



Sensores do Movimento

- posição linear
- proximidade
- posição angular
- velocidade linear e angular
- **aceleração**

Sensores do Movimento acelerómetros

Princípio físico:

- a aceleração aplicada sobre uma massa provoca uma força de inércia medida por equilíbrio com:
 - uma mola e sensor de posição linear
 - uma deformação elástica e extensómetros
 - um solenóide servo-actuado

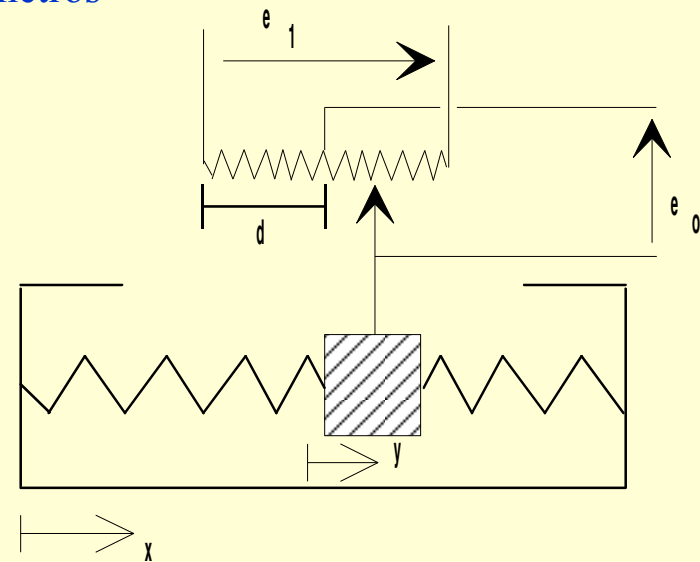


fig. acelerómetro linear potenciométrico

Sensores do Movimento

acelerómetros servo-actuados

Comentários:

- muito precisos
- muito caros
- utilizados na aviação, para misséis...

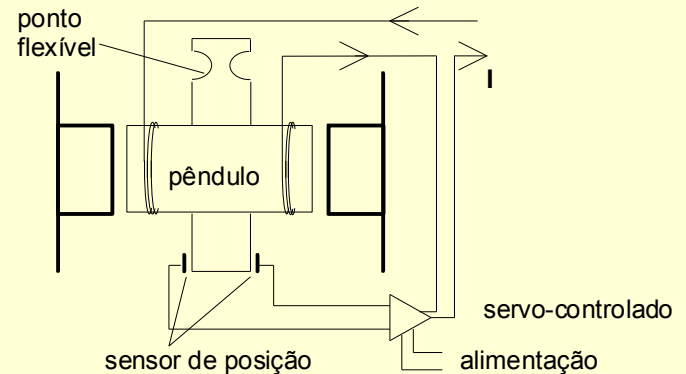


fig.acelerómetro servo-controlado

acelerómetros servo-controlados

gama (a_{\max})	10..400	g
banda passante	0..300	Hz
sensibilidade	1..4	mA/g
linearidade	$<3 \cdot 10^{-5}$	g
resolução (a_{\min})	10-6	g
repetibilidade	$6 \cdot 10^{-5}$	g
mau alinhamento	10^{-3}	g/g
sensibilidade à temp.	<30	$\mu\text{g}/\text{K}$
sens. às vibrações	<50	$\mu\text{g}/g^2$ (15 g rms)
temperatura operacional	-55..107	$^{\circ}\text{C}$
peso	80	g

Sensores do Movimento acelerómetros piezoelétricos

Comentários:

- equilíbrio por uma força piezoelétrica: gera uma carga proporcional à força de inércia

$$Q = kF_i = kma$$

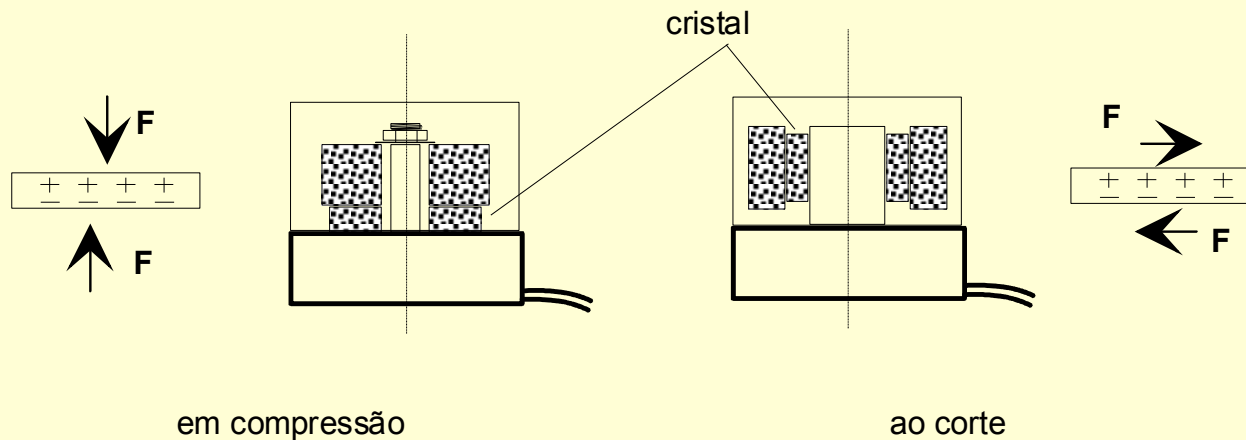


fig. acelerómetros piezo-elétricos

Sensores do Movimento acelerómetros piezoeléctricos

- características específicas:
 - o cristal pizeoeléctrico tem uma resistência de fuga que provoca uma componente passa-alto que limita a operação nas baixas frequências
 - a ressonância do cristal é muito pouco amortecida e a largura de banda é limitada a cerca de uma década abaixo da ressonância

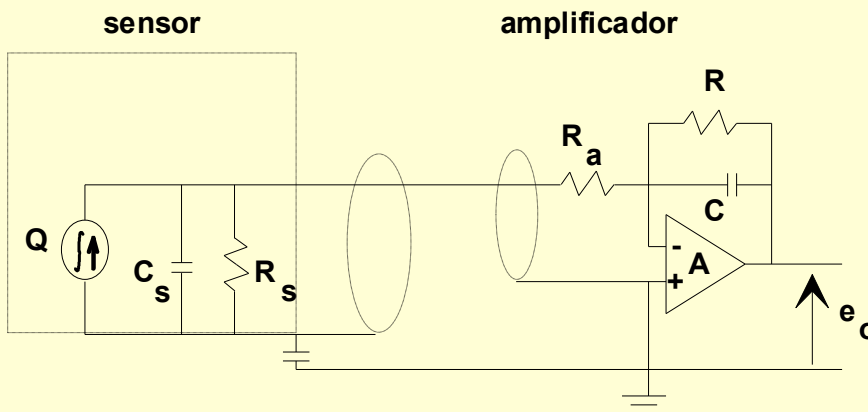


fig. amplificador de carga

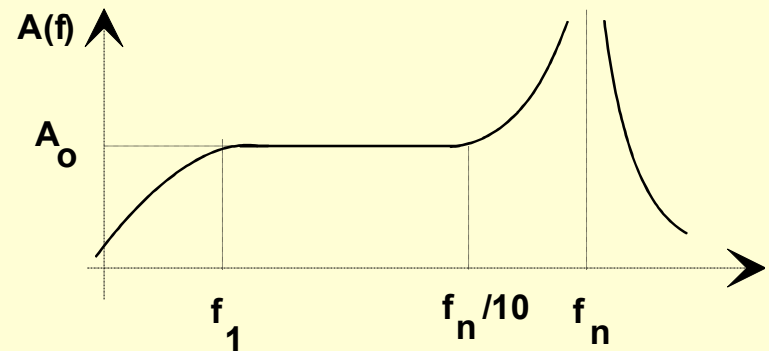


fig. resposta do sensor isolado

Sensores do Movimento

acelerómetros piezoelétricos

Comentários:

- saída de muito baixo nível: o CS é complexo e normalmente fornecido pelo fabricante
- existem sensores com dimensões muito variadas
- a gama de frequências torna estes sensores ideais para medir vibrações

acelerómetros piezoelétricos			
	acel.	amp.	
Largura de banda (de)	0.1..1	0.003	Hz
" (até)	1..54	200	kHz
frequência natural	4..180		kHz
sensibilidade	0.004..1000		pC/(m/s ²)
"		0.1 10	V/pC
alimentação		±15	Vdc
temperatura operacional	-85..400		°C
peso	0.5..500		g

Sensores do Movimento

acelerómetros piezoresistivos

princípio físico:

- a força de inércia provoca uma deformação medida por extensómetros semicondutores
- são sensores condensados num simples integrado

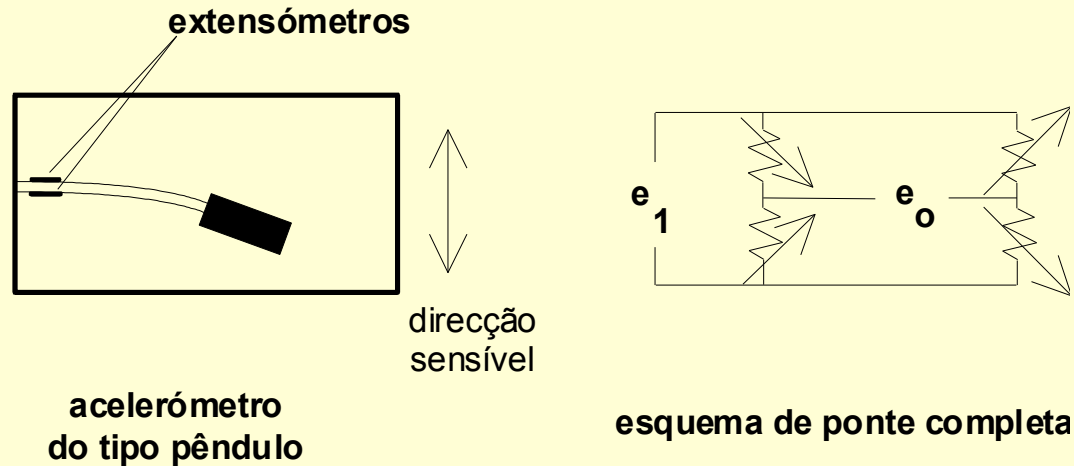


fig. acelerómetro piezo-resistivo

Sensores do Movimento

acelerómetros piezoresistivos

Comentários

- sem a limitação nas baixas frequências
- baratos mas menos precisos e com ruído elevado

acelerómetros piezo-resistivos

gama	2..100 000	g
frequência natural	1.2..125	kHz
factor de amortecimento	0..0.707	
sensibilidade	0.6..8	$\mu\text{V}/\text{V}/\text{g}$
linearidade	<1	%
sensibilidade transversa	<3	%
alimentação	5..15	V dc
zero (offset)	<25	mV (25°C)
impedância de entrada	1500..6000	Ω
impedância de saída	800..6000	Ω
temperatura operacional	-40..125	°C
sens. à temperatura	± 4 (± 4)	mV (%/100°C)
dimensões (peso)	8 x 8 x 4	mm (0.4 g)
"	12.7 x 22.9	mm _{Hex} x mm (28 g)

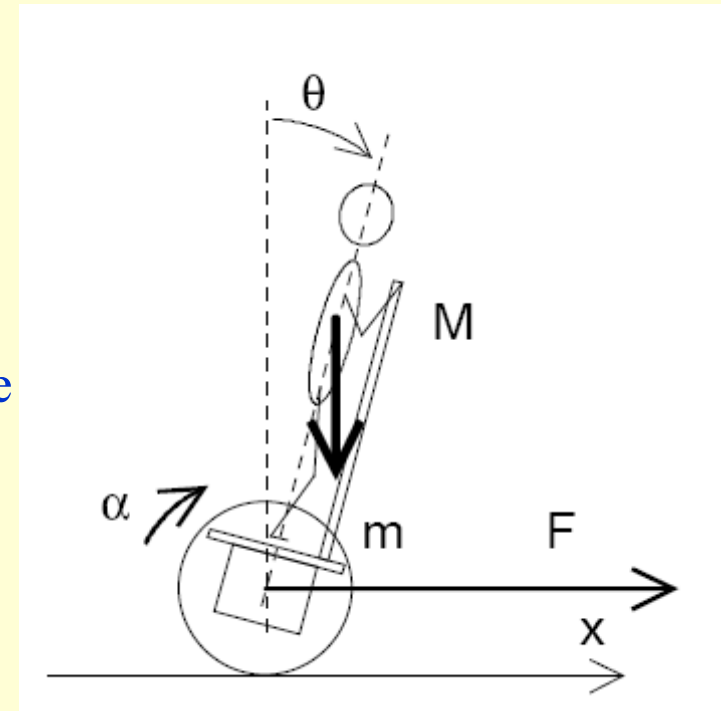
Problema Exemplificativo

Enunciado

- Para o controlo de um veículo pêndulo invertido do tipo Segway é necessário realimentar o ângulo, a sua derivada em ordem ao tempo e a velocidade linear, respectivamente.
- São utilizados dois sensores. A leitura dos sensores é efectuada com um período T_s de 10ms.
- As equações do sistema são aproximadas por:

$$(M + m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta}\cos(\theta) = F$$

$$Ml\cos(\theta)\ddot{x} + Ml^2\ddot{\theta} - Mgl\sin(\theta) = 0$$



Problema Exemplificativo

Enunciado 1

Medição da velocidade

Suponha que para medir a velocidade linear se recorre a um codificador incremental (encoder) com N impulsos acoplado directamente ao veio da roda, cujo diâmetro exterior é de 19 polegadas. As duas saídas do encoder são fornecidas a um contador de 8 bits, lido pelo microcontrolador. São seleccionados modelos com 360, 500, 1000, 2000, 4000 e 5000 impulsos.

- 1) Determine a resolução angular e linear permitida pelo encoder para a leitura da posição.
- 2) Mostre que a velocidade é então da forma $\Delta n = T_s A v$, onde Δn é a diferença entre duas leituras sucessivas da posição.

Problema Exemplificativo

Resolução angular (?)

Menor ângulo detectado: $\delta\alpha = \frac{2\pi}{N} [rad]$

ângulo medido pelo encoder: $\alpha = \alpha_0 + n\delta\alpha$

Resolução velocidade linear (?)

Posição linear: $x = R\alpha$, $R = (19 \times 0.0254) / 2 = 0,241[m]$

Velocidade linear: $v = R\dot{\alpha}$

Estimação da velocidade linear: $v = R \frac{\alpha_k - \alpha_{k-1}}{T_s} = R \frac{n_k - n_{k-1}}{T_s} \delta\alpha$

Problema Exemplificativo

Por simples substituição fica provada a relação:

$$v = R \frac{\alpha_k - \alpha_{k-1}}{T_s} = R \frac{n_k - n_{k-1}}{T_s} \delta\alpha = R \frac{\Delta n}{T_s} \frac{2\pi}{N} = \frac{\Delta n}{AT_s}, \quad A = \frac{N}{1,514 [m]}$$

Menor velocidade linear detectada (resolução):

$$\delta v = \frac{1}{AT_s}$$

Problema Exemplificativo

As necessidades do controlo exigem uma resolução da velocidade inferior a 5cm/s, deduza o número mínimo a escolher para N e escolha entre os modelos seleccionados e mostre que $A = 2642$ [/m].

$$\delta v = \frac{1}{AT_s} < 0,05[m/s]$$

$$\frac{1}{AT_s} < 0,05[m/s] \Leftrightarrow A > \frac{1}{5 \times 10^{-4}}$$

$$\frac{N}{2 \times \pi \times R} > 2000 \Leftrightarrow N > 3026$$

Logo N=4000

Problema Exemplificativo

Conclua quanto à resolução em velocidade e à gama de velocidades permitida.

$$\delta v = \frac{1}{AT_s} = \frac{2\pi R}{NT_s} = 0.0379 [m/s]$$


Velocidade máxima:

$$v = R \frac{n_k - n_{k-1}}{T_s} \delta\alpha = R \frac{n_k - n_{k-1}}{T_s} \frac{2\pi}{N}$$
$$v_{\max} = 0.241 \times \frac{256}{10^{-2}} \times \frac{6.28}{4000} = 9.7 [m/s]$$

Problema Exemplificativo

Avalie o efeito da deformação da roda com a perda de pressão, correspondendo a uma tolerância de 5% no diâmetro da roda.

$$\Delta n_1 = \frac{NT_s}{2\pi R_1} v = \frac{NT_s}{2\pi R(1-\varepsilon)} v = \frac{1}{(1-\varepsilon)} \Delta n \Rightarrow \Delta n_1 \approx (1+\varepsilon)\Delta n$$

Vel. real 

Logo a velocidade de facto medida será:

$$v_1 = R \frac{\Delta n_1}{T_s} \frac{2\pi}{N} = R \frac{(1+\varepsilon)\Delta n}{T_s} \frac{2\pi}{N} = (1+\varepsilon)v$$

Assim, um erro de 5% no diâmetro da roda induz um erro de 5% na velocidade, com sinal contrário.

Problema Exemplificativo

Enunciado 2

Medição do ângulo θ

Para a medida do ângulo θ , o sensor é escolhido entre um inclinómetro (NG2U) e um acelerómetro (B1).

A aquisição é efectuada com um conversor Analógico/Digital de 12bits, com entrada em tensão de 0/5Vdc, e ruído de 1.5LSB.

Pretende-se uma resolução inferior a 0.5mrad e a melhor precisão possível. É previsível que o ângulo não ultrapasse os 25 graus.

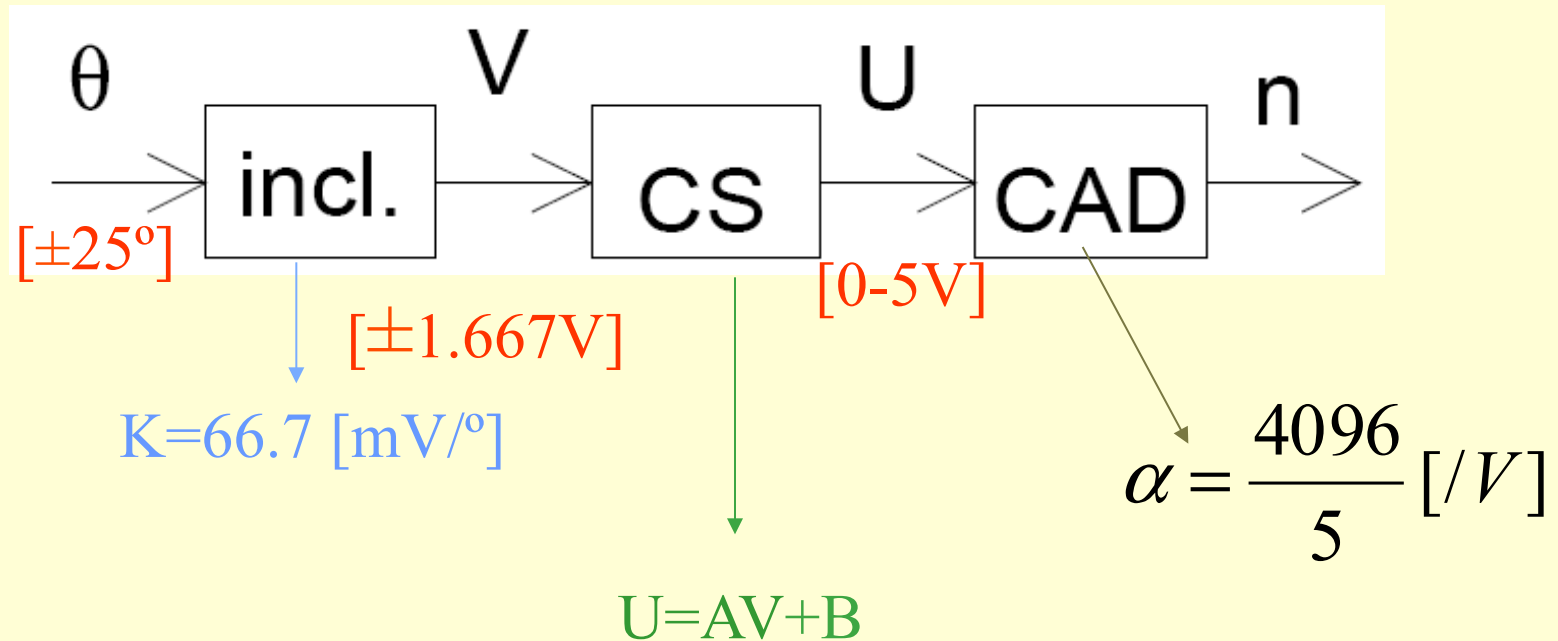
1. Com base nos dados da tabela, determine a cadeia de medida para a aquisição do inclinómetro. Estabeleça a relação entre o ângulo e a saída digital. Deduza a resolução e a precisão.

Problema Exemplificativo

	NG2U		B1	
Gama	± 30	deg	± 3	G
Sensibilidade	66.7	mV/deg	110	mV/G
Resolução	0.003	deg	1	mG
Linearidade	0.1	%FS	0.5	%FS
Constante de tempo	300	ms	6	ms

Problema Exemplificativo

Cadeia de medida



Problema Exemplificativo

Cálculo do condicionamento de sinal:

$$A = \frac{5}{2 \times 1.667} = 1.5 [V / V]$$

$$B = 0 - 1.5 * (-1.667) = 2.5 [V]$$

Saída do sistema de leitura:

$$n = \text{int}[\alpha U + \beta] \quad \text{com} \quad \alpha = \frac{4096}{5} [1/V] \quad \text{e} \quad \beta = 0$$

Problema Exemplificativo

Donde:

$$n = \text{int}[\alpha(AK\theta + B)]$$

Resolução do CAD:

$$\delta n = 1 = \alpha AK \delta^{\text{CAD}} \theta \Rightarrow \delta^{\text{CAD}} \theta = \frac{1}{\alpha AK} = 0.0122^\circ = 0.213 \text{ [mrad]}$$

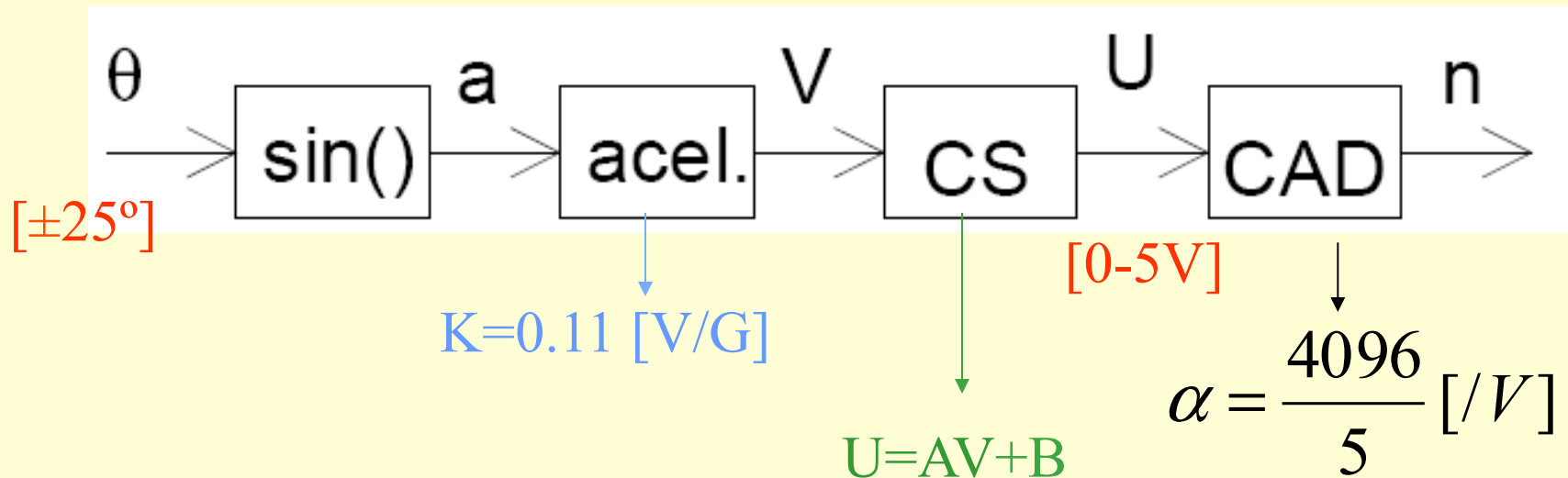
Precisão:

$$\Delta\theta = \delta^{\text{S}} \theta + \Delta^{\text{lin}} \theta + 1.5 \delta^{\text{CAD}} \theta = 0.003 + \frac{0.1}{100} 30 + 0.0183 = 0.051 [^\circ]$$

Problema Exemplificativo

Utilização de um acelerómetro

No caso de se utilizar um acelerómetro, a grandeza medida é a aceleração da gravidade “filtrada” pelo seno do ângulo: $a = g \sin(\theta)$ ou, se a aceleração está em G, $a = \sin(\theta)$



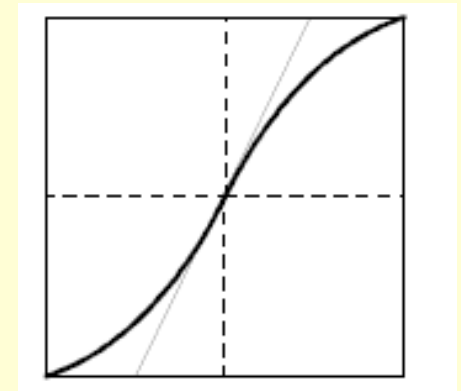
Problema Exemplificativo

$$A = \frac{5}{2 \times 0.11 \times \sin(25^\circ)} = 53.78 [V / V]$$

$$B = 2.5 [V]$$

Saída do sistema de leitura:

$$n = \text{int}[\alpha(AK \sin(\theta) + B)]$$



Esta relação entre ângulo e leitura digital é não linear e logo não teremos uma resolução constante. No entanto o erro máximo para 25 graus é de 3%.

Logo, com θ em rad:

$$\theta \approx \sin(\theta)$$

Problema Exemplificativo

Resolução do CAD

$$\delta^{CAD} \theta = \frac{1}{\alpha_{AK}} = 0.00021 [rad] = 0.0118^\circ$$

Resolução do sensor

$$\delta^S \theta = 0.001 [rad] = 0.0573^\circ$$

Precisão

	NG2U		B1	
Gama	±30	deg	±3	G
Sensibilidade	66.7	mV/deg	110	mV/G
Resolução	0.003	deg	1	mG
Linearidade	0.1	%FS	0.5	%FS
Constante de tempo	300	ms	6	ms

$$\Delta \theta = \delta^S \theta + \Delta^{\text{lin}} \theta + 1.5 \delta^{CAD} \theta = 0.0573 + \frac{0.5}{100} \times 3 \times \frac{180}{\pi} + 0.0177 = 0.934 [^\circ]$$

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