



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



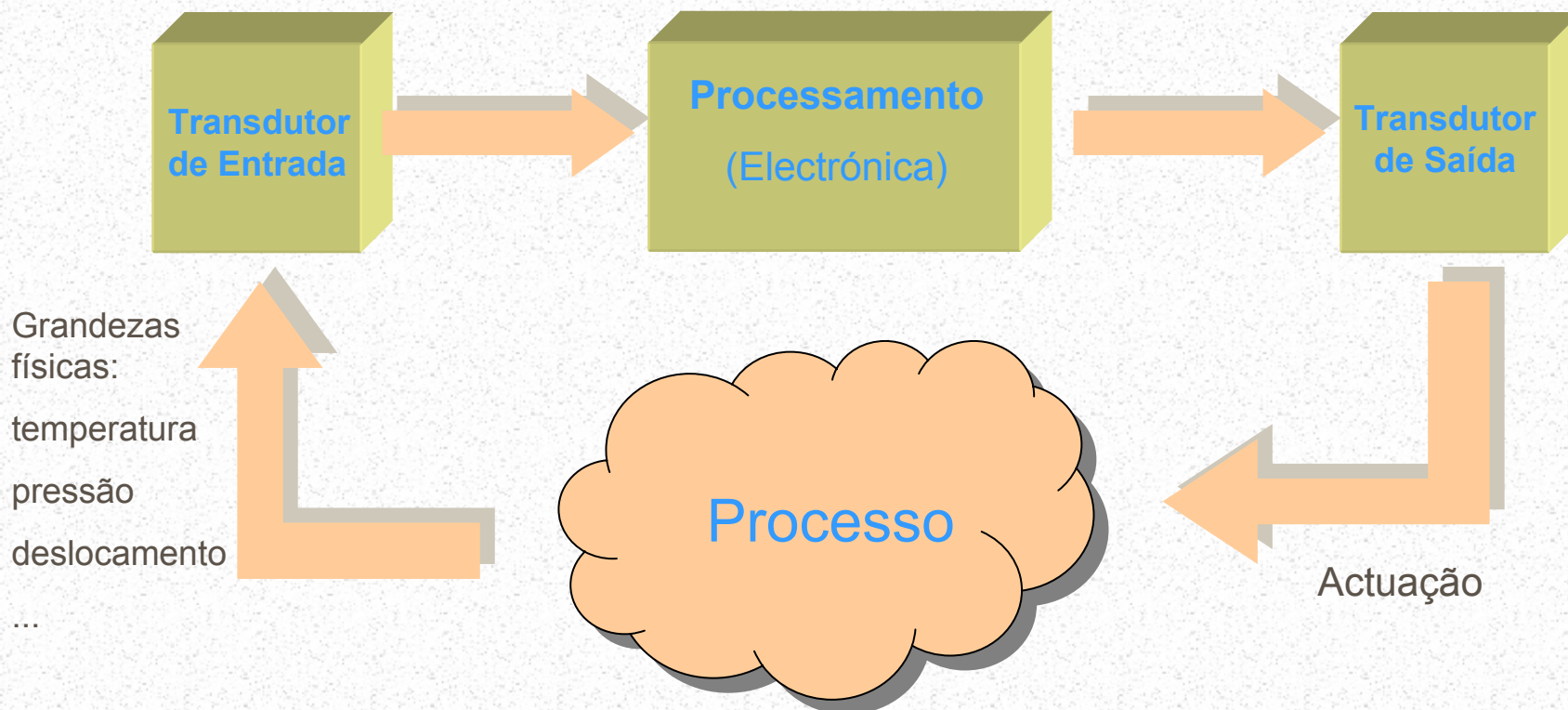
Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

■ 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

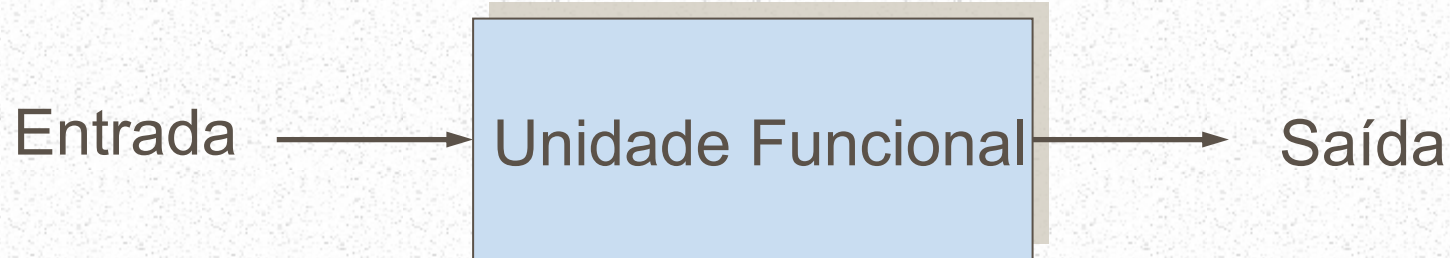
- Conversores analógico ↔ digital
- *Multiplexers*

■ 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

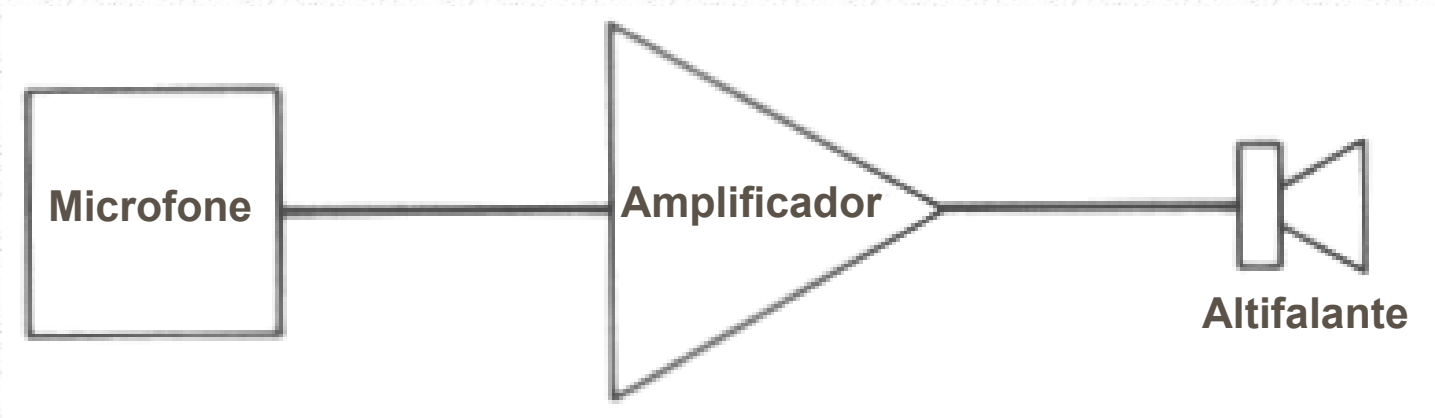




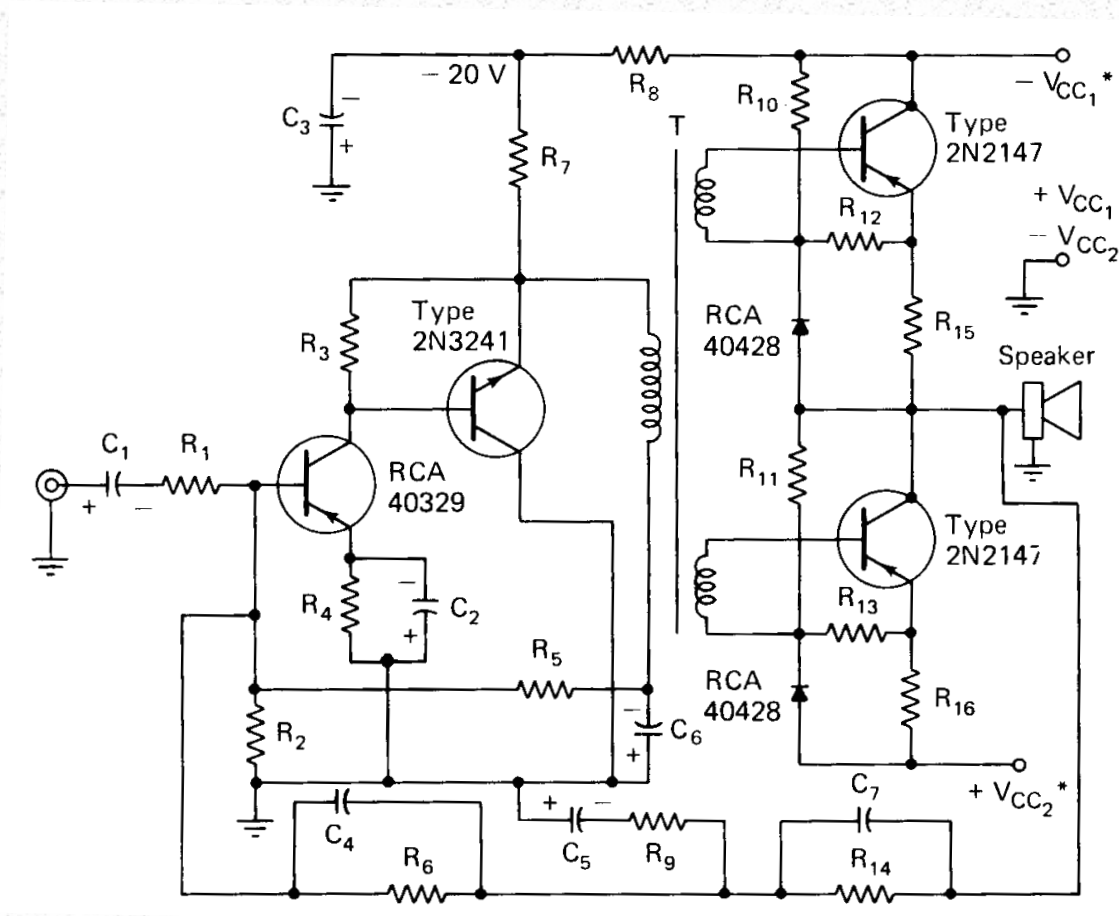
O Sistema



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial



O Sistema





O Sistema

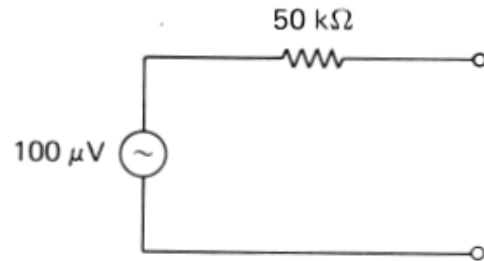


Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

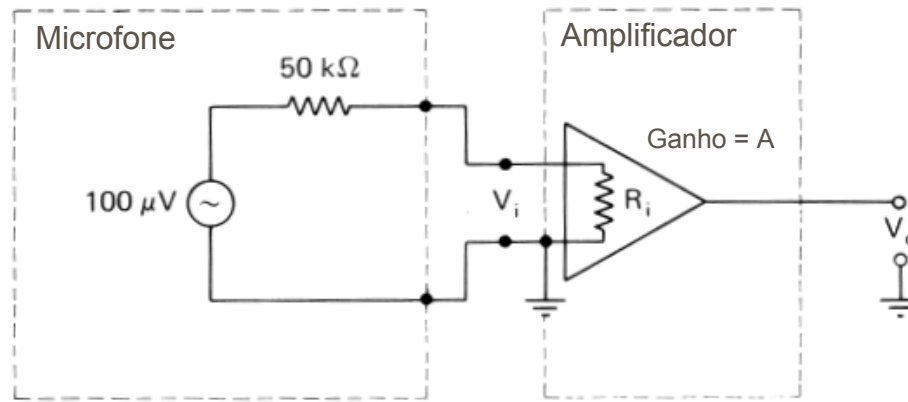
Parâmetro	Microfone	Amplificador	Altifalante	Sistema
Impedância	50k Ω	Entrada: 10M Ω Saída: 8 Ω	8 Ω	—
Resposta em frequência (± 3 dB)	40–9000Hz	20–15000Hz	30–12000Hz	—
Potência	—	30W (max.)	30W	30W
Tensão de saída	100 μ V	15,5V max	—	—
Ganho de tensão	—	155000	—	—
Distorção harmónica	—	1%	—	—
Alimentação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

Especificações do sistema PA e seus componentes

O Sistema



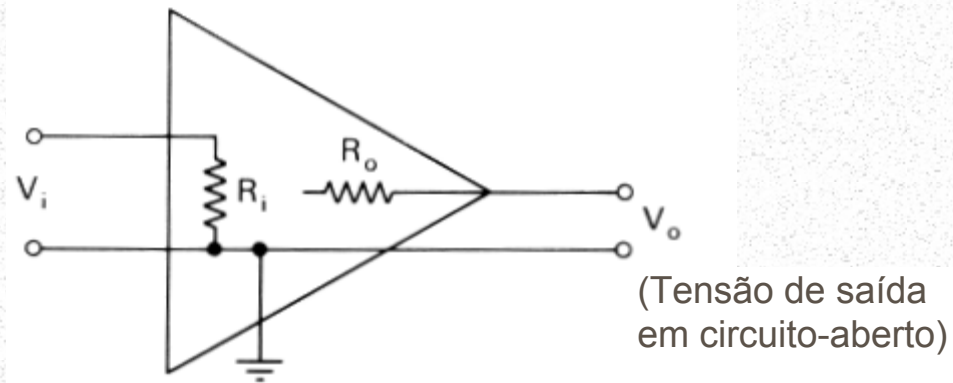
(a)



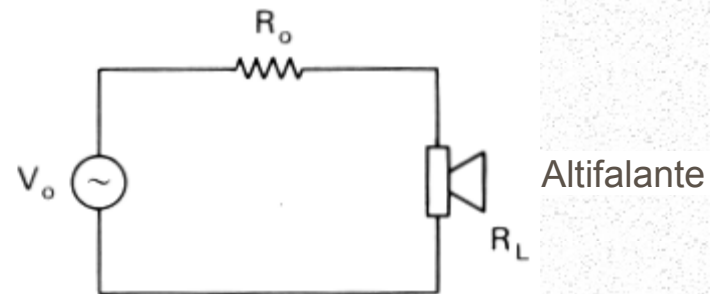
(b)

- (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 Ω

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

Amplificador

Impedância de entrada: 1M Ω

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

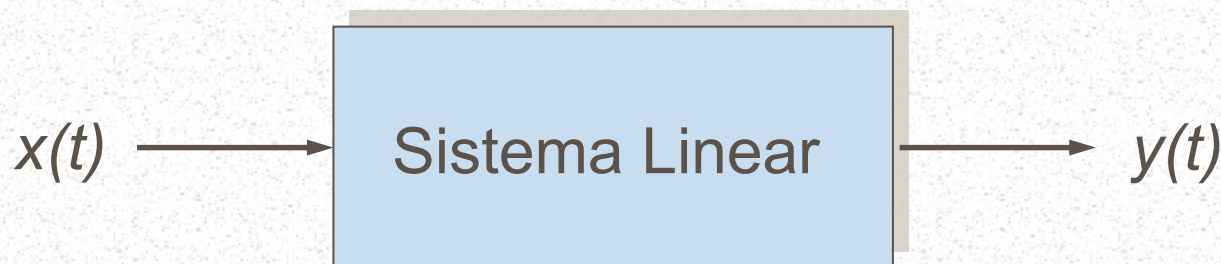
Para um amplificador com uma impedância de $10\text{ k}\Omega$ em vez de $1\text{ M}\Omega$:

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

■ Tipos de Sistemas

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

■ Lineares, Não Lineares

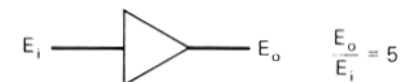


$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0$$

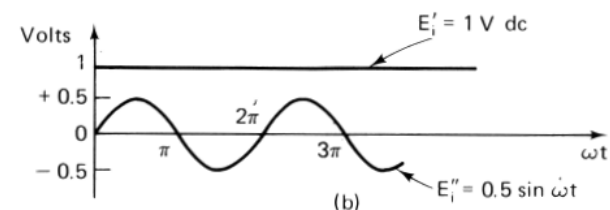
Características de Sistemas Lineares:

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

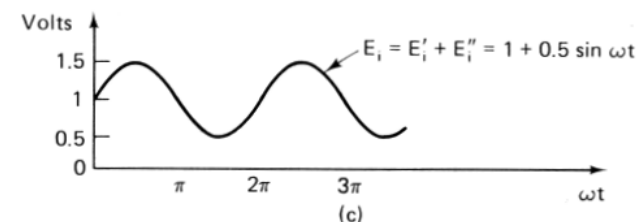
- a) $A = E_o/E_i$
- b) Linha recta $E'_i = 1V$
Sinusóide $E''_i = 0.5 \text{ sen}(\omega t)$
- c) $E_i = E'_i + E''_i = 1 + 0.5 \text{ sen}(\omega t)$
- d) $E_o = E'_o + E''_o = 5 + 2.5 \text{ sen}(\omega t)$



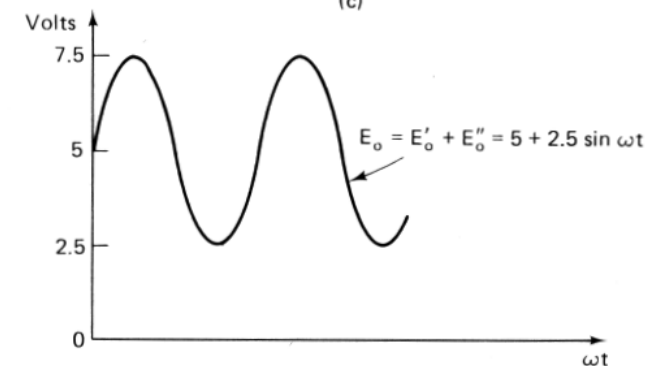
(a)



(b)



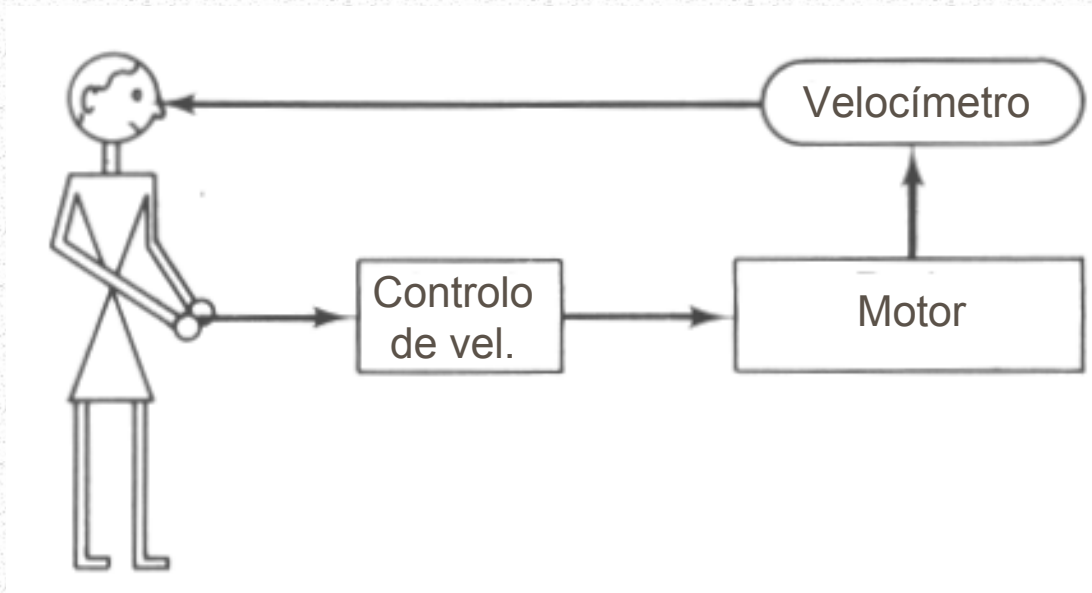
(c)



(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

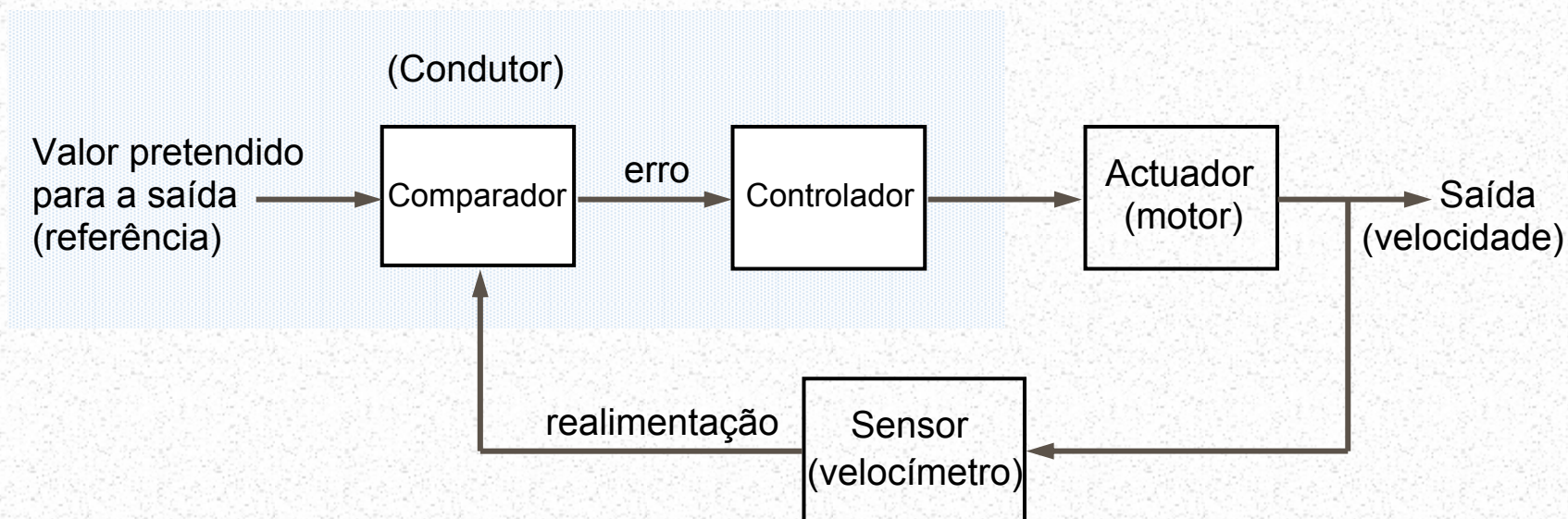


Diagrama de blocos de um sistema em malha-fechada



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

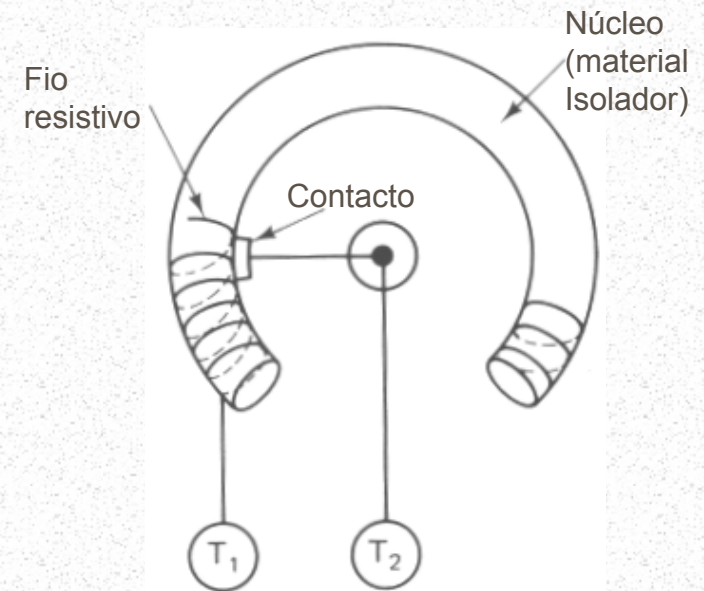
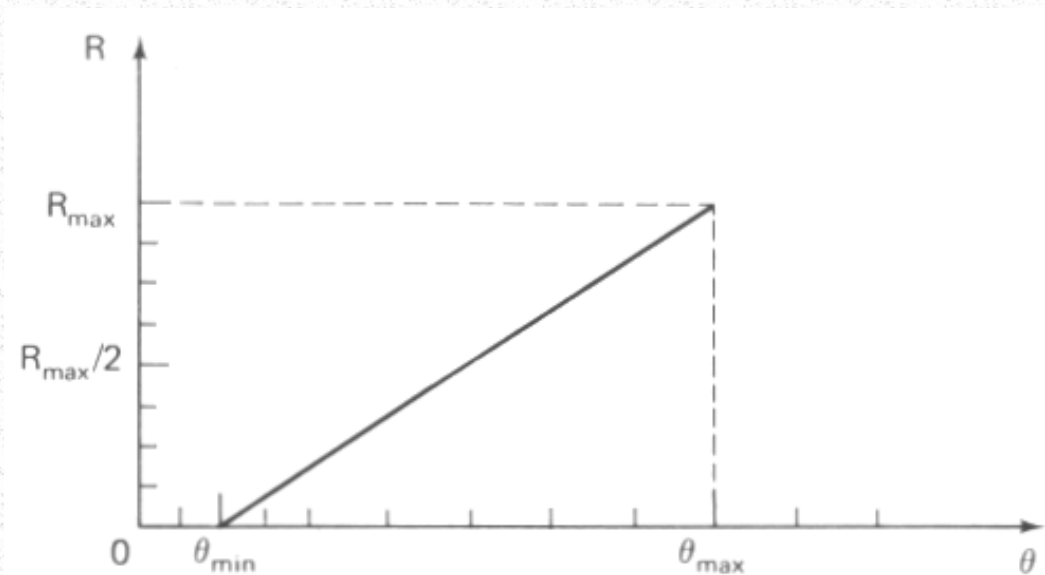


Diagrama simplificado duma resistência bobinada variável

■ Características de Sistemas (cont.)

■ Linearidade

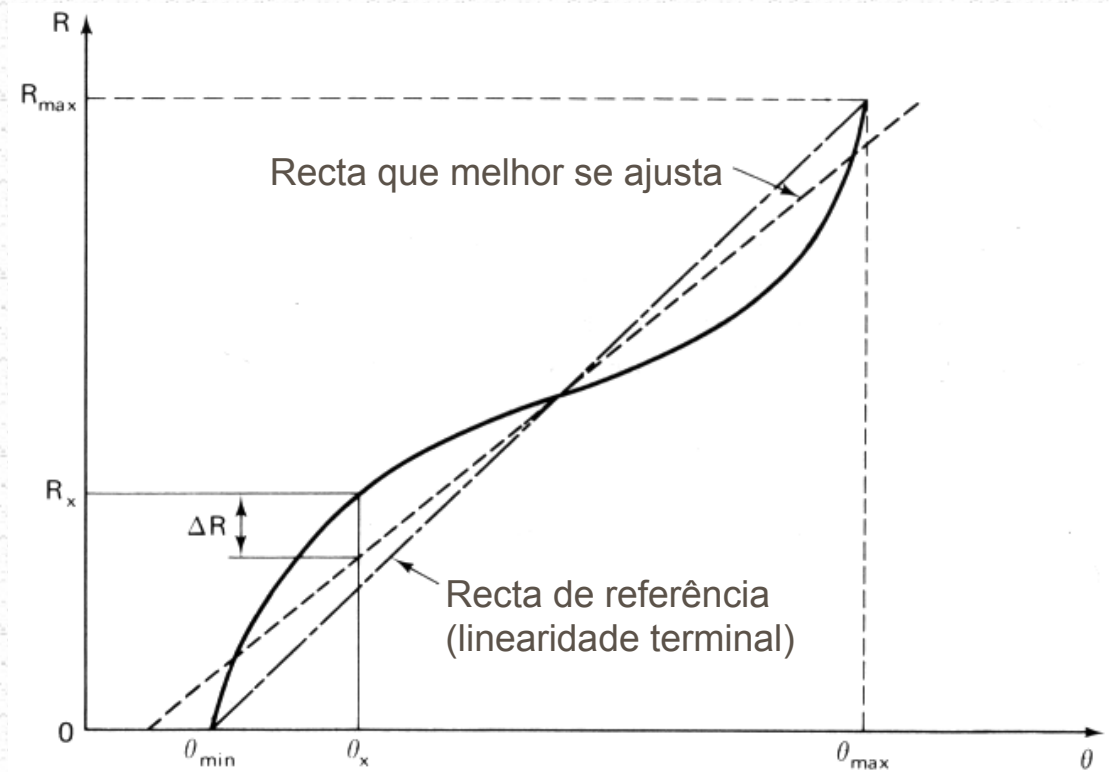
... pode definir se como o desvio da relação entre a entrada e a saída de uma linha recta ...



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

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

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

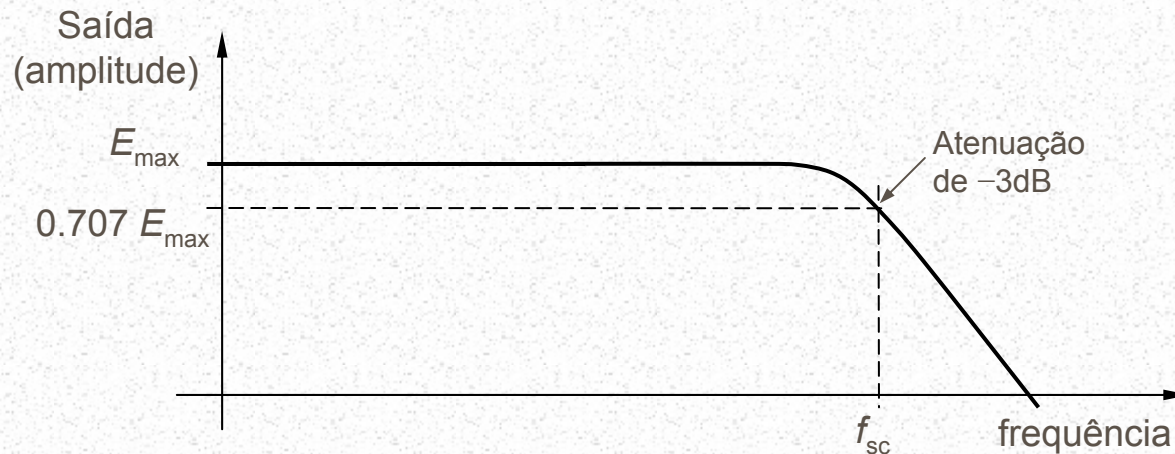


Resistência *versus* posição angular do veio para uma resistência variável - relação não-linear

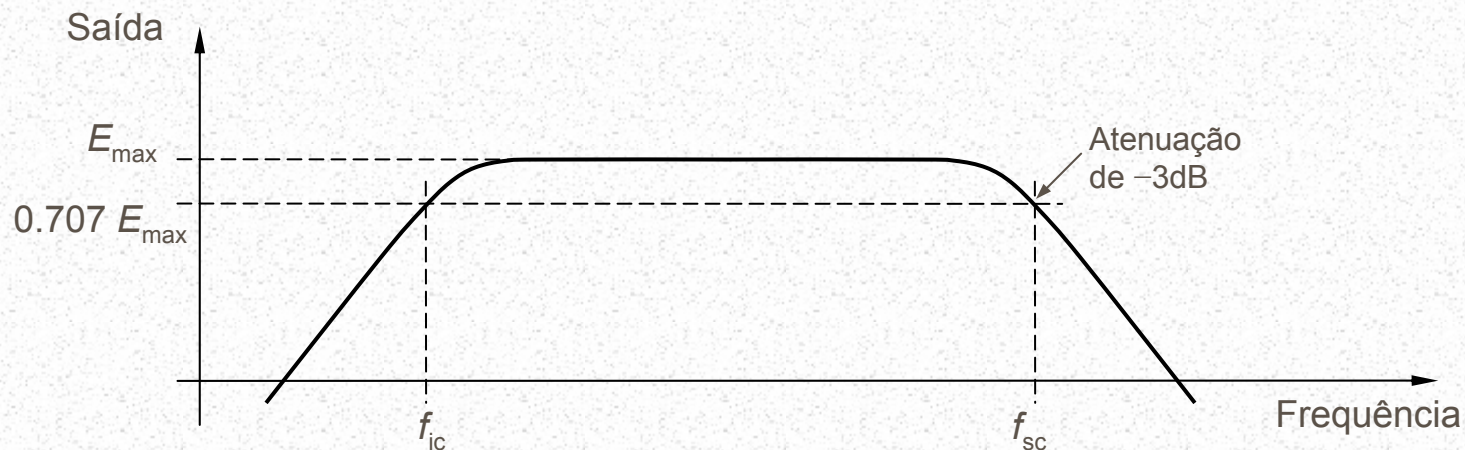
■ Características de Sistemas (cont.)

■ 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)

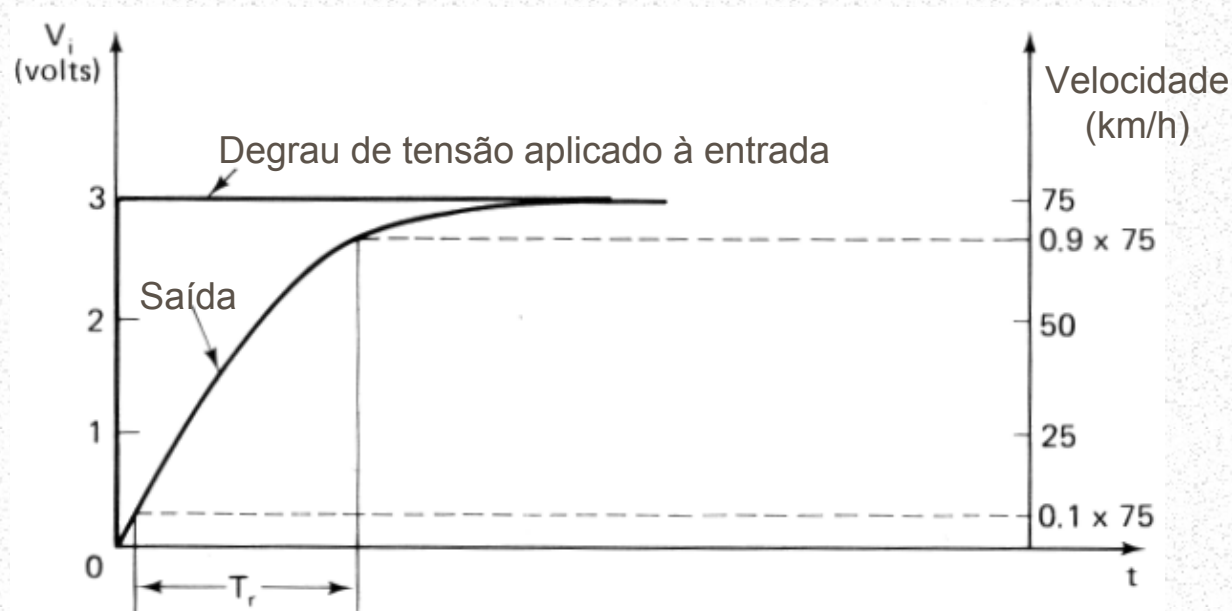
$$\text{largura de banda} = f_{sc} - f_{ic} \quad (\text{Hz})$$

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

■ Características de Sistemas (cont.)

■ Tempo de resposta

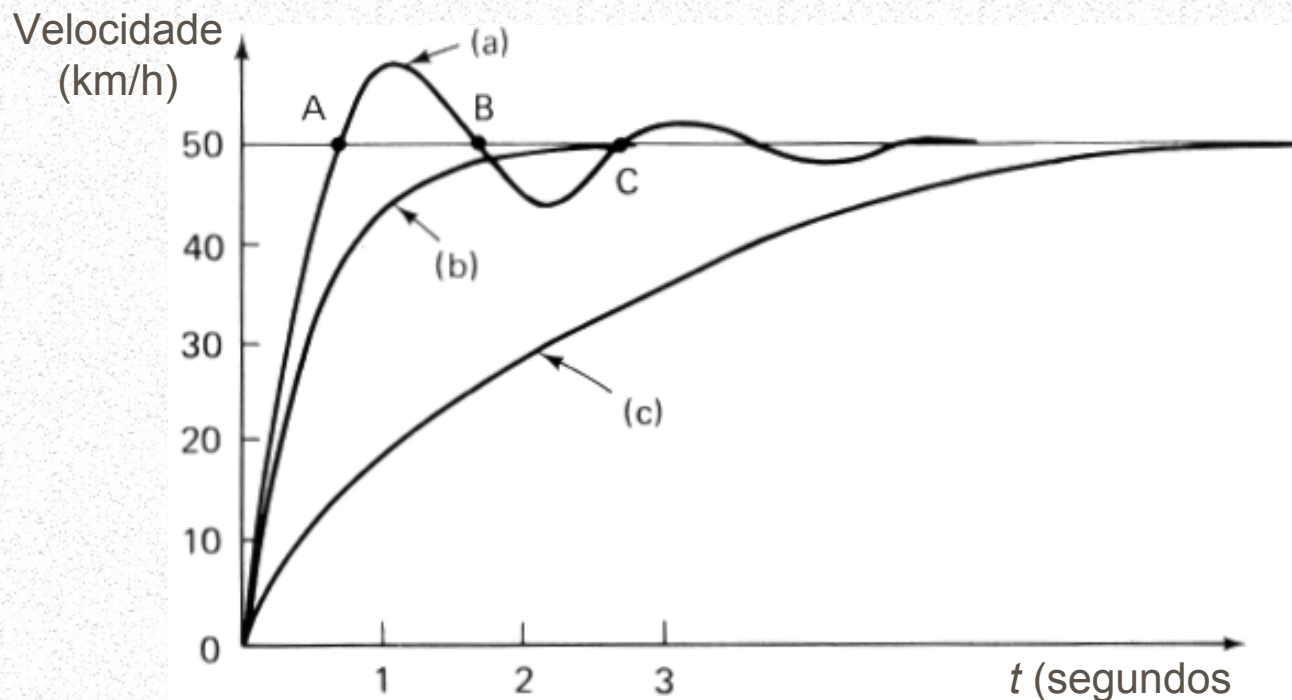
... tem a ver com a rapidez com que um sistema responde a variações do sinal de entrada ...



Resposta do sistema para uma entrada em degrau

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

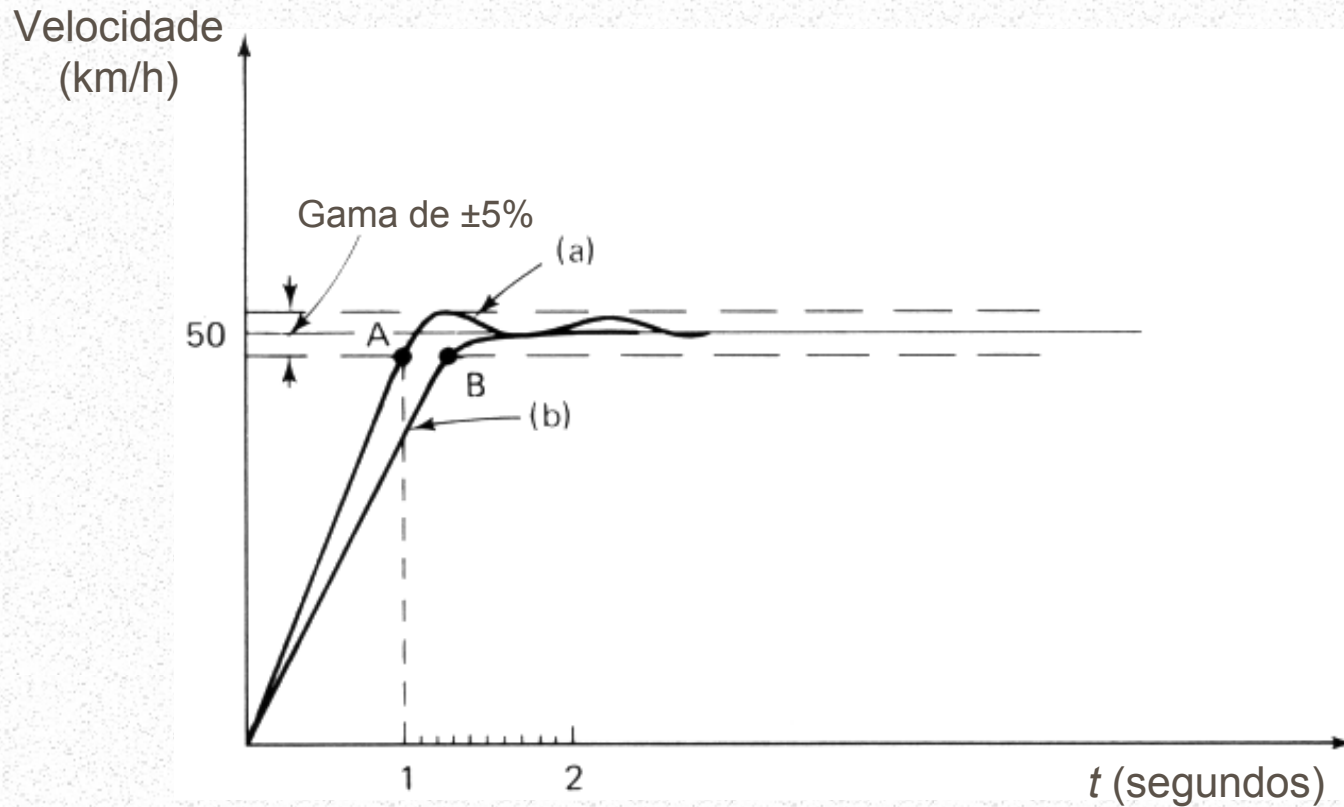
■ Características Dinâmicas



Respostas em regime transitório:

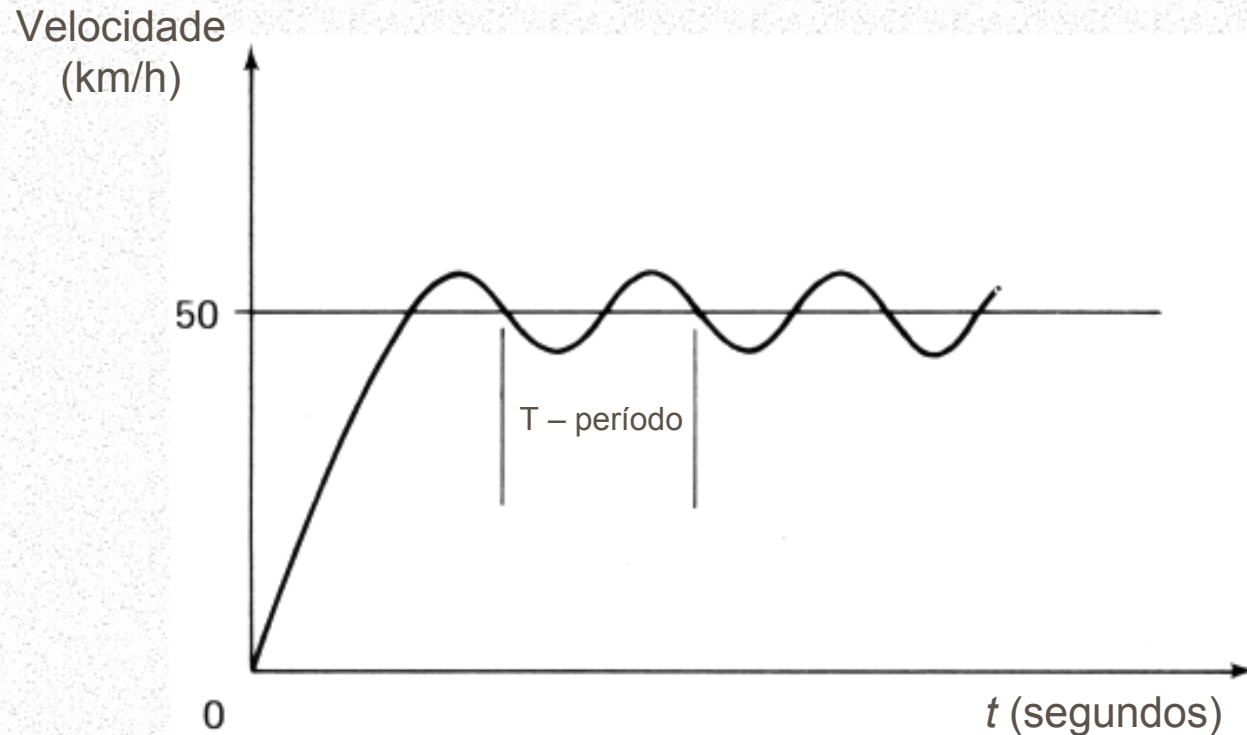
(a) sub-amortecida; (b) criticamente amortecida; (c) sobre-amortecida

O Sistema



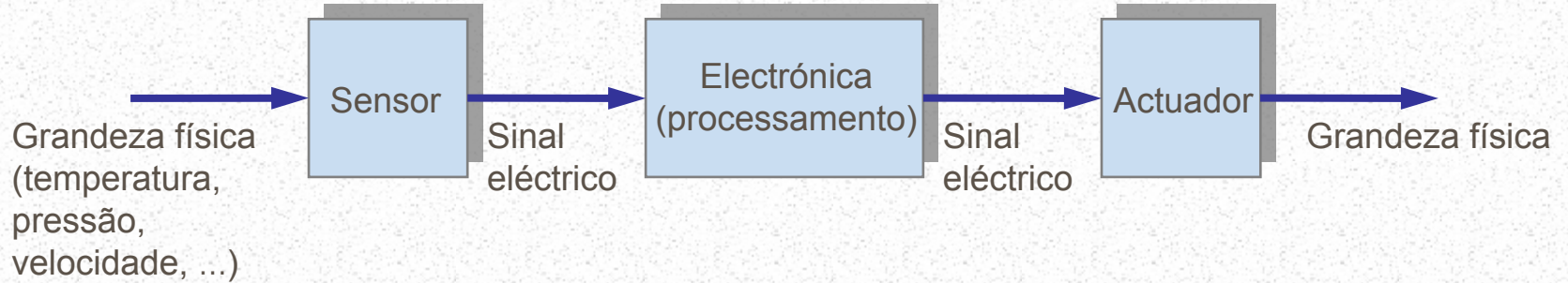
Tempo de resposta e gama de erro

O Sistema



Oscilações não-amortecidas (sistema instável)

■ Introdução



■ Introdução

Tipo	Entrada	Potência Disponível (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Saída
Termopar	Temperatura	0.5×10^{-4}	10^{-3}	10^{-1}	Tensão (CC)
Célula fotovoltaica	Luz	0.5×10^{-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	0.25×10^{-6}	10^{-2}	10^{-4}	Tensão (CA)
Resolver	Ângulo	$10^{-2} - 10$	10	—	Tensão (CA)

Transdutores de entrada típicos

■ Introdução

Tipo	Potência (W)	Rendimento (%)	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 (CRT)	10^{-7}	—	Sistemas de medida e monitorização

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

Transdutores de saída típicos



Transdutores

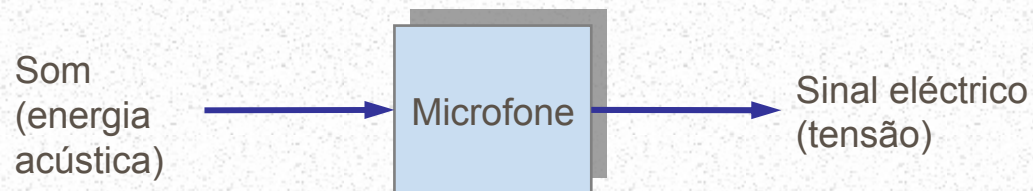


Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

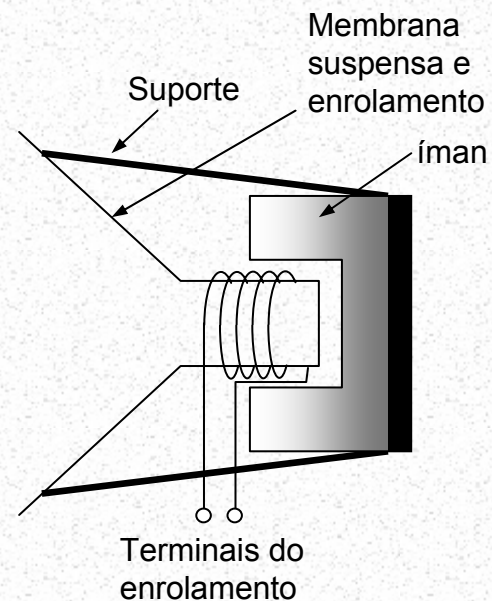
Tipo	Entrada	Saída	Aplicações
Extensómetro	Força	Variação de resistência	Medida de força, tensão, deslocamento
Célula de carga*	Força/pressão	Variação de resistência	Medida de peso, pressão
Fotocélula	Intensidade da luz	Tensão	Fontes de energia, dispositivos sensíveis a luz
Transformador diferencial (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



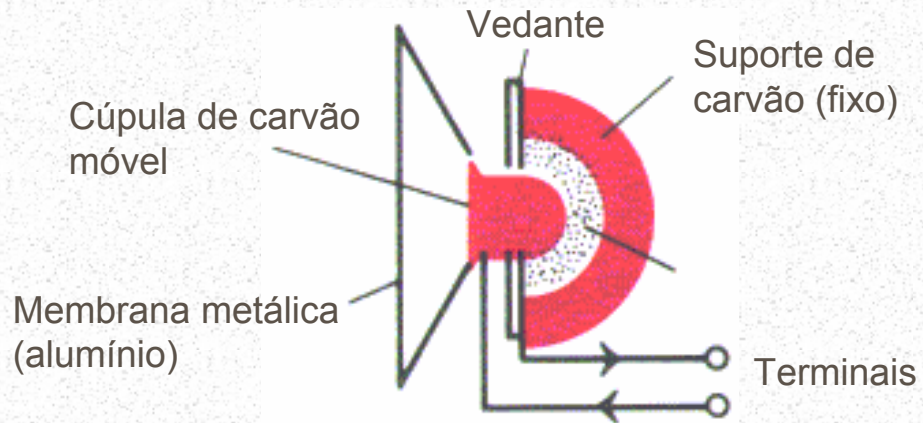
(a)



(b)

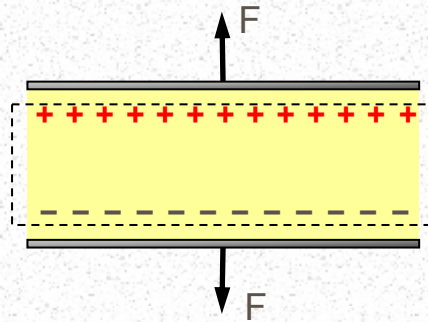
Microfone dinâmico:
(a) Aspecto exterior
(b) Estrutura básica

■ Microfones

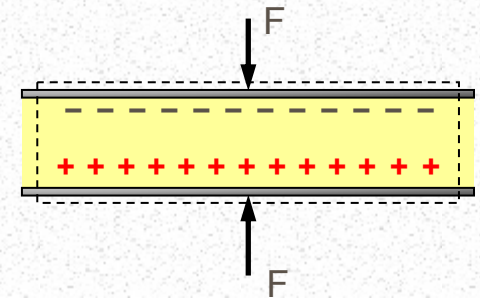


Microfone de carvão

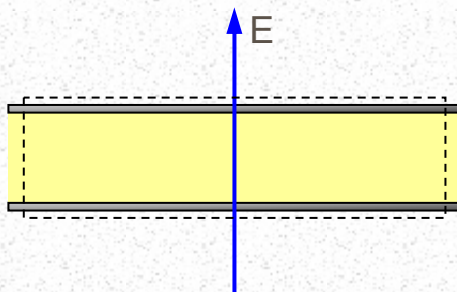
■ Efeito Piezoeléctrico



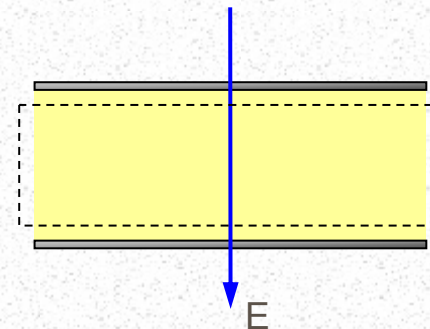
Resultado de um esforço de tracção



Resultado de um esforço de compressão

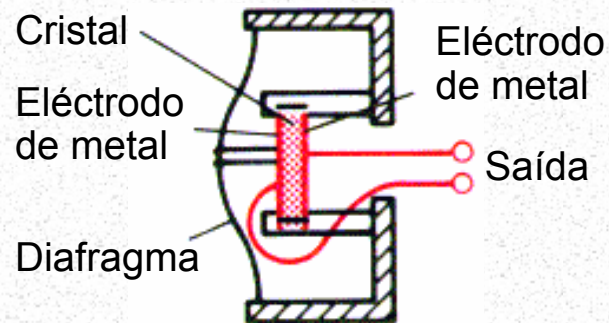


Resultado da aplicação de um campo eléctrico

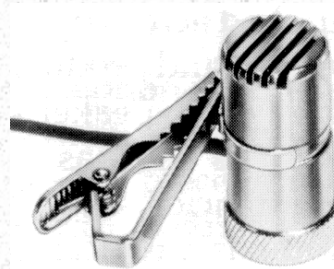


Resultado da aplicação de um campo eléctrico (inverso)

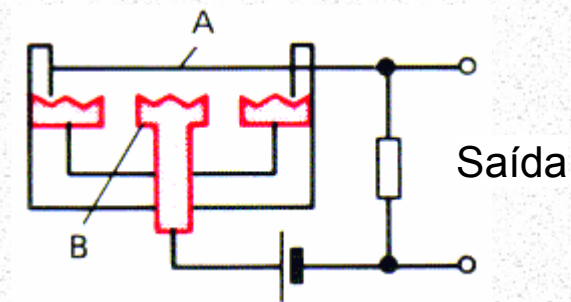
■ Microfones



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

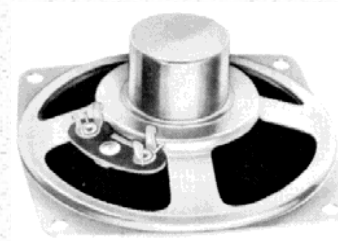
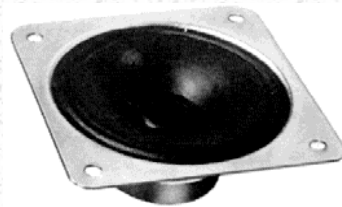


(a)



(b)

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



Altifalantes

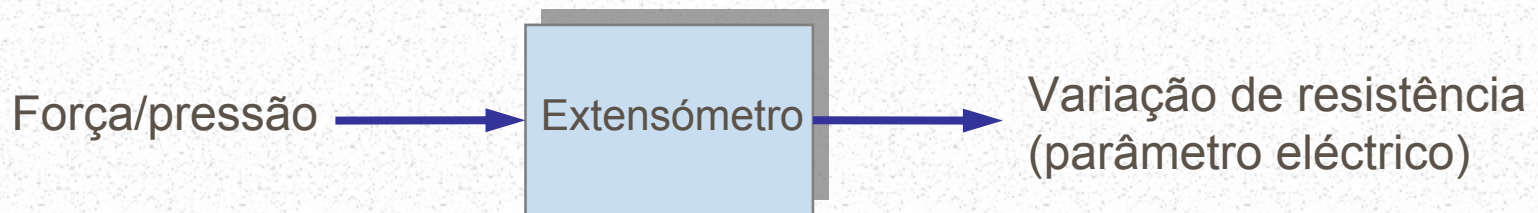
Tipo	Impedância	Resposta em Frequência	Sensibilidade*
Dinâmico	50k Ω	100Hz – 10kHz	-57dB
Carbono	5k Ω	100Hz – 9kHz	—
Cristal	1M Ω	100Hz – 12kHz	-55dB
Capacitivo	600 Ω	30Hz – 16kHz	-70dB

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

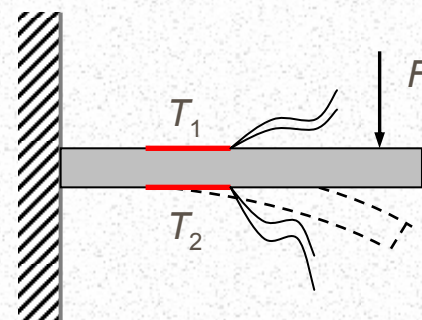
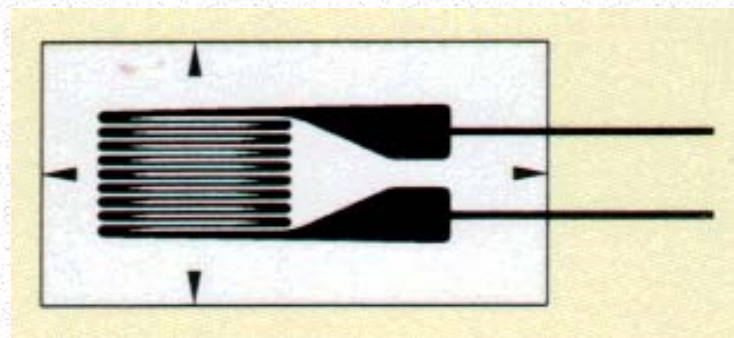
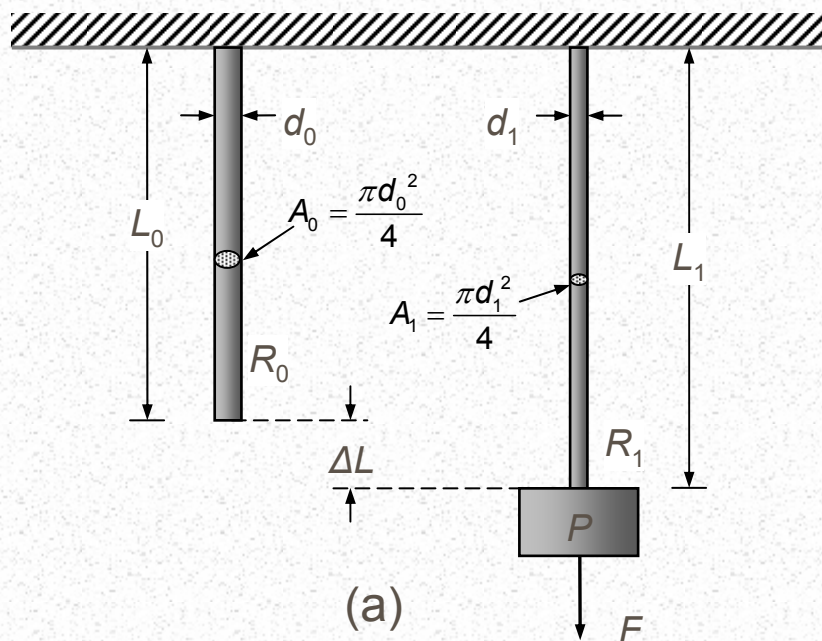
Características de microfones

■ Transdutores de força/pressão

- Extensómetros
- Efeito piezoeléctrico
- Efeito da mola

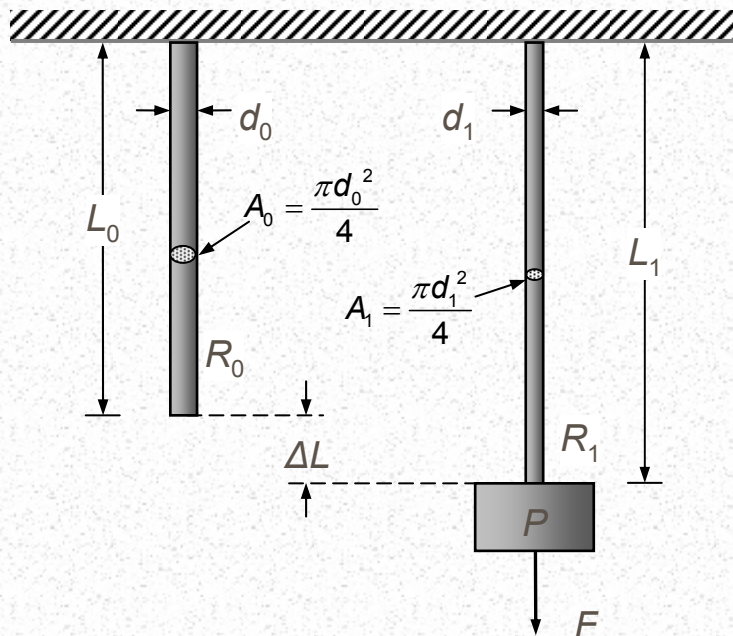


■ Transdutores de força/pressão



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

■ Transdutores de força/pressão



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

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

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

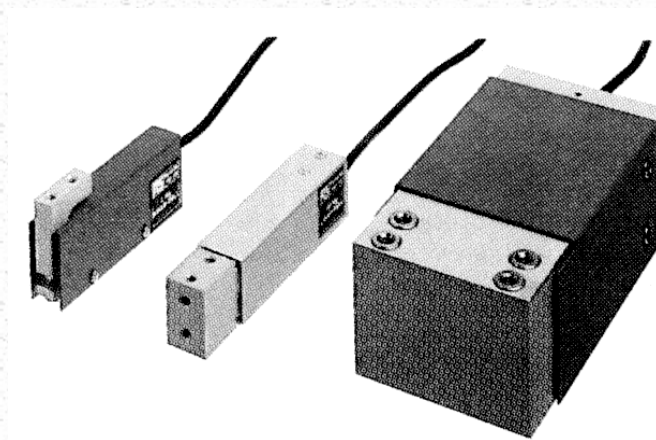
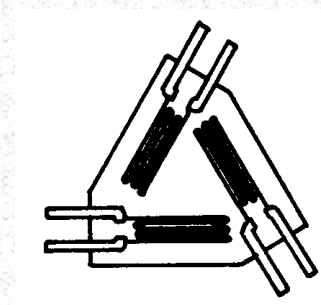
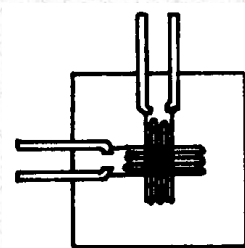
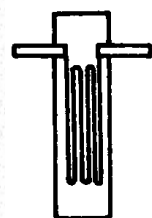
→ 2% de acréscimo na resistência

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

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

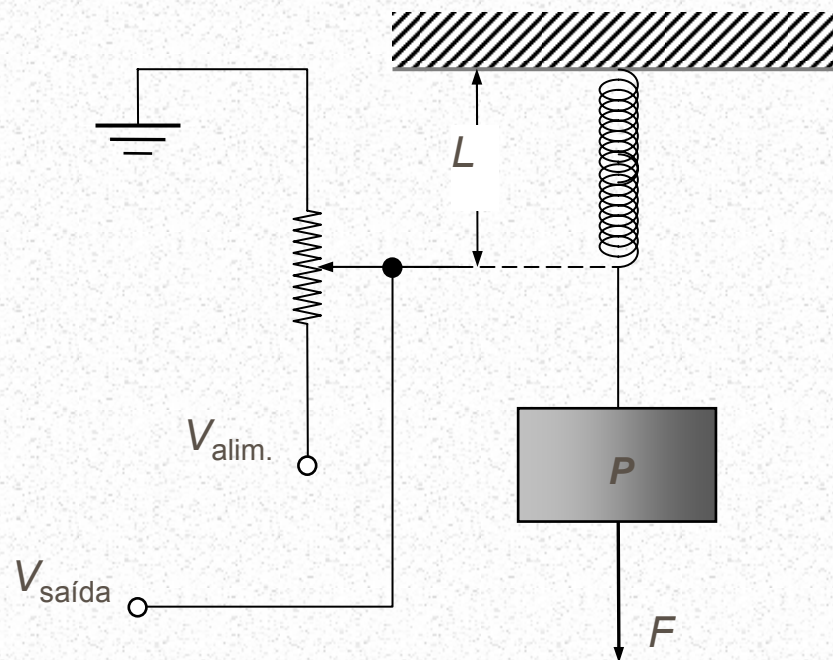
$$\rightarrow FG = \frac{0.02}{0.01} = 2$$

■ Transdutores de força/pressão



Células de carga de 2kg, 20kg e 100kg

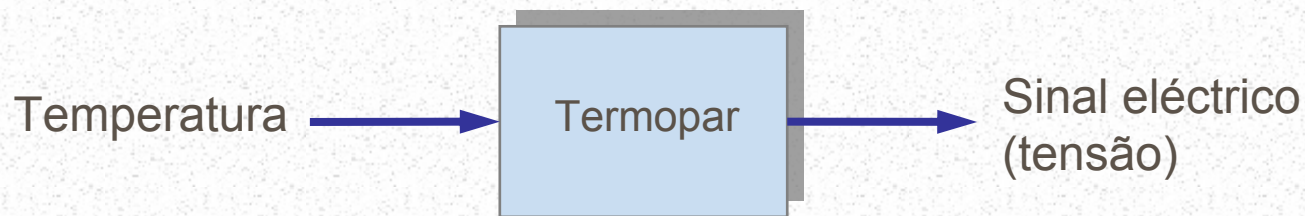
■ Transdutores de força/pressão



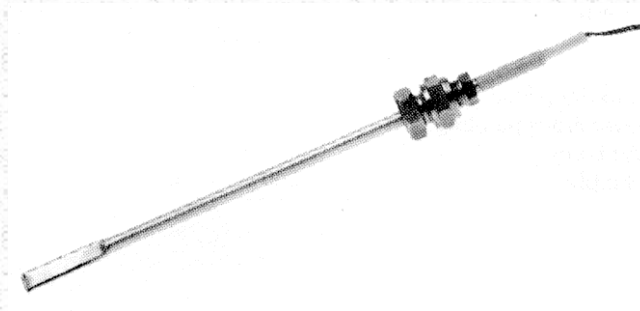
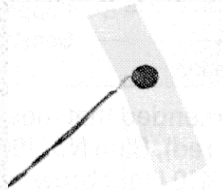
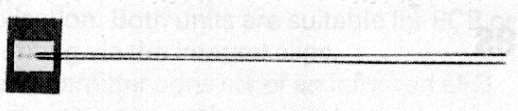
Utilização de uma mola para medir forças

■ Transdutores de temperatura

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

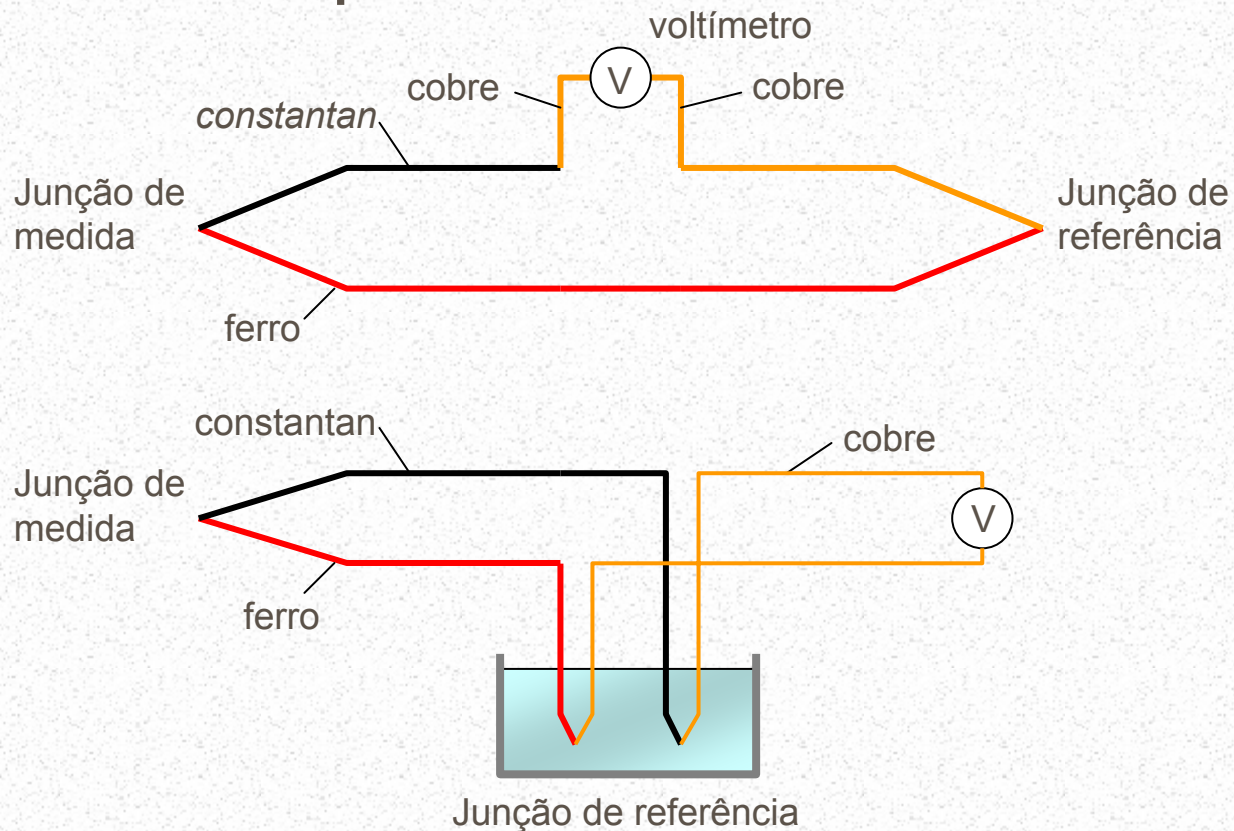


■ Transdutores de temperatura



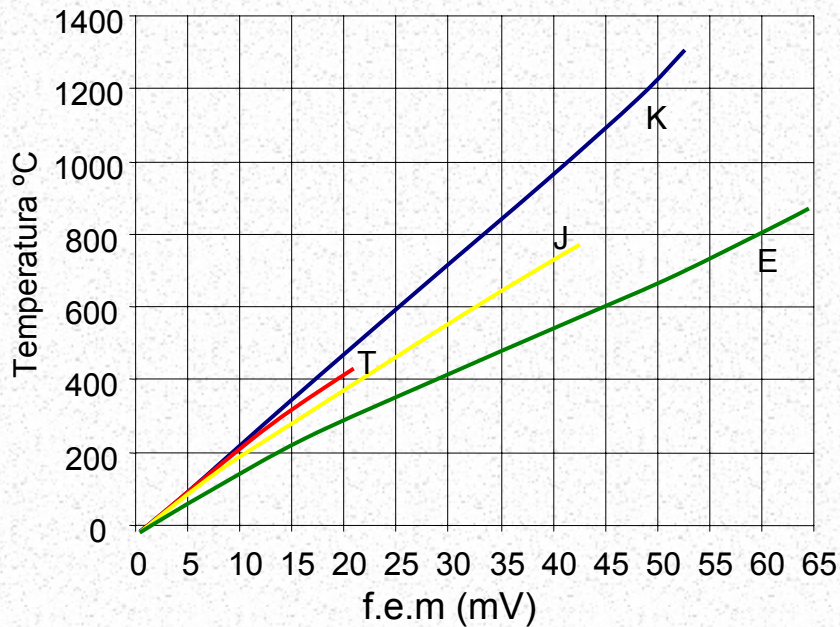
Termopares de diferente tipo

■ Transdutores de temperatura



Termopar

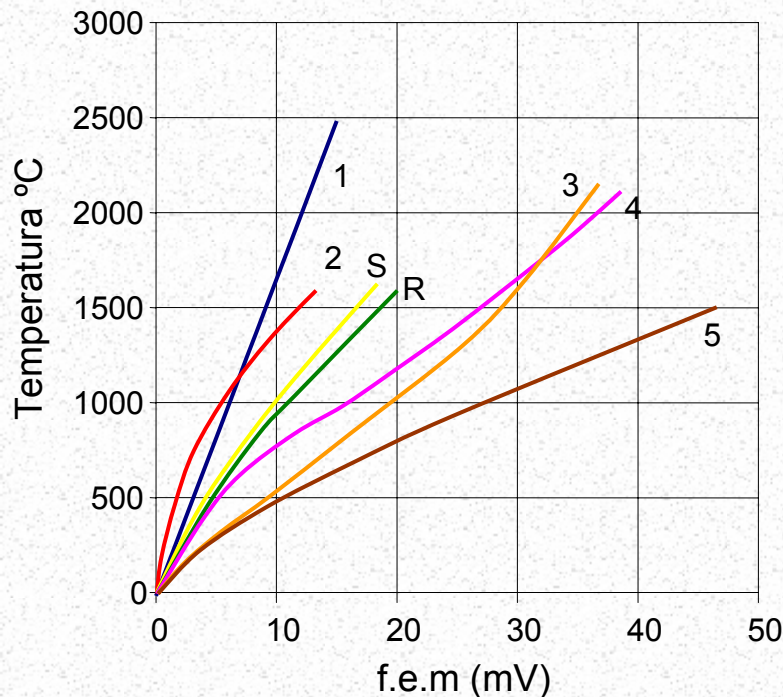
■ Transdutores de temperatura



Tipo	Material (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)

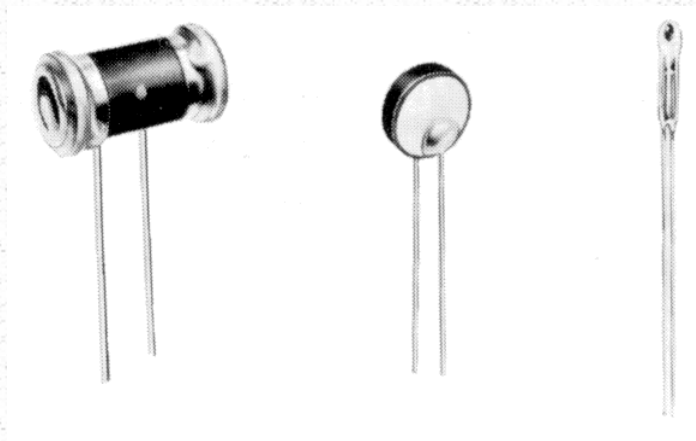
■ Transdutores de temperatura



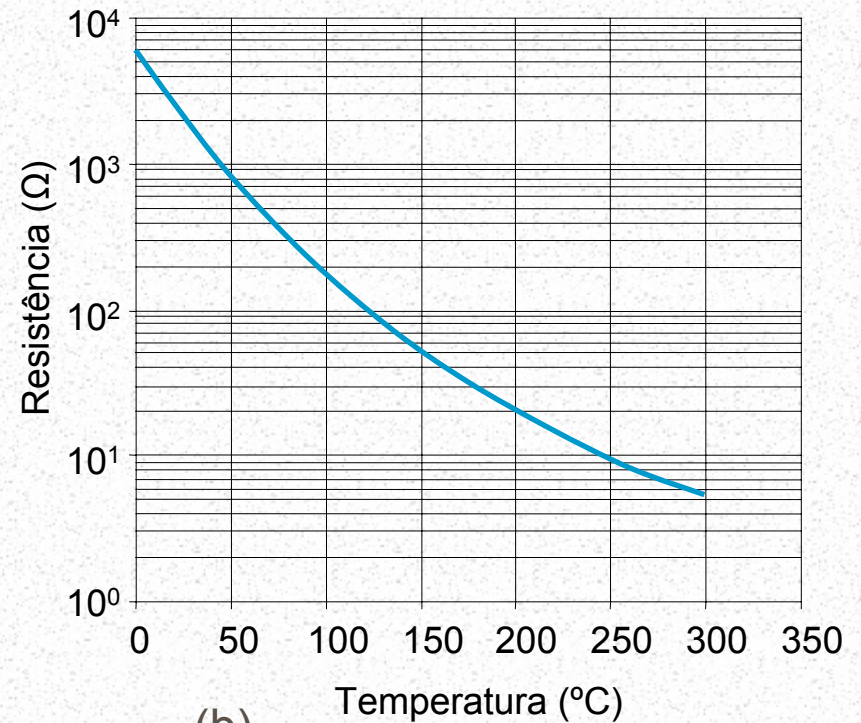
Tipo	Material (em maiúsculas o material positivo)	Cód. de cores dos cond.
1	60% IRÍDIO 40% RÓDIO – Irídio	
2	PLATINA 30% RÓDIO – Platina 6% Ródio	
3	TUNGSTÉNIO 5% RÉNIO – Tungsténio 26% Rénio	
4	TUNGSTÉNIO – Tungsténio 26% Rénio	
5	PT 5% MOLIBDÉNIO – Pt 0.1% molibdénio	
R	PLATINA 13% RÓDIO – Platina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

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

■ Transdutores de temperatura



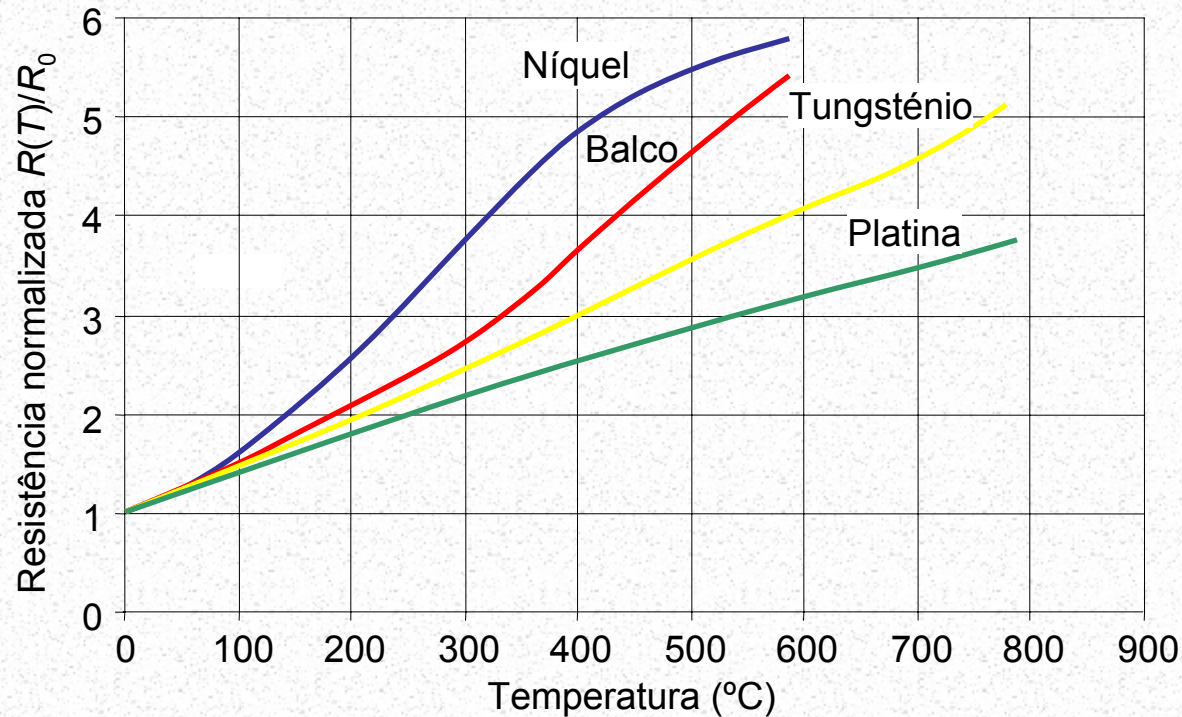
(a)



(b)

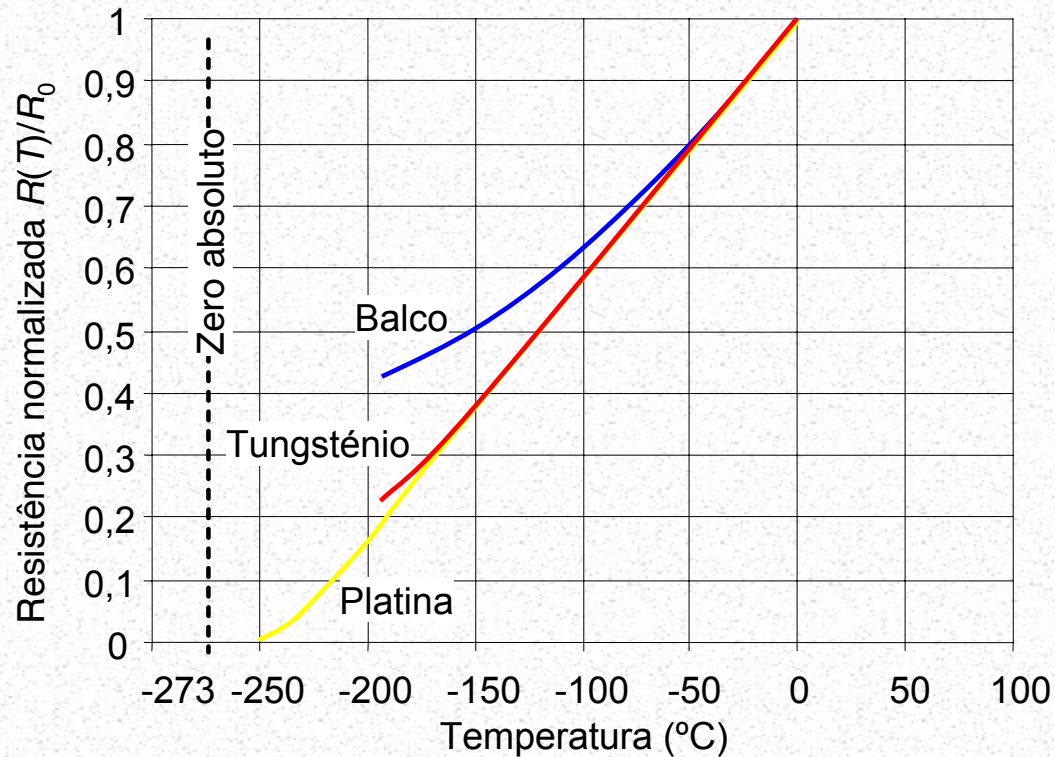
Termistor: (a) aspecto típico; (b) característica resistência vs temperatura

■ Transdutores de temperatura



Termoresistências – curvas para altas temperaturas

■ Transdutores de temperatura



Termoresistências – curvas para baixas temperaturas

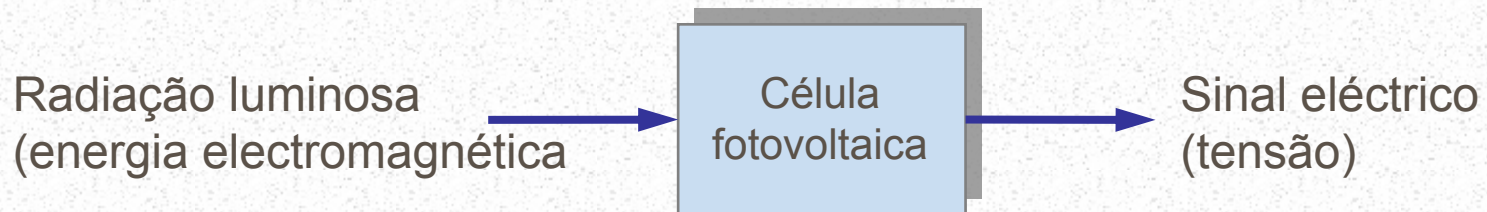
■ Transdutores de temperatura

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 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 (com uma ponte)	até 200mV/°C (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

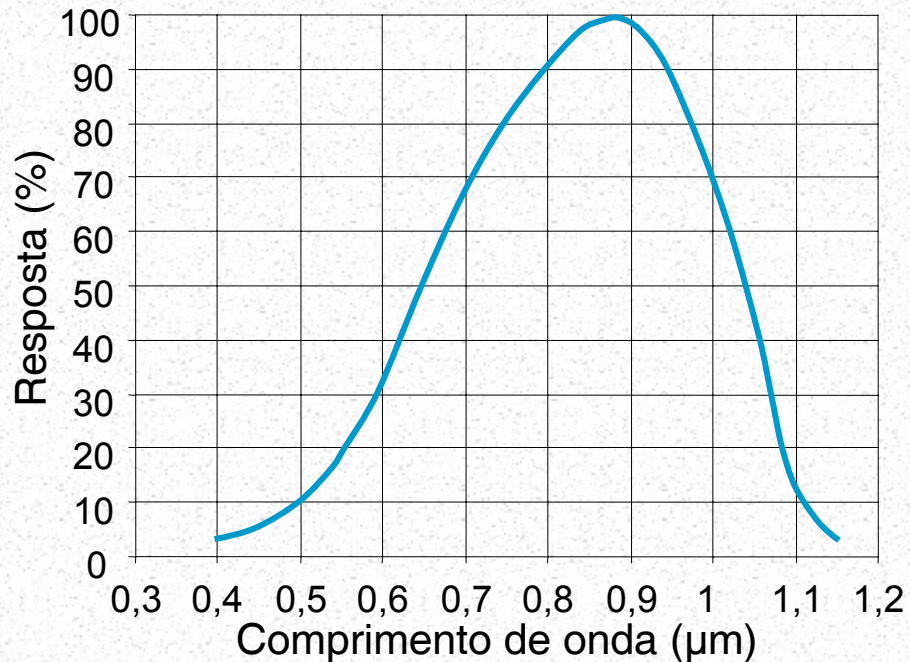
■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

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



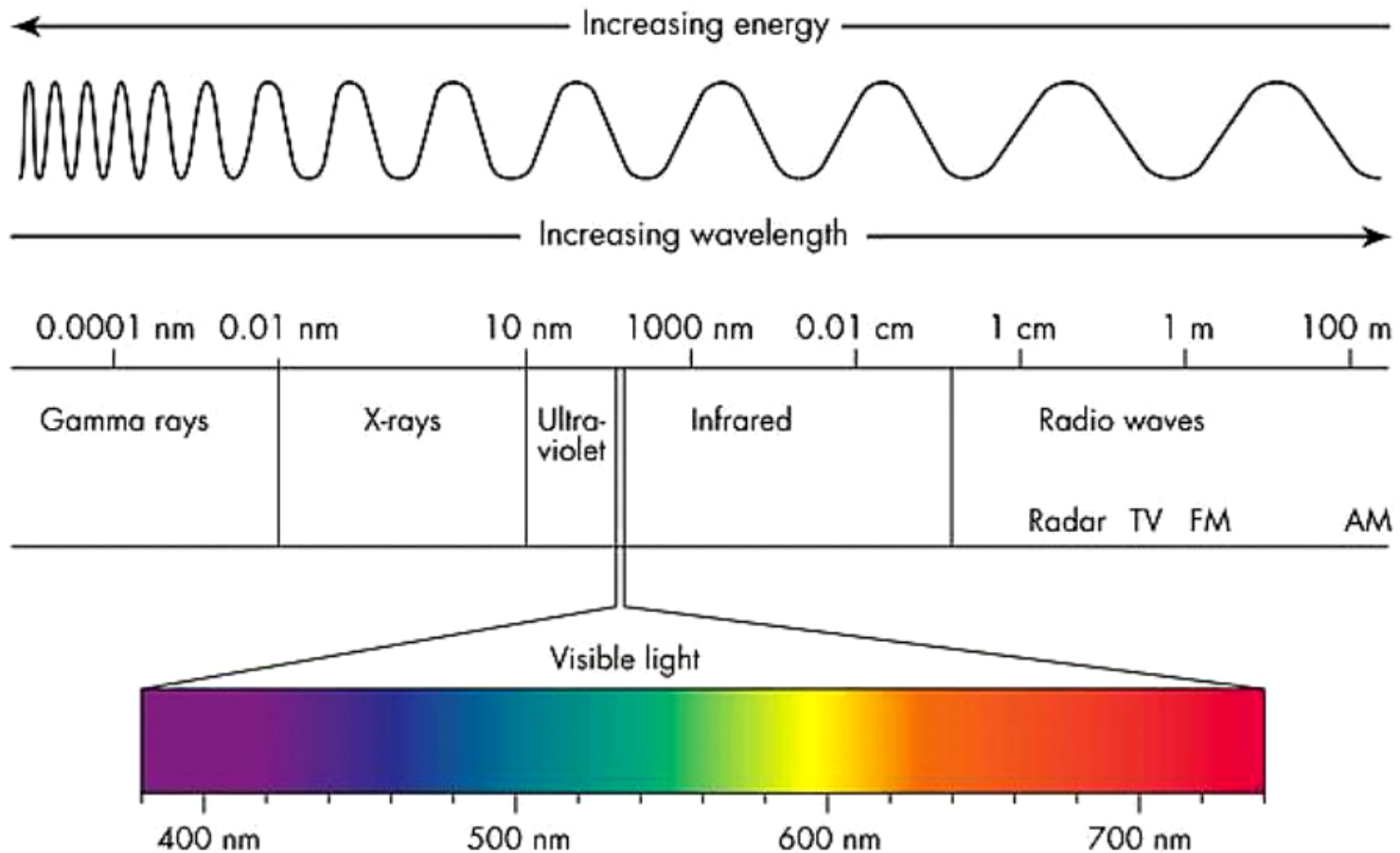
■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

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



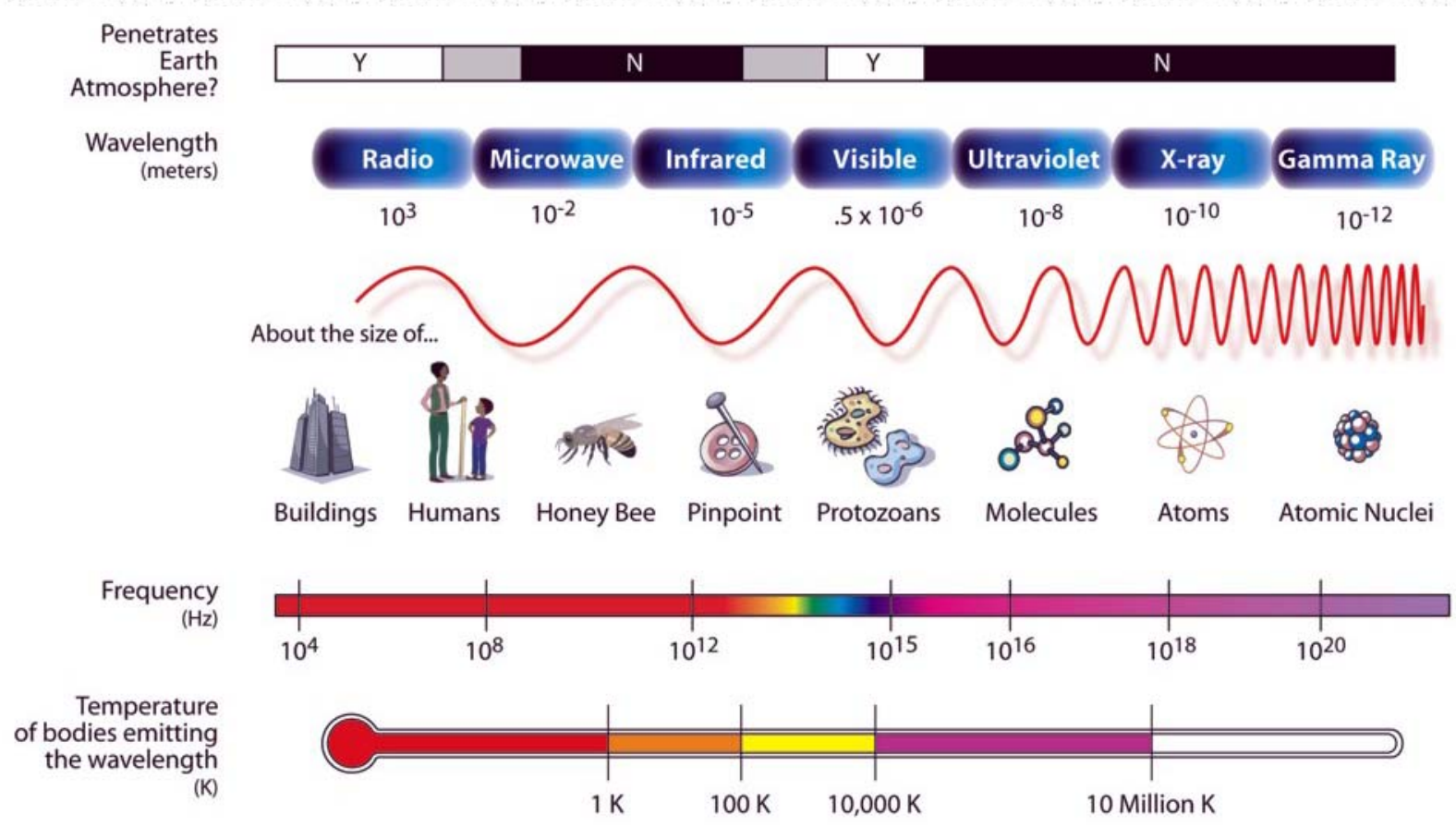
Curva de resposta típica dum fototransístor

Transdutores



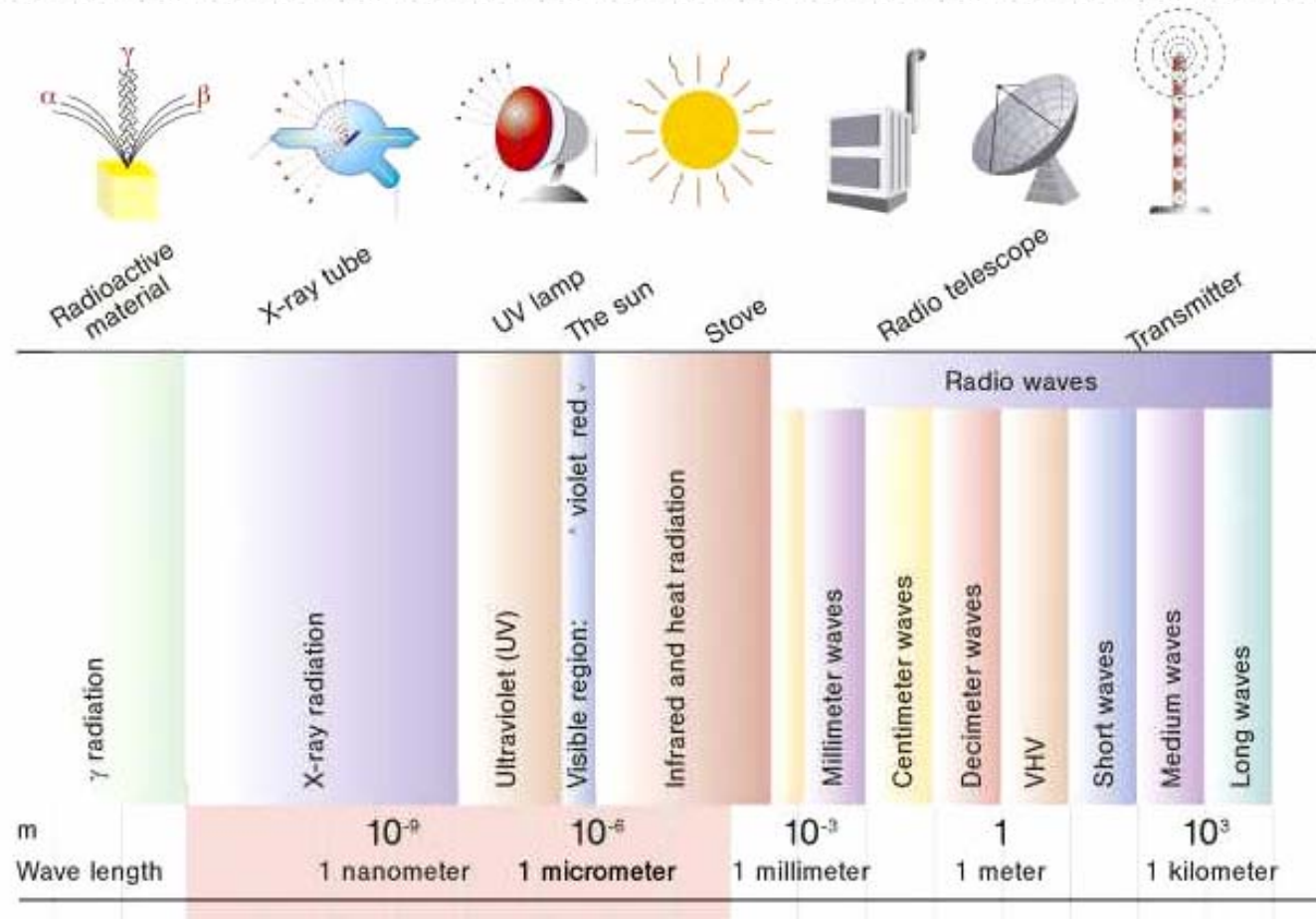
Espectro Electromagnético

Transdutores



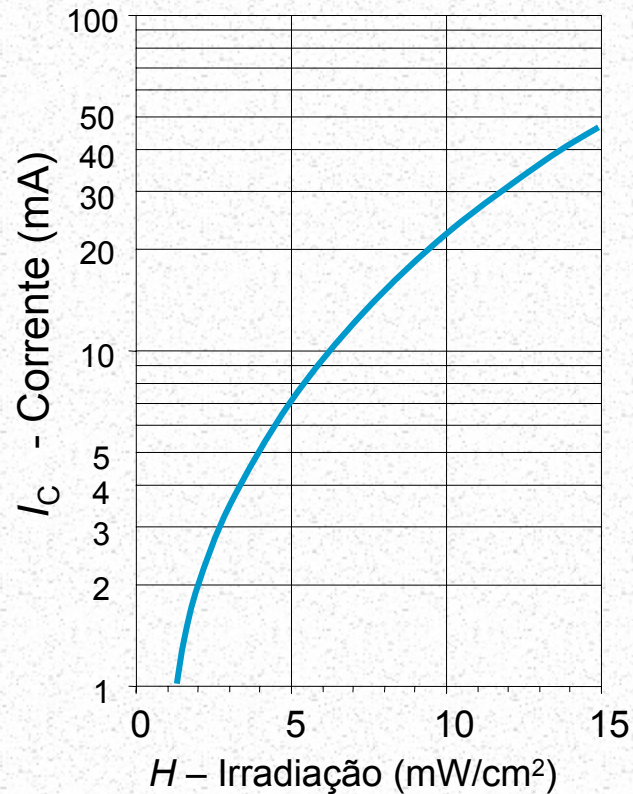
Espectro Electromagnético

Transdutores



Espectro Electromagnético

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



Curva de resposta típica dum fototransístor



Transdutores



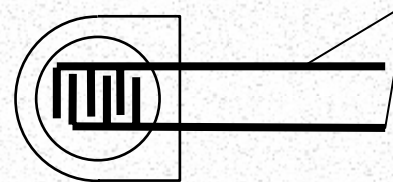
Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

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

Valores de irradiação típicos para o espectro visível

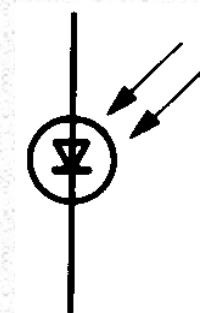
■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



Eléctrodos de metal
sobre uma superfície de
sulfureto de cádmio

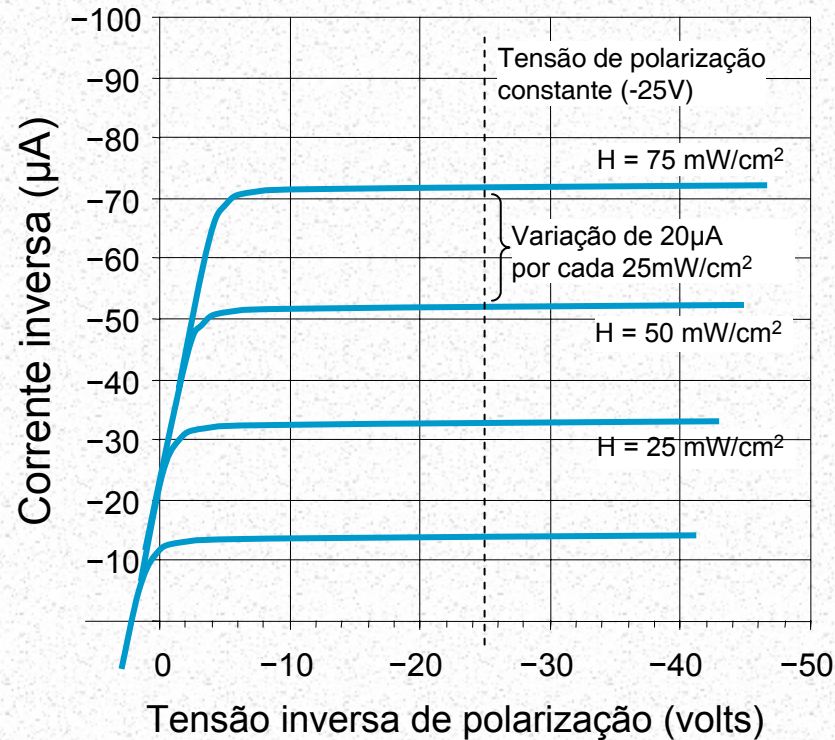
Aspecto e estrutura dum resistência fotossensível (LDR)

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



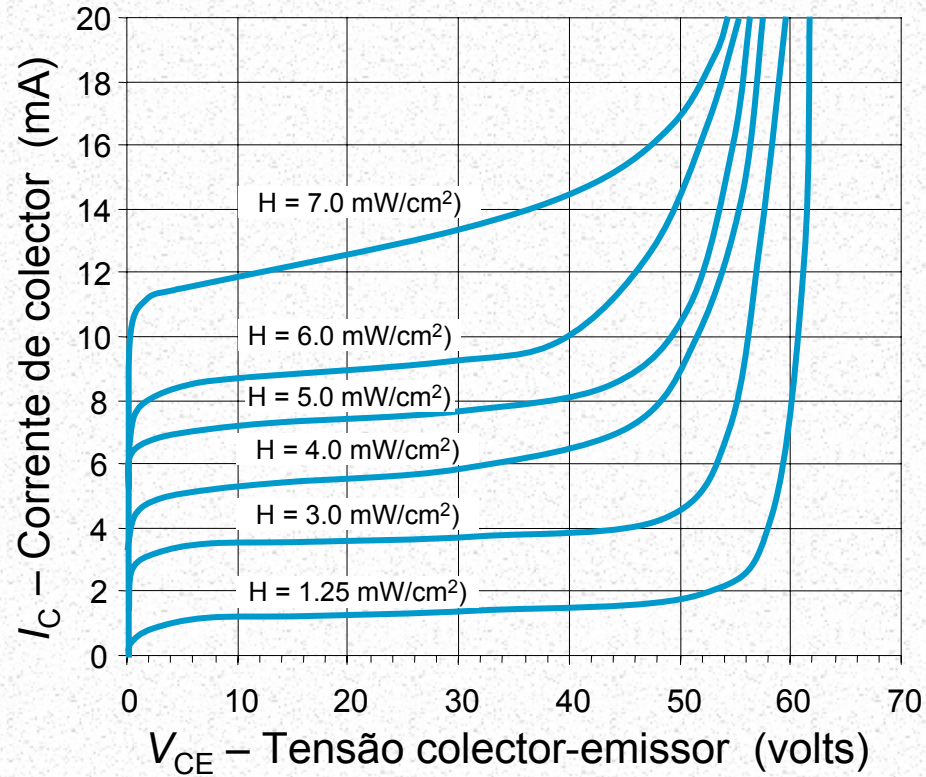
Fotodíodo (aspecto e símbolo).

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)



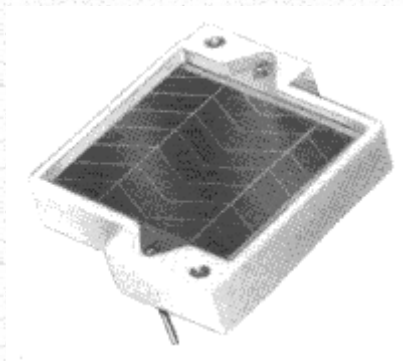
Característica dum fotodíodo

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

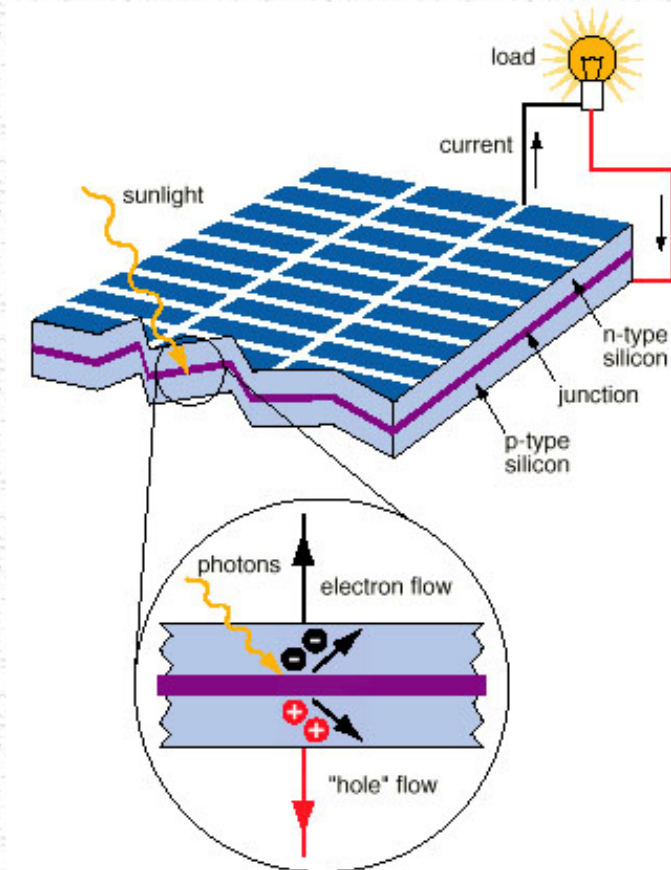


Característica dum fotodíodo

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

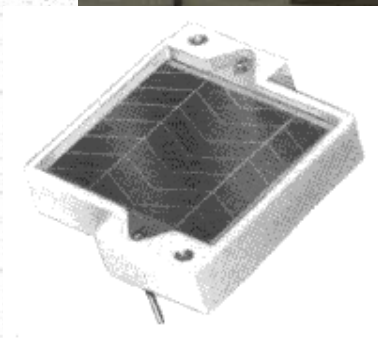


Aspecto da célula fotovoltaica



Transdutores

■ Trans



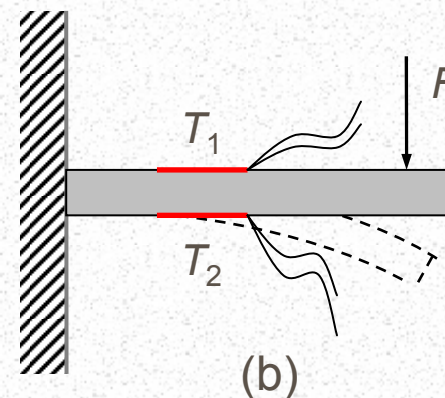
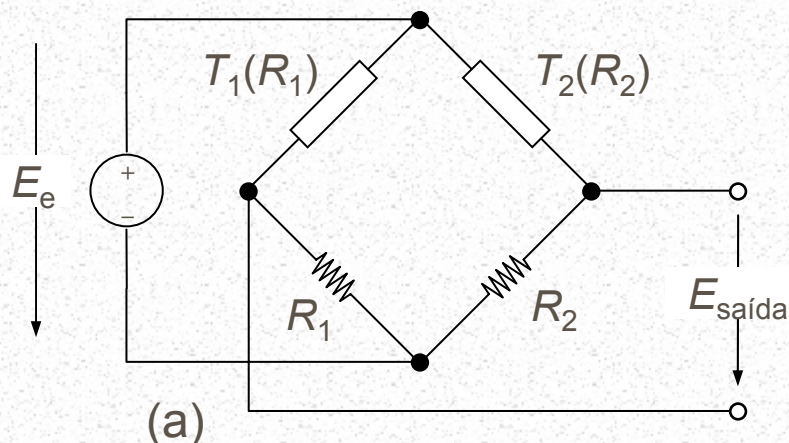
Aspecto e utilização da célula fotovoltaica

■ Transdutores ópticos (sensores de luz)

Característica	Fotocondutor	Fotodíodo	Fototransistor	Fotocélula	Fotomultiplicador
Impedância de saída	Iluminado: 20k Ω No escuro: 1M Ω	Muito elevada	Muito elevada	Muito baixa	Muito elevada
Corrente (típica)	10mA	(μ A)	1 – 50mA	1mA (ou mais)	1mA (max.)
Tensão de excitação (típica)	100V (max)	50V	30V	—	1kV (ou mais)
Tempo de subida (típico)	(ms)	(μ s)	(μ s)	(ms)	< 1 μ 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



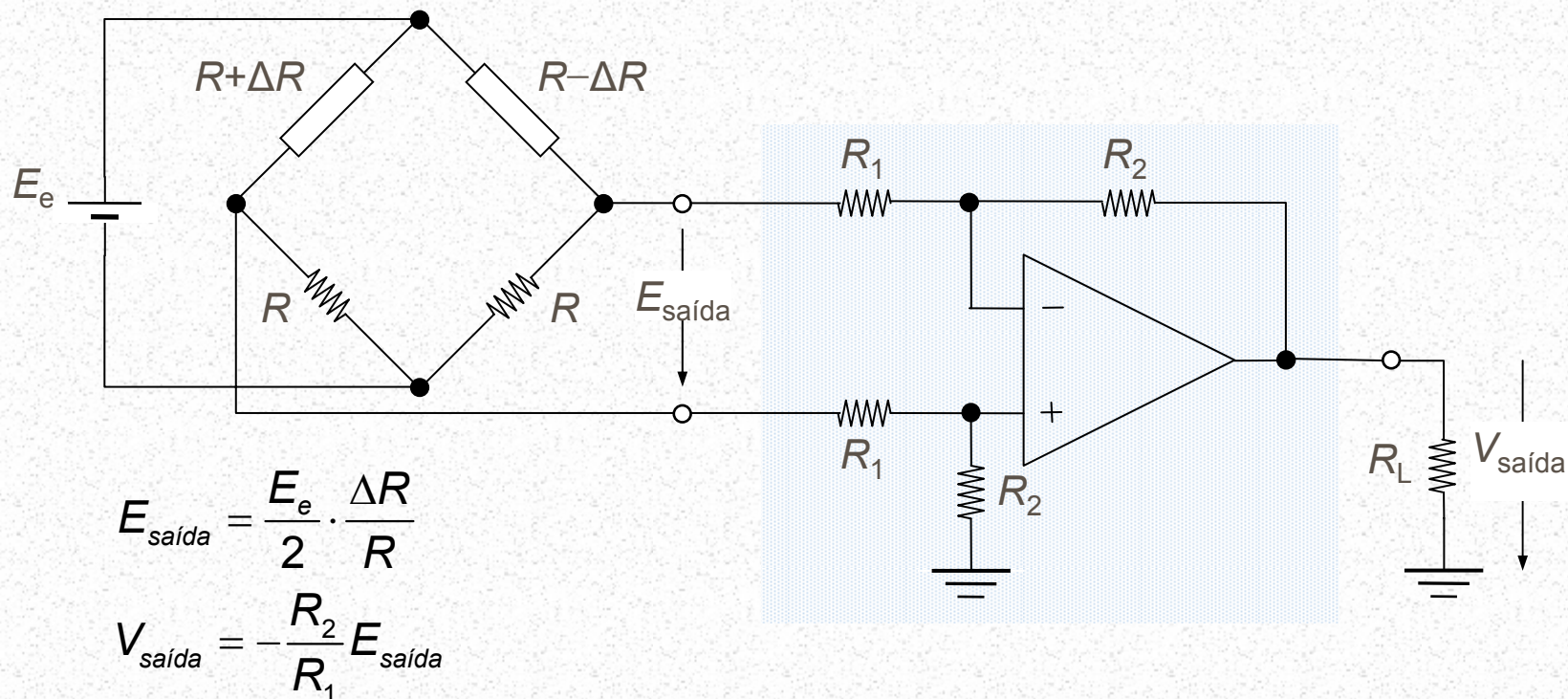
Princípio da utilização de extensómetros: a) ligação em ponte de *Wheatstone*; b) montagem dos extensómetros na barra

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

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



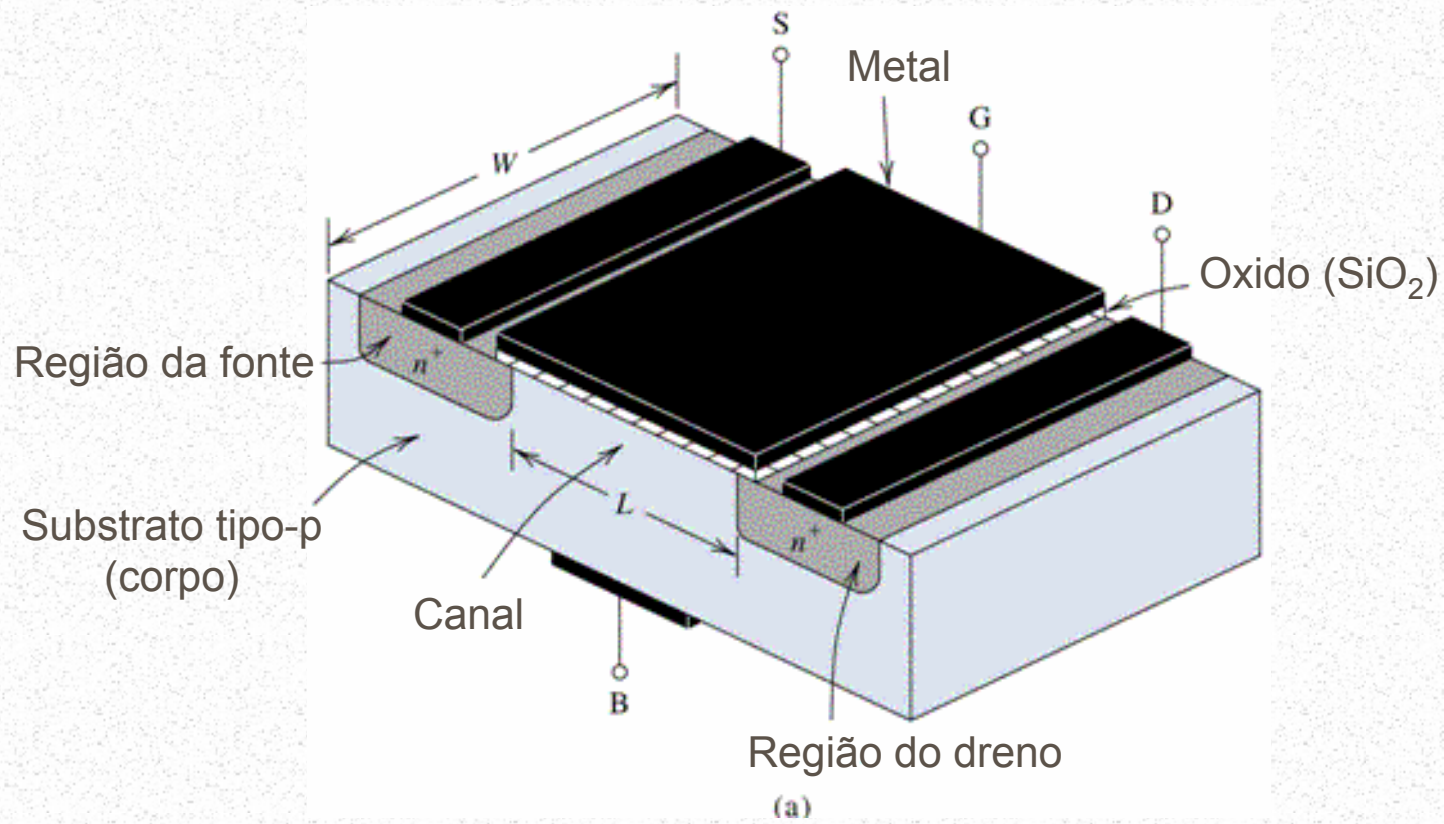
Componentes Básicos



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

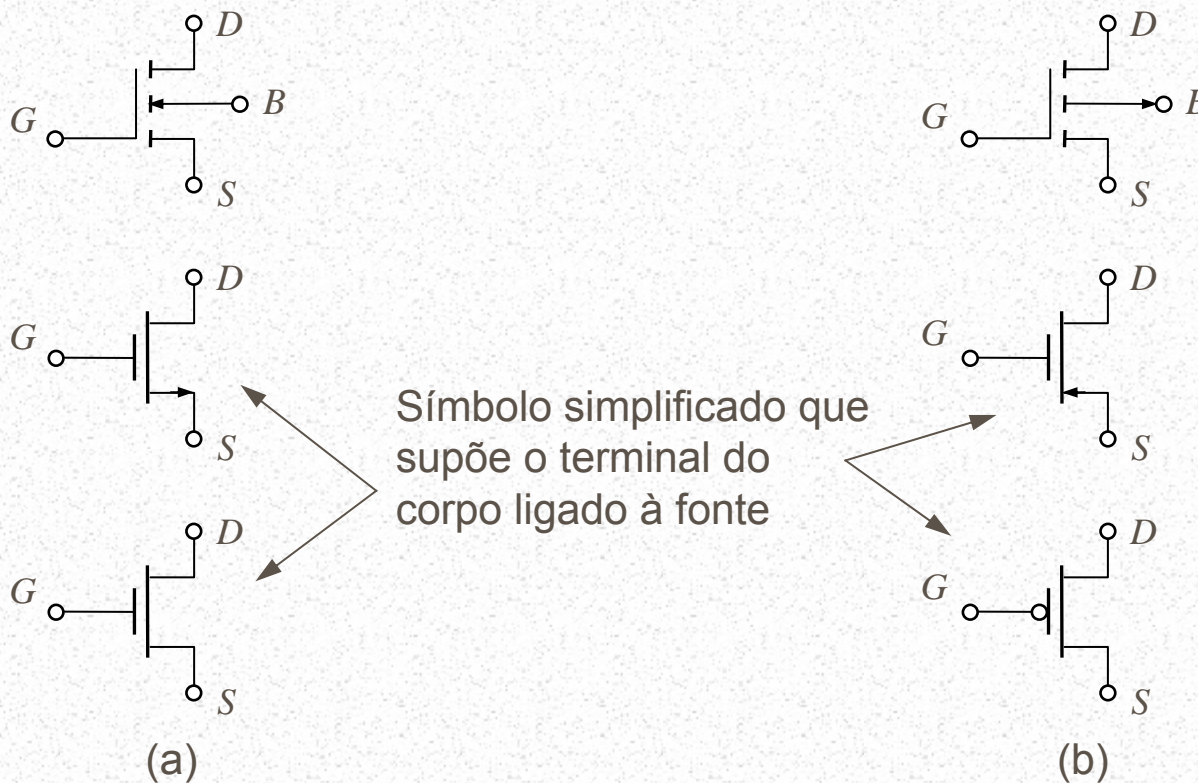
- **O MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)**
 - Dispositivo controlado por tensão
 - Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico
 - Impedância de entrada extremamente elevada (terminal de controlo isolado)
 - Mais simples de construir e ocupa menos espaço que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

■ O MOSFET – estrutura



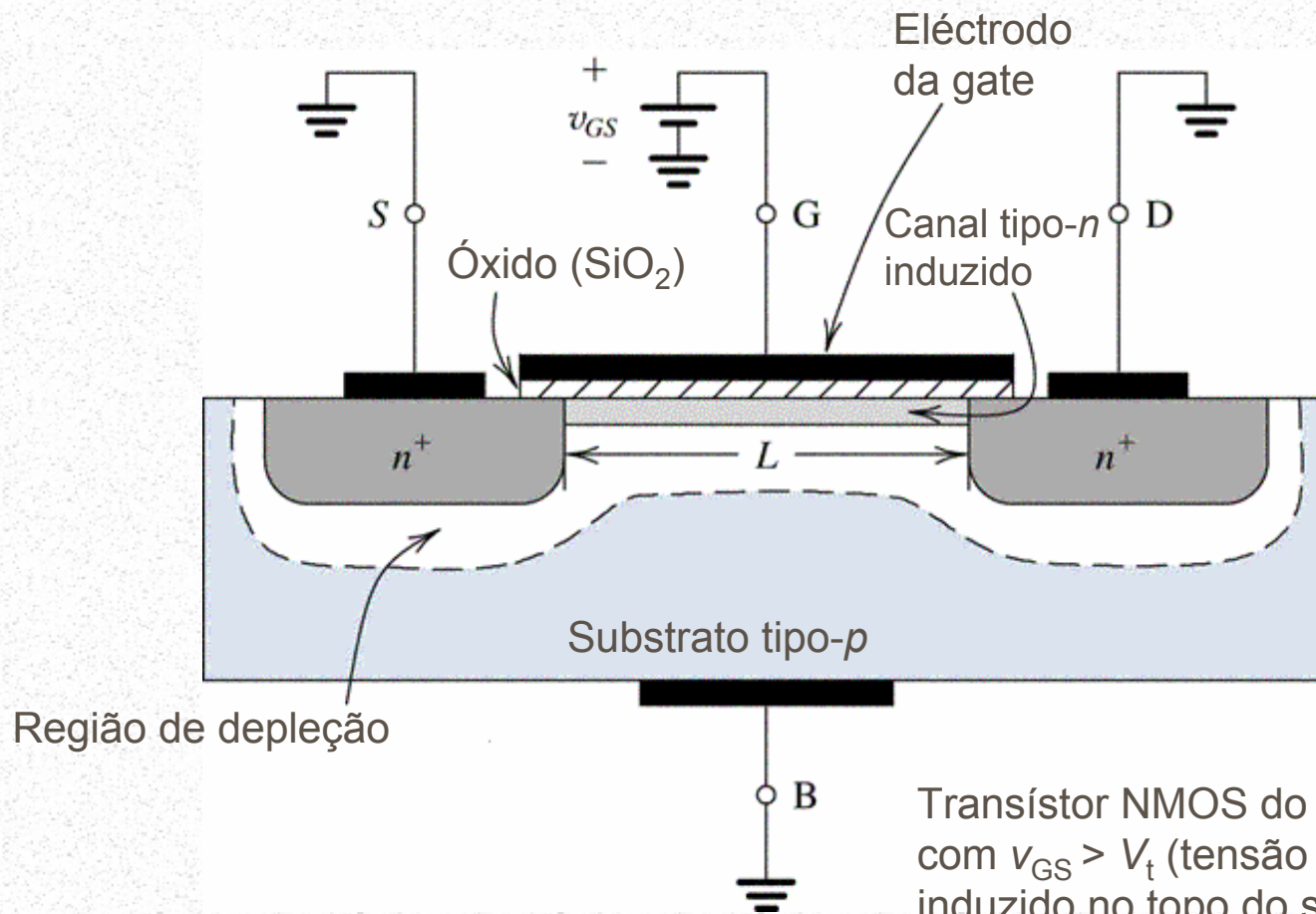
Estrutura física de um transístor NMOS do tipo intensificação

■ MOSFET

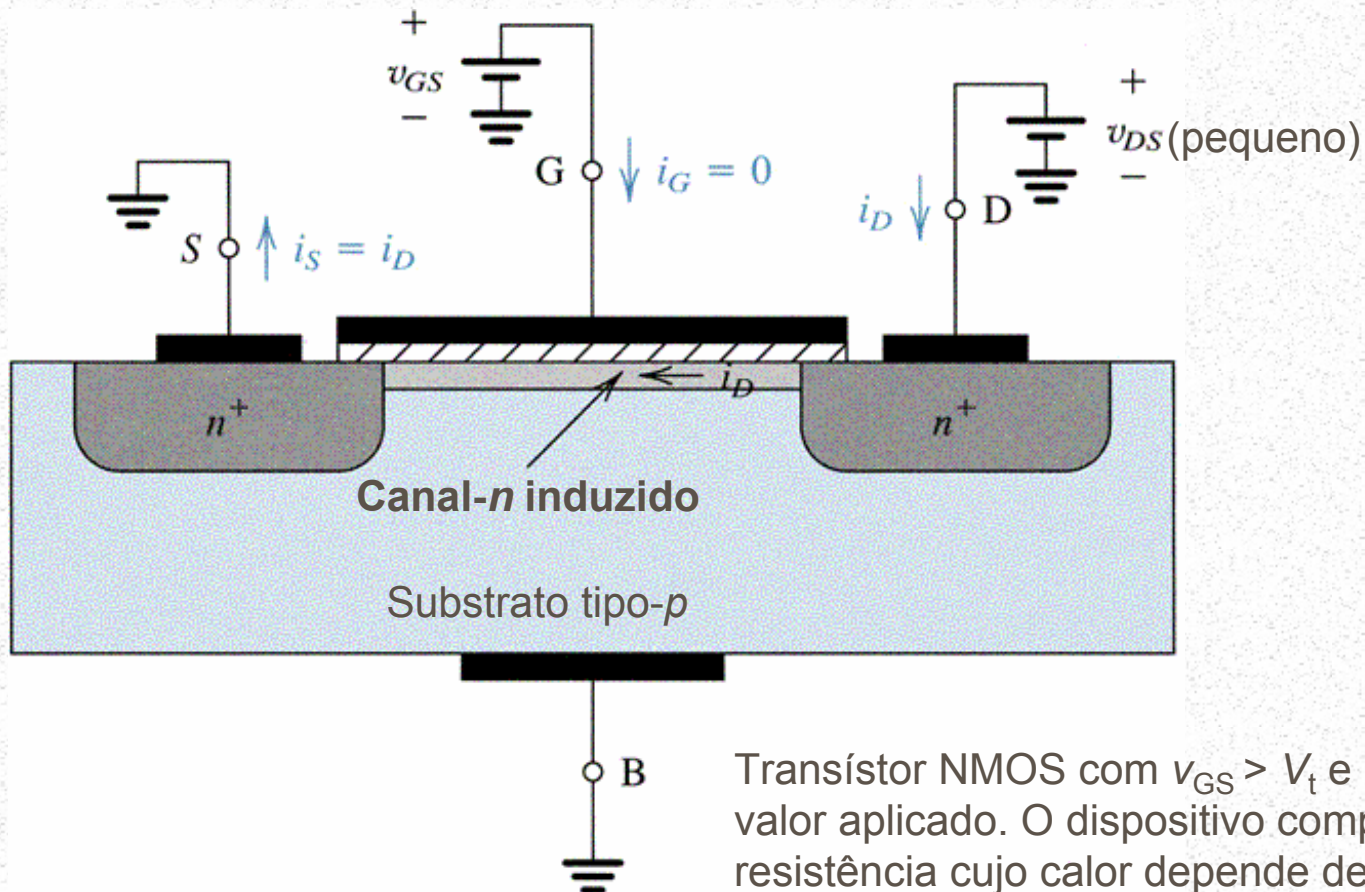


Símbolos do MOSFET do tipo intensificação: (a) NMOS; (b) PMOS

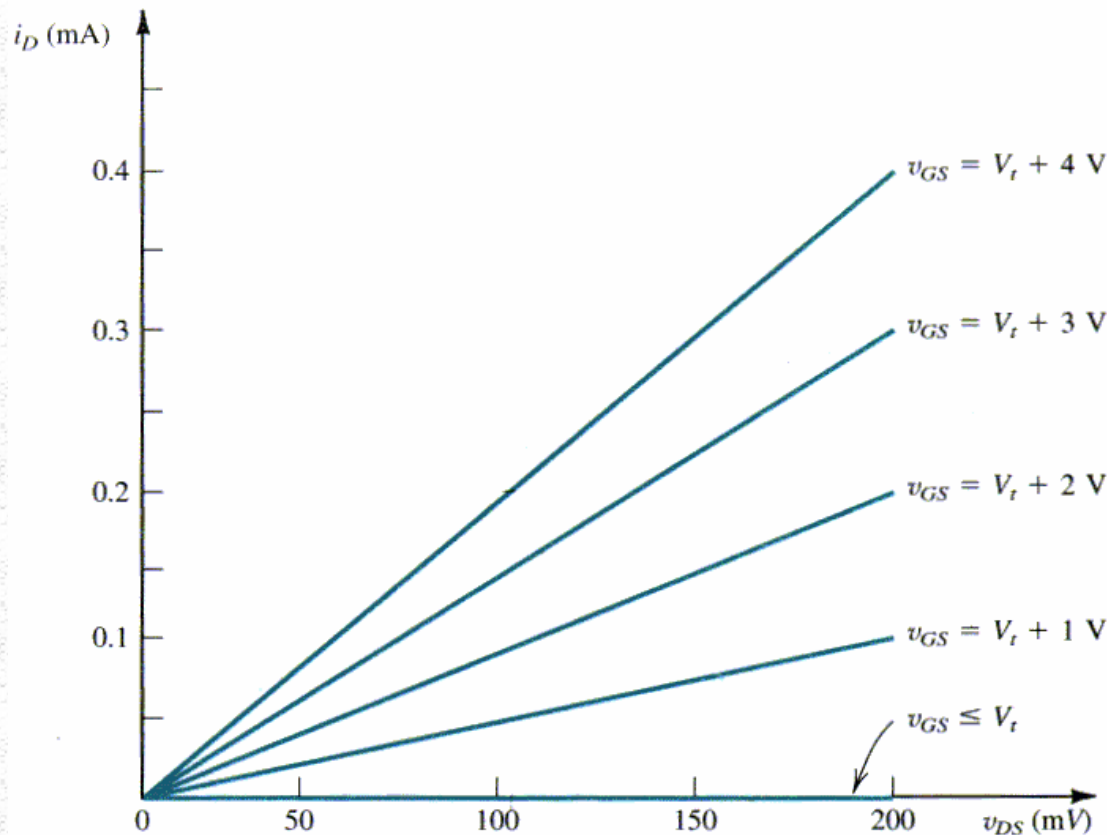
Componentes Básicos



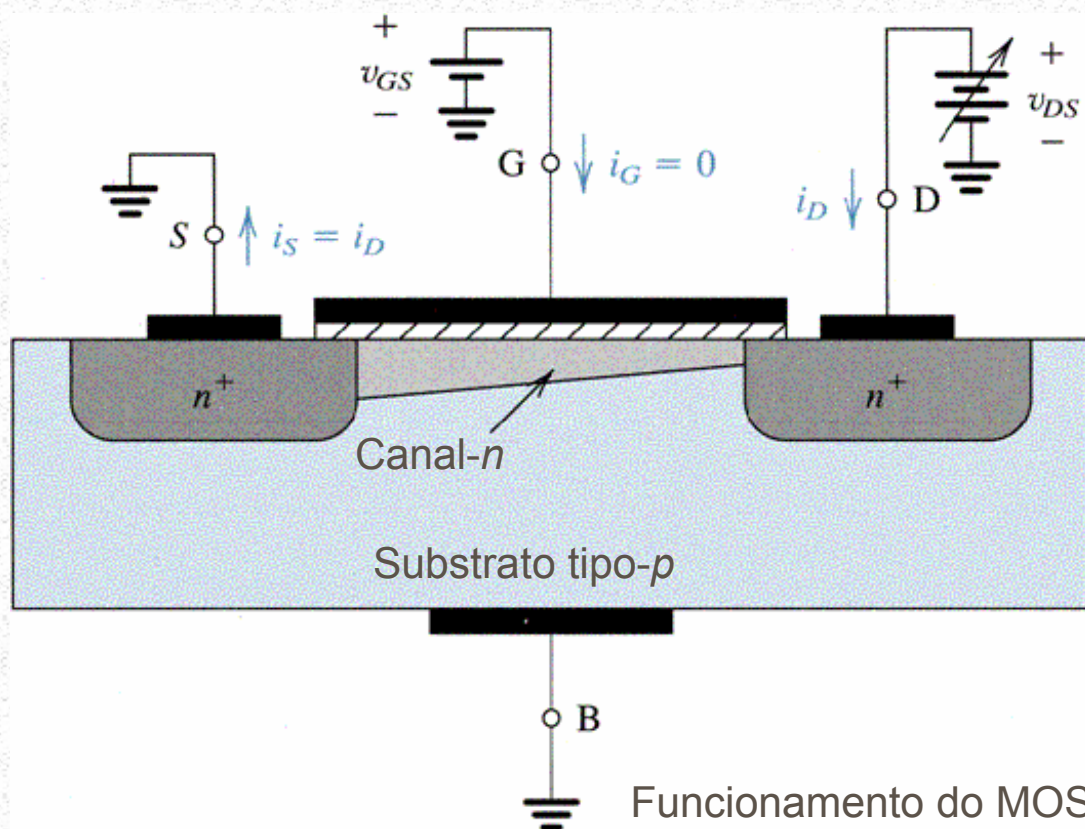
Transístor NMOS do tipo intensificação:
com $v_{GS} > V_t$ (tensão limiar) um canal n é induzido no topo do substrato (junto à gate)



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 $v_{GS} - V_t$)

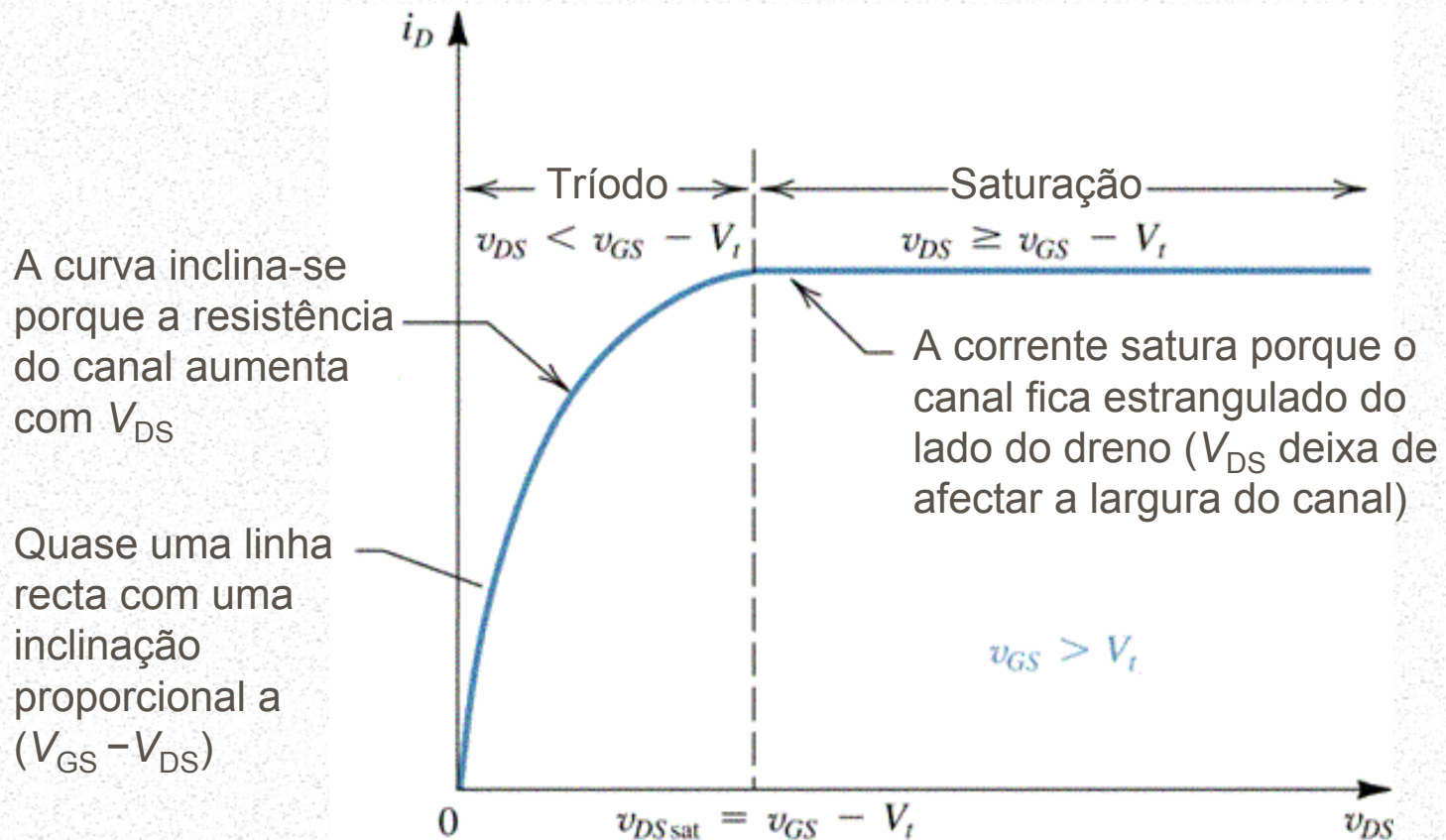


Característica i_D - v_{DS} do MOSFET de intensificação para pequenos valores de v_{DS} : o dispositivo comporta-se como uma resistência linear controlada pela tensão v_{GS} .



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 tríodo

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

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

■ 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: $t_{ox} = 0.02 \text{ a } 0.1 \text{ }\mu\text{m}$

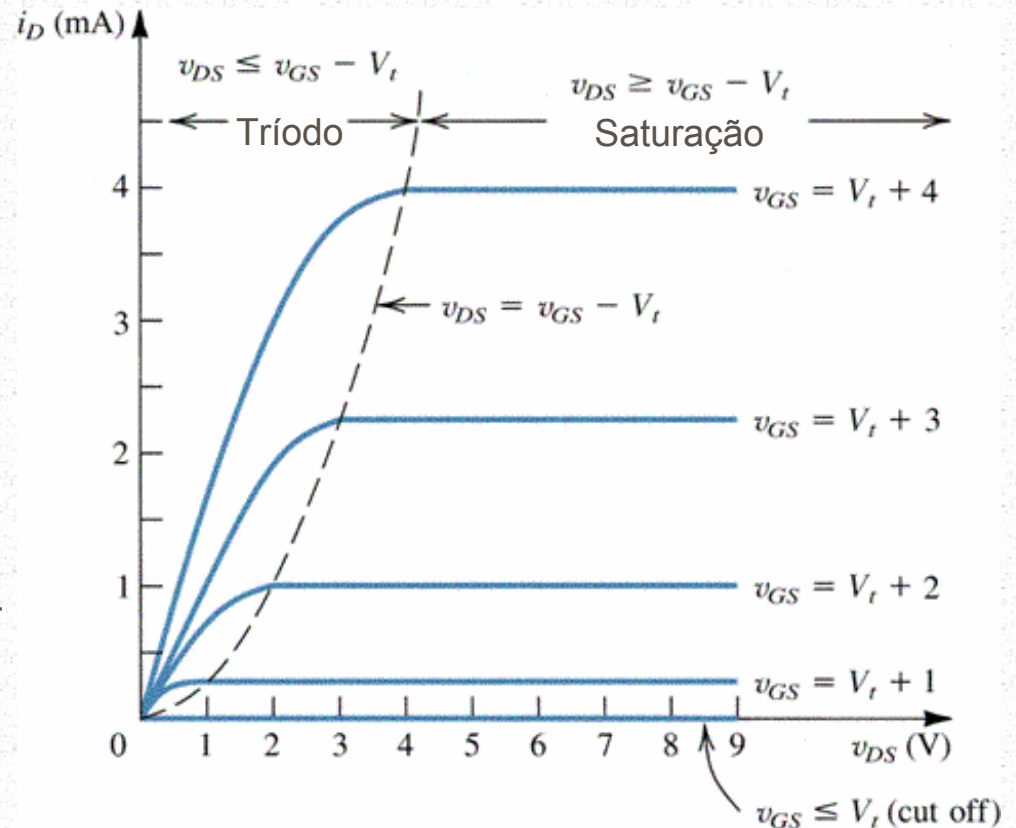
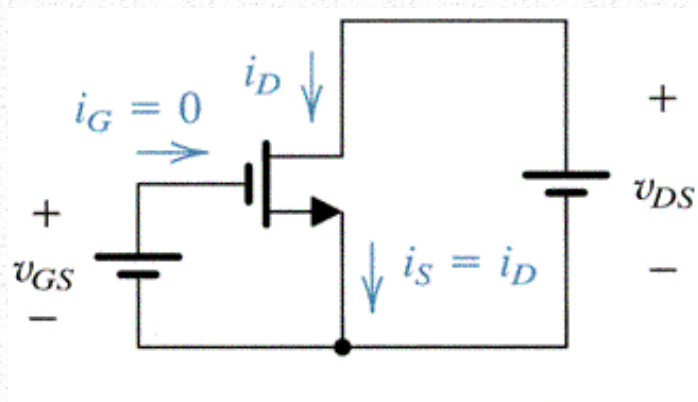
Cte. dieléctrica do óxido: $\epsilon_{ox} = 3.97\epsilon_0 = 3.5 \times 10^{-13} \text{ F/cm}$

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 $t_{ox} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$)

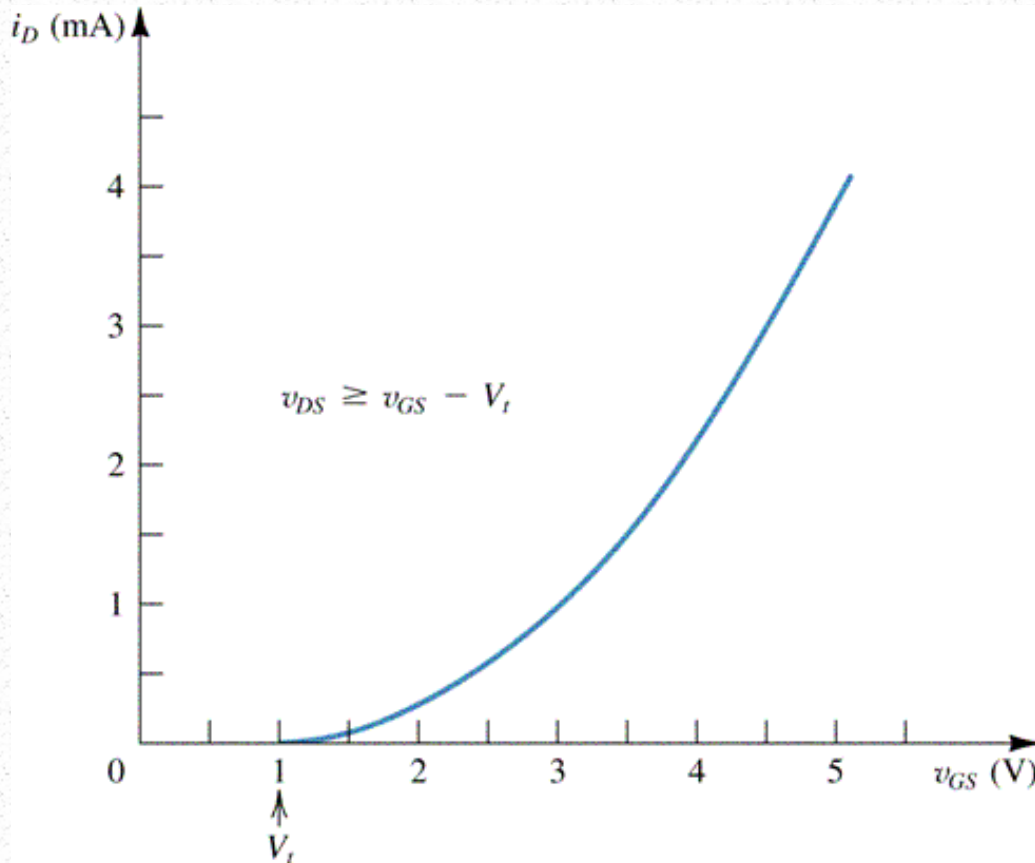
Constante de transcondutância: $k'_n = \mu_n C_{ox}$
 $\approx 100 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$ (para $t_{ox} = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$)
 $\approx 20 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$ (para $t_{ox} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$)

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

■ Característica i_D - i_{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

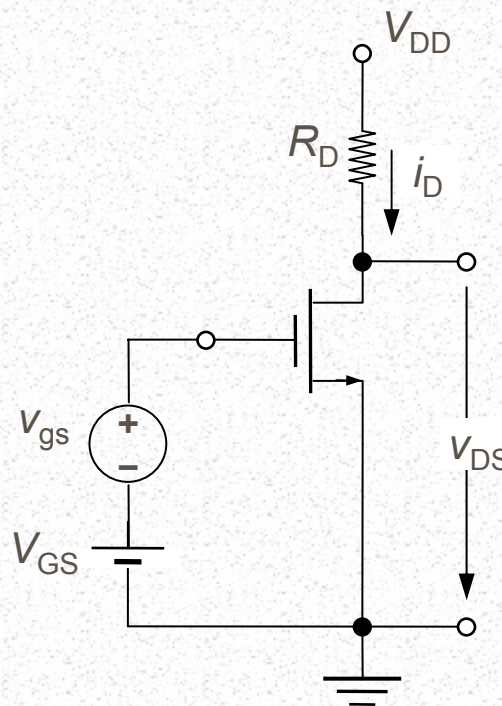
■ Funcionamento do MOSFET como amplificador

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

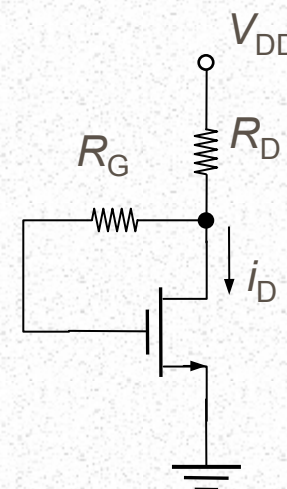
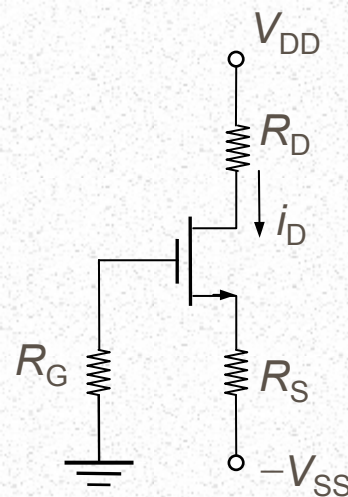
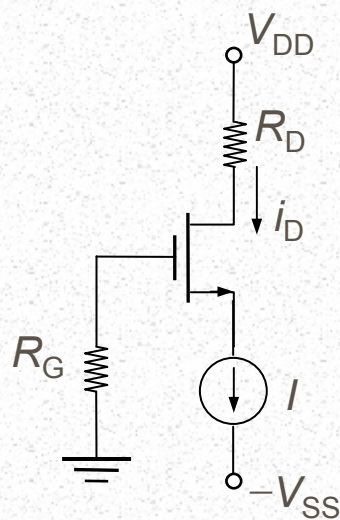
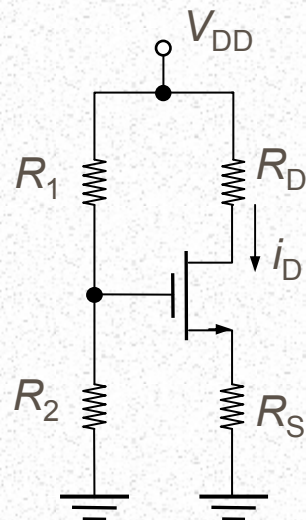
$$\begin{cases} i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \\ V_{DD} = R_D i_D + v_{DS} \end{cases}$$

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

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

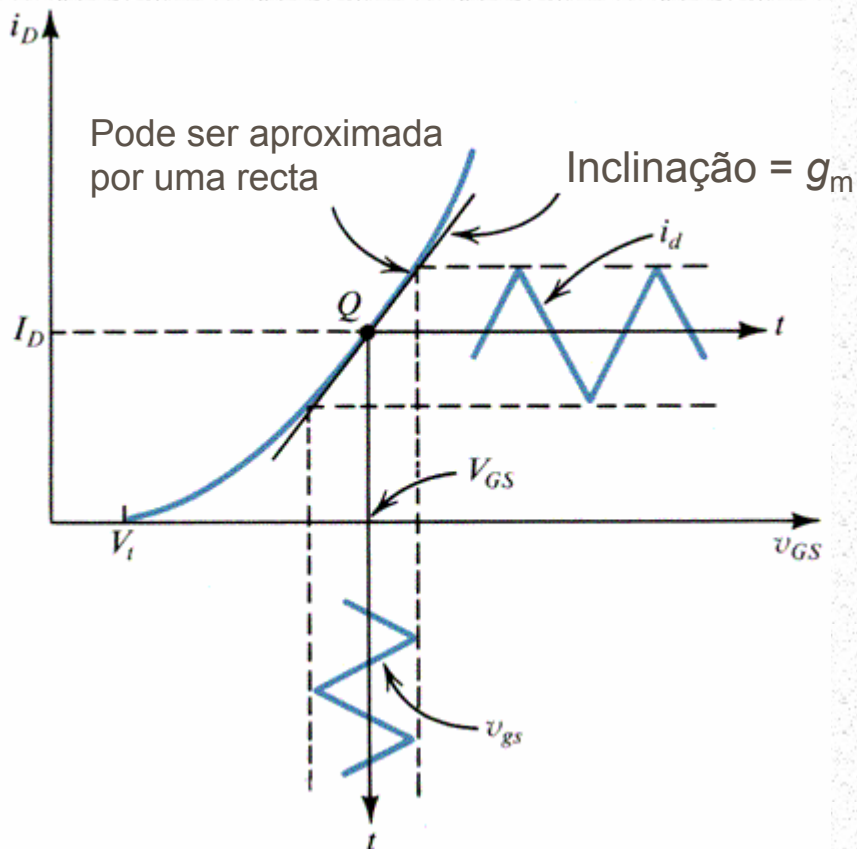


Circuito utilizado para estudar o funcionamento do MOSFET como amplificador



Diversos circuitos para polarização do MOSFET de intensificação

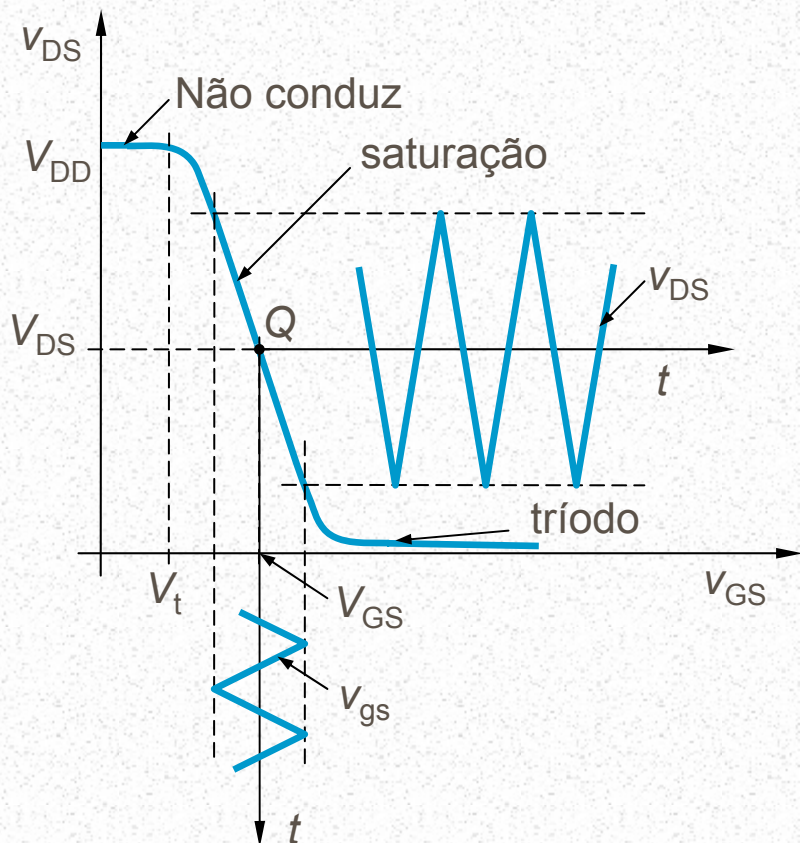
■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



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:

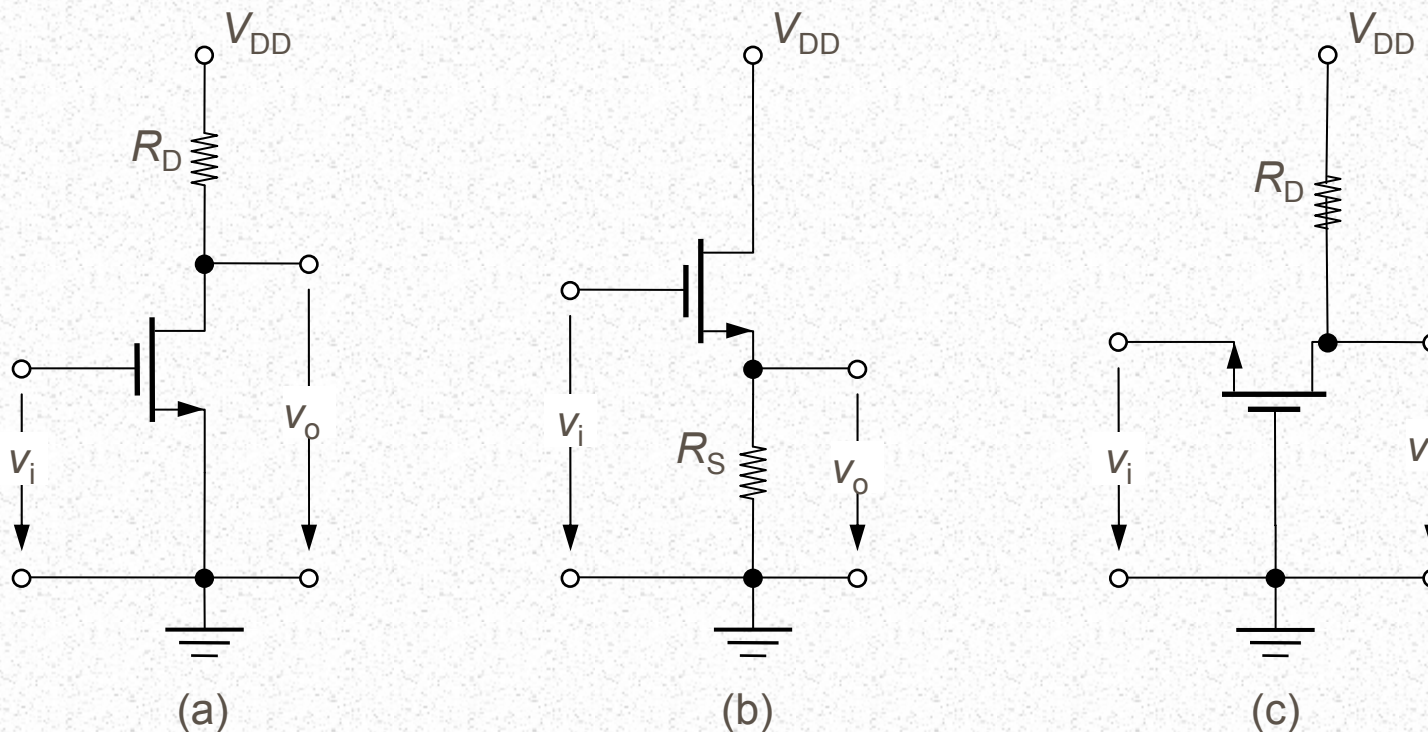
$$V_{DS} = V_{DD} - R_D (I_D + i_d)$$

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

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

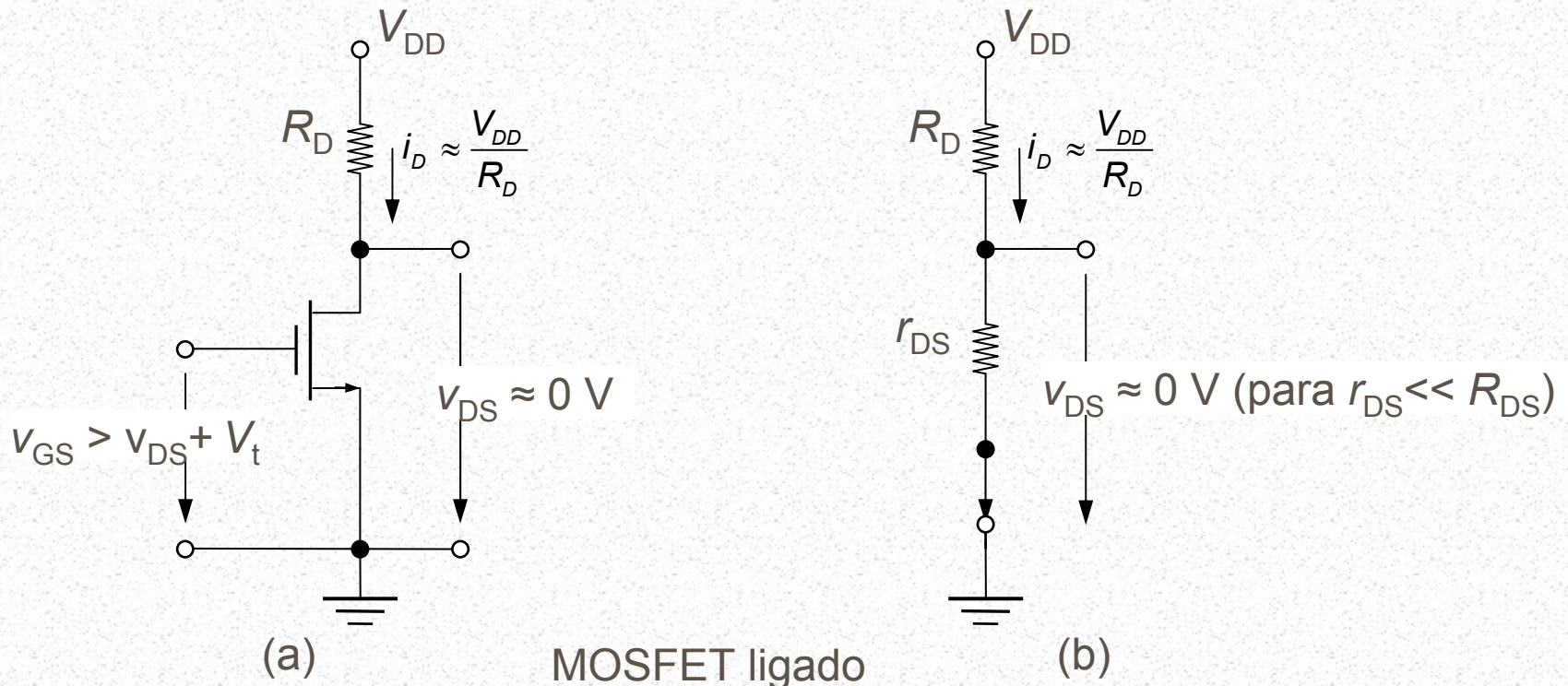
$$\rightarrow \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



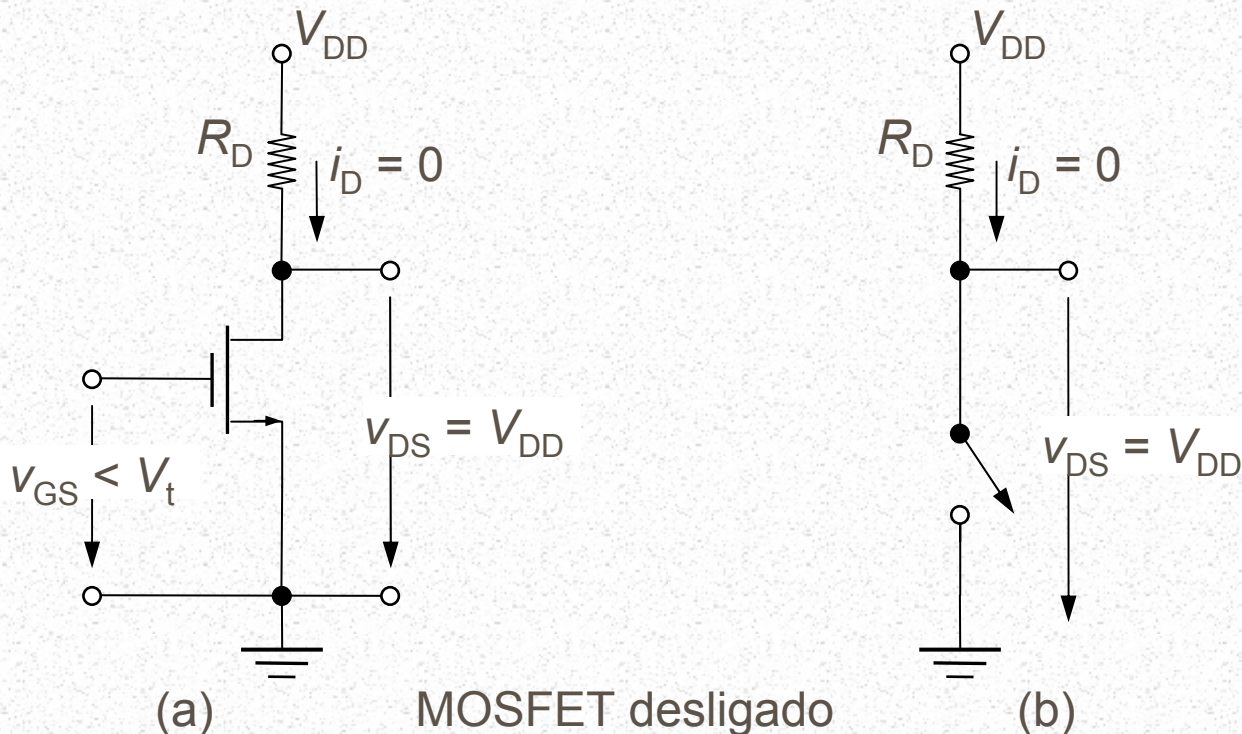
Amplificadores com 'n-MOSFET's – configurações básicas: (a) fonte comum; (b) dreno comum (ou seguidor de fonte); (c) gate comum

■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital



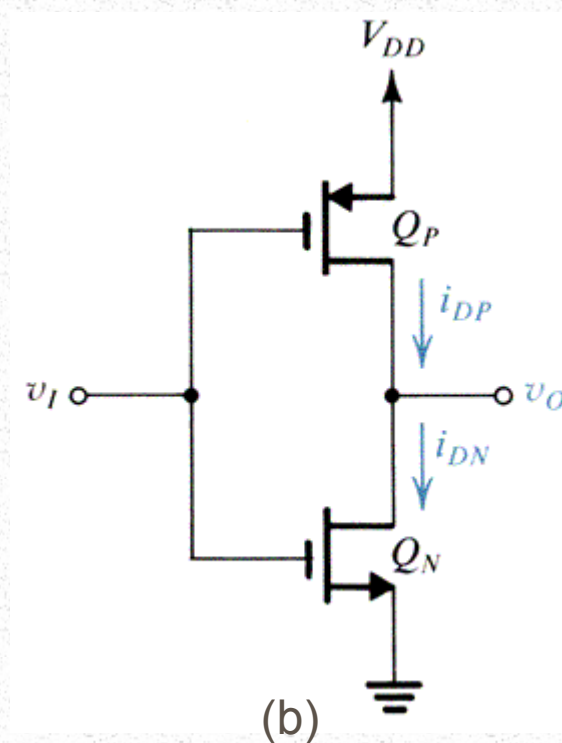
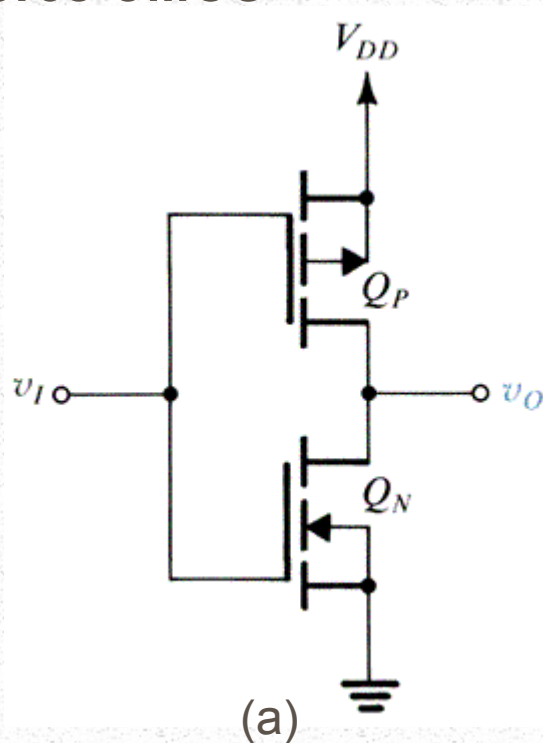
Funcionamento um nível de tensão de entrada (v_{GS}) elevado:
(a) circuito com $v_{GS} > v_{DS} + V_t$ (1 lógico); (b) circuito equivalente

■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital



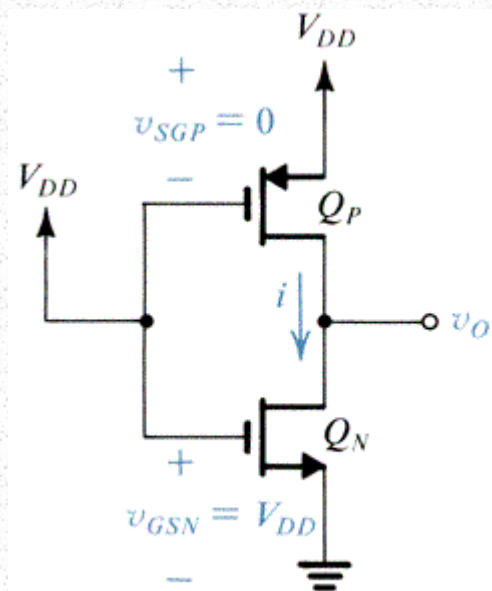
Funcionamento para um nível de tensão de entrada (v_{GS}) baixo:
(a) circuito com $v_{GS} < V_t$ (0 lógico); (b) circuito equivalente

■ Transístores CMOS

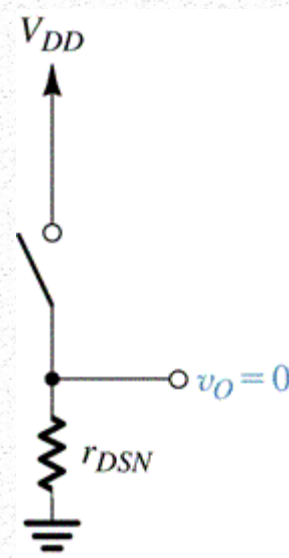


(a) Inversor CMOS; (b) circuito simplificado

■ Transístores CMOS



(a)

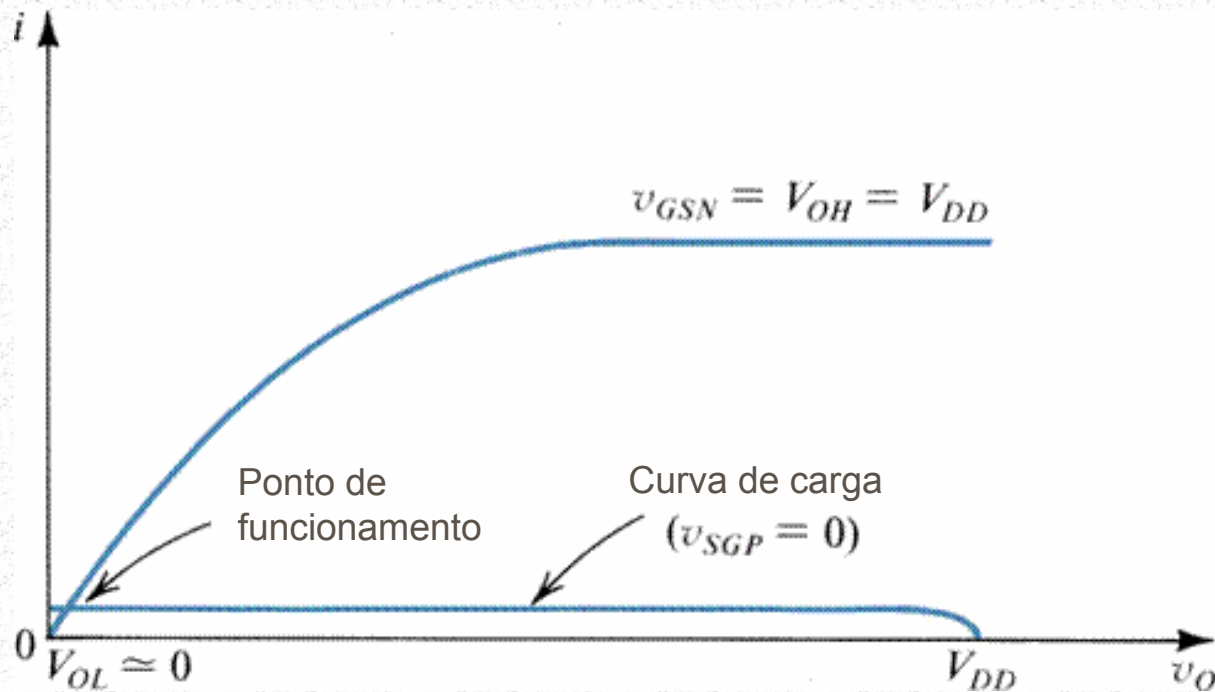


(b)

Funcionamento do inversor CMOS para v_i elevado:

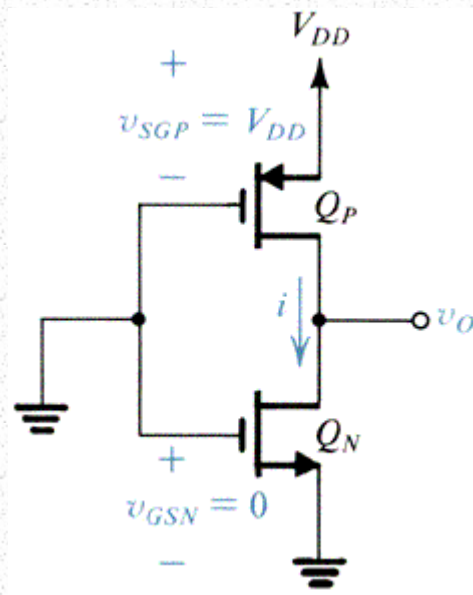
(a) circuito com $v_i = V_{DD}$ (1 lógico); (b) circuito equivalente

■ Transístores CMOS

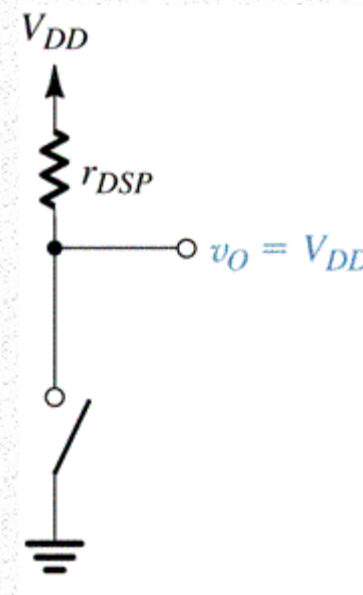


Funcionamento do inversor CMOS para v_i elevado: modo de obter graficamente o ponto de funcionamento

■ Transístores CMOS



(a)

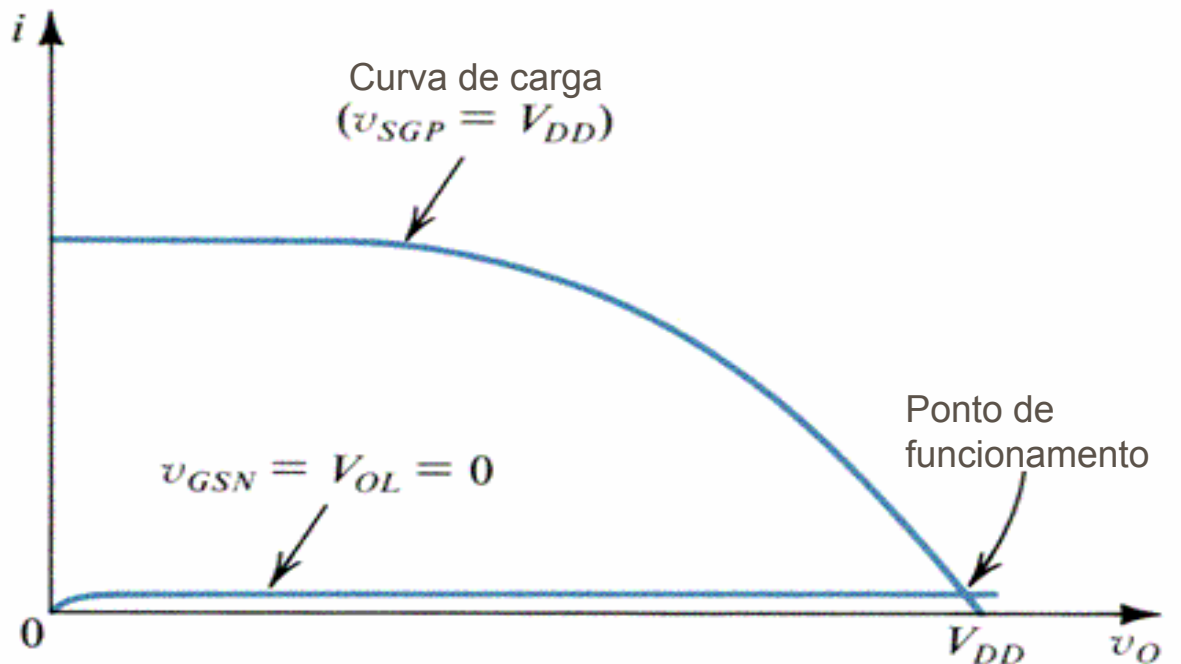


(b)

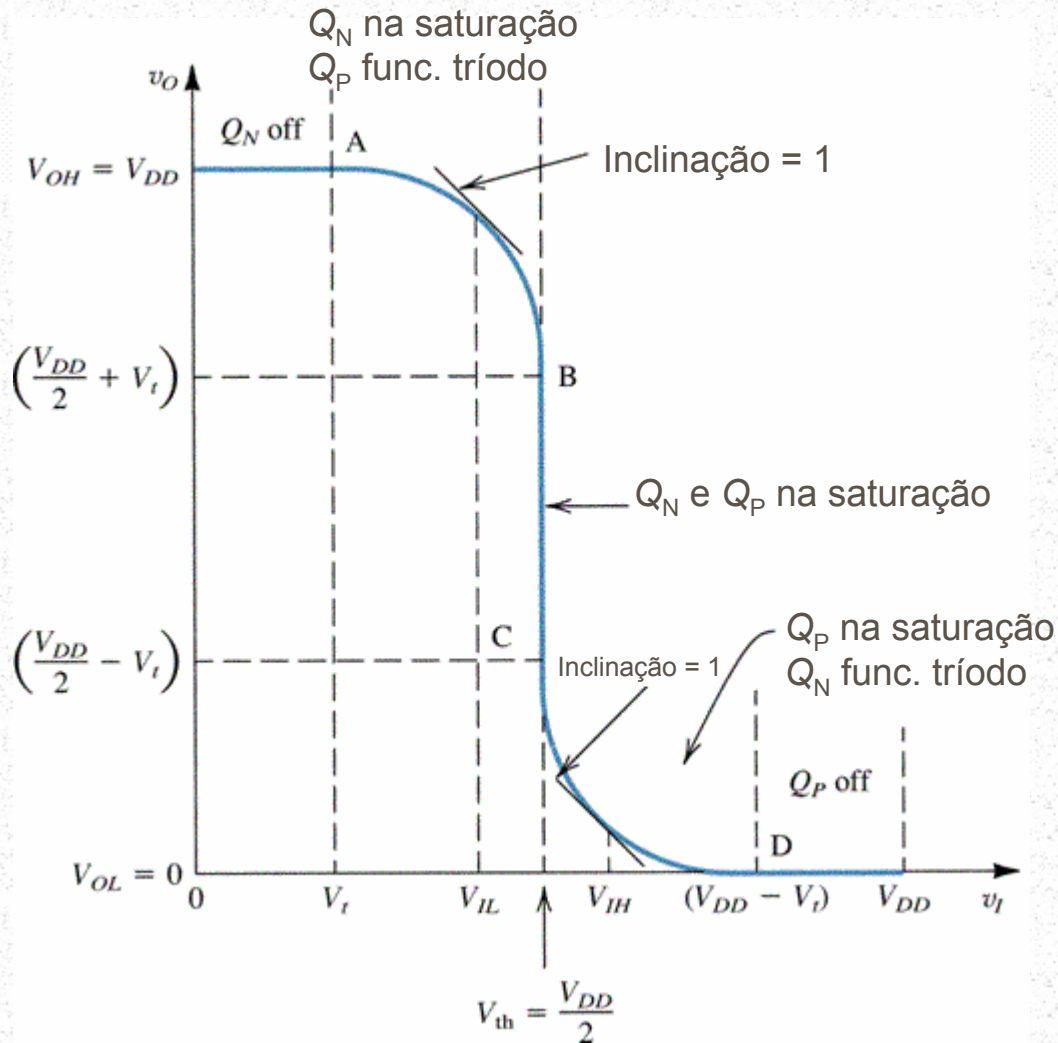
Funcionamento do inversor CMOS para v_i baixo:

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

■ Transístores CMOS

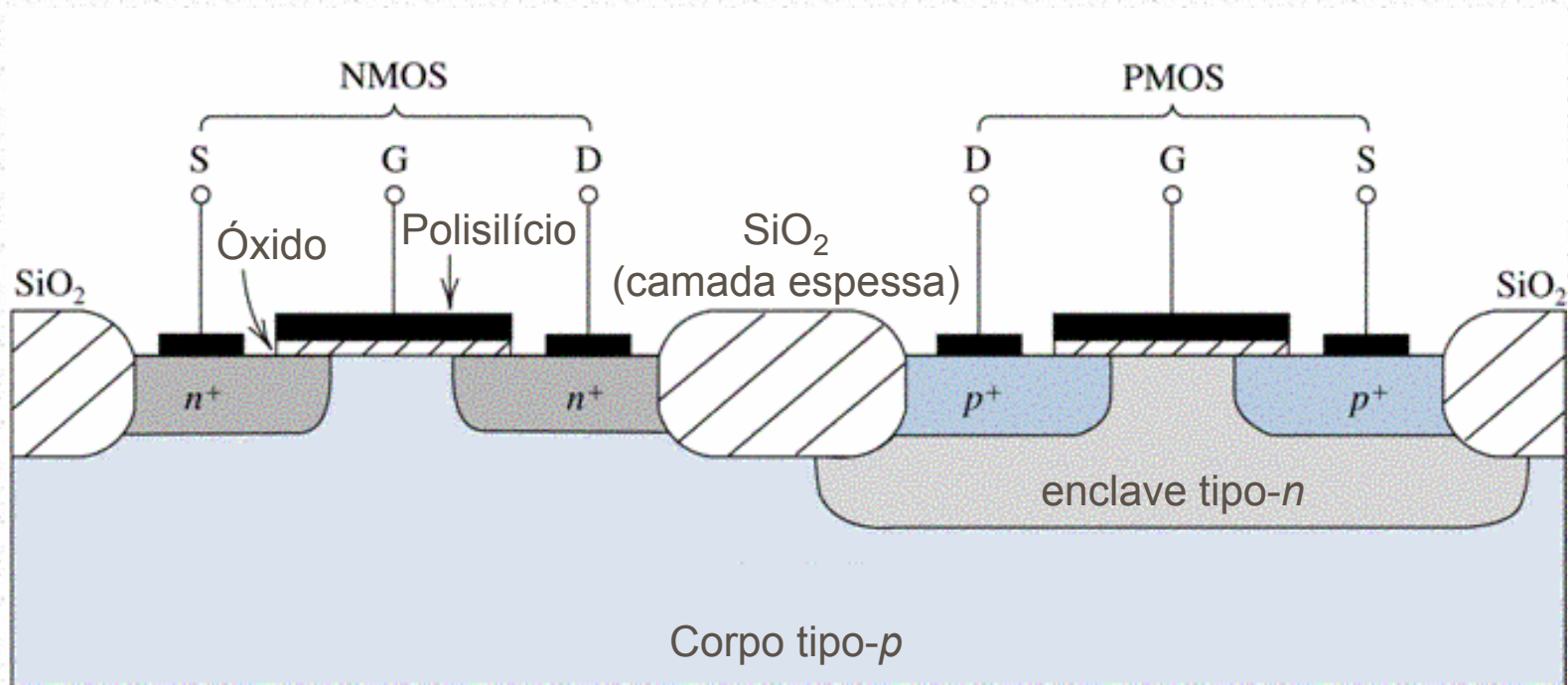


Funcionamento do inversor CMOS para v_i baixo: modo de obter graficamente o ponto de funcionamento



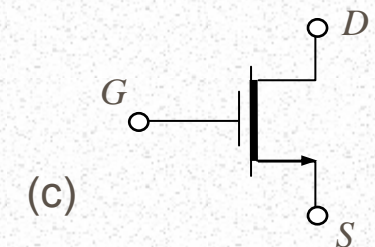
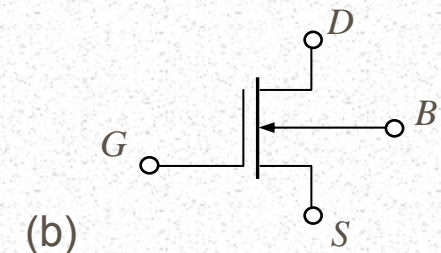
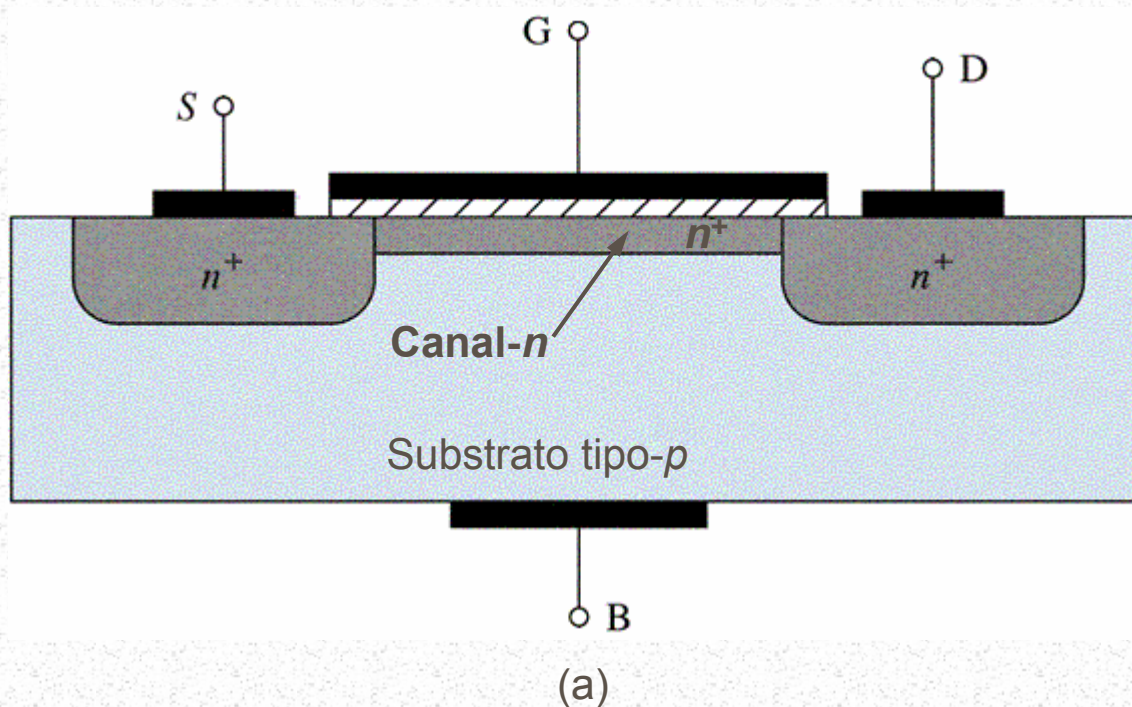
Característica de transferência do inversor CMOS

■ CMOS



Estrutura de um par de transístores CMOS

■ MOSFET de depleção



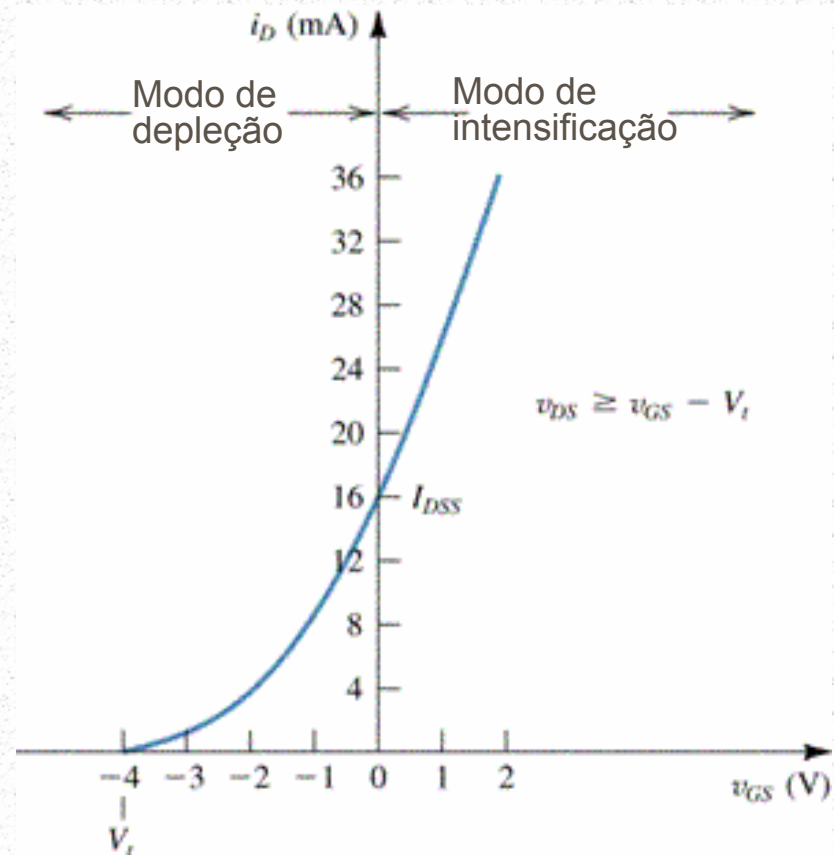
Transístor NMOS do tipo depleção: (a) estrutura física; (b) símbolo; (c) símbolo simplificado admitindo que o terminal do corpo está ligado à fonte

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

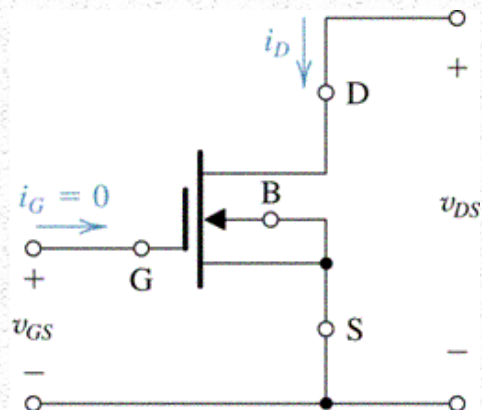
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2$$

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

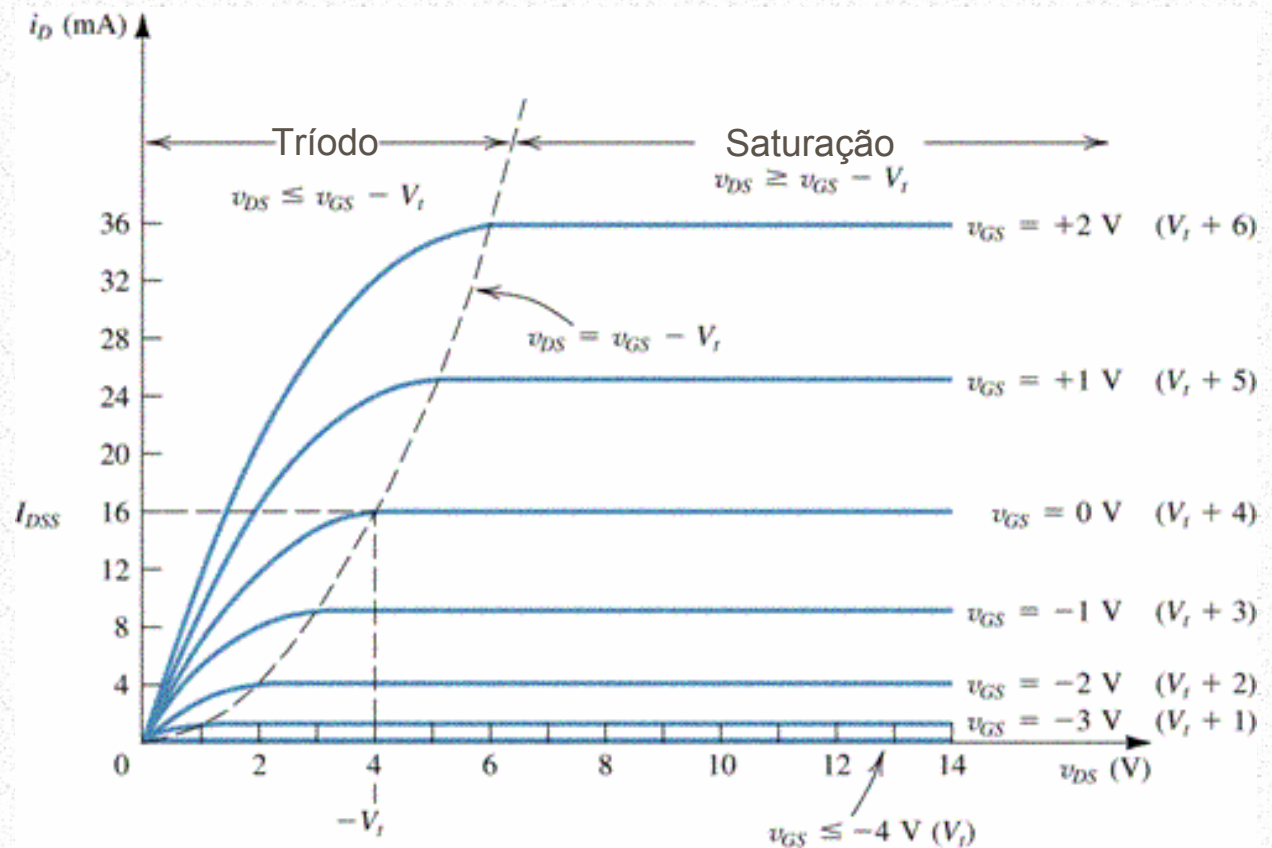
Característica i_D - i_{GS} de um n -MOSFET de depleção com $V_t = -4V$



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



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





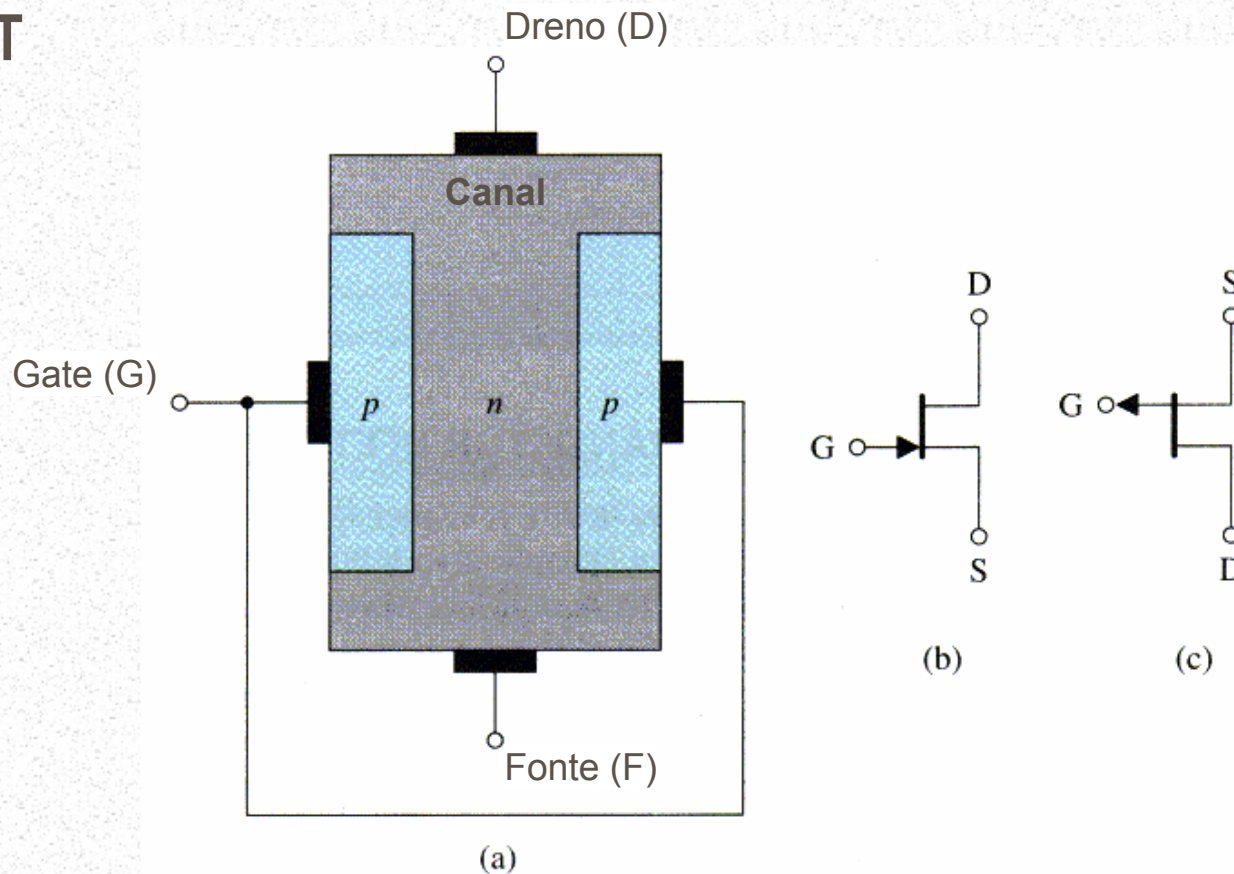
Componentes Básicos



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

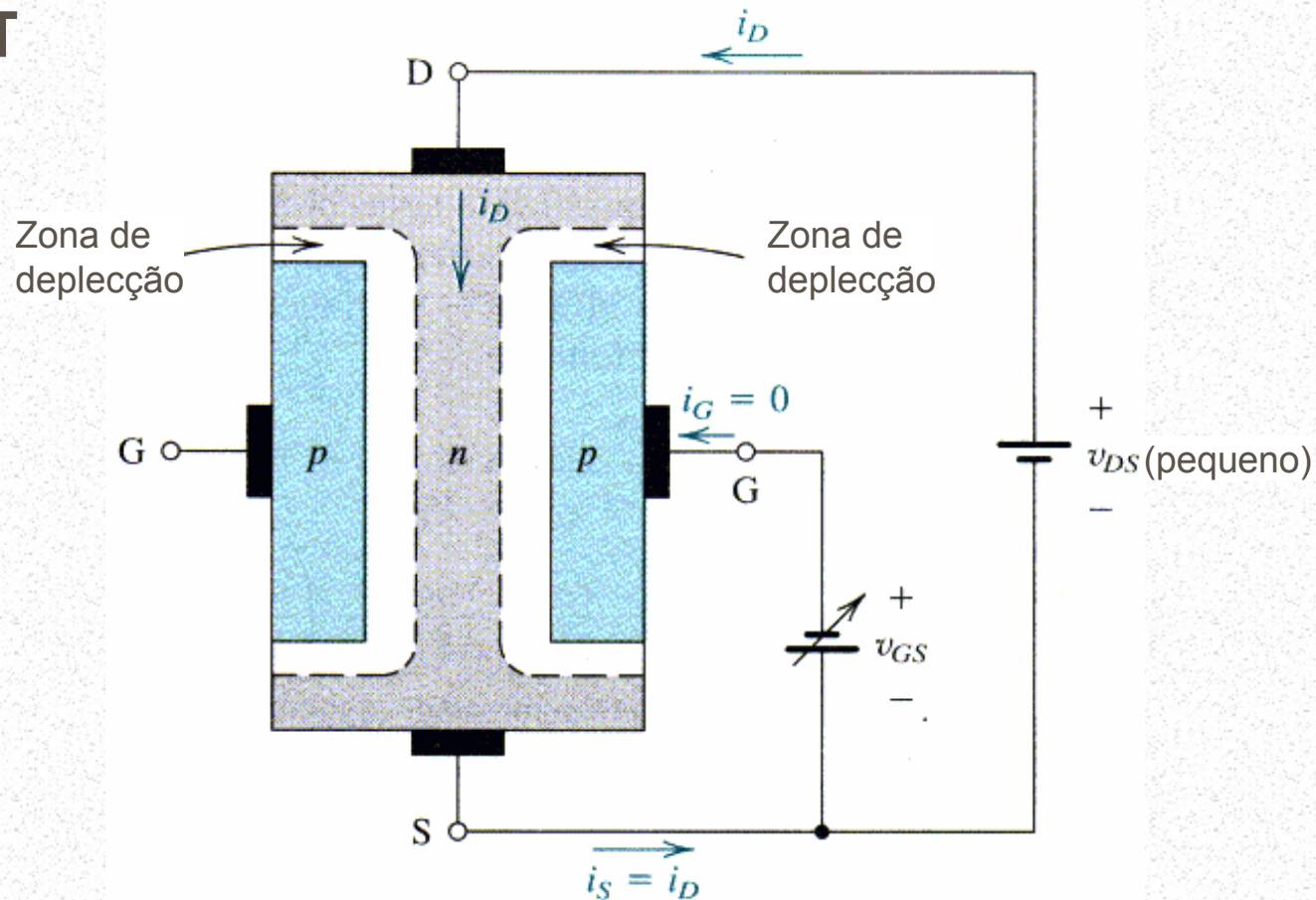
- O JFET (Junction Field-Effect Transistor)
 - Dispositivo controlado por tensão
 - Corrente de entrada desprezável (da ordem do pA ou inferior)
 - Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico

■ O JFET



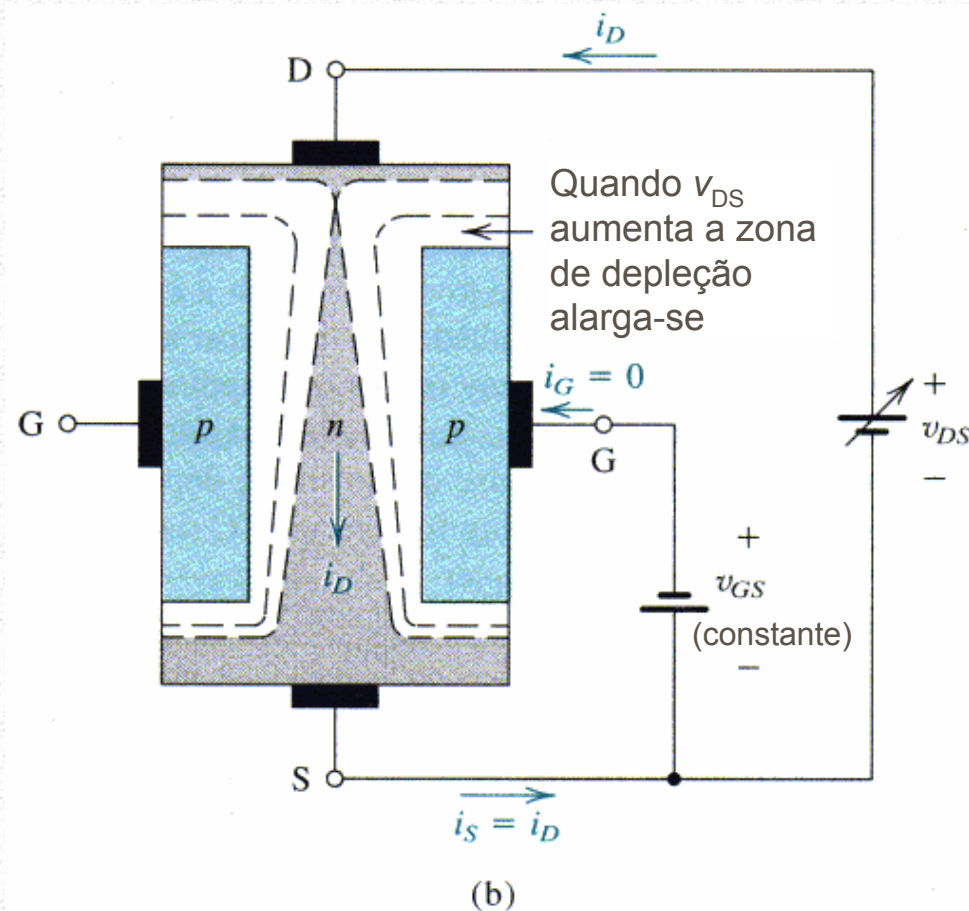
JFET canal-n: (a) Estrutura básica (b) símbolo para o JFET canal-n;
símbolo para o JFET canal-p

■ O JFET



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

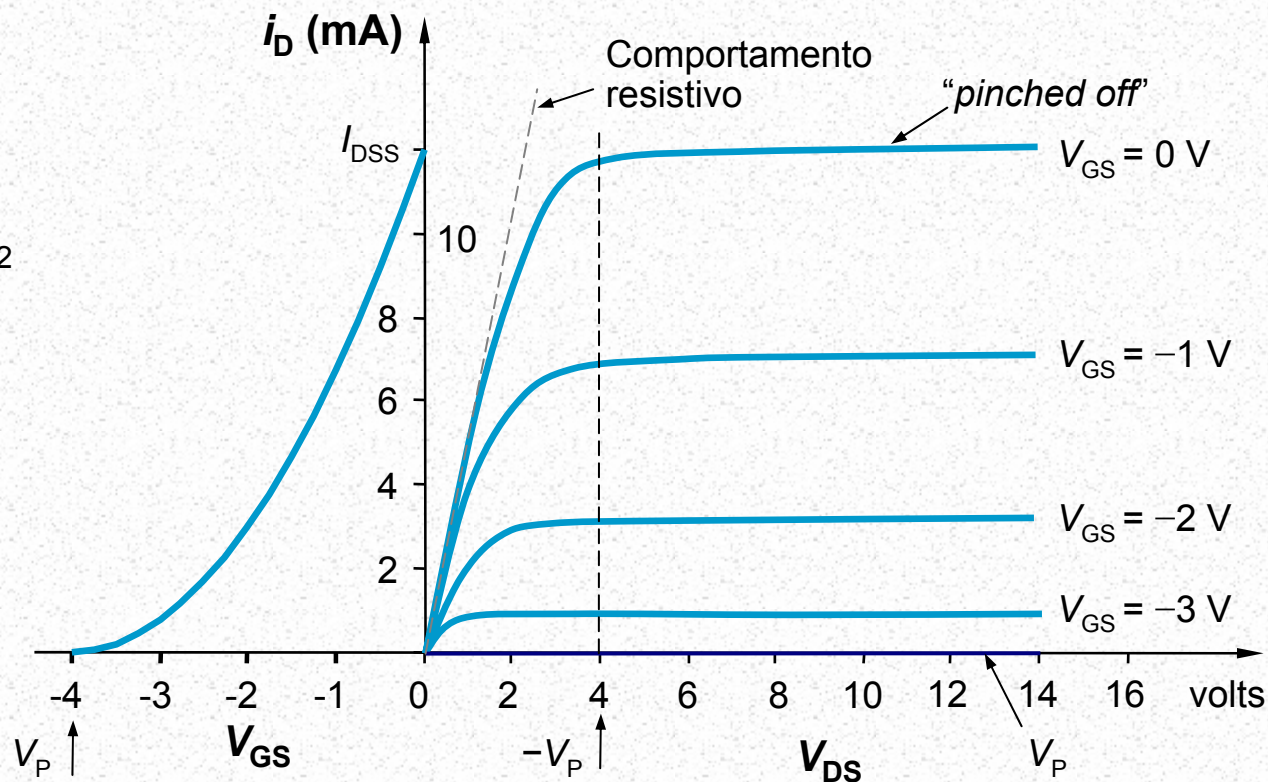
■ O JFET



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

■ O JFET

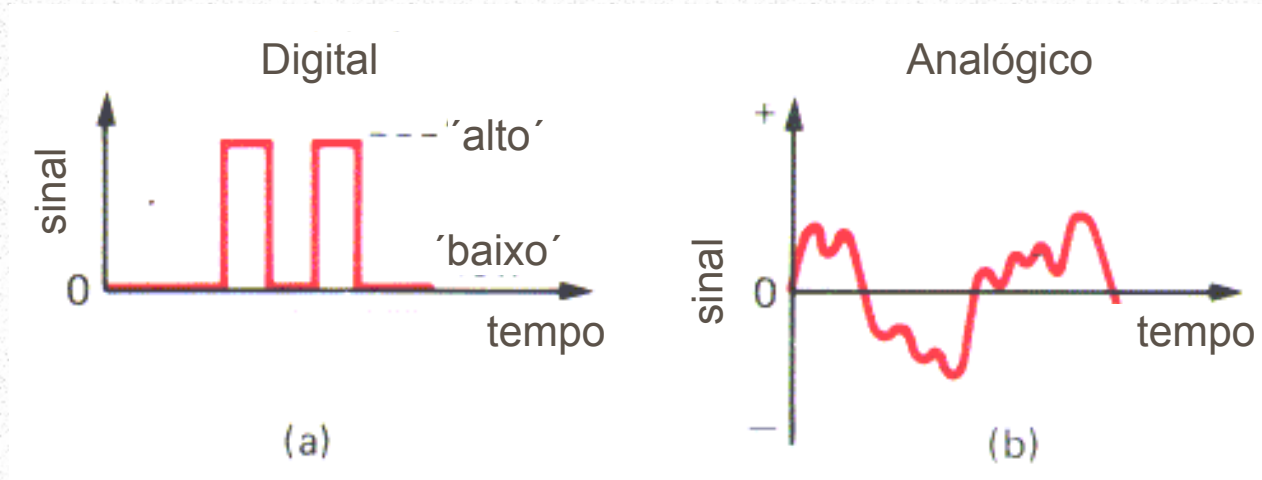
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$



Características de saída de um JFET canal-n

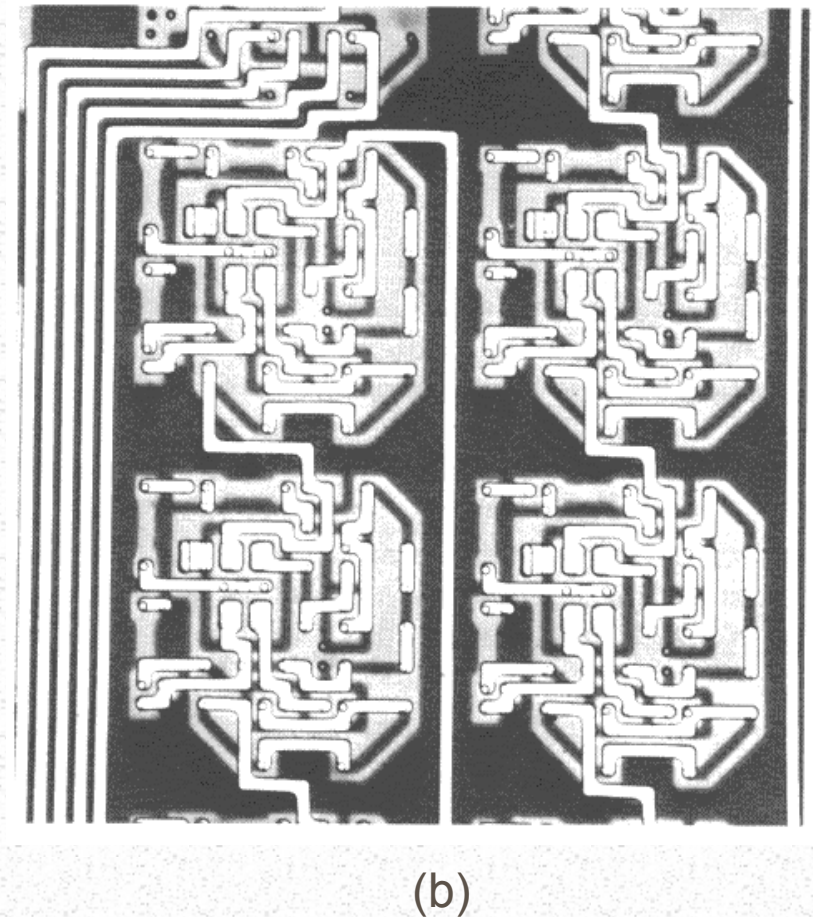
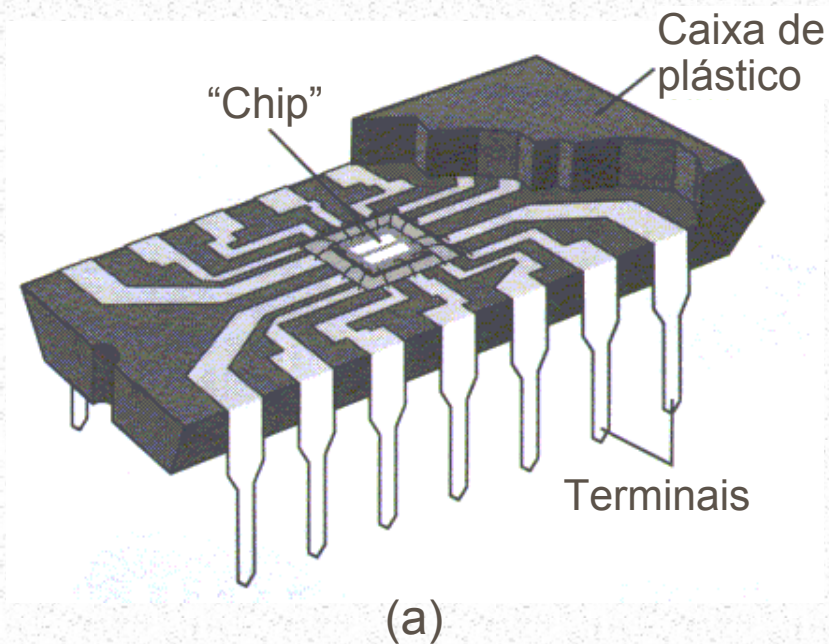
■ Circuitos integrados (CI's)

- 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



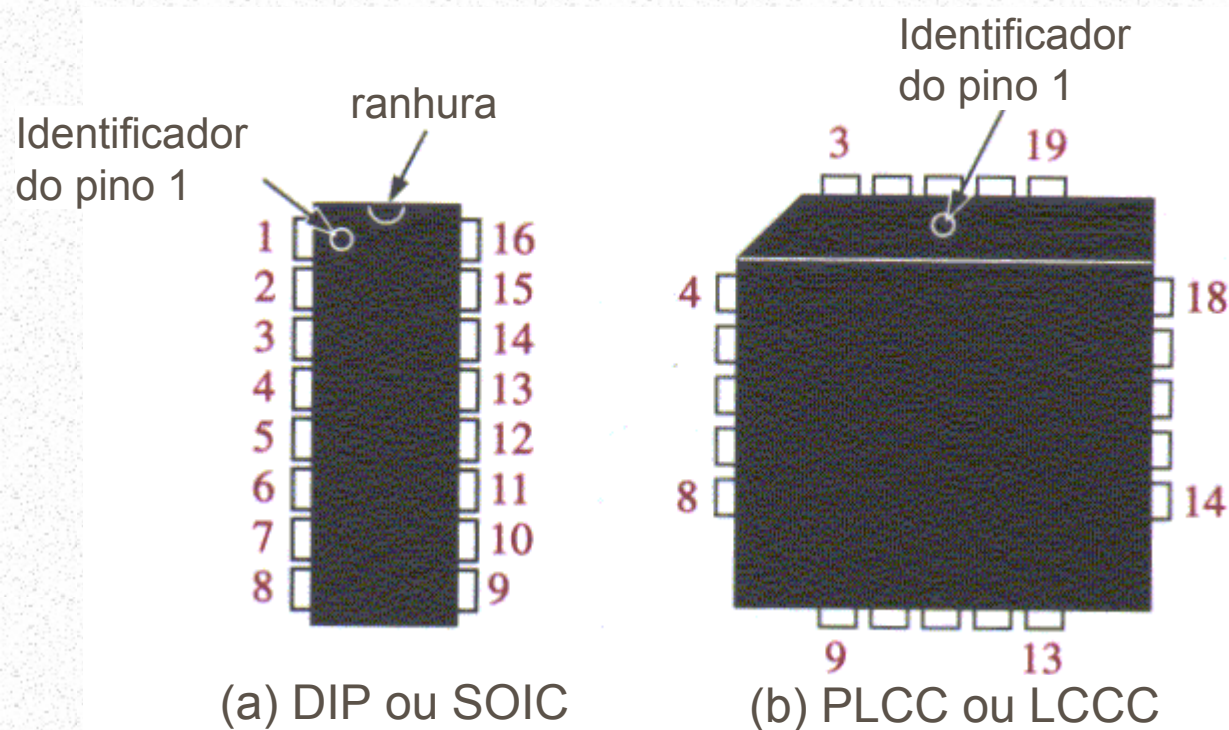
(a) Sinal digital; (b) sinal analógico

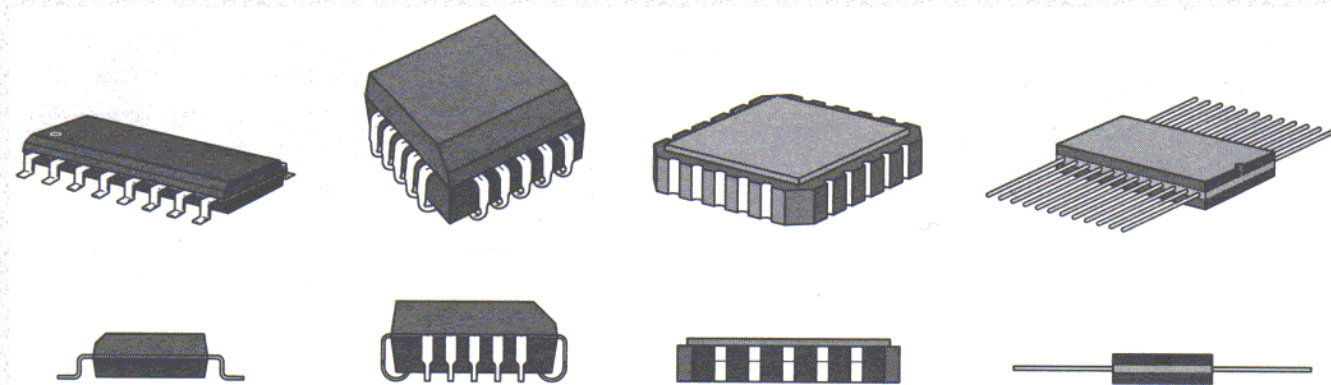
■ Circuitos integrados



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

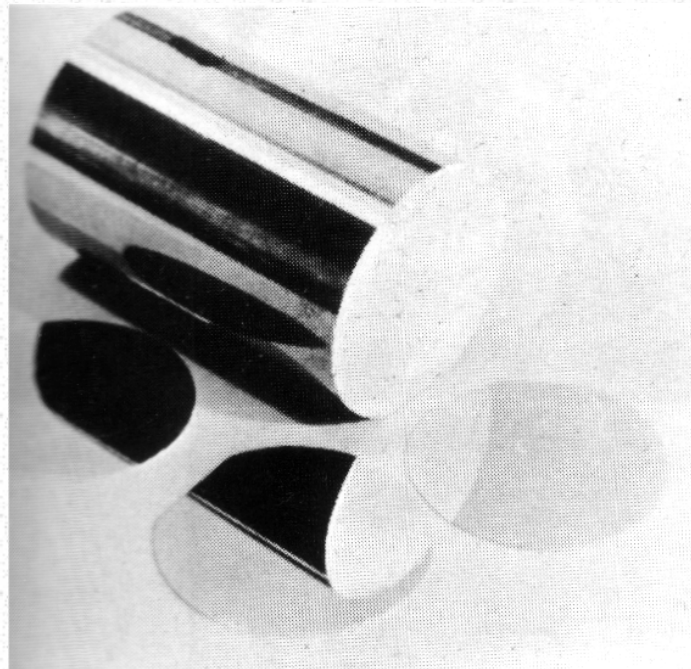
■ Circuitos integrados





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

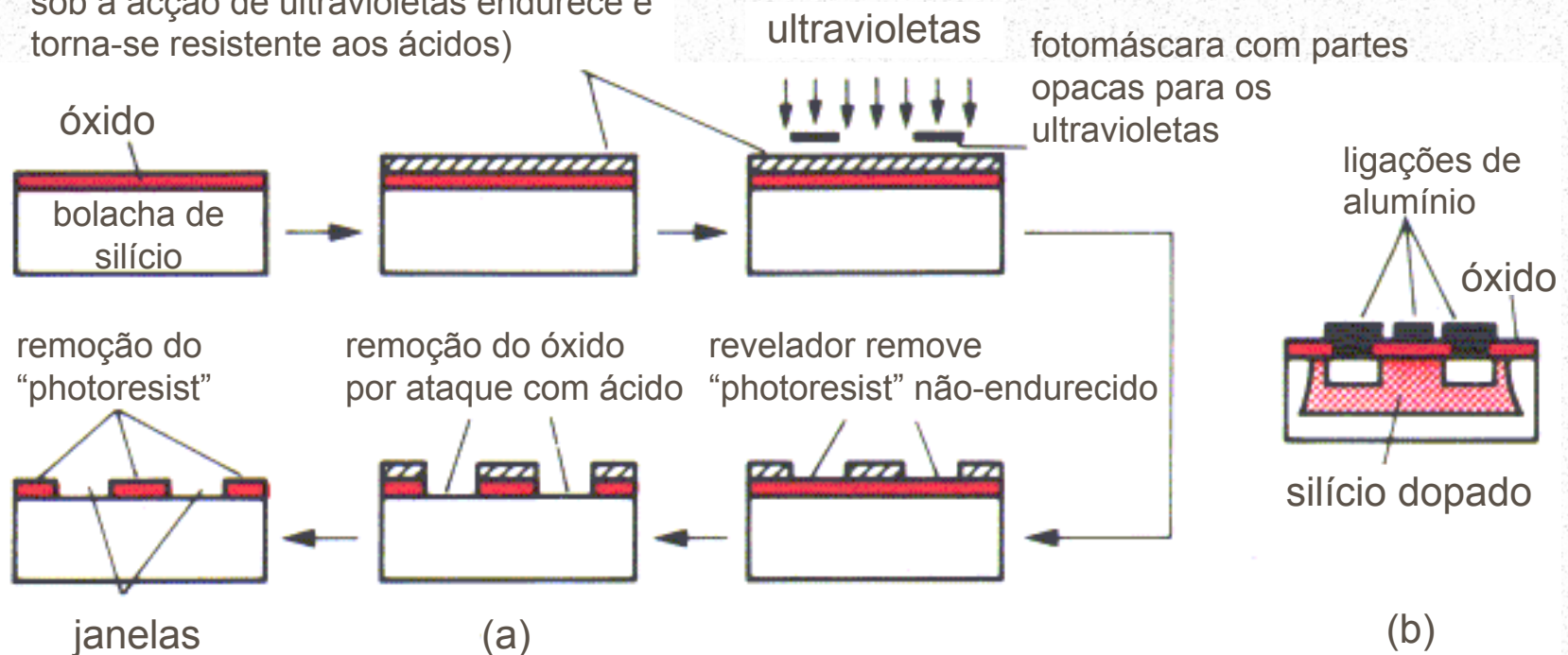
■ Circuitos integrados – fabrico



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

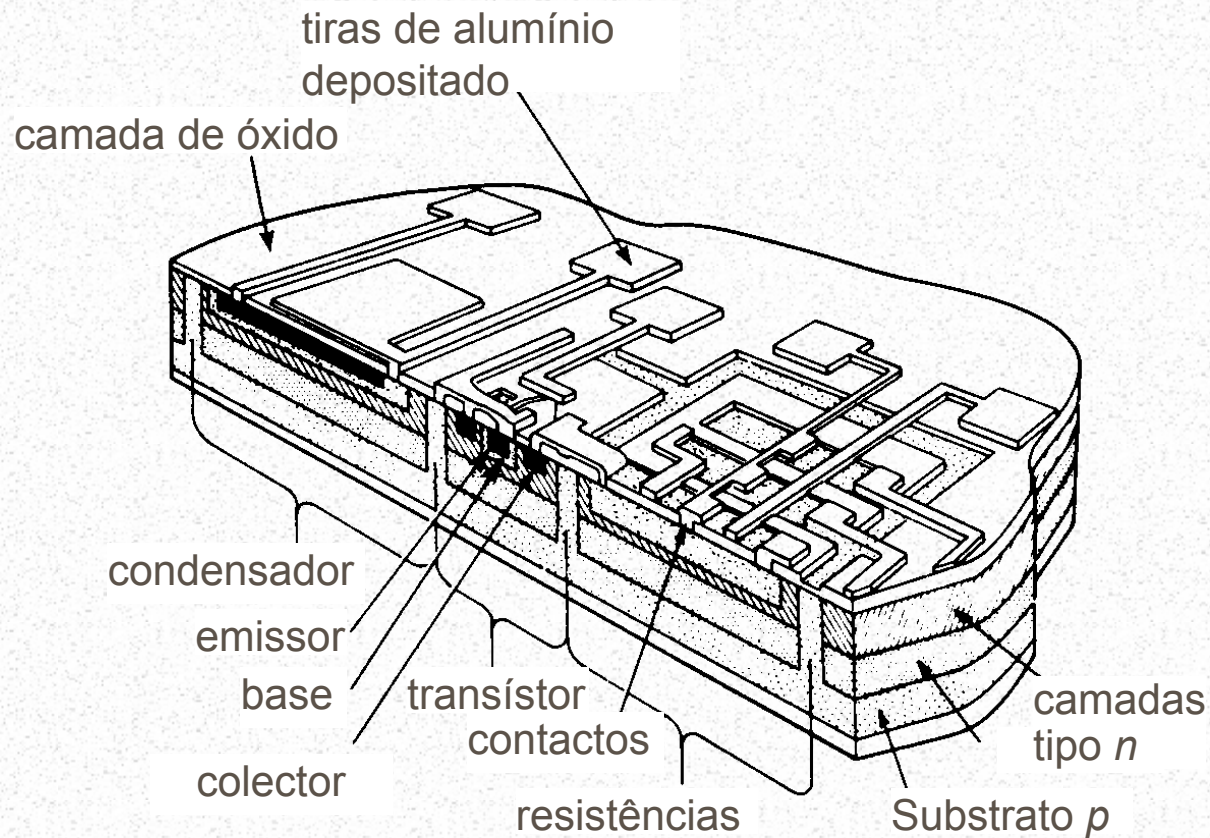
■ Circuitos integrados – fabrico

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

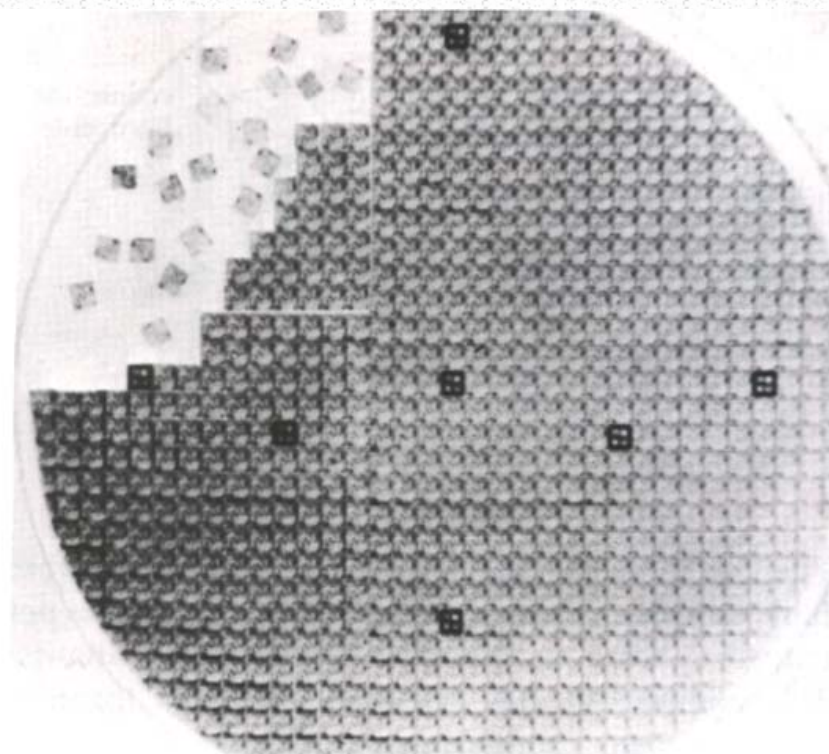
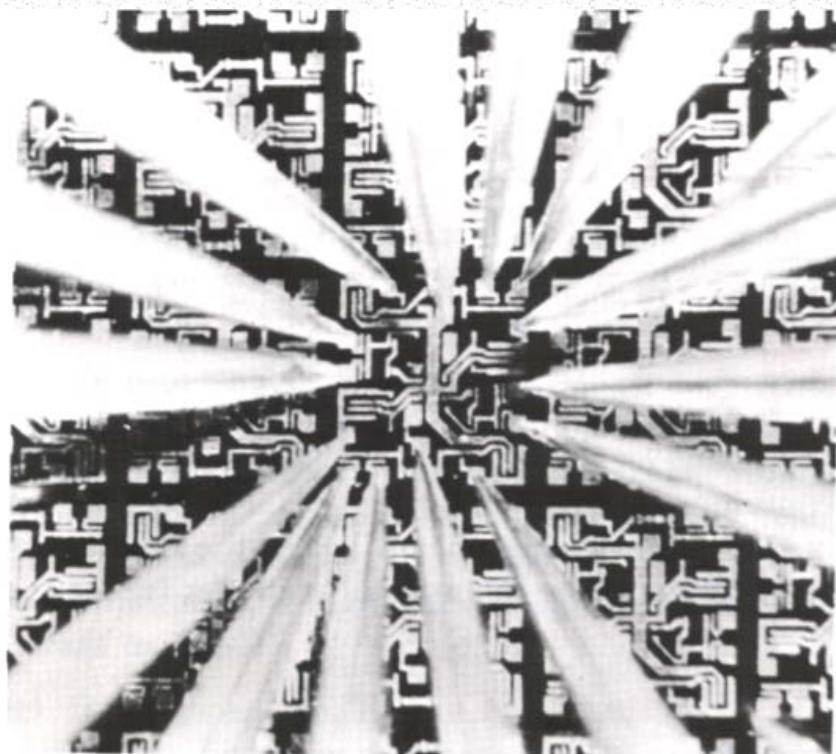


(a) Diferentes fases de fabrico de um CI; (b) interligação dos vários componentes por deposição de tiras de alumínio

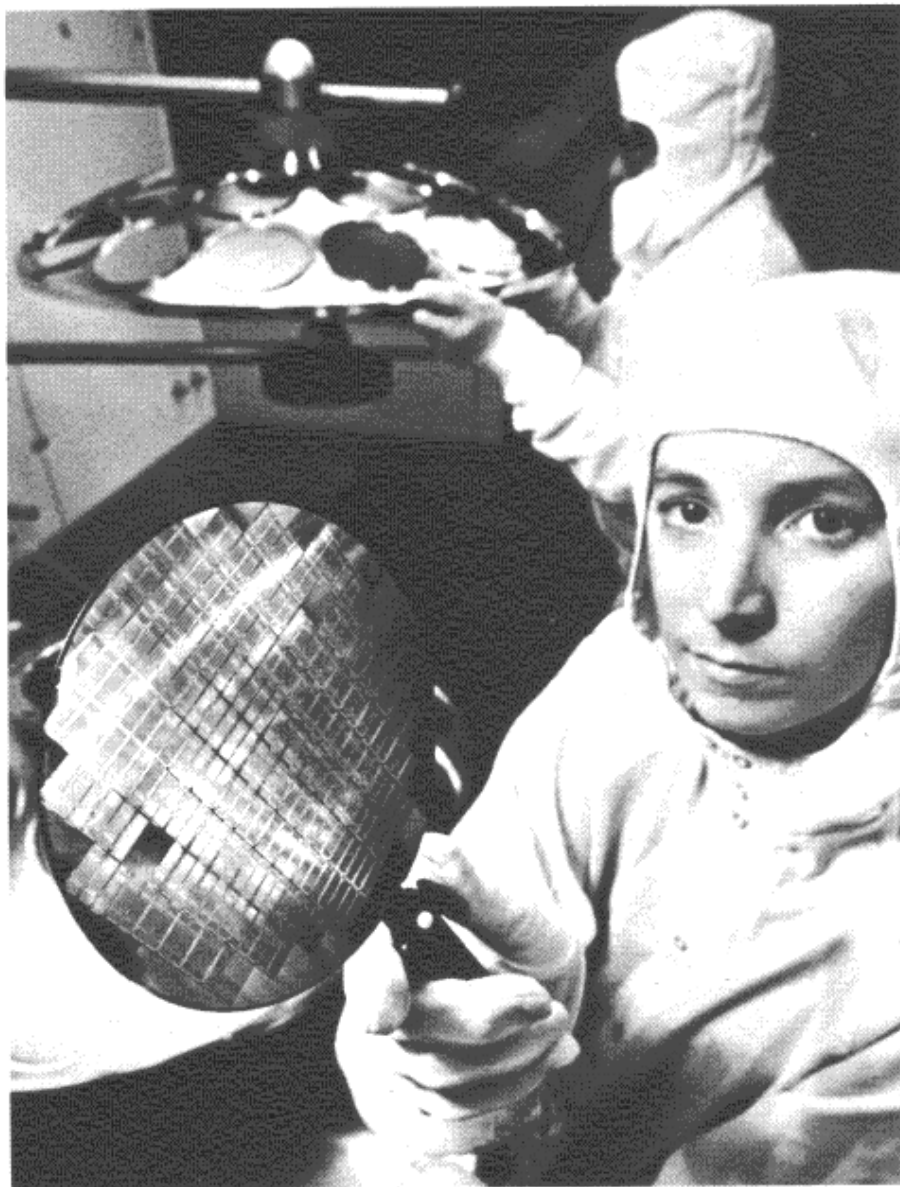
■ Circuitos integrados – fabrico



■ Circuitos integrados – teste



Teste de circuitos integrados





Componentes Básicos



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

■ Circuitos integrados – vantagens

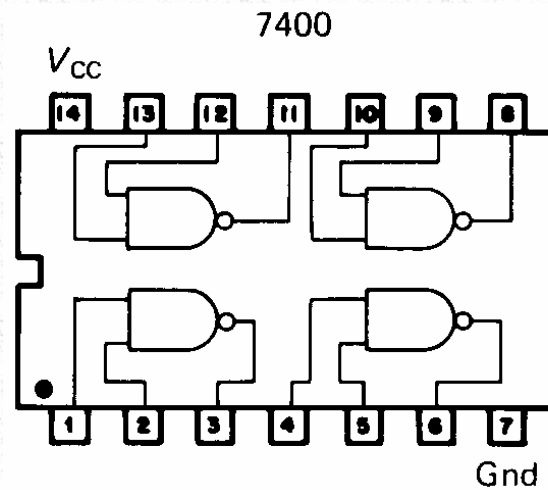
- Maior fiabilidade
- Permitem baixar custos
- Simplificam da construção de circuitos
- Permitem soluções compactas

■ Desvantagens

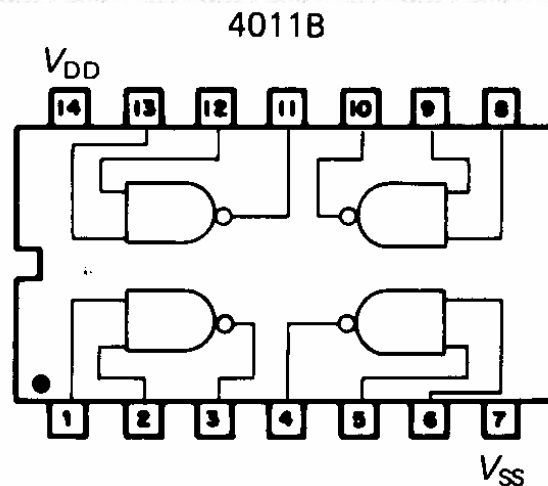
- Falta de versatilidade
- Não existem para potências elevadas

■ Famílias lógicas

- TTL
- CMOS
- ...



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



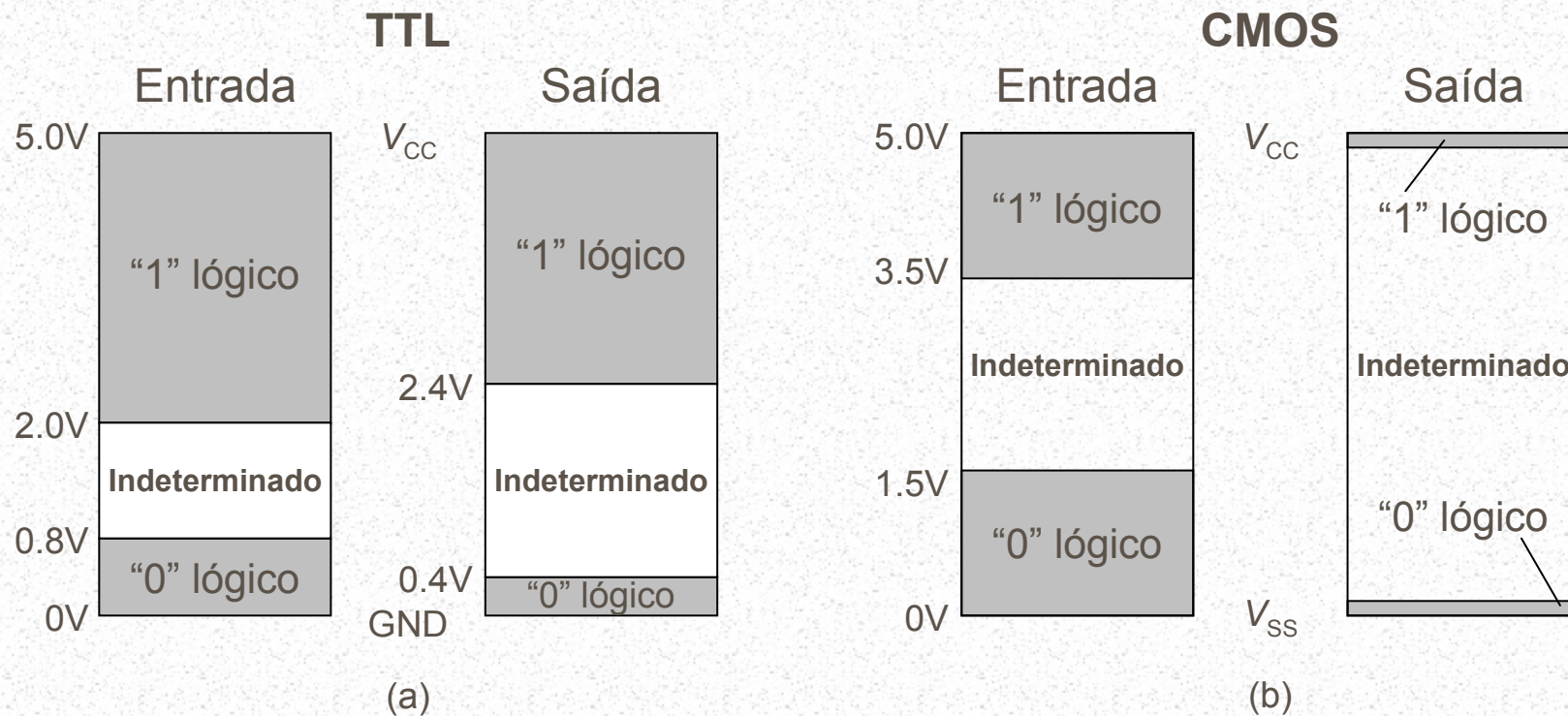
CMOS ($V_{DD} = +3\text{ to }15\text{ V}$,
 $V_{SS} = 0\text{ V}$)

■ 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

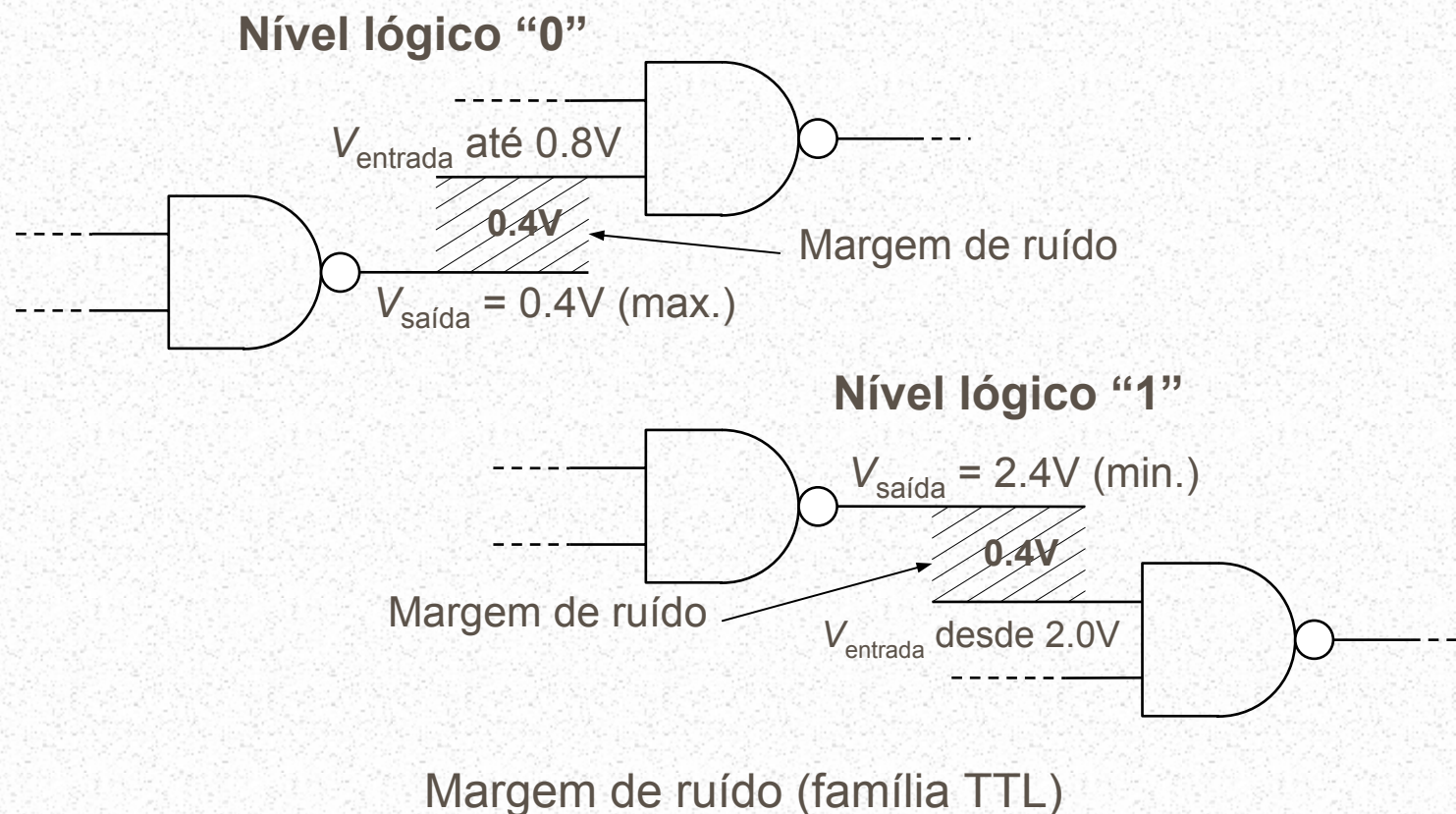
Famílias TTL e CMOS: principais características

■ Famílias lógicas

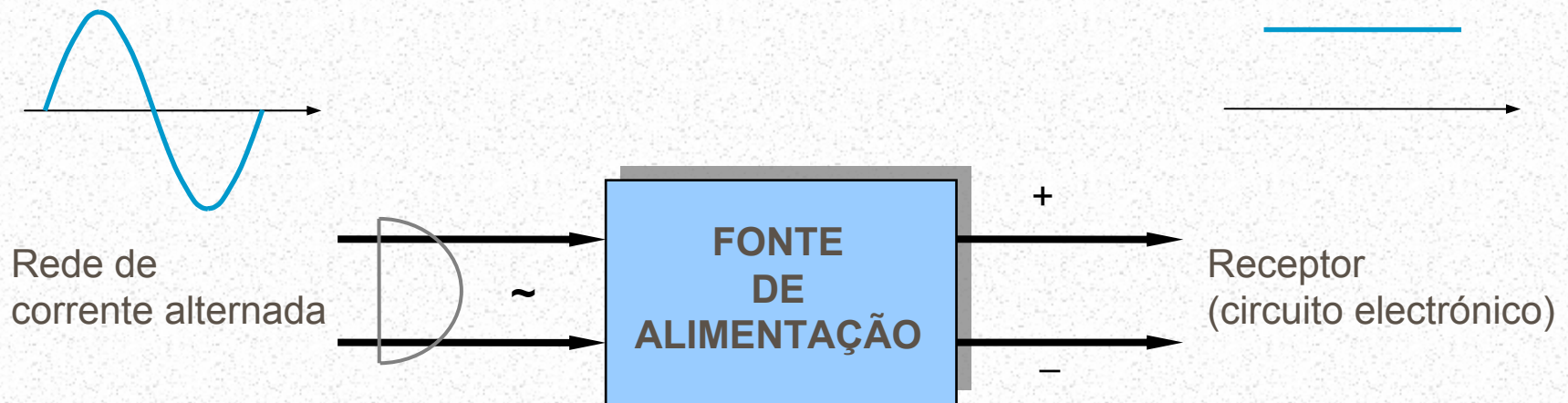


Níveis lógicos e interface: (a) TTL; (b) CMOS

■ Famílias lógicas



Fontes de Alimentação



Fonte de alimentação de corrente contínua

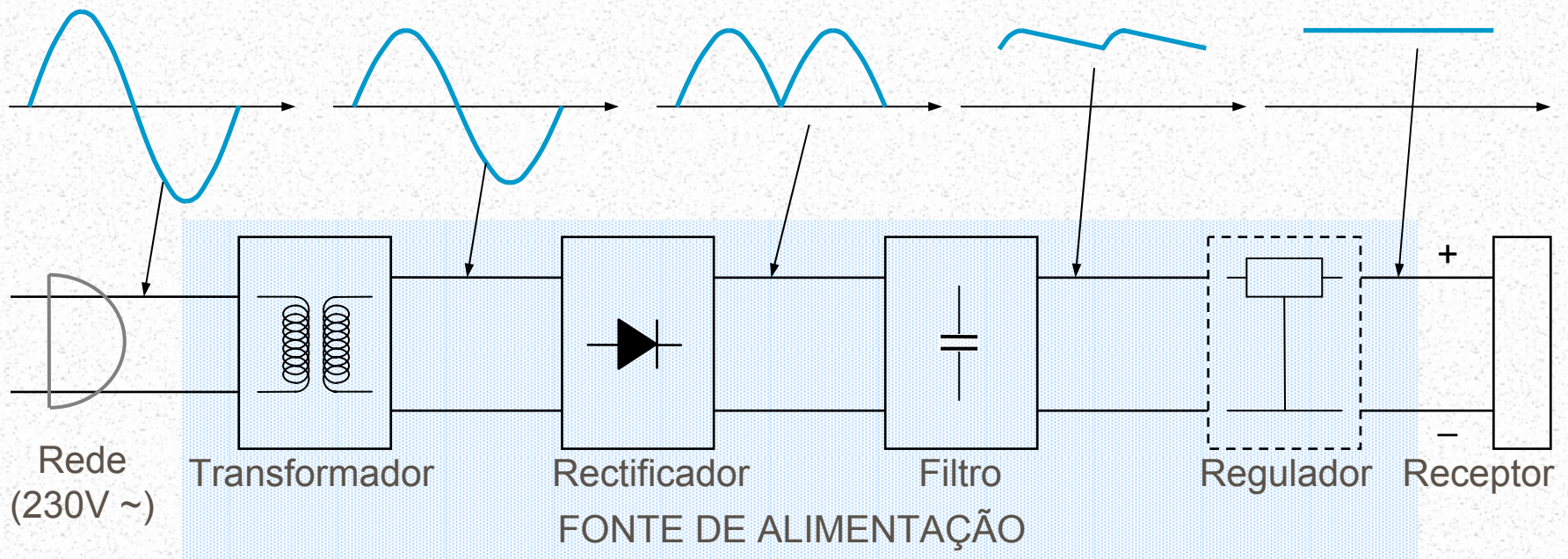
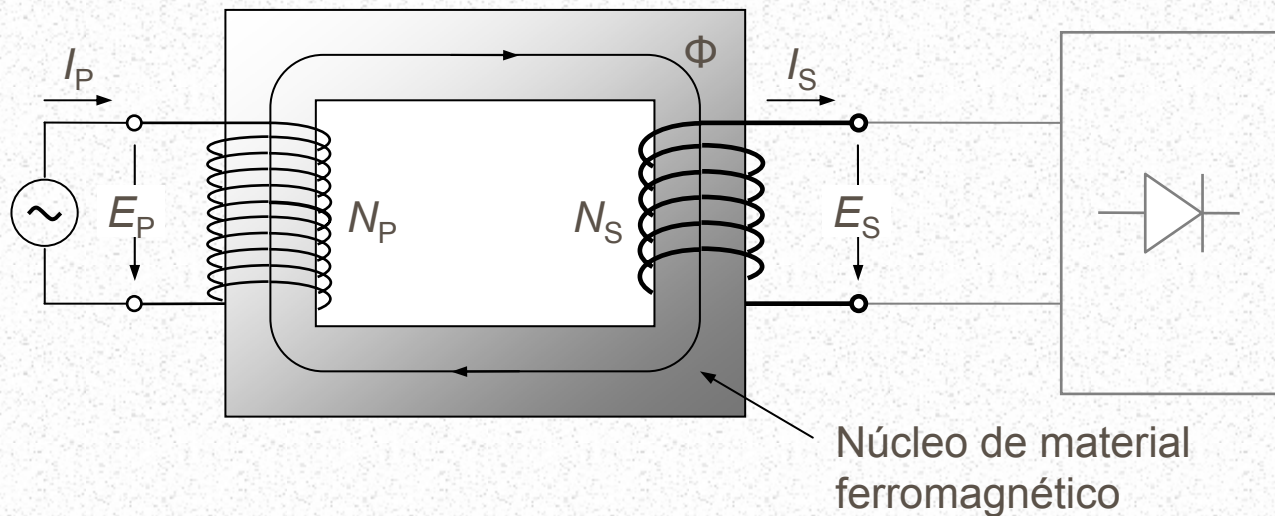


Diagrama de blocos duma fonte de alimentação de corrente contínua

■ Transformador



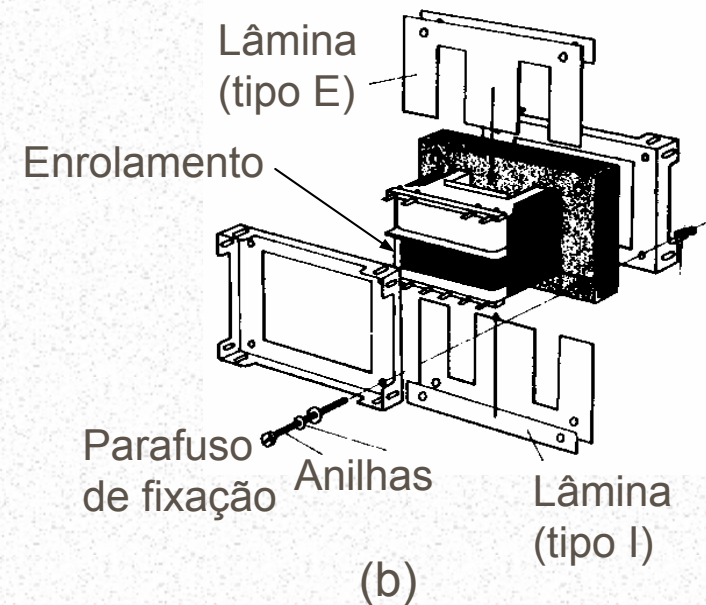
$$E_P = N_P \frac{d\Phi}{dt}, \quad E_S = N_S \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

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

■ Transformador

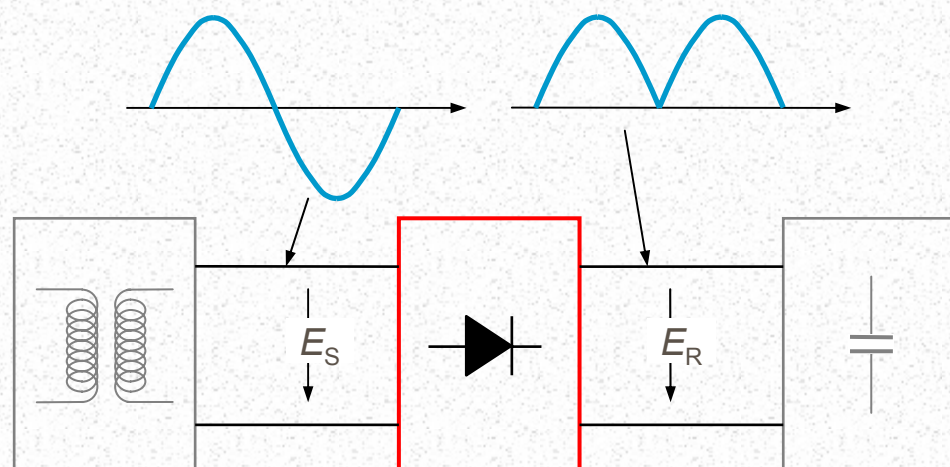


(a)

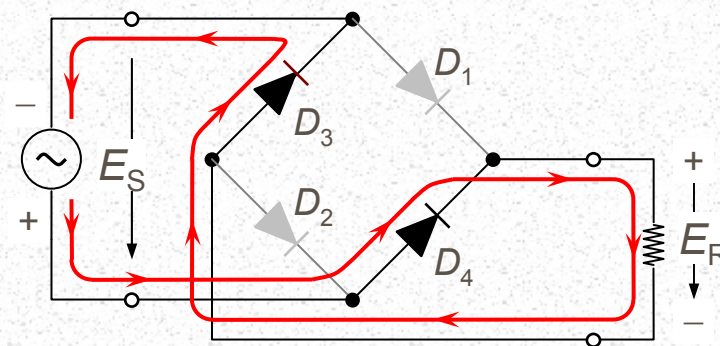
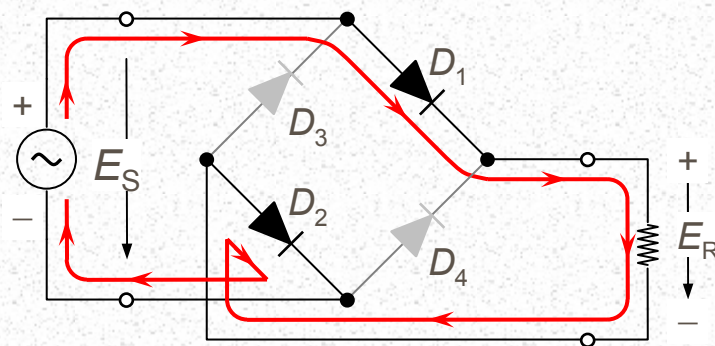
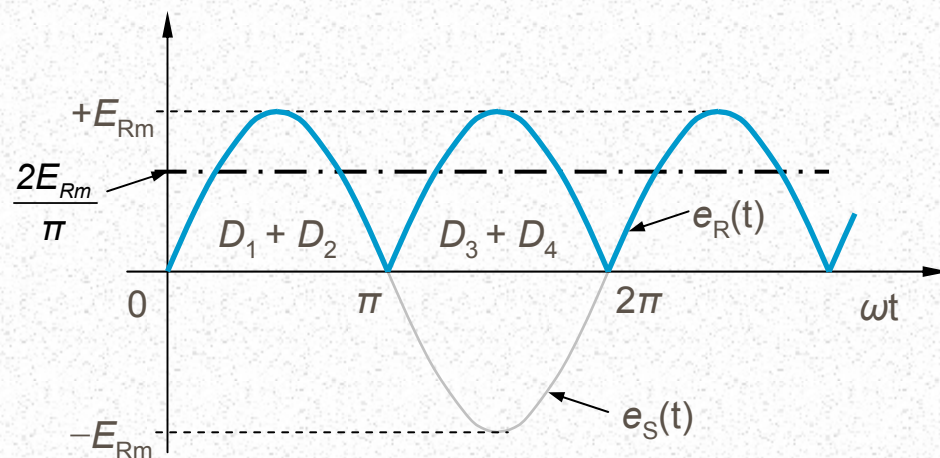
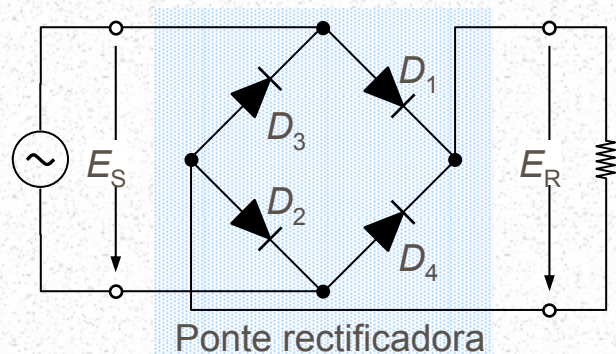


Transformador para fonte de alimentação:
(a) aspecto exterior; (b) construção

■ Rectificador

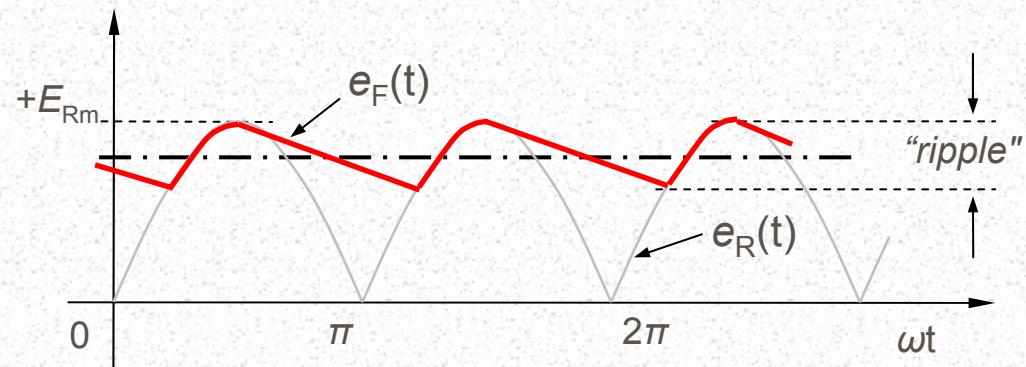
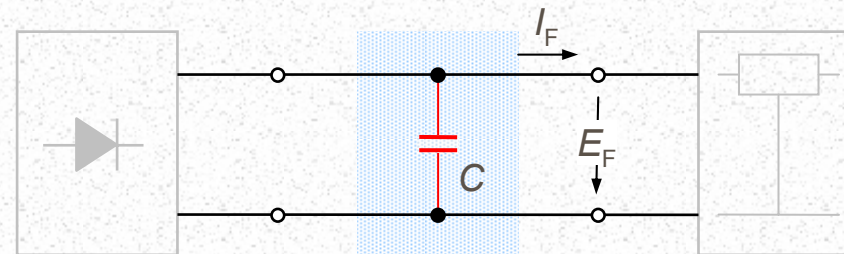


■ Rectificador



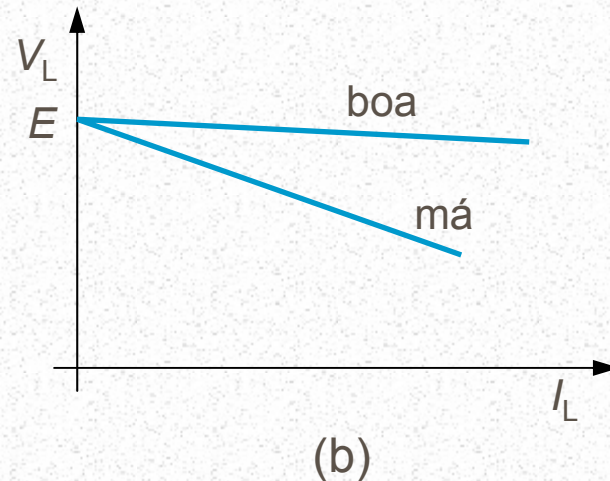
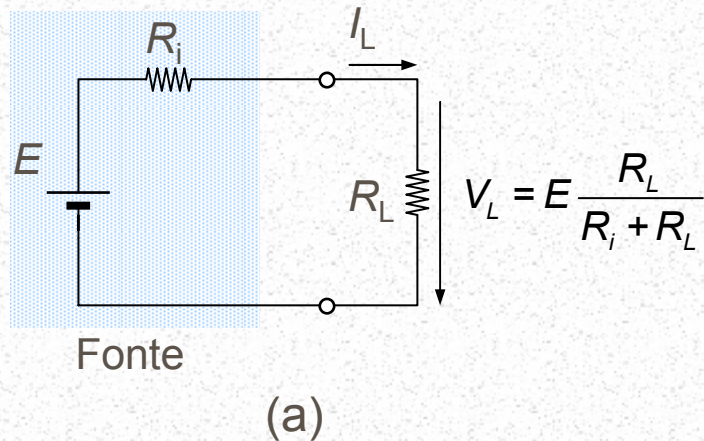
Funcionamento da ponte rectificadora

■ 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

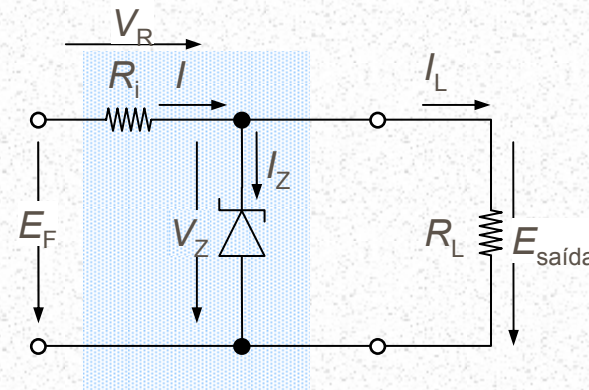
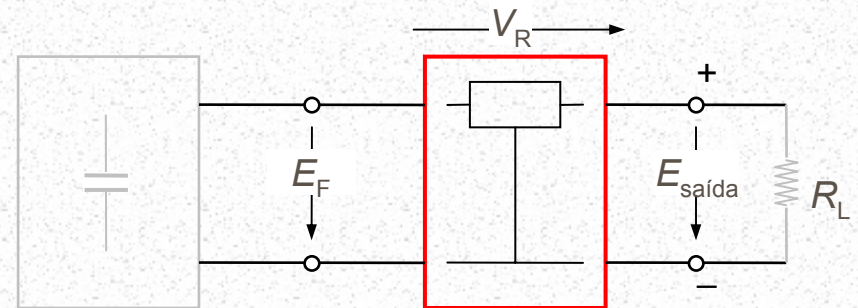
$$E_F = V_R + E_{saída}$$

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

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

para $I_Z > 0$

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



Regulador

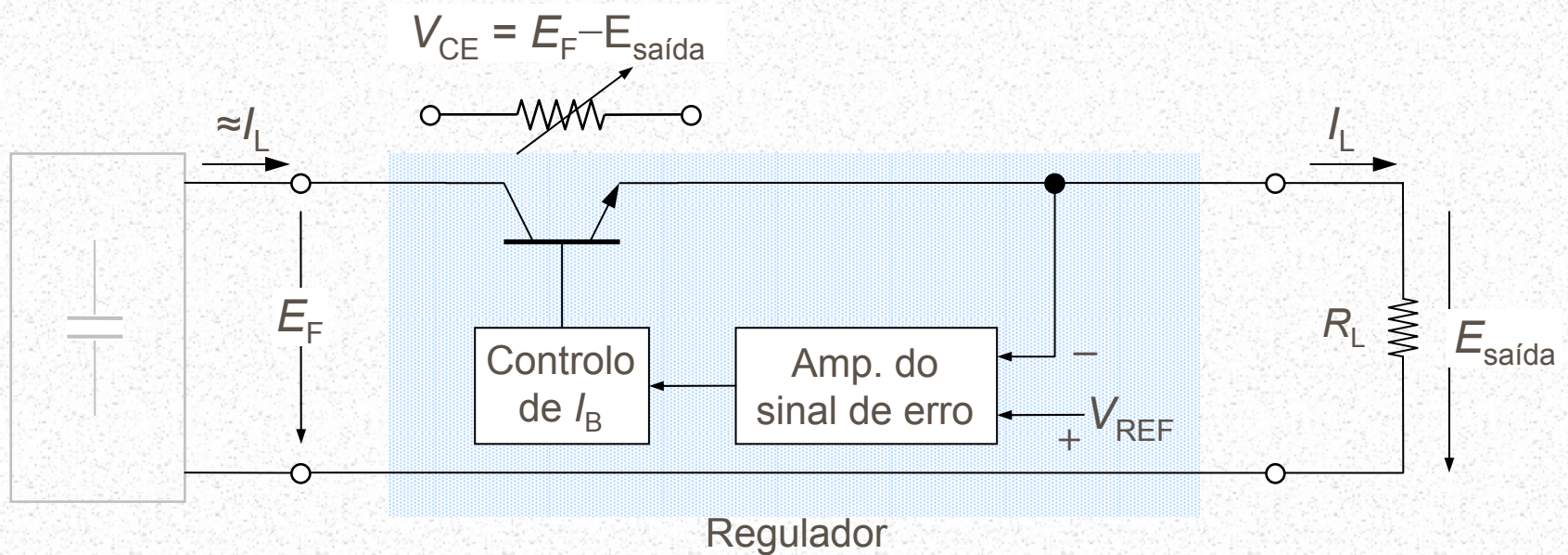


Diagrama de blocos dum regulador de tensão linear

■ 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: 0.1Ω
- 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)

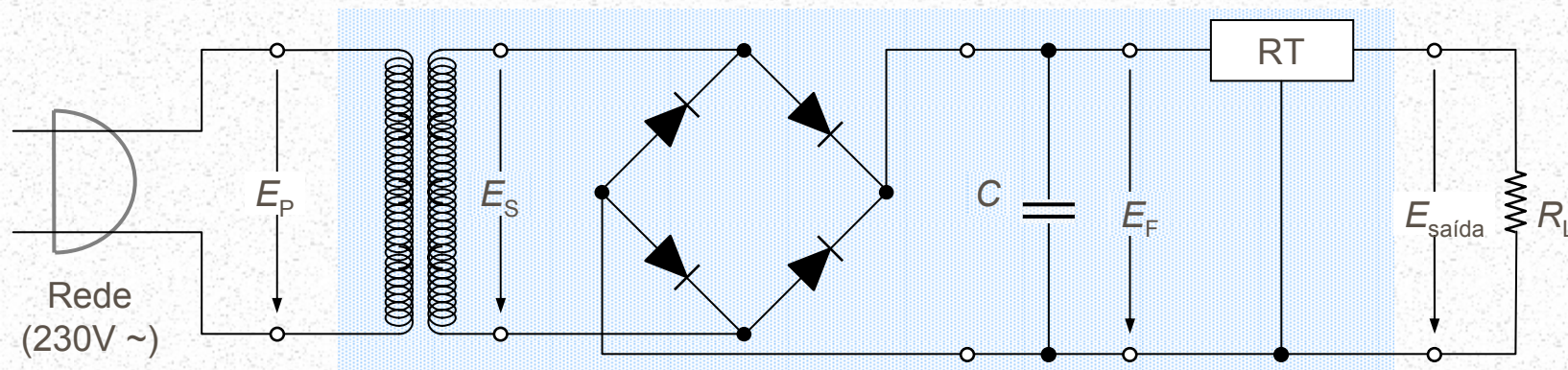
$$E_n = 12V - (0.1\Omega)(2A) = 11.8V$$

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

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,

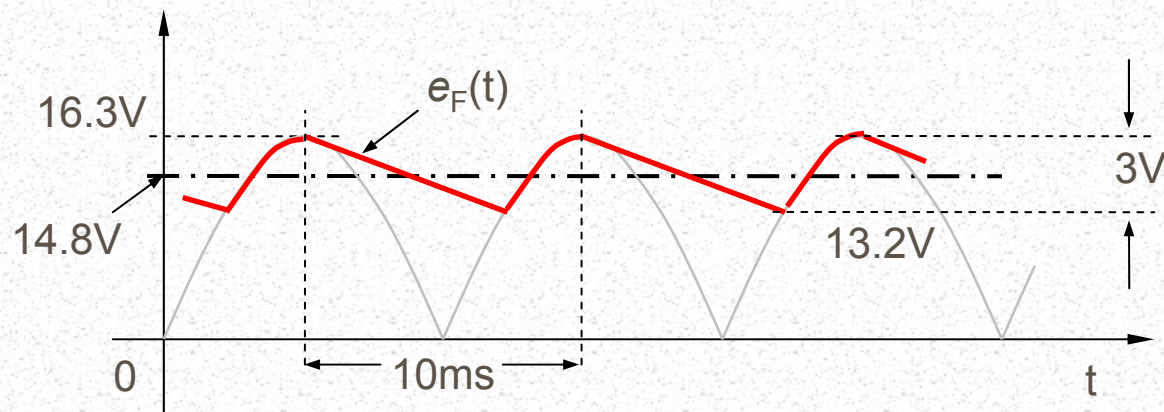
$$E_{Fr,p-p} = \frac{I_F}{C} \Delta t = \frac{1 \text{ A}}{3300 \mu\text{F}} \times 10 \text{ ms} = 3.0 \text{ V}_{p-p}$$

■ 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

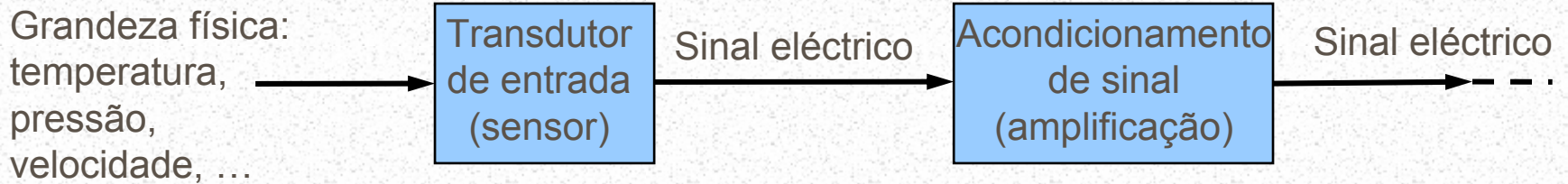
d) admitindo que, quer o transformador, quer o rectificador, não têm perdas, apenas o regulador dissipa potência. O valor médio das perdas neste bloco é,

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

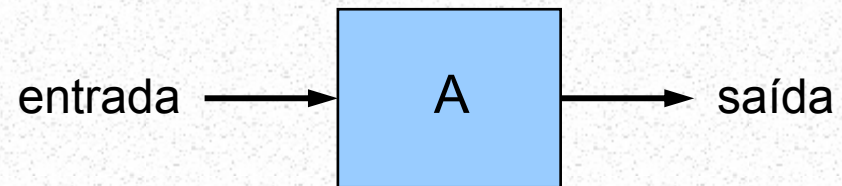
Logo o rendimento da fonte é ,

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

■ Introdução



$$saída = A \times entrada$$

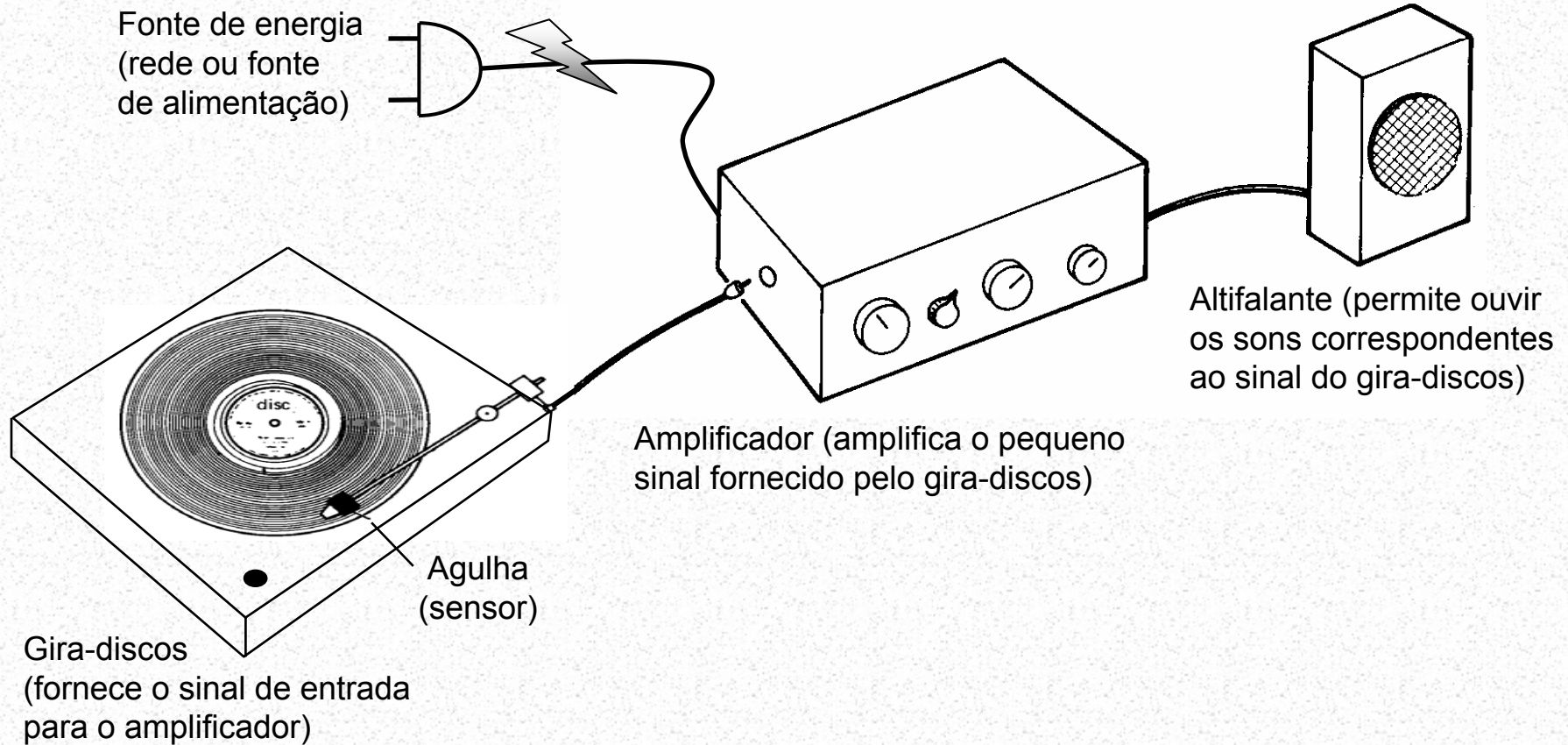


... O amplificador é um dispositivo que controla (ou modela) o fluxo de potência duma fonte de energia para a carga, de acordo com um sinal de controlo, cujo nível de energia é normalmente muito pequeno (por vezes é desprezável) ...

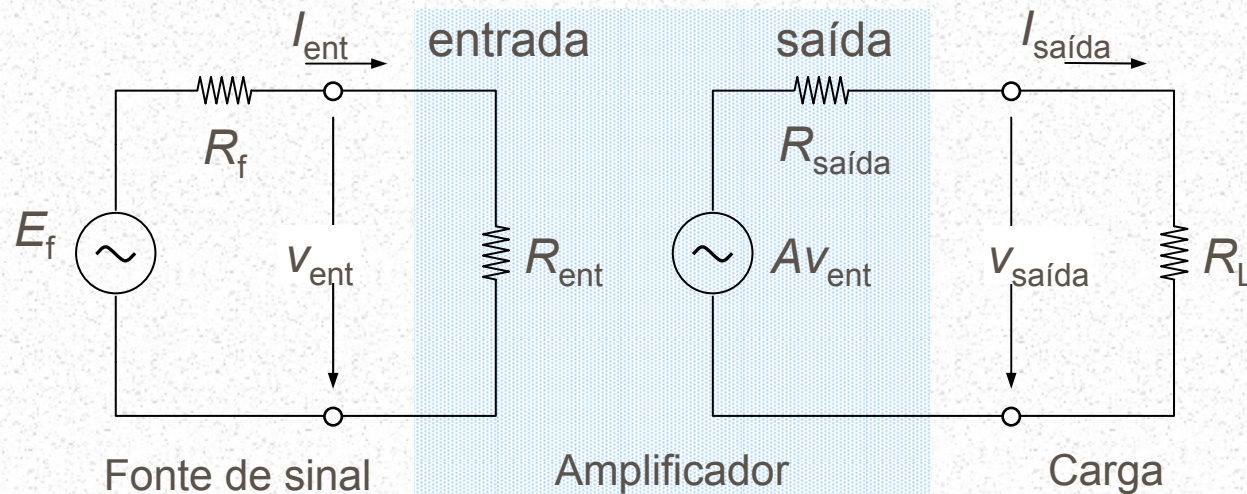


Fluxo de potência num amplificador

Amplificadores



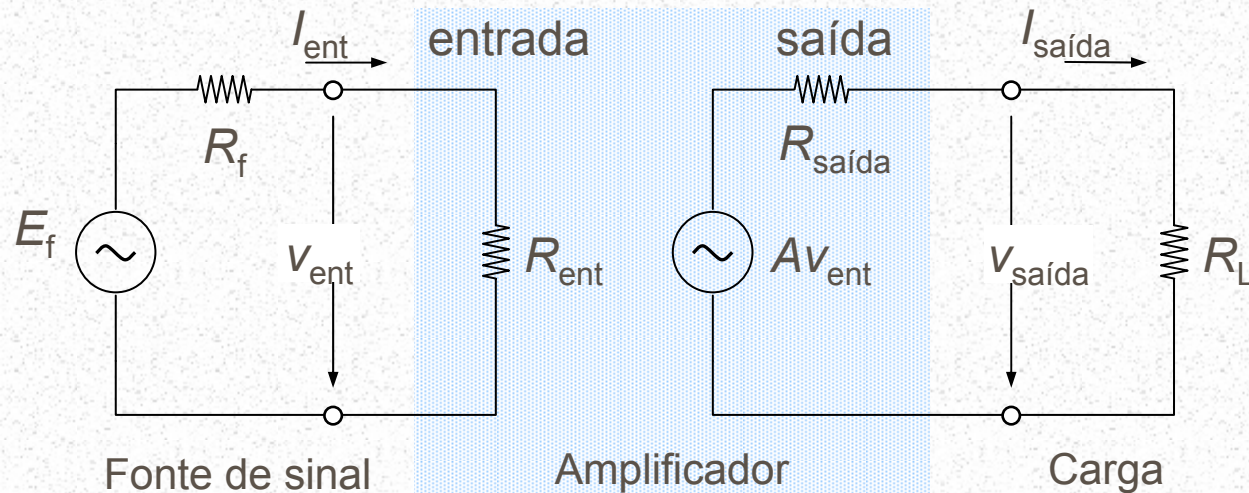
■ Circuito equivalente (amplificador de tensão)



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

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

■ Circuito equivalente (amplificador de tensão)



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

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

Amplificadores

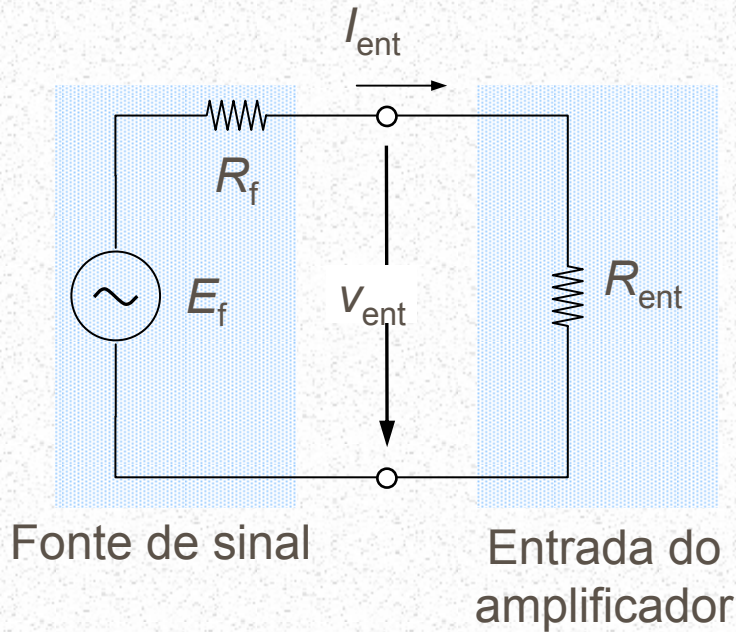
$$A_I = \frac{I_{saída}}{I_{ent}} \rightarrow \text{Ganho em corrente} \quad I_{saída} = \frac{A \cdot V_{ent}}{R_{saída} + R_L} \quad I_{ent} = \frac{V_{ent}}{R_{ent}}$$

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

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

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

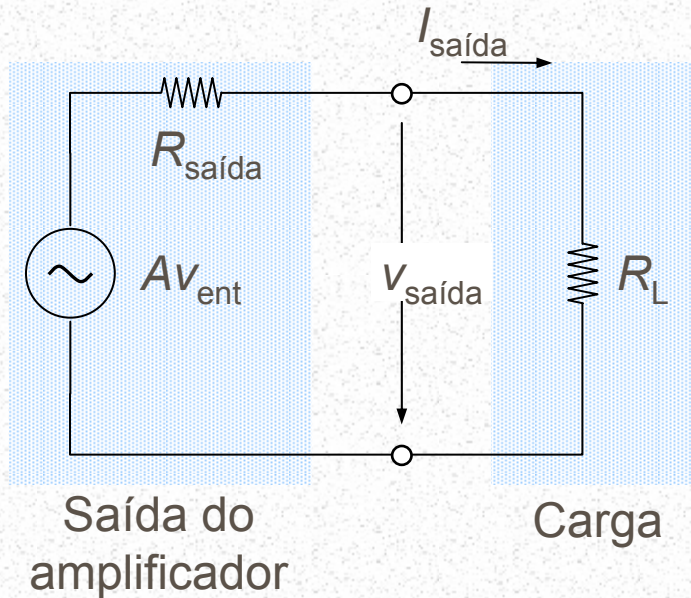
Adaptação de impedâncias – entrada



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

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

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

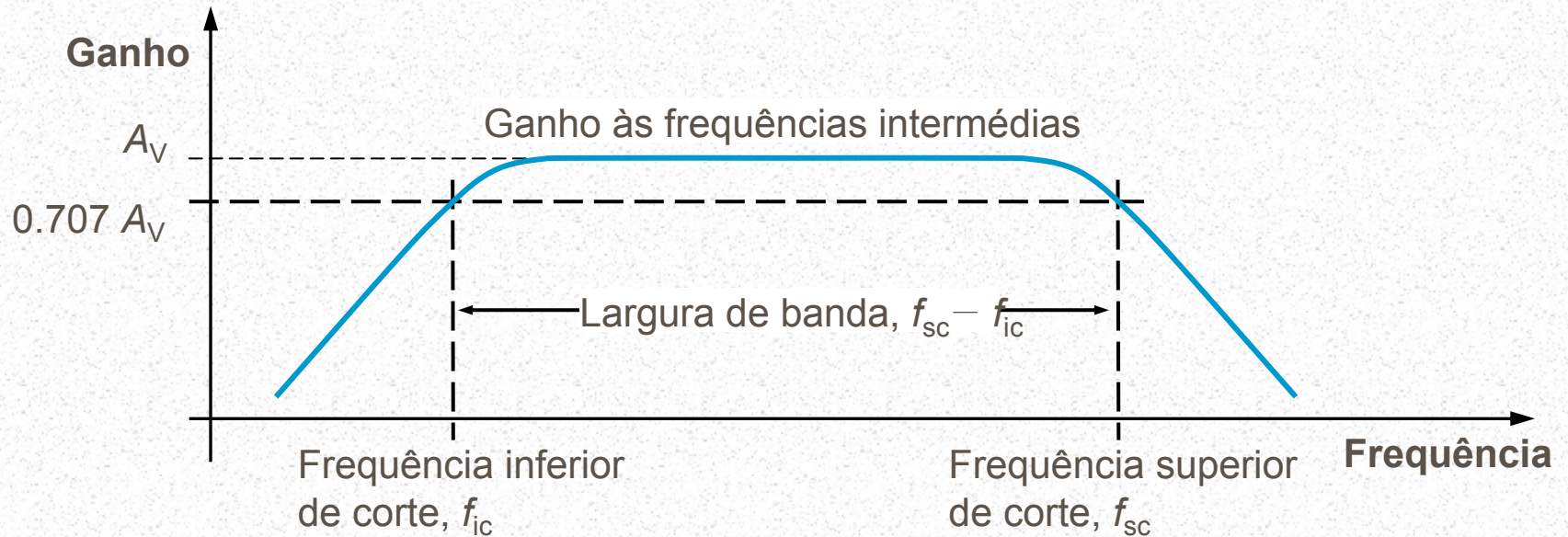
■ Ganho em tensão: $20 \log_{10} \frac{V_{saída}}{V_{ent}}$ (dB)

■ 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

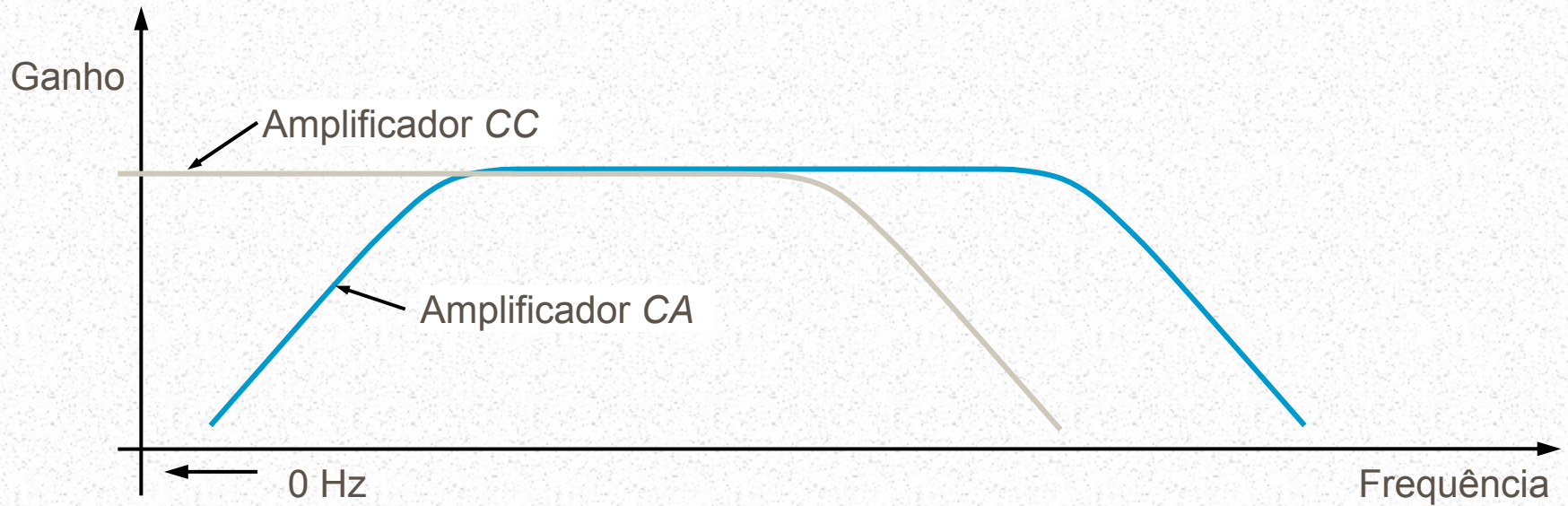




Amplificadores



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

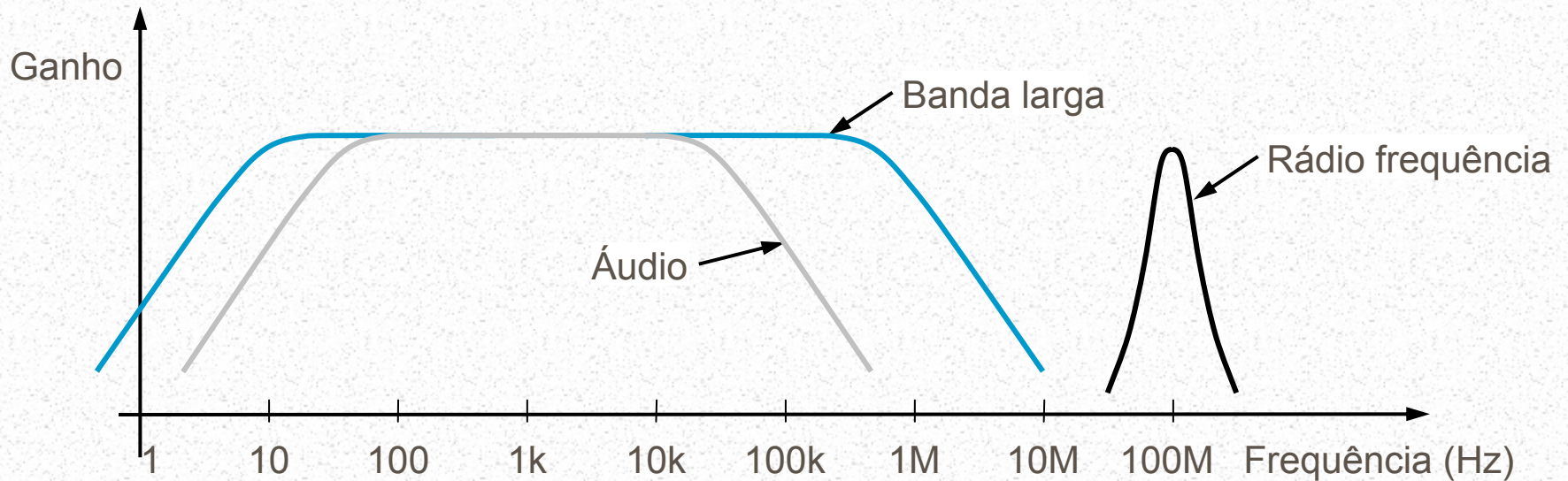




Amplificadores



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial





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)



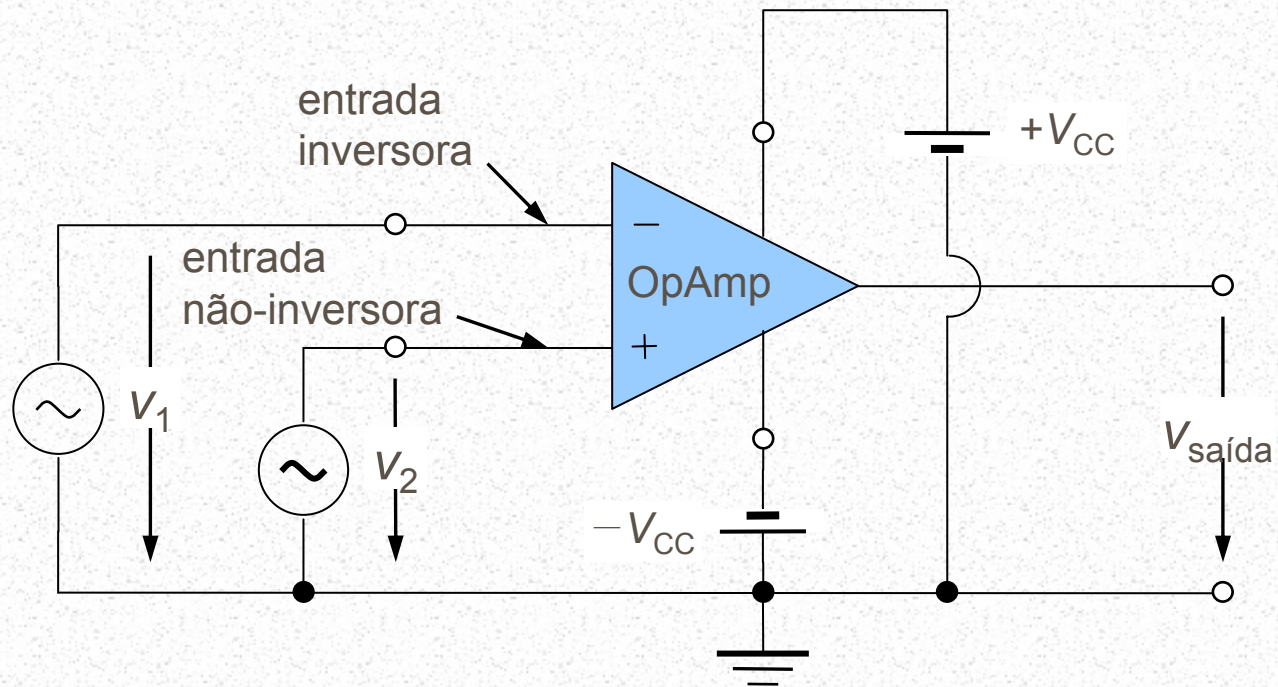
Amplificadores



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 100Ω (a tensão de saída é transferida de forma eficiente para qualquer carga superior a alguns $k\Omega$)

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

■ Amplificador Operacional – Introdução

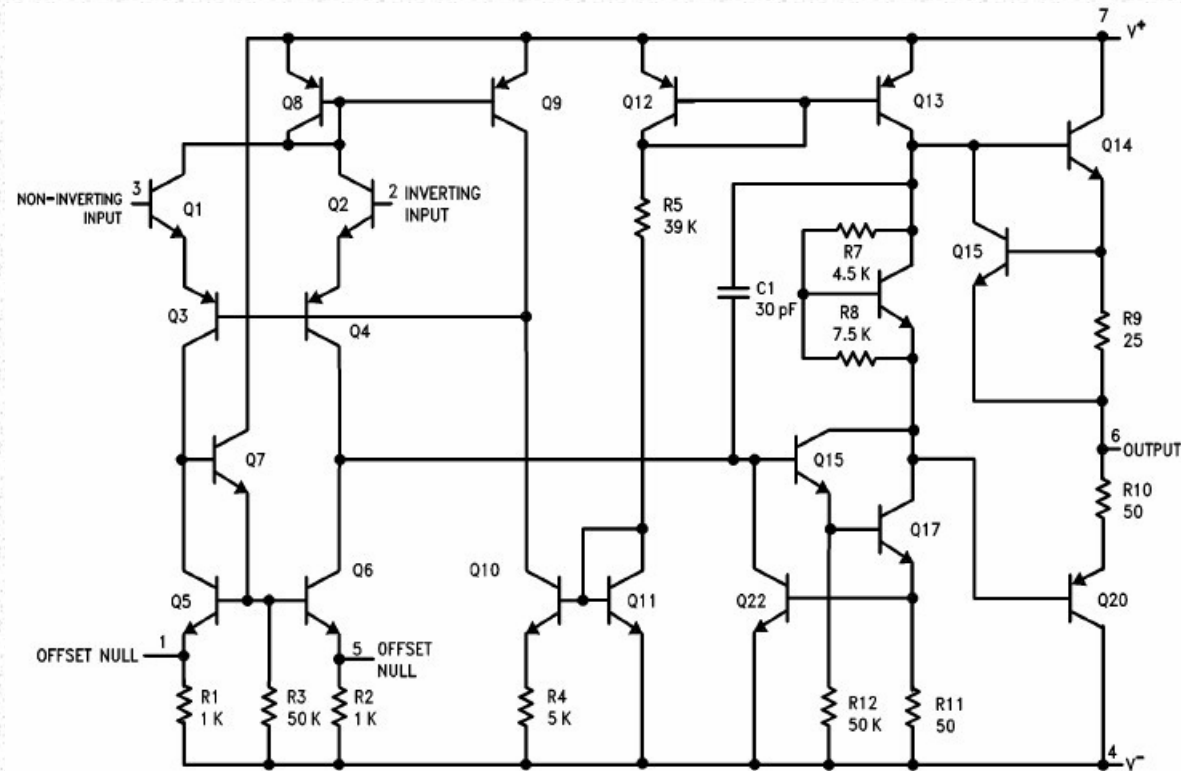
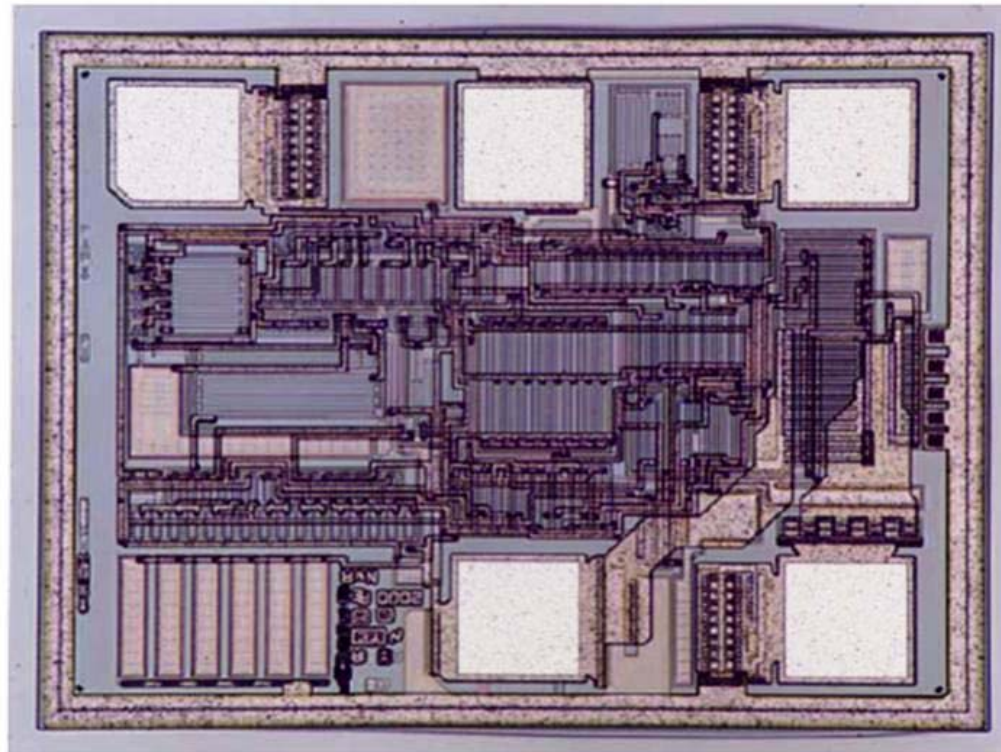


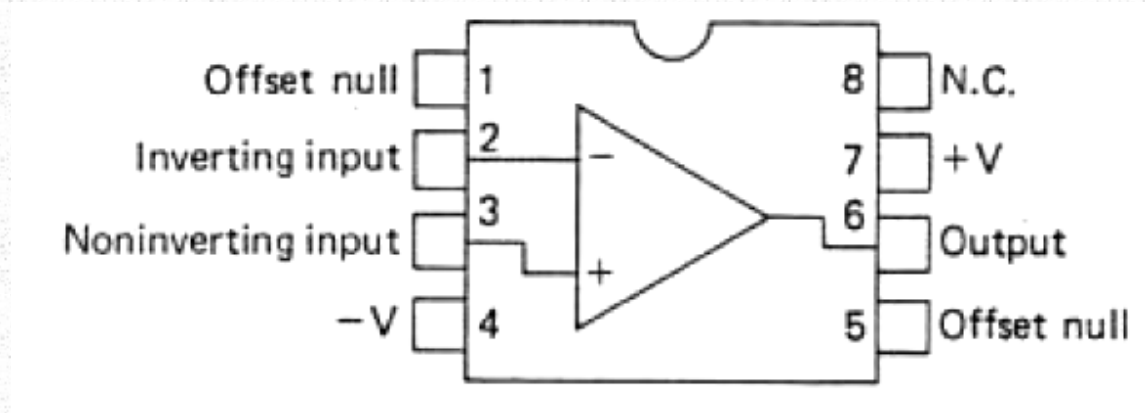
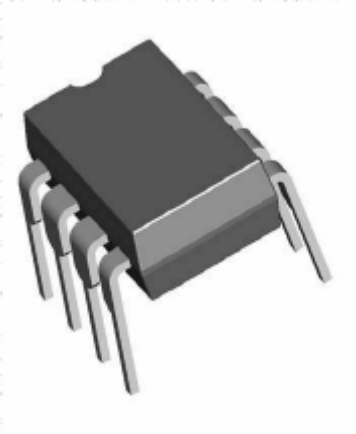
Diagrama Esquemático do AmpOp $\mu A741$

■ Amplificador Operacional – Introdução



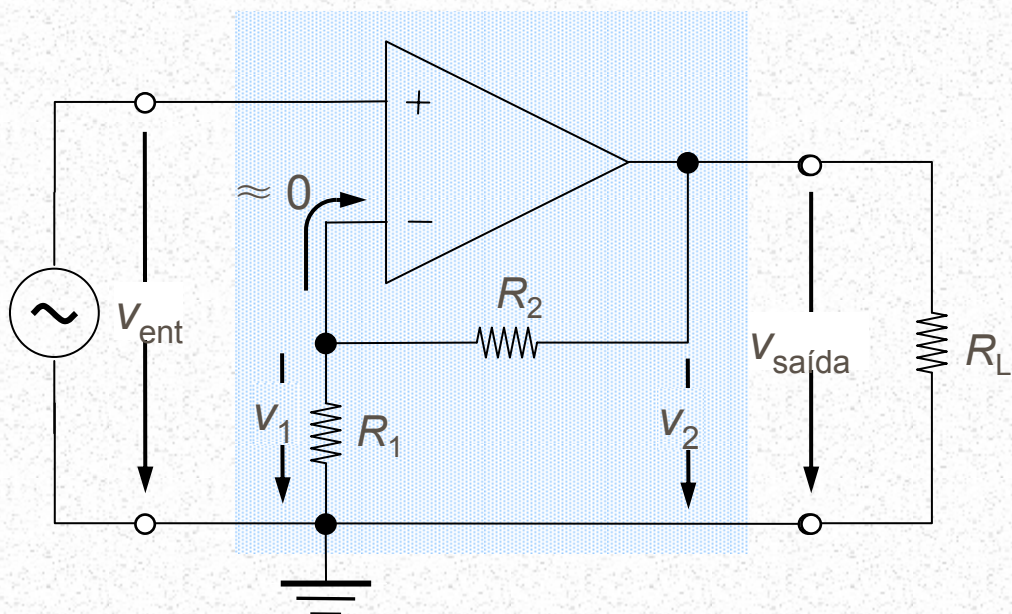
AmpOP – vista microscópica de um CI

■ Amplificador Operacional – Introdução



■ Amplificador operacional – blocos básicos

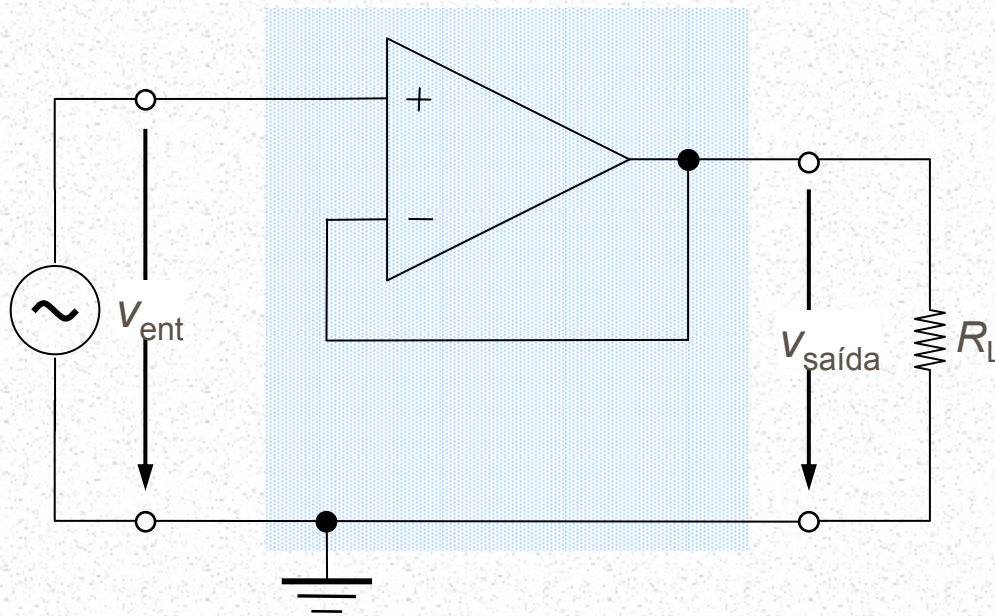
■ Amplificador Não-Inversor



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

■ Amplificador operacional – blocos básicos

■ Seguidor de tensão

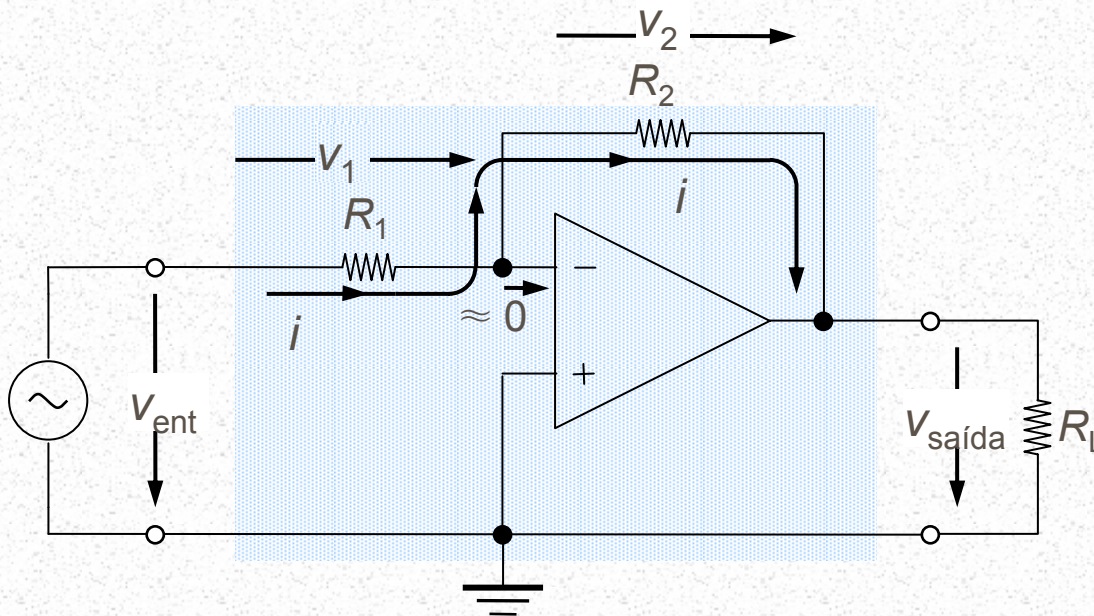


$$\frac{V_{saída}}{V_{ent}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1$$

The equation shows the voltage gain of the follower circuit. The feedback resistor R_2 is indicated as 0, and the input resistor R_1 is indicated as ∞ .

■ Amplificador operacional – blocos básicos

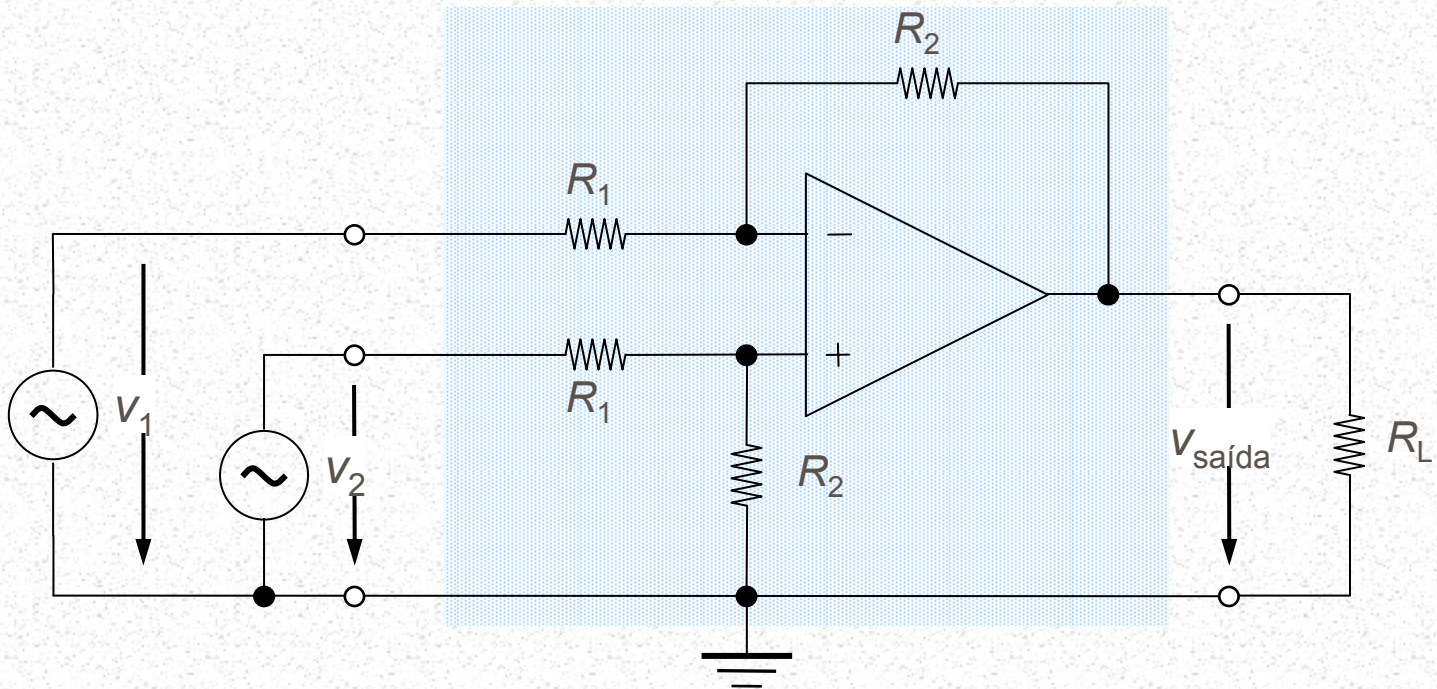
■ Amplificador Inversor

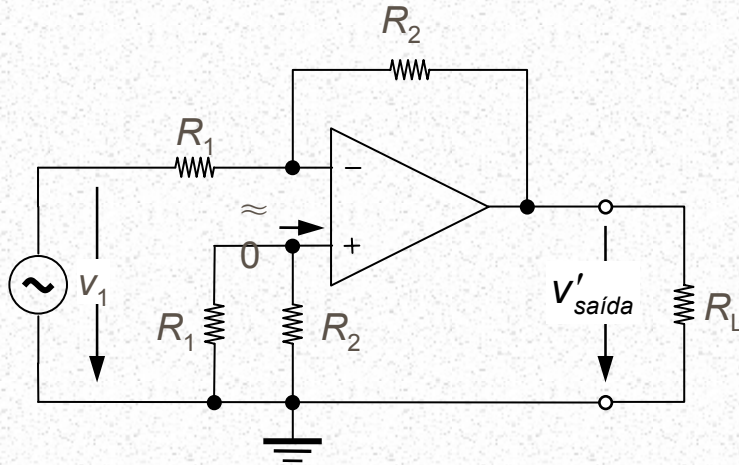


$$\frac{V_{saída}}{V_{ent}} = \frac{-V_2}{V_1} = \frac{-R_2 I}{R_1 I}$$

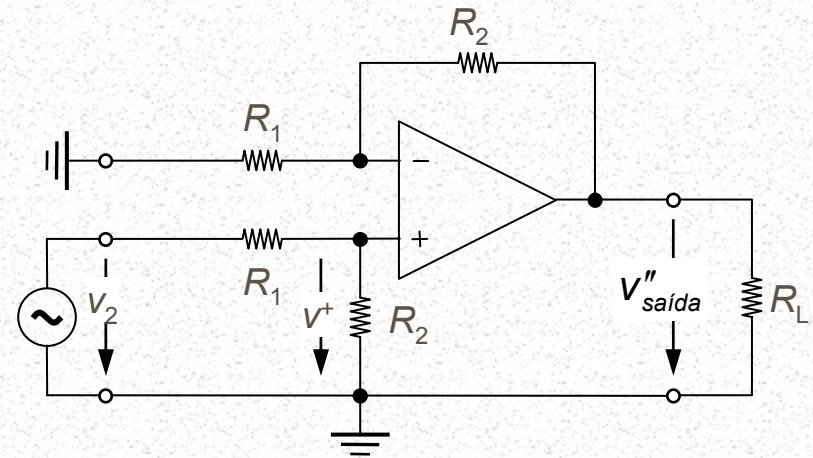
$$\rightarrow \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- Amplificador operacional – blocos básicos
 - Amplificador Diferencial





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



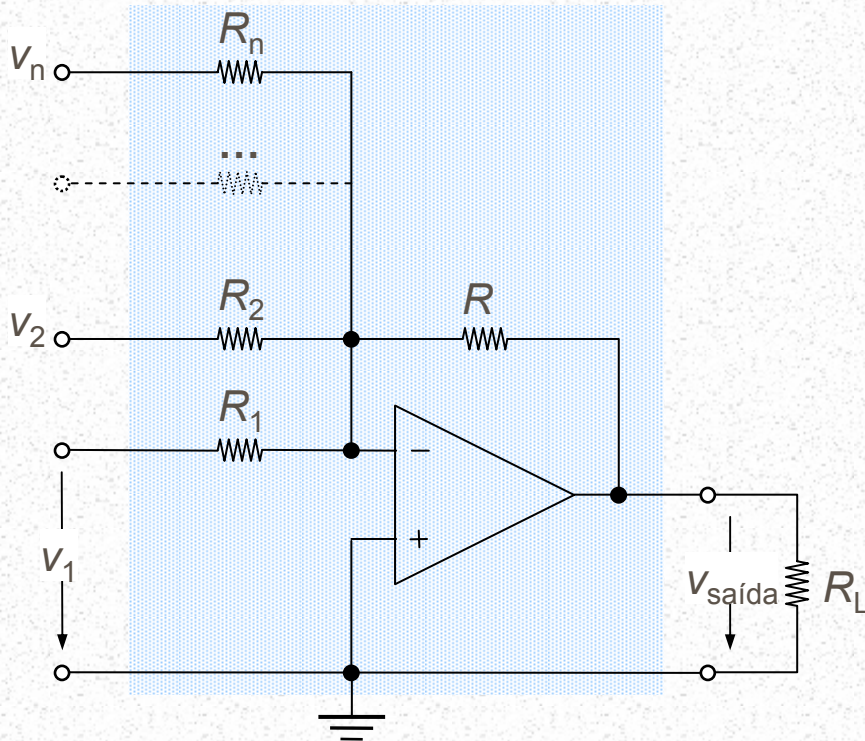
$$V^+ = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad V''_{saída} = V^+ \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

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

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

■ Amplificador operacional – outras configurações

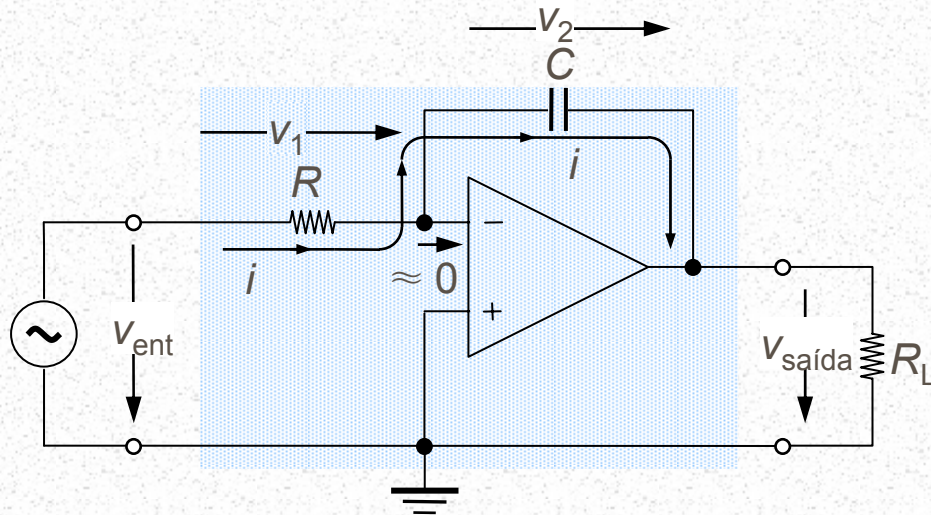
■ Amplificador Somador



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

■ Amplificador operacional – outras configurações

■ Amplificador Integrador



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

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

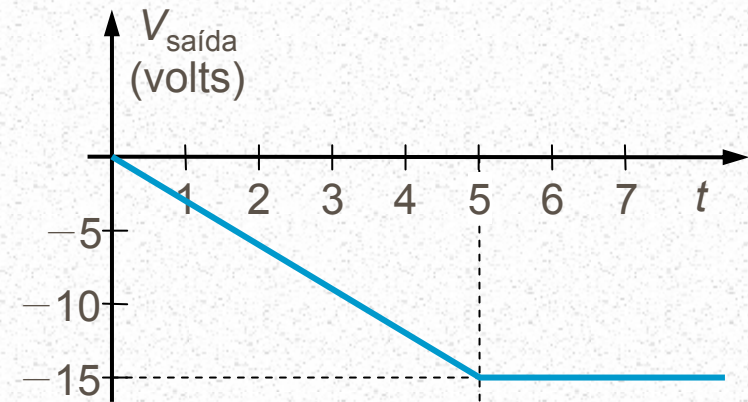
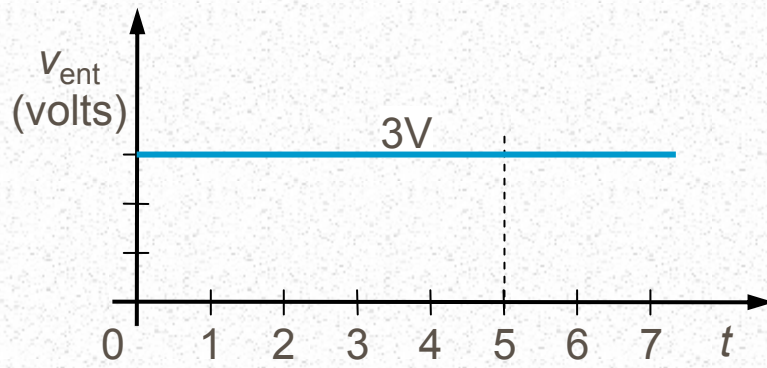
$$\rightarrow V_{saída} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{ent} dt + V_{iC}$$



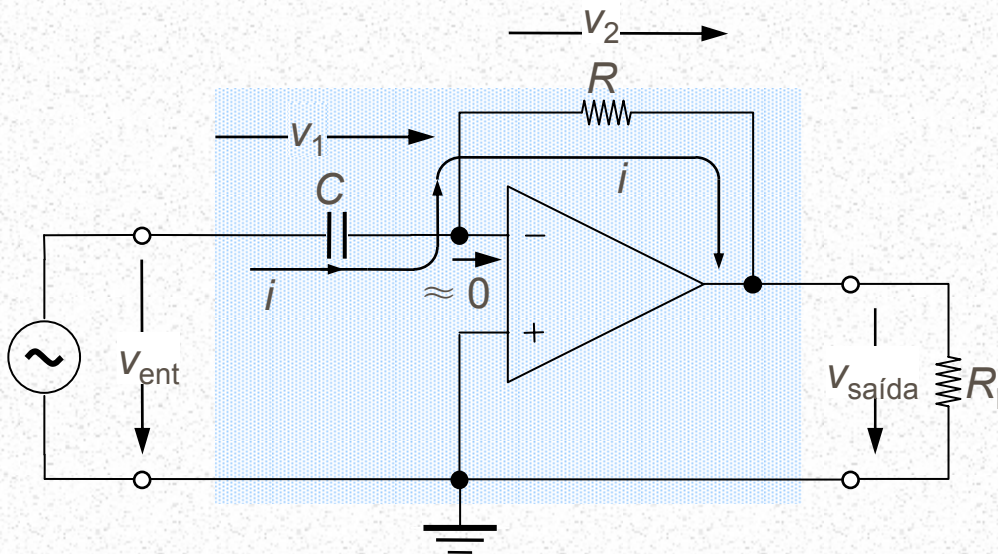
Amplificadores



Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial



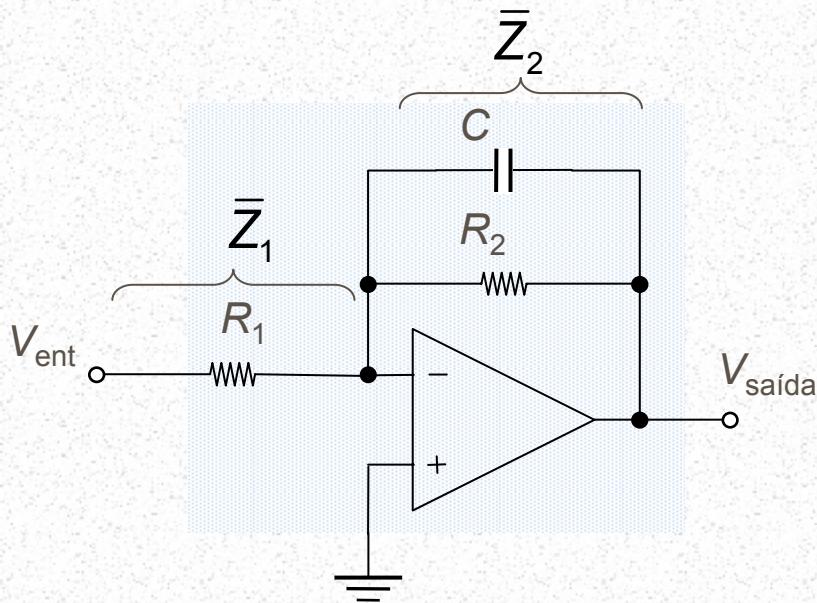
- Amplificador operacional – outras configurações
 - Amplificador Diferenciador



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

■ 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 $f \ll f_0$

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

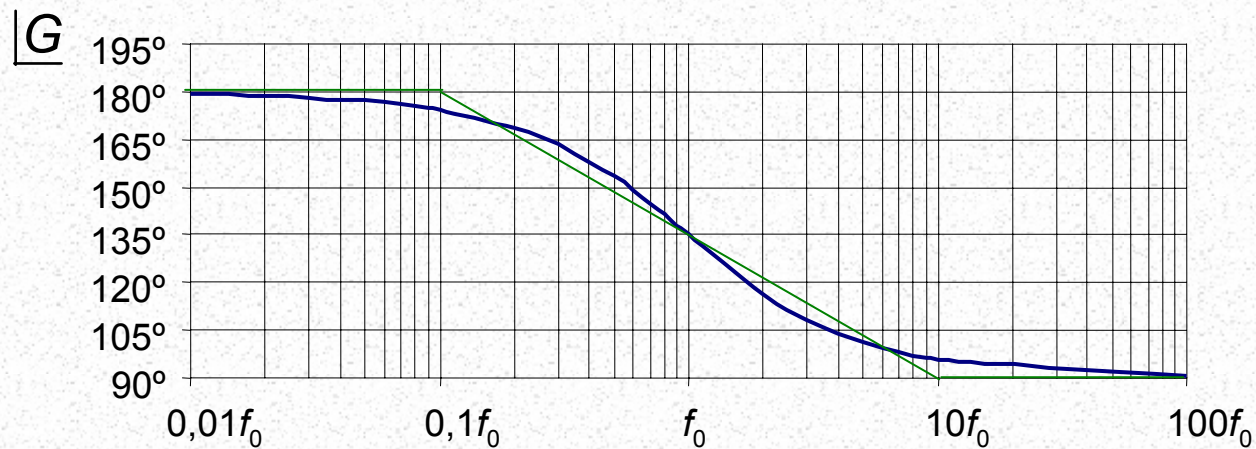
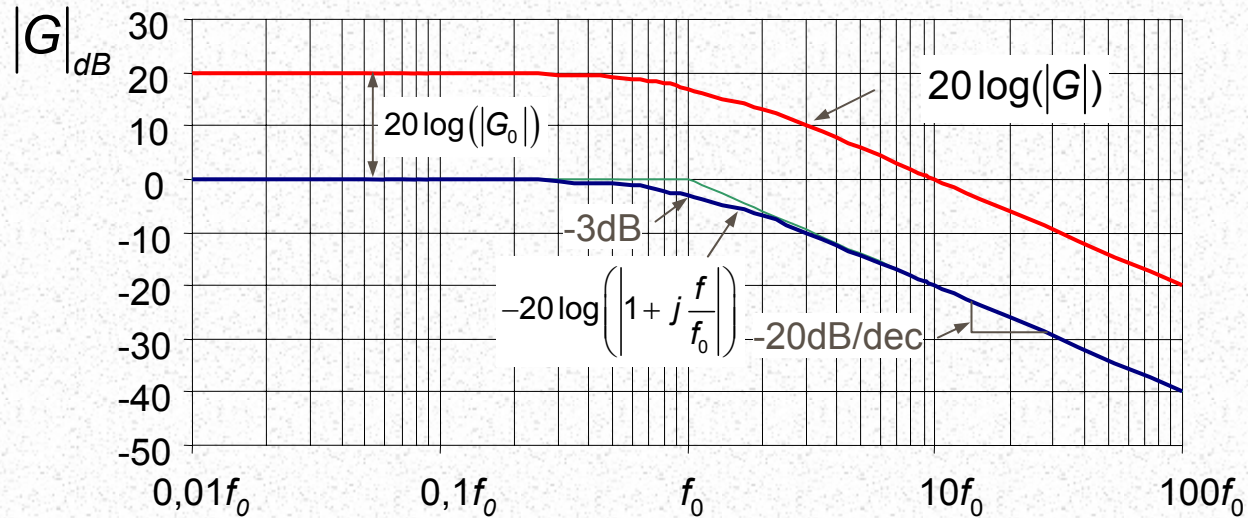
Para $f \gg f_0$

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

Para $f = f_0$

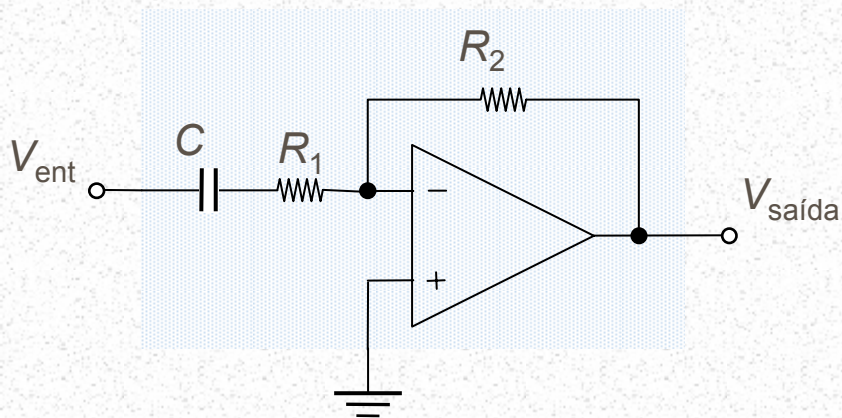
$$\underline{G} = 135^\circ, \quad |G|_{dB} = 20 \log(|G_0|) - 20 \log(\sqrt{2}) = 20 \log(|G_0|) - 3 \text{ dB}$$

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 $f \ll f_0$

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

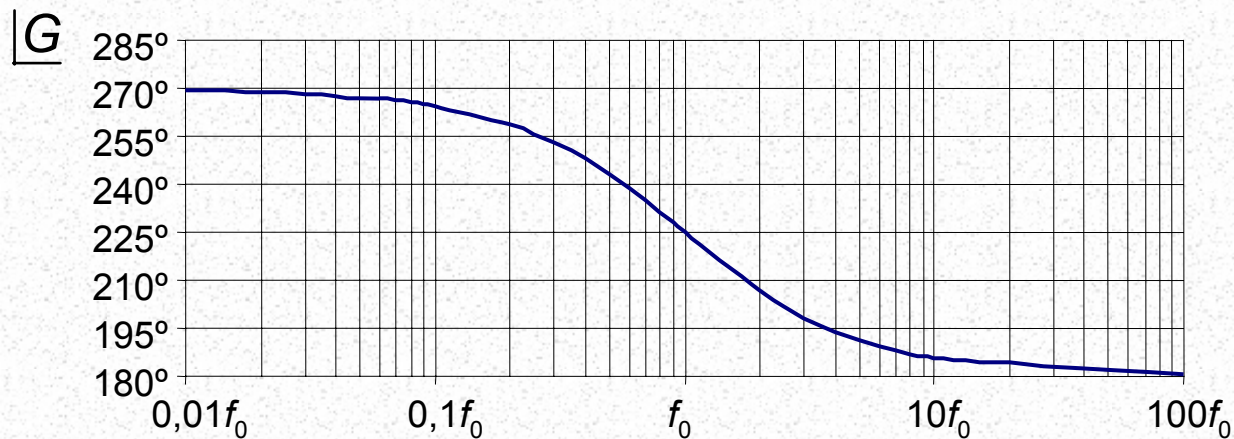
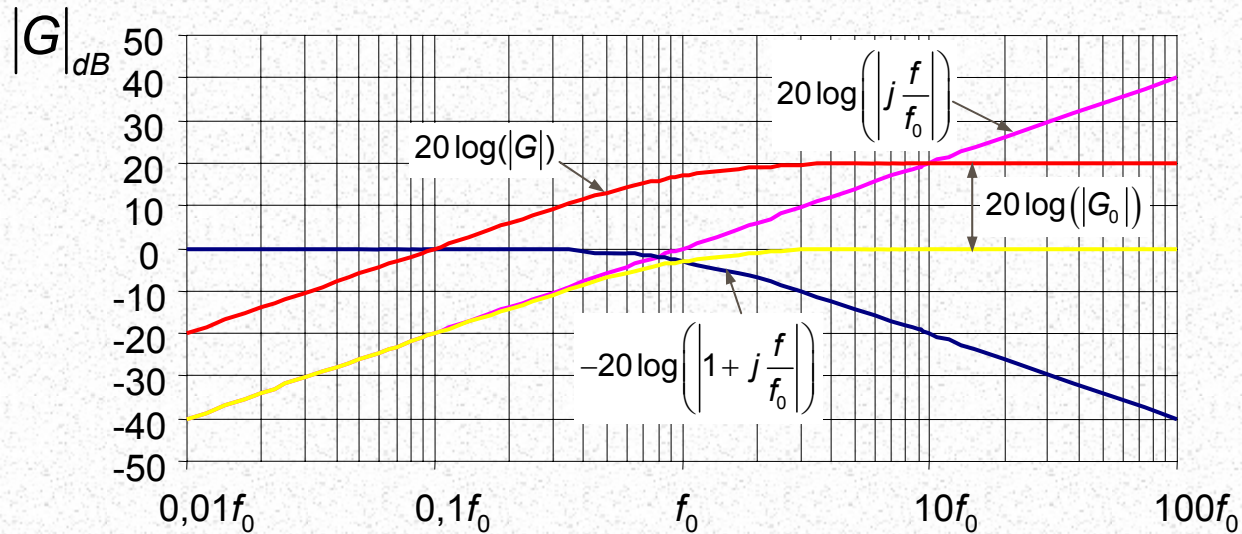
Para $f \gg f_0$

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

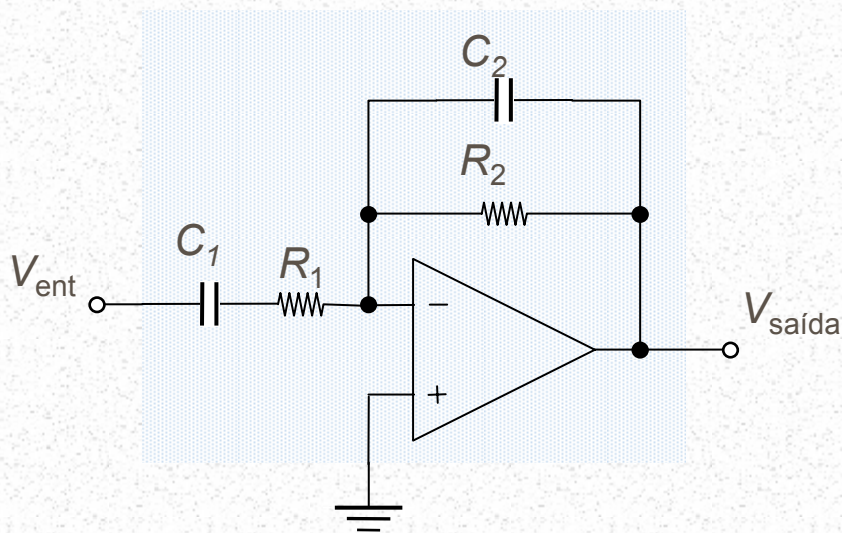
Para $f = f_0$

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

Amplificadores



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

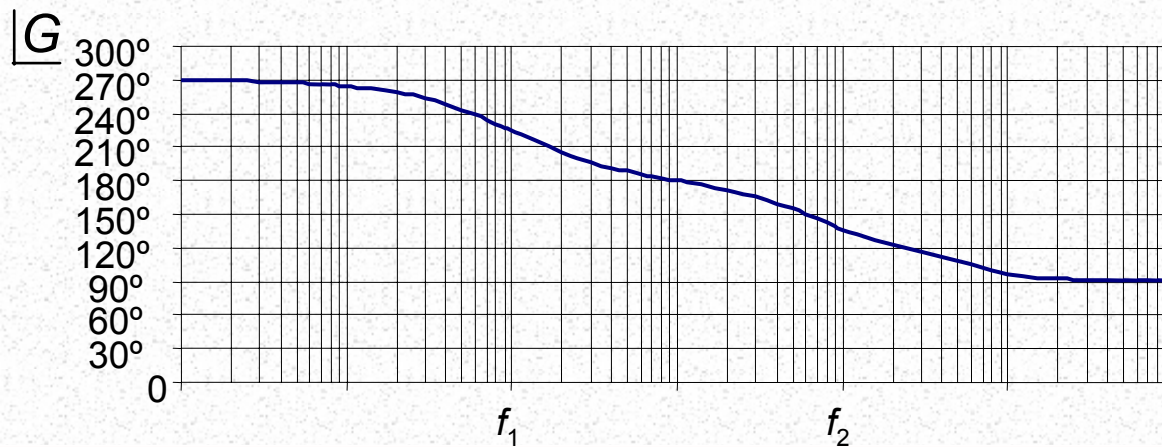
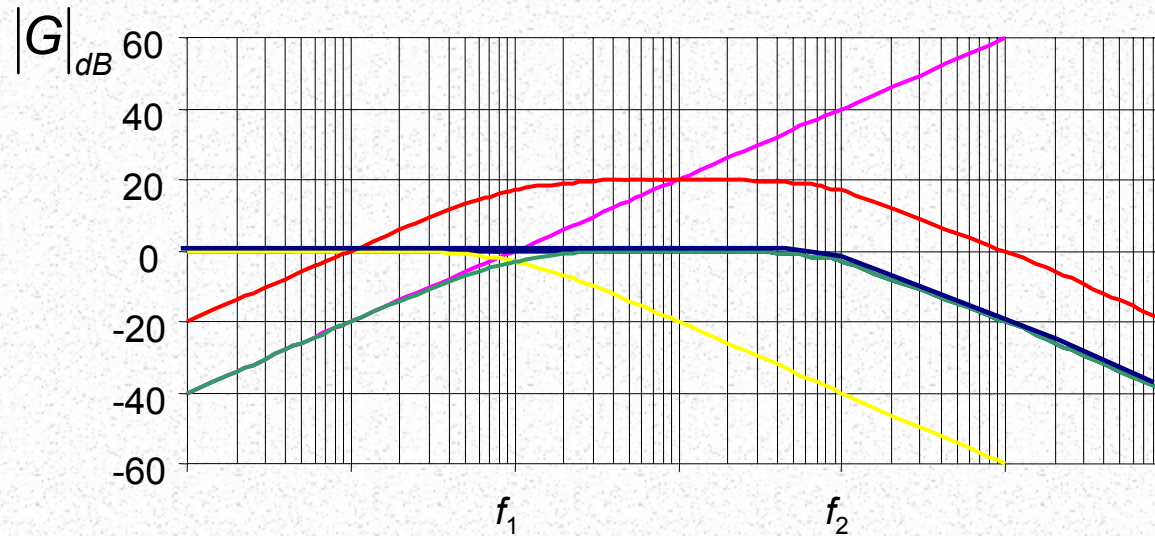


$$\rightarrow G = G_0 \frac{j \frac{f}{f_1}}{\left(1 + j \frac{f}{f_1}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_2}\right)}$$

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

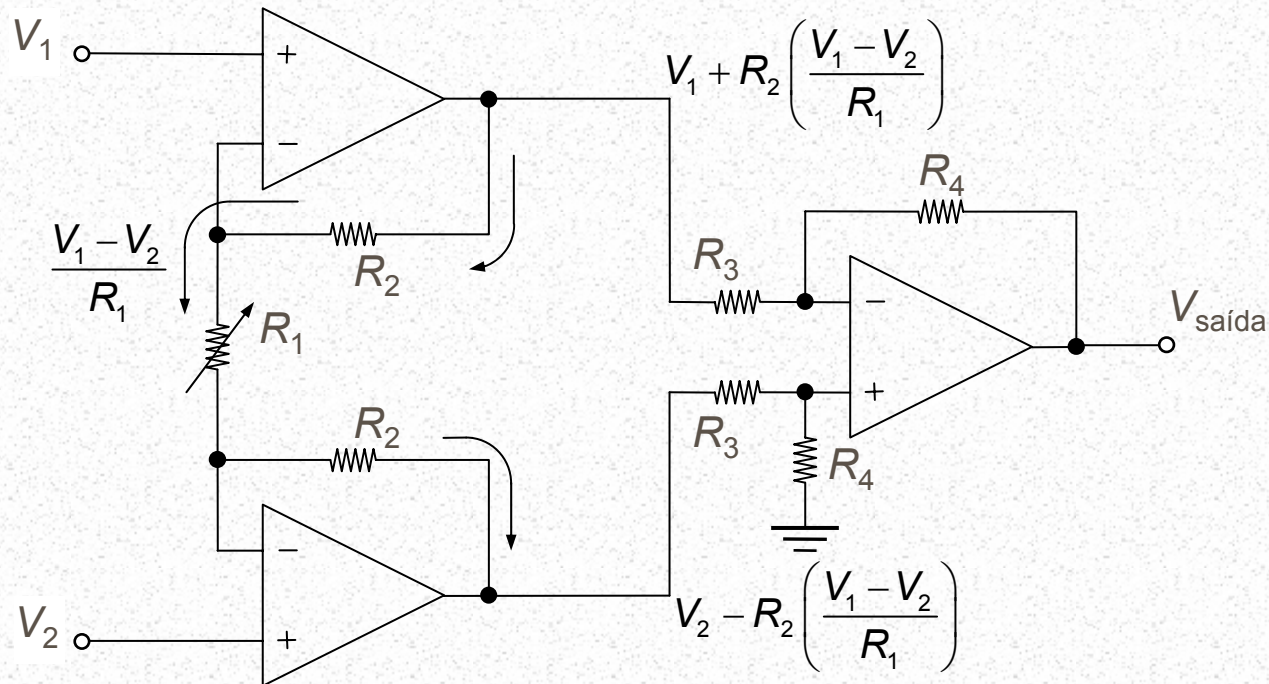
$$(f_2 > f_1)$$

Amplificadores



■ Amplificador operacional – outras configurações

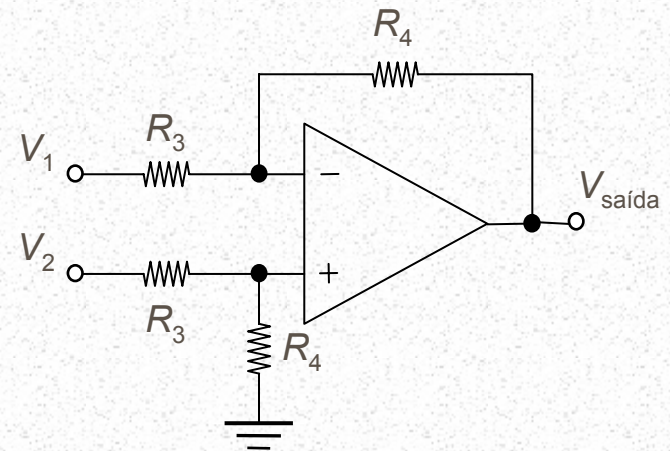
■ Amplificador de instrumentação



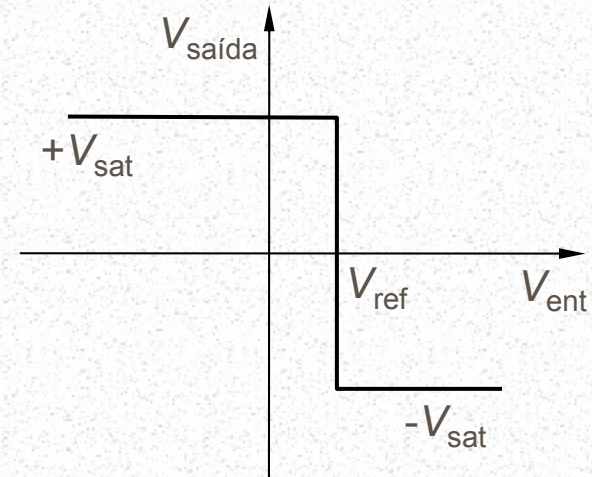
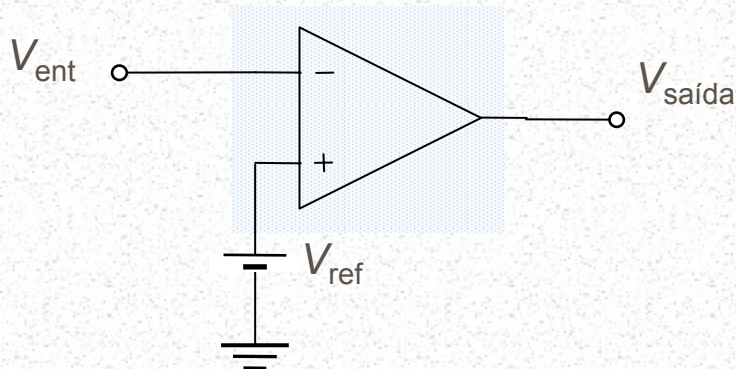
$$A_d = \frac{V_{saída}}{V_2 - V_1} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{para } R_2 = R_3 = R_4 = R, \rightarrow A_d = 1 + 2 \frac{R}{R_1}$$

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

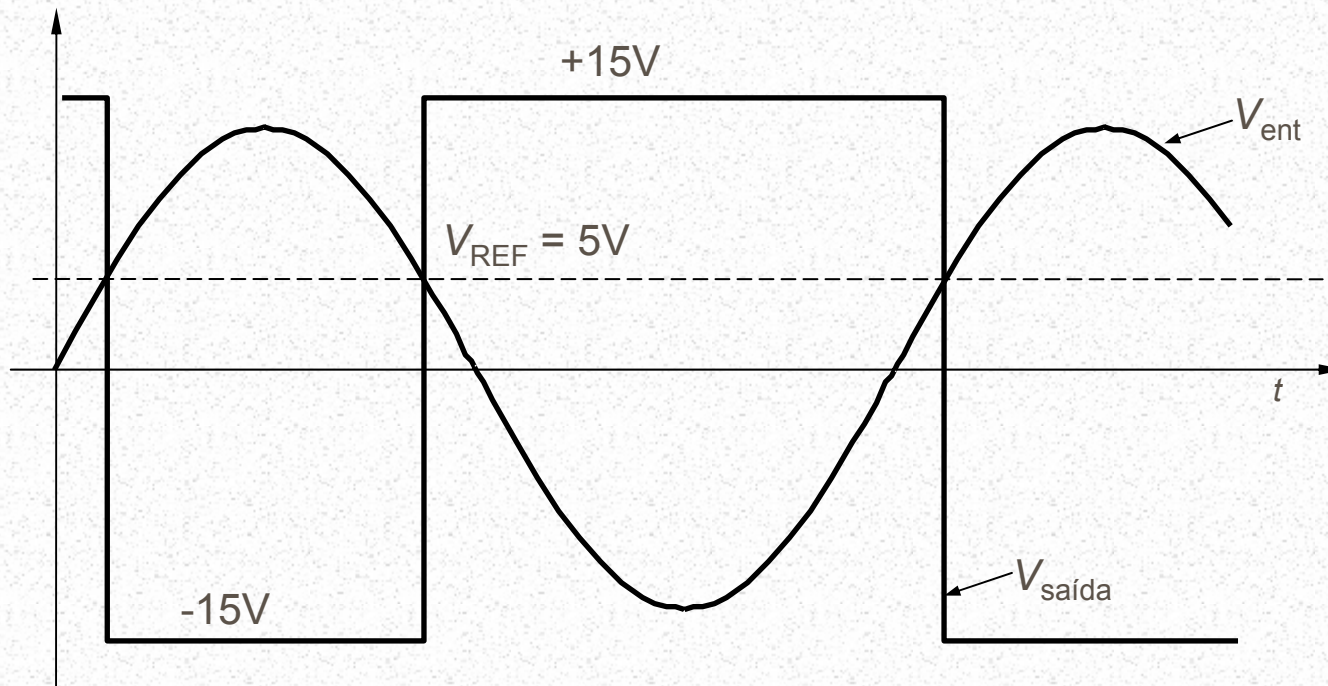


- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
 - Comparador de nível inversor

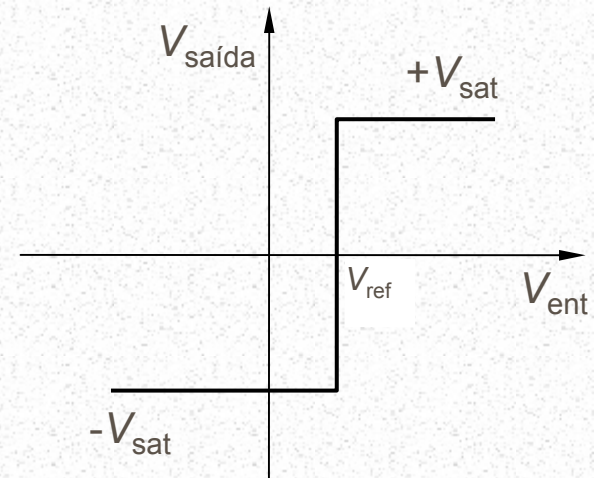
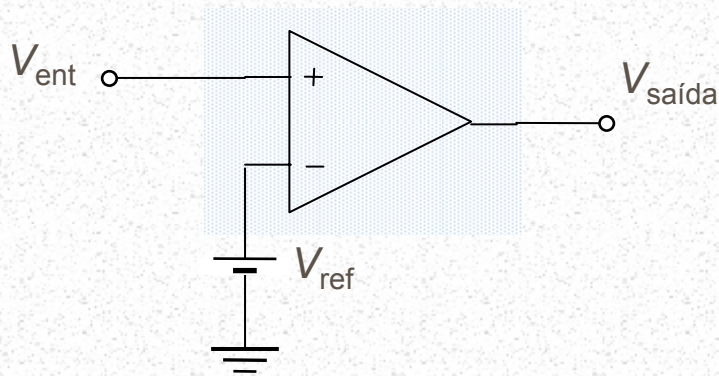


Característica de transferência

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



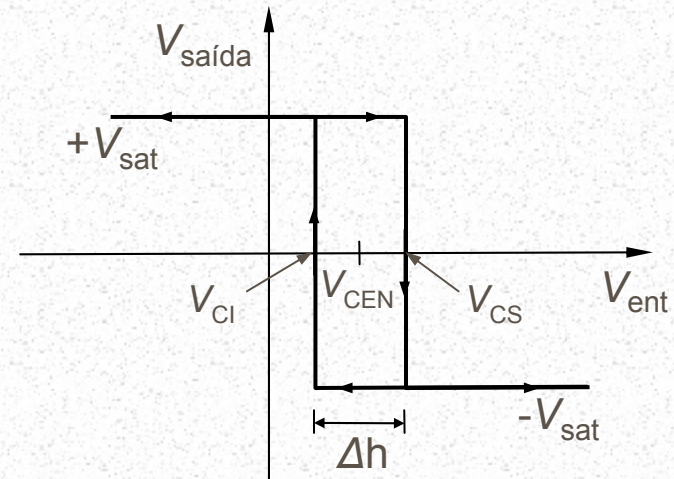
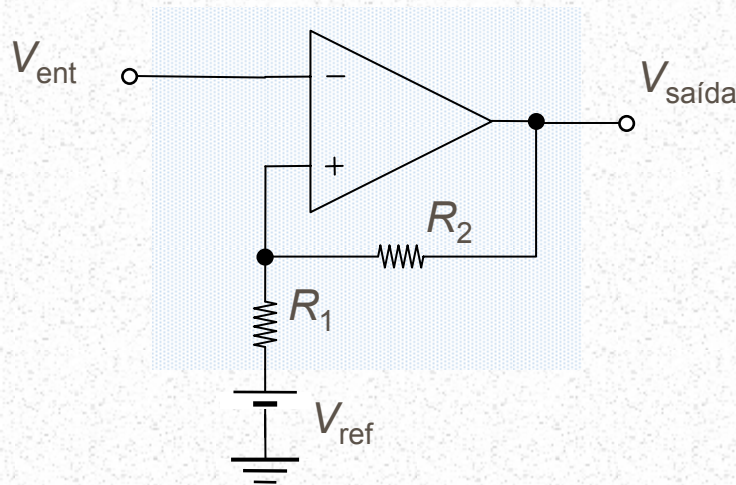
- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
 - Comparador de nível não-inversor



Característica de transferência

■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

■ Comparador de nível inversor com histerese



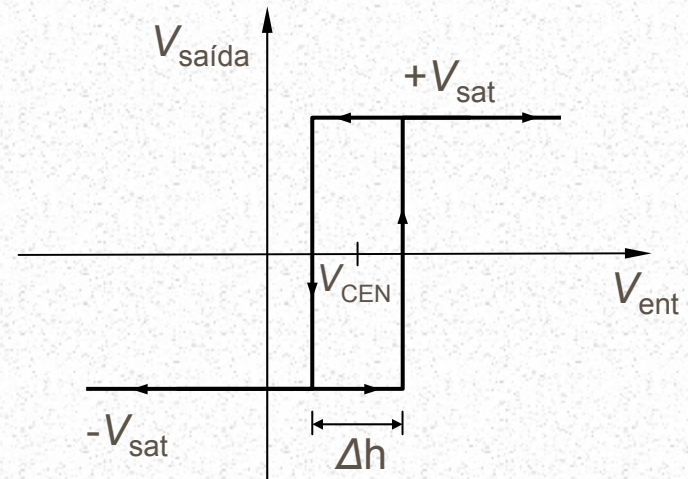
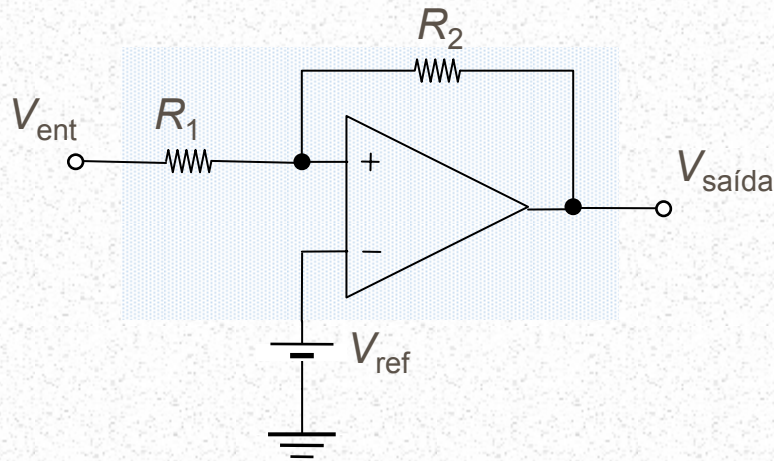
$$V_{CEN} = V_{REF} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

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

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

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

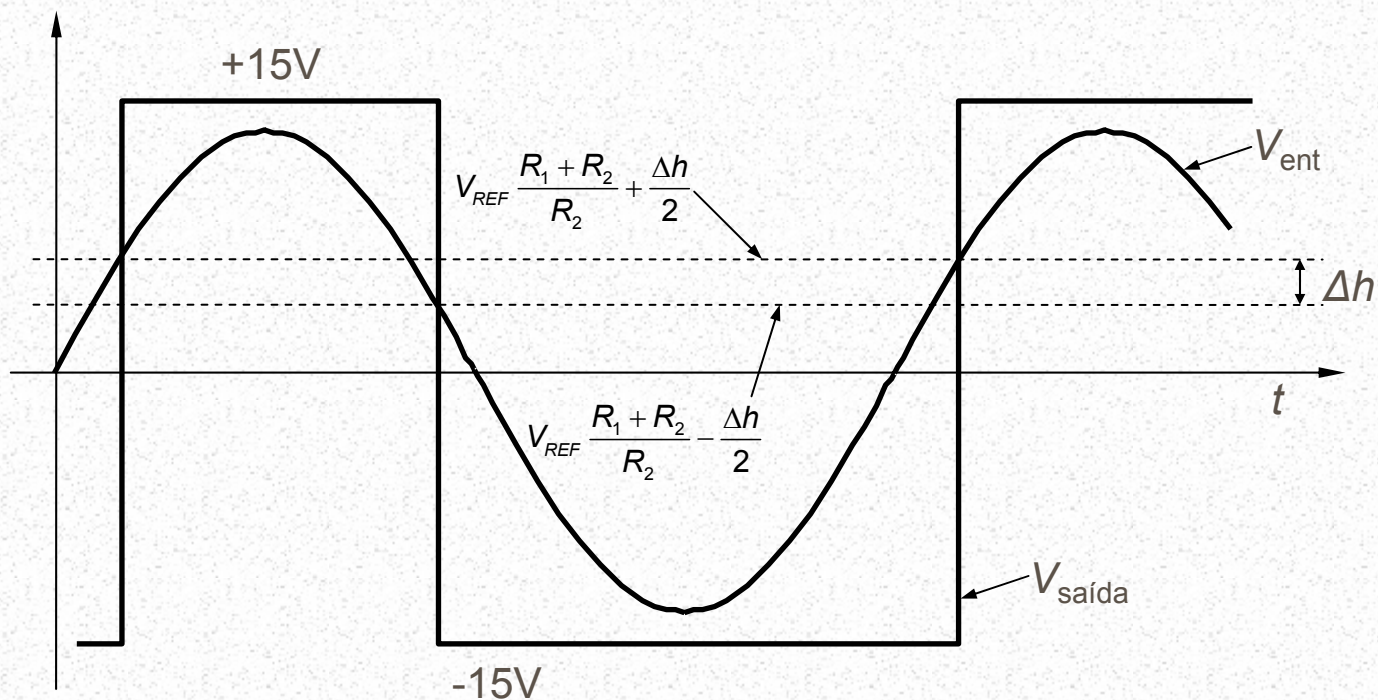
- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
 - Comparador de nível não-inversor com histerese



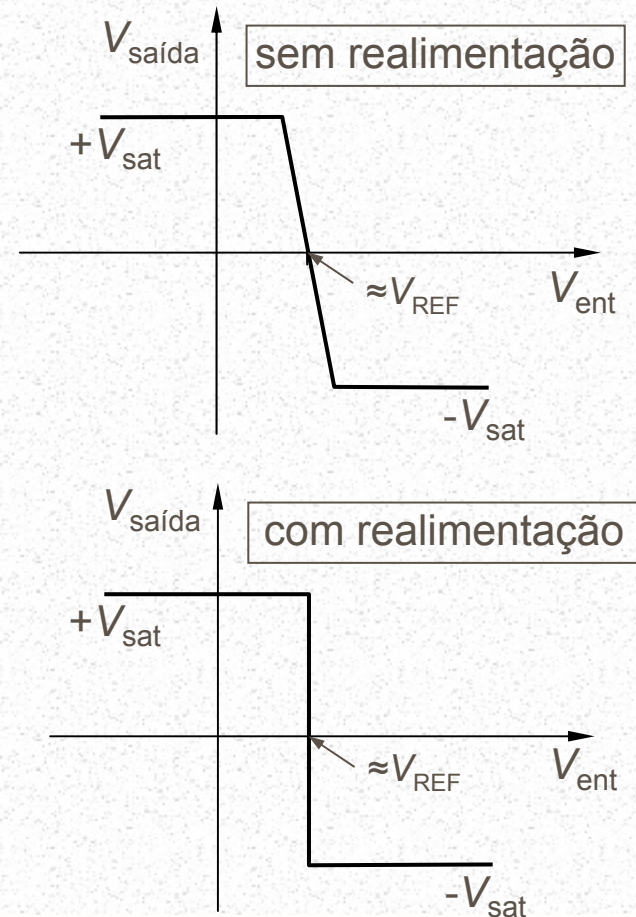
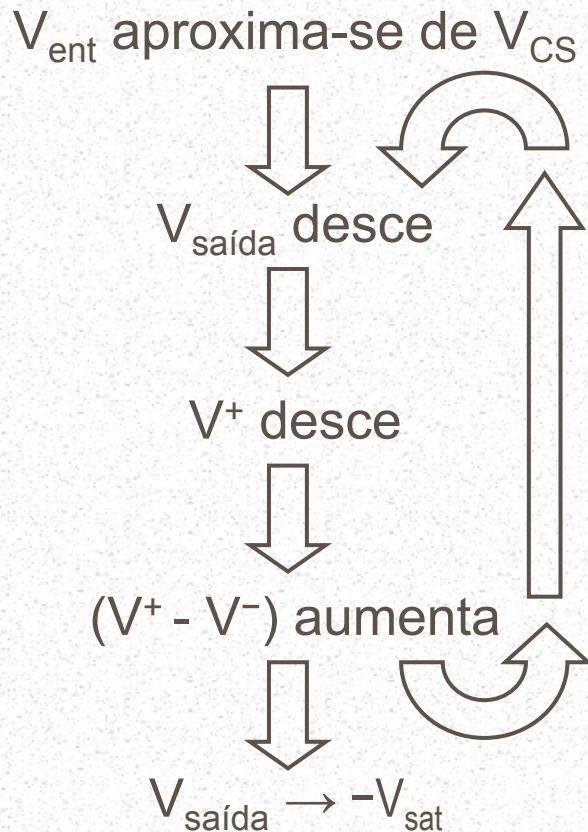
$$V_{CEN} = V_{REF} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

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

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

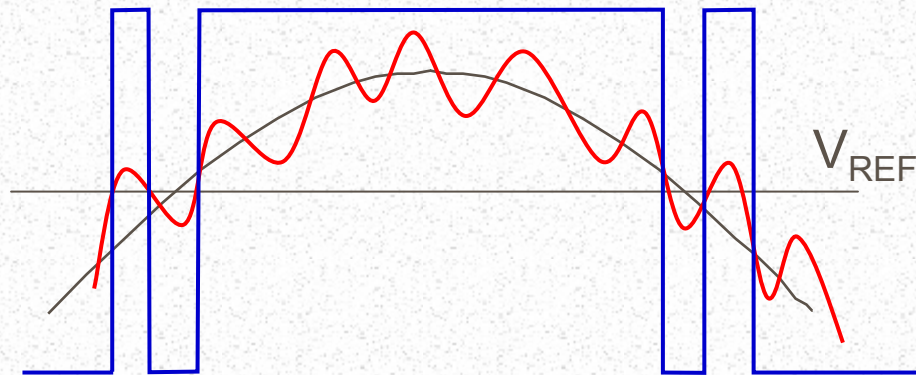


A realimentação positiva aumenta a velocidade das transições

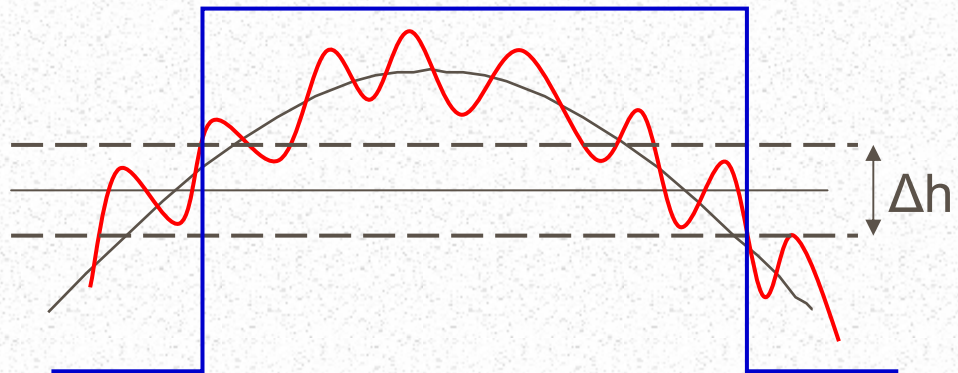


A histerese aumenta a imunidade ao ruído

Comparador
sem histerese

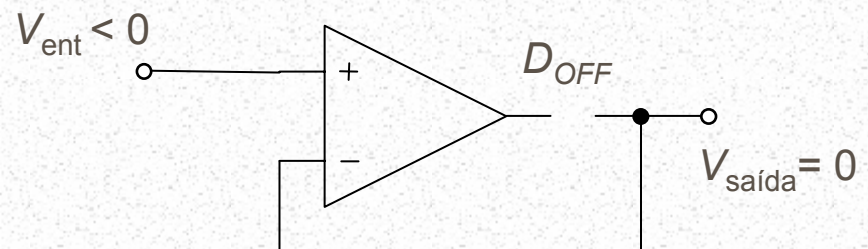
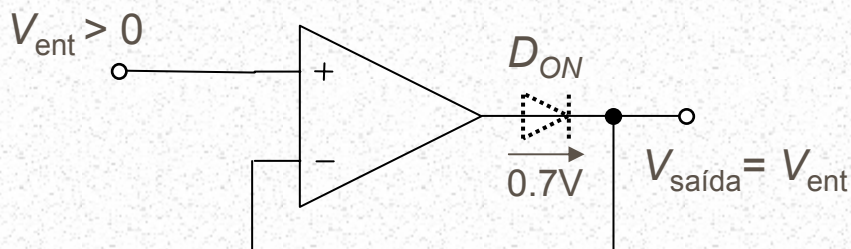
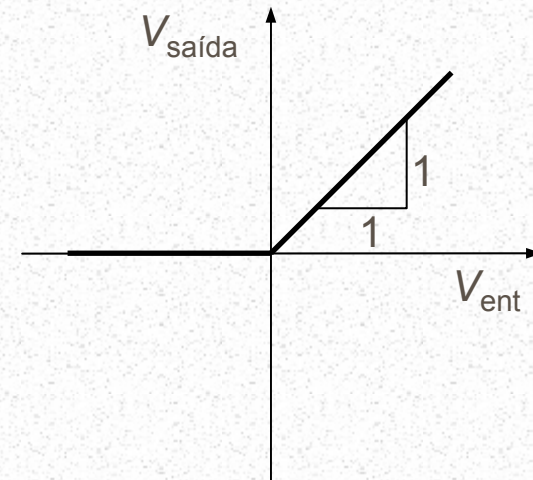
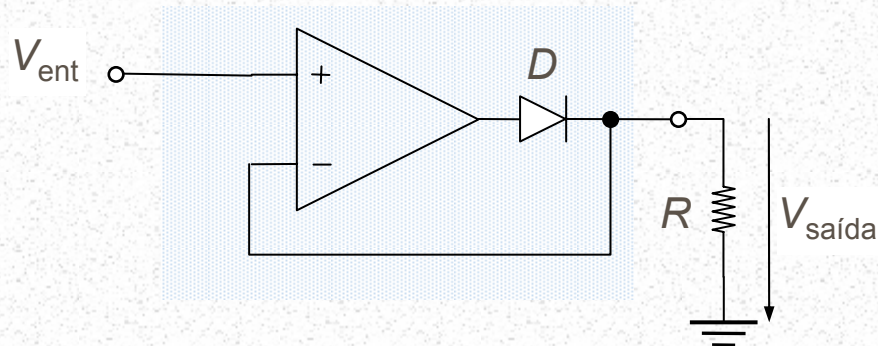


Comparador
com histerese

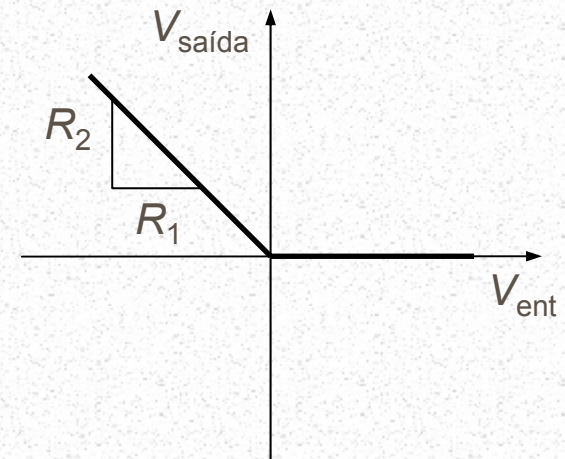
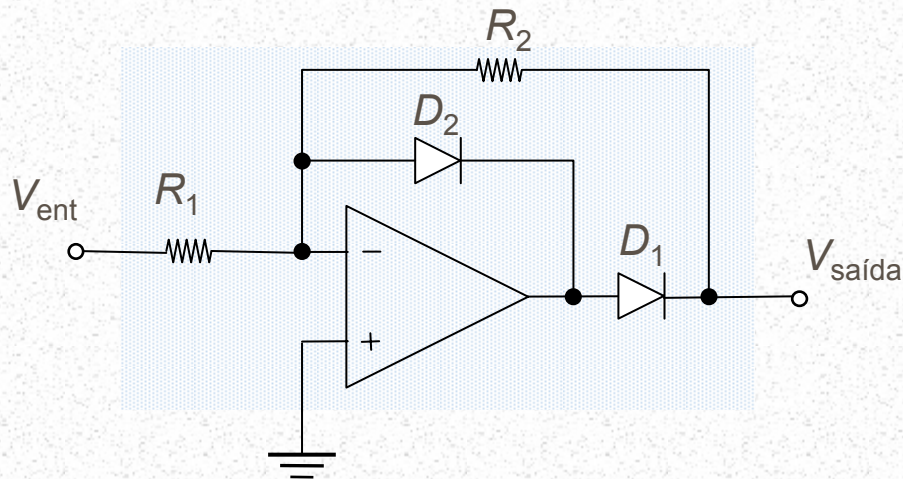


■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

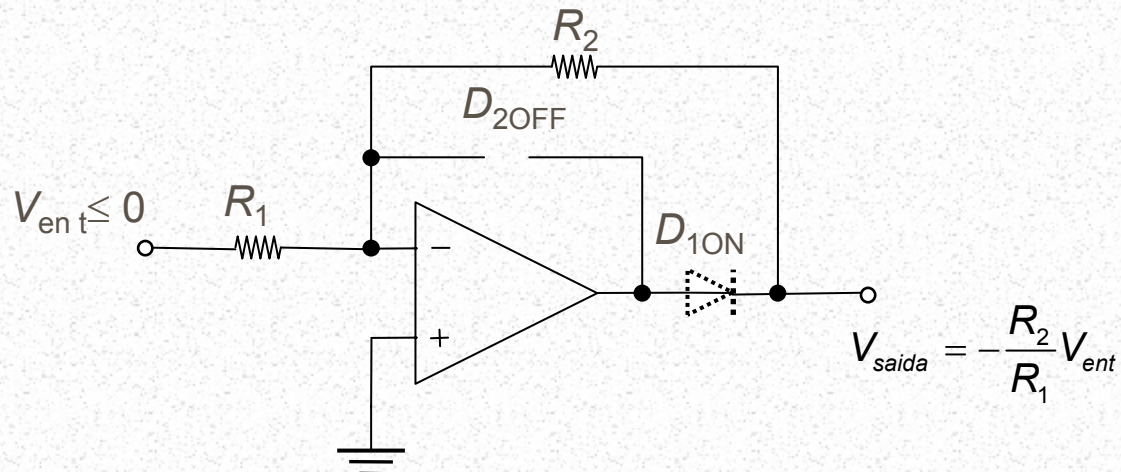
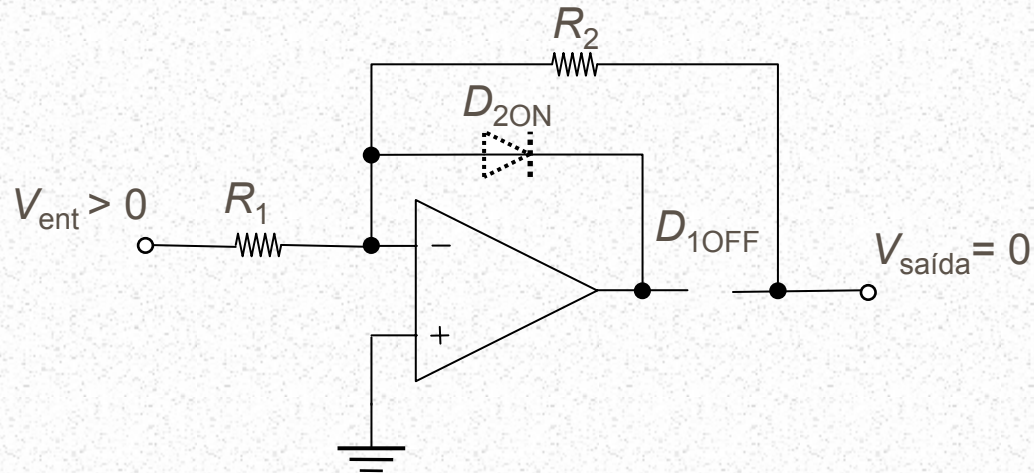
■ Rectificador de precisão de meia-onda



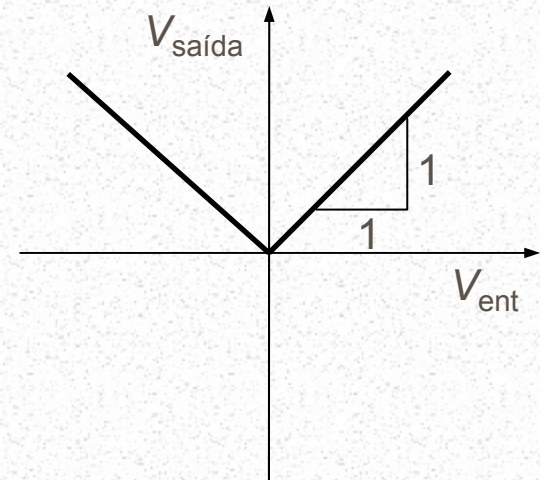
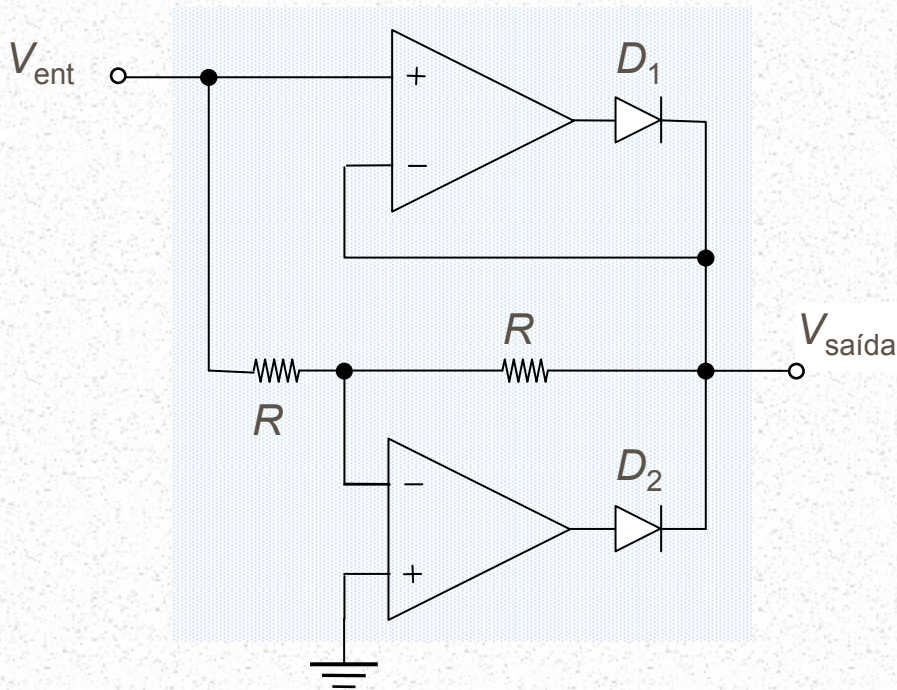
- **Amplificador operacional – aplicações não-lineares**
 - Rectificador de precisão de meia-onda – circuito melhorado



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)

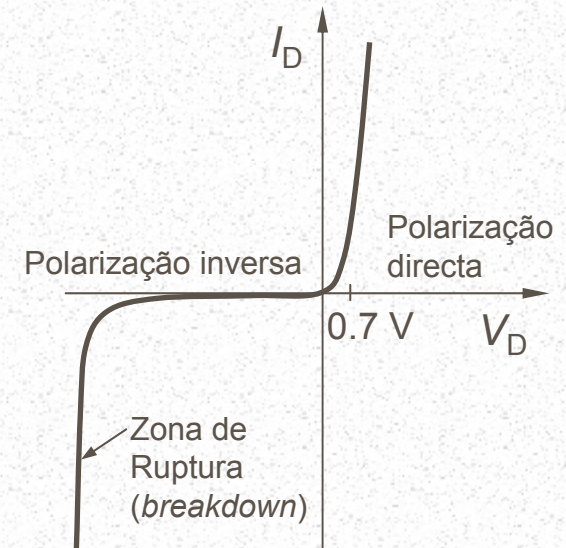
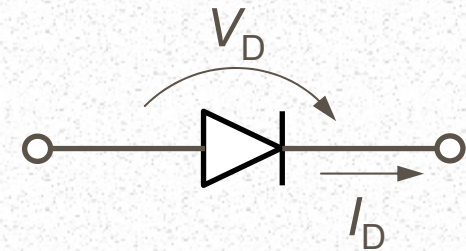
I_0 = corrente inversa de saturação (A)

q = carga do electrão, 1.6×10^{-19} C

K = constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23}

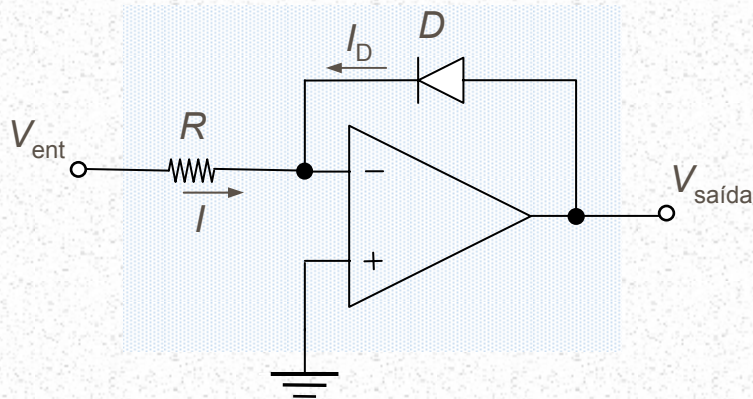
T = temperatura absoluta (°K)

m = constante empírica entre 1 e 2



■ Amplificador operacional – aplicações não-lineares

■ Amplificador logarítmico



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

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

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

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

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

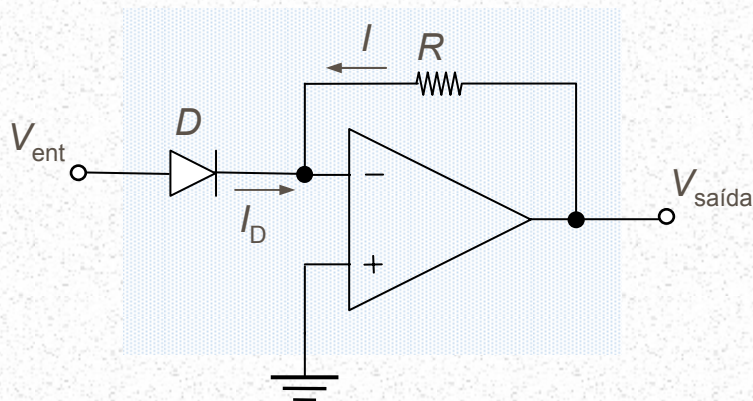
$$V_{saida} = V_D \approx a \times \ln\left(\frac{I_D}{I_0}\right)$$

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

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

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

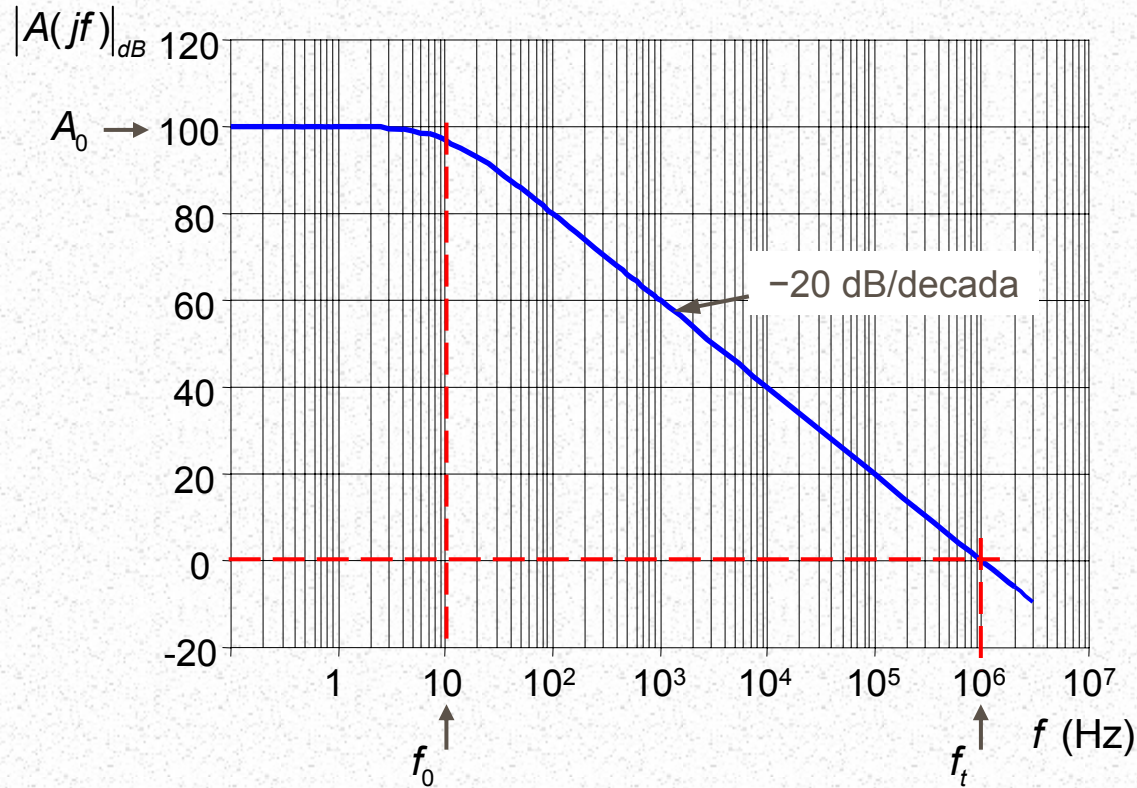
- Amplificador operacional – aplicações não-lineares
 - Amplificador exponencial (ou anti-logarítmico)



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

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

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



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

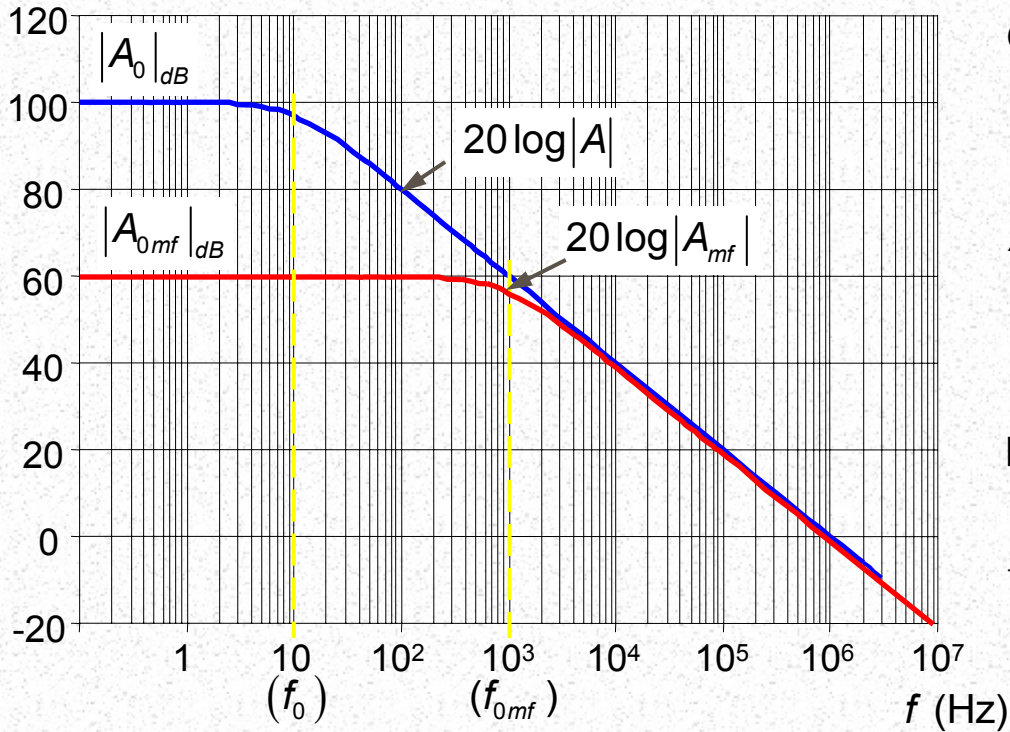
para $f \gg f_0$,

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

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 $\rightarrow A_{mf} = \frac{A}{1 + AB}$

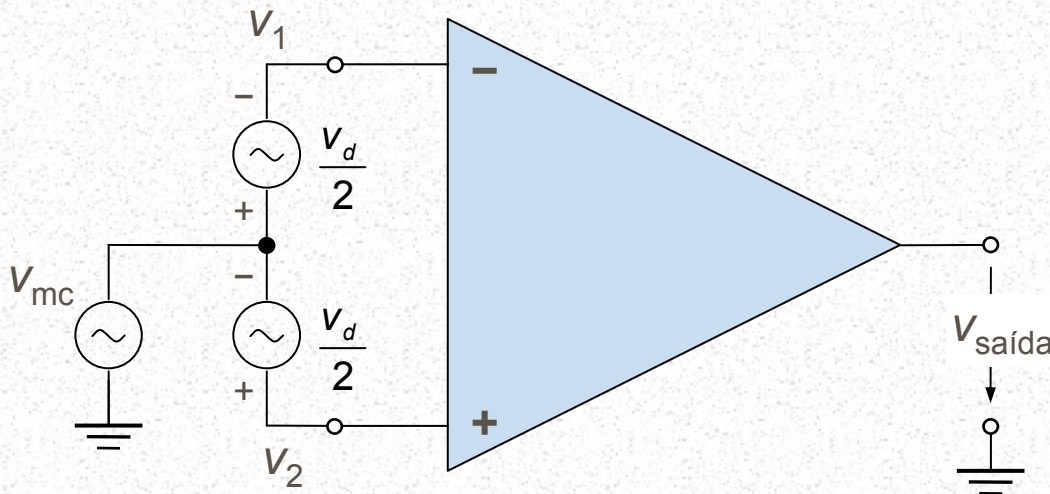
$$A_{mf} = \frac{\frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_0}}}{1 + \frac{A_0 B}{1 + j \frac{f}{f_0}}} = \frac{A_0}{1 + A_0 B + j \frac{f}{f_0}}$$

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*)



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

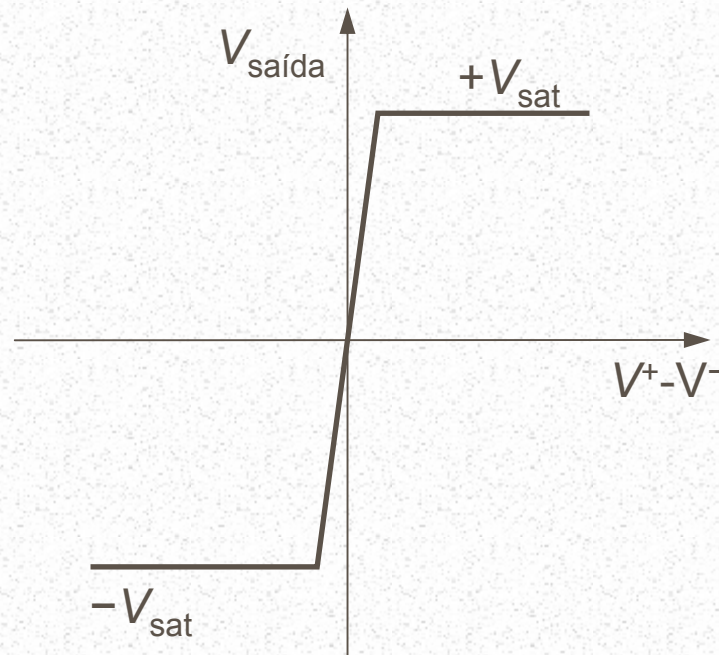
$$\rightarrow CMRR = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_{mc}} \right) \quad (dB)$$

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

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

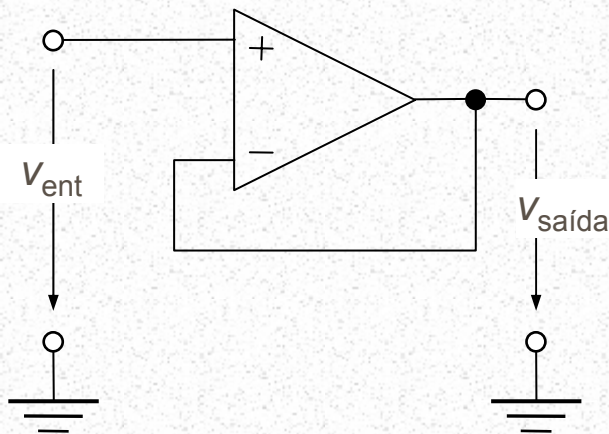
$$V_1 = V_{mc} - \frac{V_d}{2}, \quad V_2 = V_{mc} + \frac{V_d}{2}$$

- Limitações do AmpOp para grandes sinais
 - Saturação da saída

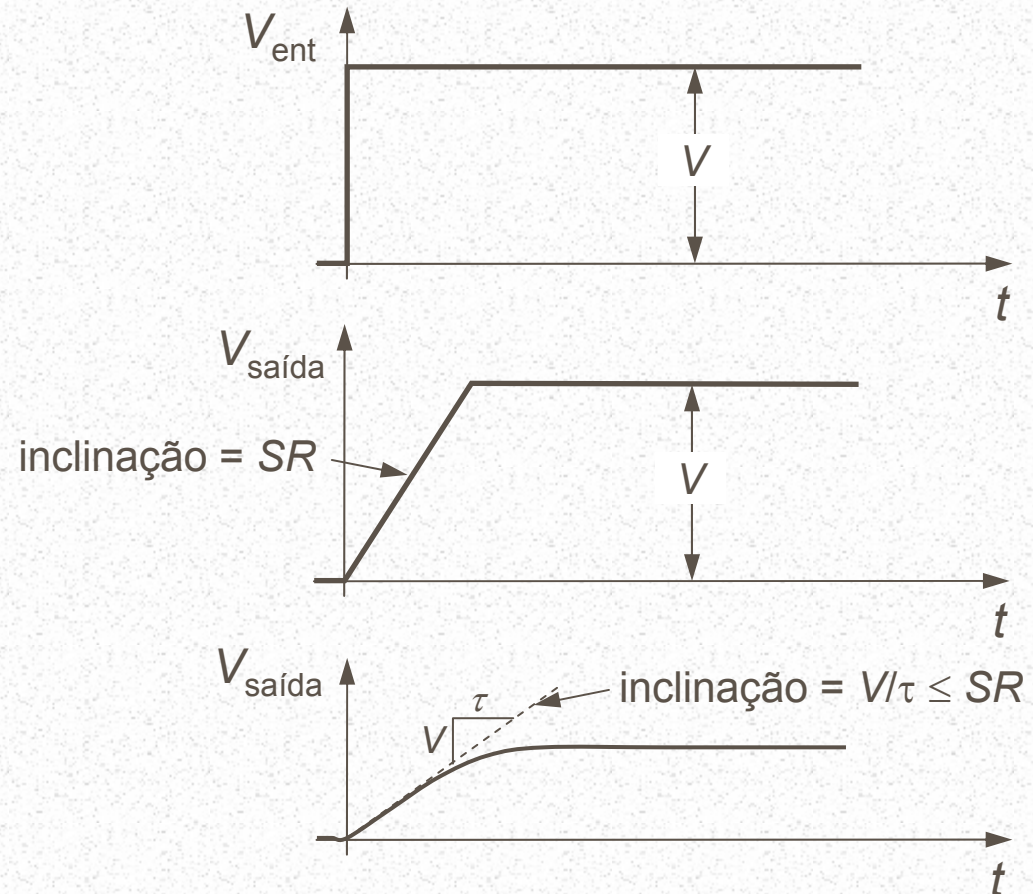


■ Limitações do AmpOP para grandes sinais

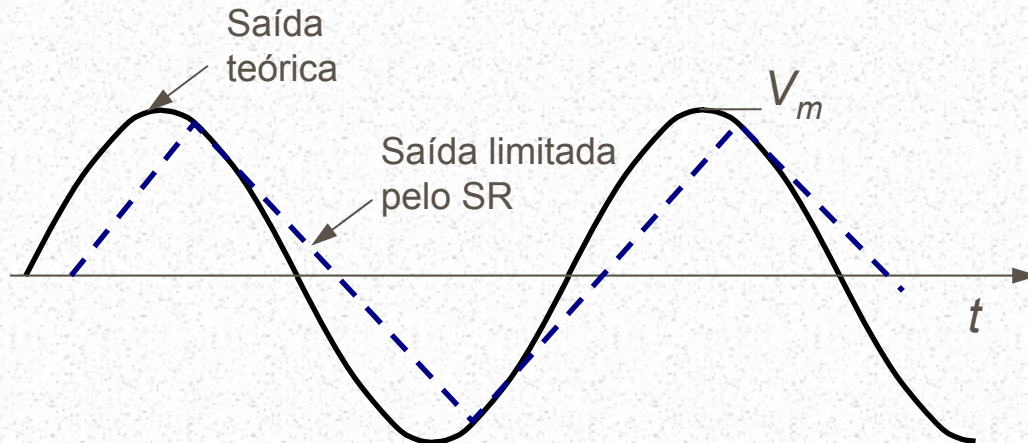
■ Slew rate



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



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



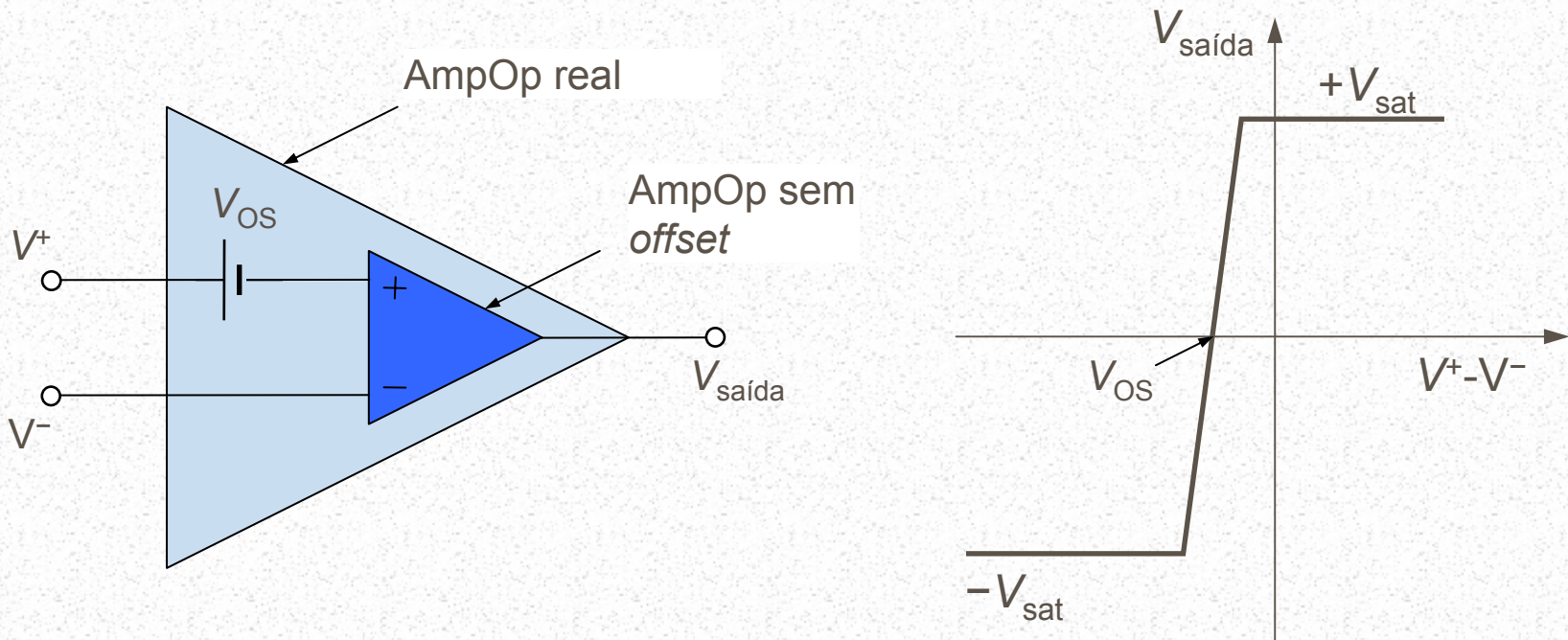
$$V_{ent} = V_m \text{ sen}(\omega t)$$

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

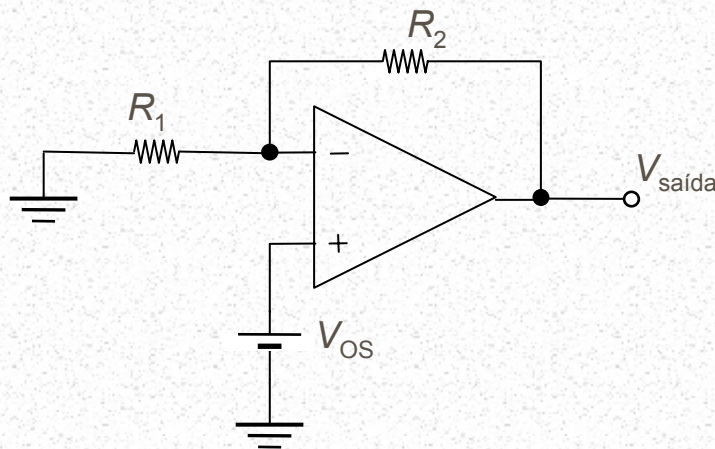
$$\omega_{\max} V_m = SR$$

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

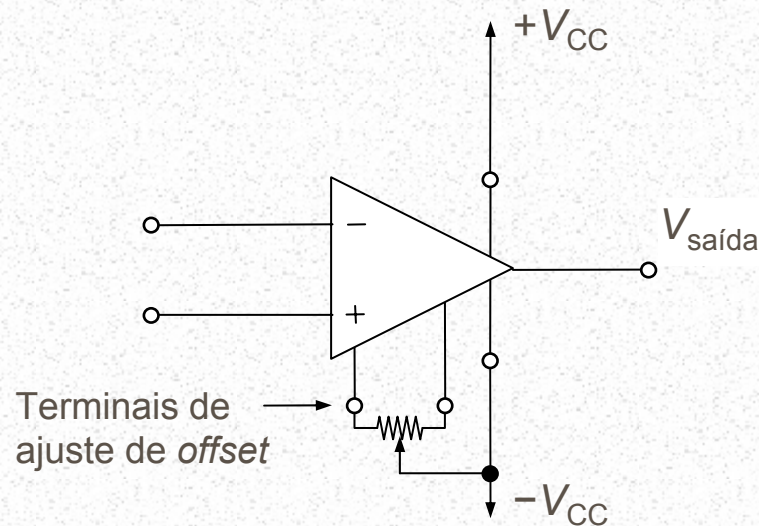
- “Imperfeições” de AmpOP para corrente contínua
 - Tensão de *offset* na entrada (V_{OS})



Efeito da tensão de *offset* na saída

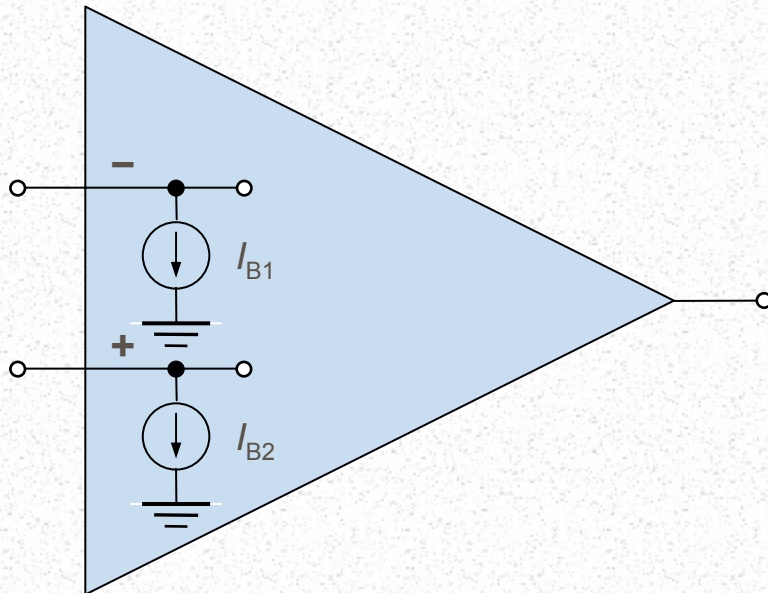


$$V_{saída} = V_{OS} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



■ Imperfeições de AmpOp para corrente contínua

■ Corrente de entrada de polarização



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

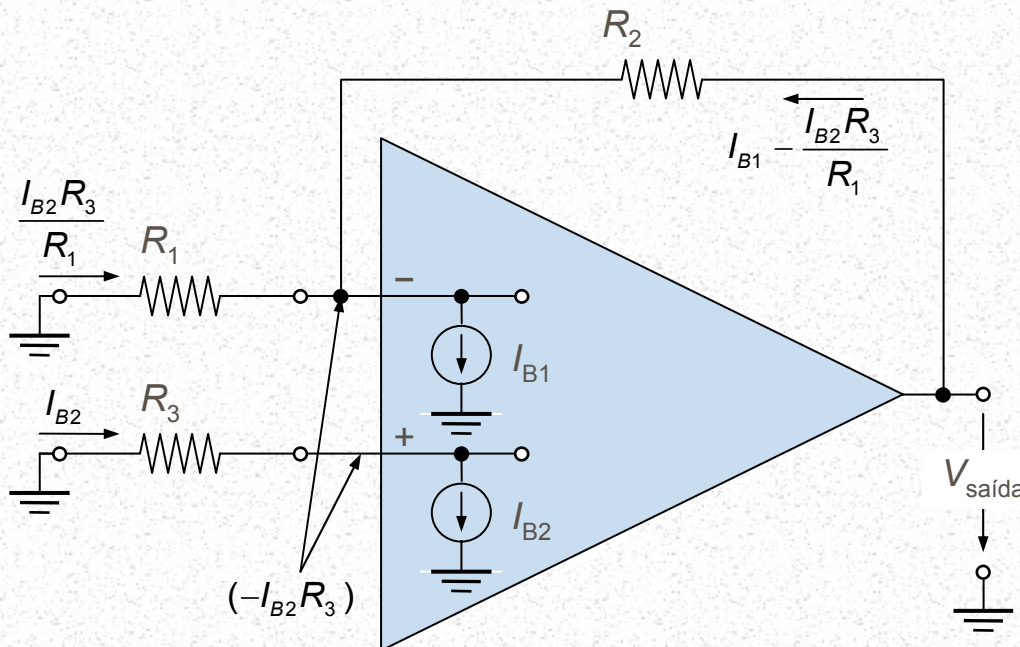
→ Corrente de entrada de polarização

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

→ 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 $I_{B1} = I_{B2} = I_B$,

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

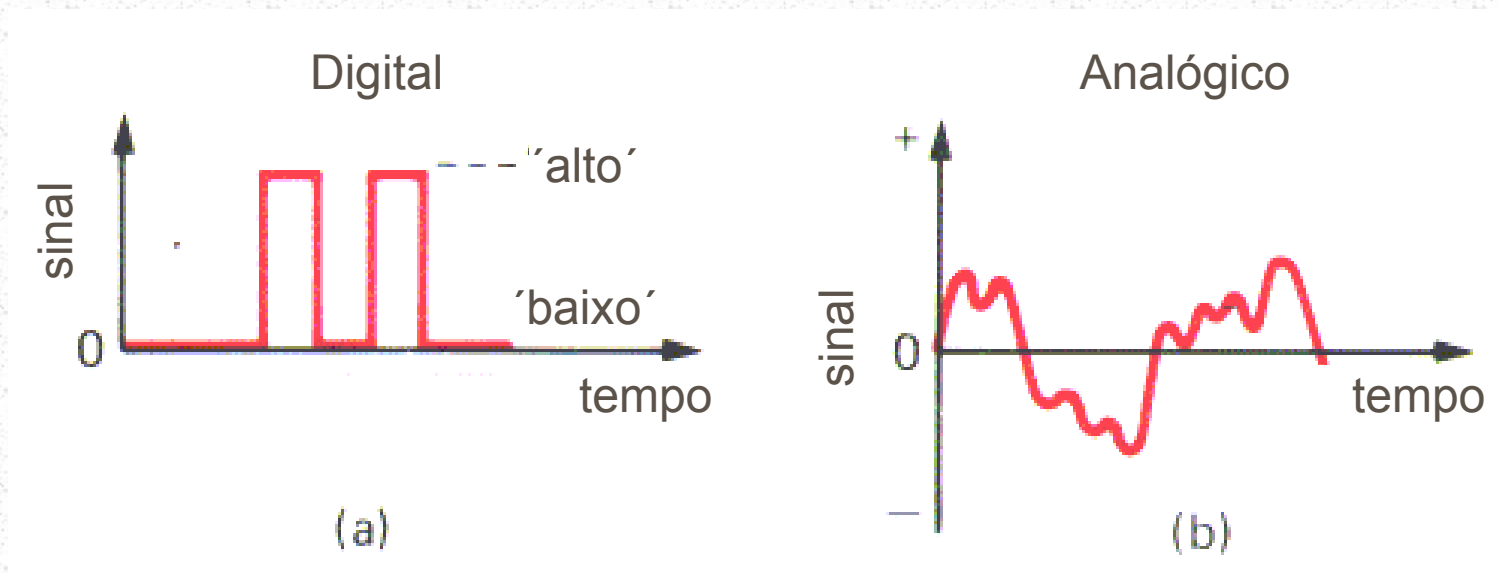
Para fazer $V_{saida} = 0$,

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

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

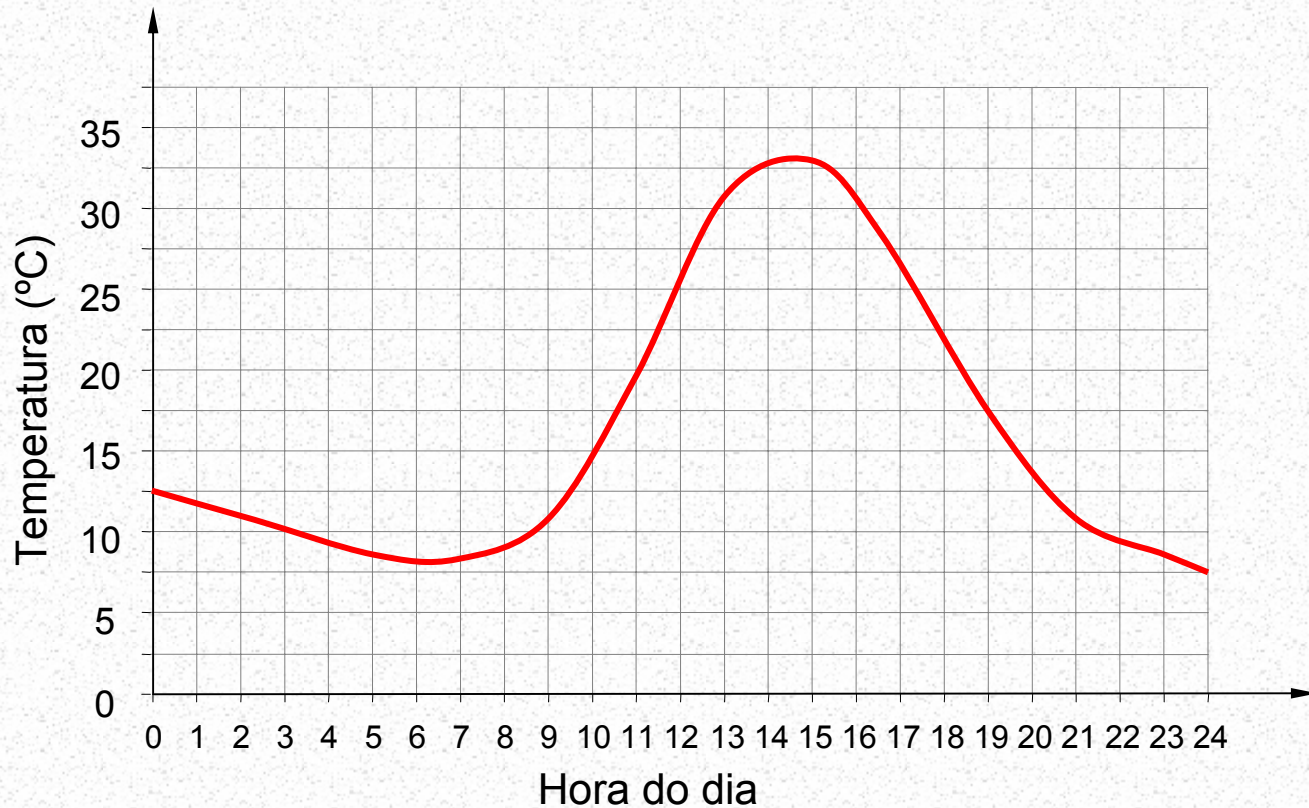
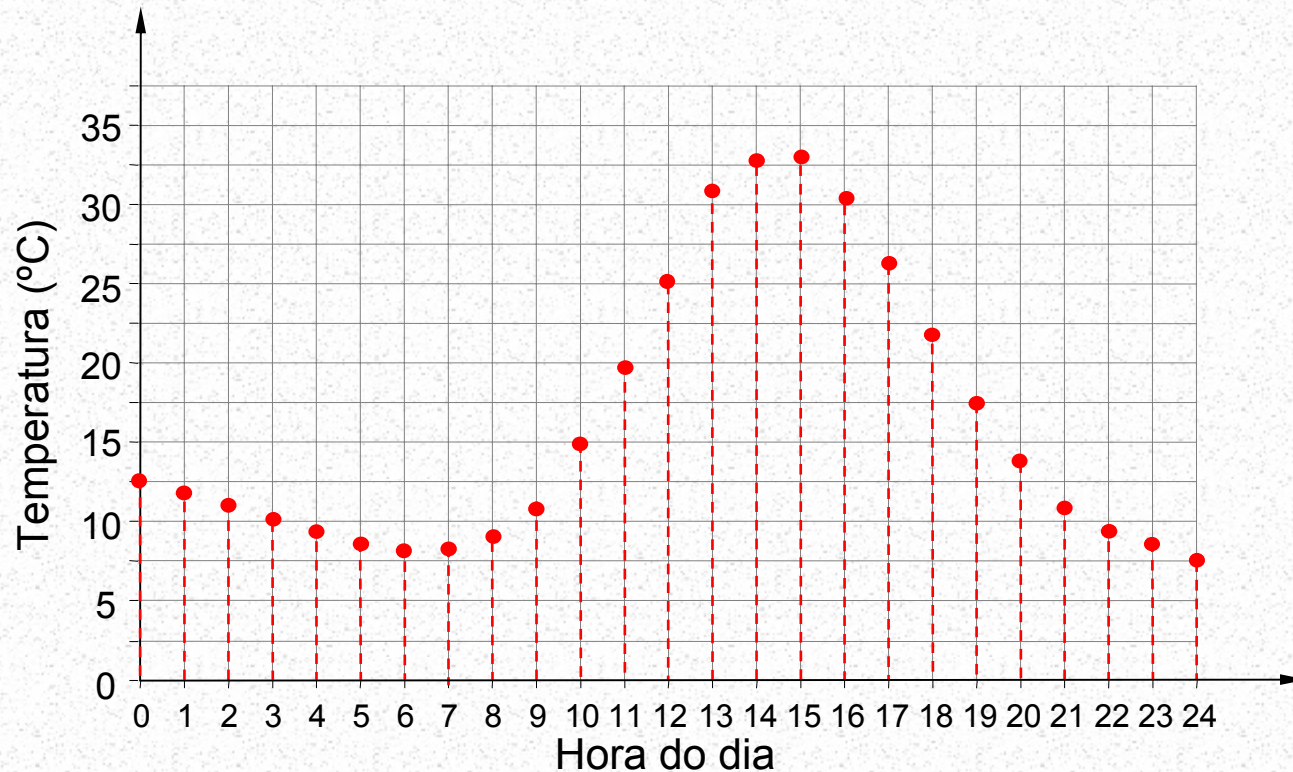


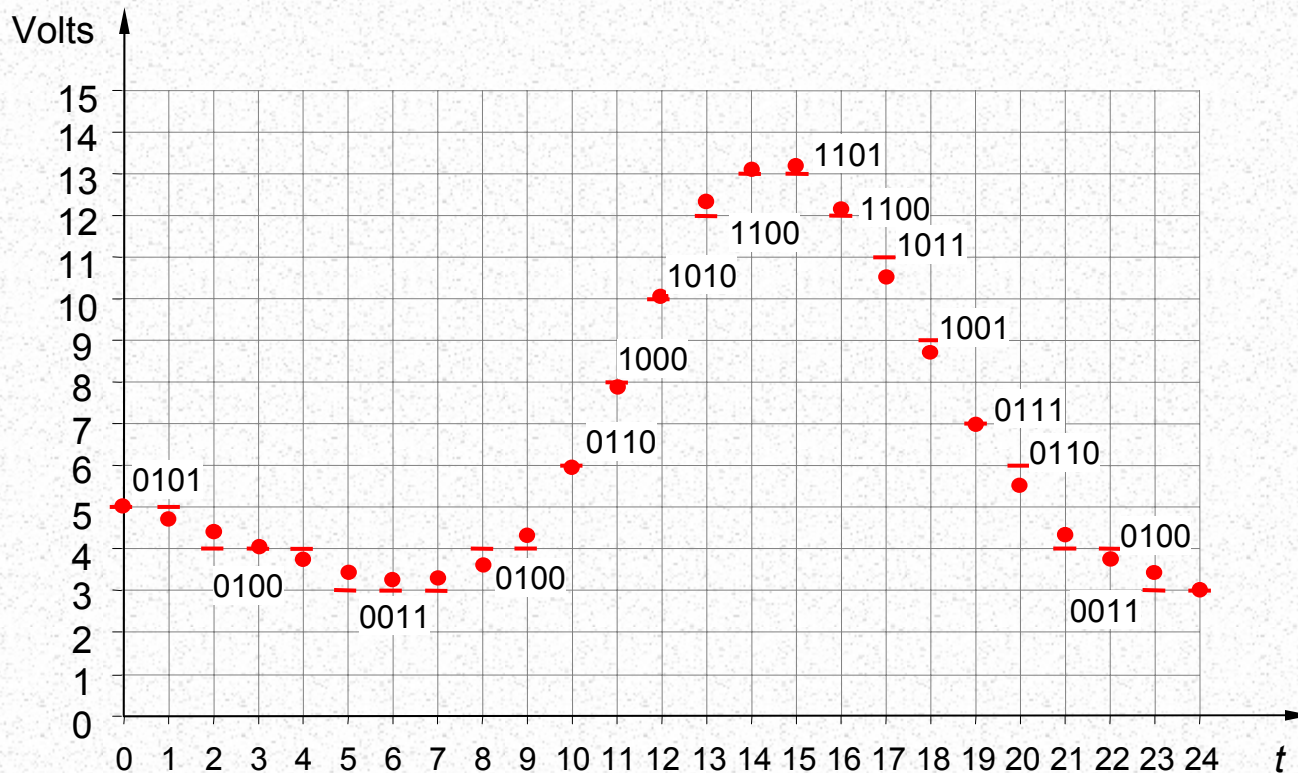
Gráfico de uma grandeza analógica (temperatura *versus* tempo)

■ Sinais analógicos e digitais



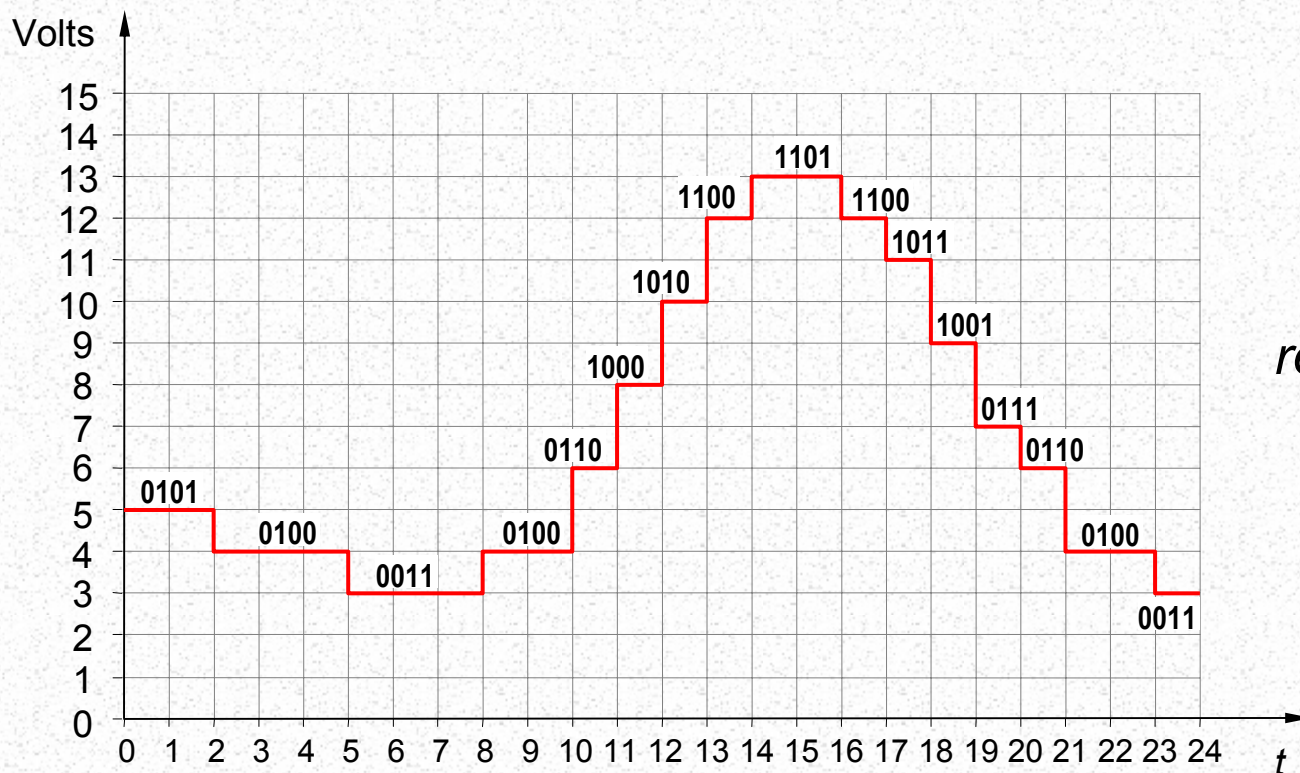
Valores amostrados da do sinal analógico. Cada ponto pode agora ser digitalizado (representado pela palavra de um código binário)

■ Sinais analógicos e digitais



Representação digital dos pontos resultantes da discretização de uma curva analógica

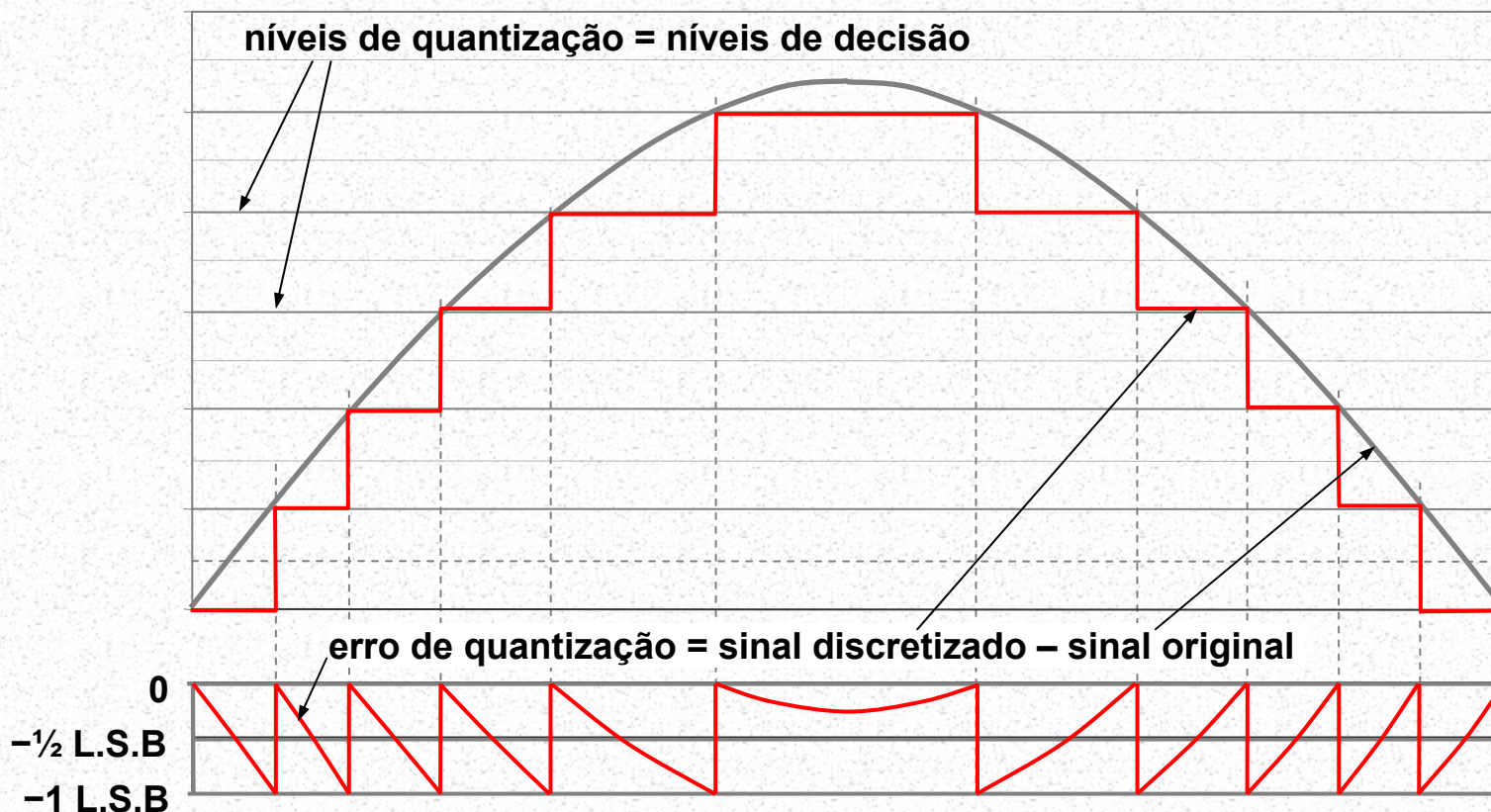
■ Sinais analógicos e digitais



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

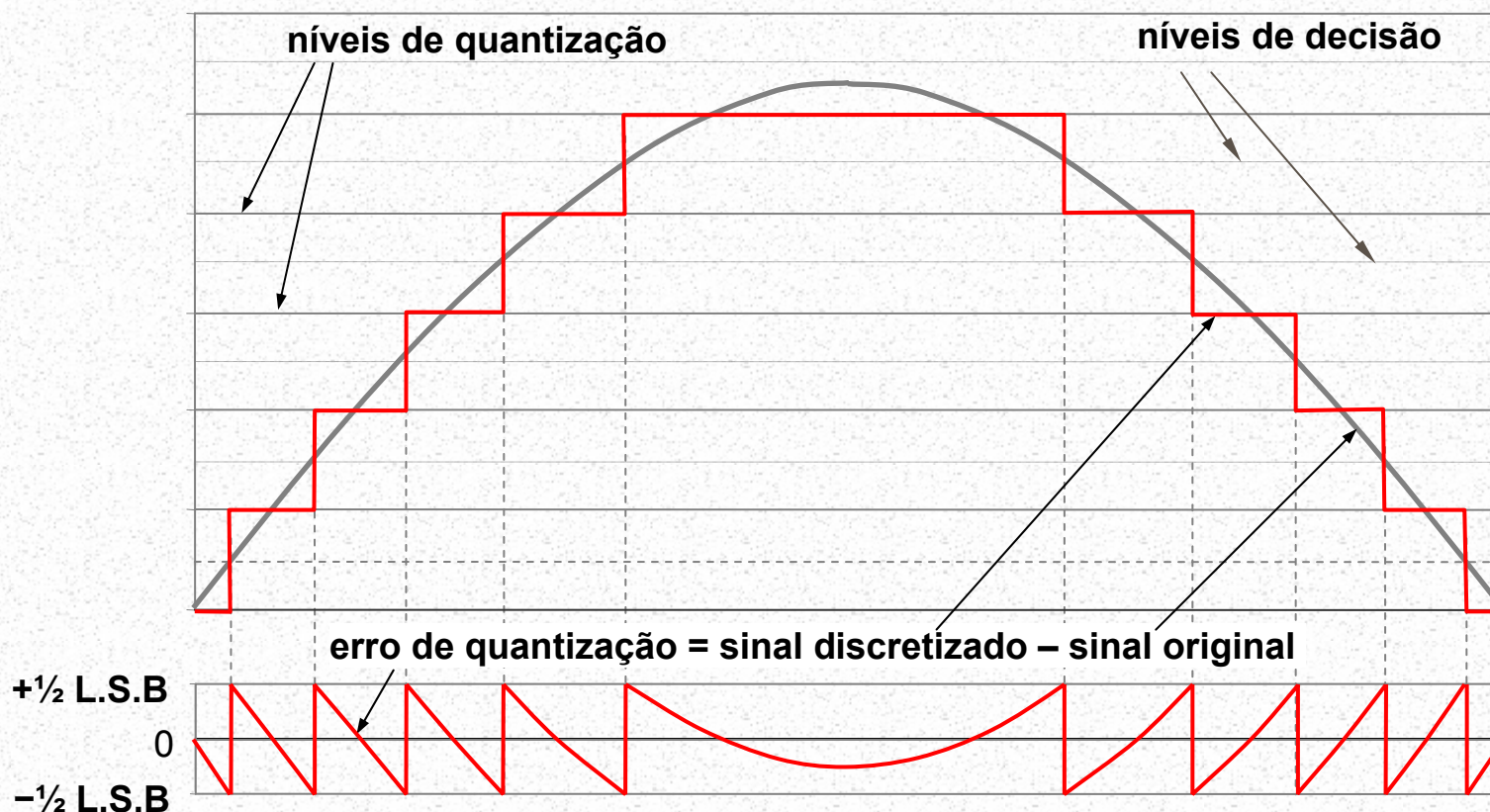
Reprodução digital da curva analógica

■ Sinais analógicos e digitais



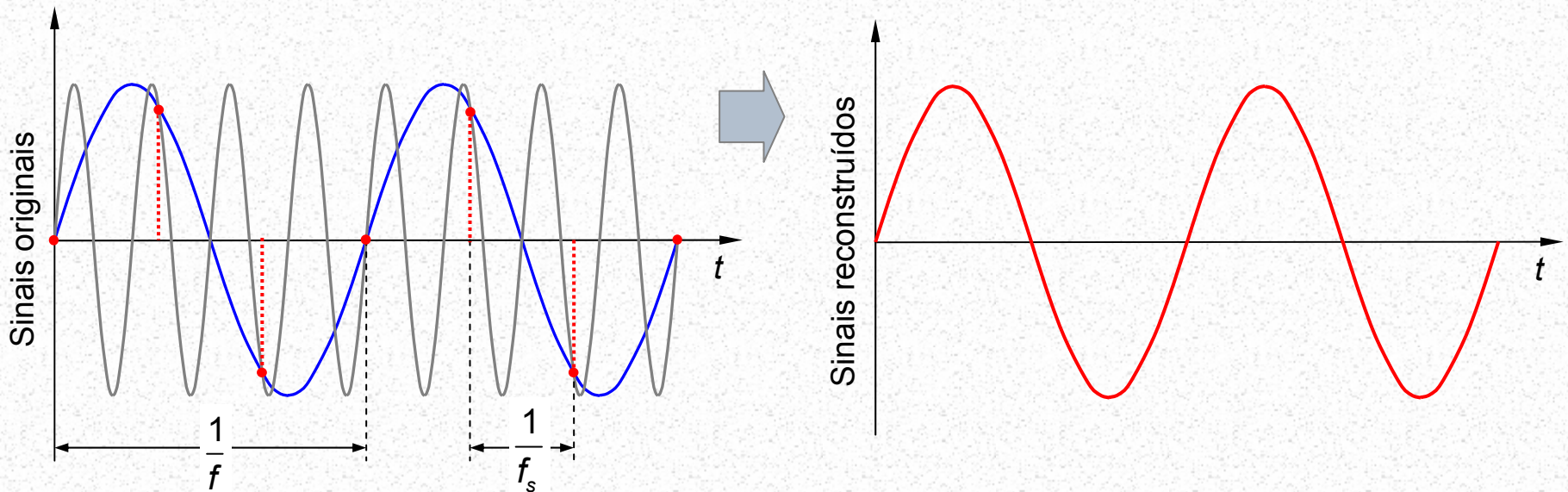
Erro de quantização para iguais níveis de discretização e decisão

■ Sinais analógicos e digitais



Erro de quantização para níveis de discretização e decisão distantes de $1/2$ L.S.B.

Teorema de *Nyquist*



$$f_s = 2 \times f$$



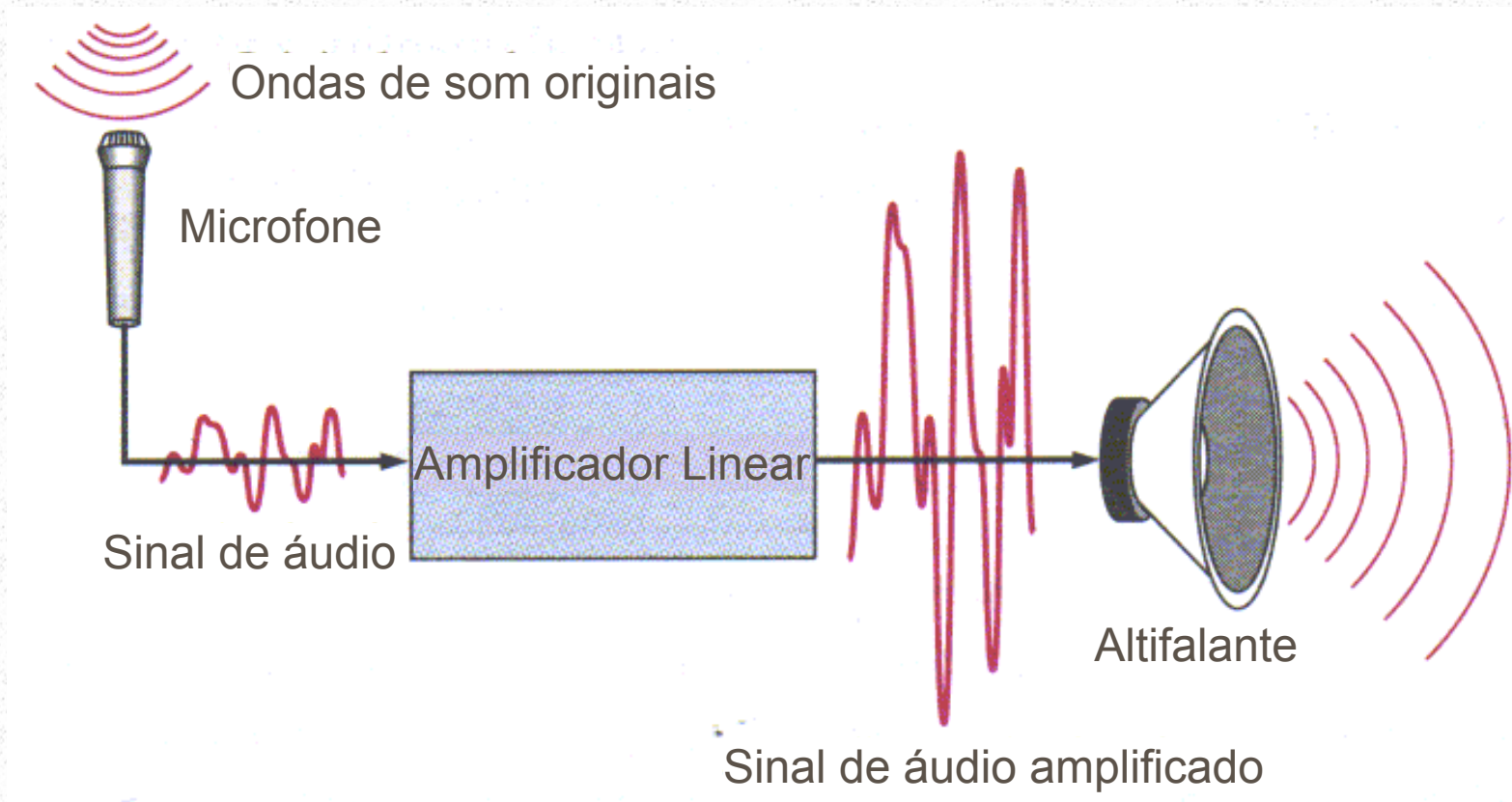
Outros Componentes e Subsistemas



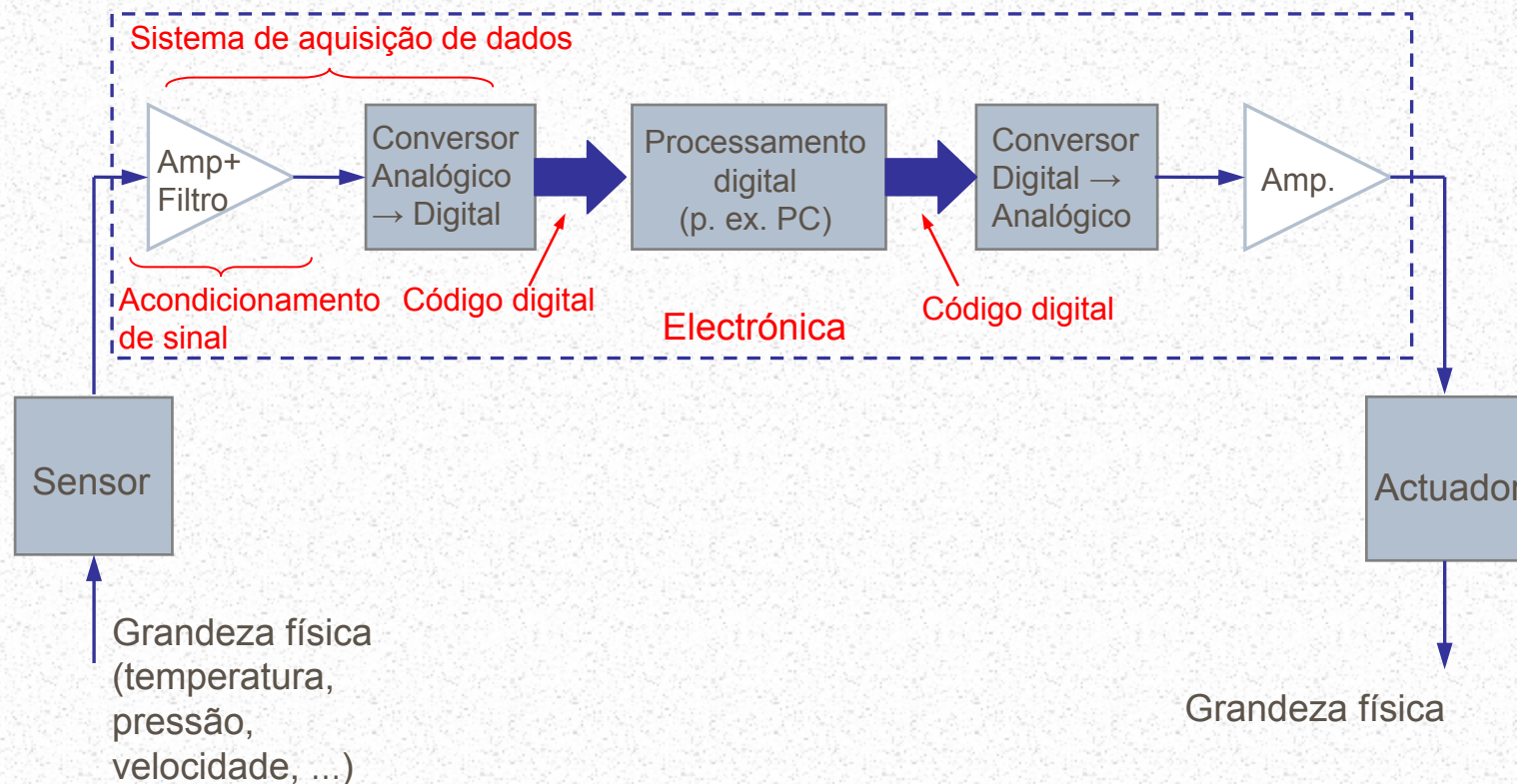
Escola de Engenharia
Universidade do Minho
Departamento de
Electrónica Industrial

Sinal	f_{\max}	f_s	nº de bits
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

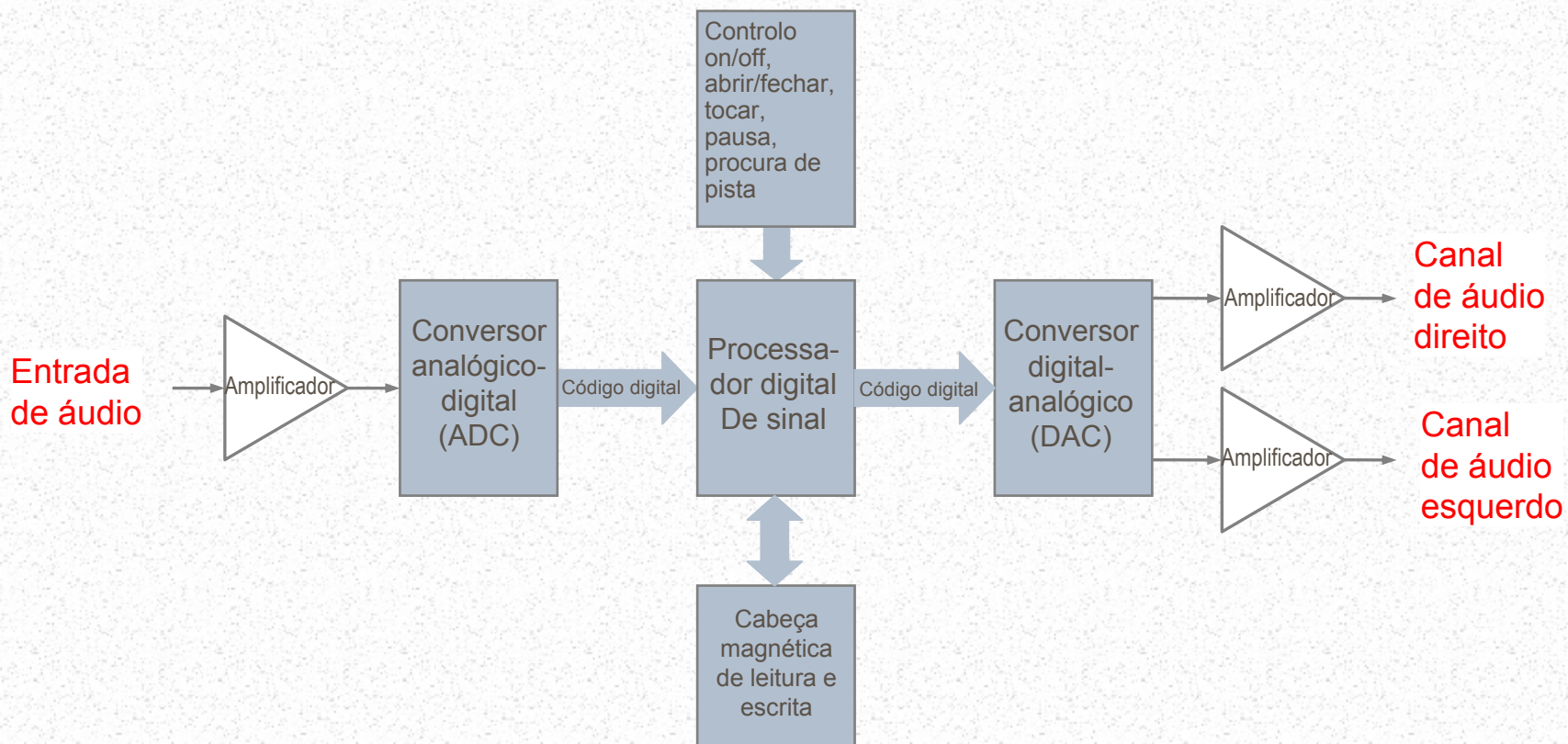
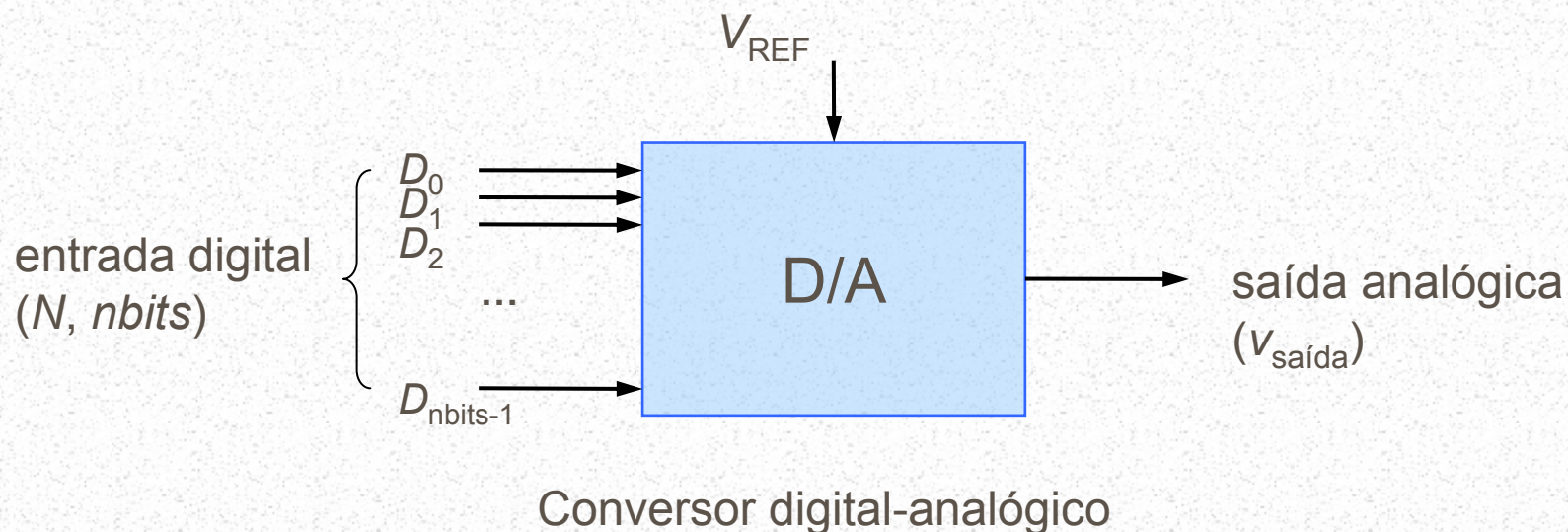
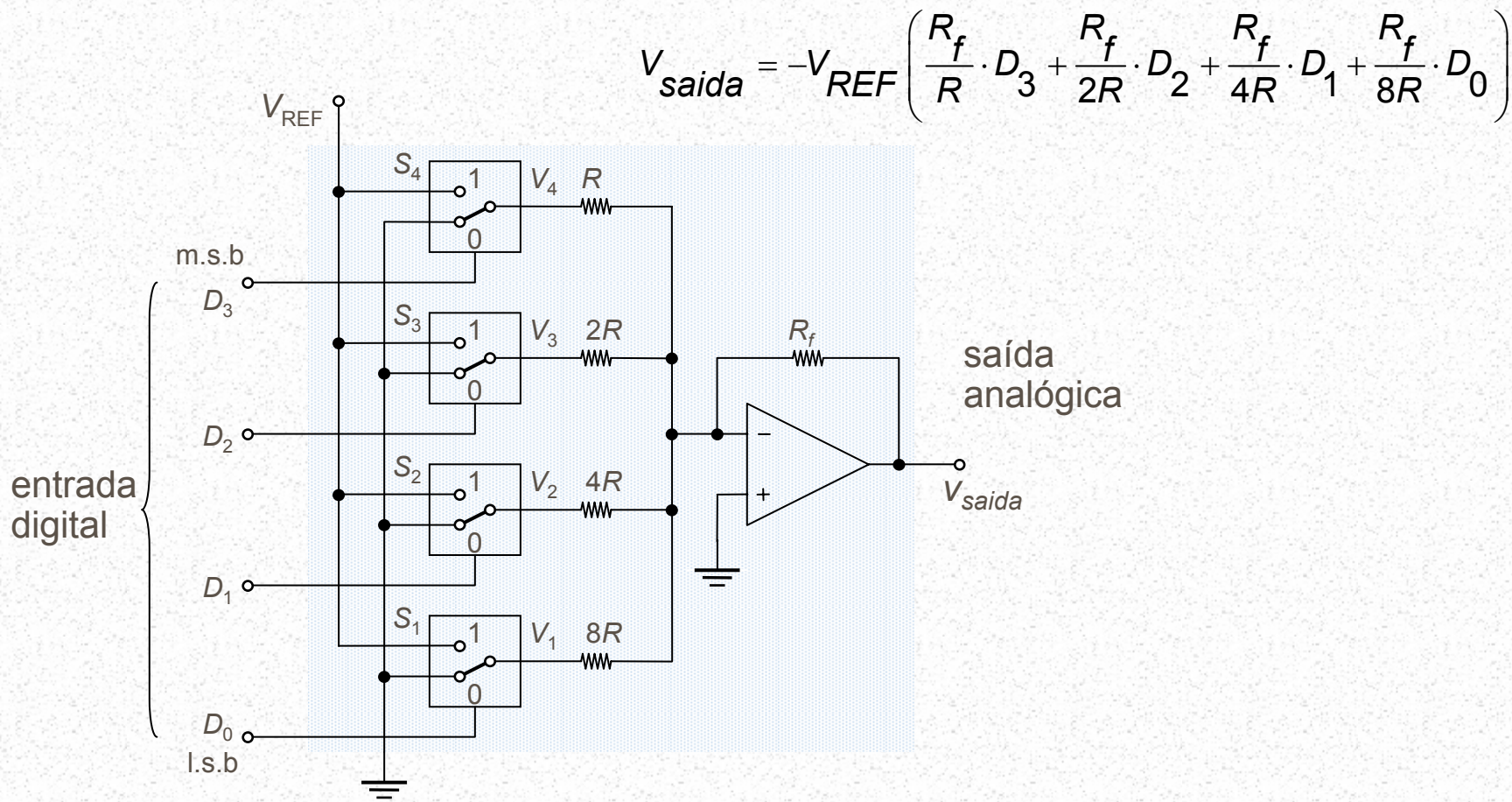


Diagrama de blocos de um sistema DAT (gravador de áudio digital)

■ Conversão digital → analógico

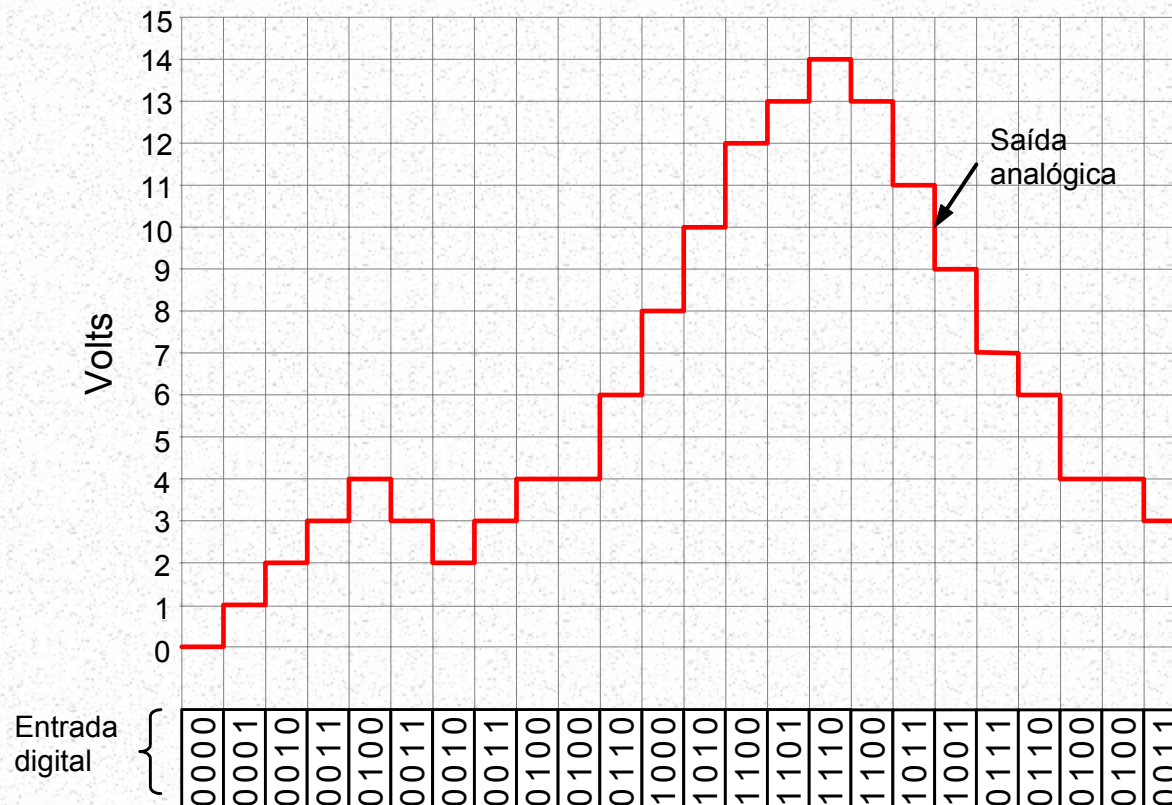


$$v_{saida} = \frac{V_{REF}}{2^{nbits} - 1} \cdot N$$



Conversor digital-analógico de 4 bits

■ Conversão digital → analógico

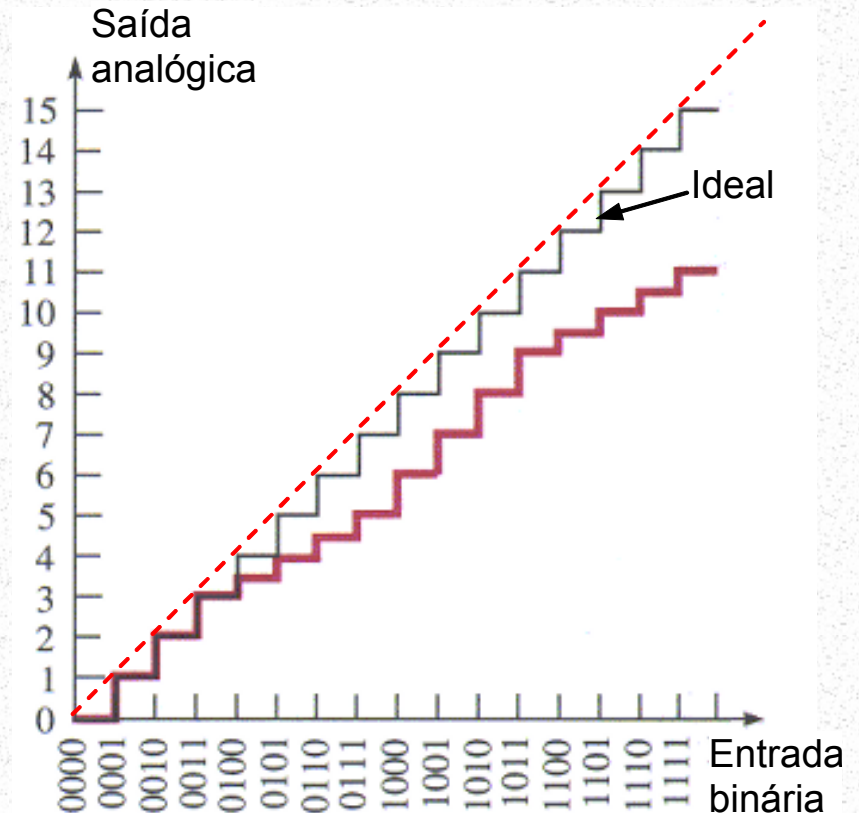


Saída de um conversor digital-analógico de 4 bits

■ Características de desempenho de conversores D/A

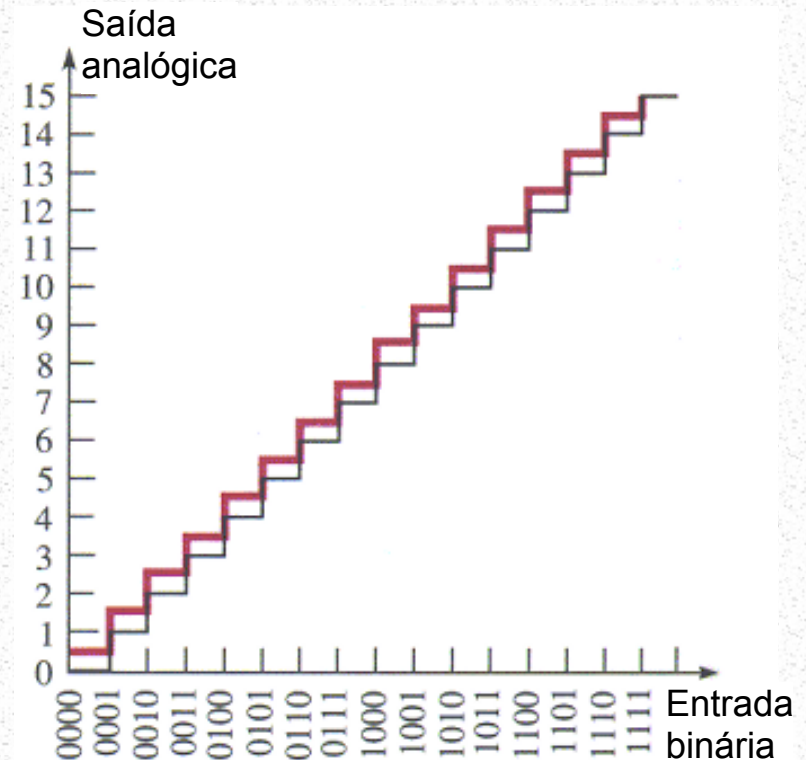
- **Resolução.** A resolução de um A/D é o inverso do número máximo de degraus da saída. Para um A/D de n bits a resolução referida à entrada é $1/(2^n-1)$. Referida à saída a resolução é $V_{REF}/(2^n-1)$, onde V_{REF} corresponde ao fim de escala do D/A. A resolução pode também exprimir-se através 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.



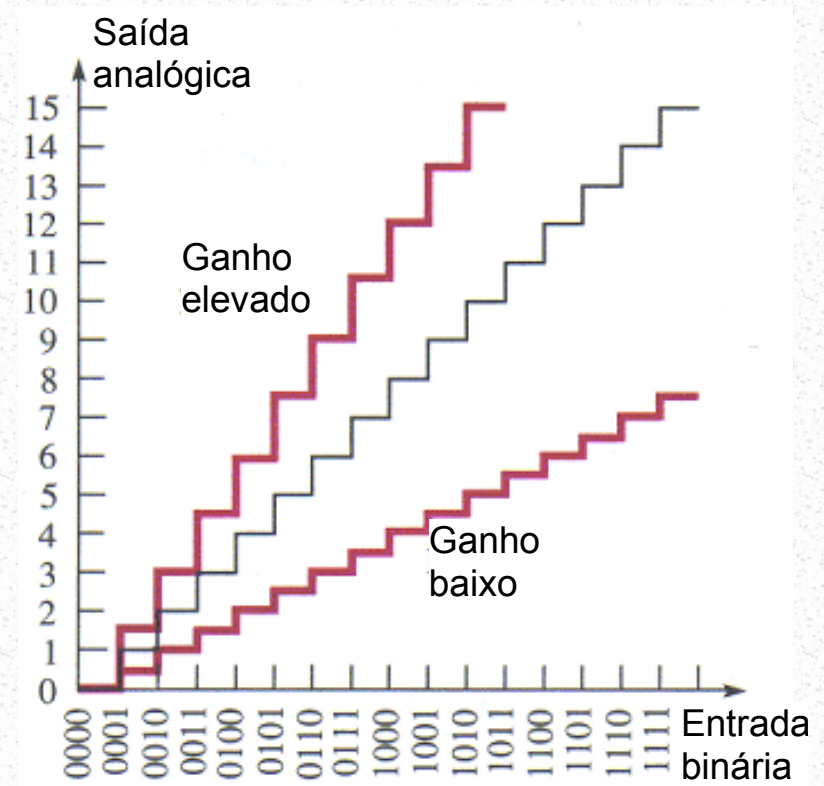
(a) Não-linearidade diferencial (a cor)

- **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)

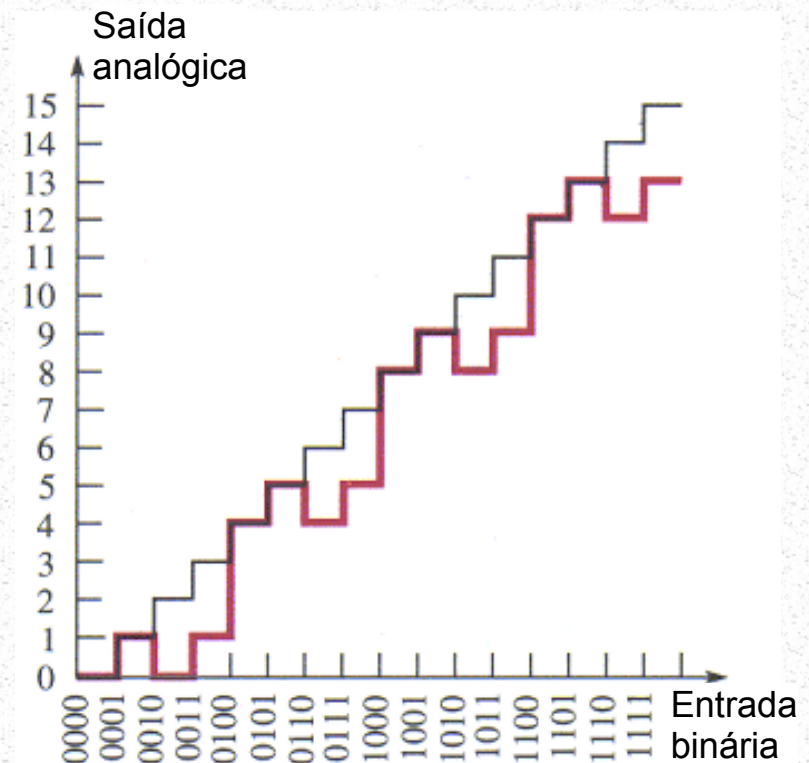
- **Características de desempenho de conversores D/A**
 - ***Ganho baixo ou elevado.*** A figura ilustra os erros introduzidos na saída como resultado de um ganho desajustado. No caso de um ganho baixo a amplitude dos degraus é inferior ao ideal. No caso de um ganho elevado a amplitude dos degraus é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



(c) Ganhos elevado e baixo (a cor)

■ Características de desempenho de conversores D/A

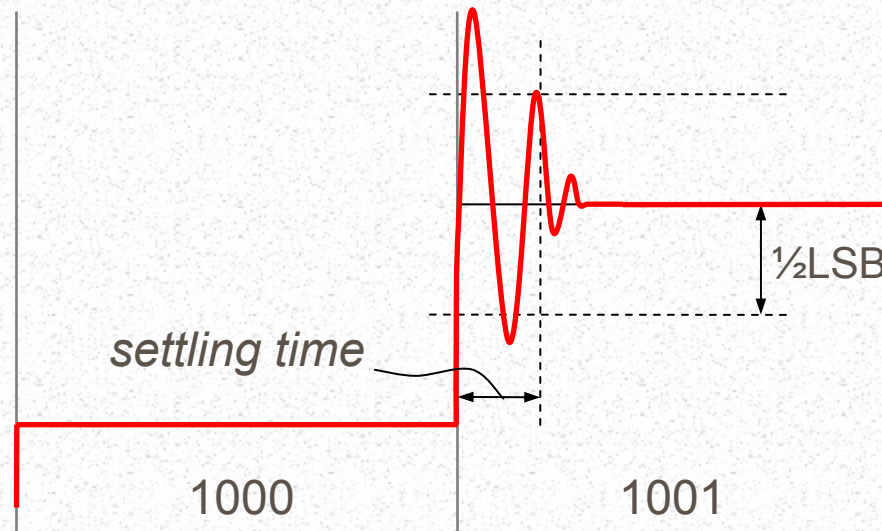
- **Monotonicidade.** Um D/A diz-se *monotónico* se, para uma sequência cobrindo toda a gama de entradas, a saída não apresenta nenhuma inversão de passos (figura 4.147 (d)).



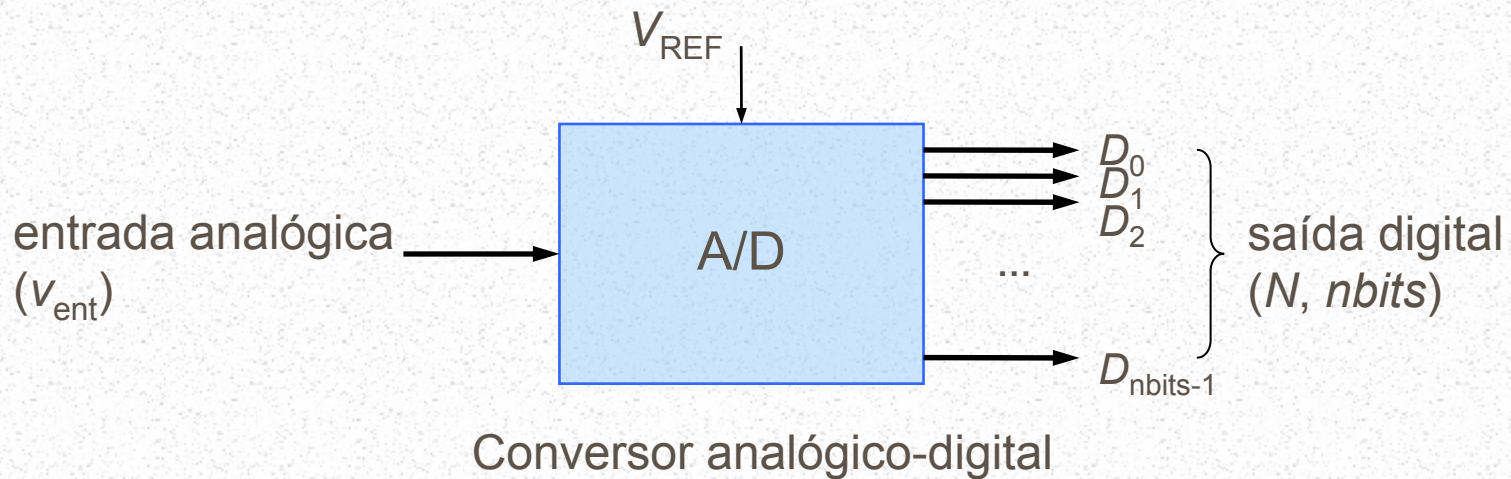
(d) Saída não-monotónica (a cor)

■ Características de desempenho de conversores D/A

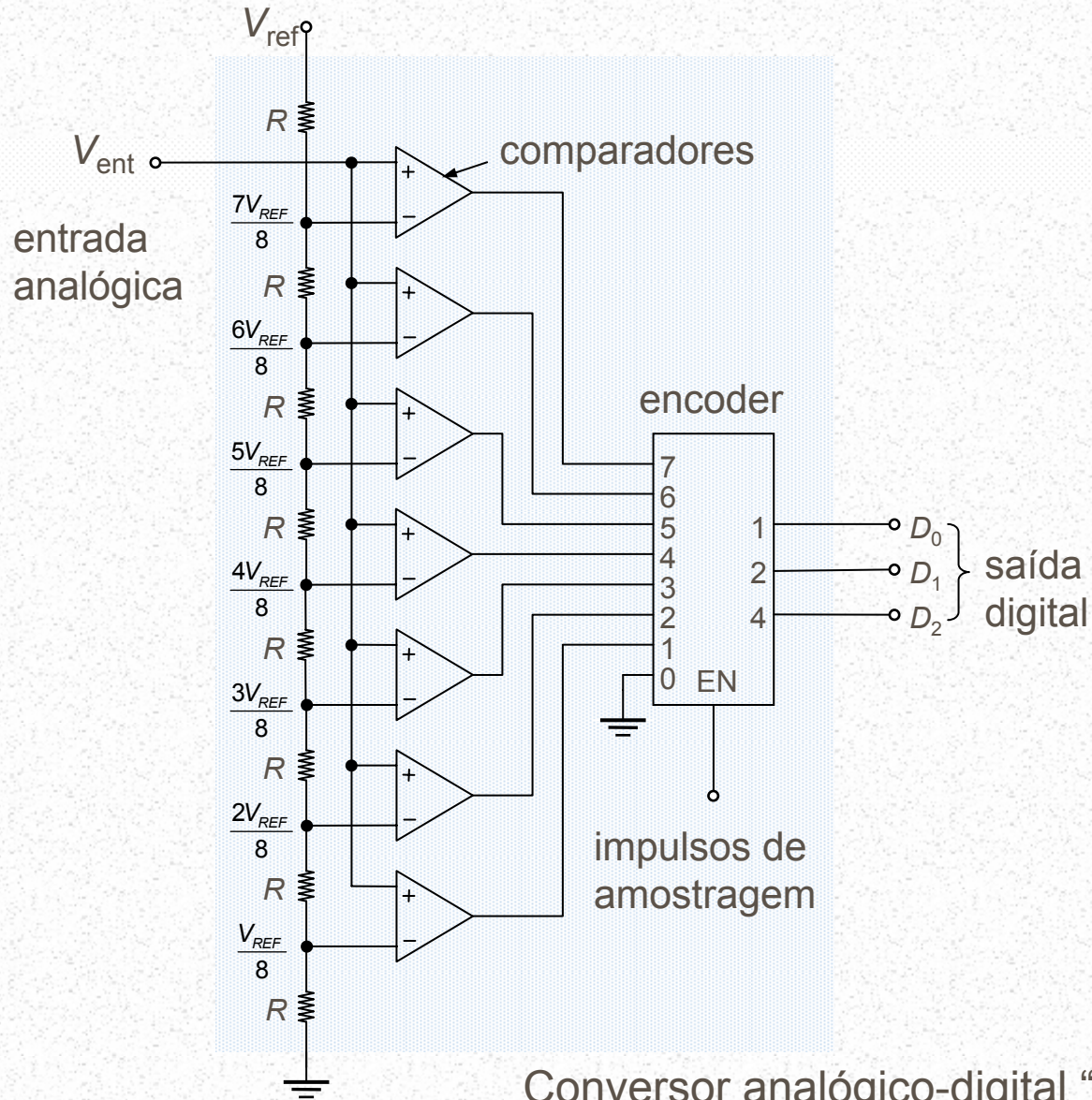
- **Settling time.** É o tempo que a saída do D/A demora a estabilizar dentro de uma gama correspondente a $\pm 1/2$ do LSB quando ocorre uma alteração na entrada (figura 4.148).



■ Conversão analógico → digital

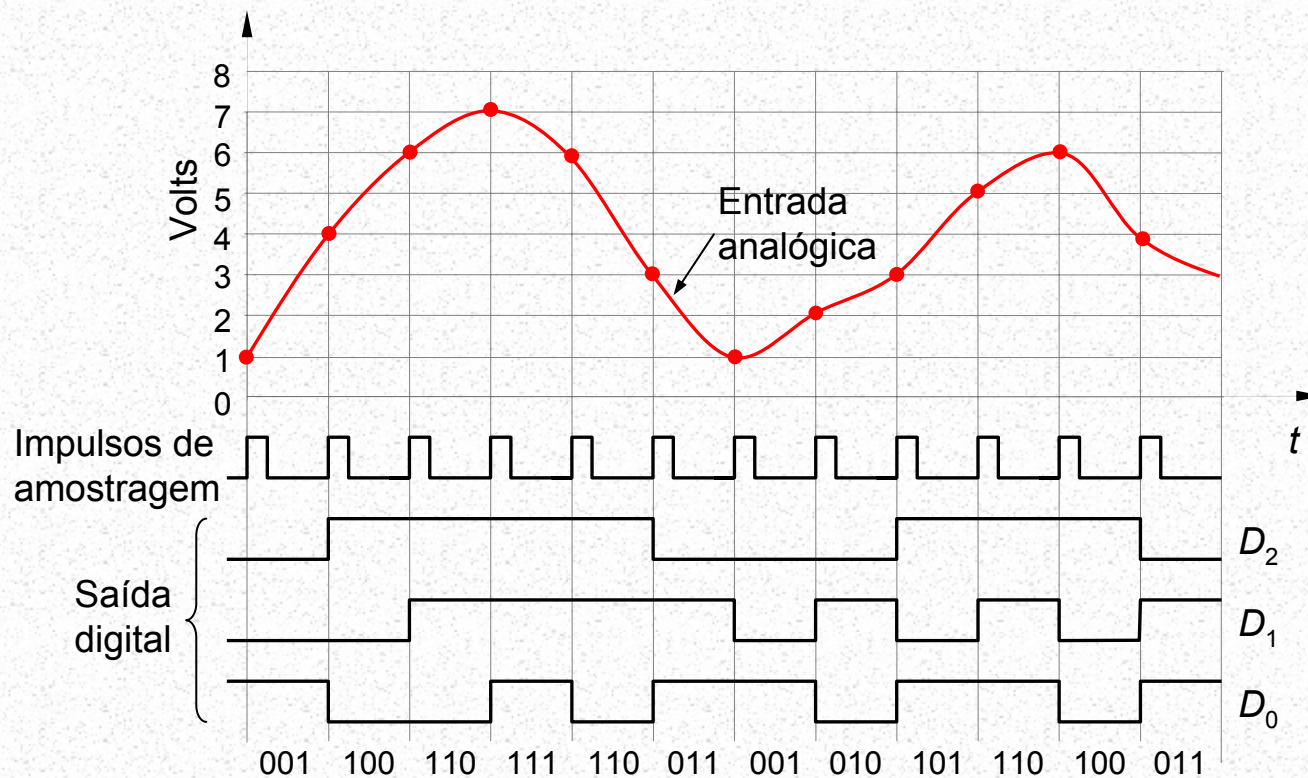


$$N = INT \left(\frac{2^{nbits} - 1}{V_{REF}} \cdot V_{ent} \right)$$



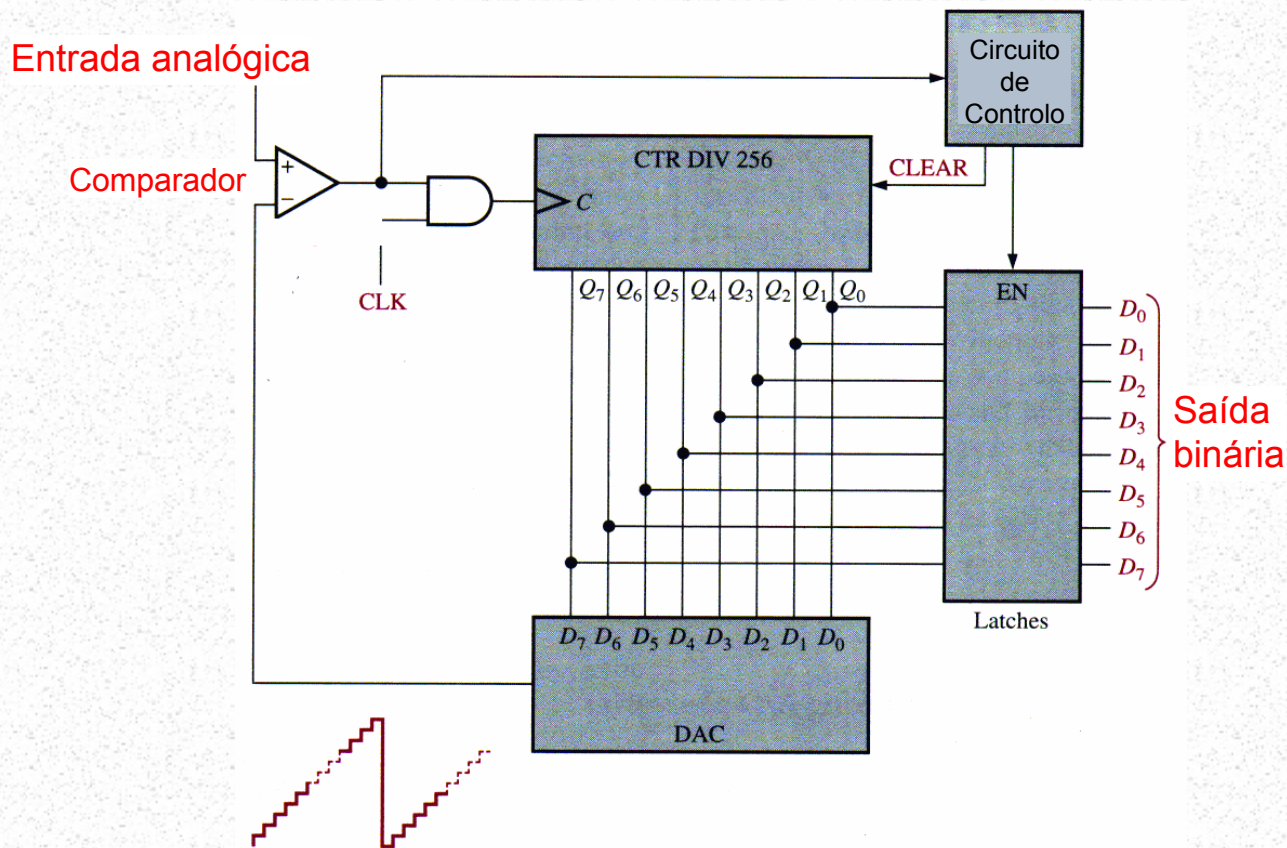
Conversor analógico-digital “flash” de 3 bits

■ Conversão analógico → digital



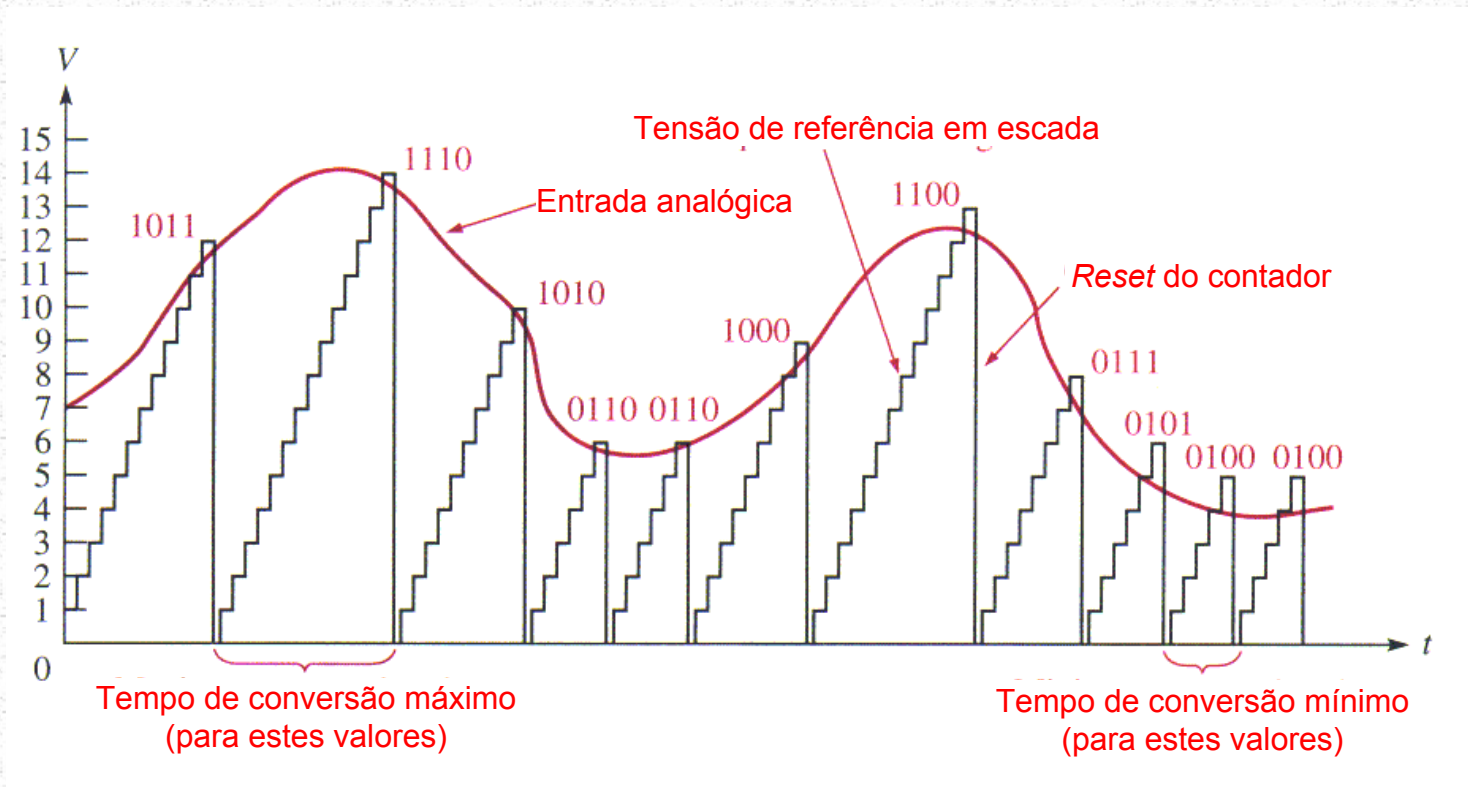
Conversor analógico-digital “flash” – formas de onda

■ Conversão analógico → digital



Conversor A/D de rampa digital

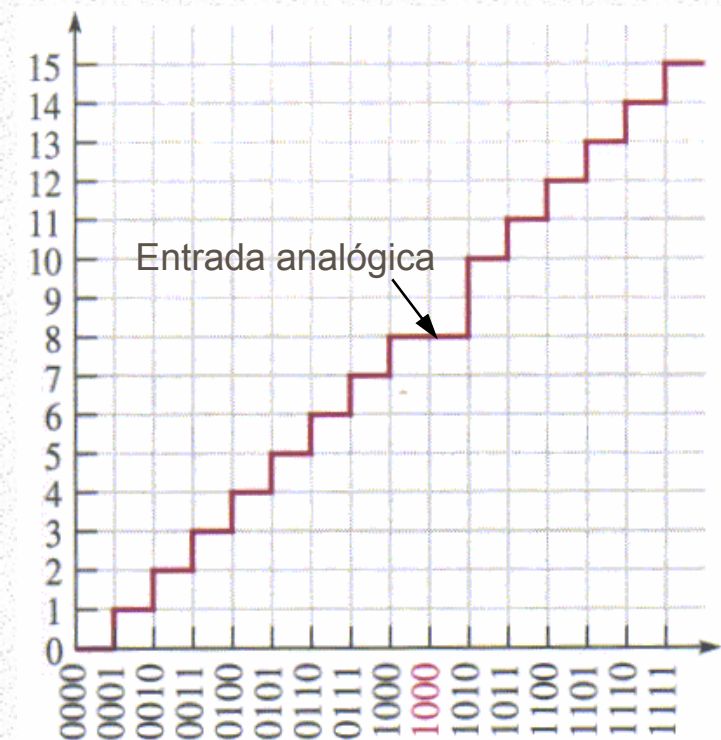
■ Conversão analógico → digital



Conversor A/D de rampa digital – formas de onda

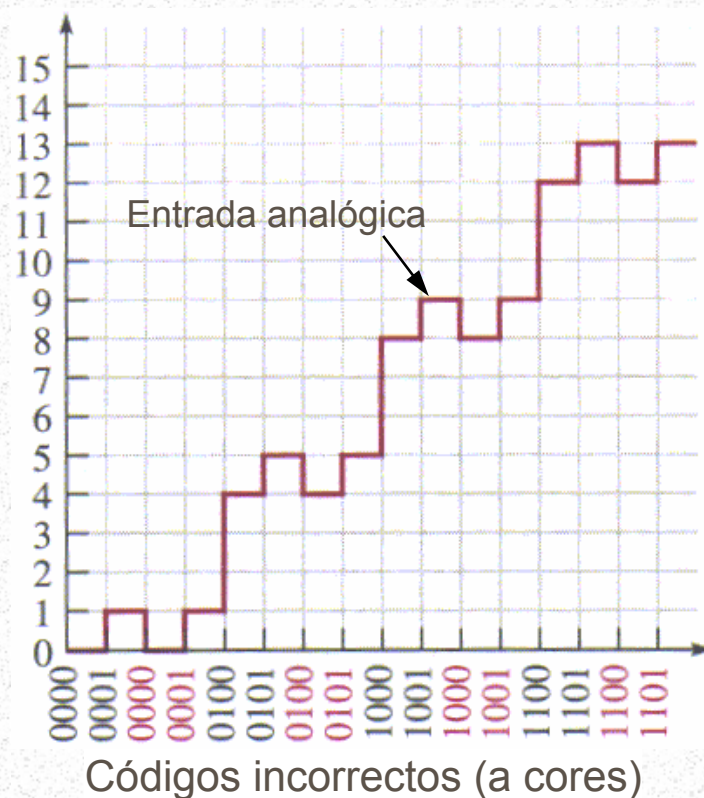
■ Características de desempenho de conversores A/D

- 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**



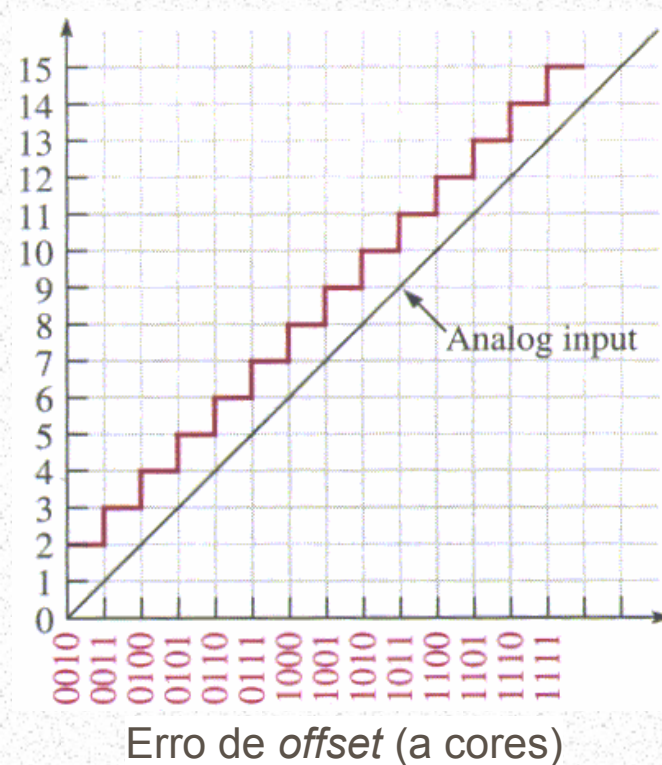
Falta de um código (a cores)

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

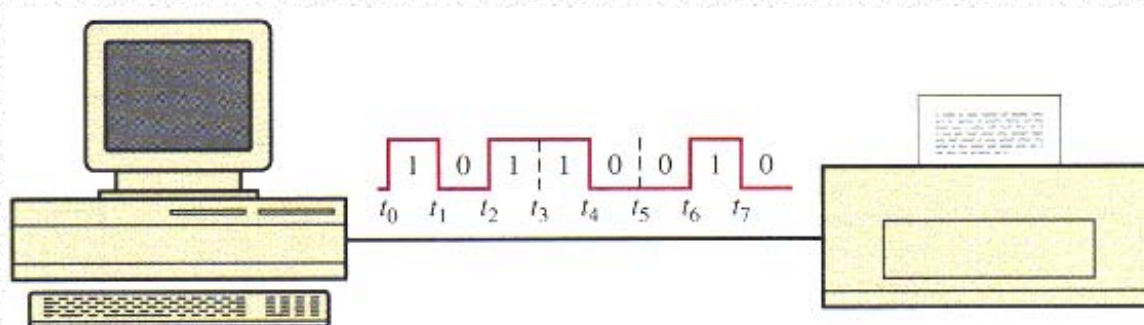


- **Características de desempenho de conversores A/D**
 - **Erro de *offset***
 - **Tempo de conversão.** É o tempo (t_c) necessário para converter para binário uma amostra do sinal de entrada.
Note-se que a frequência de amostragem (f_s) deverá ser sempre,

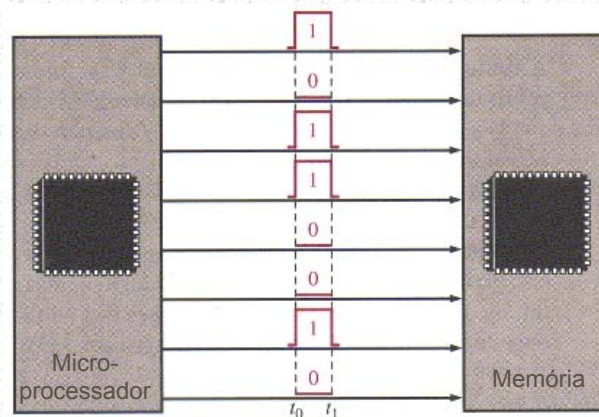
$$f_s \leq \frac{1}{t_c}$$



■ Conversão série ↔ paralelo

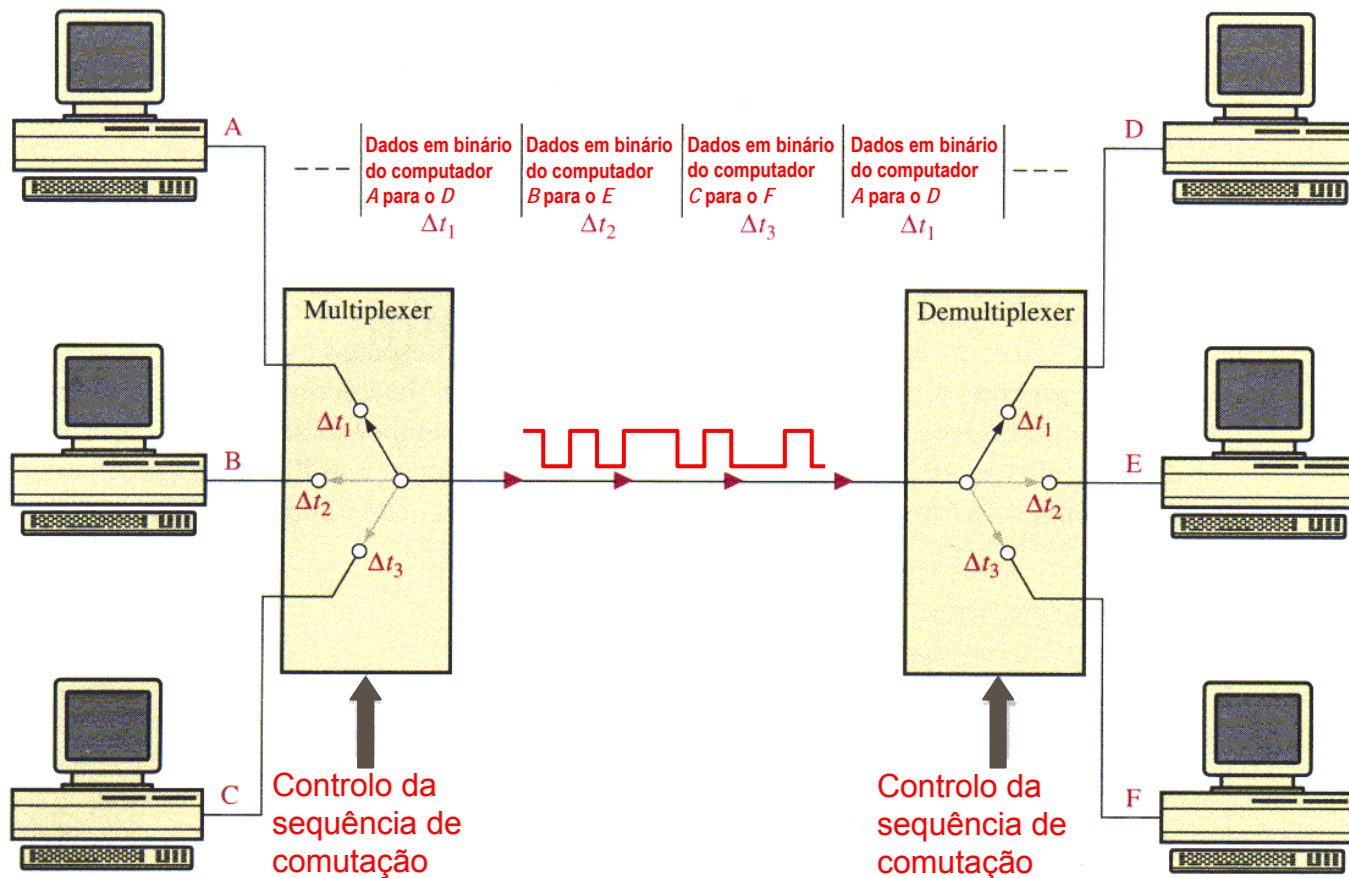


(Transferência de dados binários em série do computador para a impressora)



Transferência de dados binários em paralelo do microprocessador para a memória

■ Multiplexers digitais



■ Multiplexers analógicos

