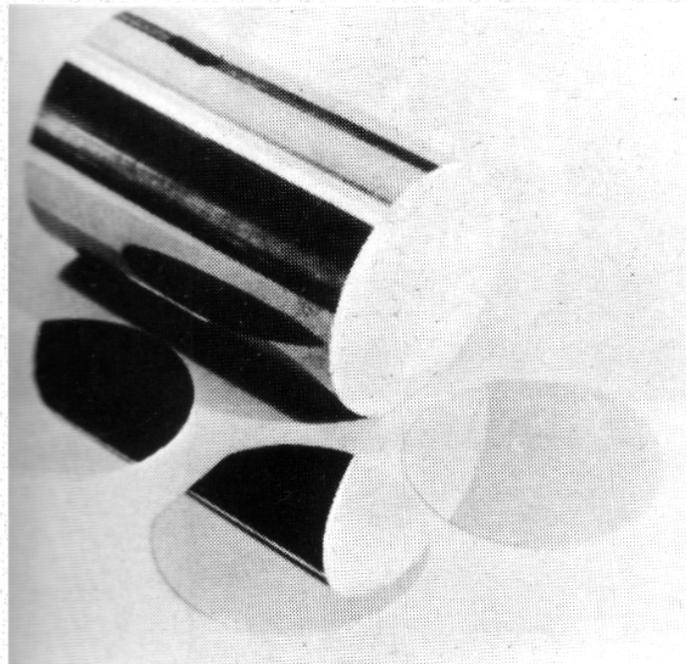
## ■ Circuitos integrados





| Nível de Integração | Abreviatura | Nº de Transístores |
|---------------------|-------------|--------------------|
| Pequeno             | SSI         | 5 a 50             |
| Médio               | MSI         | 50 a 500           |
| Grande              | LSI         | 500 a 5000         |
| Muito grande        | VLSI        | 5000 a 50000       |
|                     | SLSI        | > 50000            |

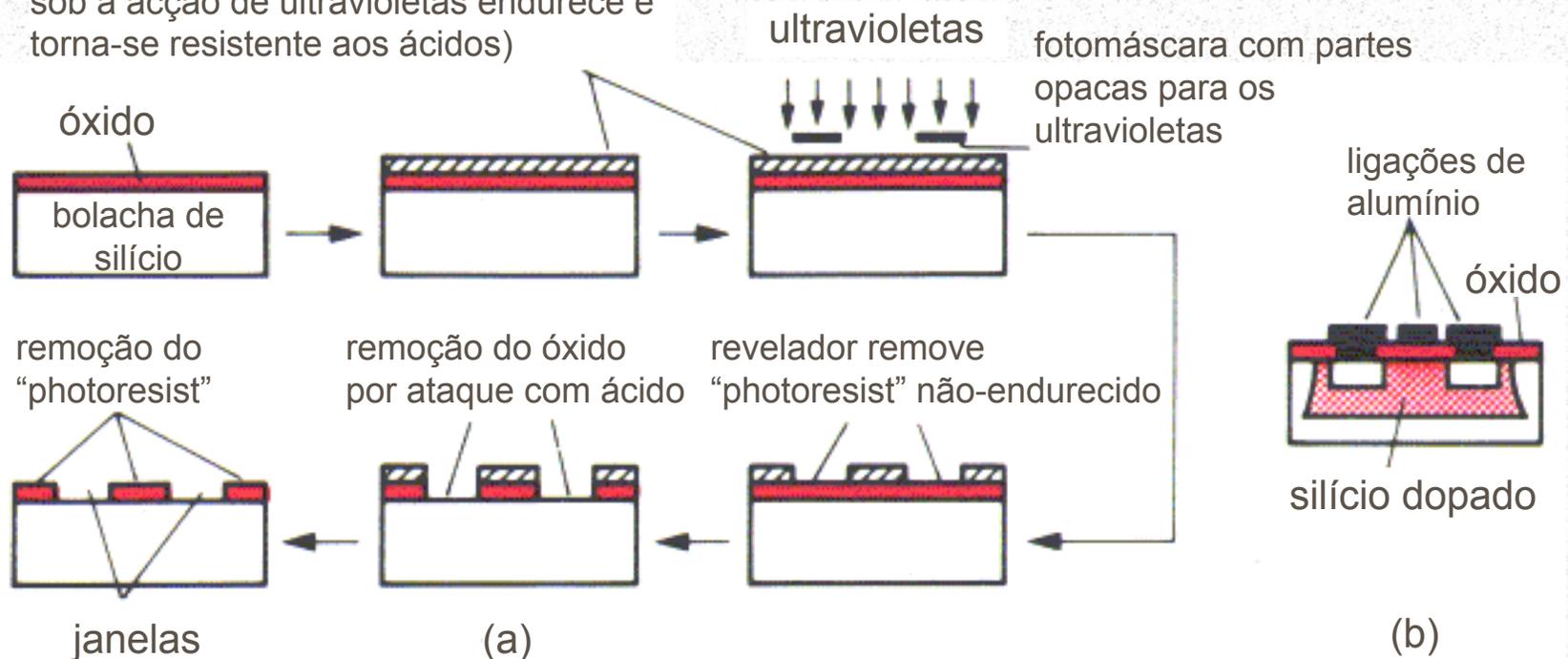
## ■ Circuitos integrados – fabrico



Barra cilíndrica de silício purificado (comprimento tip. 1 m x 10 cm)  
e “bolachas” (espessura tip. 0.25 a 0.5 mm)

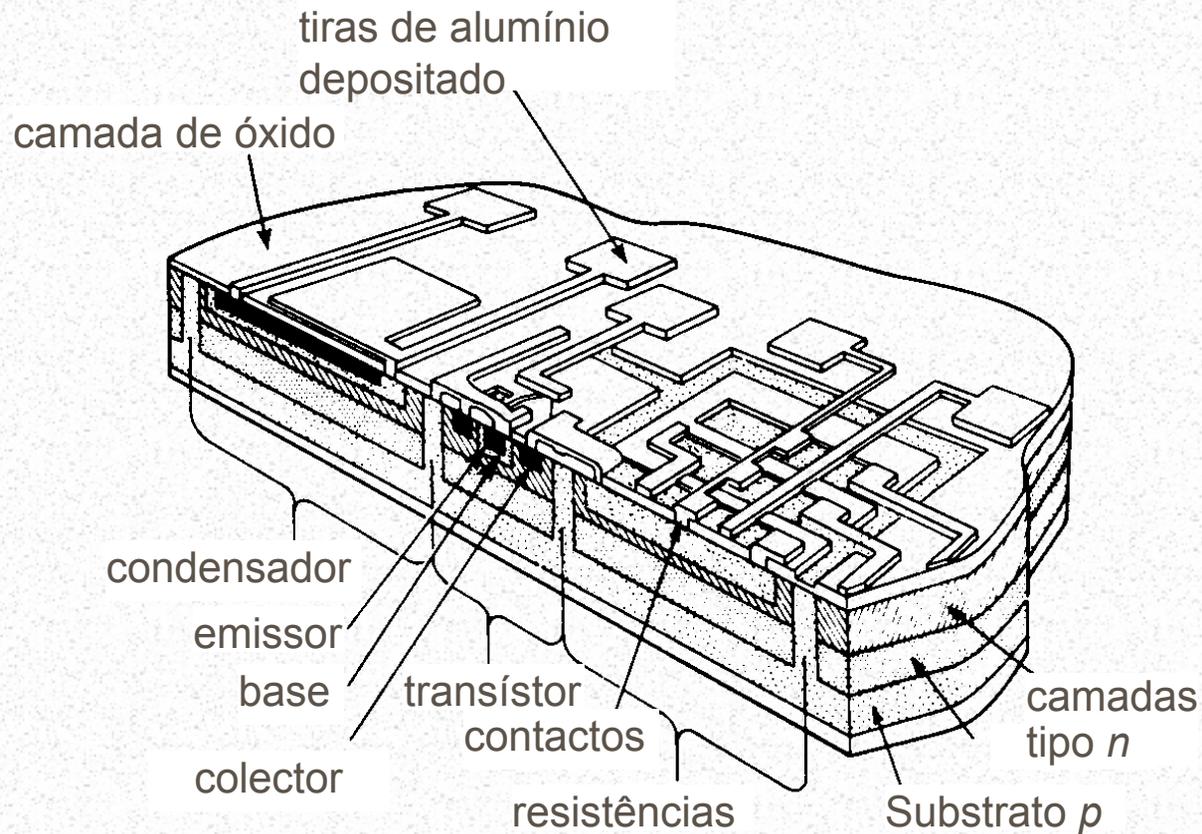
## ■ Circuitos integrados – fabrico

“photoresist” (um plástico líquido que sob a acção de ultravioletas endurece e torna-se resistente aos ácidos)

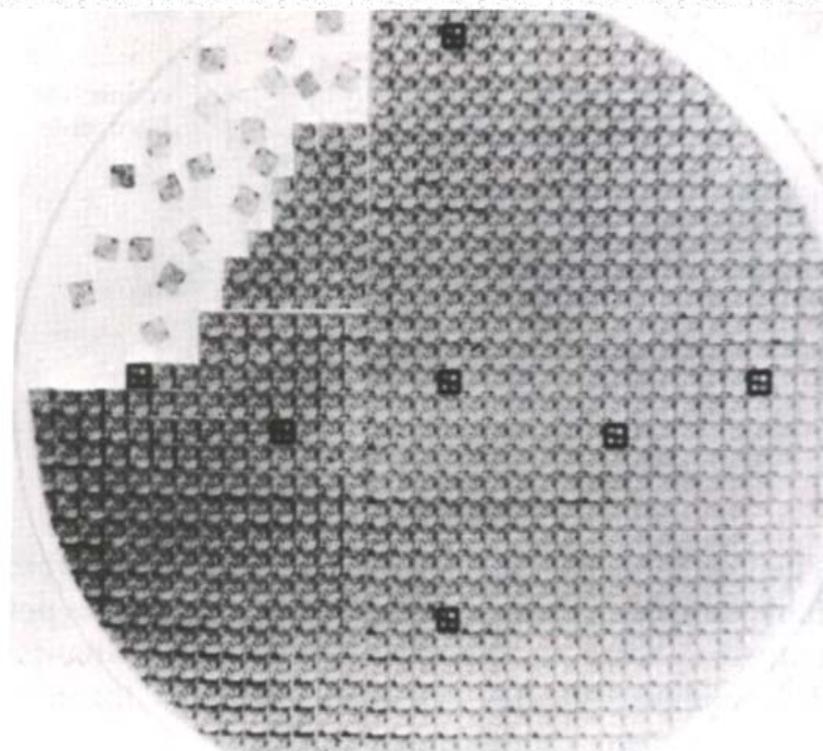
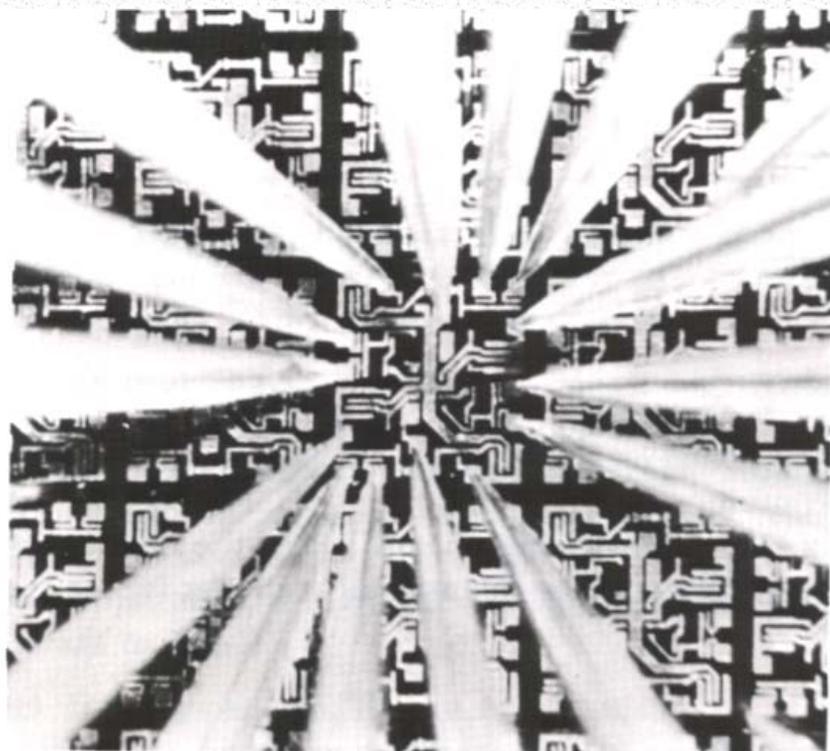


(a) Diferentes fases de fabrico de um CI; (b) interligação dos vários componentes por deposição de tiras de alumínio

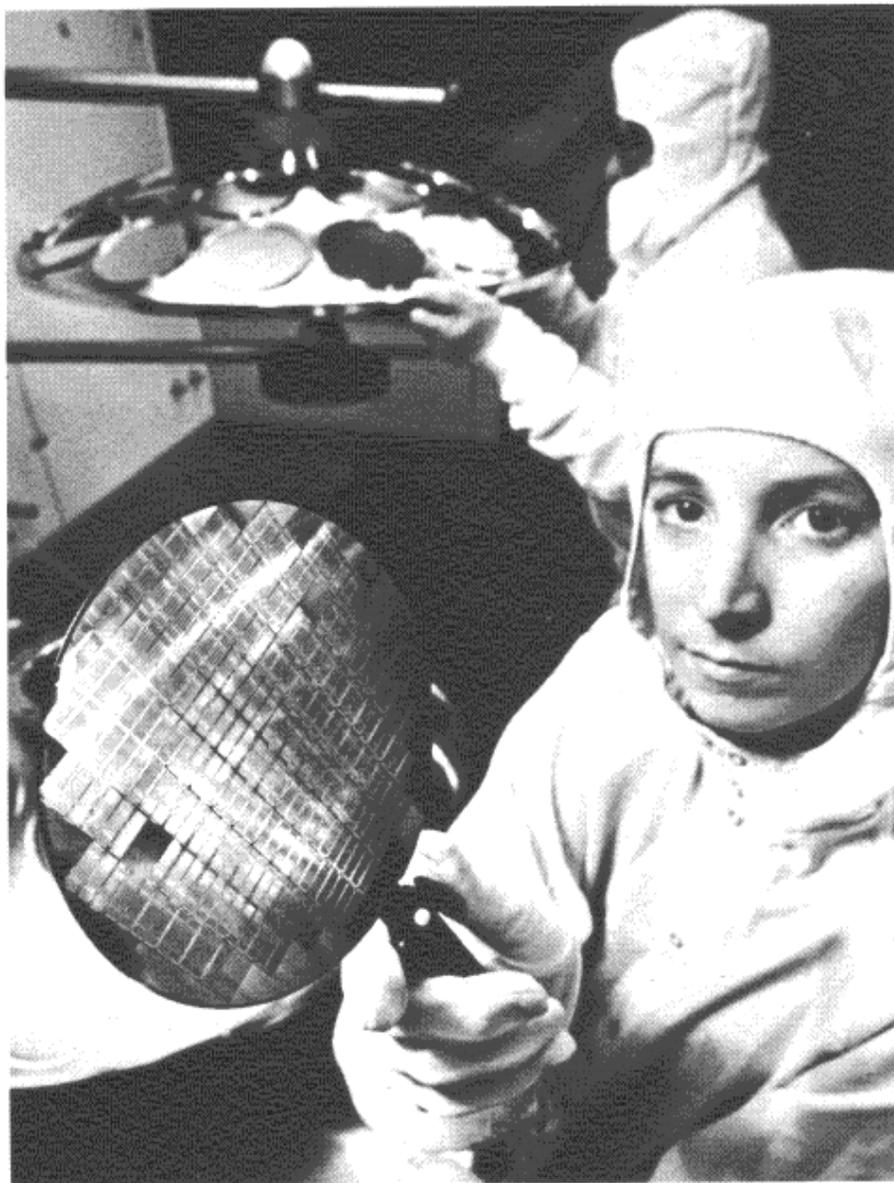
## ■ Circuitos integrados – fabrico



## ■ Circuitos integrados – teste



Teste de circuitos integrados





# Componentes Básicos



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Circuitos integrados – vantagens

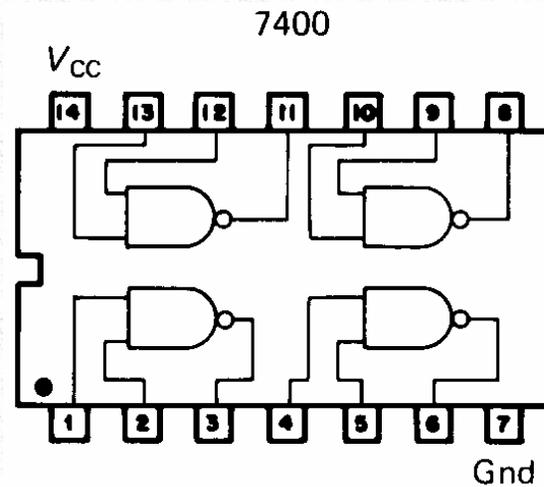
- Maior fiabilidade
- Permitem baixar custos
- Simplificam da construção de circuitos
- Permitem soluções compactas

## ■ Desvantagens

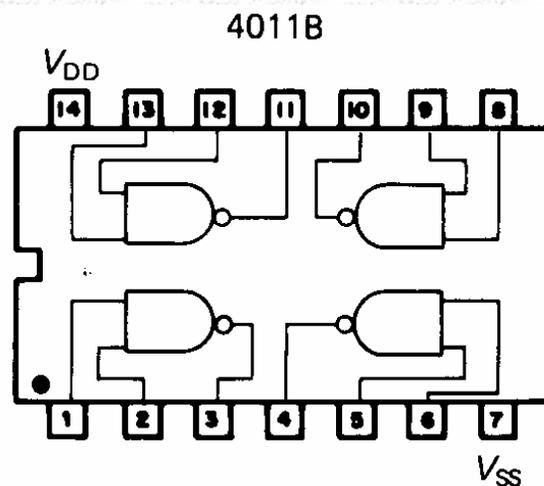
- Falta de versatilidade
- Não existem para potências elevadas

## ■ Famílias lógicas

- TTL
- CMOS
- ...



TTL ( $V_{CC} = +5\text{ V}$ ,  
 $Gnd = 0\text{ V}$ )



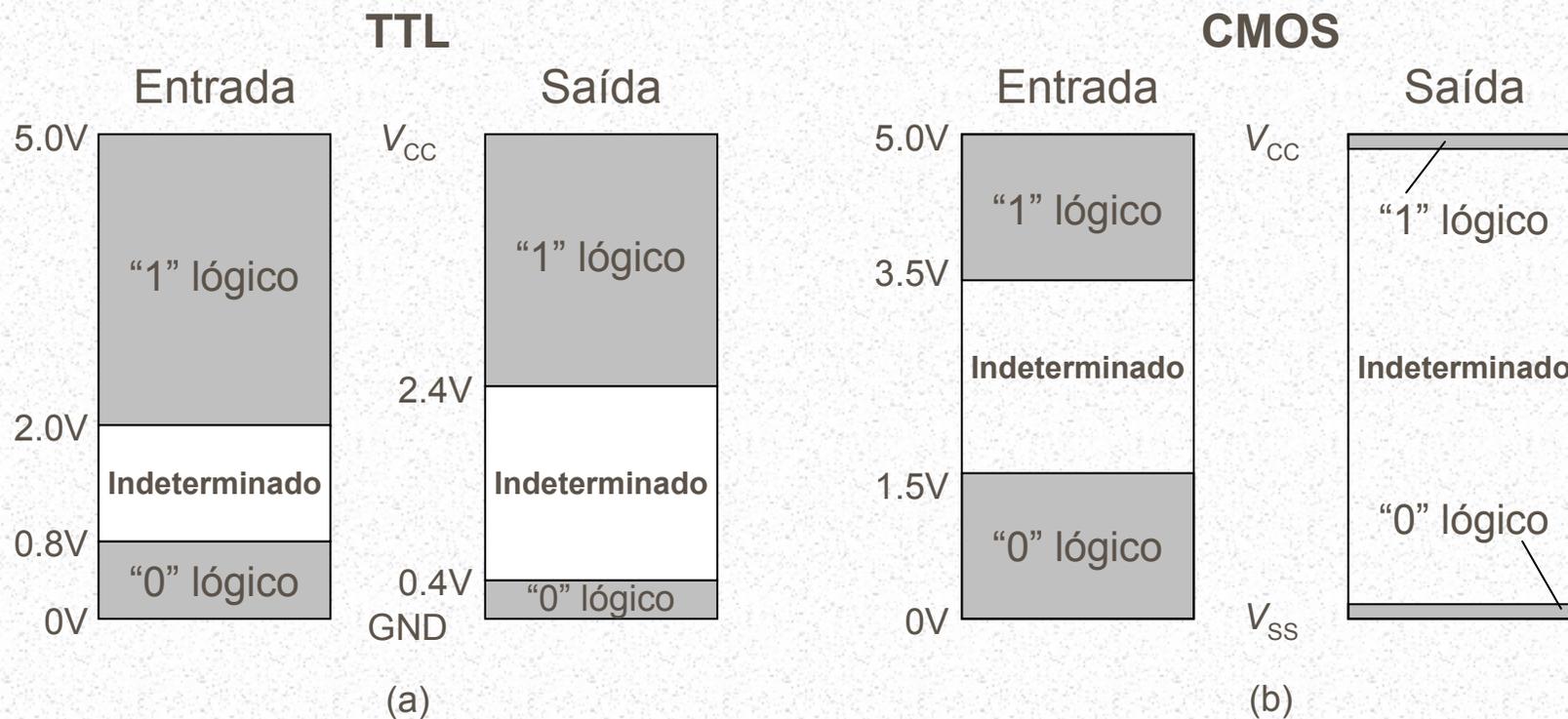
CMOS ( $V_{DD} = +3\text{ to }15\text{ V}$ ,  
 $V_{SS} = 0\text{ V}$ )

## ■ Famílias lógicas

| Propriedades            | TTL                 | CMOS             |
|-------------------------|---------------------|------------------|
| Fonte de Alimentação    | $5V \pm 0.25V$ c.c. | de 3V a 15V c.c. |
| Corrente requerida      | Miliampéres         | Microampéres     |
| Impedância de entrada   | Baixa               | Muito elevada    |
| Velocidade de comutação | Elevada             | Mais Baixa       |
| " <i>Fan-out</i> "      | Dez                 | Cinquenta        |

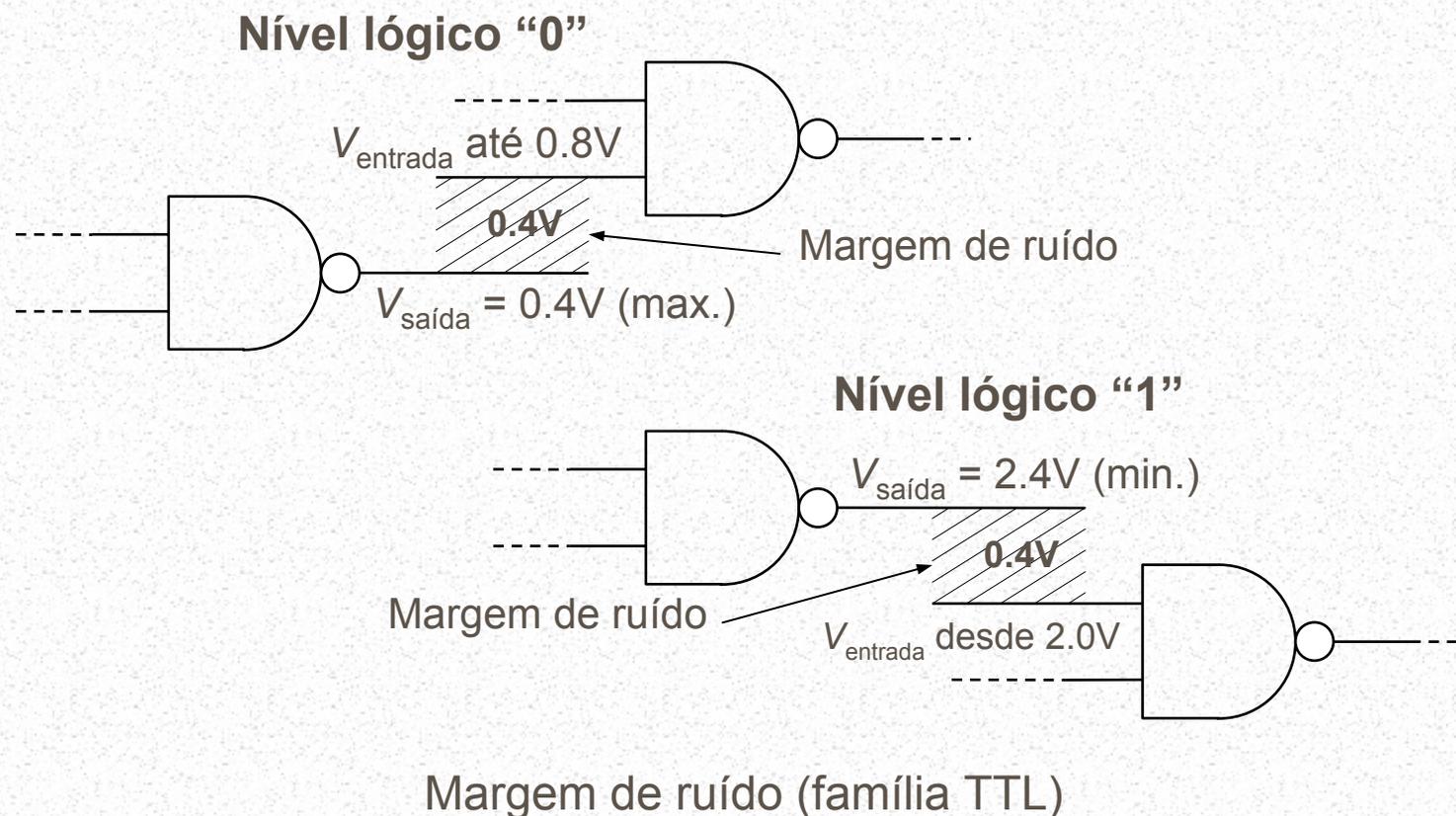
Famílias TTL e CMOS: principais características

## ■ Famílias lógicas

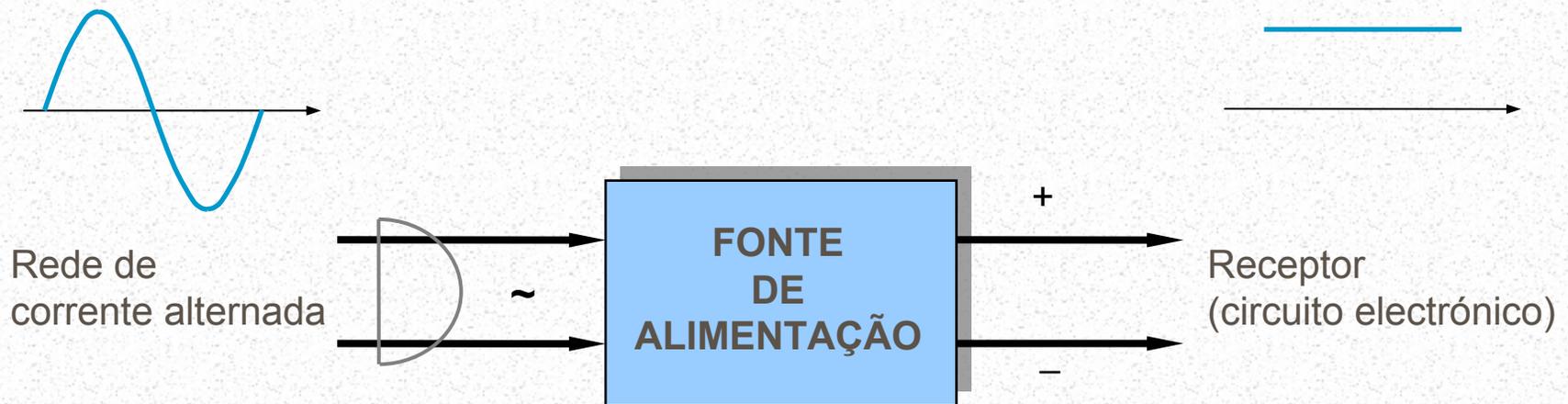


Níveis lógicos e interface: (a) TTL; (b) CMOS

## ■ Famílias lógicas



# Fontes de Alimentação



Fonte de alimentação de corrente contínua

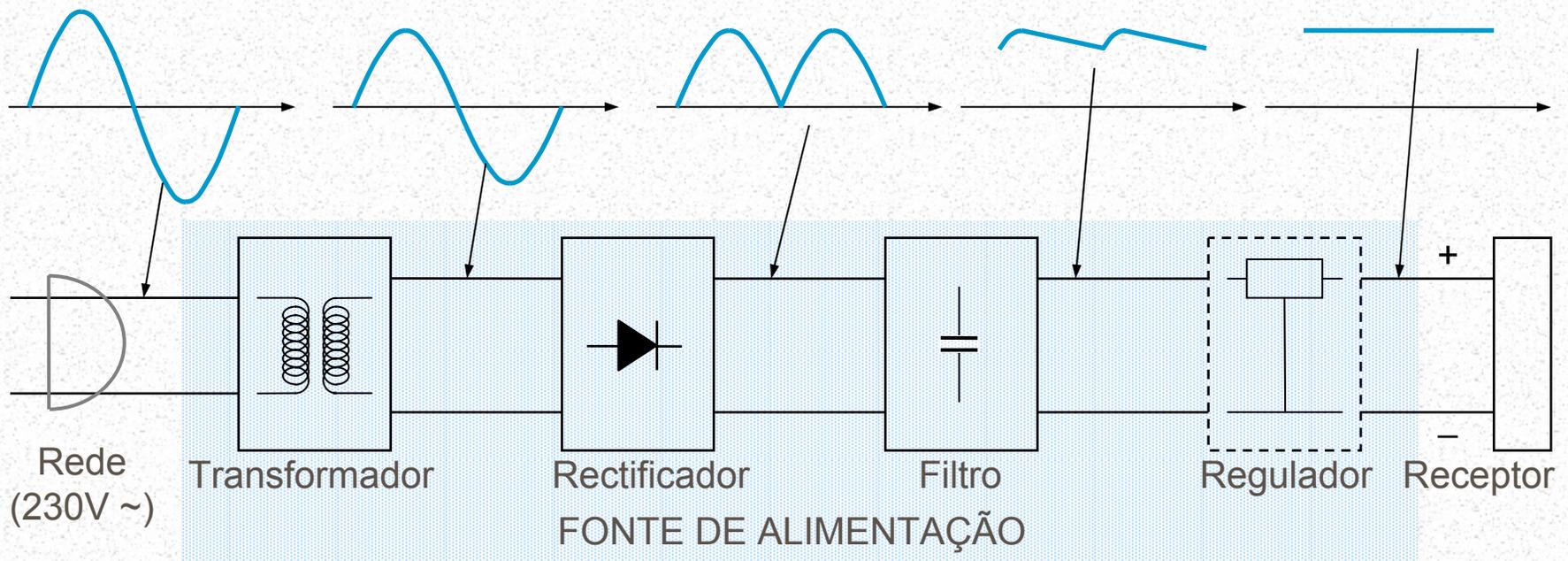
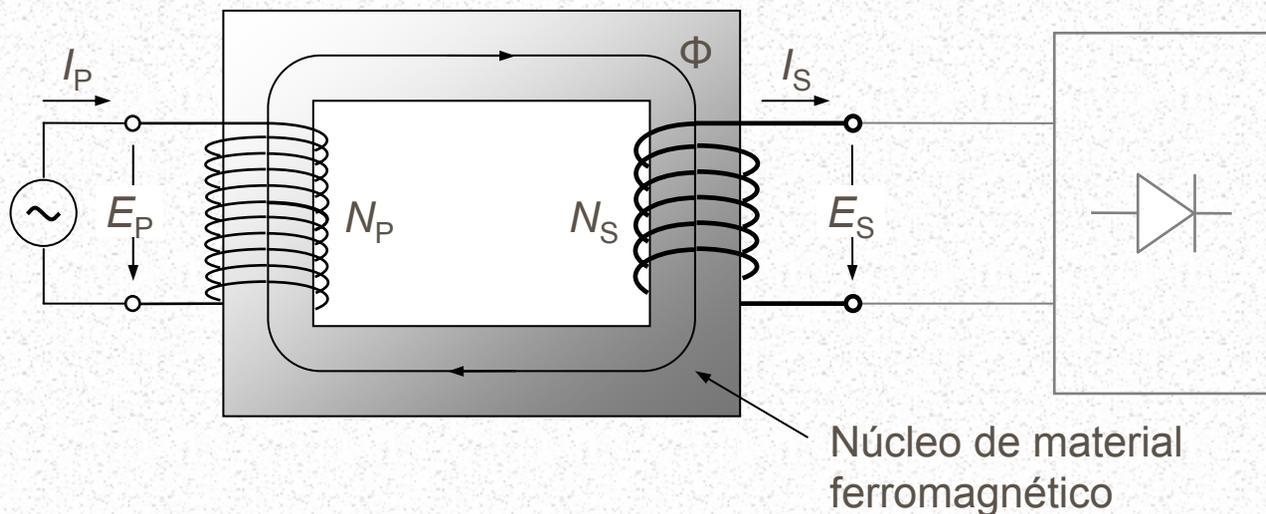


Diagrama de blocos duma fonte de alimentação de corrente contínua

## ■ Transformador



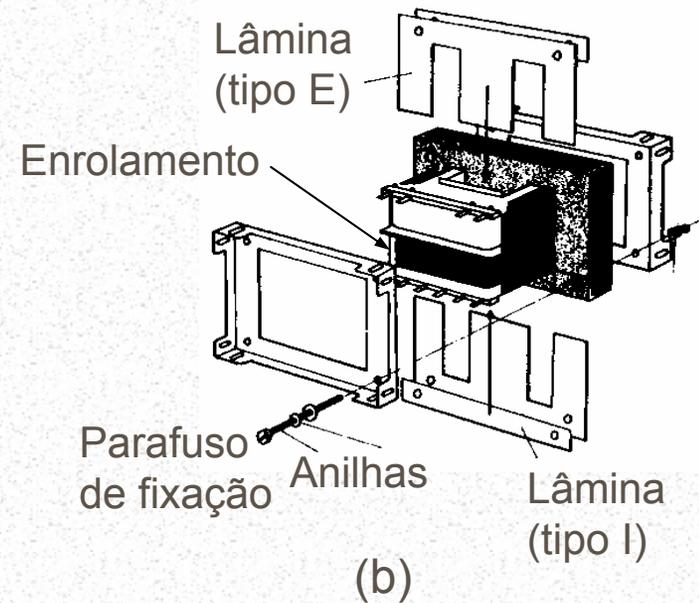
$$E_P = N_P \frac{d\Phi}{dt}, \quad E_S = N_S \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

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

## ■ Transformador

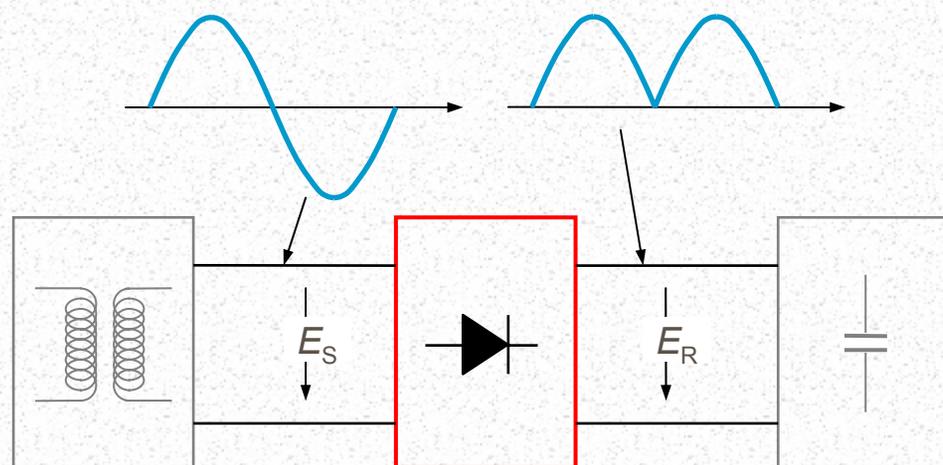


(a)

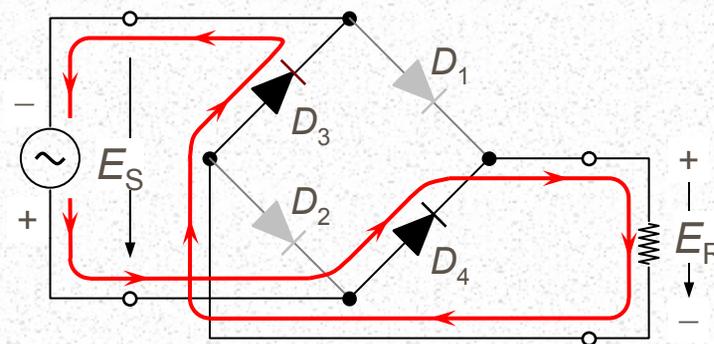
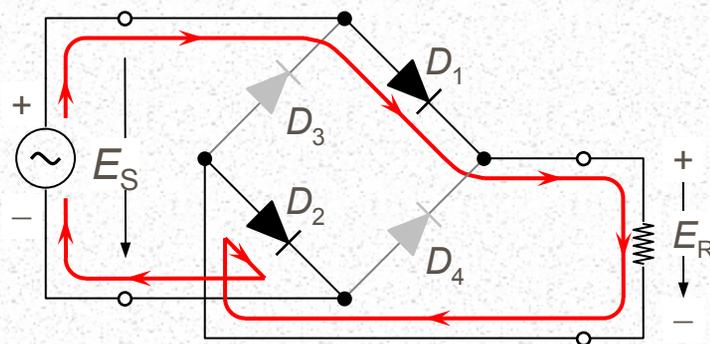
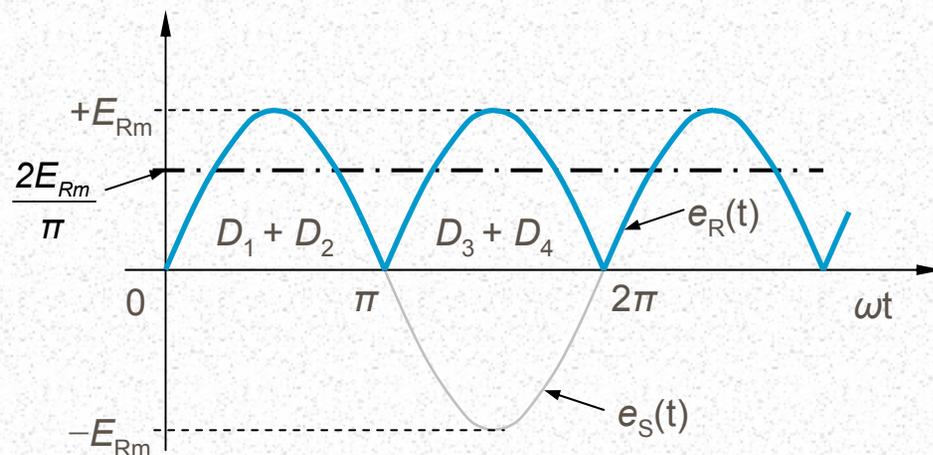
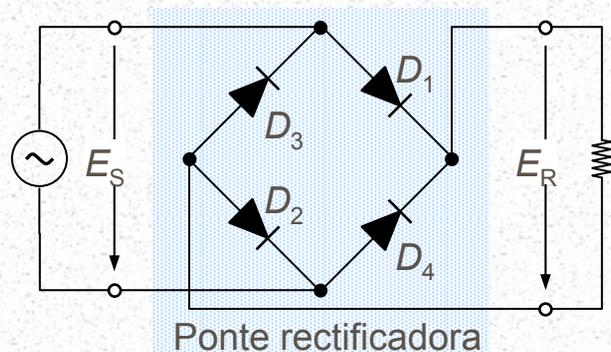


Transformador para fonte de alimentação:  
(a) aspecto exterior; (b) construção

## ■ Rectificador

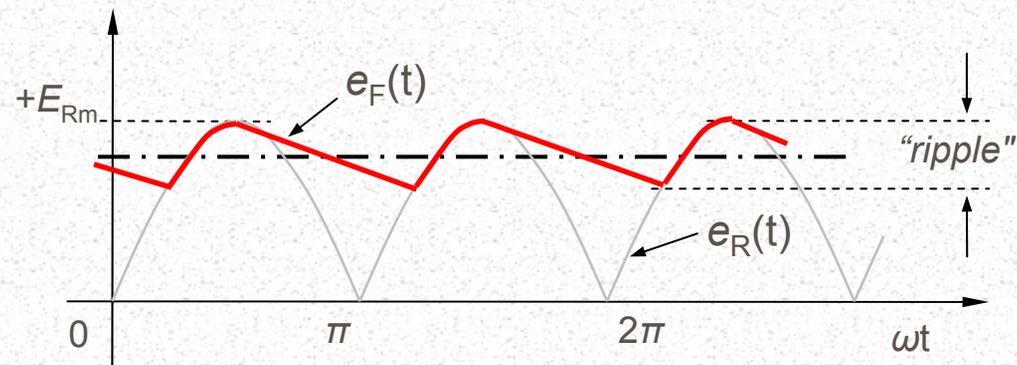
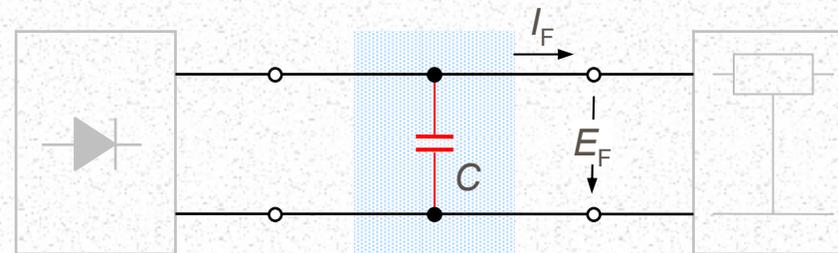


## ■ Rectificador



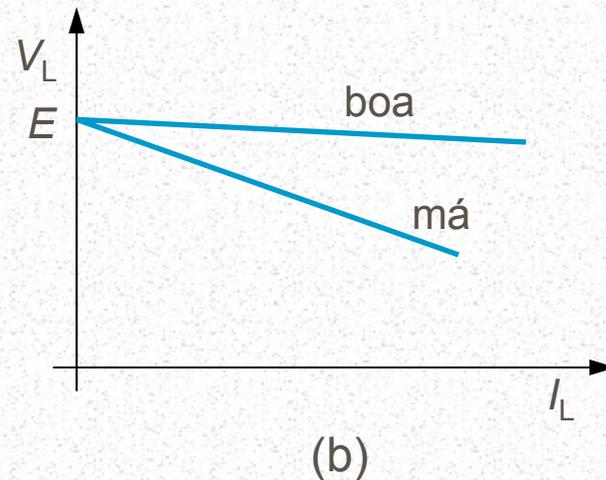
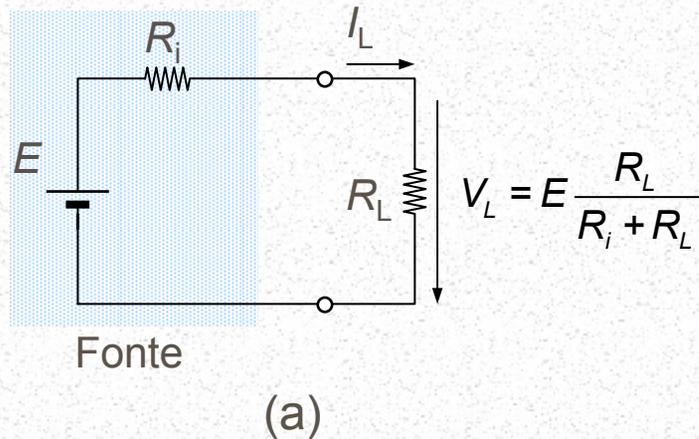
Funcionamento da ponte rectificadora

## ■ Filtro



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

## ■ Regulador



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

## Regulador

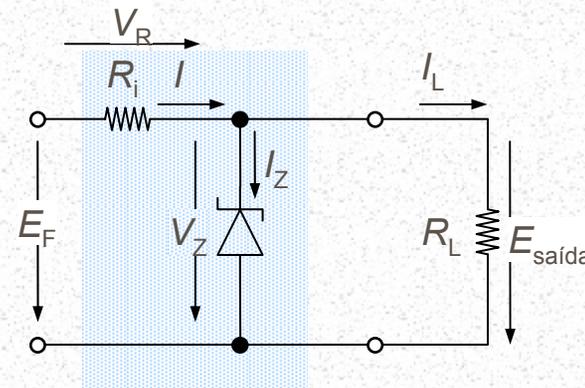
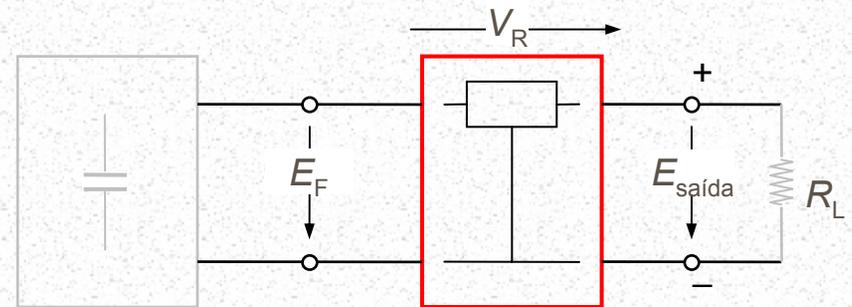
$$E_F = V_R + E_{saída}$$

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

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

para  $I_Z > 0$

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



## Regulador

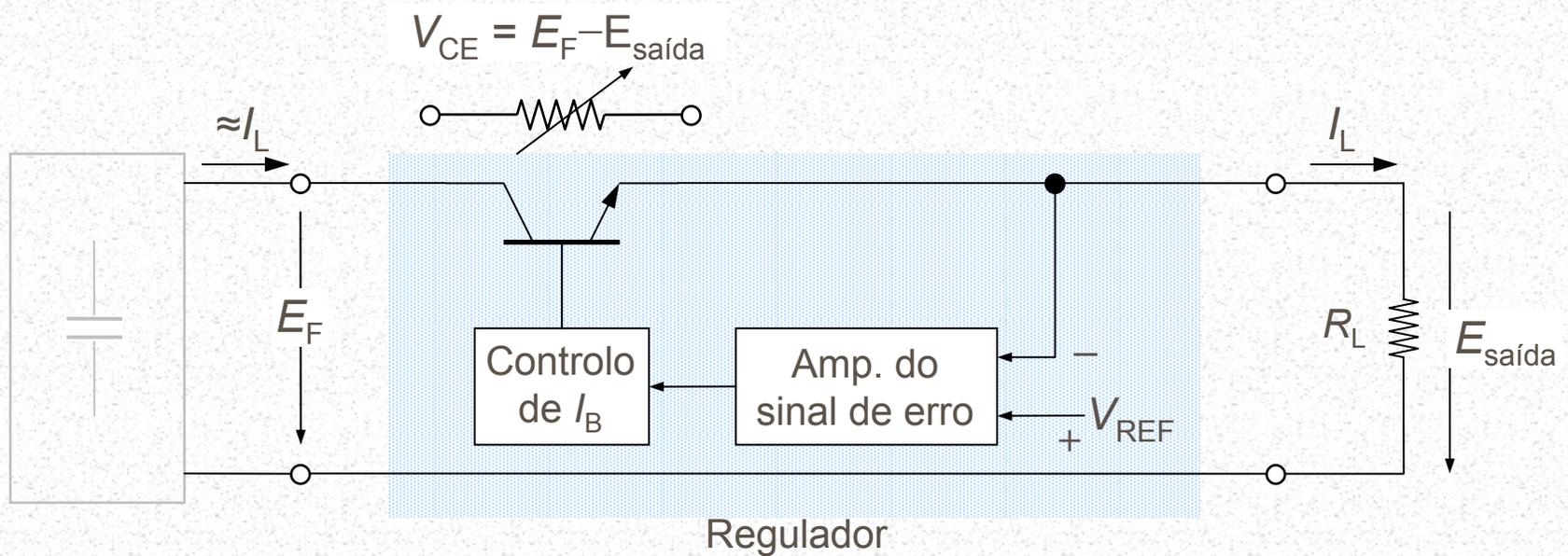


Diagrama de blocos dum regulador de tensão linear

## ■ Especificações

### ■ Rendimento

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

### ■ "Ripple"

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

### ■ Rejeição do "ripple" (bloco regulador)

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

## ■ Especificações

### ■ Regulação na carga

$$\text{Regulação na carga} = \frac{E_0 - E_n}{E_n} \times 100\%$$

### ■ Impedância de saída

$$\text{Impedância de saída} = \frac{E_0 - E_n}{I_n} \quad (\Omega)$$

## ■ Especificações

### ■ Regulação na entrada

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

## ■ 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)

## ■ Exemplo

a)

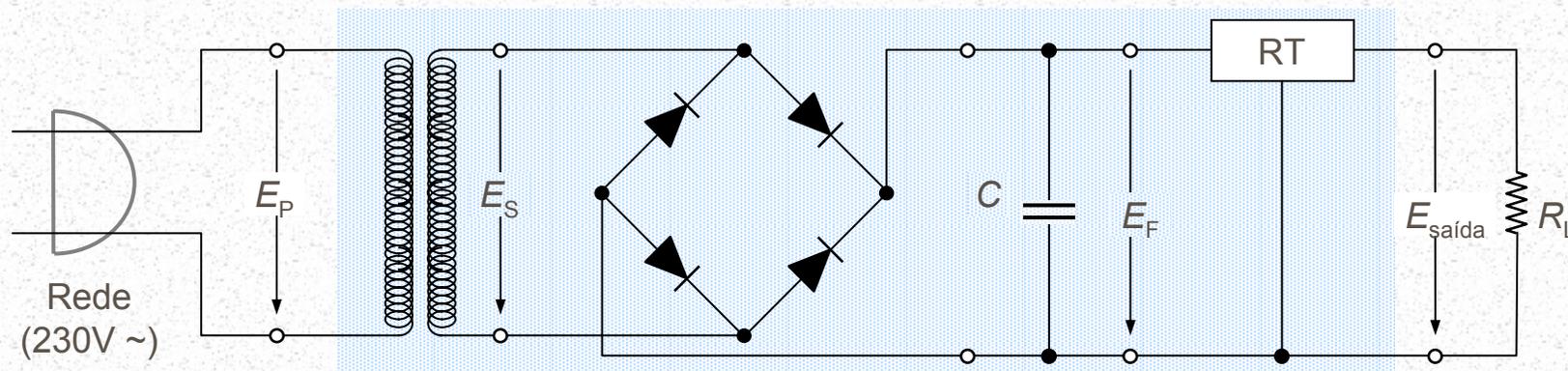
$$E_n = 12V - (0.1\Omega)(2A) = 11.8V$$

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

b)

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

## ■ 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%



# Fontes de Alimentação



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Exemplo

A tensão na rede é 230V/50Hz, a razão de transformador é  $a = 20$ , e capacidade do condensador do filtro é  $C = 3300\mu\text{F}$ . Uma vez ligada a fonte à receptor, mediu-se aos seus terminais uma tensão de 4.95V para uma corrente de 1A.

Determinar: a) a 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 díodos.

## ■ 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,

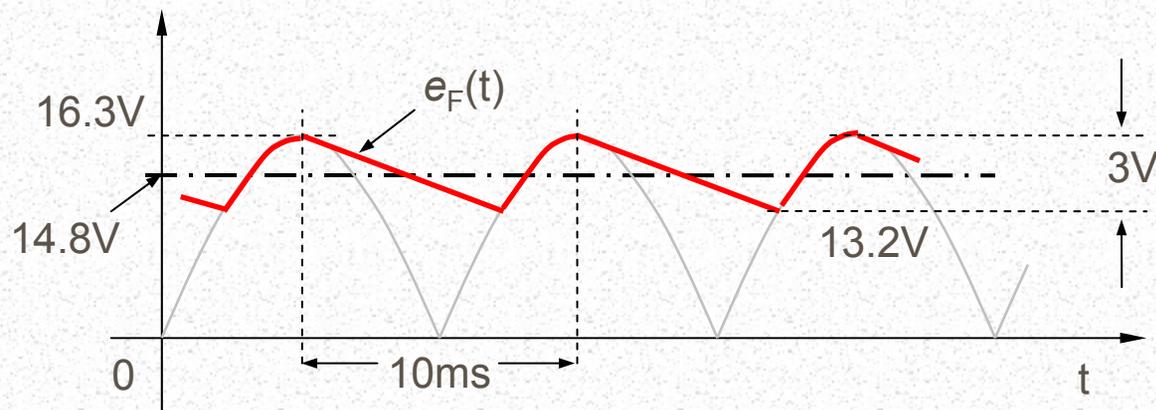
$$E_{Fr,p-p} = \frac{I_F}{C} \Delta t = \frac{1 \text{ A}}{3300 \mu\text{F}} \times 10 \text{ ms} = 3.0 \text{ V}_{p-p}$$

## ■ Exemplo

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

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

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



## ■ Exemplo

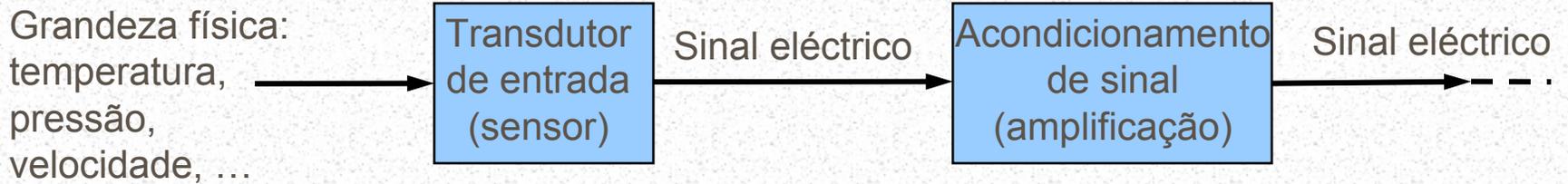
d) admitindo que, quer o transformador, quer o rectificador, não têm perdas, apenas o regulador dissipa potência. O valor médio das perdas neste bloco é,

$$P_{perdas} = V_{CE} \times I_L = (E_{F_{m\u00e9dio}} - E_{sa\u00edda}) I_L \approx (14.8 \text{ V} - 5 \text{ V}) \times 1 \text{ A} = 9.8 \text{ W}$$

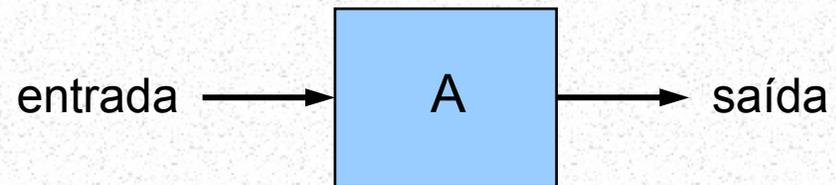
Logo o rendimento da fonte é ,

$$\text{rendimento} = \frac{\text{Pot\u00eancia de sa\u00edda (CC)}}{\text{Pot\u00eancia de entrada (CA)}} = \frac{P_{sa\u00edda}}{P_{sa\u00edda} + P_{perdas}} = \frac{5 \text{ W}}{5 \text{ W} + 9.8 \text{ W}} = 33.8\%$$

## ■ Introdução



$$saída = A \times entrada$$

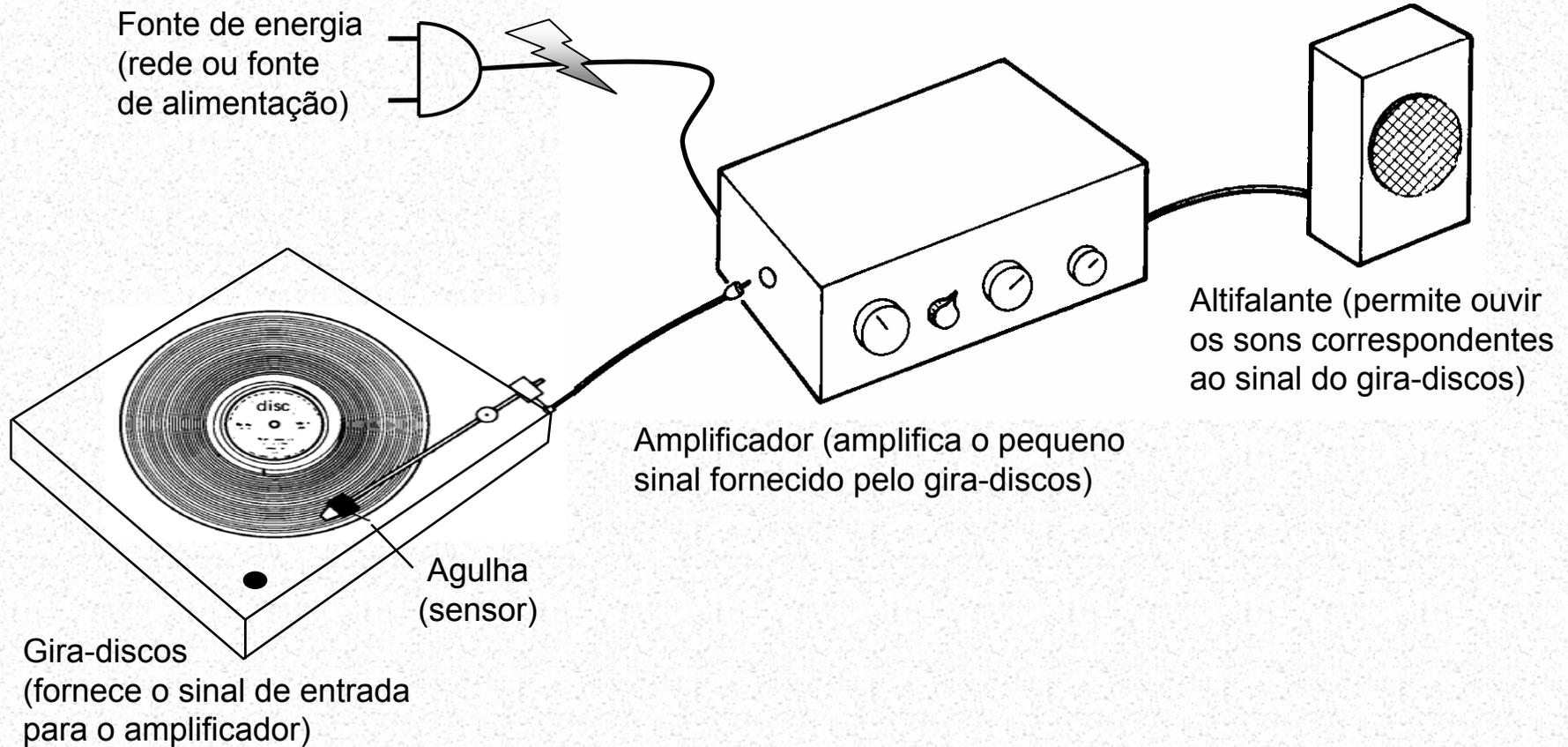


... O amplificador é um dispositivo que controla (ou modela) o fluxo de potência duma fonte de energia para a carga, de acordo com um sinal de controlo, cujo nível de energia é normalmente muito pequeno (por vezes é desprezável) ...

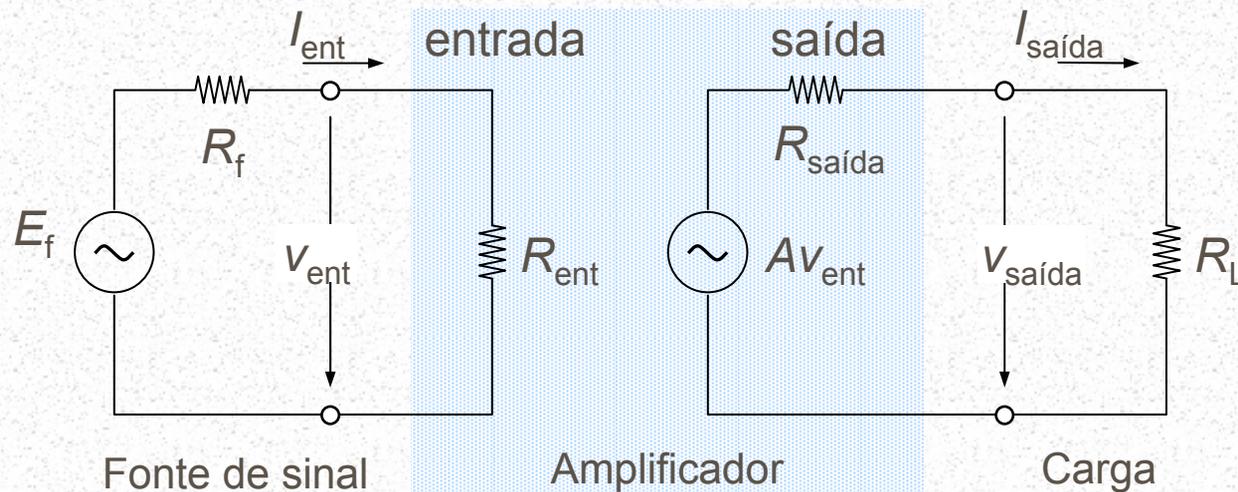


Fluxo de potência num amplificador

# Amplificadores



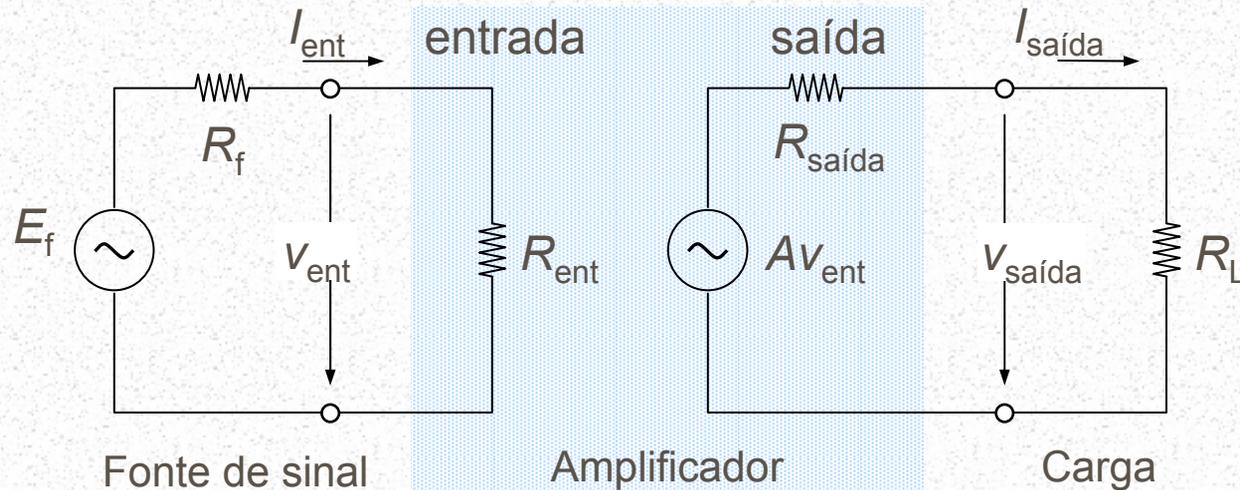
## ■ Circuito equivalente (amplificador de tensão)



$$R_{ent} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}} \rightarrow \text{“resistência” de entrada}$$

$$R_{saída} = \frac{A \cdot V_{ent} - V_{saída}}{I_{saída}} \rightarrow \text{“resistência de saída”}$$

## ■ Circuito equivalente (amplificador de tensão)



$$A_V = \frac{V_{saída}}{V_{ent}} \rightarrow \text{Ganho em tensão}$$

$$V_{saída} = A \cdot V_{ent} \frac{R_L}{R_{saída} + R_L} \rightarrow A_V = A \frac{R_L}{R_{saída} + R_L}$$

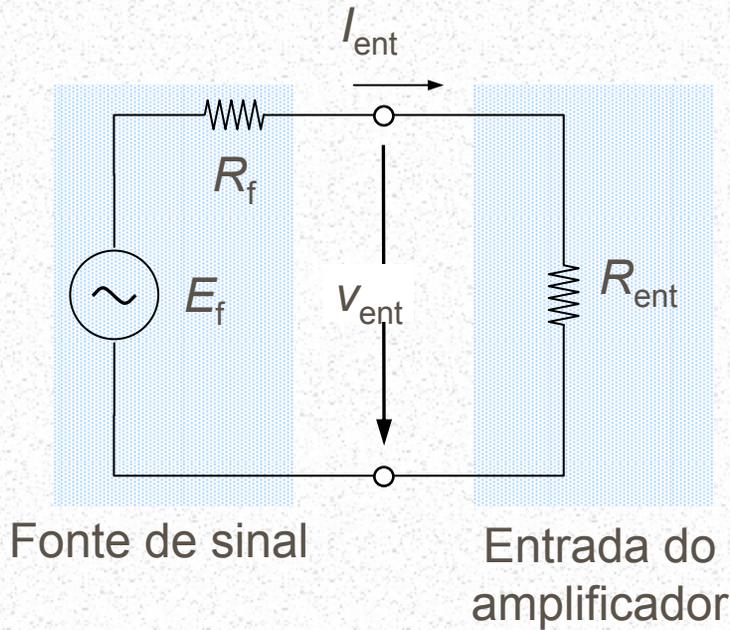
$$A_I = \frac{I_{saída}}{I_{ent}} \rightarrow \text{Ganho em corrente} \quad I_{saída} = \frac{A \cdot V_{ent}}{R_{saída} + R_L} \quad I_{ent} = \frac{V_{ent}}{R_{ent}}$$

$$\rightarrow A_I = A \frac{R_{ent}}{R_{saída} + R_L}$$

$$A_P = \frac{\text{potência disponível à saída do amplificador}}{\text{potência fornecida à entrada (de sinal) do amplificador}} \rightarrow \text{Ganho em potência}$$

$$\rightarrow A_P = \frac{V_{saída} I_{saída}}{V_{ent} I_{ent}} = A_V A_I$$

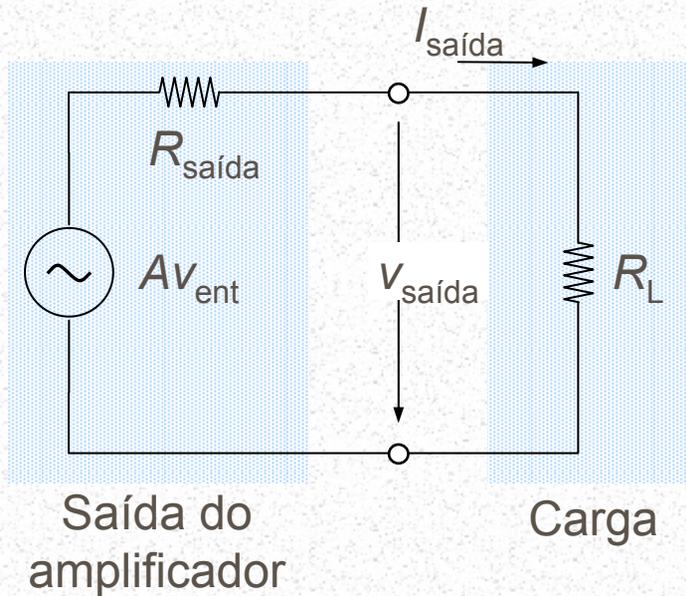
## Adaptação de impedâncias – entrada



$$V_{ent} = E_f \frac{R_{ent}}{R_f + R_{ent}}$$

$$\text{Para } R_{ent} \gg R_f, \rightarrow V_{ent} \approx E_f$$

## Adaptação de impedâncias – saída



$$P_L = \frac{V_{saída}^2}{R_L}$$

$$P_{Lmax} \Rightarrow R_L = R_{saída} \text{ (teorema da máxima transferência de potência)}$$

## Exemplo 4.8

Considere-se uma fonte de sinal, um amplificador e uma carga com as seguintes características:  $E_f = 15\text{mV}$ ,  $R_f = 500\Omega$ ,  $A = 100$ ,  $R_{ent} = 1000\Omega$ ,  $R_{saída} = 8\Omega$ ,  $R_L = 8\Omega$  (ver fig. 4.72). a) Calcular a tensão de saída,  $V_{saída}$ ; b) a potência fornecida à carga; c) a potência fornecida à carga se a impedância de entrada do amplificador fosse  $R_{ent} = 10\text{k}\Omega$ .

a) A tensão à entrada do amplificador é:

$$V_{ent} = E_f \frac{R_{ent}}{R_f + R_{ent}} = 15\text{mV} \frac{1000\Omega}{500\Omega + 1000\Omega} = 10\text{mV}$$

A tensão de saída do amplificador (em circuito aberto) é dada por,

$$A \cdot V_{ent} = 100 \times 10\text{mV} = 1\text{V}$$

e a tensão aos terminais da carga,

$$V_{saída} = A \cdot V_{ent} \frac{R_{saída}}{R_{saída} + R_L} = 1\text{V} \frac{8\Omega}{8\Omega + 8\Omega} = 0.5\text{V}$$

b) 
$$\text{Potência na carga} = \frac{V_{saída}^2}{R_L} = \frac{(0.5V)^2}{8\Omega} \approx 0.03W$$

c)

$$V_{ent} = 15mV \frac{10000\Omega}{500\Omega + 10000\Omega} = 14.3mV$$

$$V_{saída} = A \cdot V_{ent} \frac{R_{saída}}{R_{saída} + R_L} = 1.43V \frac{8\Omega}{8\Omega + 8\Omega} = 0.714V$$

$$\text{Potência na carga} = \frac{(0.714V)^2}{8\Omega} \approx 0.06W$$

## ■ Especificações

■ Impedância de entrada

■ Impedância de saída

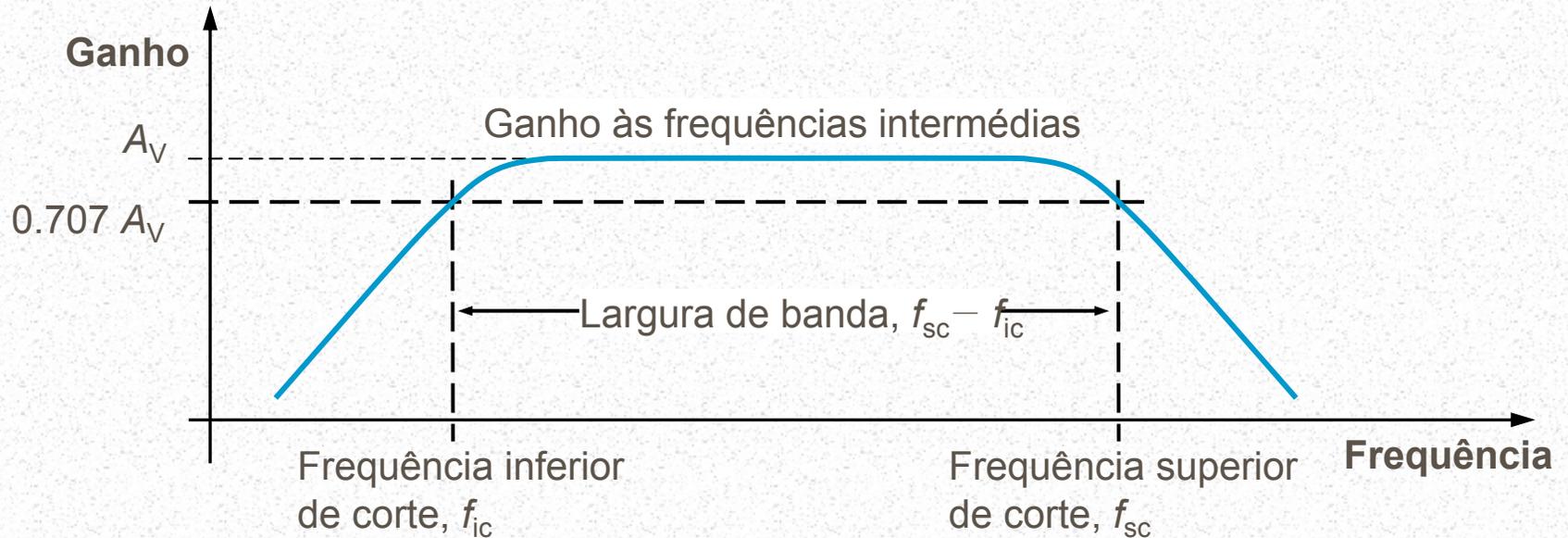
■ Ganho em tensão:  $20 \log_{10} \frac{V_{saída}}{V_{ent}}$  (dB)

■ Ganho em Corrente:  $20 \log_{10} \frac{I_{saída}}{I_{ent}}$  (dB)

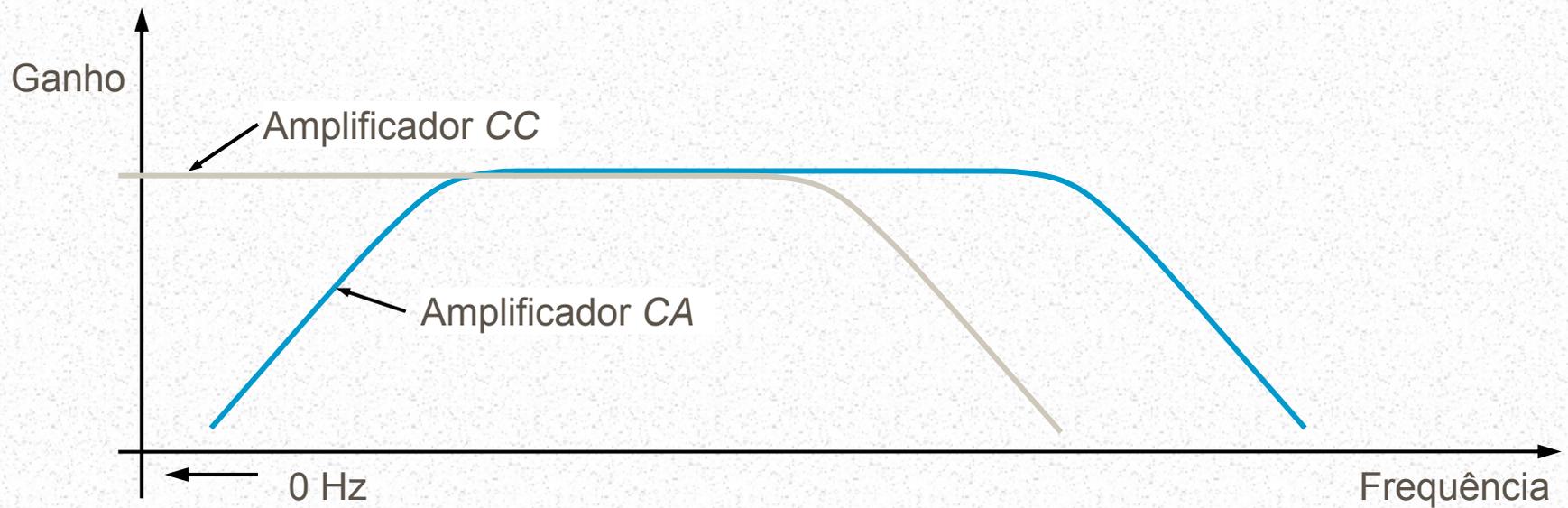
■ Ganho em Potência:  $20 \log_{10} \frac{P_{saída}}{P_{ent}}$  (dB)

## ■ Especificações (cont.)

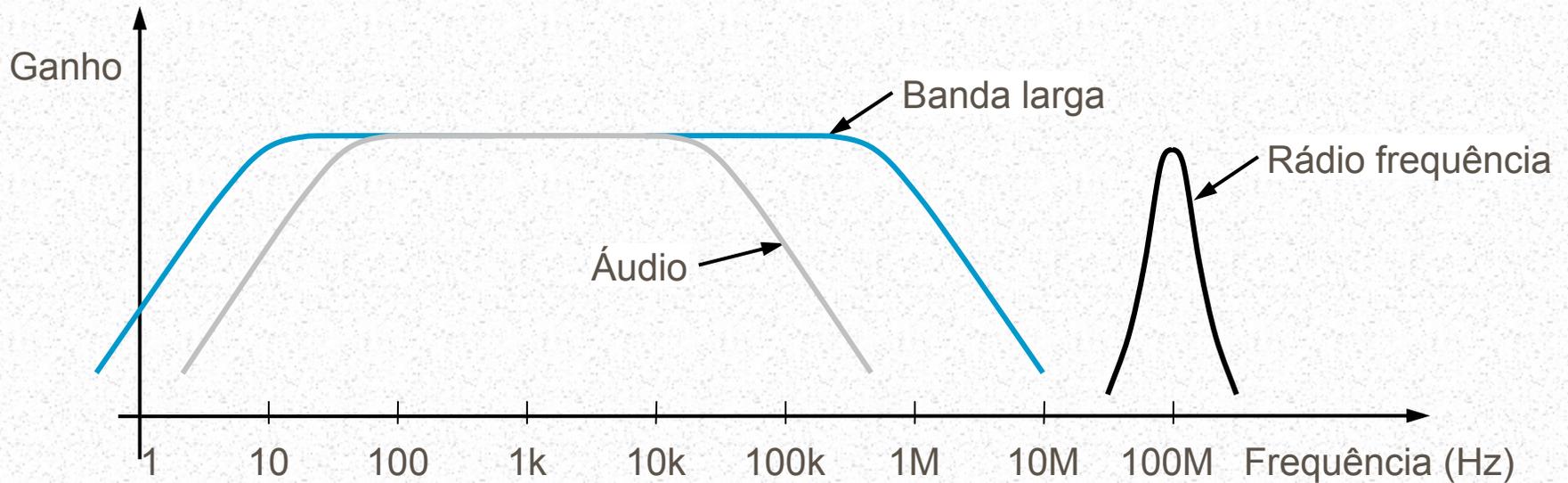
### ■ Resposta em frequência



# Amplificadores



# Amplificadores





# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Especificações (cont.)

### ■ Tensão de saída

é o excursão máxima permitida à tensão de saída sem que haja distorção significativa (especificada em valores de pico ou pico a-pico)

### ■ Potência de saída

É o valor eficaz da potência de saída, especificado para uma carga de determinada impedância, para um determinado valor de THD, e para uma dada frequência

### ■ Alimentação

É a indicação dos requisitos em termos de tensão e de corrente de alimentação (note se que alguns amplificadores necessitam de mais do que uma tensão cc de alimentação)



# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

## ■ Especificações (cont.)

### ■ Rendimento

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência fornecida ao amplificador}} \times 100\%$$

(amplificadores lineares → rendimentos baixos)

(amplificadores não-lineares → rendimentos elevados)



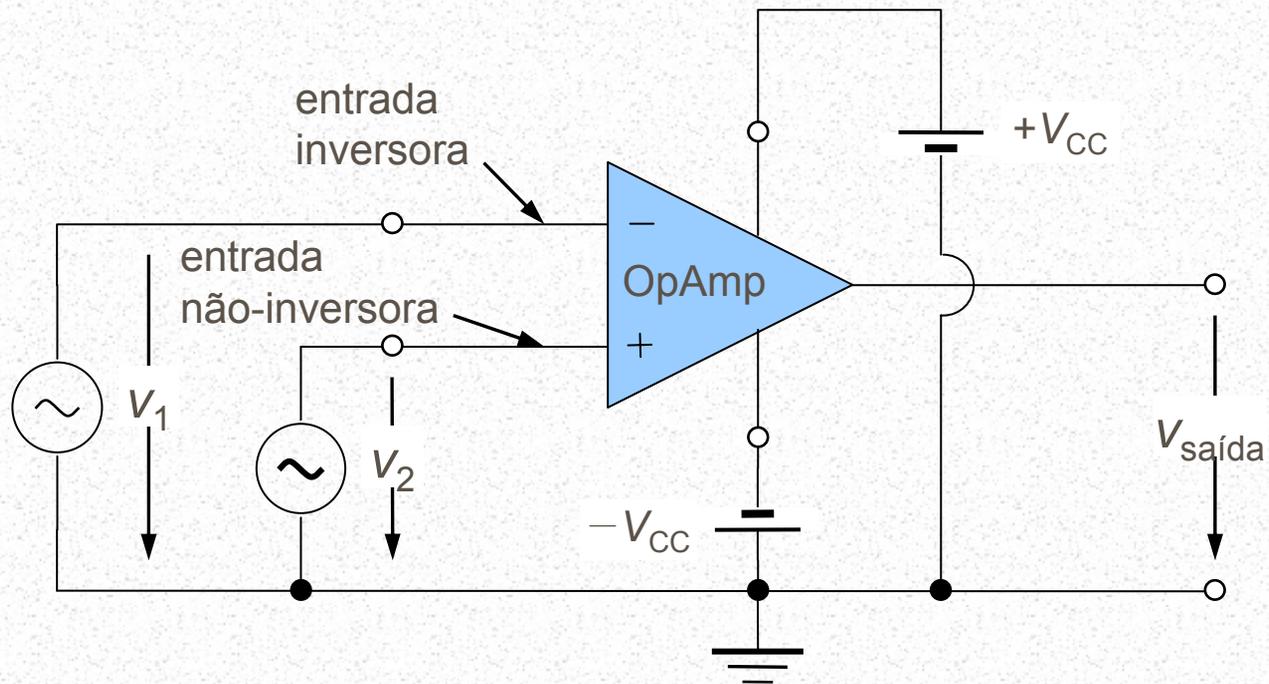
# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

- **Características de amplificadores realimentados:**
  - Ganho constante (estável) e previsível
  - Menor distorção no sinal de saída
  - Melhor resposta em frequência (maior largura de banda)

## ■ Amplificador Operacional – Introdução



$$V_{saída} = A(V_2 - V_1)$$

## ■ Amplificador operacional – principais propriedades

- *Ganho de tensão em malha aberta* muito elevado (valores como  $A = 10^5$  para componentes contínuas e baixas frequências são comuns; o ganho diminui à medida que a frequência aumenta)
- Impedância de entrada muito elevada, tipicamente entre  $10^6 \Omega$  e  $10^{12} \Omega$  (a corrente que flui nas suas entradas é mínima)
- Impedância de saída baixa, vulgarmente cerca de  $100 \Omega$  (a tensão de saída é transferida de forma eficiente para qualquer carga superior a alguns  $k\Omega$ )

$$\begin{matrix} \nearrow \\ V \\ \text{(finito)} \end{matrix} \text{saída} = A \begin{matrix} \nearrow \infty \\ (V_2 - V_1) \\ \searrow 0 \end{matrix}$$

## ■ Amplificador Operacional – Introdução

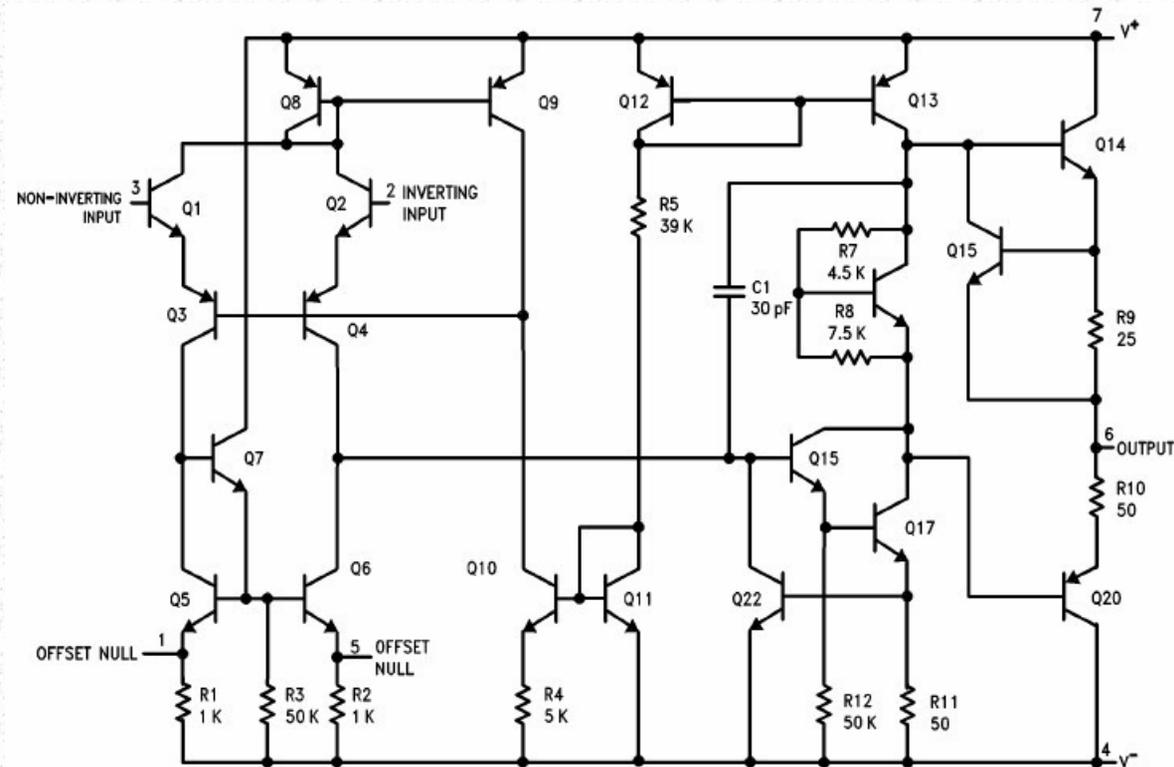
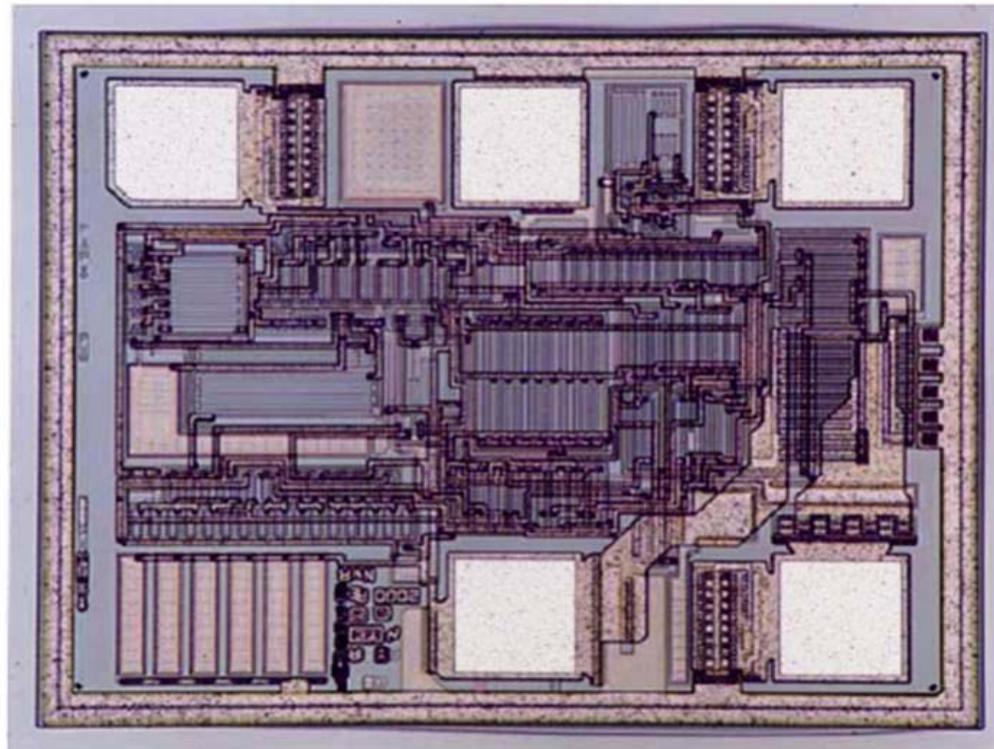


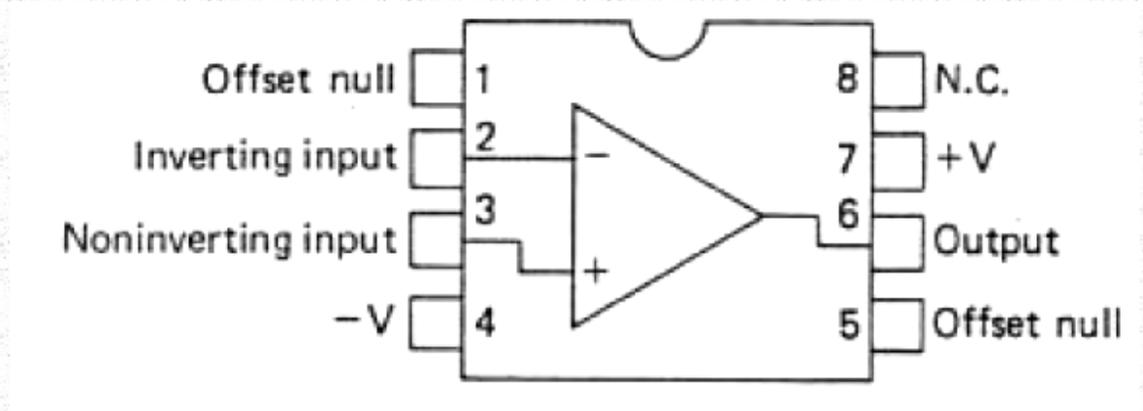
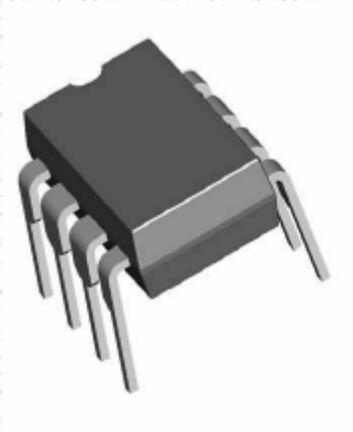
Diagrama Esquemático do AmpOp  $\mu A741$

## ■ Amplificador Operacional – Introdução



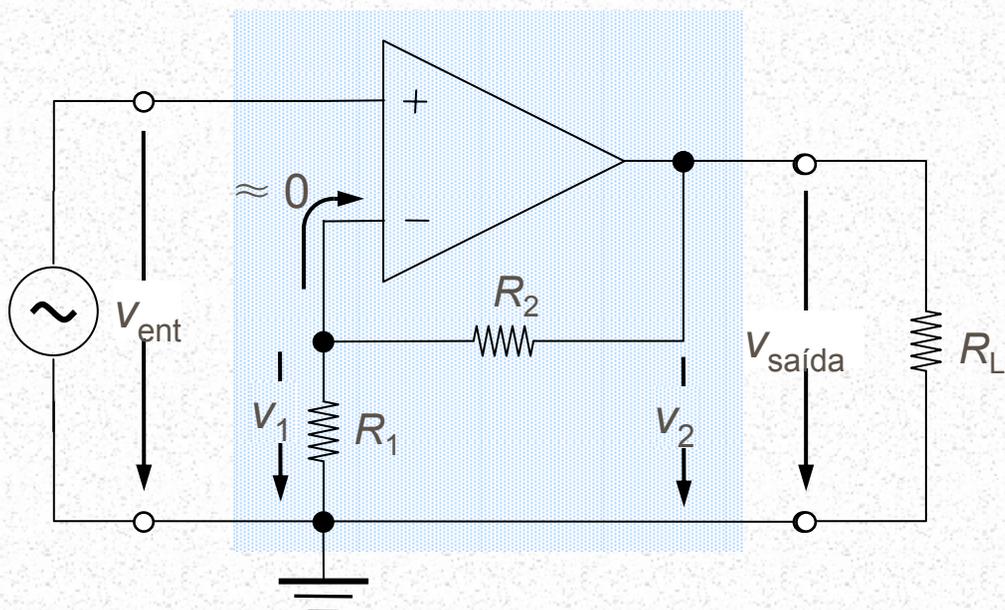
AmpOP – vista microscópica de um CI

## ■ Amplificador Operacional – Introdução



## ■ Amplificador operacional – blocos básicos

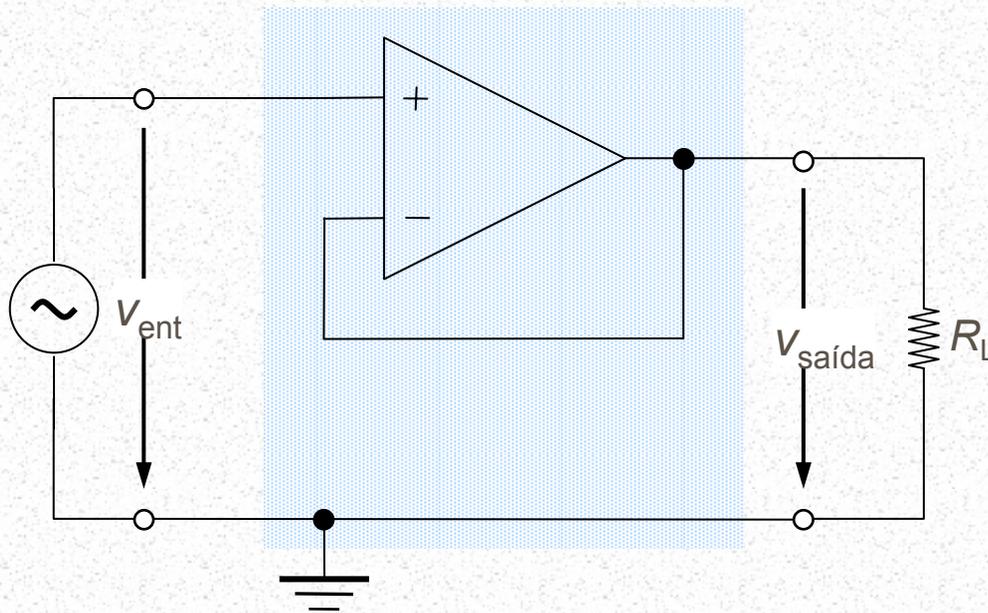
### ■ Amplificador Não-Inversor



$$\begin{aligned}
 V_{ent} &= V_1 \\
 &= V_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{saida} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\
 \rightarrow \frac{V_{saida}}{V_{ent}} &= 1 + \frac{R_2}{R_1}
 \end{aligned}$$

## ■ Amplificador operacional – blocos básicos

### ■ Seguidor de tensão

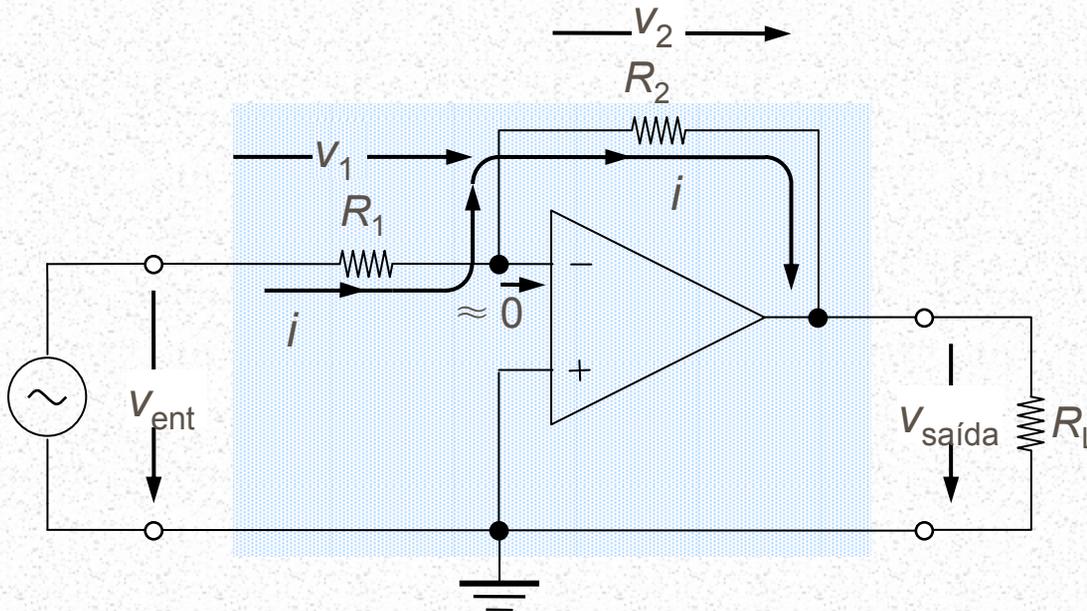


$$\frac{V_{saída}}{V_{ent}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1$$

$\begin{matrix} \nearrow 0 \\ \searrow \infty \end{matrix}$

## ■ Amplificador operacional – blocos básicos

### ■ Amplificador Inversor

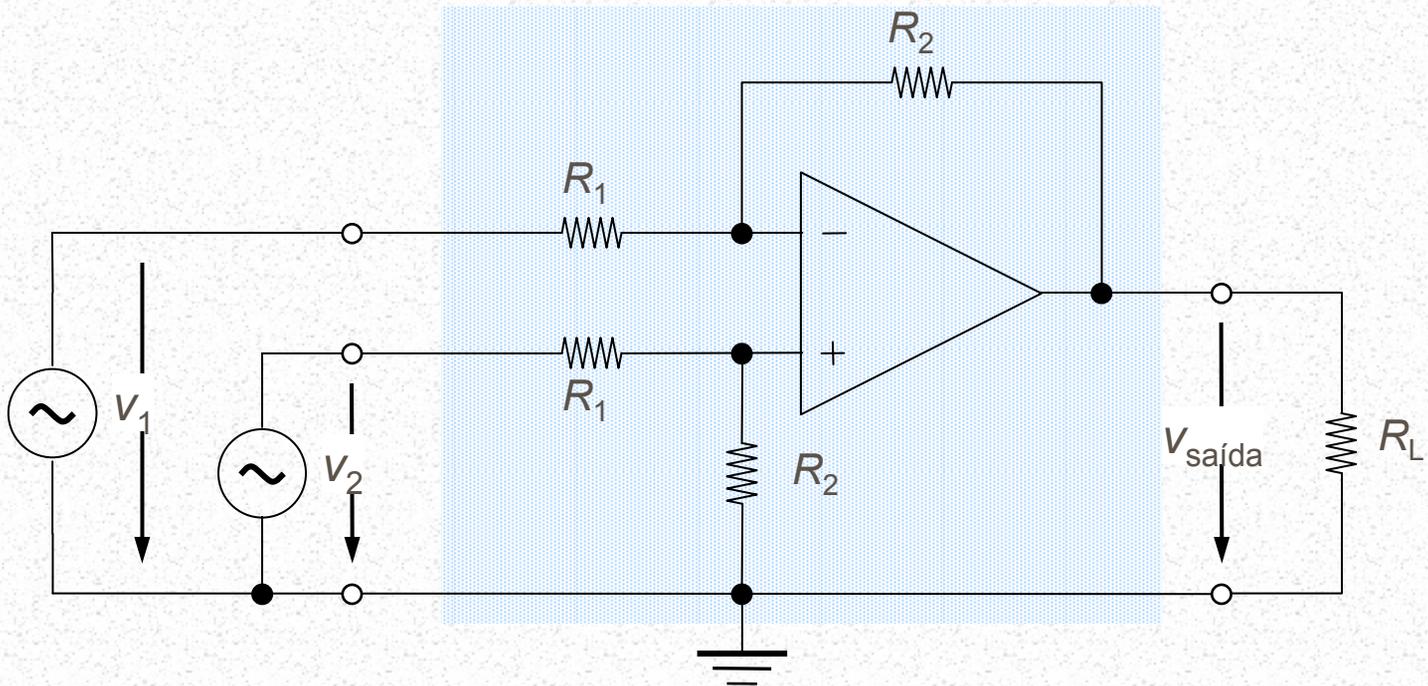


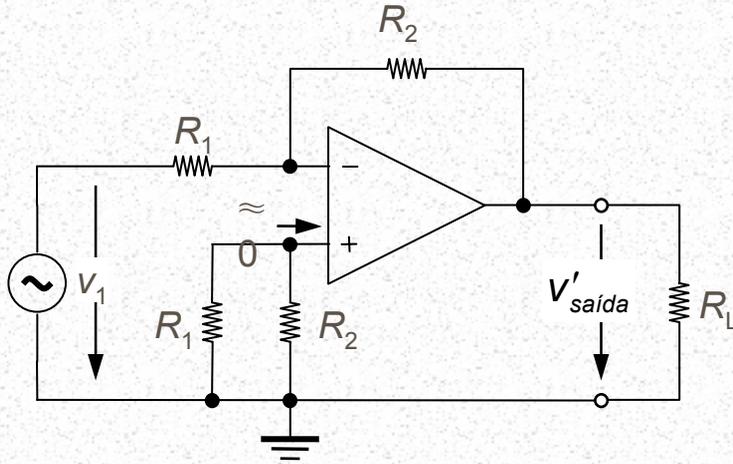
$$\frac{V_{saída}}{V_{ent}} = \frac{-V_2}{V_1} = \frac{-R_2 I}{R_1 I}$$

$$\rightarrow \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

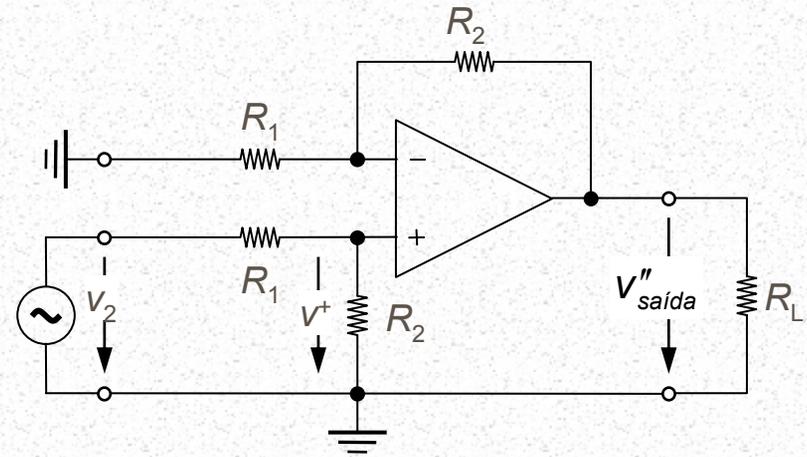
## ■ Amplificador operacional – blocos básicos

### ■ Amplificador Diferencial





$$\frac{V'_{saída}}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \rightarrow V'_{saída} = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$



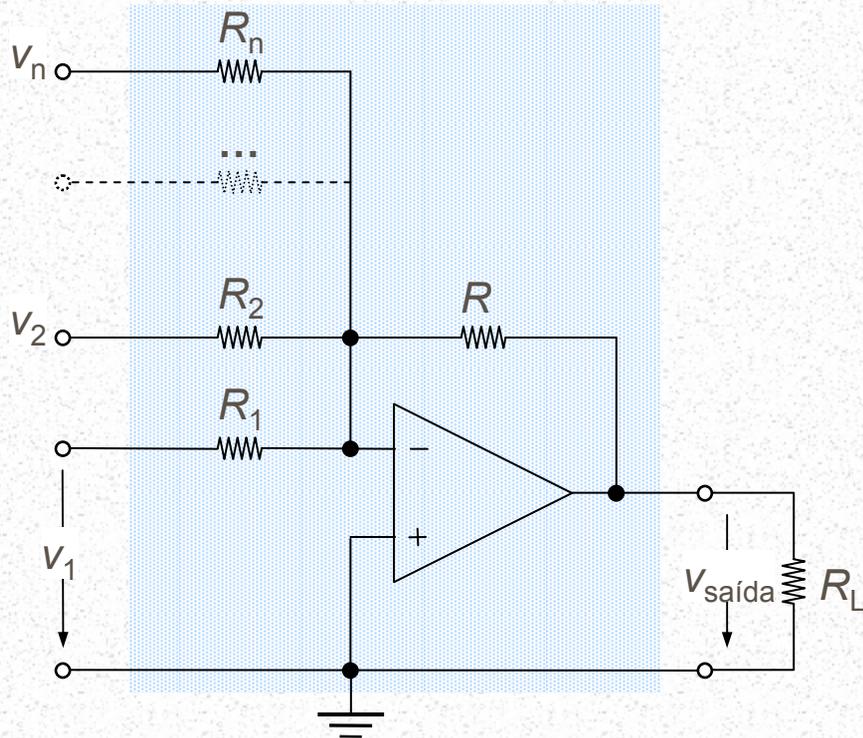
$$V^+ = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad V''_{saída} = V^+ \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$V''_{saída} = V_2 \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}_{V^+} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} = V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

$$\rightarrow V_{saída} = V'_{saída} + V''_{saída} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

## ■ Amplificador operacional – outras configurações

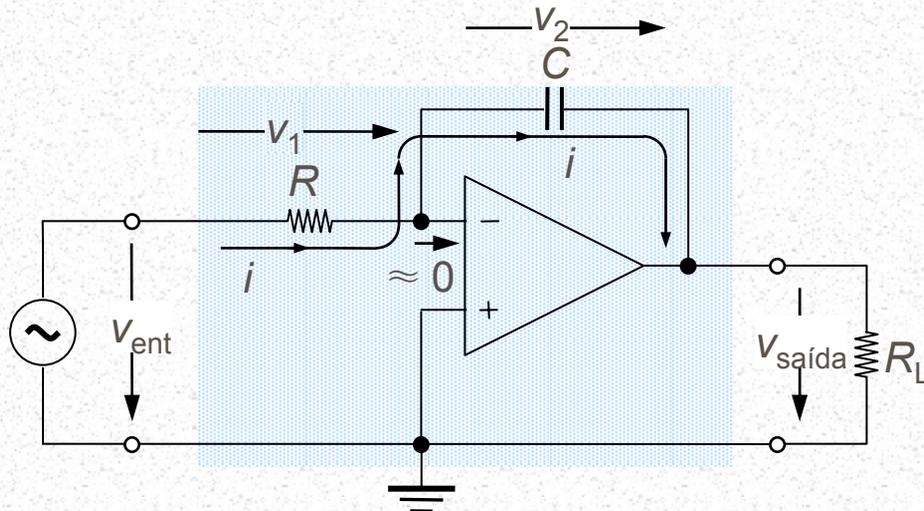
### ■ Amplificador Somador



$$V_{saída} = - \left( \frac{R}{R_1} V_1 + \frac{R}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R}{R_n} V_n \right)$$

## ■ Amplificador operacional – outras configurações

### ■ Amplificador Integrador



$$I = \frac{V_1}{R} = \frac{V_{ent}}{R} \quad I = C \frac{dV_2}{dt} = C \frac{d(-V_{saída})}{dt}$$

$$C \frac{d(-V_{saída})}{dt} = \frac{V_{ent}}{R}$$

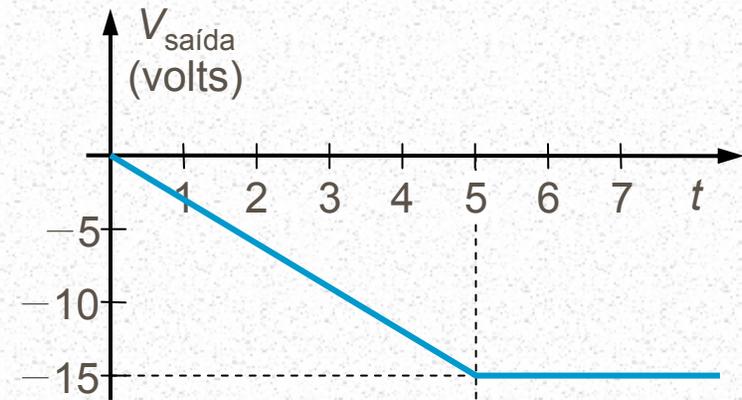
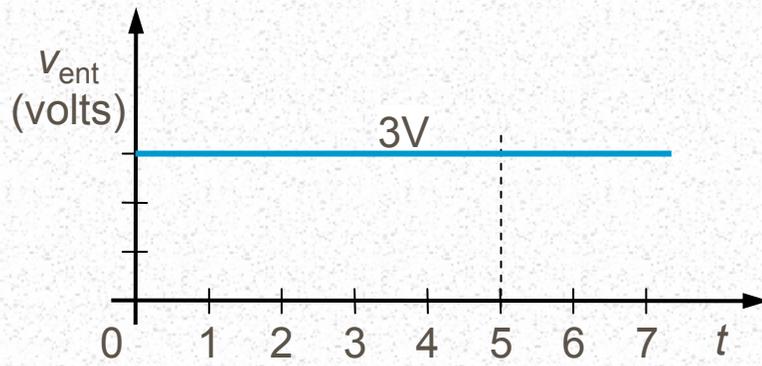
$$\rightarrow V_{saída} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{ent} dt + V_{iC}$$



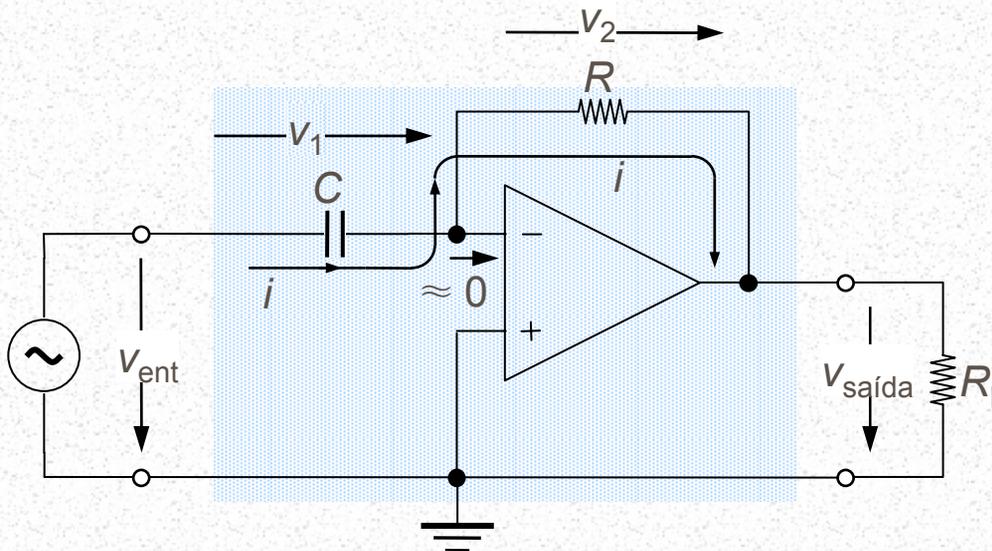
# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial



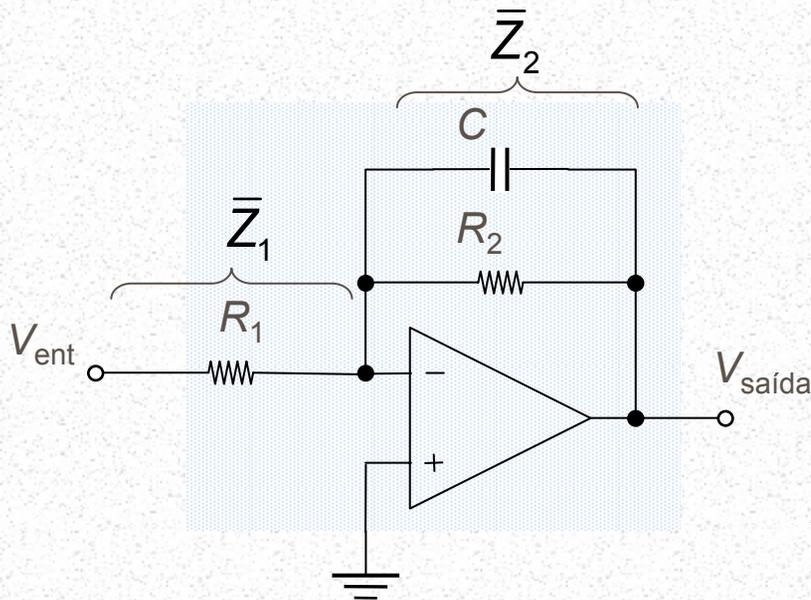
- Amplificador operacional – outras configurações
  - Amplificador Diferenciador



$$V_{saída} = -RC \frac{dV_{ent}}{dt}$$

## ■ Amplificador operacional – outras configurações

### ■ Filtro activo passa-baixo de 1ª ordem



$$G(j\omega) = \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1} = \frac{R_2 \parallel (1/j\omega C)}{R_1} = -\frac{R_2 \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$G(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}$$

$$\text{Para } G_0 = -\frac{R_2}{R_1}, f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C},$$

$$\rightarrow G = G_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$



# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

$$G = G_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

$$|G| = |G_0| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}, \quad \underline{G} = \underline{G_0} - \left[1 + j \frac{f}{f_0}\right] = 180^\circ - \arctg\left(\frac{f}{f_0}\right)$$

Para  $f \ll f_0$

$$\underline{G} \approx 180^\circ, \quad |G|_{dB} \approx 20 \log(|G_0|)$$

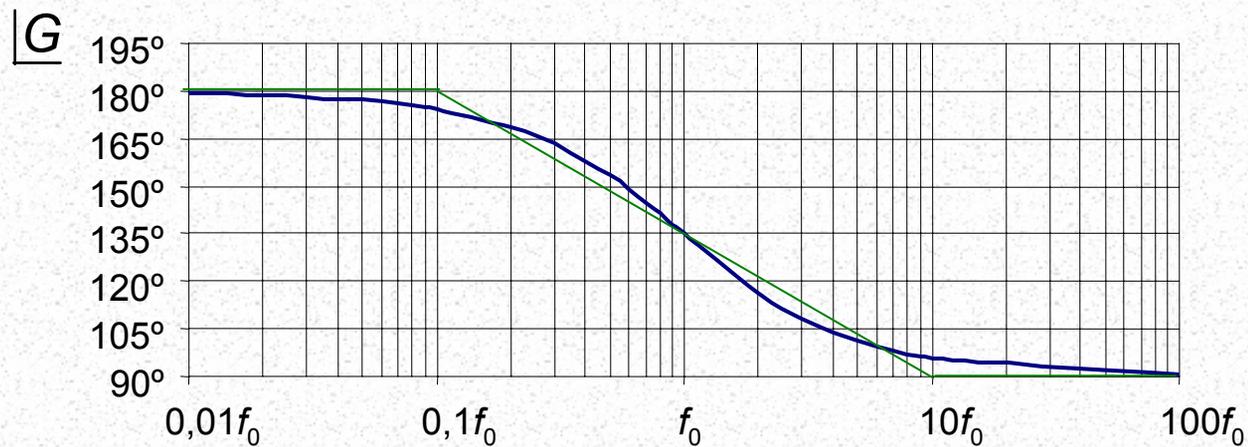
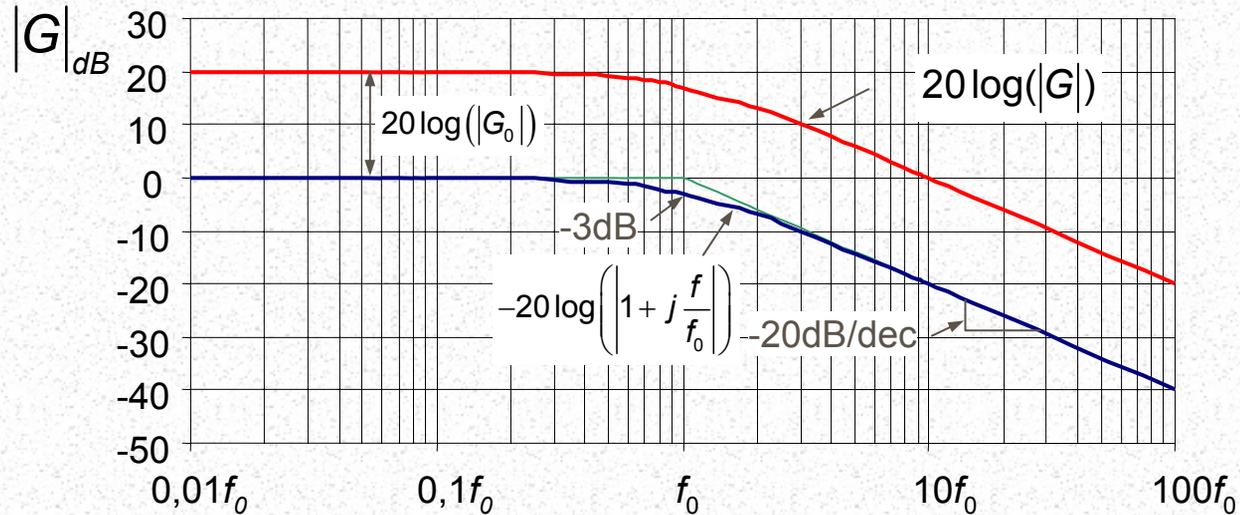
Para  $f \gg f_0$

$$\underline{G} \approx 90^\circ, \quad |G|_{dB} \approx 20 \log(|G_0|) - 20 \log\left(\frac{f}{f_0}\right)$$

Para  $f = f_0$

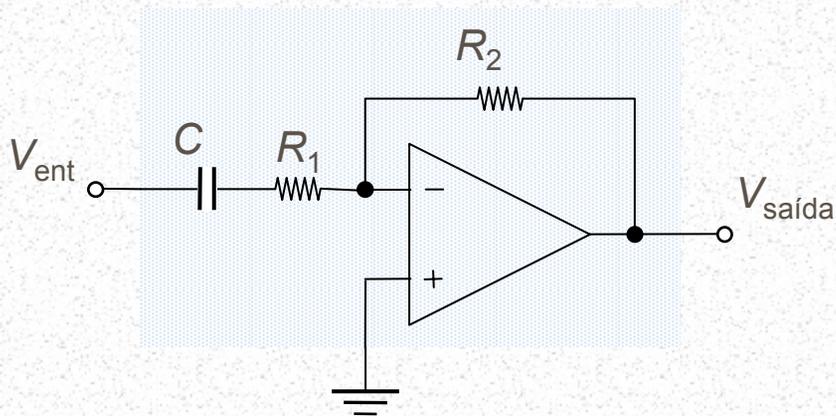
$$\underline{G} = 135^\circ, \quad |G|_{dB} = 20 \log(|G_0|) - 20 \log(\sqrt{2}) = 20 \log(|G_0|) - 3 \text{ dB}$$

# Amplificadores



## ■ Amplificador operacional – outras configurações

### ■ Filtro activo passa-alto de 1ª ordem



$$G(j\omega) = \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{1 + j\omega R_1 C}$$

$$G(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_1 C}$$

$$\text{Para } G_0 = -\frac{R_2}{R_1}, f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C},$$

$$\rightarrow G = G_0 \frac{j \frac{f}{f_0}}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$



# Amplificadores



Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

$$G = G_0 \frac{j \frac{f}{f_0}}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

$$|G| = |G_0| \frac{\frac{f}{f_0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}},$$

$$\underline{G} = \underline{G_0} + \left[ j \frac{f}{f_0} - \left[ 1 + j \frac{f}{f_0} \right] = 270^\circ - \arctg \left( \frac{f}{f_0} \right)$$

Para  $f \ll f_0$

$$\underline{G} \approx 270^\circ, \quad |G|_{dB} \approx 20 \log(|G_0|) + 20 \log\left(\frac{f}{f_0}\right)$$

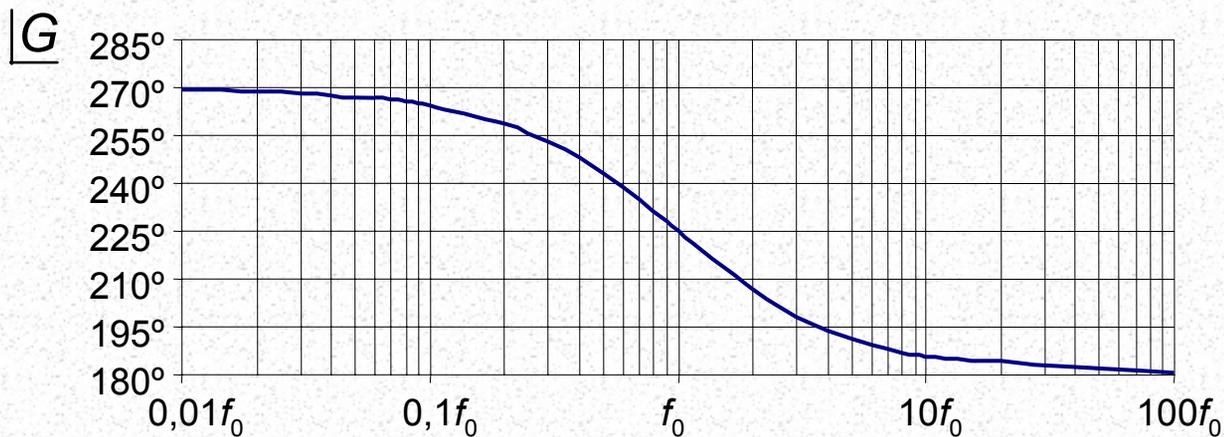
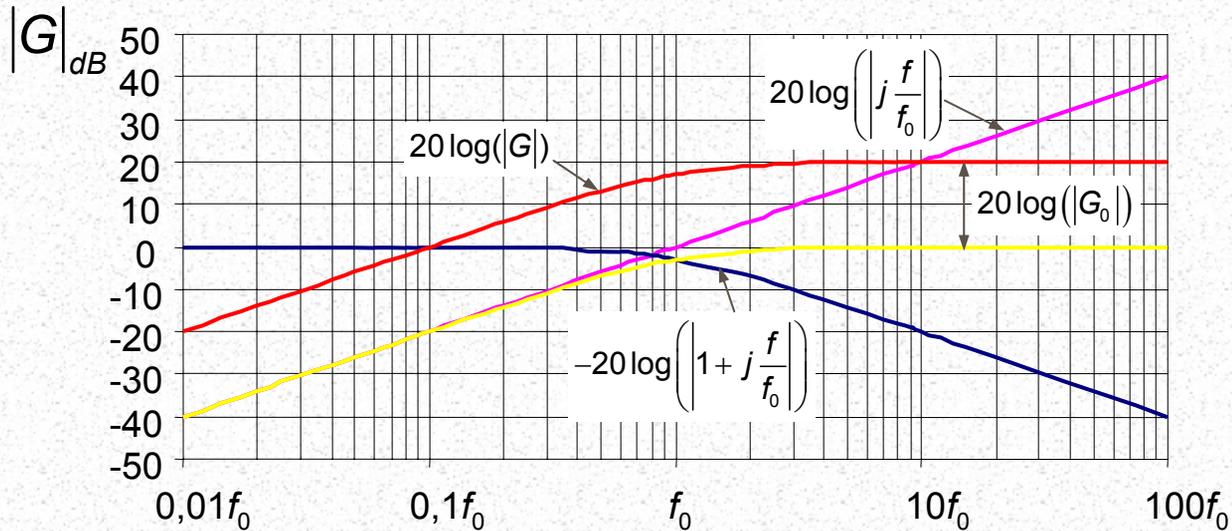
Para  $f \gg f_0$

$$\underline{G} \approx 180^\circ, \quad |G|_{dB} \approx 20 \log(|G_0|)$$

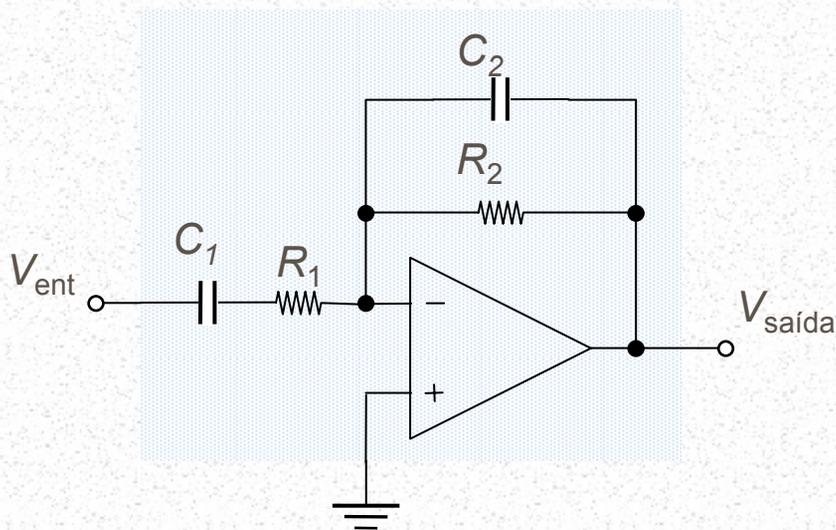
Para  $f = f_0$

$$\underline{G} = 225^\circ, \quad |G|_{dB} = 20 \log(|G_0|) - 20 \log(\sqrt{2}) = 20 \log(|G_0|) - 3 \text{ dB}$$

# Amplificadores



- Amplificador operacional – outras configurações
  - Filtro activo passa-banda

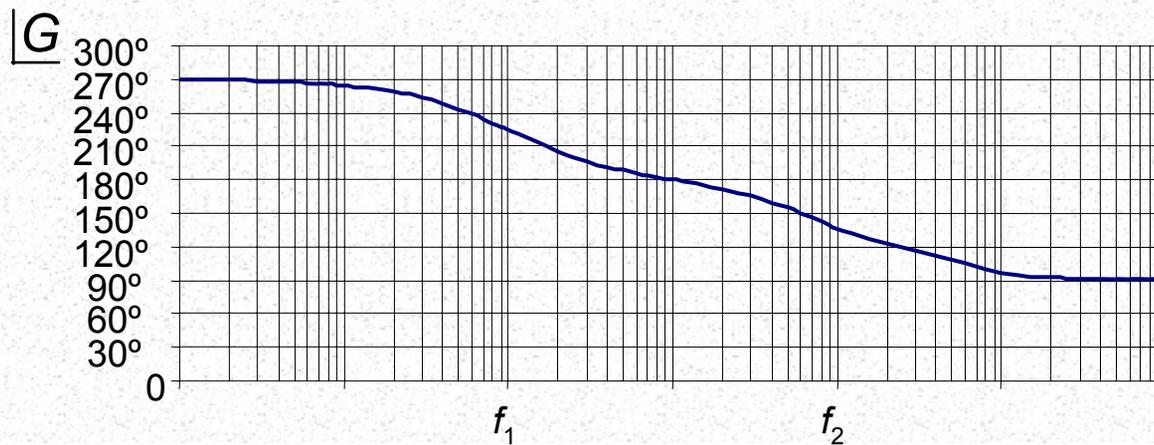
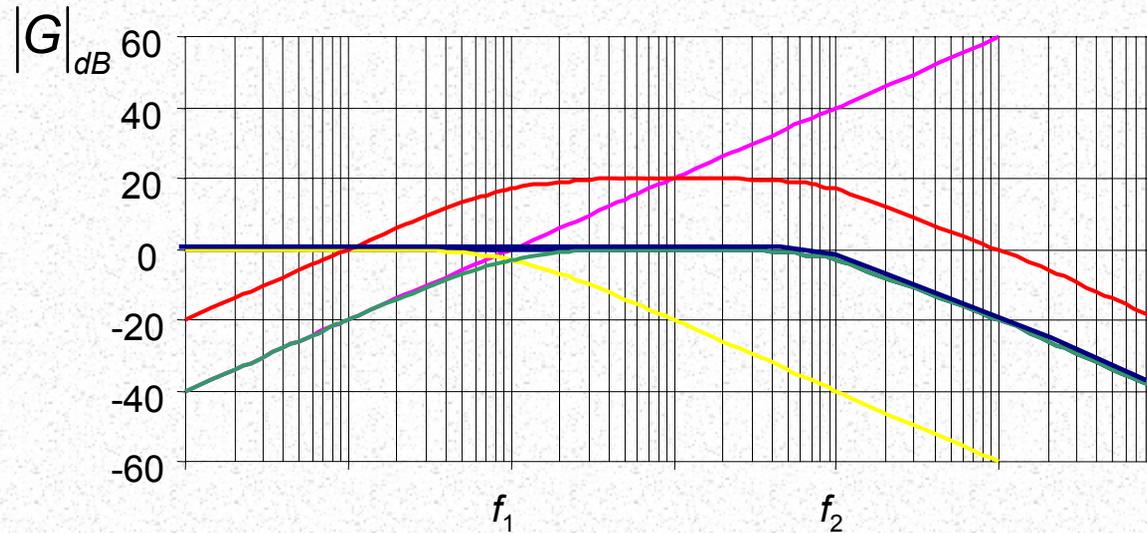


$$\rightarrow G = G_0 \frac{j \frac{f}{f_1}}{\left(1 + j \frac{f}{f_1}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_2}\right)}$$

$$\text{Com } G_0 = -\frac{R_2}{R_1}, \quad f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

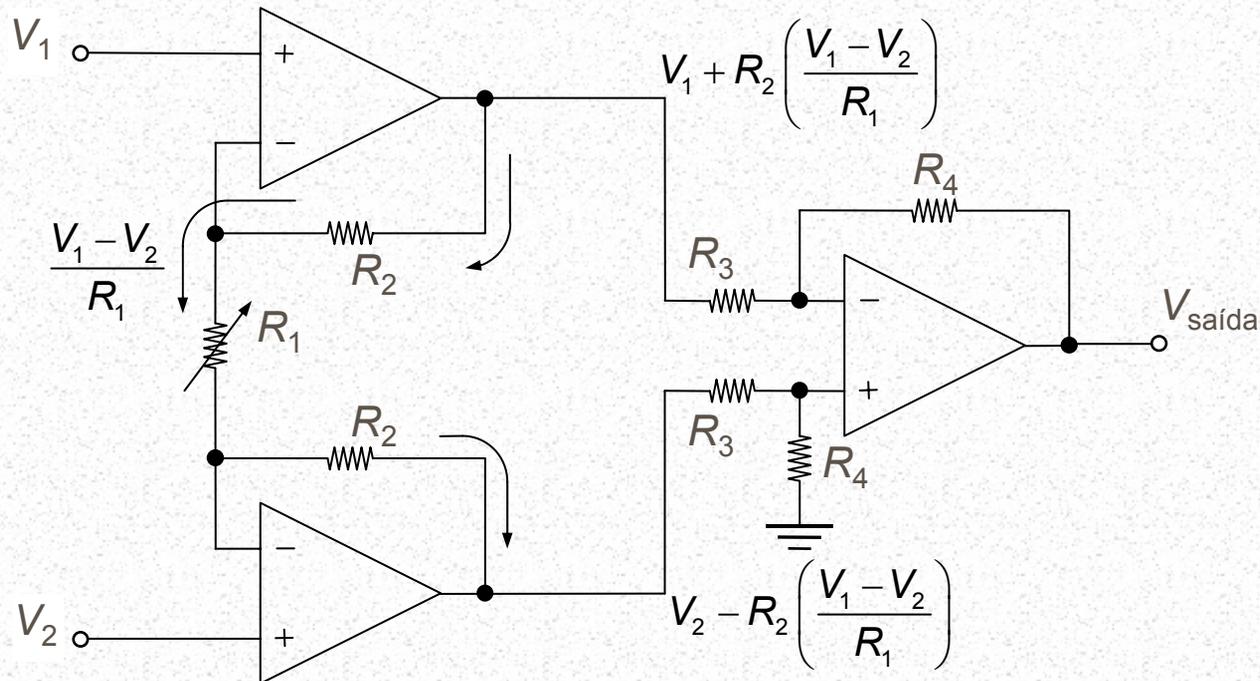
$$(f_2 > f_1)$$

# Amplificadores



## ■ Amplificador operacional – outras configurações

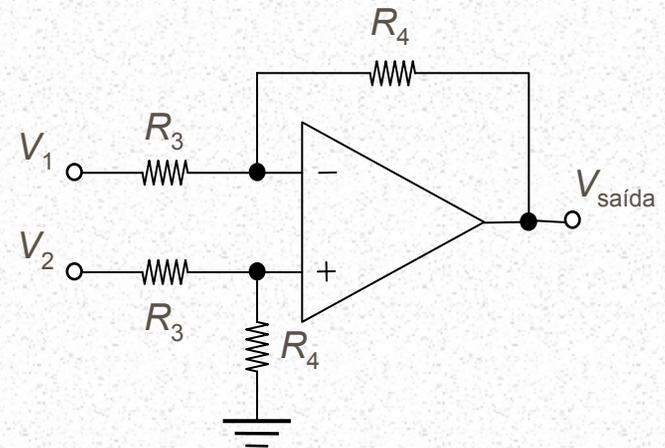
### ■ Amplificador de instrumentação



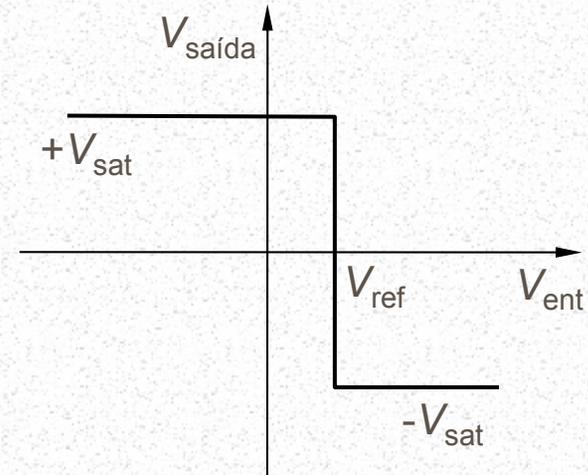
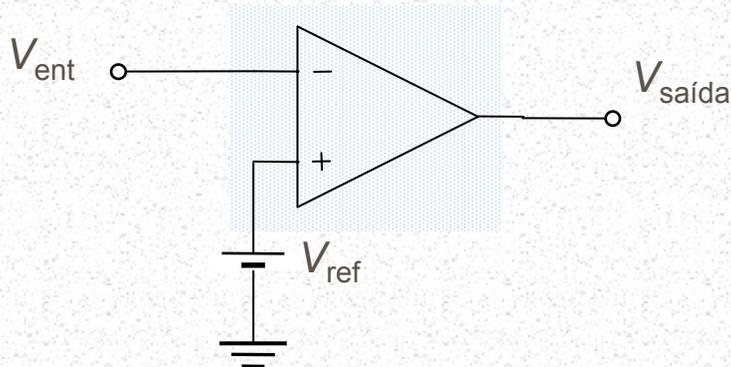
$$A_d = \frac{V_{saída}}{V_2 - V_1} = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{para } R_2 = R_3 = R_4 = R, \rightarrow A_d = 1 + 2 \frac{R}{R_1}$$

## Amplificador de instrumentação – vantagens (comparando com o amplificador diferencial básico)

- Impedância de entrada muito elevada ( $\rightarrow \infty$ )
- Ganho ajustado através de uma só resistência ( $R_1$ ); para o amplificador diferencial básico é necessário variar simultaneamente 2 resistências e manter  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$  para garantir uma razão de rejeição de modo comum elevada

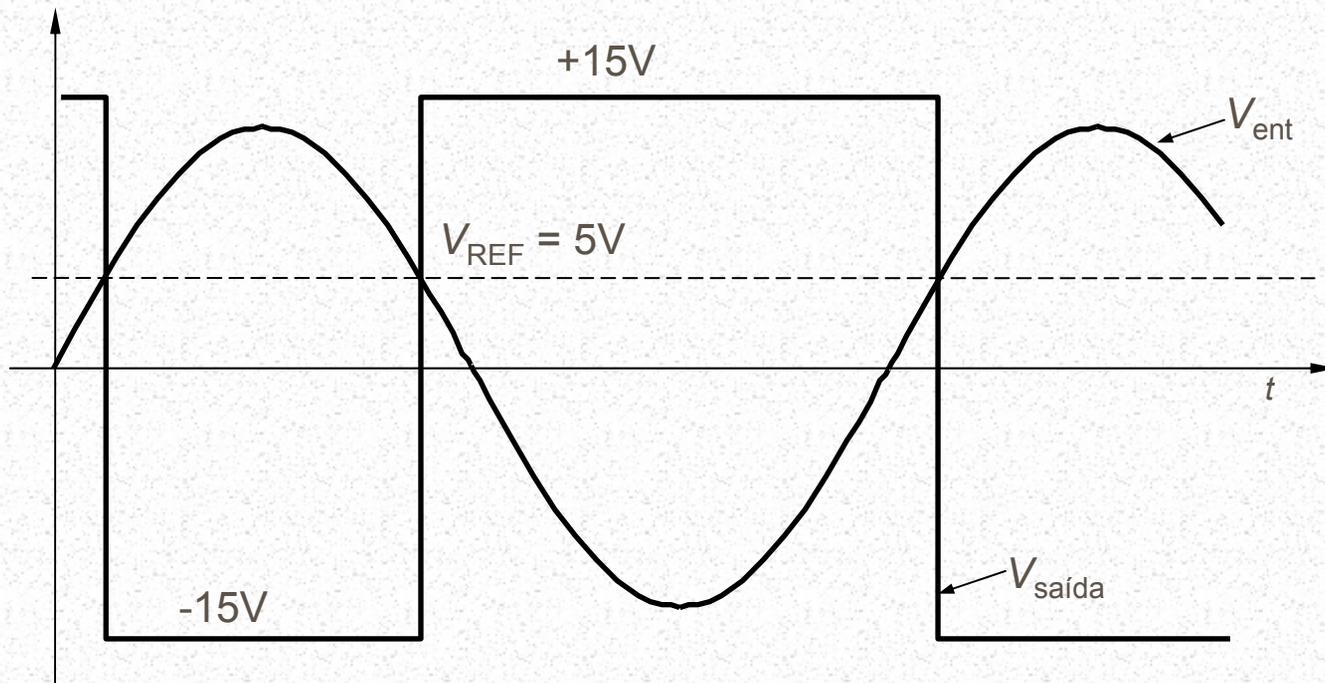


- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
  - Comparador de nível inversor

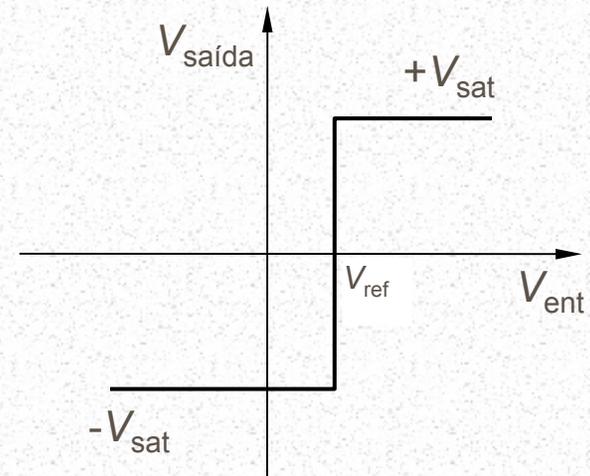
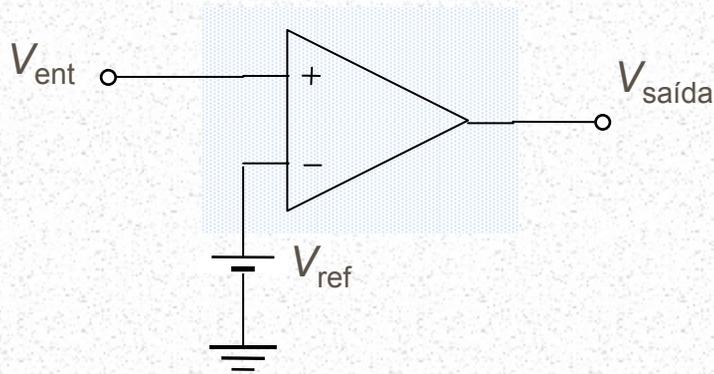


Característica de transferência

Exemplo: para  $V_{REF} = 5\text{ V}$  e  $\pm V_{sat} = \pm 15\text{ V}$ ,



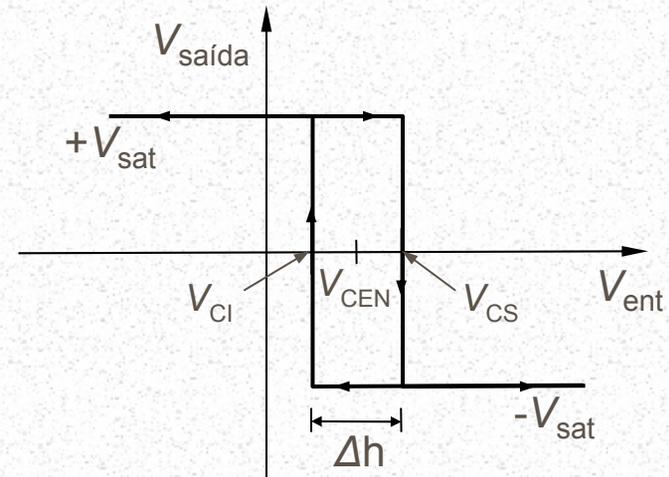
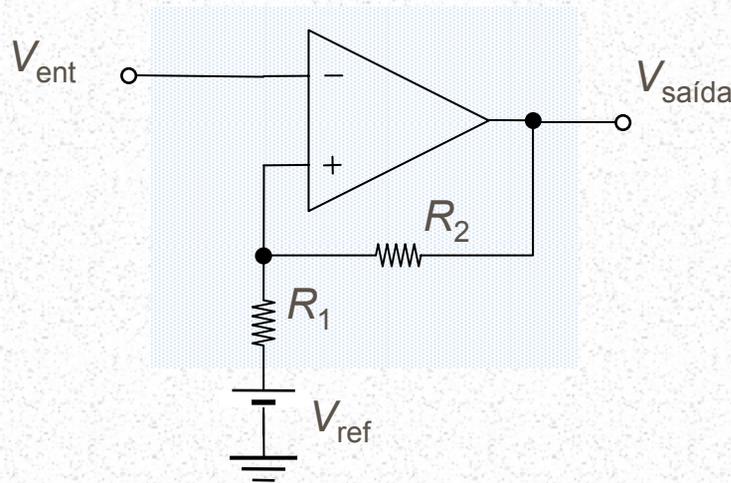
- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
  - Comparador de nível não-inversor



Característica de transferência

## ■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

### ■ Comparador de nível inversor com histerese



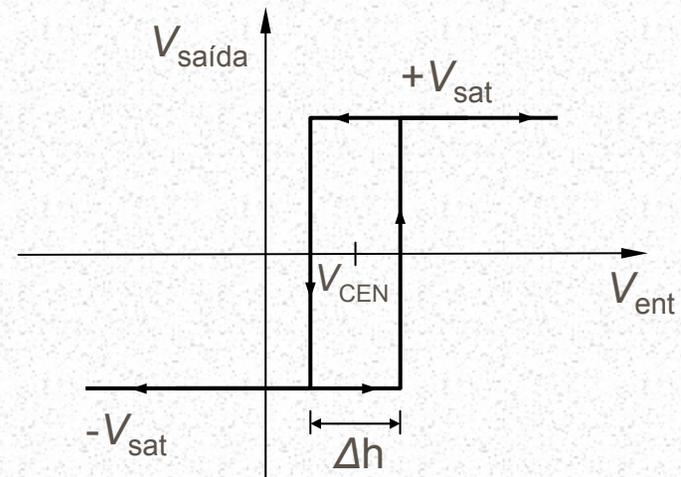
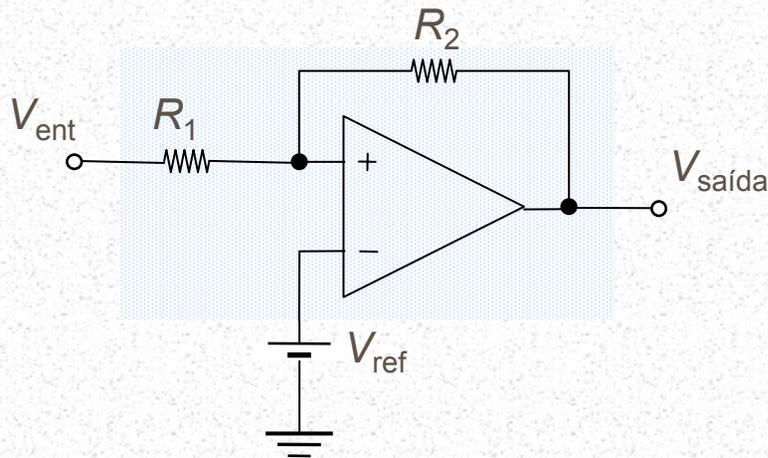
$$V_{CEN} = V_{REF} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Se } R_2 \gg R_1 \rightarrow V_{CEN} \approx V_{REF}$$

$$\Delta h = 2V_{sat} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{CS} = V_{CEN} + \frac{\Delta h}{2}, V_{CI} = V_{CEN} - \frac{\Delta h}{2}$$

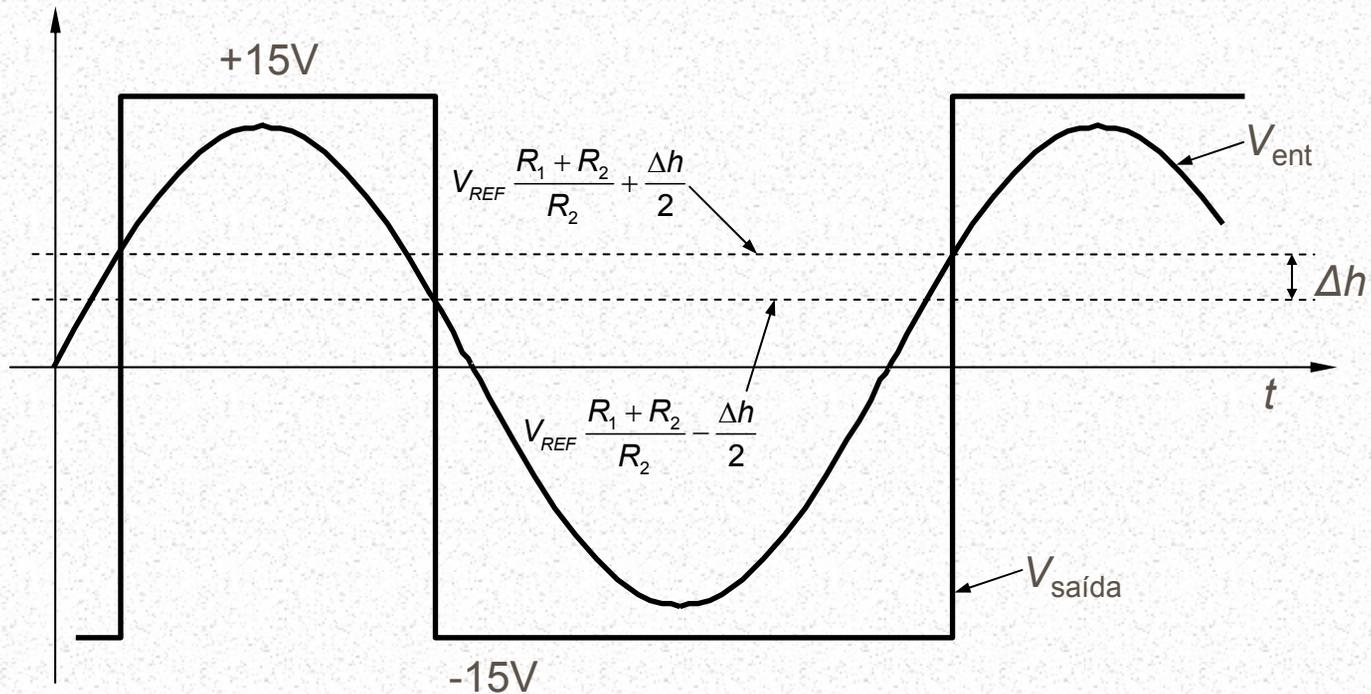
- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
  - Comparador de nível não-inversor com histerese



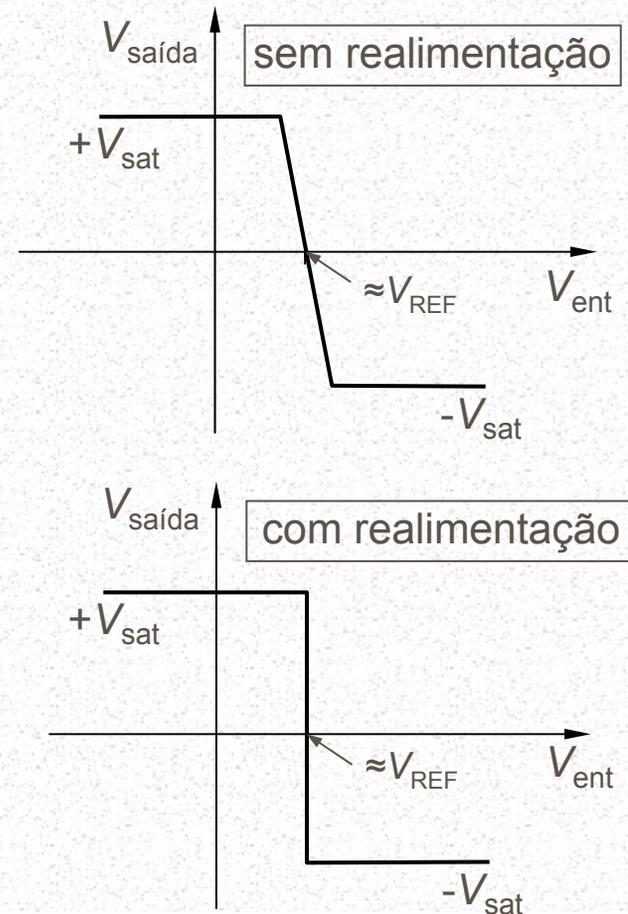
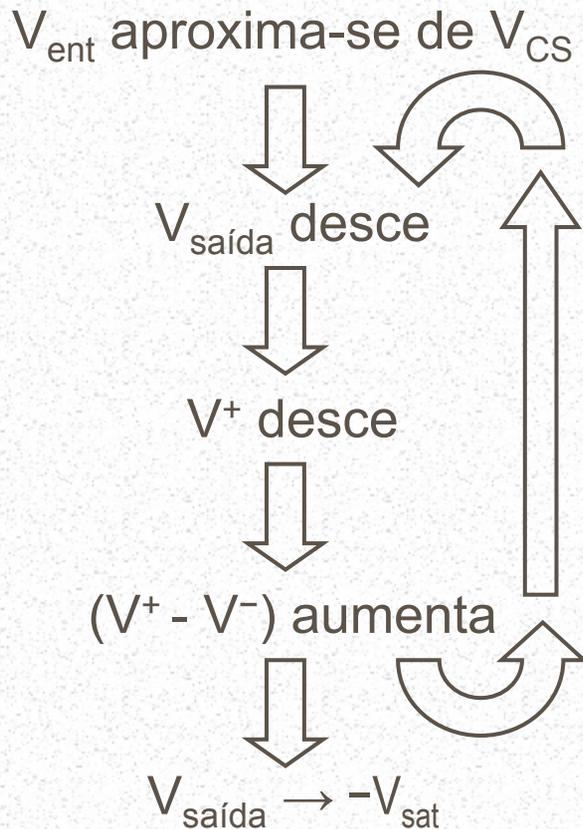
$$V_{CEN} = V_{REF} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\Delta h = 2V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$

Exemplo: para  $V_{REF} = 5\text{ V}$ ,  $\pm V_{sat} = \pm 15\text{ V}$ ,  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$

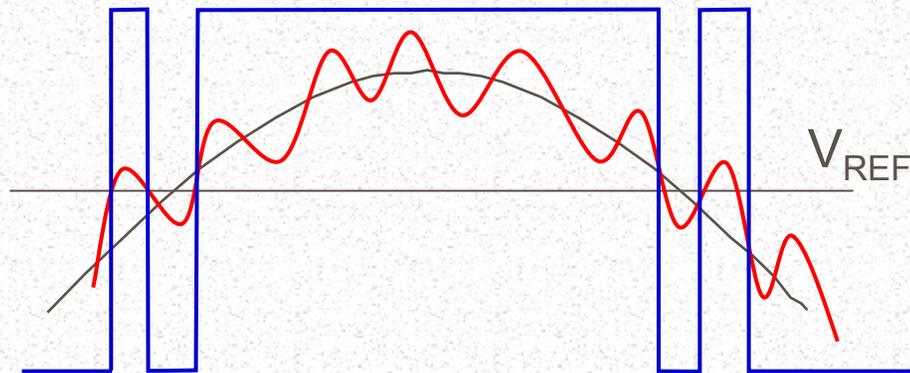


## A realimentação positiva aumenta a velocidade das transições

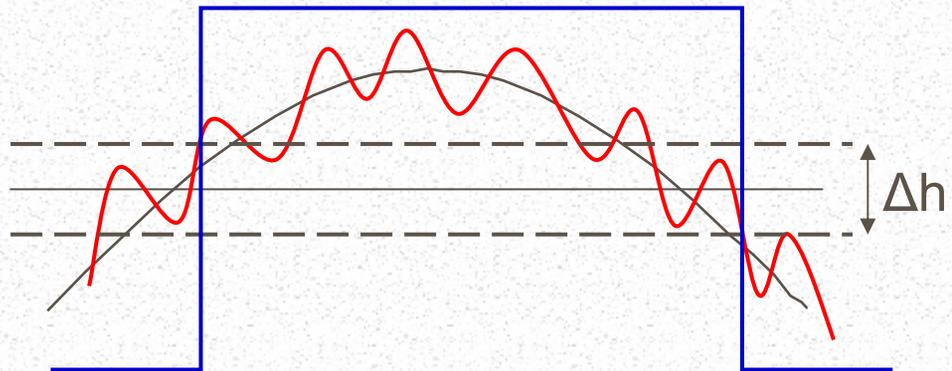
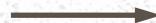


## A histerese aumenta a imunidade ao ruído

Comparador  
sem histerese

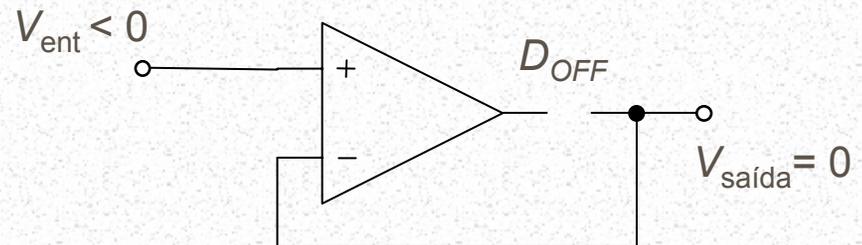
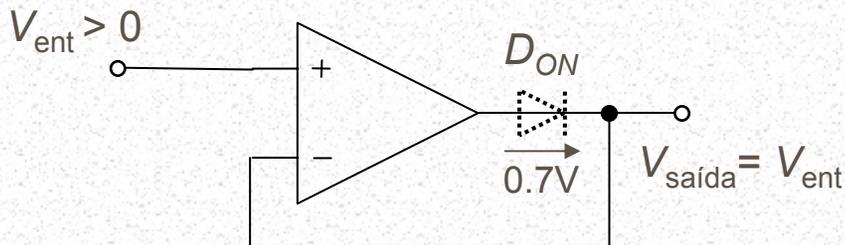
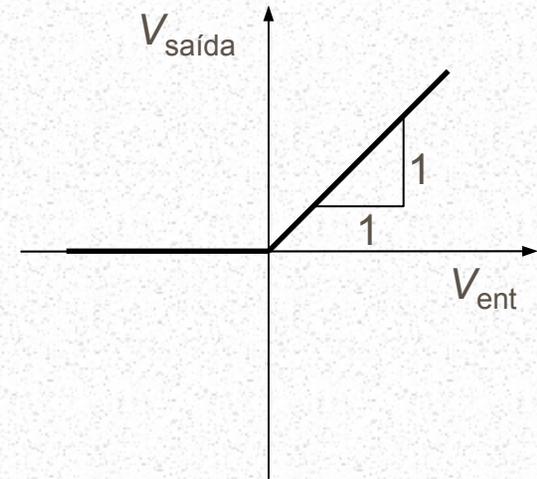
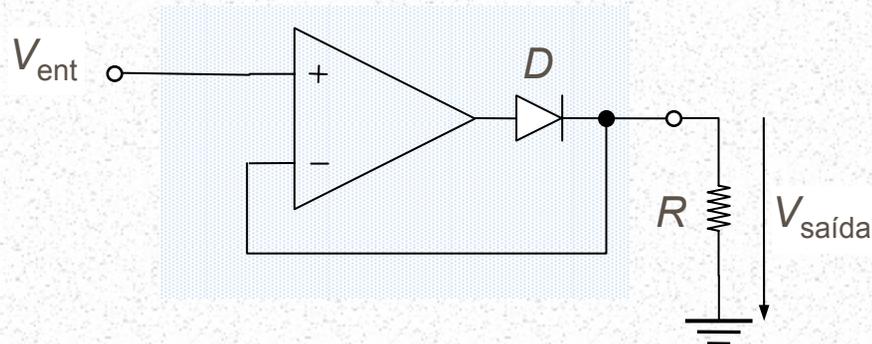


Comparador  
com histerese

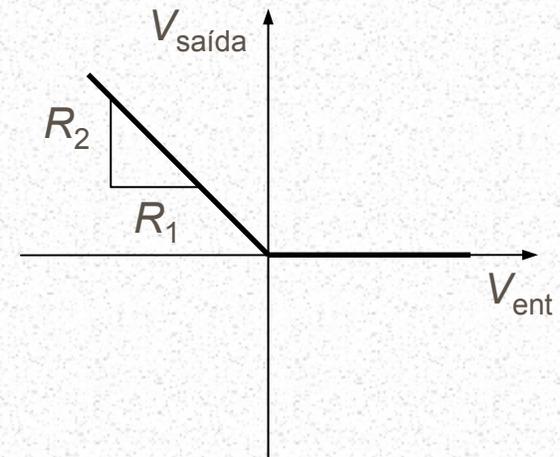
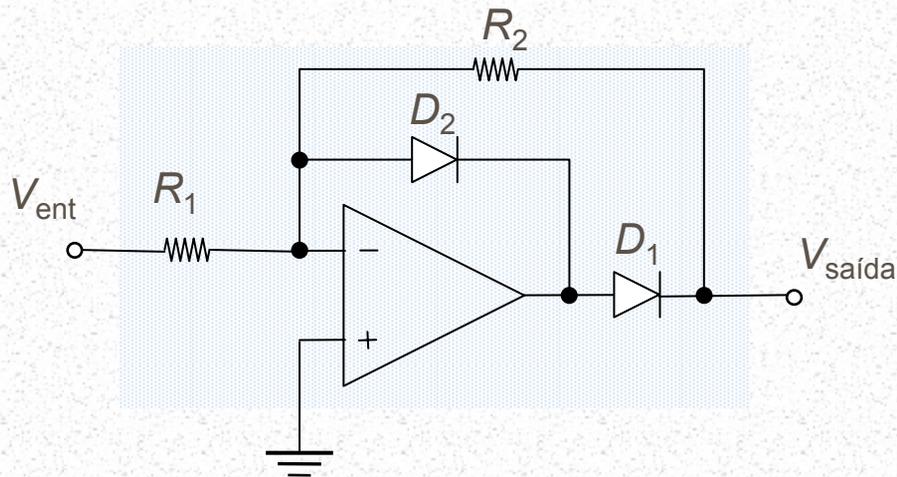


## ■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

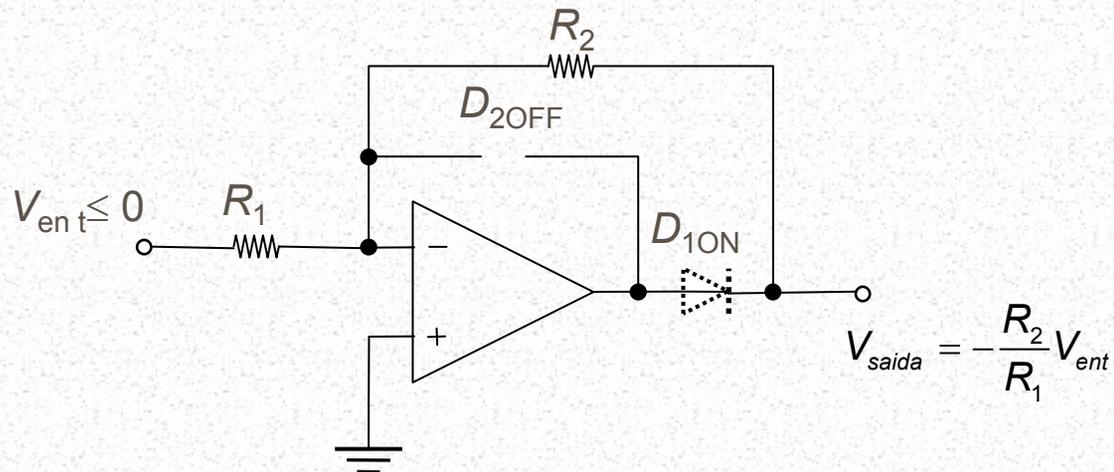
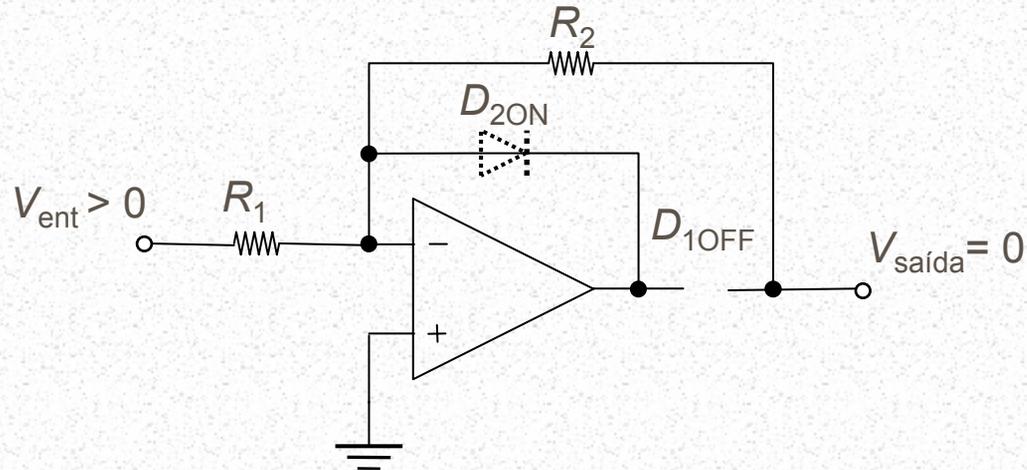
### ■ Rectificador de precisão de meia-onda



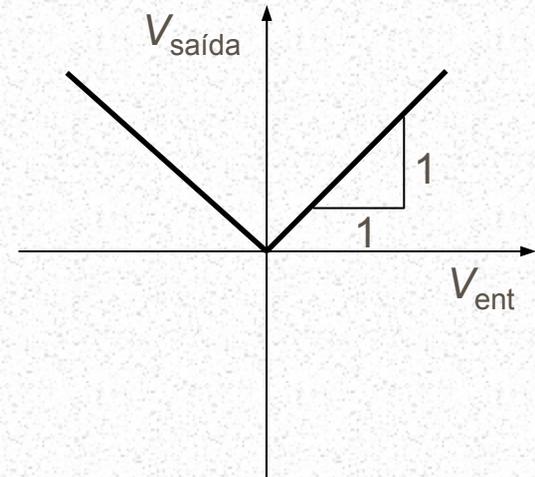
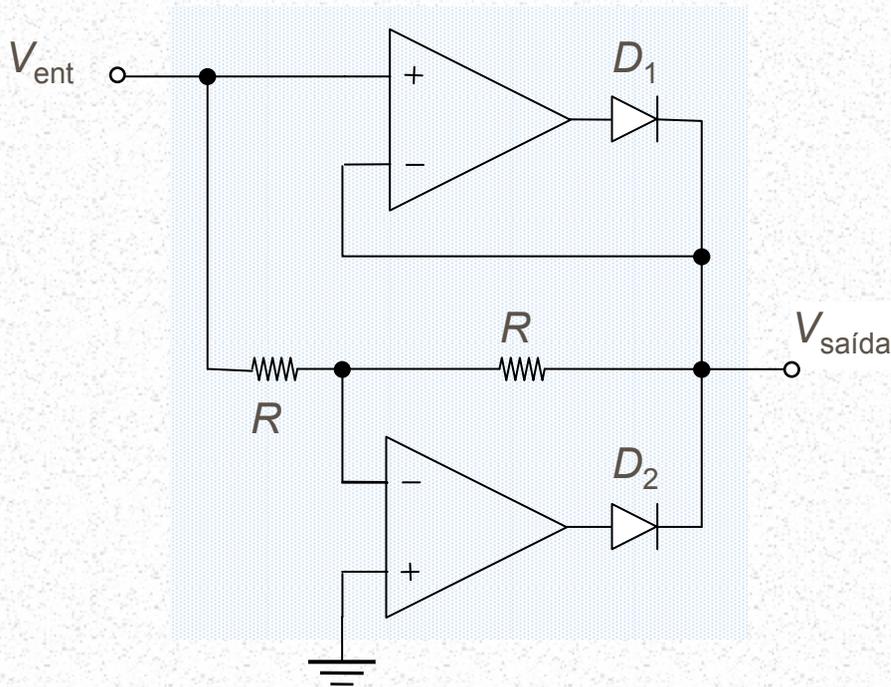
- **Amplificador operacional – aplicações não-lineares**
  - Rectificador de precisão de meia-onda – circuito melhorado



# Amplificadores



- **Amplificador operacional – aplicações não-lineares**
  - Rectificador de precisão de onda-completa



## ■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

### ■ Amplificador logarítmico

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{mkT}} - 1 \right)$$

$I_D$  = corrente no diodo (A)

$V_D$  = tensão aos terminais do diodo (V)

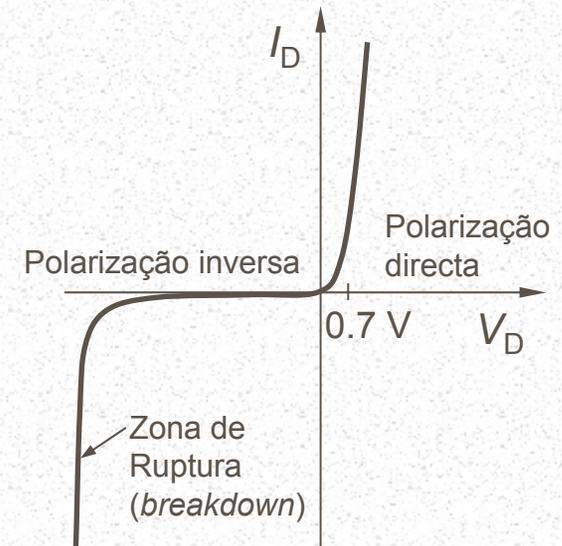
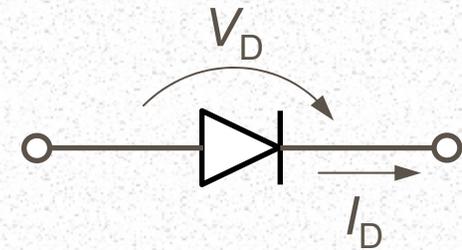
$I_0$  = corrente inversa de saturação (A)

$q$  = carga do electrão,  $1.6 \times 10^{-19}$  C

$K$  = constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$

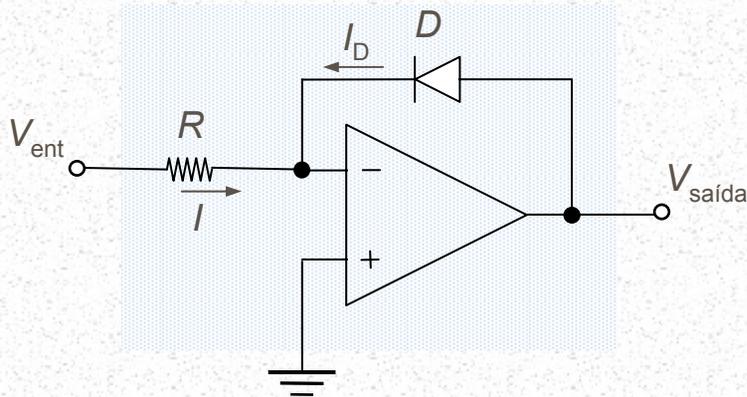
$T$  = temperatura absoluta (°K)

$m$  = constante empírica entre 1 e 2



## ■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

### ■ Amplificador logarítmico



Nota:  $V_{ent}$  deve ser  $< 0V$

$$\text{Para } a = \frac{mkT}{q} \quad (\approx 26mV \text{ para } T = 300^\circ K)$$

$$\text{e } V_D > 0$$

$$I_D \approx I_0 e^{\frac{V_D}{a}}$$

$$\rightarrow V_D \approx a \times \ln\left(\frac{I_D}{I_0}\right)$$

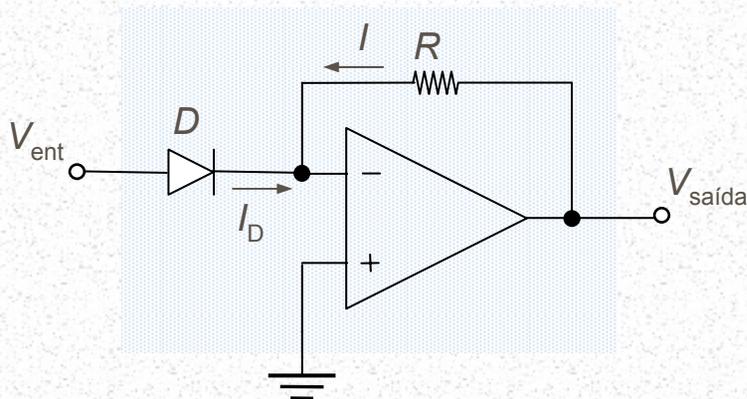
$$V_{saida} = V_D \approx a \times \ln\left(\frac{I_D}{I_0}\right)$$

$$I_D = -I = -\frac{V_{ent}}{R}$$

$$\text{Para } V_{ent} < 0,$$

$$\rightarrow V_{saida} \approx a \times \ln\left(\frac{|V_{ent}|}{RI_0}\right)$$

- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
  - Amplificador exponencial (ou anti-logarítmico)



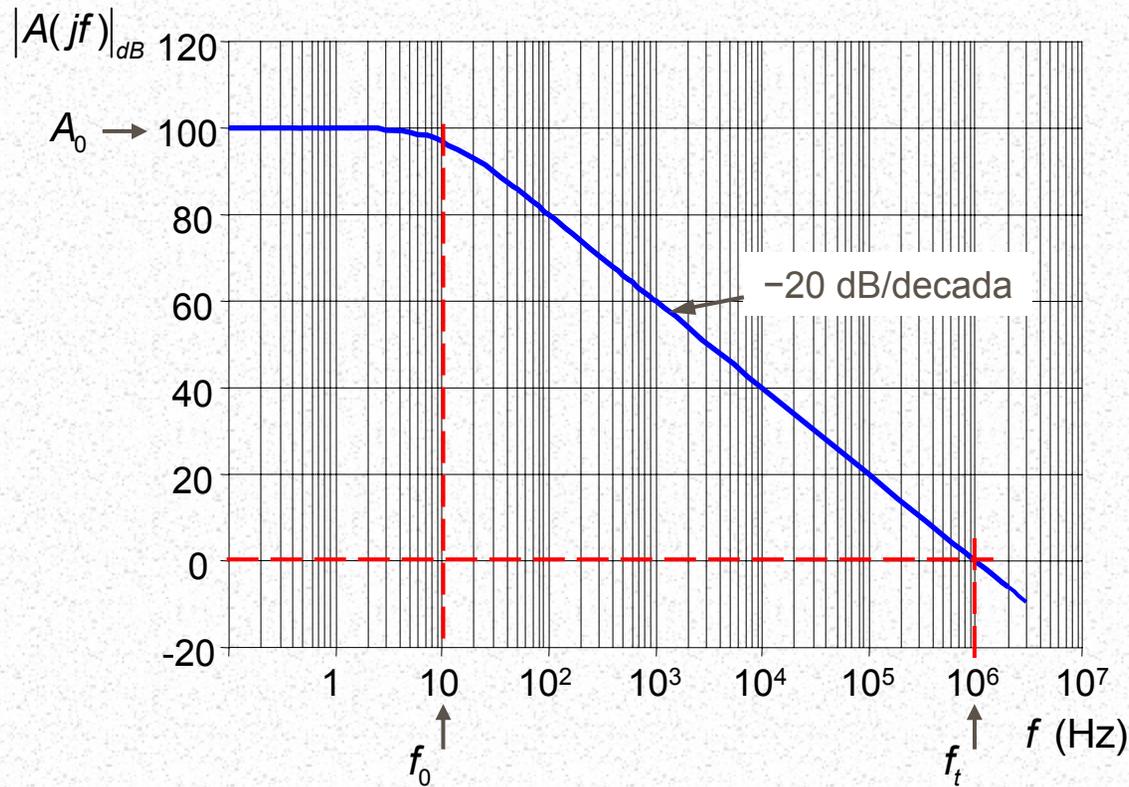
$$V_{ent} = V_D$$

$$I_D \approx I_0 e^{\frac{V_{ent}}{a}} = -I = -\frac{V_{saida}}{R}$$

$$\rightarrow V_{saida} = -R I_0 e^{\frac{V_{ent}}{a}}$$

Nota:  $V_{ent}$  deve ser  $> 0V$

- Efeito de um ganho e uma largura de banda finitos no desempenho do amplificador operacional (AmpOp)



$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

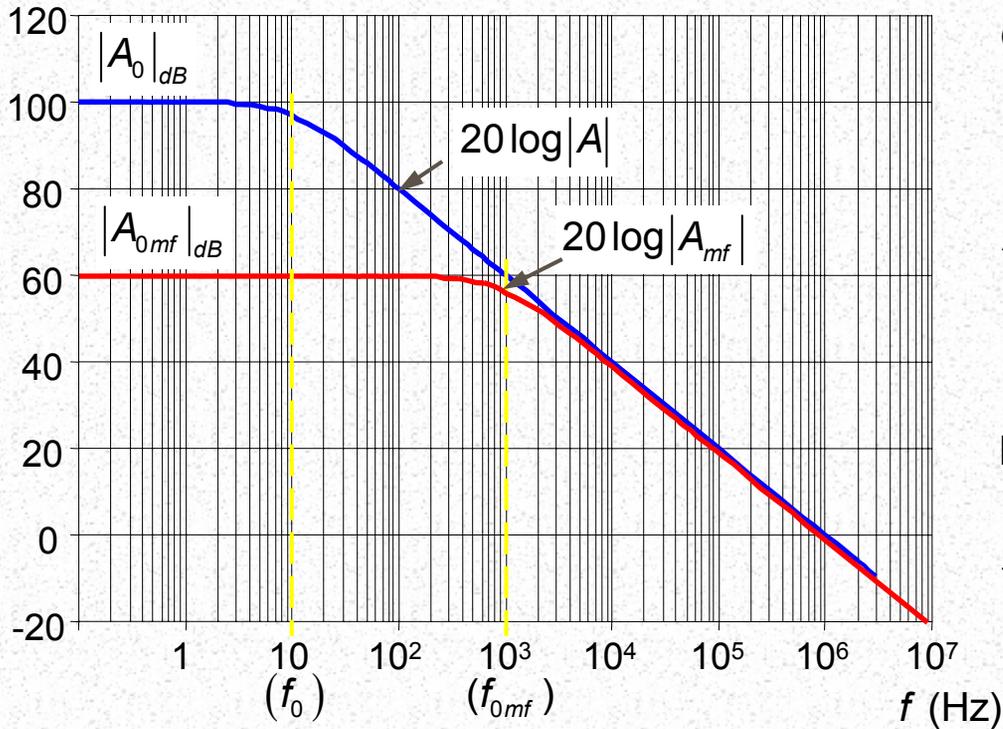
para  $f \gg f_0$ ,

$$|A(jf)| \approx A_0 \frac{f_0}{f}$$

para  $f_t = A_0 f_0$

$$\rightarrow |A(jf)| \approx 1 \quad (\text{ou } 0 \text{ dB})$$

Ganho em malha aberta de um AmpOp típico com compensação interna



Ganho em malha fechada do AmpOp

Ganho em malha fechada  $\rightarrow A_{mf} = \frac{A}{1 + AB}$

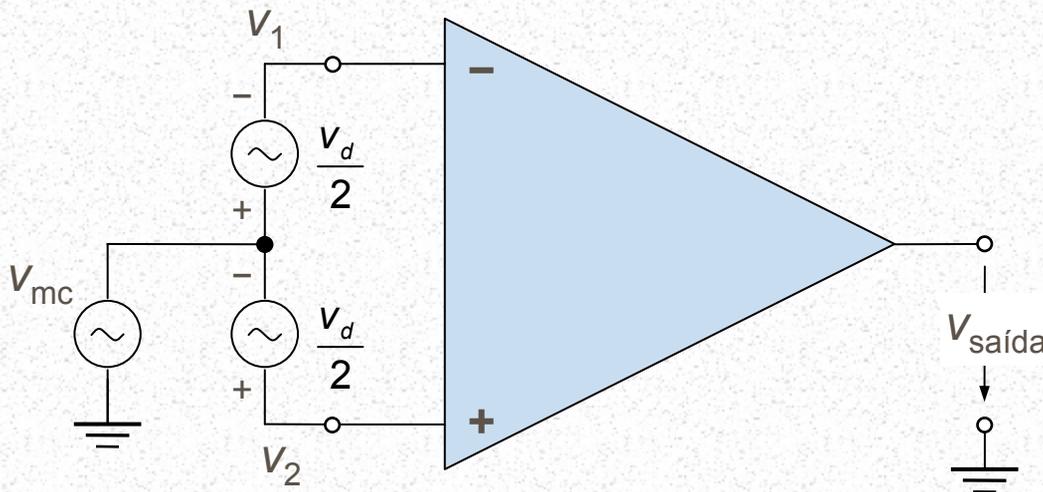
$$A_{mf} = \frac{\frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_0}}}{1 + \frac{A_0 B}{1 + j \frac{f}{f_0}}} = \frac{A_0}{1 + A_0 B + j \frac{f}{f_0}}$$

para  $A_0 B \gg 1$ ,  $A_{0mf} = \frac{1}{B}$ ,  $f_{0mf} = f_0 \frac{A_0}{A_{0mf}}$

$$\rightarrow A_{mf} \approx \frac{A_{0mf}}{1 + j \frac{f}{f_{0mf}}}$$

$$A_{0mf} f_{0mf} = A_0 f_0$$

## ■ Razão de rejeição do modo comum (*CMRR*)



$$V_{saida} = A_d V_d + A_{mc} V_{mc}$$

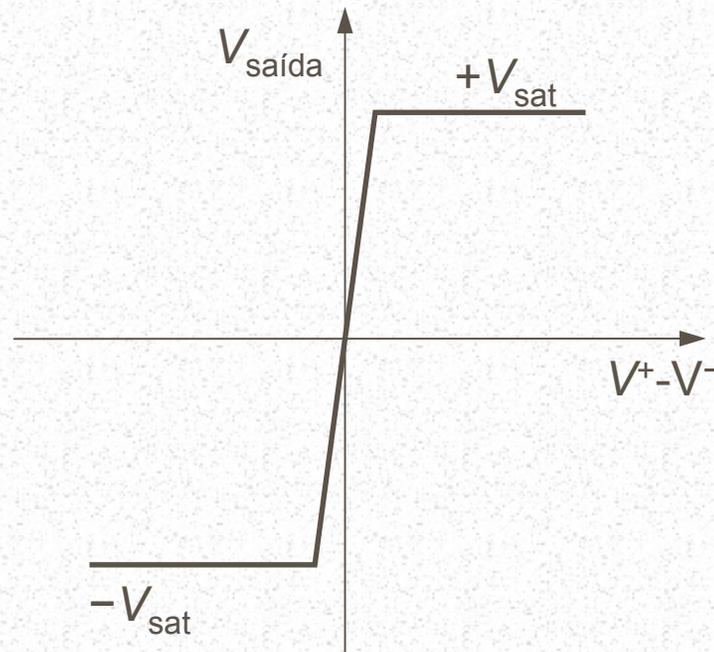
$$\rightarrow CMRR = 20 \log \left( \frac{A_d}{A_{mc}} \right) \quad (dB)$$

$$V_{mc} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \rightarrow \text{entrada de modo comum}$$

$$V_d = V_2 - V_1 \quad \rightarrow \text{entrada diferencial}$$

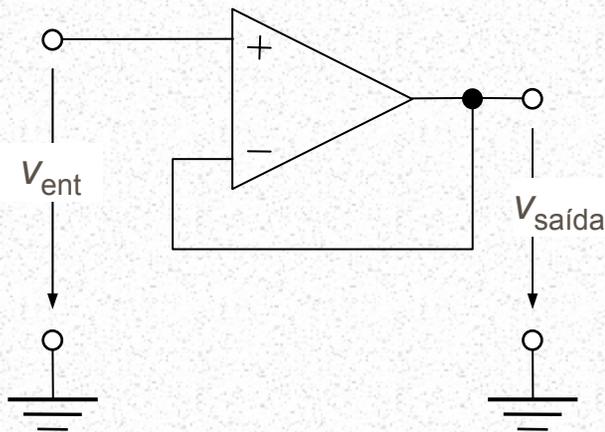
$$V_1 = V_{mc} - \frac{V_d}{2}, \quad V_2 = V_{mc} + \frac{V_d}{2}$$

- Limitações do AmpOp para grandes sinais
  - Saturação da saída

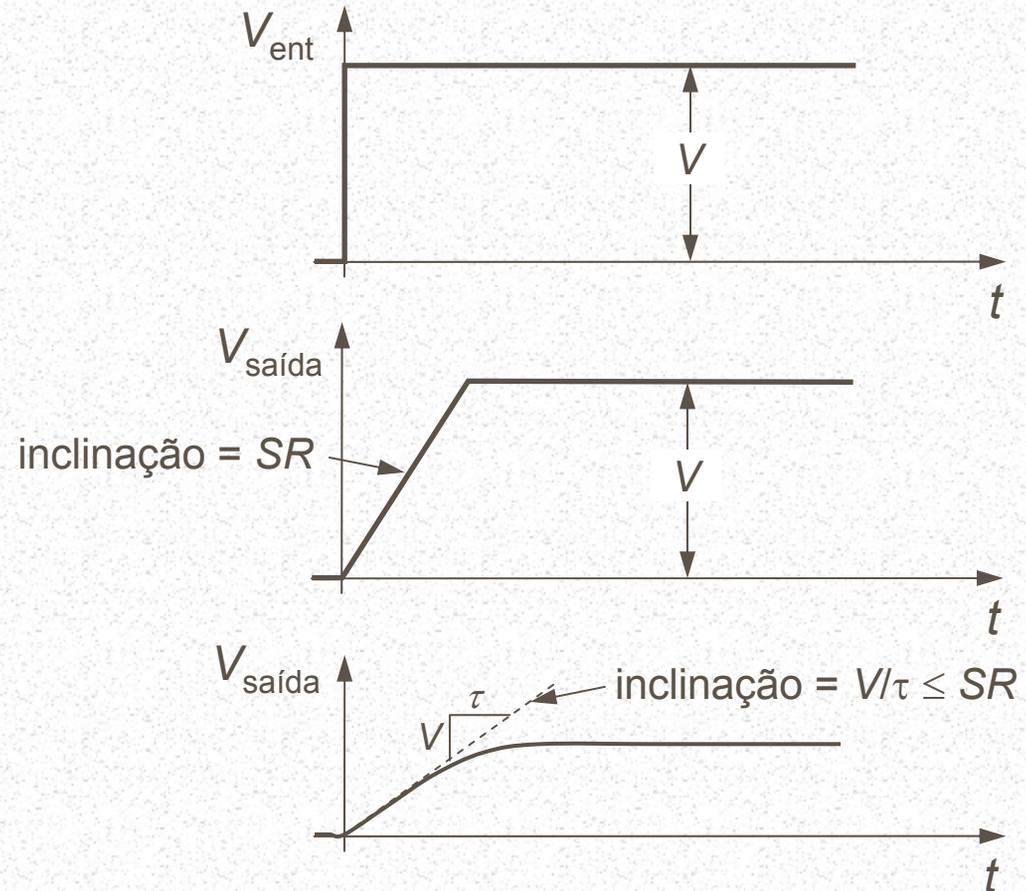


## ■ Limitações do AmpOP para grandes sinais

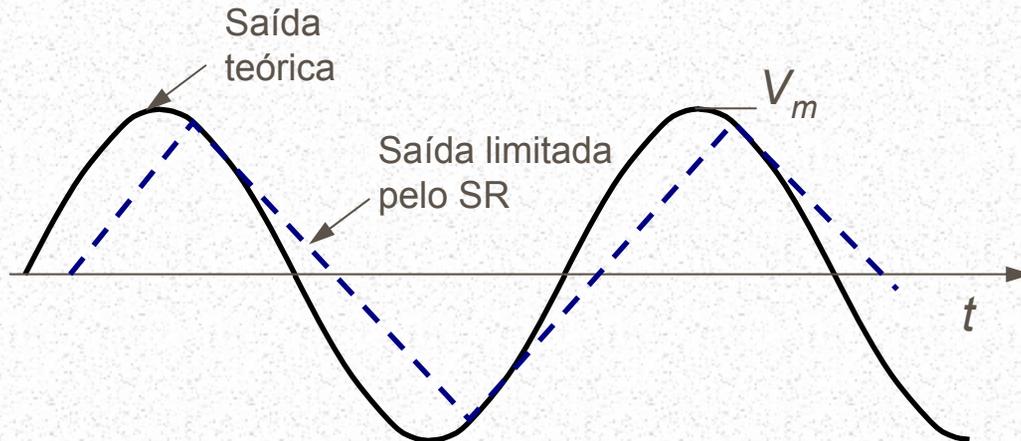
### ■ Slew rate



$$SR = \left. \frac{dV_{saída}}{dt} \right|_{\max} \quad (V / \mu s)$$



- Limitações do AmpOP para grandes sinais
  - Largura de banda de potência



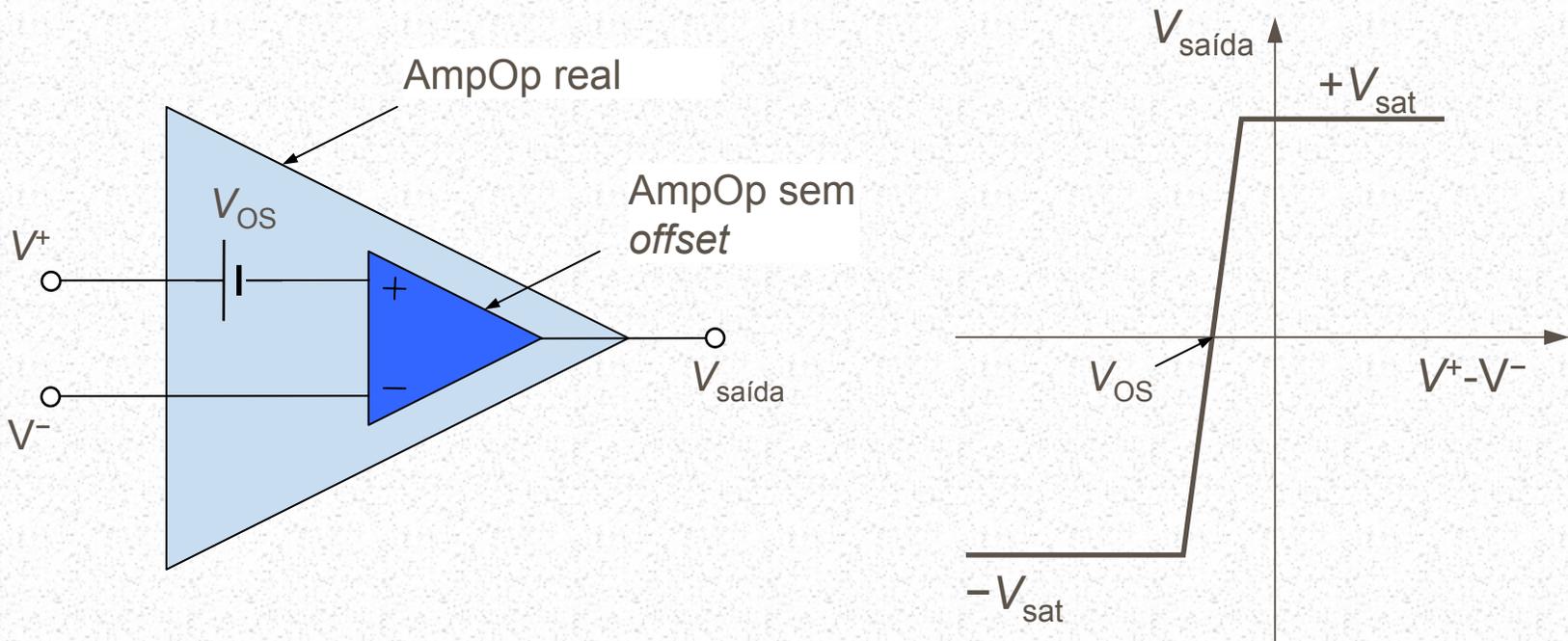
$$V_{ent} = V_m \text{ sen}(\omega t)$$

$$\frac{dV_{ent}}{dt} = \omega V_m \text{ cos}(\omega t)$$

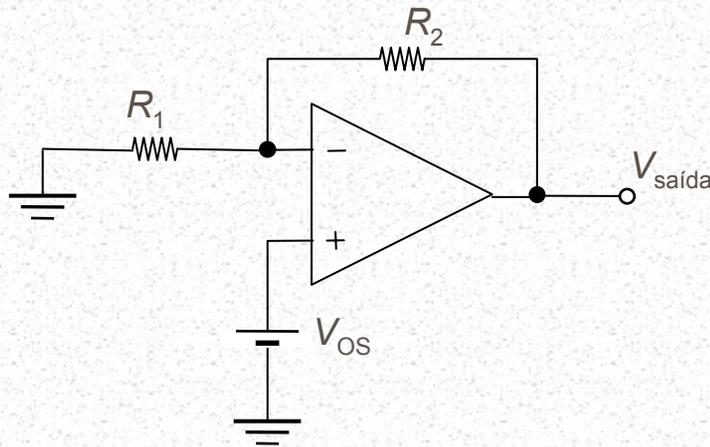
$$\omega_{\max} V_m = SR$$

$$\rightarrow f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_m}$$

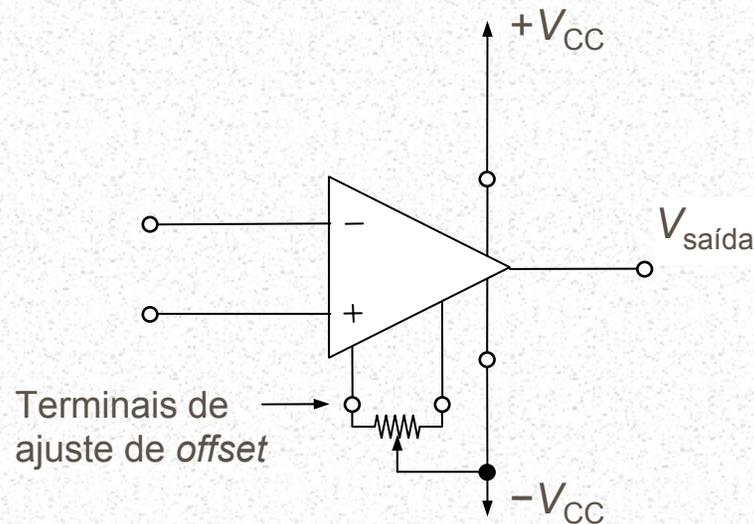
- “Imperfeições” de AmpOP para corrente contínua
  - Tensão de *offset* na entrada ( $V_{OS}$ )



## Efeito da tensão de *offset* na saída

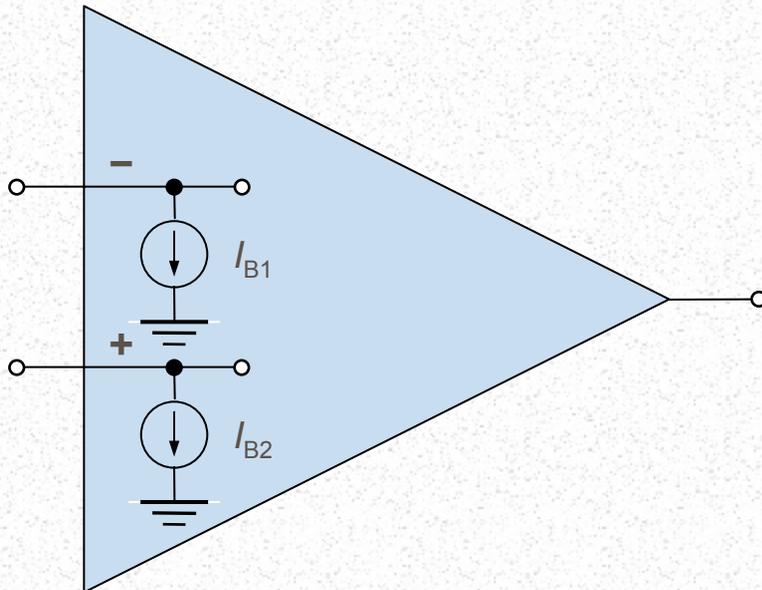


$$V_{saída} = V_{OS} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



## ■ Imperfeições de AmpOp para corrente contínua

### ■ Corrente de entrada de polarização



$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

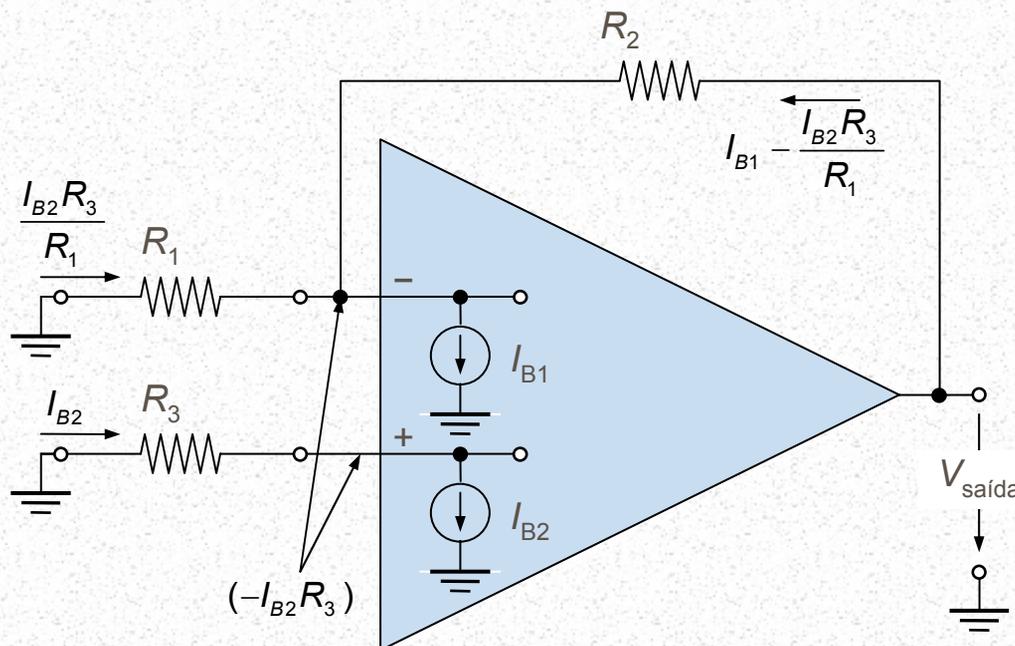
→ Corrente de entrada de polarização

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

→ Corrente de *offset* na entrada

## ■ Imperfeições de AmpOP para corrente contínua

### ■ Corrente de entrada de polarização



$$V_{saida} = -I_{B2}R_3 + R_2 \left( I_{B1} - I_{B2} \frac{R_3}{R_1} \right)$$

Se  $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ ,

$$V_{saida} = I_B \left[ R_2 - R_3 \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right]$$

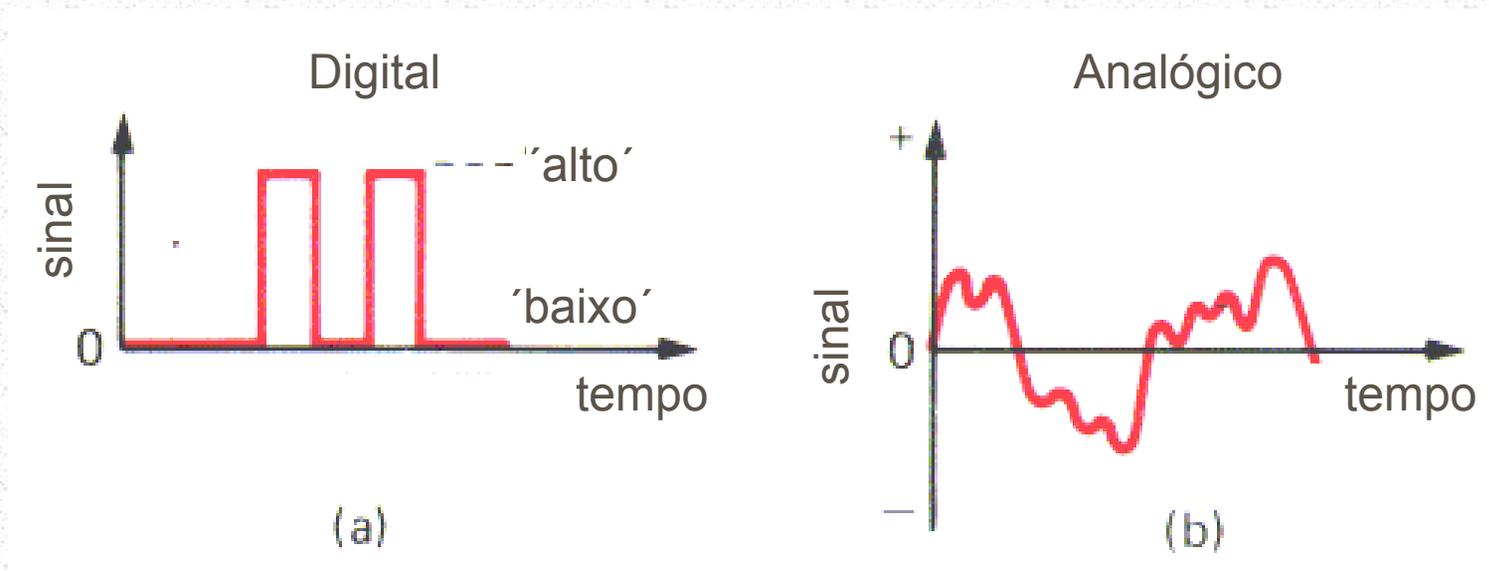
Para fazer  $V_{saida} = 0$ ,

$$\rightarrow R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 // R_2$$

Se  $R_3 = R_1 // R_2$  e  $I_{B1} \neq I_{B2}$ ,

$$\rightarrow V_{saida} = I_{OS} R_2$$

## ■ Conceitos Básicos



## ■ Sinais analógicos e digitais

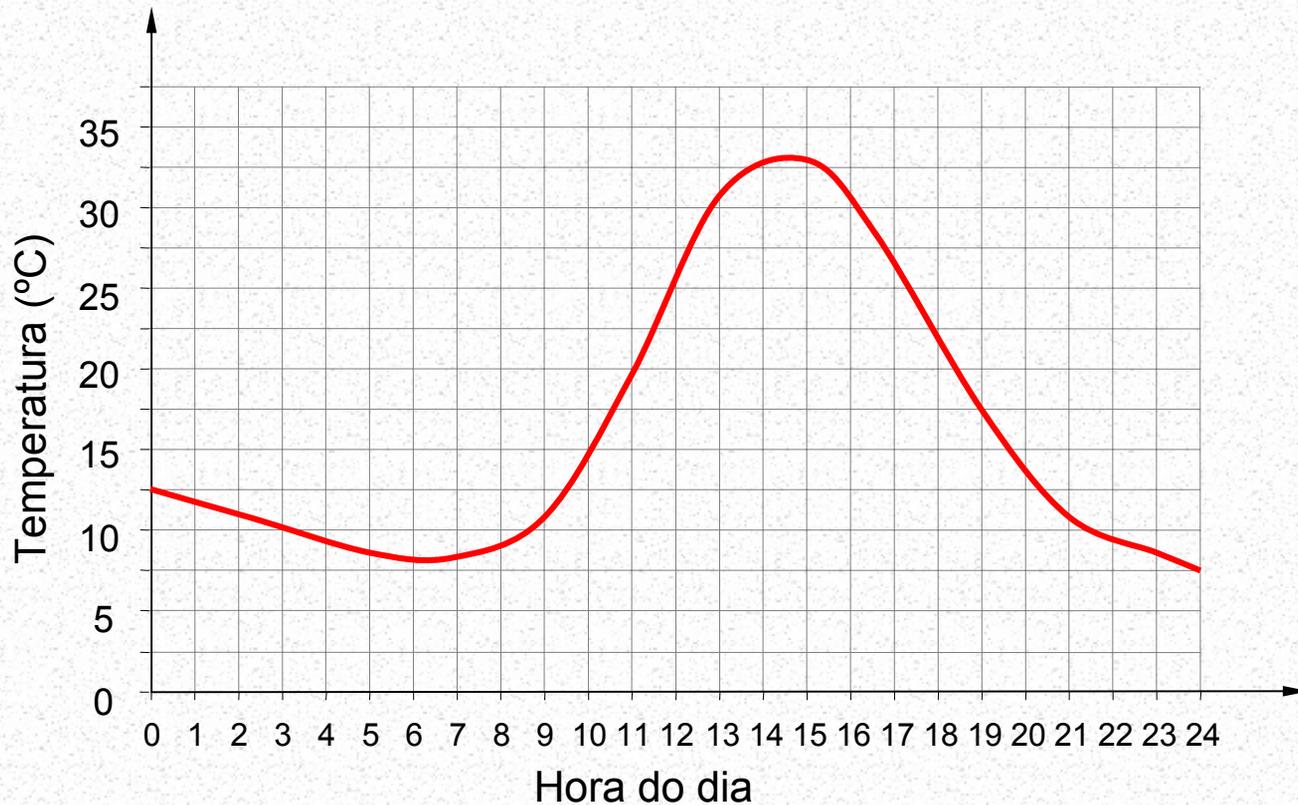
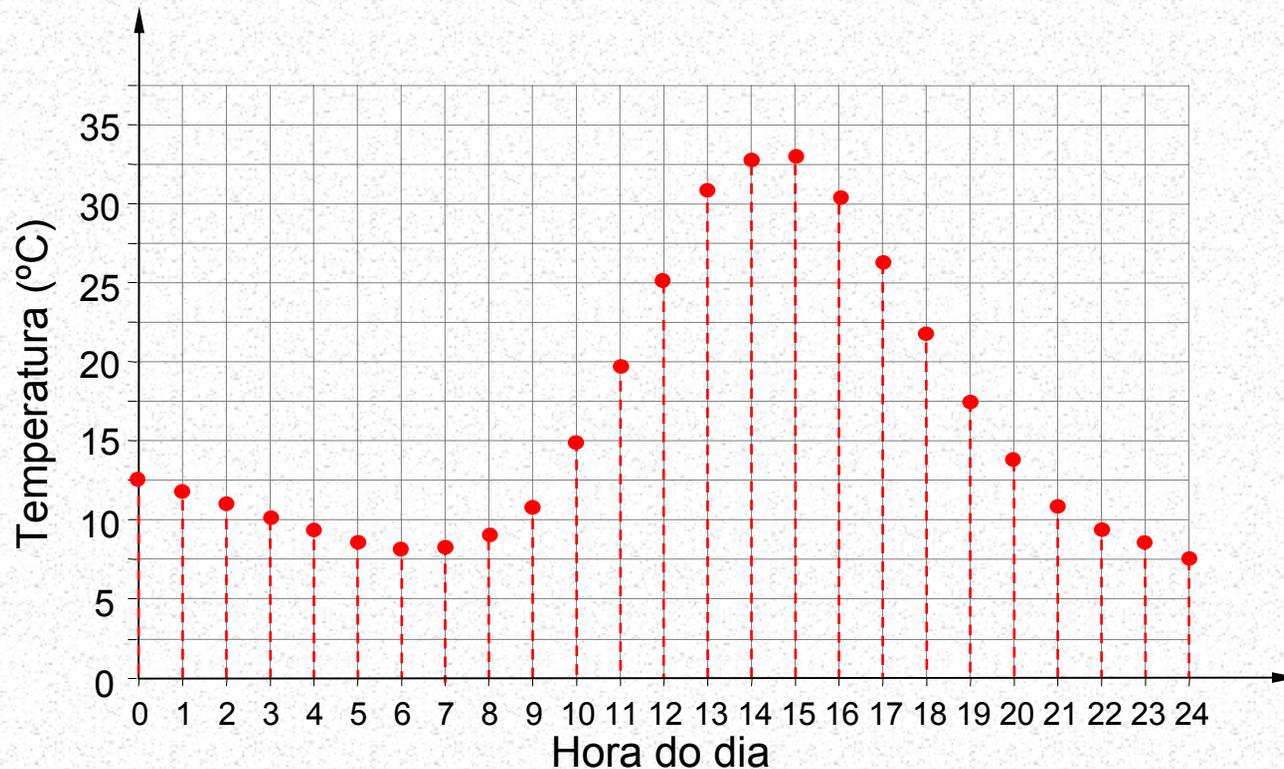


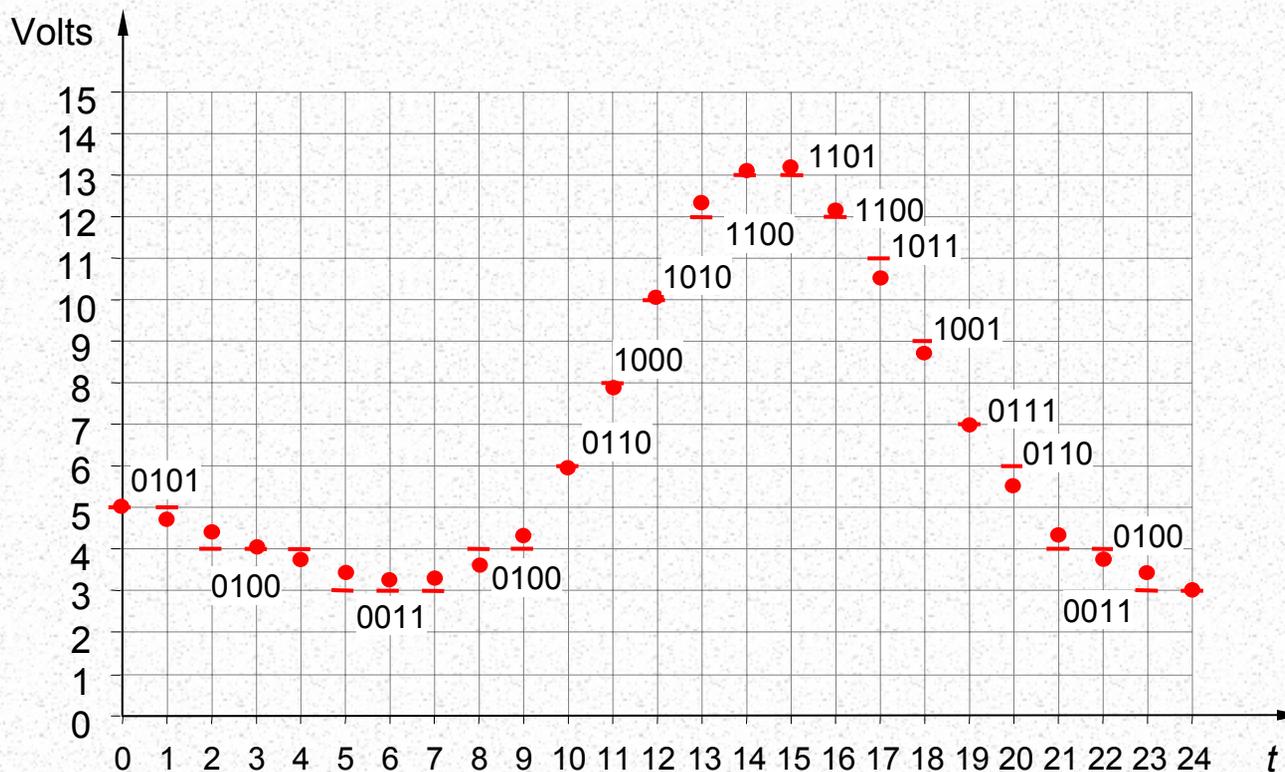
Gráfico de uma grandeza analógica (temperatura *versus* tempo)

## ■ Sinais analógicos e digitais



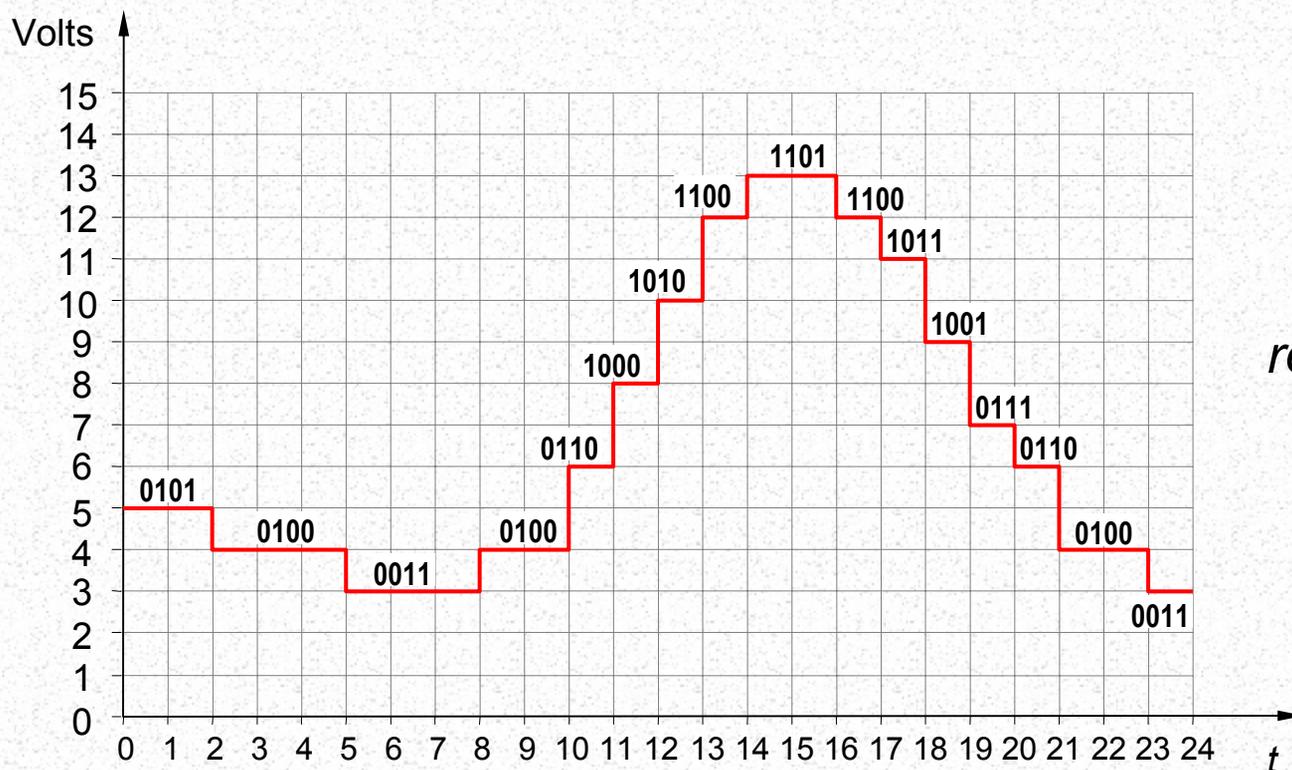
Valores amostrados da do sinal analógico. Cada ponto pode agora ser digitalizado (representado pela palavra de um código binário)

## ■ Sinais analógicos e digitais



Representação digital dos pontos resultantes da discretização de uma curva analógica

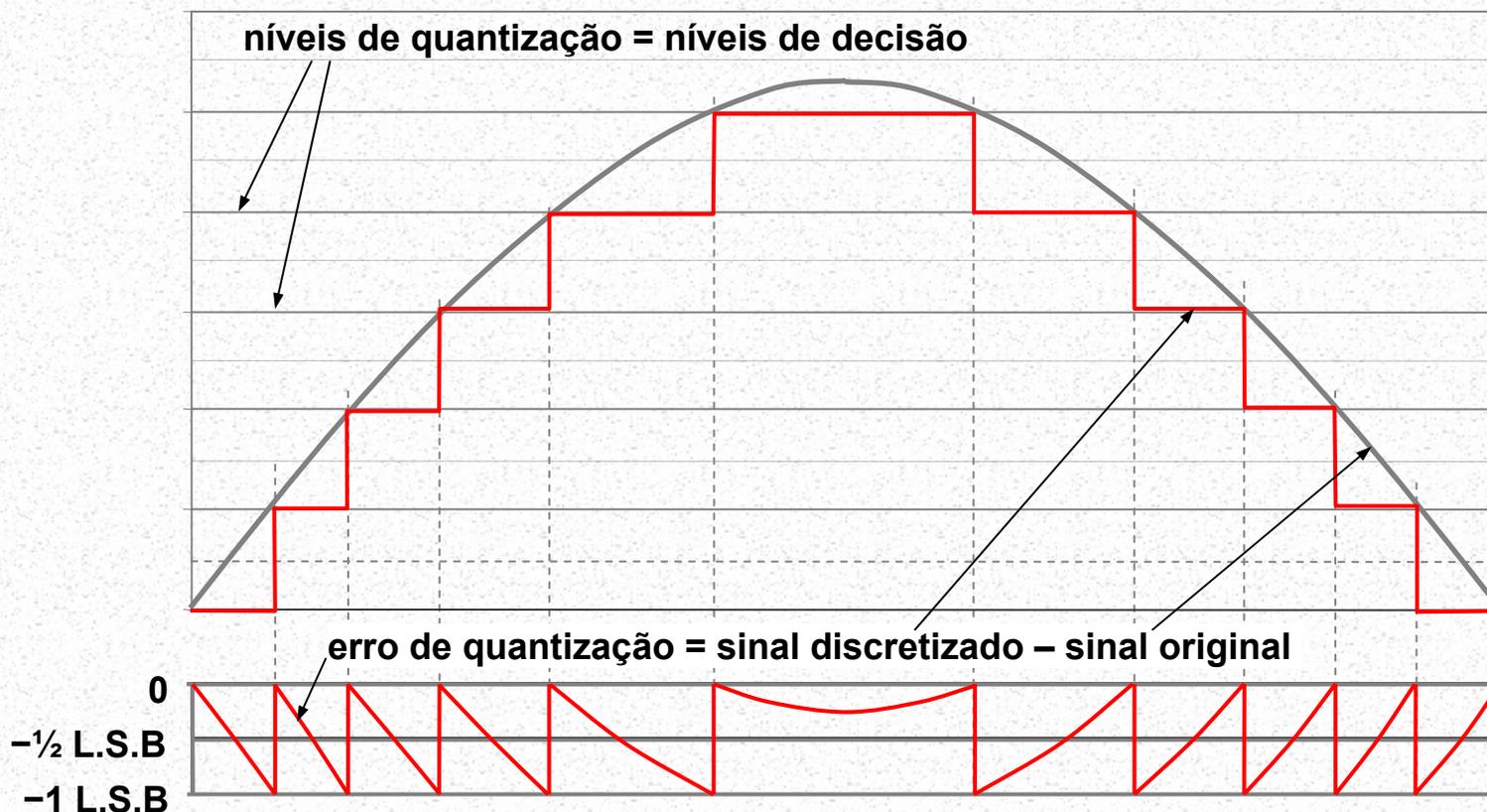
## ■ Sinais analógicos e digitais



$$resolução = \frac{V_{REF}}{2^{nbits} - 1}$$

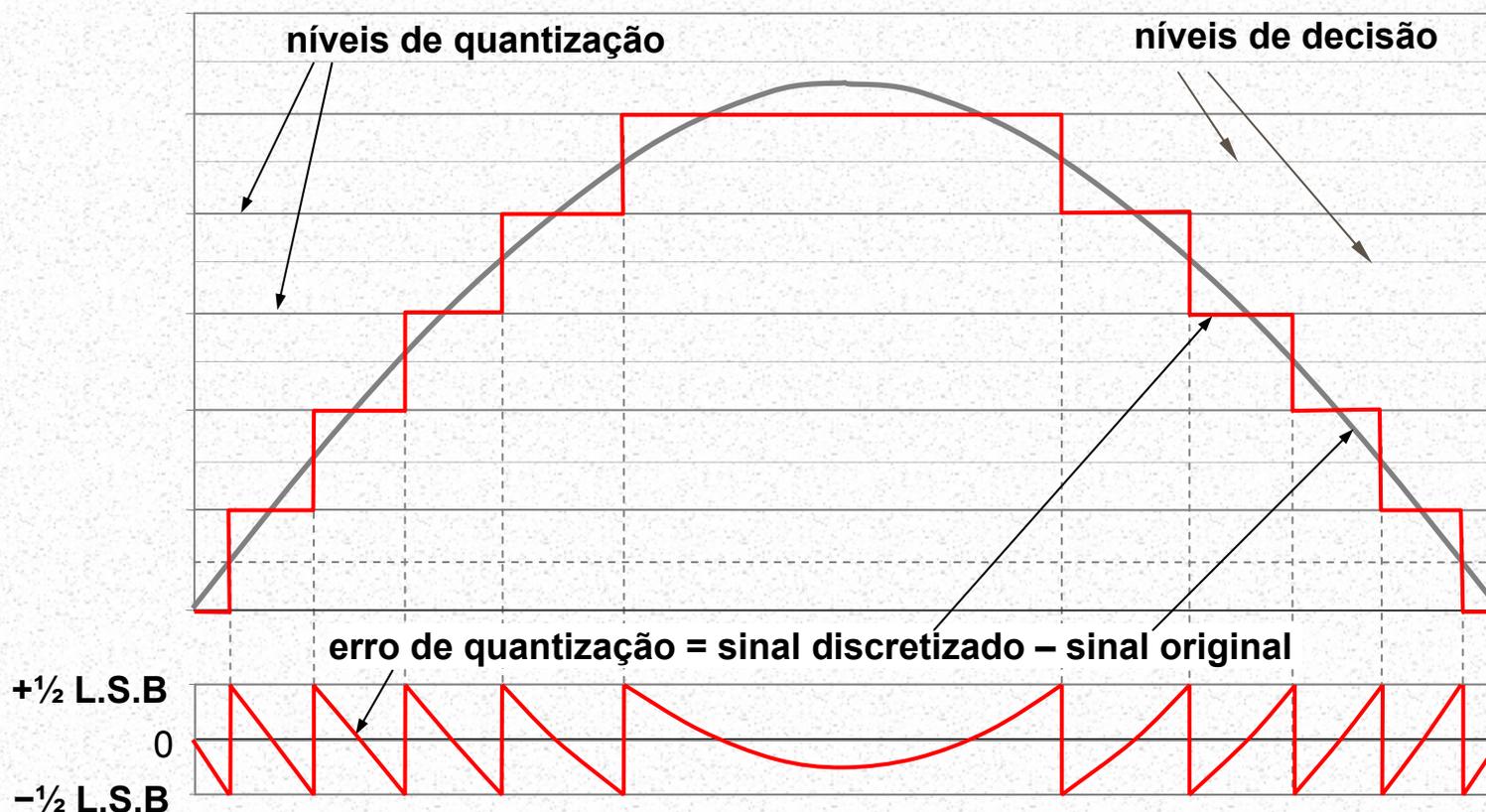
Reprodução digital da curva analógica

## ■ Sinais analógicos e digitais



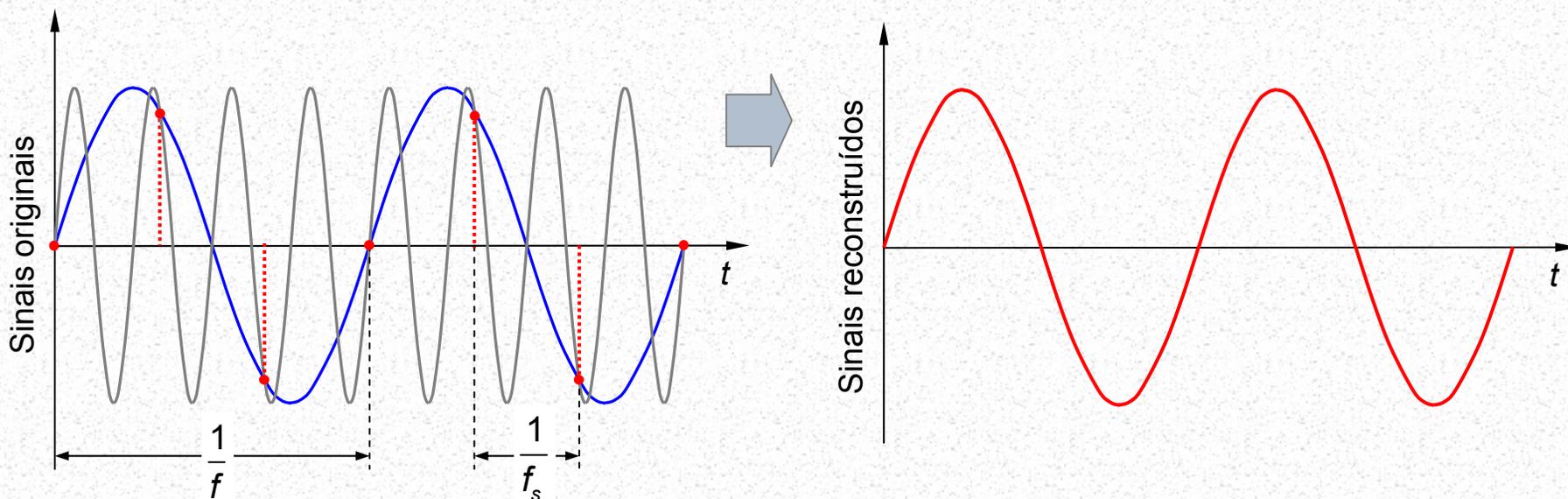
Erro de quantização para iguais níveis de discretização e decisão

## ■ Sinais analógicos e digitais



Erro de quantização para níveis de discretização e decisão distantes de  $\frac{1}{2}$  L.S.B.

## Teorema de *Nyquist*



$$f_s = 2 \times f$$



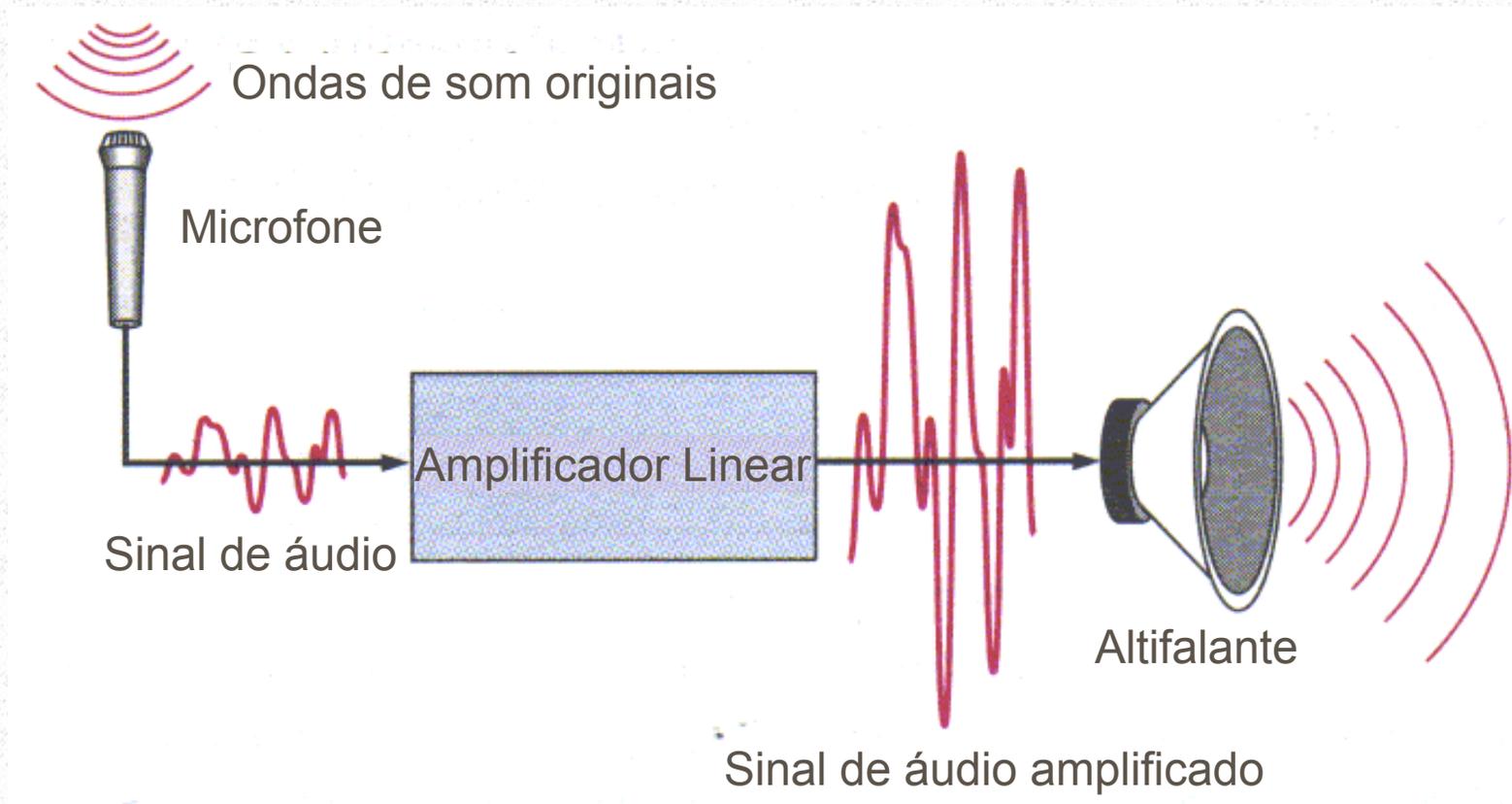
# Outros Componentes e Subsistemas



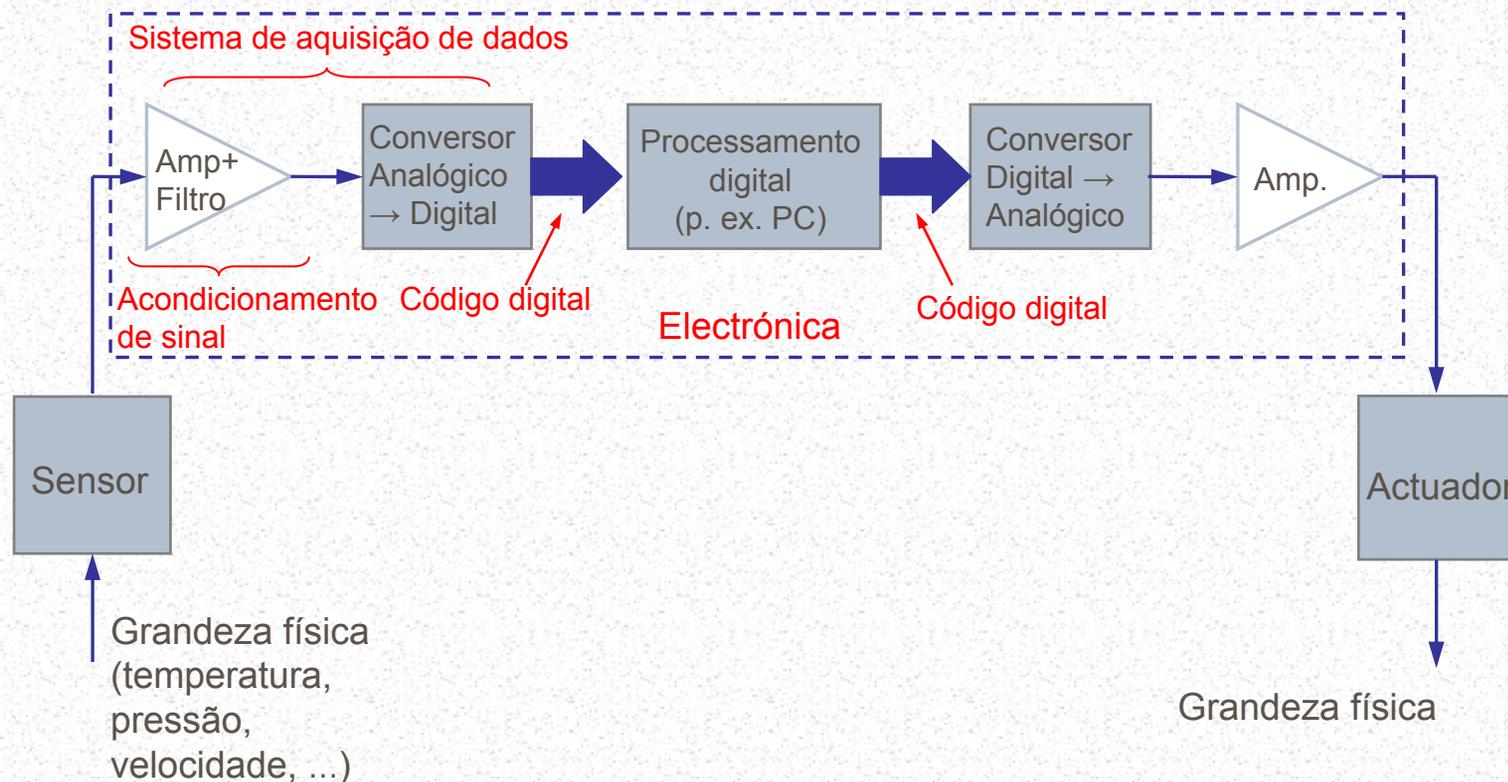
Escola de Engenharia  
Universidade do Minho  
Departamento de  
Electrónica Industrial

| <b>Sinal</b> | $f_{\max}$ | $f_s$    | <b>nº de bits</b> |
|--------------|------------|----------|-------------------|
| Telefónico   | 3500 Hz    | 8000 Hz  | 8 bits            |
| HI-FI        | 16000 Hz   | 32000 Hz | 16 bits           |
| Vídeo        | 2 MHz      | 4 MHz    | 16 bits           |

## ■ Processamento digital de informação



## ■ Processamento digital de informação



Sistema electrónico para processamento digital de informação

## ■ Processamento digital de informação

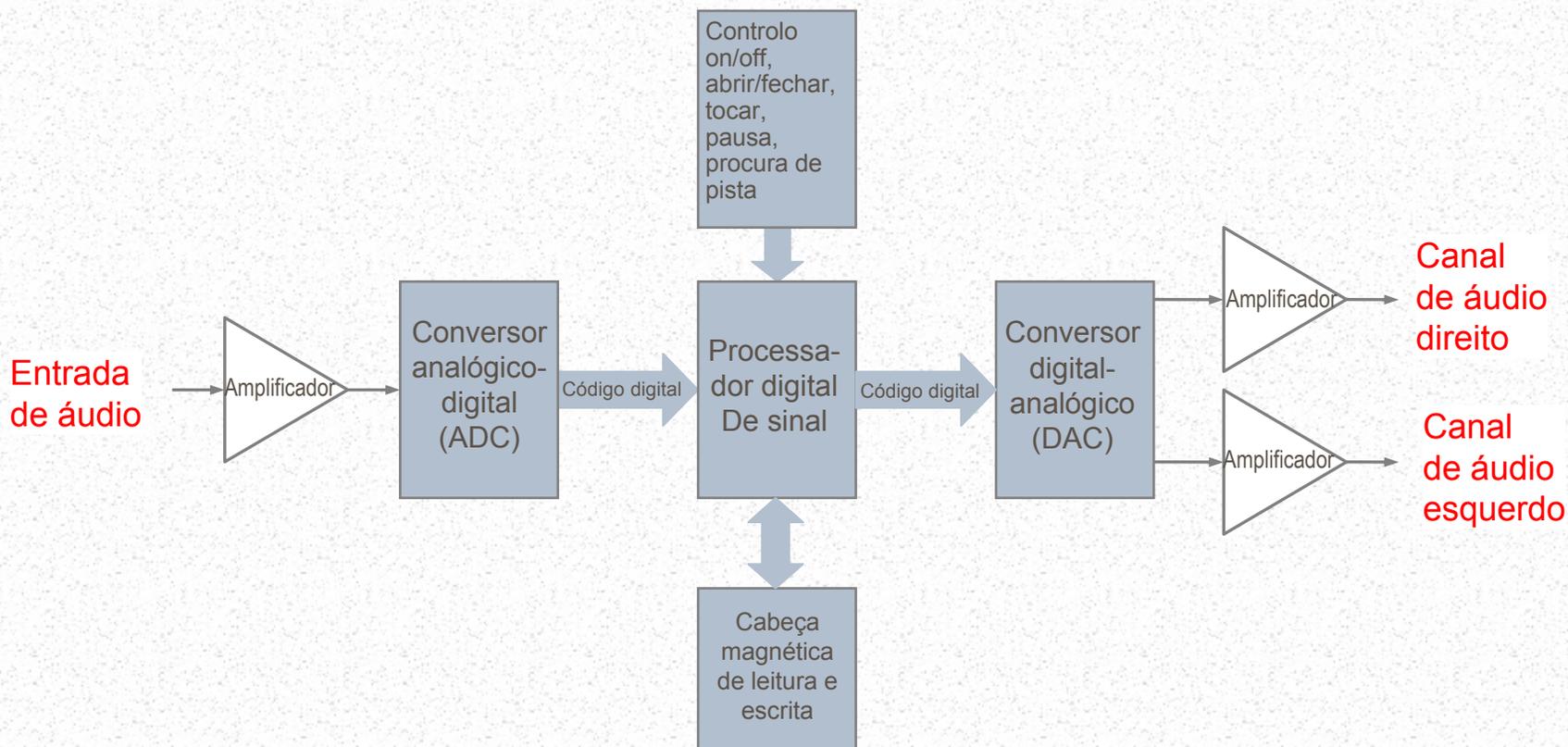
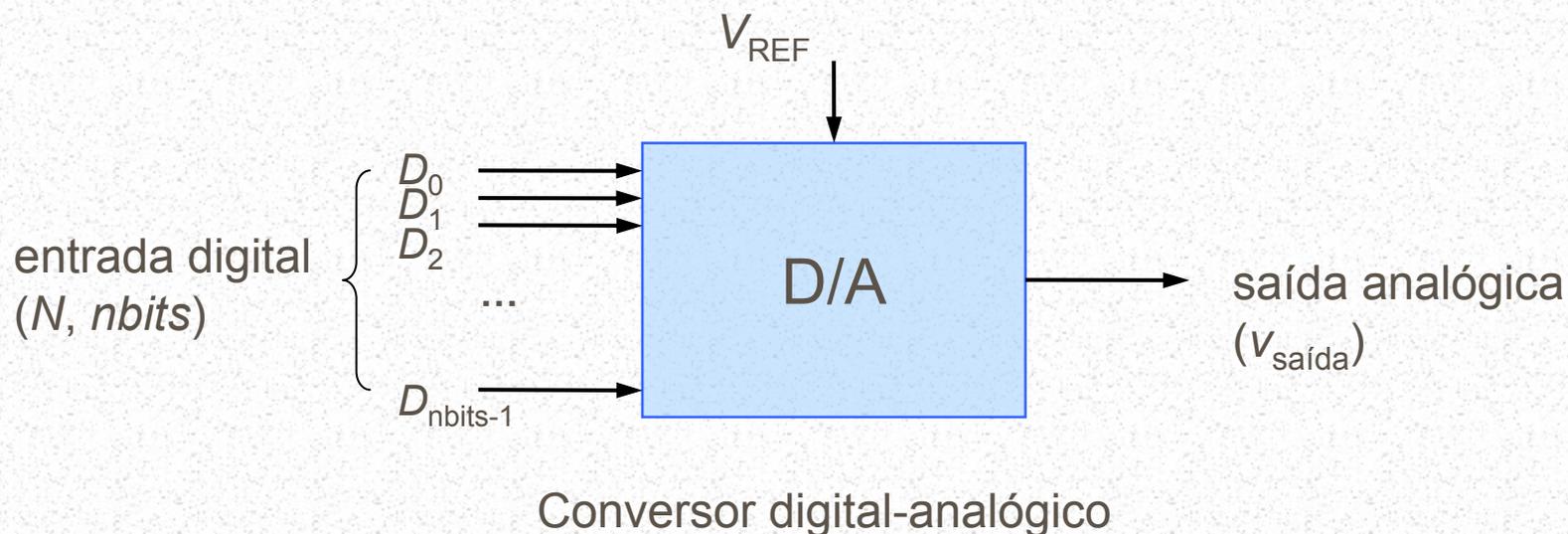
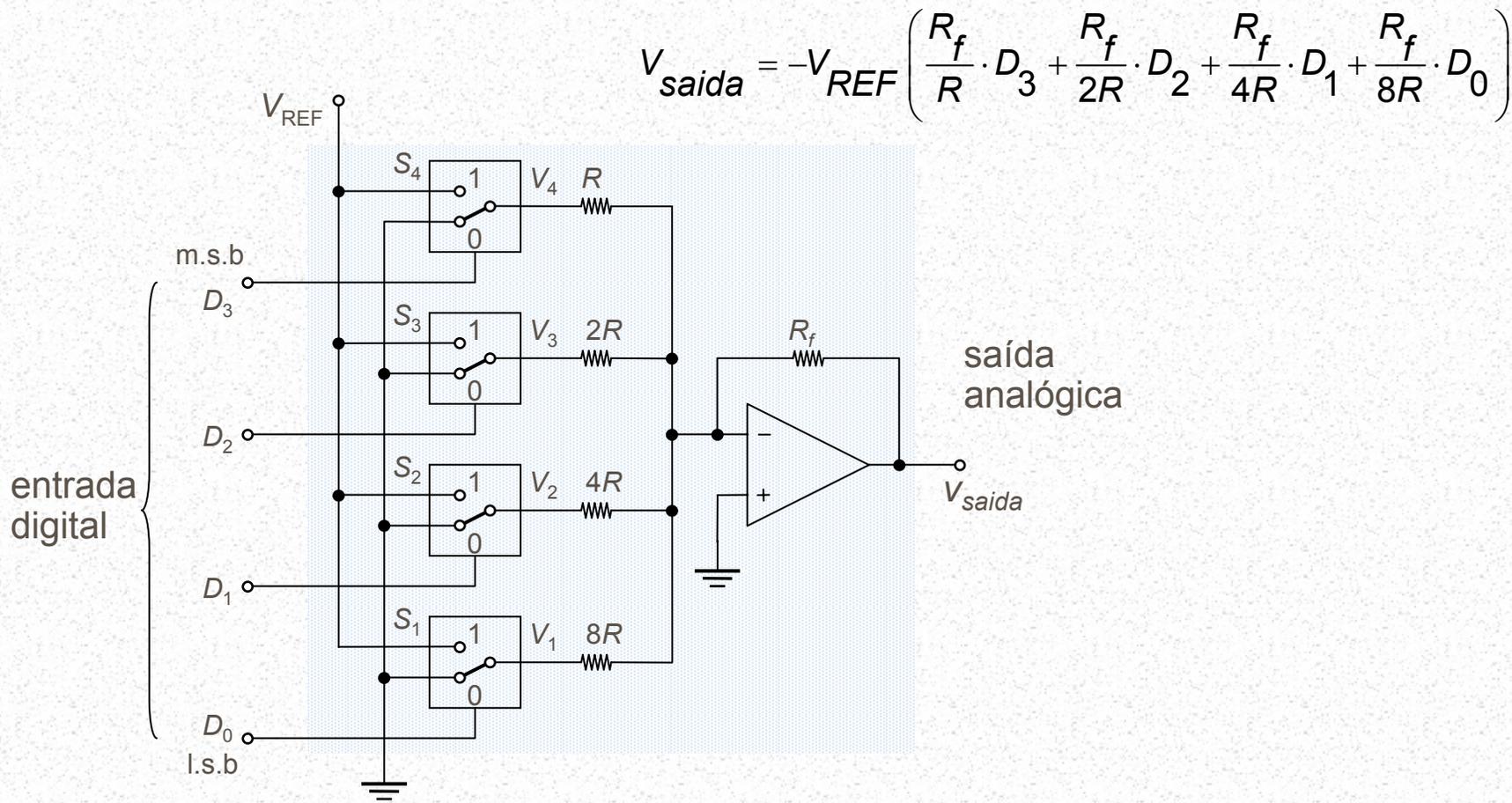


Diagrama de blocos de um sistema DAT (gravador de áudio digital)

## ■ Conversão digital → analógico

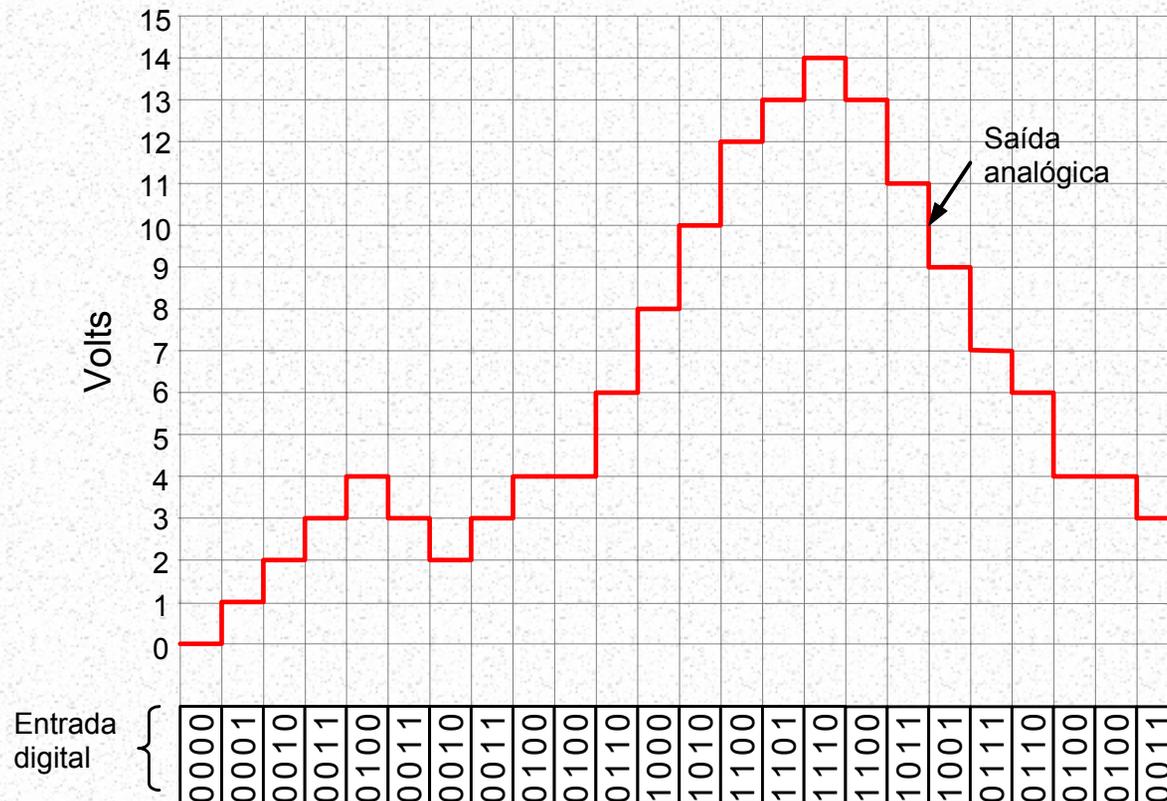


$$v_{saida} = \frac{V_{REF}}{2^{nbits} - 1} \cdot N$$



Conversor digital-analógico de 4 bits

## ■ Conversão digital → analógico

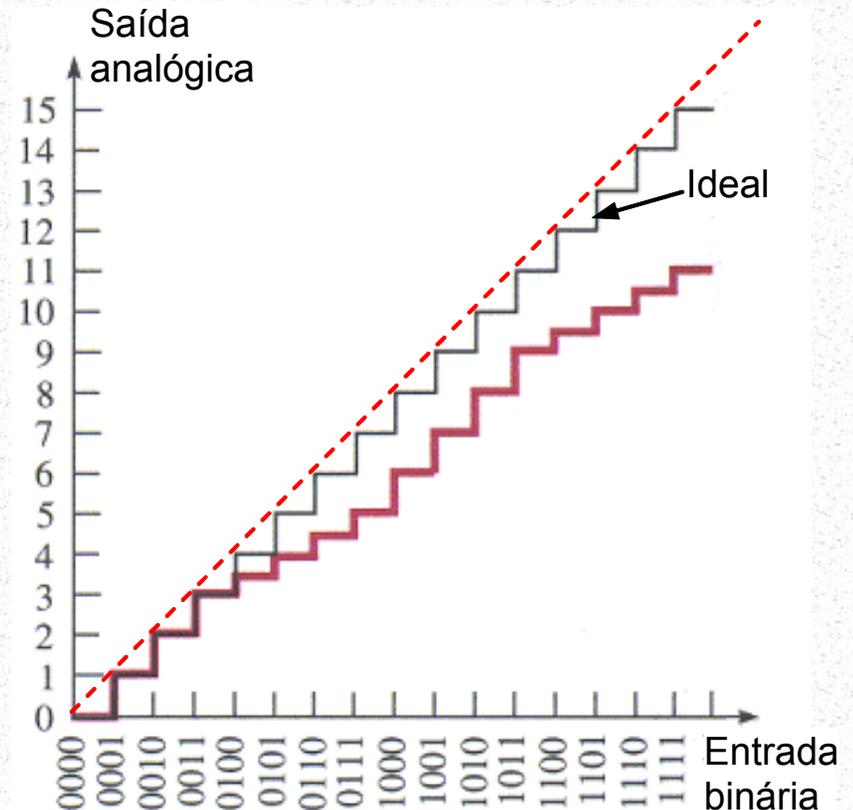


Saída de um conversor digital-analógico de 4 bits

## ■ Características de desempenho de conversores D/A

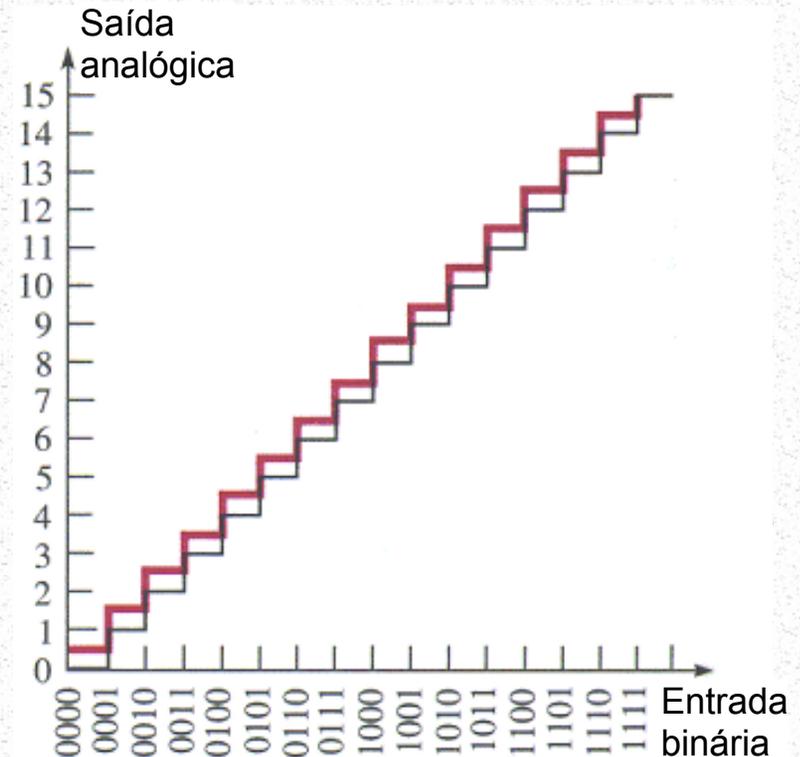
- **Resolução.** A resolução de um A/D é o inverso do número máximo de degraus da saída. Para um A/D de  $n$  bits a resolução referida à entrada é  $1/(2^n-1)$ . Referida à saída a resolução é  $V_{REF}/(2^n-1)$ , onde  $V_{REF}$  corresponde ao fim de escala do D/A. A resolução pode também exprimir-se através da especificação do número de bits que são convertidos (diz-se p. ex. que um D/A tem uma resolução de 8 bits significando que a resolução é  $1/255 = 0.0039$ ).
- **Precisão.** A precisão é uma medida da diferença entre a saída esperada e a saída real do D/A. Exprime-se como uma percentagem de um fim de escala (ou valor máximo). se, p. ex. um conversor possui como fim de escala uma saída de 10 V e tem uma precisão de 0.1%, então o maior erro que ocorre na saída é  $(0.001)(10 \text{ V}) = 10 \text{ mV}$ . Idealmente a precisão deve corresponder, quando muito, a  $\pm 1/2$  do LSB (bit menos significativo). Para um conversor de 8 bits, p. ex.,  $1 \text{ LSB} = 0.0039$ , pelo que a precisão deve ser melhor do que  $\pm 0.195\%$  do fim de escala.

- **Características de desempenho de conversores D/A**
  - **Linearidade.** Tem a ver com o desvio de uma recta ideal da saída do conversor D/A. Na prática alguns códigos binários não produzem na saída degraus com a amplitude esperada.



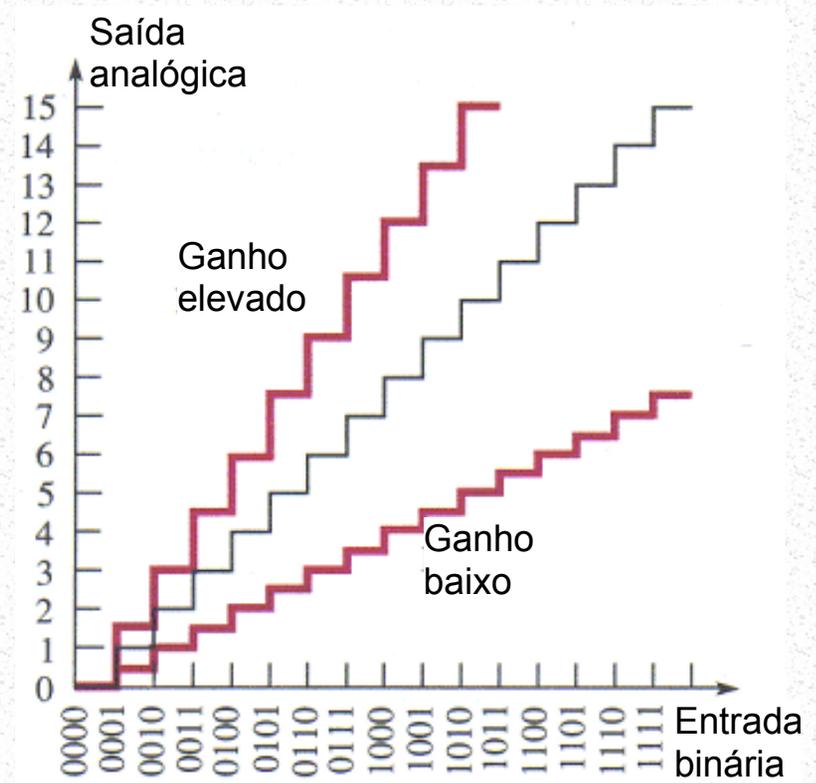
(a) Não-linearidade diferencial (a cor)

- **Características de desempenho de conversores D/A**
  - **Erro de Offset.** É o erro que ocorre pelo facto da tensão de saída do conversor ser diferente de zero quando todos os bits de entrada são iguais a zero. Note-se que o erro é mesmo para todos os valores convertidos.



(b) Erro de *offset* (a cor)

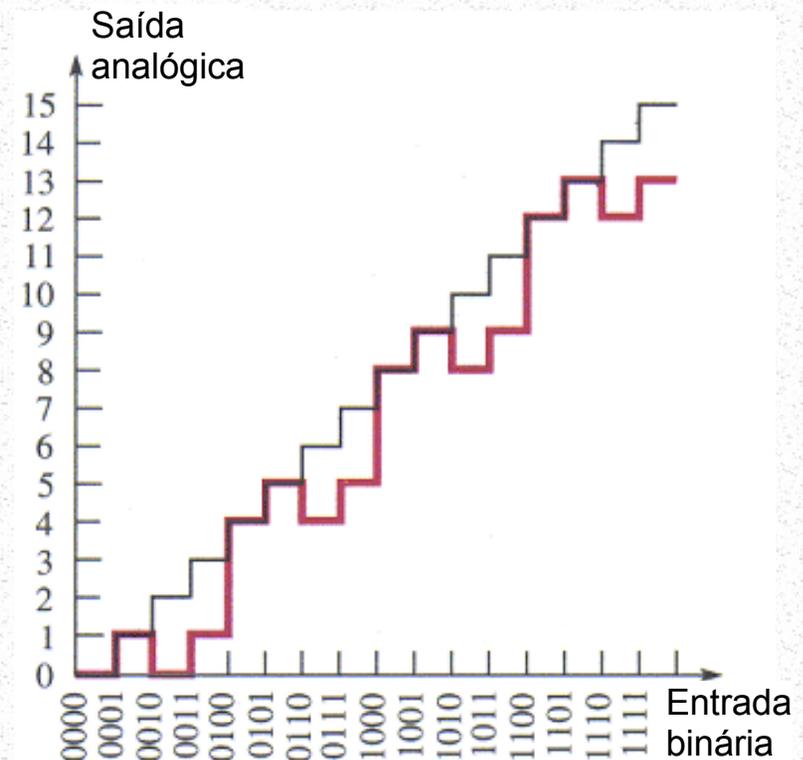
- **Características de desempenho de conversores D/A**
  - ***Ganho baixo ou elevado.*** A figura ilustra os erros introduzidos na saída como resultado de um ganho desajustado. No caso de um ganho baixo a amplitude dos degraus é inferior ao ideal. No caso de um ganho elevado a amplitude dos degraus é inferior ao ideal.



(c) Ganhos elevado e baixo (a cor)

## ■ Características de desempenho de conversores D/A

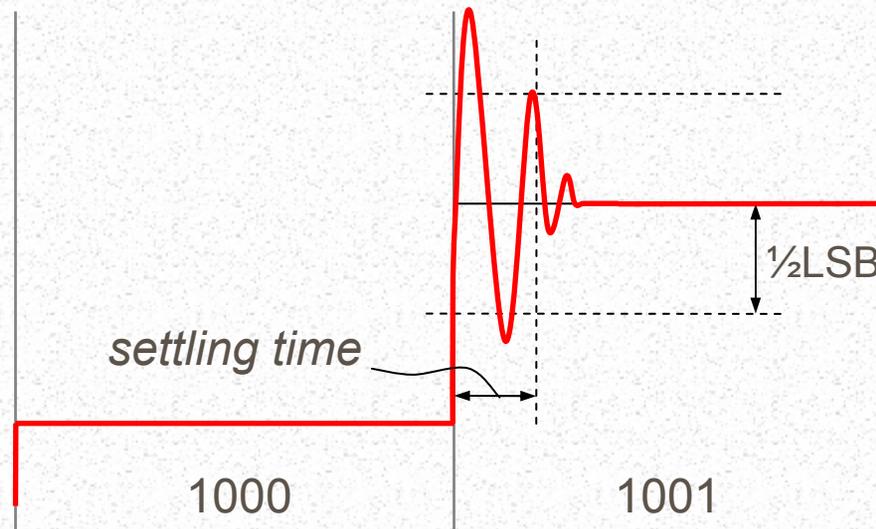
- **Monotonicidade.** Um D/A diz-se *monotónico* se, para uma sequência cobrindo toda a gama de entradas, a saída não apresenta nenhuma inversão de passos (figura 4.147 (d)).



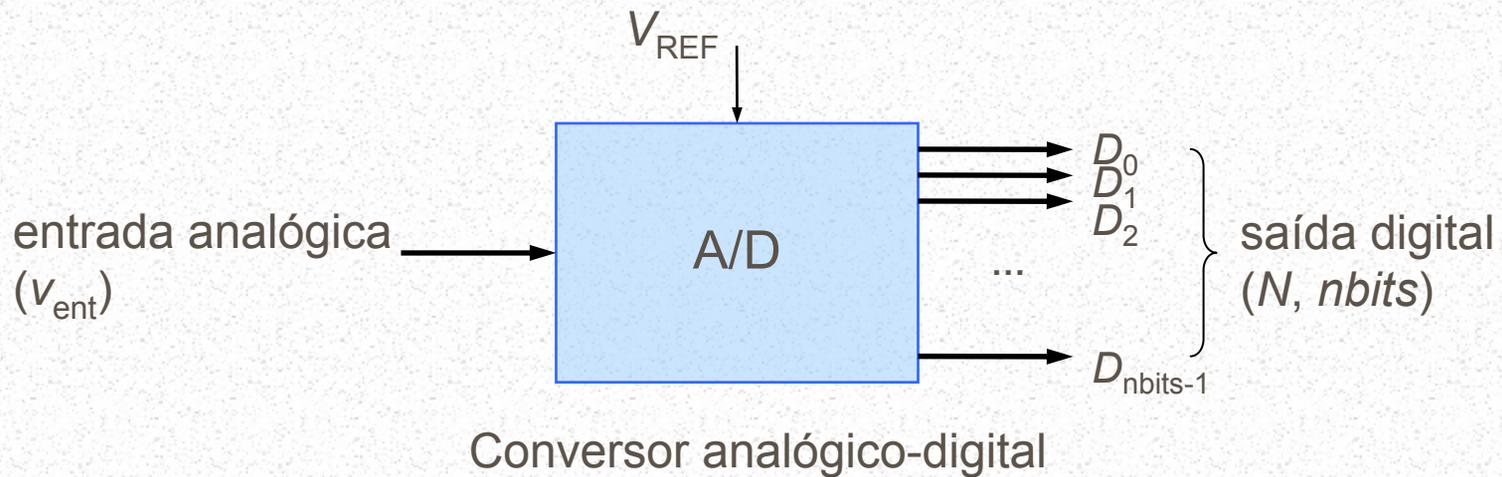
(d) Saída não-monotónica (a cor)

## ■ Características de desempenho de conversores D/A

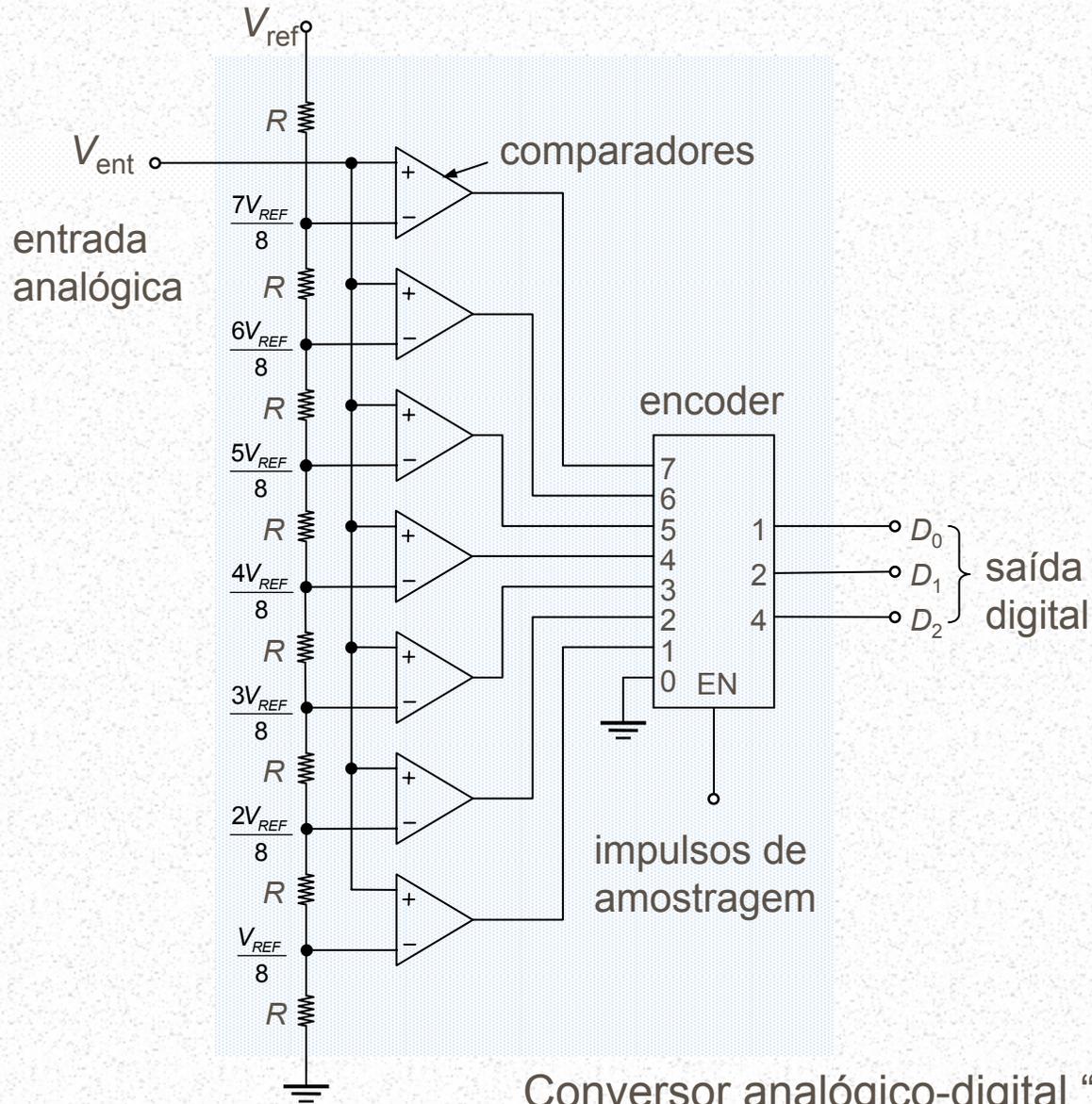
- **Settling time.** É o tempo que a saída do D/A demora a estabilizar dentro de uma gama correspondente a  $\pm 1/2$  do LSB quando ocorre uma alteração na entrada (figura 4.148).



## ■ Conversão analógico → digital

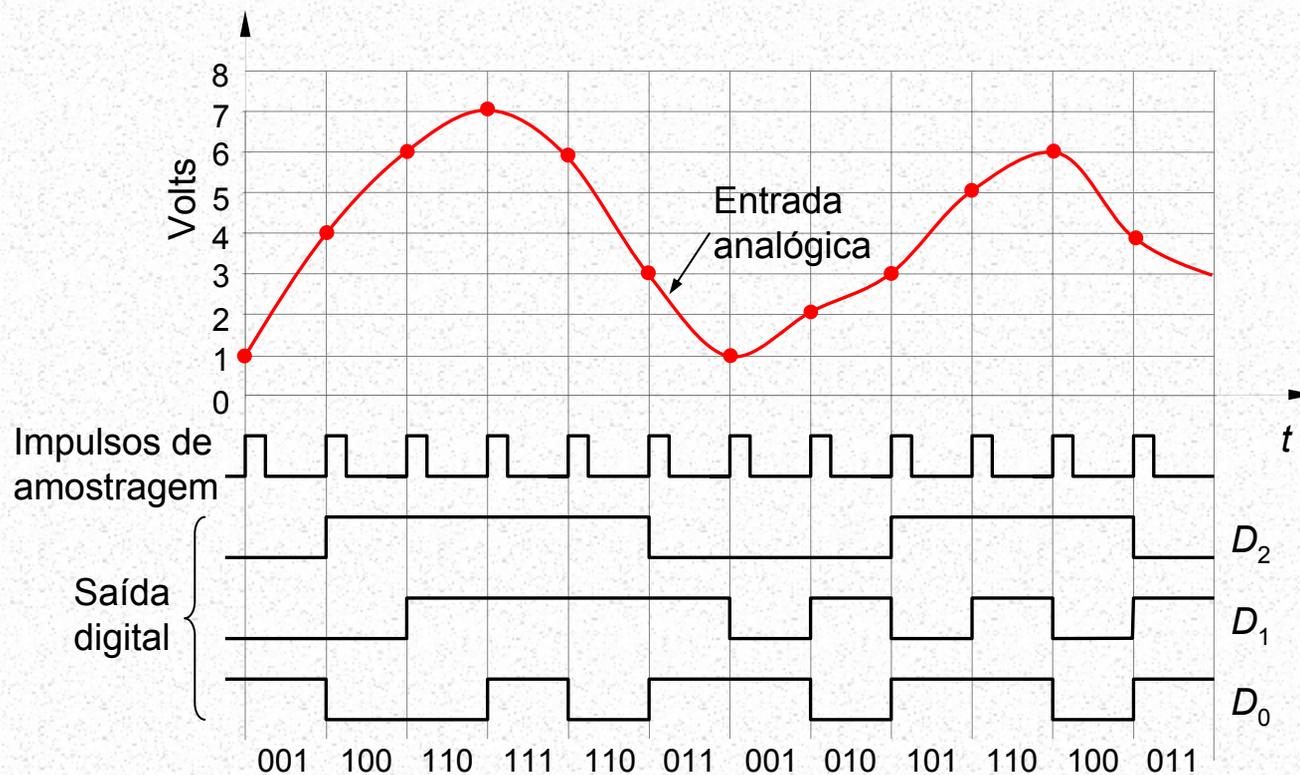


$$N = INT \left( \frac{2^{nbits} - 1}{V_{REF}} \cdot V_{ent} \right)$$



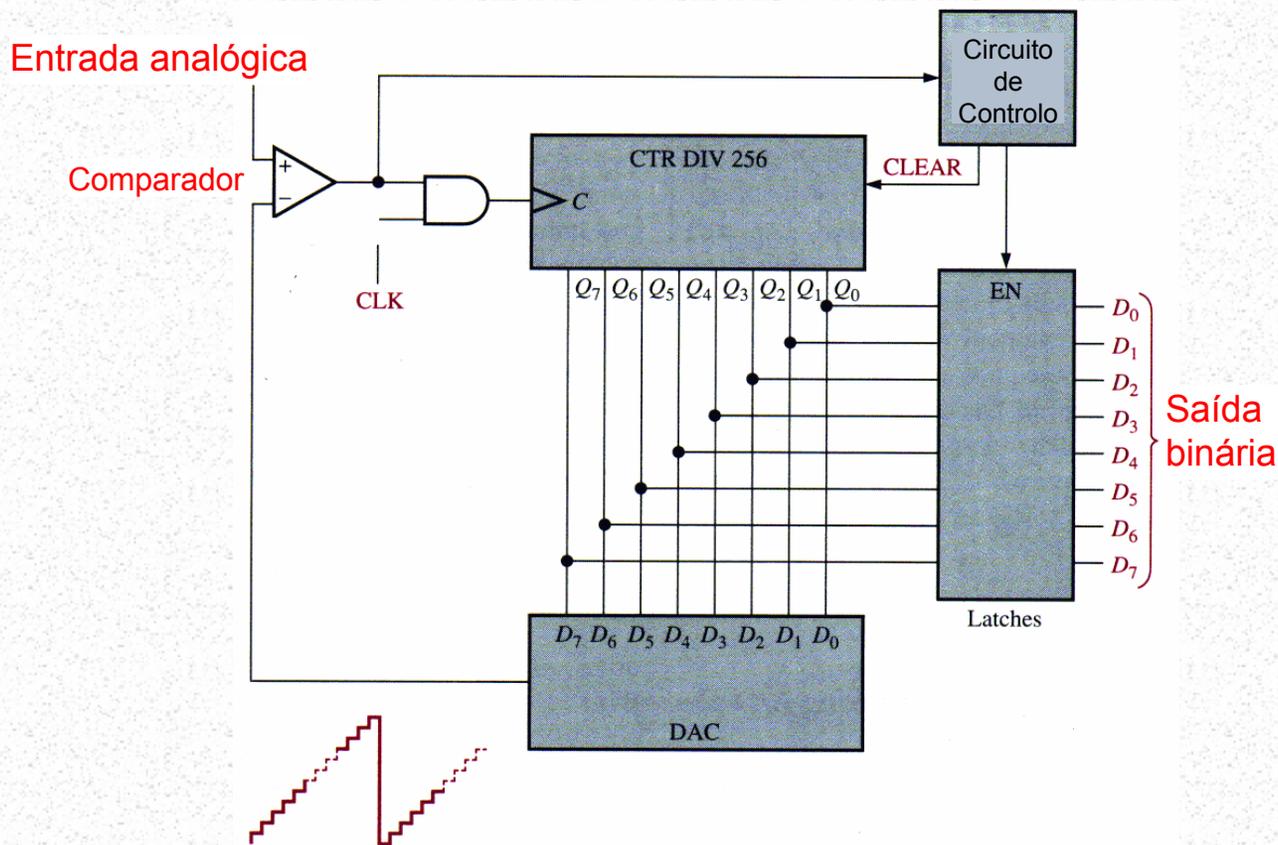
Conversor analógico-digital "flash" de 3 bits

## ■ Conversão analógico → digital



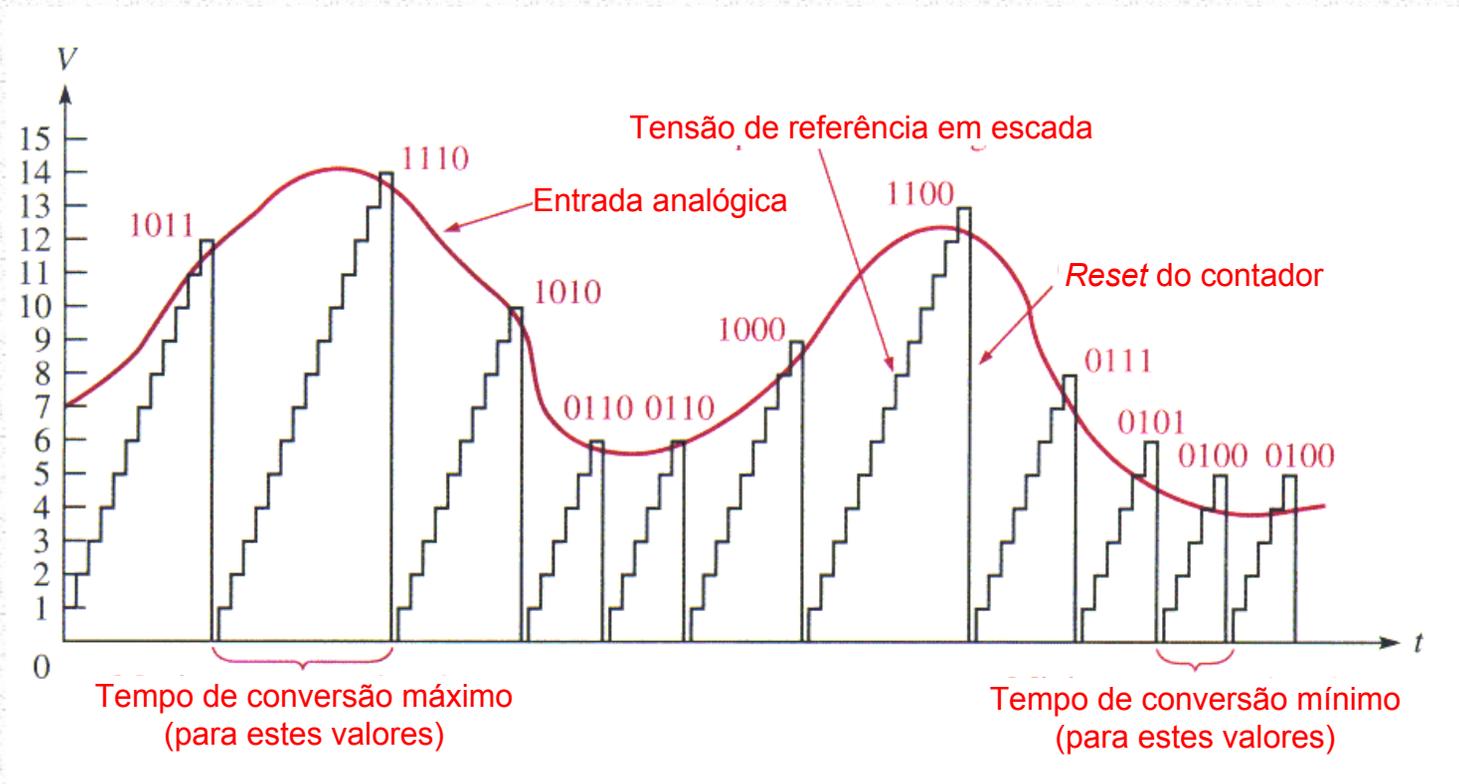
Conversor analógico-digital “flash” – formas de onda

## ■ Conversão analógico → digital



Conversor A/D de rampa digital

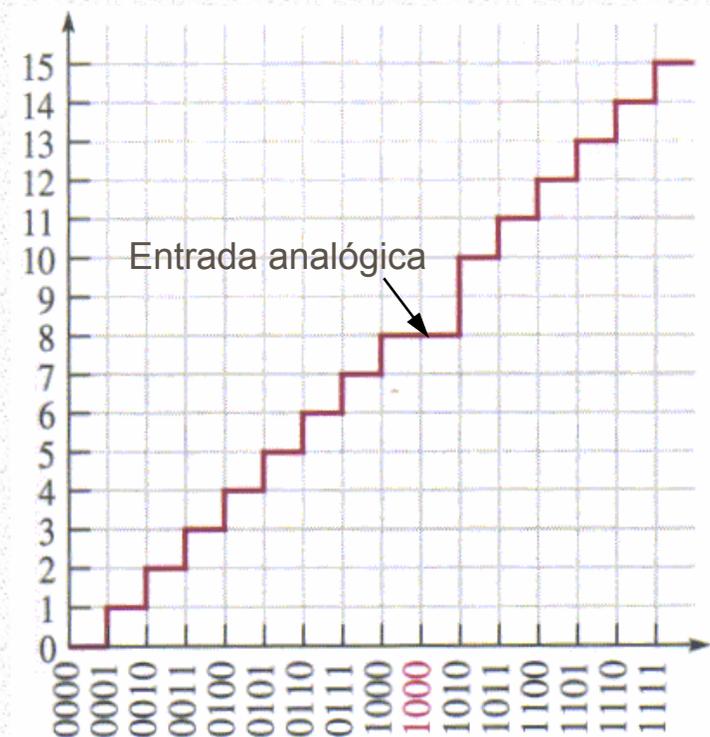
## ■ Conversão analógico → digital



Conversor A/D de rampa digital – formas de onda

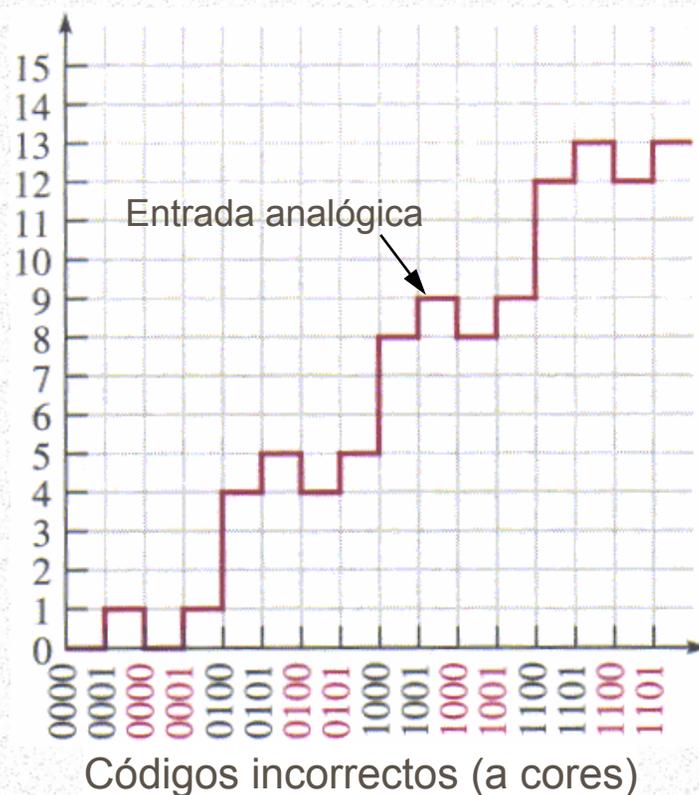
## ■ Características de desempenho de conversores A/D

- Muitas das características de desempenho dos conversores A/D (resolução, precisão, linearidade, ...) são especificadas de forma idêntica às dos conversores D/A (basta inverter as referências às entradas e saídas)
- **Falta de um código**



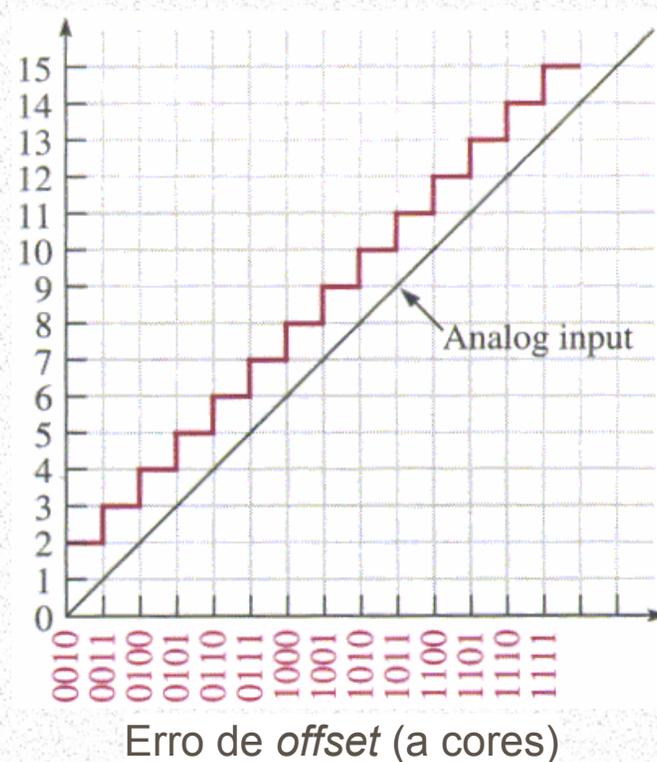
Falta de um código ( a cores)

- Características de desempenho de conversores A/D
  - Códigos incorrectos

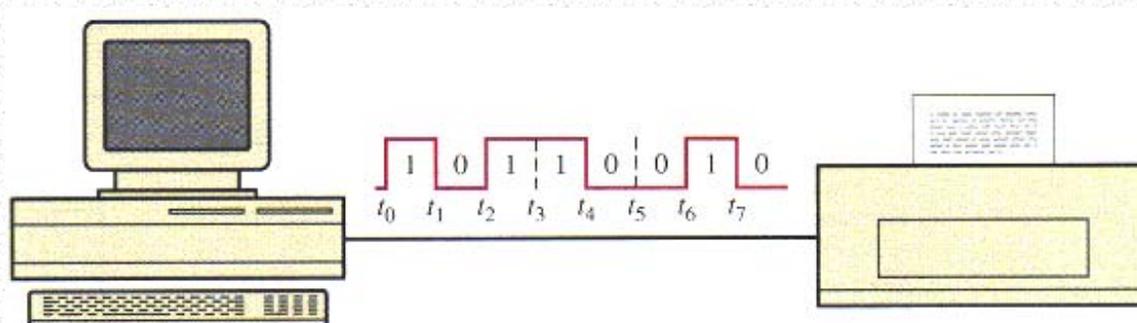


- **Características de desempenho de conversores A/D**
  - Erro de *offset*
  - **Tempo de conversão.** É o tempo ( $t_c$ ) necessário para converter para binário uma amostra do sinal de entrada.  
Note-se que a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deverá ser sempre,

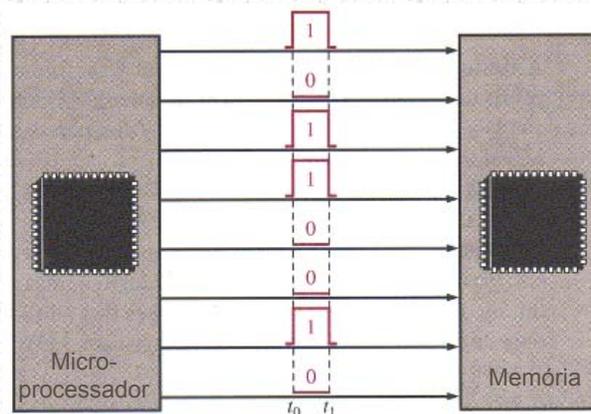
$$f_s \leq \frac{1}{t_c}$$



## ■ Conversão série ↔ paralelo

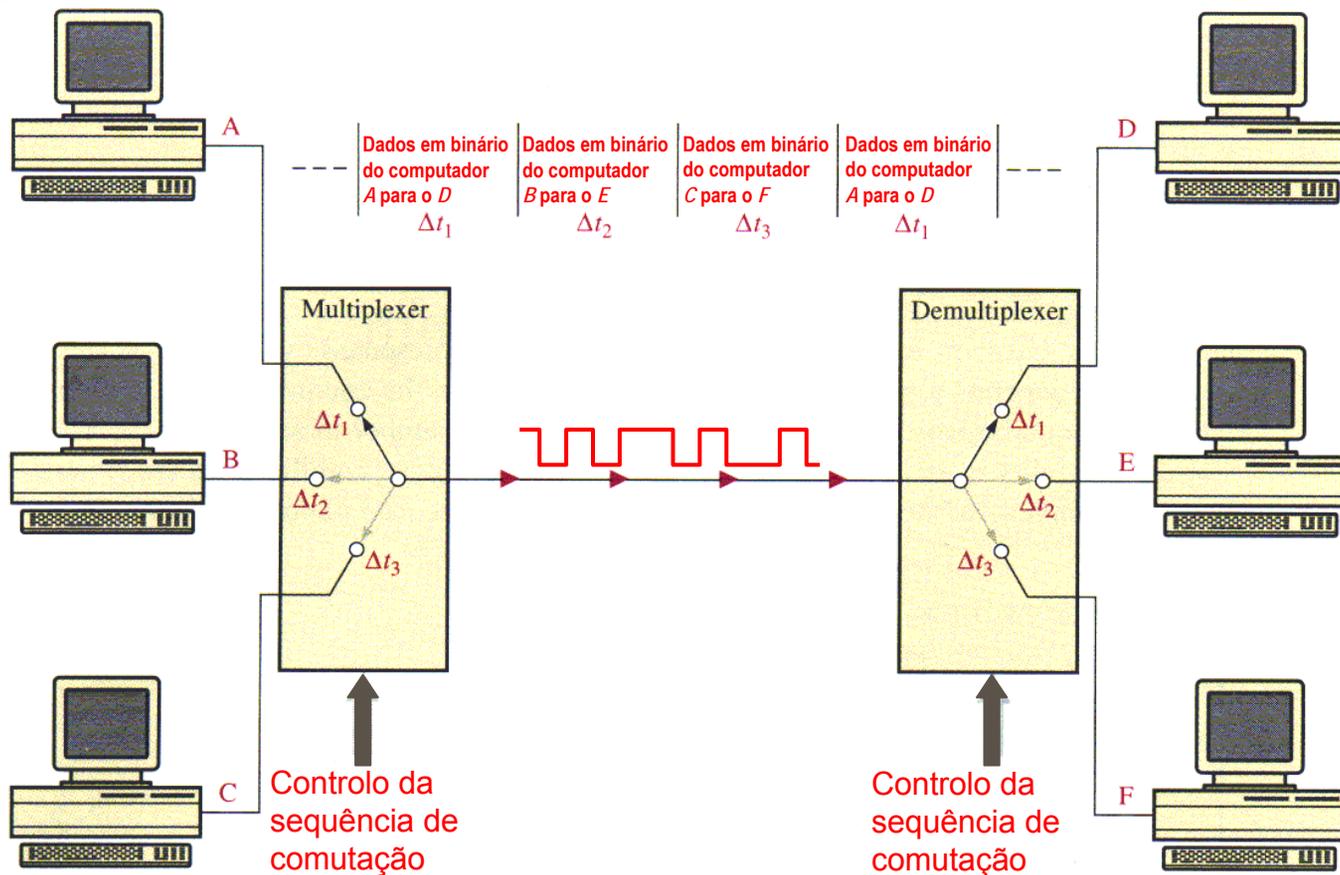


(Transferência de dados binários em série do computador para a impressora)



Transferência de dados binários em paralelo do microprocessador para a memória

## ■ Multiplexers digitais



## ■ Multiplexers analógicos

