

SENSORES E ACTUADORES

J.R.Azinheira

Nov 2008

*Bibliografia: Sensores e Actuadores, J.R. Azinheira, 2002, IST-DEM
(disponível na página da UC em 'Material de Apoio' -> 'Bibliografia Complementar')*

ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

Sensores a Actuadores

Monitorização e Controlo

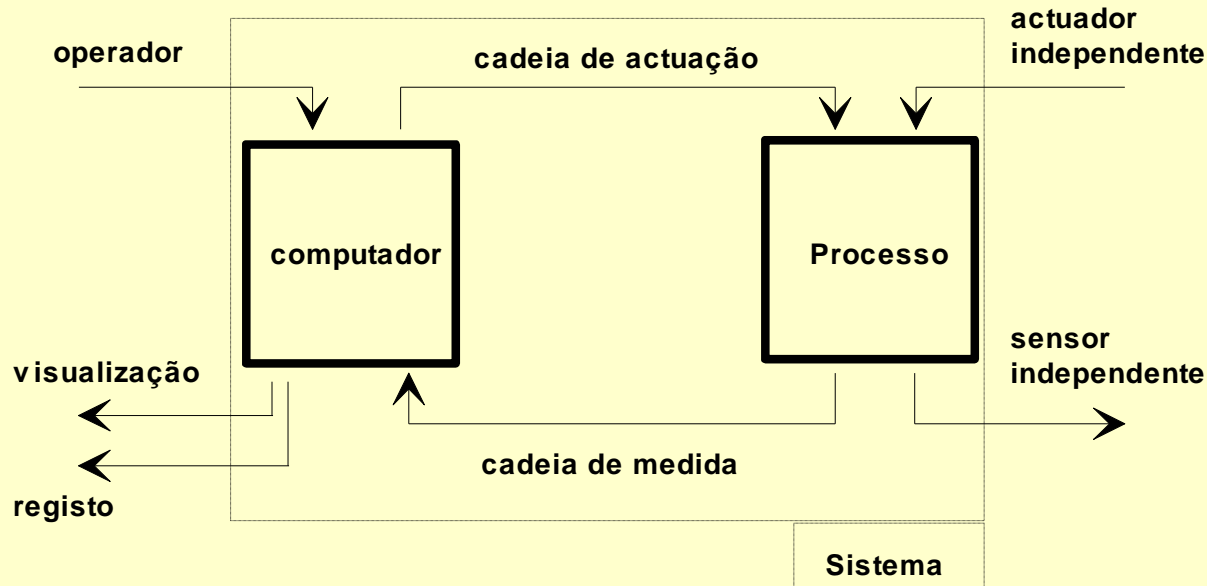


fig. um processo automatizado

- Cadeia de medida: informações sobre o processo
- Cadeia de actuação: ordens de controlo

Cadeia de Medida e Actuação Seguindo o Sinal

- Cadeia de medida: sensor + CS + aquisição
- Cadeia de actuação: energia + CS + actuação

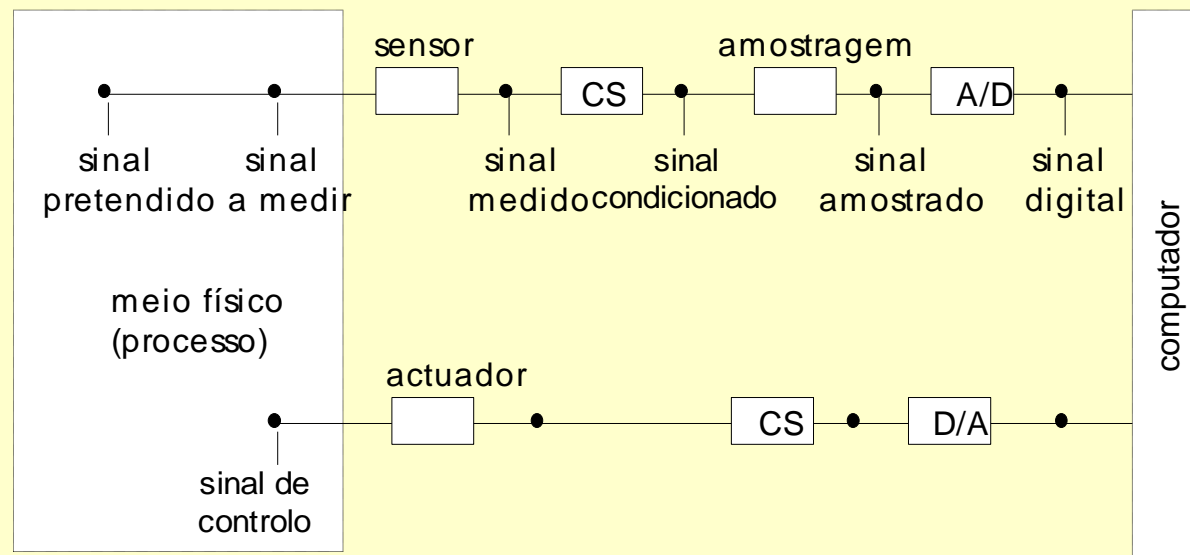


fig. cadeias de medida e de actuação

ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

Cadeia de Medida índice

- Instrumentação
 - definições
 - erros
- Condicionamento de Sinal analógico
 - Amplificador Operacional
 - Circuitos de base
 - Filtros
- Aquisição e sinal digital
- Exemplo

Instrumentação

Definições

- medir : atribuir a uma grandeza física um valor numérico x_m usando uma escala adequada (unidade).
- o valor exacto (x_e): fornecido por um instrumento ideal.
- o erro : diferença entre valor medido e valor exacto :
 - erro absoluto, na unidade da medida: $e_{abs} = x_m - x_e$
 - erro relativo, geralmente em percentagem: $e_{rel} = \frac{e_{abs}}{x_e} \approx \frac{e_{abs}}{x_m}$
 - erro (relativo ao) fim-de-escala, em percentagem: $e_{fe} = \frac{e_{abs}}{x_{max}}$
- gama de medida : mínimo e máximo medíveis.
- exactidão ou precisão : majorante do erro absoluto/relativo.
- a resolução : menor variação detectada

Instrumentação

Definições

- a sensibilidade ou factor de escala : relação entre uma variação à entrada e variação da medida.
- repetibilidade e reproducibilidade :
 - a mesma medição, nas mesmas condições fornece o mesmo valor;
 - outra medição, com outro princípio, fornece o mesmo valor;
- calibração :
 - determinação experimental da relação valor exacto-valor medido
 - verificação da sua precisão e da sua fiabilidade
 - > o valor exacto é determinado com o apoio de um instrumento de precisão superior garantida.

Instrumentação

erros

$$|x - \langle x \rangle| < 2\sigma \quad 95\%$$

- erros aleatórios e sistemáticos

- aleatórios: diferentes para cada medição (estatística)

- sistemáticos: repetem-se

 - má utilização do sensor*

 - modelo errado*

 - factores externos*

 - não linearidade*

 - aquecimento*

- erros estáticos ou dinâmicos

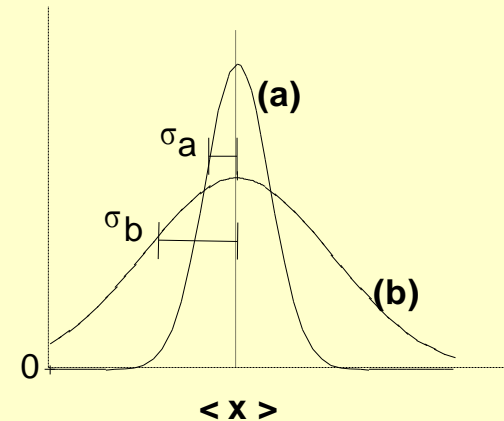
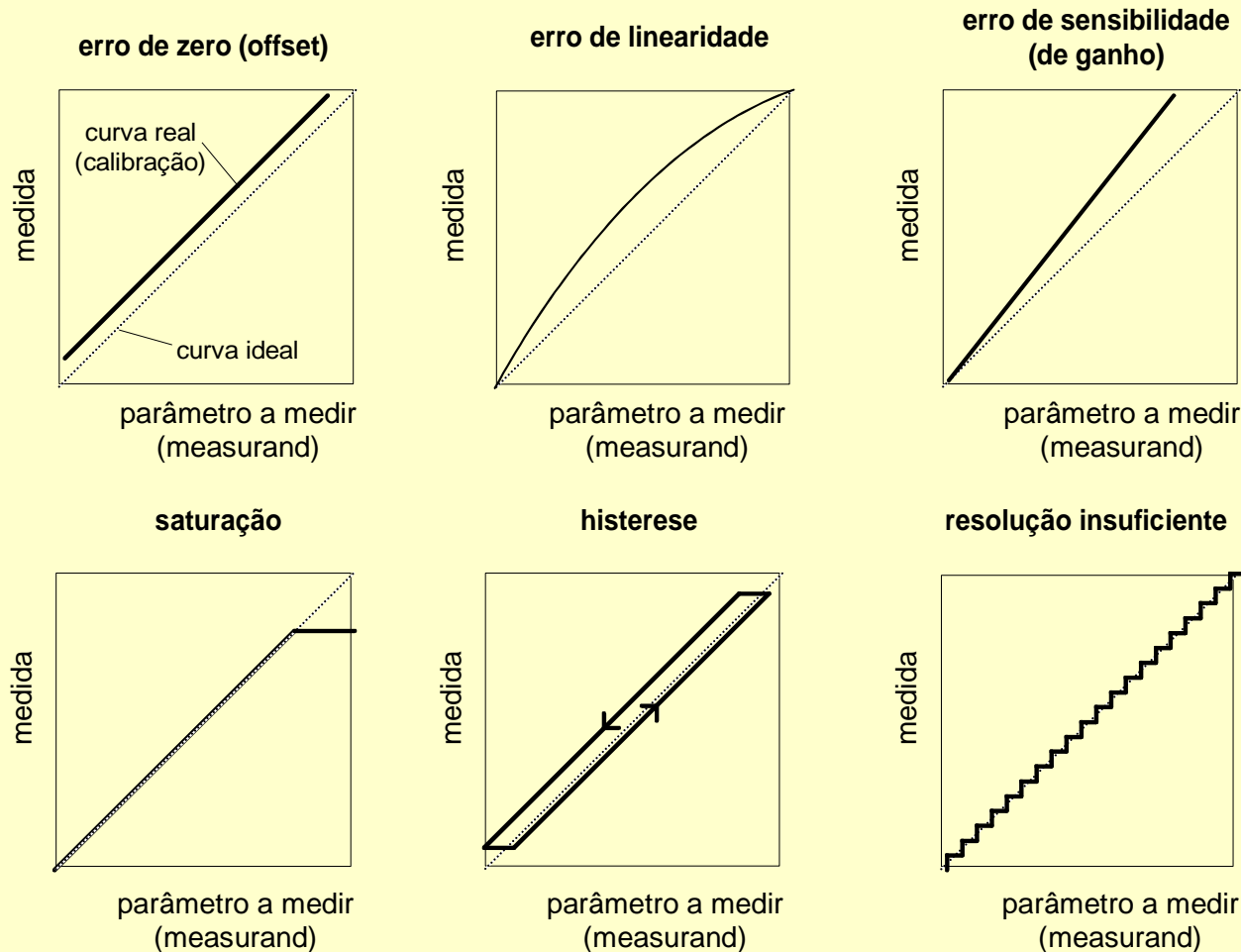


fig. distribuições gaussianas de erros aleatórios

Instrumentação

erros sistemáticos típicos



Condicionamento do Sinal analógico

- objetivos:
 - correcção do nível (amplificar/atenuar)
 - conversão entre grandezas (I/V, V/ Ω , F/V)
 - operações com sinais (soma/subtração)
 - filtragem
- circuitos passivos
 - componentes R/L/C unicamente
- circuitos activos: recorrem também ao
Amplificador operacional (AmpOp)

Condicionamento de Sinal

AmpOp

Modelo do Amplificador Operacional

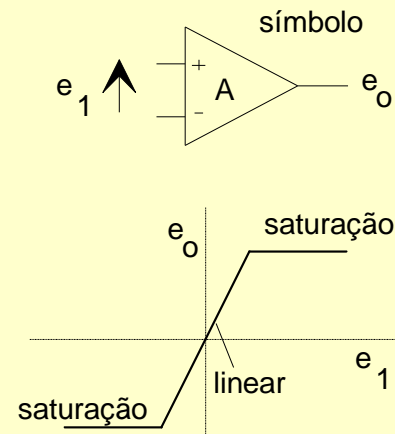
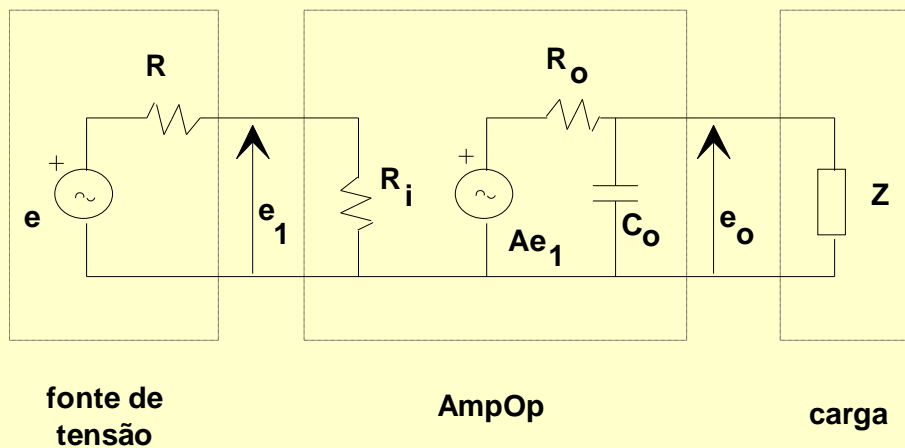


fig. o amplificador operacional

Aproximações do AmpOp ideal (na zona linear):

- resistência de entrada infinita
- ganho muito elevado

$$\begin{matrix} R_i \gg R \\ A \gg 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} i_+ \approx 0 \approx i_- \\ e_+ \approx e_- \end{cases}$$

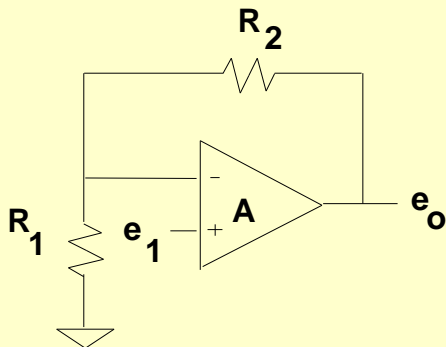
Condicionamento de Sinal

Circuitos de base com AmpOp

Circuitos amplificadores:

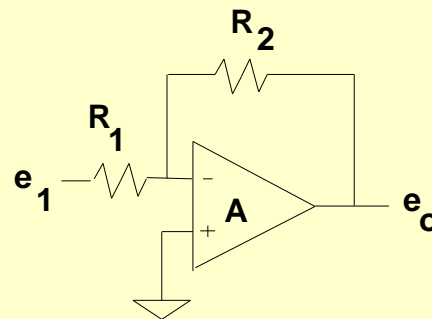
não inversor

$$e_o = e_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



inversor

$$e_o = -e_1 \frac{R_2}{R_1}$$



seguidor

$$e_o = e_1$$

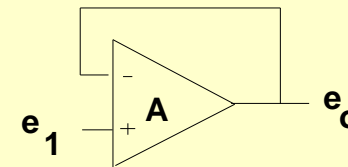
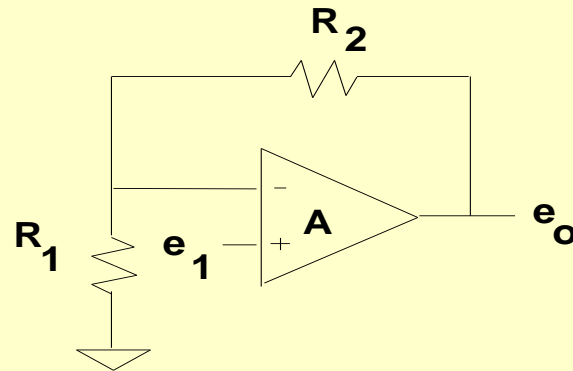


fig. configurações usuais com Amplificadores Operacionais

- o não inversor tem ganho >1
- o inversor tem ganho <0
- o seguidor permite isolar a entrada e a saída ($i=0$)

Condicionamento de Sinal

Exemplo : amplificador não inversor



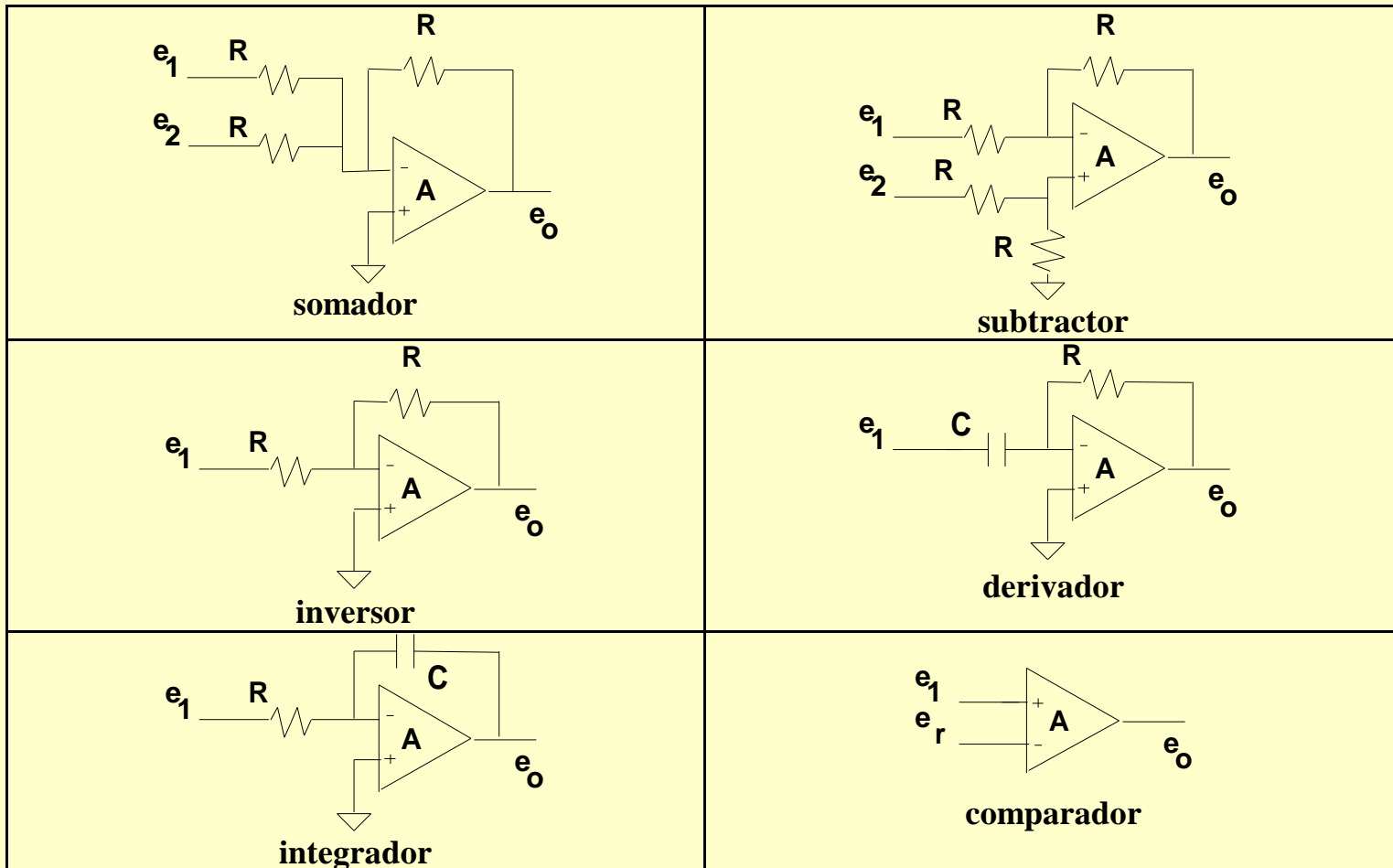
Com a aproximação do AmpOp ideal:

$$\begin{aligned}
 i_- = 0 & \Rightarrow i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{0 - e_1}{R_1} = \frac{e_1 - e_o}{R_2} \\
 e_1 = e_- & \\
 \Rightarrow e_o & = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) e_1
 \end{aligned}$$



Condicionamento de Sinal

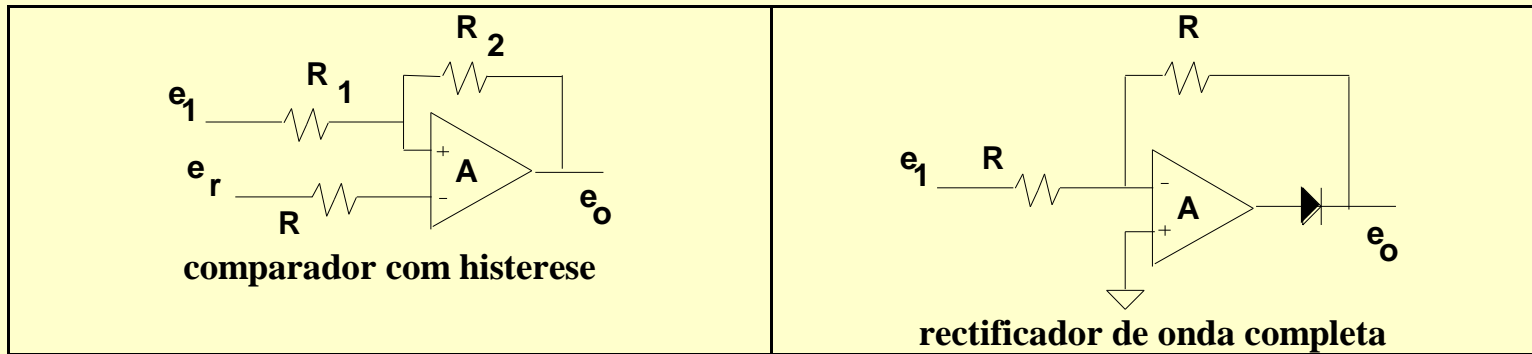
Mais circuitos com AmpOp



Condicionamento de Sinal

Circuitos não lineares

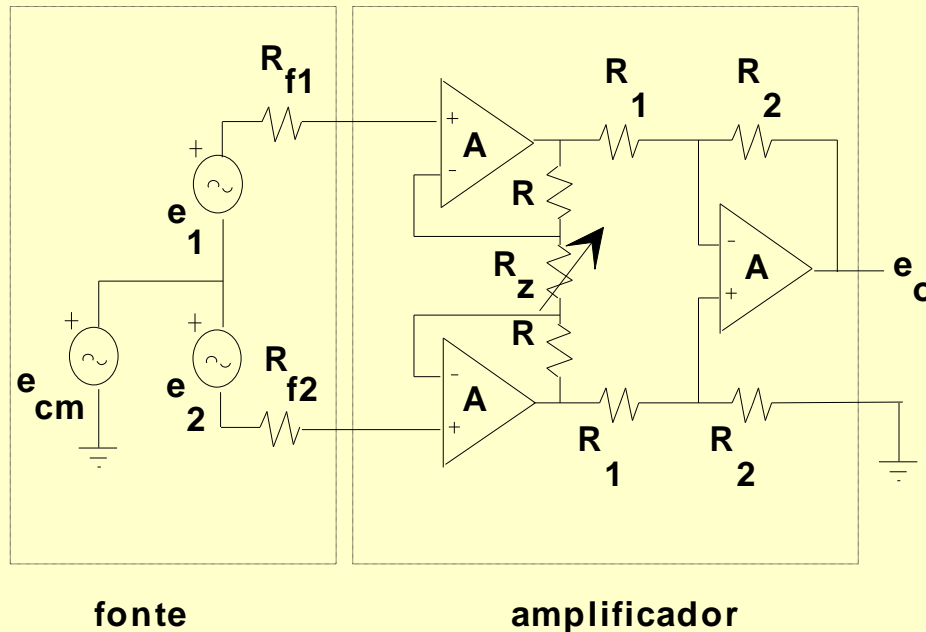
- Fora da zona linear ou com componente não linear



Condicionamento de Sinal

Amplificador de instrumentação

É um subtrator com ganho elevado



$$e_o = \left(1 + 2 \frac{R}{R_z}\right) \frac{R_2}{R_1} (e_2 - e_1)$$

fig. amplificador de instrumentação

Condicionamento de Sinal

Resposta em frequência do AmpOp

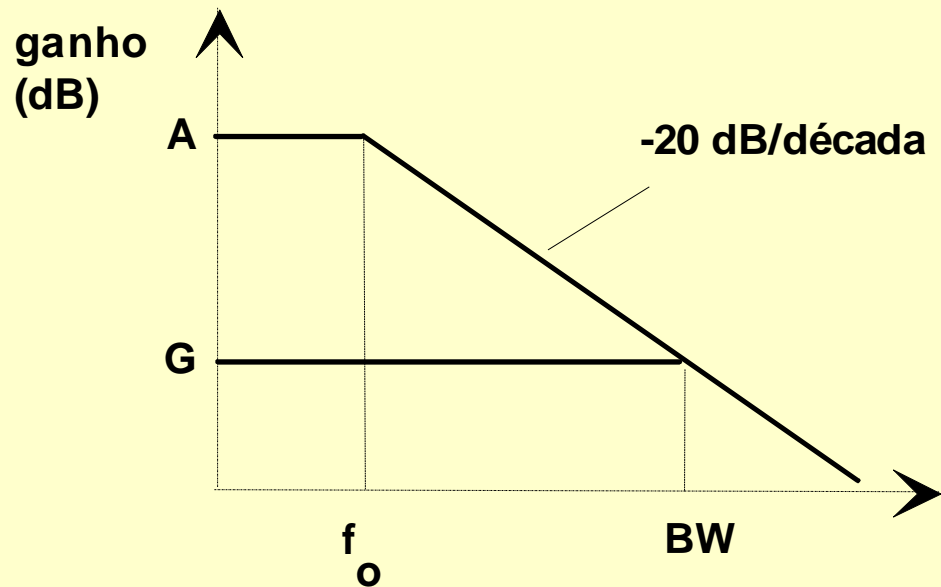


fig. largura de banda de um amplificador de tensão

Condicionamento de Sinal

Valores típicos do AmpOp

- elevada impedância de entrada Z_i (tip. $10^5..10^{14}\Omega$);
- reduzida impedância de saída Z_o ;
- ganho elevado e/ou ajustável (tip. $A \approx 10^6$; $G \approx 10^{-1}..10^3$);
- possível ajuste do zero (tip. $\pm 100\%$);
- largura de banda (tip. $GBW=10^6$);
- $CMRR \approx 60..120$ dB



Condicionamento de Sinal

Valores típicos do AmpOp

alguns exemplos de AmpOps

	LM741	LF356	LM312	LM324		
Vos	5	3	2	7	mV	= $ e_p - e_n $ para $e_o=0$
IB	500	0.03	1.5	45	nA	= $ i_p - i_n $ para $e_o=0$
GBW	1	5	1	1	MHz	
CMRR	90	100	100	85	dB	
"slew rate"	0.5	12	-	-	V/ μ s	= $ de_o/dt $ máximo
alimentação	$\pm 3.. \pm 22$	$\pm 15.. \pm 18$	$\pm 15.. \pm 18$	3..32	Vdc	
consumo	2.8	5	0.3	3	mA	
preço ap.	0.50	1	3	0.50	EUR	
	barato	baixo IB	baixo consumo	alim. unipolar, 4 AmpOp's		

Condicionamento de Sinal

Filtros

- **Filtros passivos**, componentes passivos RLC.
- **Filtros activos**, com AmpOps –com alimentação.
- Os filtros activos:
 - são mais pequenos, leves, baratos, sem bobinas, com impedâncias alta à entrada e baixa à saída, são ajustáveis e simples;
 - requerem alimentação estabilizada, têm ruídos de baixa/alta frequência, saturam com amplitudes elevadas, têm frequência limitada a uma banda de 0.1Hz a 1 MHz.

Condicionamento de Sinal

Filtros

- O objectivo do filtro é:
atenuar o ruído = isolar a informação
- supõe que têm frequências diferentes
→ CS com Função de Transferência

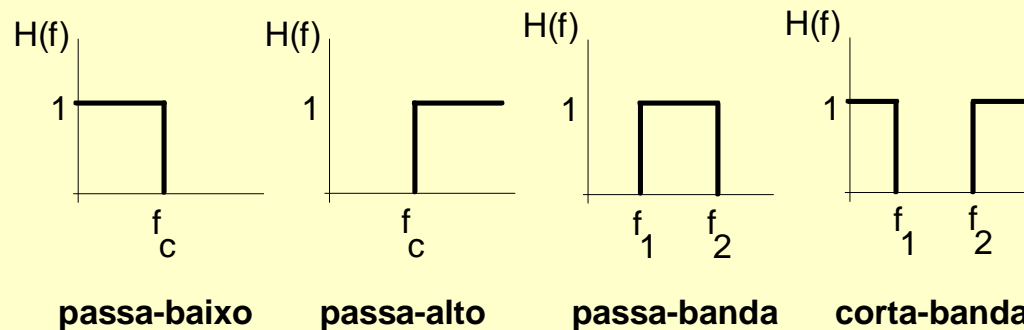


fig. filtros ideais



Condicionamento de Sinal

filtros de primeira ordem

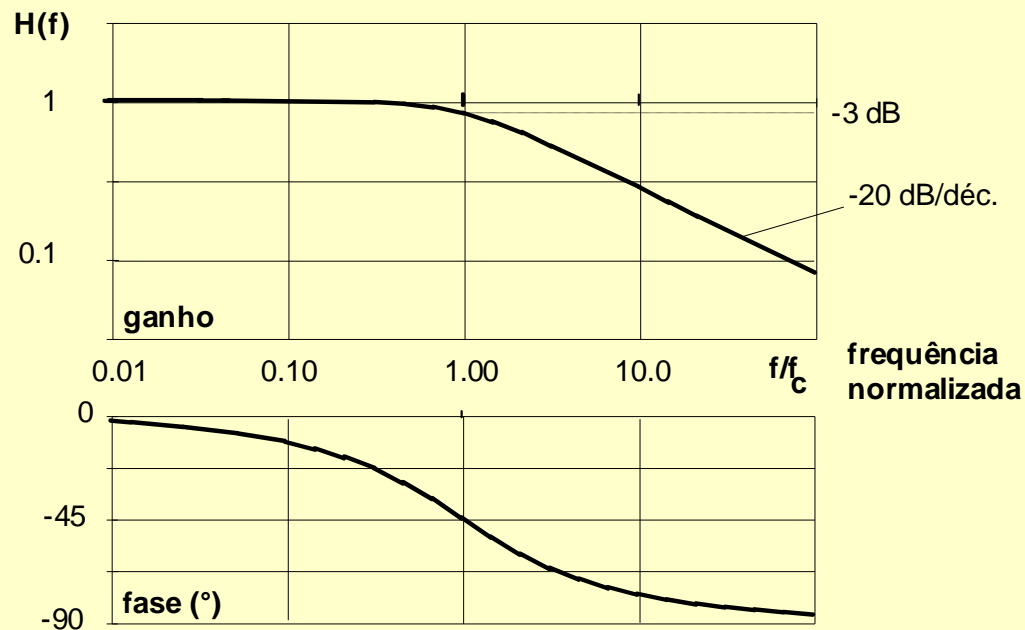


fig. filtro passa-baixo real (de 1ª ordem)

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$$

ou

$$H(f) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

Condicionamento de Sinal

Filtros de primeira ordem

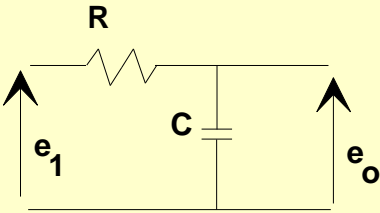
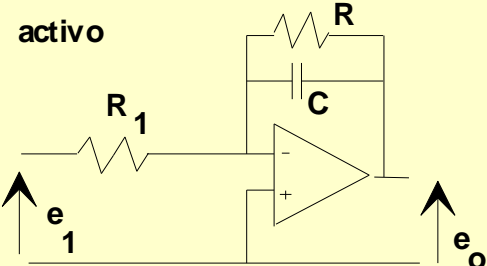
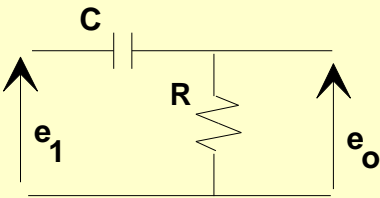
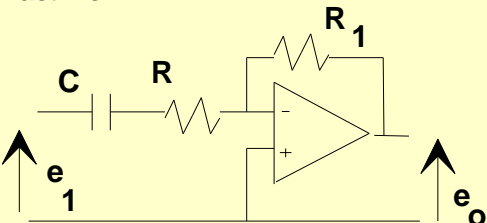
<p>passivo</p> 	<p>activo</p> 	<p>passivo</p> $H(s) = \frac{1}{1 + s RC}$ <p>activo</p> $H(s) = -\frac{R / R_1}{1 + s RC}$
<p>passivo</p> 	<p>activo</p> 	<p>passivo</p> $H(s) = \frac{s RC}{1 + s RC}$ <p>activo</p> $H(s) = -\frac{(R_1 / R) s RC}{1 + s RC}$

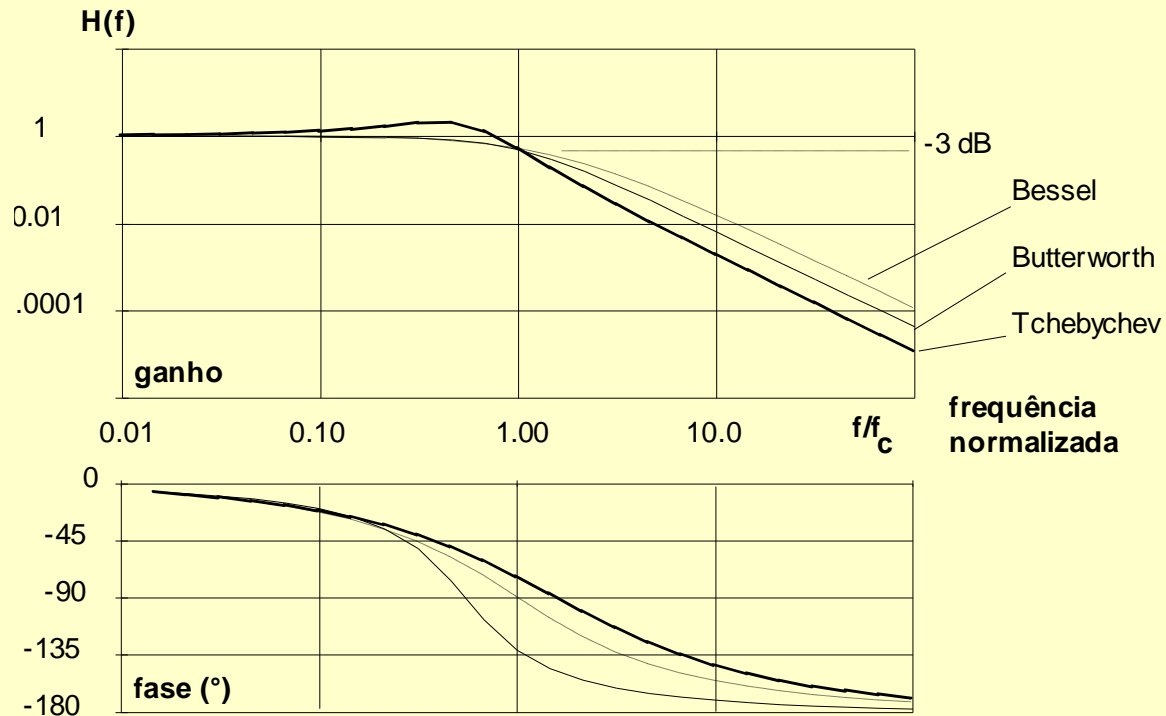
fig. filtros passa-baixo de 1ª ordem

fig. filtros passa-alto de 1ª ordem



Condicionamento de Sinal

Filtros de segunda ordem



$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

ou

$$H(f) = \frac{1}{1 + 2j\xi \frac{f}{f_c} - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$$

fig. filtros passa-baixo de 2ª ordem

Condicionamento de Sinal

Filtros de segunda ordem

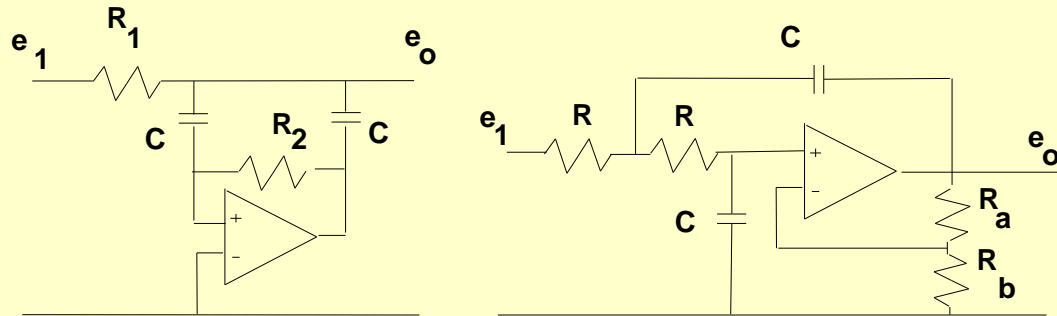


fig. filtros passa-baixo de 2ª ordem

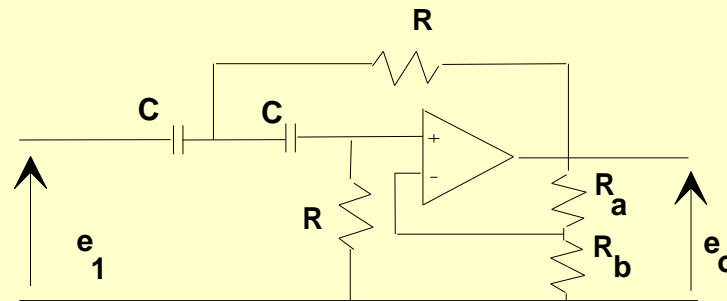
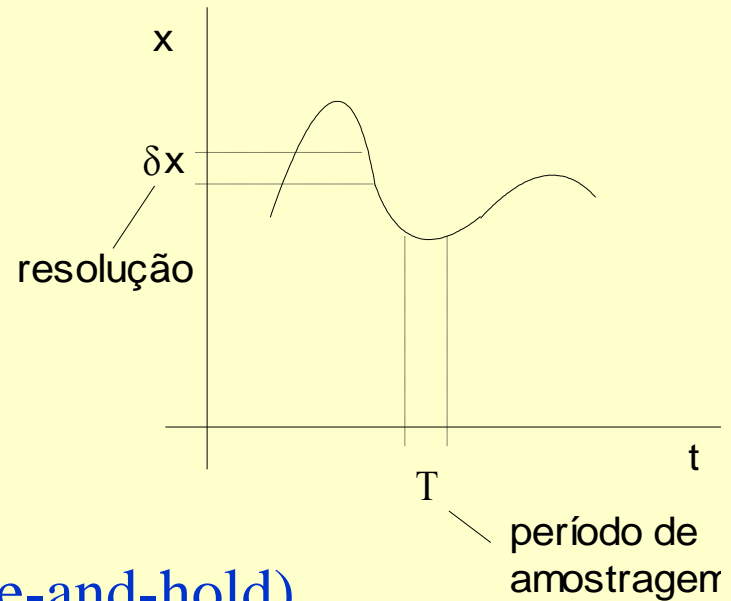


fig. filtro passa-alto de 2ª ordem

Aquisição do Sinal



- multiplexagem
- amostragem/retenção (sample-and-hold)
(discretização no tempo)
- conversão analógico-digital (CAD)
(discretização na variável)

Aquisição do Sinal

Conversão A/D

- Esquema de CAD

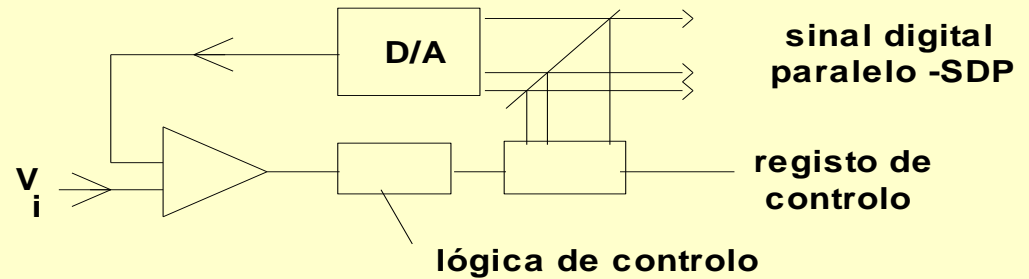
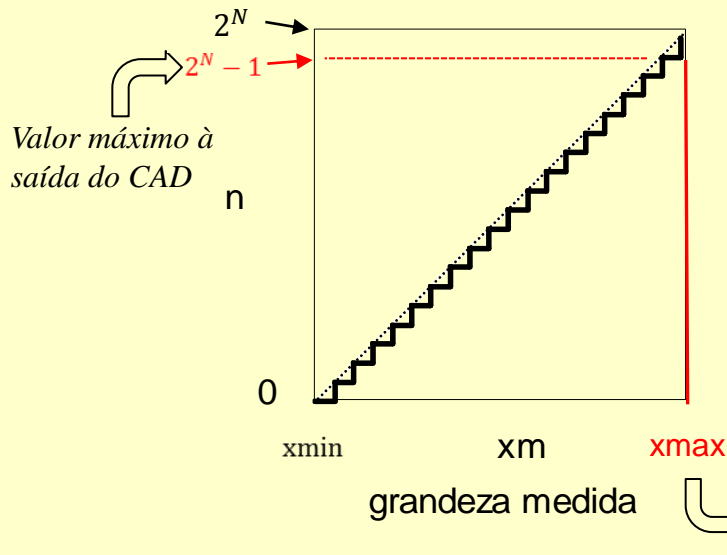


fig. aproximação iterativa



- Operação de um CAD

$$n(x_m) = \text{int} \left(2^N \frac{x_m - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right)$$



Aquisição do Sinal

Conversão A/D: alguns valores

CAD

conversores A/D (ADC) "Analog Devices"

	AD573	AD578	AD1377	AD770	AD1170	
tipo de conversão	iter.	iter.	iter.	flash	integração	
resolução	10	12	16	8	18	bits
tempo de conversão	30	6	10	<0.006	4..110(ms)	μs
precisão	1 LSB	0.1%	<0.1%	1 LSB	<0.001%	
offset	1 LSB	0.1%	1/2 LSB			
Z _i	5k	5/10k	260	100M	1.9/3.8/7.5k	Ω
V _i unipolar	10	10/20	5/10/20			V
V _i bipolar	±5	±5/±10	±2.5/±5/±10	±1	±5	V
alimentação	+5-15	+5±15		±5	±15	V
saída	SDP	SDP/SDS	SDP	SDP/SDS	SDS	
tempo de aquecimento			1		10	min

CDA

conversores D/A (DAC) "Analog Devices"

	AD557	AD561	AD662	AD569	
tipo de saída	tensão	tensão	corrente	tensão	
resolução	8	10	12	16	bits
tempo de conversão	0.8	0.25	<1	<5	μs
precisão	<1	<1/2	<1	1	LSB
alimentação	+5-15	+5±15	±5	±15	V
saída	0..2.56	0..2.56	<2.4 mA	-5..5	V

Aquisição do Sinal

Sinal Digital

- Sinal digital: codificado em N bits de “0” e “1”
(sinal digital paralelo e série)

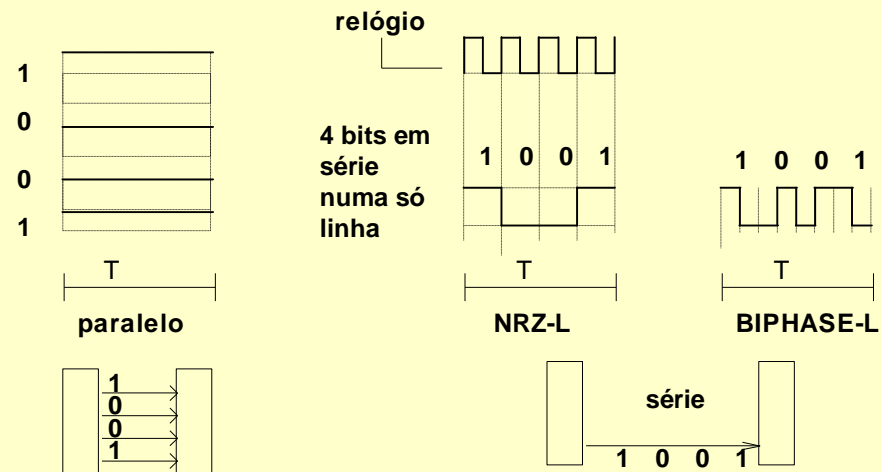


fig. codificação série -PCM

Aquisição do Sinal

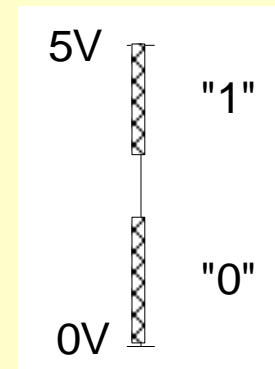
Exemplo de codificação digital

a codificação TTL (transistor-to-transistor logic)

é uma codificação em tensão: 0V/5V:

“0” → 0V ou < cerca de 2.4 V

“1” → 5V ou > cerca de 3 V



o sinal não deve estar nunca entre 2.4V e 3V!

Cadeia de Medida

Conclusão

- A Cadeia de Medida depende da *grandeza medida*, do *princípio físico* utilizado pelo sensor, da *ordem de grandeza*...
- O sensor pode ser:
 - **resistivo**: a resistência varia com a grandeza
 - **capacitivo**: uma capacidade varia com a grandeza
 - **indutivo**: é uma indutância que varia;

sendo o objectivo levar o sinal numa forma adequada até ao microprocessador

Exemplo de cálculo de cadeia de medida

Enunciado:

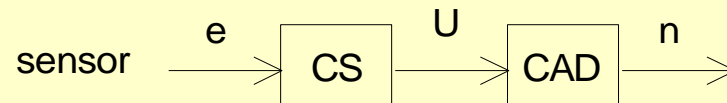
- Considere que um sensor fornece uma saída em tensão que varia entre 10mV e 50mV.
- Pretende-se adquirir o sinal com um CAD com entrada entre 0V e 10Vdc
- Dimensione um CS para otimizar a leitura.

Exemplo de cálculo de cadeia de medida

Enunciado:

- Considere que um sensor fornece uma saída em tensão que varia entre 10mV e 50mV.
- Pretende-se adquirir o sinal com um CAD com entrada entre 0V e 10Vdc
- Dimensione um CS para otimizar a leitura.

- Consideramos um Diagrama de Blocos

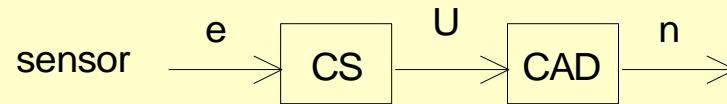


Exemplo de cálculo de cadeia de medida

Enunciado:

- Considere que um sensor fornece uma saída em tensão que varia entre 10mV e 50mV.
- Pretende-se adquirir o sinal com um CAD com entrada entre 0V e 10Vdc
- Dimensione um CS para otimizar a leitura.

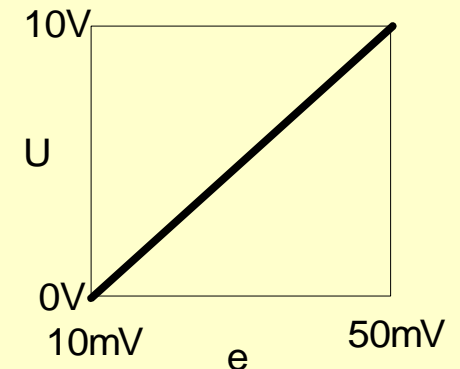
- Consideramos um Diagrama de Blocos



- O CS terá uma operação linear da forma : $U=Ae+B$

$$A = \frac{10(V)}{50(mV) - 10(mV)} = 0.25(V / mV) = 250$$

$$B = -250 \times 10(mV) = -2.5(V)$$

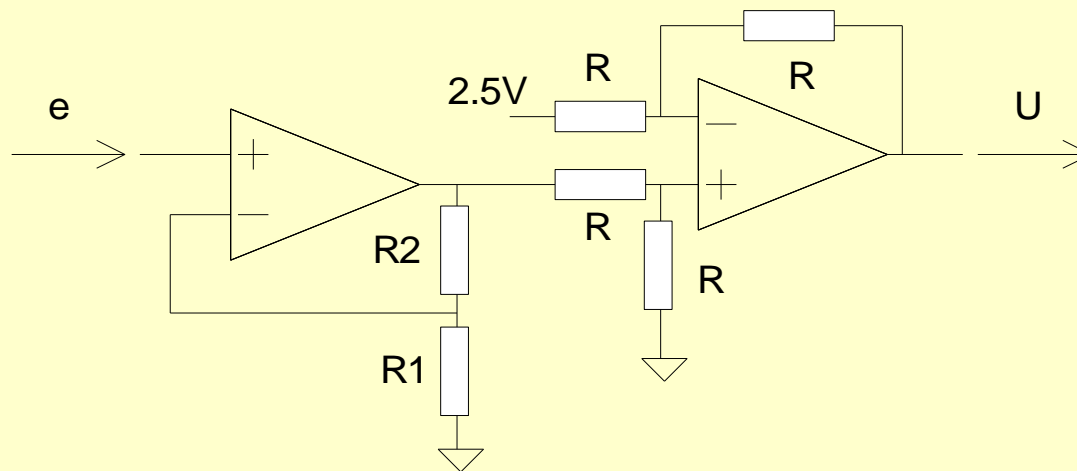


Exemplo de cálculo de CM

Implementação em circuito

Um exemplo de implementação seria com:

- um amplificador não inversor
com ganho: $R2/R1+1=A$
- um subtrator



ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores