



# Sensores do Movimento

---

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

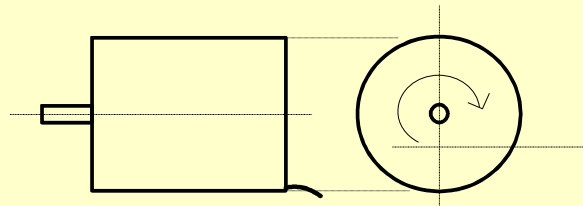
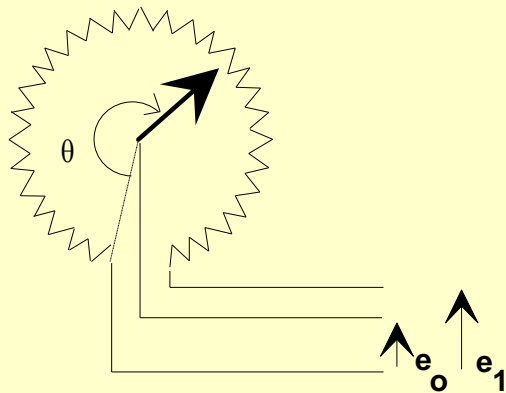
# Posição angular

---

- sensores analógicos
  - potenciômetros
  - resolvers/synchros
  - transformadores lineares
- sensores digitais
  - codificadores ópticos incrementais
  - codificadores digitais absolutos
- sensores específicos
  - inclinômetros
  - bússolas

# Posição angular potenciómetros

- similares aos sensores potenciométricos de posição linear
- gama finita:
  - inferior a uma volta
  - ou multivoltas



$$R_{\theta} = R \frac{\theta}{\theta_{max}}$$

fig. sensor angular potenciométrico

# Posição angular potenciómetros

## Comentários:

- + simples, saída de nível elevado
- + CS simples ou dispensável
- o contacto físico limita a velocidade e a vida útil

<b>sensor de posição angular potenciométrico</b>			
diâmetro	8.5	2.5	"(2.54 cm)
gama de medida	352	358	°
resistência	7..20	80..100	kΩ
linearidade	<0.2	<0.075	%
binário máximo	2	8	g cm
velocidade máxima	3600	1000	°/s
vida útil	> 5 10 <sup>7</sup>	> 2 10 <sup>7</sup>	(3 Hz, 60°)

# Posição angular

## Exemplo de cálculo

---

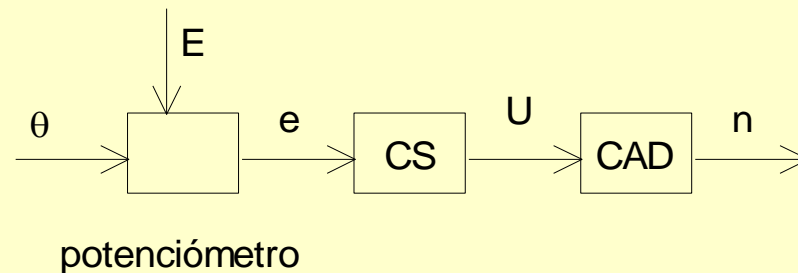
### Enunciado:

- Para a medição de um ângulo variando numa gama  $\pm 45^\circ$ , é utilizado um potenciómetro de  $180^\circ$ .
- O sensor é colocado de forma simétrica.
- É alimentado em tensão 0/5Vdc e deve ser lido por um conversor A/D de 12 bits com entrada em tensão 0/10Vdc.
- Determine a gama de variação da saída do potenciómetro
- Determine a relação entre ângulo e leitura digital e deduza a resolução da medida.

# Posição angular

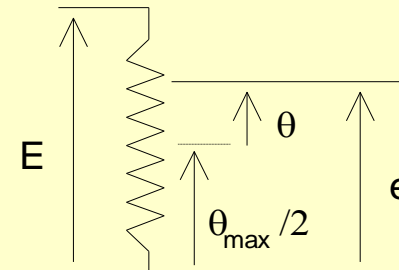
## Exemplo de cálculo

- O Diagrama de Blocos é a priori o seguinte



- considerando a alimentação e saída

$$e = \frac{\theta + \theta_{\max} / 2}{\theta_{\max}} E = \frac{E}{2} + \frac{\theta}{\theta_{\max}} E$$



- a saída varia assim entre 1.25V e 3.75V: o CS pode ser um simples seguidor ou mesmo não existir:  $U = e$

# Posição angular

## Exemplo de cálculo

- A operação do CAD é descrita por:

$$n = \text{int} \left[ 2^{12} \frac{U - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \right] = \text{int} [kU] \quad \text{com} \quad k = \frac{4096}{10} (\text{V})$$

- logo

$$n = \text{int} \left[ k \left( \frac{E}{2} + \frac{E}{\theta_{\max}} \theta \right) \right] = \text{int} [A\theta + B] \quad \text{com} \quad \begin{aligned} A &= kE / \theta_{\max} = 11.37 (/\circ) \\ B &= kE / 2 = 1024 \end{aligned}$$

- a resolução é o ângulo correspondendo a 1 bit

$$\delta n = \delta [A\theta + B] = A\delta\theta = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta\theta = \frac{1}{A} = 0.088 (^\circ)$$

# Posição angular resolvers e synchros

## Princípio físico:

- sensor indutivo, transformador
- saída em CA que depende do ângulo rotor/stator

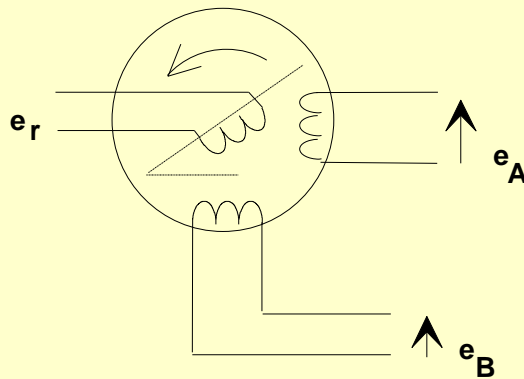


fig. resolvers

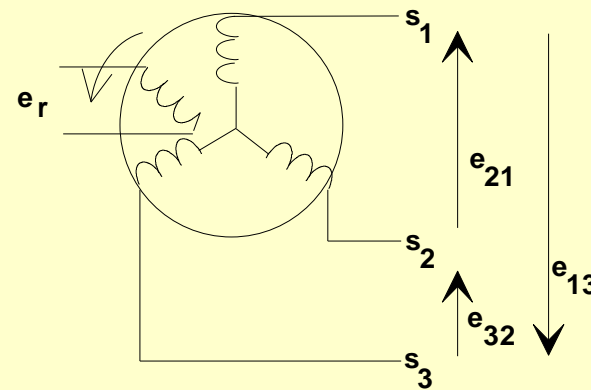
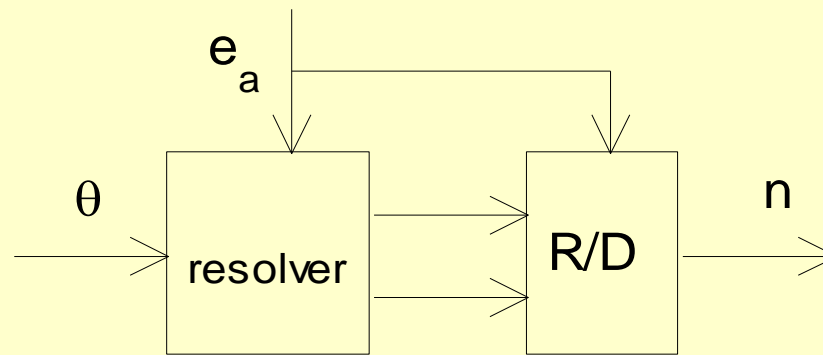


fig. synchros



# Posição angular resolvers e synchros

- Comentários:
  - + sensor indutivo: sem contacto, resolução infinita
  - + precisão elevada
  - caro
- o CS mais usual é com um conversor de resolver para digital (R/D) com 14 a 16 bits



# Posição angular outros indutivos

Similares ao LVDT  
(por vezes denominados RVDT)

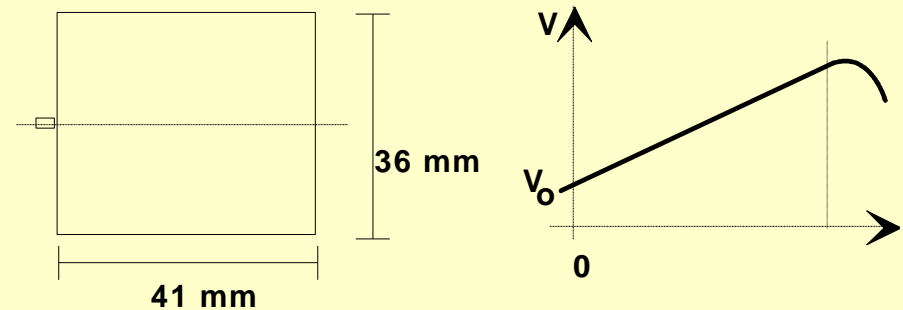


fig. resposta de um sensor tipo lv dt

## sensor de posição angular do tipo LVDT

dimensões	36 x 41	mm(diam)x mm
peso	100	g
gama	4..300	°
alimentação	10	V dc (50 mA)
sensibilidade	33..470	mV/° (dc)
tensão $V_o$	50..3600	mV
linearidade	< 0.5	%
resolução	inf.	
resistência de carga	10	k $\Omega$
binário máximo	0.5	g cm

# Posição angular codificado incremental (encoder)

- Princípio físico:
  - sensor de proximidade
  - medir é contar impulsos
  - a resolução  $\delta\theta$  é inversamente proporcional ao número  $N$  de impulsos por volta

$$\theta = \theta_o + n\delta\theta \quad \text{com} \quad \delta\theta = \frac{360(^{\circ})}{N}$$

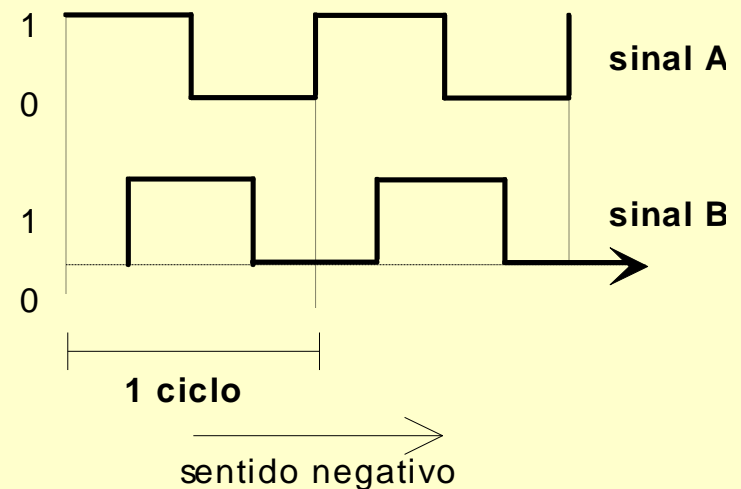
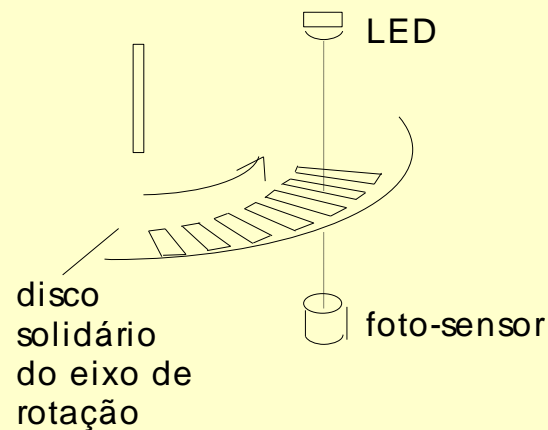


fig. codificador óptico incremental

# Posição angular codificado incremental (encoder)

- Comentários:
  - para detectar o sentido da rotação adiciona-se um segundo impulso desfasado de  $90^\circ$  (sinais A e B)
  - trata-se de um sensor incremental: só mede deslocações, para saber a posição absoluta ou saber a posição inicial:
    - acrescenta-se um sinal com um único impulso por volta (home ou zero)
    - recorre-se a um sensor absoluto em paralelo (potenciómetro?)
  - as saídas são usualmente em nível TTL
  - o CS é aqui directamente digital:
    - em hardware: consiste em contador(es), cujas saídas são lidas em paralelo pelo microprocessador
    - em software: ou utiliza-se directamente uma entrada do computador ou microcontrolador e a contagem é feita por alguma aplicação

# Posição angular

## codificador incremental (encoder)

- simples, barato, robusto: é muito utilizado
- são inclusive utilizados para medir deslocações lineares através uma roldana ou roda dentada (por exemplo em impressoras de jacto de tinta)

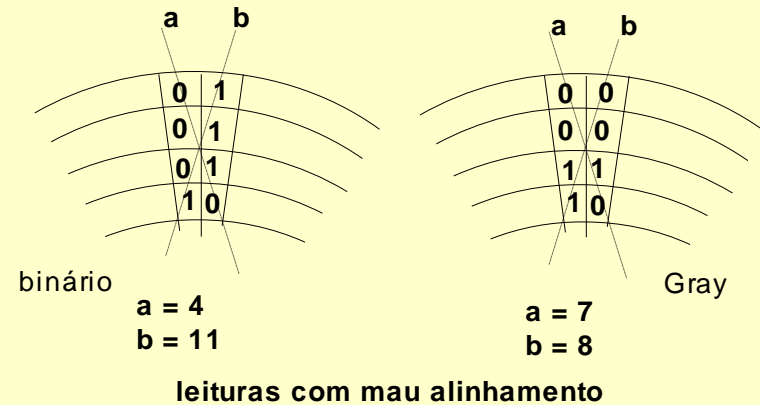
### codificadores ópticos incrementais (encoders)

diâmetro	25	80	mm
comprimento	25	50	mm
gama de medida	>360	>360	°
resolução	25	1000	imp./volta
precisão	30	4	' de arco
alimentação	5 (25)	5 (100)	V dc(mA)
saída	TTL/CMOS		
freq.máxima	50	50	kHz
velocidade mecânica máxima	500	1000	rpm
binário máximo	3	150	g cm
vida útil (LED)	>10 <sup>5</sup>	>10 <sup>7</sup>	h

# Posição angular codificador absoluto

tabela

dec	bin	Gray
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
...		



## Princípio físico:

- similar ao encoder
- com N sinais codificados em código de Gray

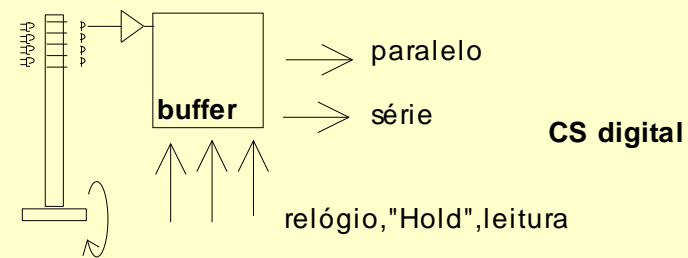


fig. codificador digital absoluto

# Posição angular codificador absoluto

## Comentários:

- a resolução varia inversamente com o número de sinais ou bits
  - para 12 bits  $\delta\theta = 0.088^\circ$
  - para 16 bits  $\delta\theta = 0.0055^\circ$

$$\delta\theta = \frac{360^\circ}{2^N}$$

- actualmente já se vendem codificadores absolutos com 16bits
- precisos, fiáveis, sem CS, insensíveis ao ruído
- mais caros que os anteriores

# Posição angular outros sensores

---

- inclinómetros
  - medem um ou dois ângulos entre a vertical e o corpo do sensor
  - o princípio físico baseia-se na acção da gravidade
- bússolas
  - medem o ângulo entre o sensor e o norte magnético
  - saídas analógicas são proporcionais
    - ao ângulo (e tem uma discontinuidade de 360graus) ou
    - aos seno e coseno (e são contínuas)
  - podem medir as 3 coordenadas do campo magnético no referencial do sensor



# Sensores do Movimento

---

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

# Velocidade linear

## velocidade ou posição ou aceleração ?

---

Para medir velocidades, uma primeira hipótese seria medir posições e logo derivar (ou medir acelerações e integrá-las) mas é melhor, quando possível, medir a própria velocidade, porque:

- a diferenciação é um filtro passa-alto;
- a integração é um filtro passa-baixo;
- ambas introduzem erros e ruído dispensáveis.

Uma excepção importante é o codificador incremental que na realidade é um sensor digital de velocidade. A contagem dos impulsos por unidade de tempo ou medição do tempo entre dois impulsos fornece a informação desejada, proporcional à velocidade.

# Velocidade linear

## Princípio físico:

- a variação do fluxo numa bobine provoca uma fem:
- As sensibilidades de ambos os tipos de sensores varia:
  - para o magneto móvel de 16.5 a 250 mV/(m/s);
  - para a bobina móvel de 4 a 3000 mV/(m/s).
- As gamas de frequência vão até 10 a 20 kHz.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = kv$$

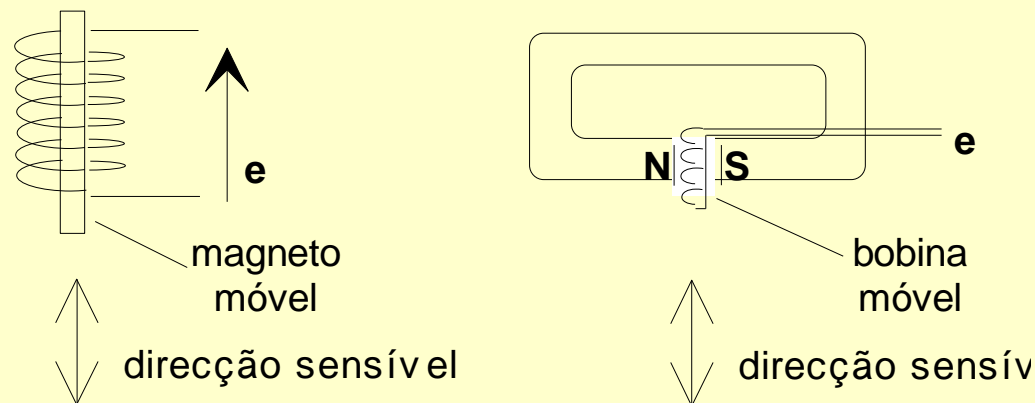
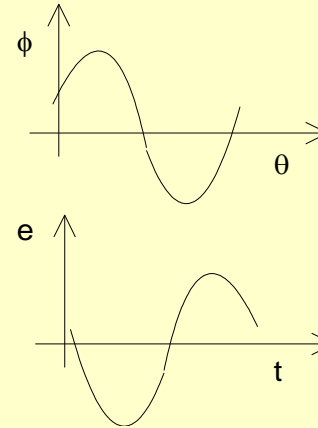
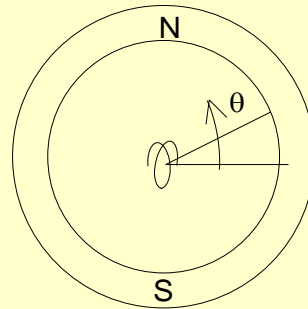


fig. pick-up

# Velocidade angular sensor analógico

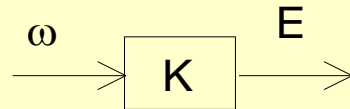


## Princípio físico:

- similar ao anterior: variação de um fluxo magnético provoca uma fem
- rotação provoca um sinal sinusoidal
- amplitude e sinal são proporcionais à velocidade angular

$$\left. \begin{array}{l} \phi = \phi_o \cos(\theta) \\ \theta \approx \omega t \end{array} \right\} \Rightarrow e = -\frac{d\phi}{dt} = k\omega \sin(\omega t)$$

# Velocidade angular taquímetro – sensor analógico



$$E = \langle e \rangle = K\omega$$

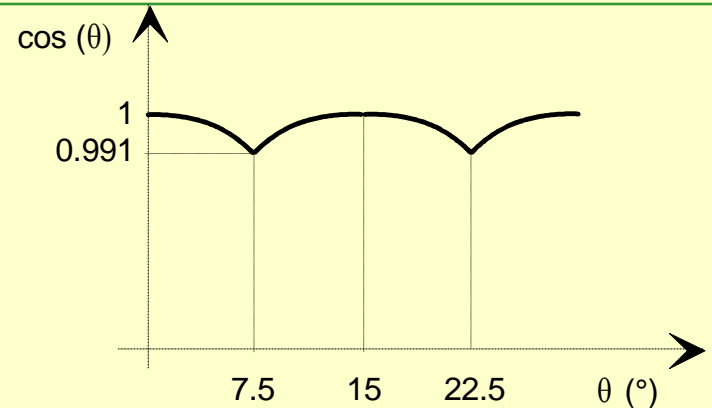


fig. gerador dc a partir de um gerador

## Taquímetro (tacómetro) dc

- converte o sinal alternado por comutação
- é similar a um motor eléctrico de magnetos permanentes invertido
- saída tem :
  - valor médio proporcional à amplitude com sinal
  - ruído (ripple) devido à comutação, com frequência proporcional à velocidade
- sensibilidade  $K$  em  $V/(\text{rad/s})$  ou  $V/\text{RPM}$



# Velocidade angular taquímetro

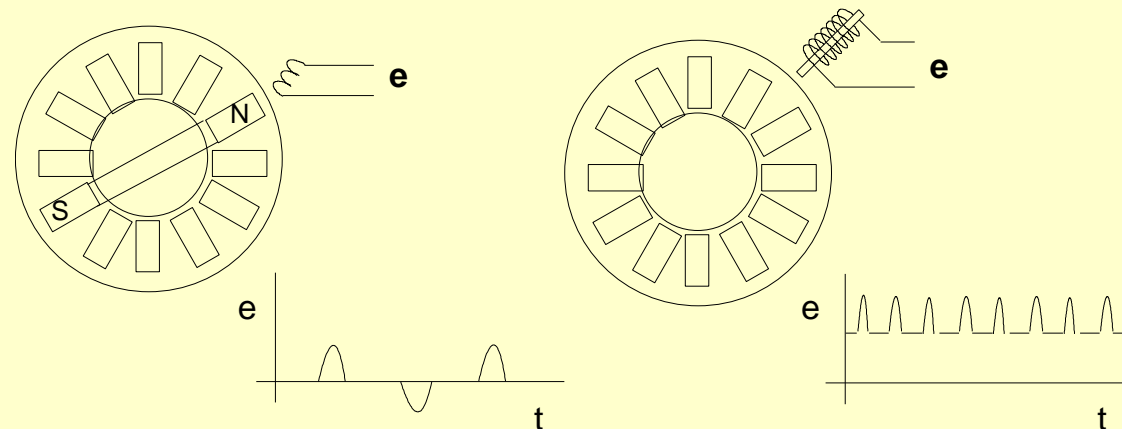
- Measurement of rotary speed using a DC generator
- Essentially a motor running in reverse
- Used to be common to have these attached to motors to enable direct analog feedback
- Much less common now with digital control (use incremental encoders)



Tacho generator for large industrial plant (GE)

# Velocidade angular sensores digitais

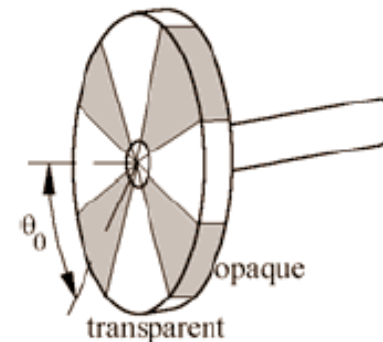
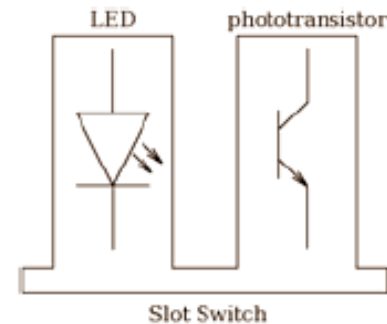
- Princípio físico:
  - medição da frequência
    - de um sinal sinusoidal ou
    - de um trem de impulsos
  - medida um período de forma digital é fácil e precisa



**fig. geradores de impulsos indutivos**

# Velocidade angular sensores digitais

- LED – phototransistor pair
  - LED emits invisible light
  - Phototransistor output voltage affected by light
- **Slot switch**
  - Wheel positioned between LED and phototransistor
  - Opaque => low voltage
  - Transparent => high voltage
- Pulse/sec => rotational speed





# Velocidade angular velocidades inerciais

## Princípio físico dos giroscópios (de razão):

- efeito giroscópico:
  - corpo simétrico em rotação a alta velocidade
  - a velocidade angular gera um momento medido

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_o \end{bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} M_o \\ M_i \end{bmatrix}$$

$$H = I_s \omega_s$$

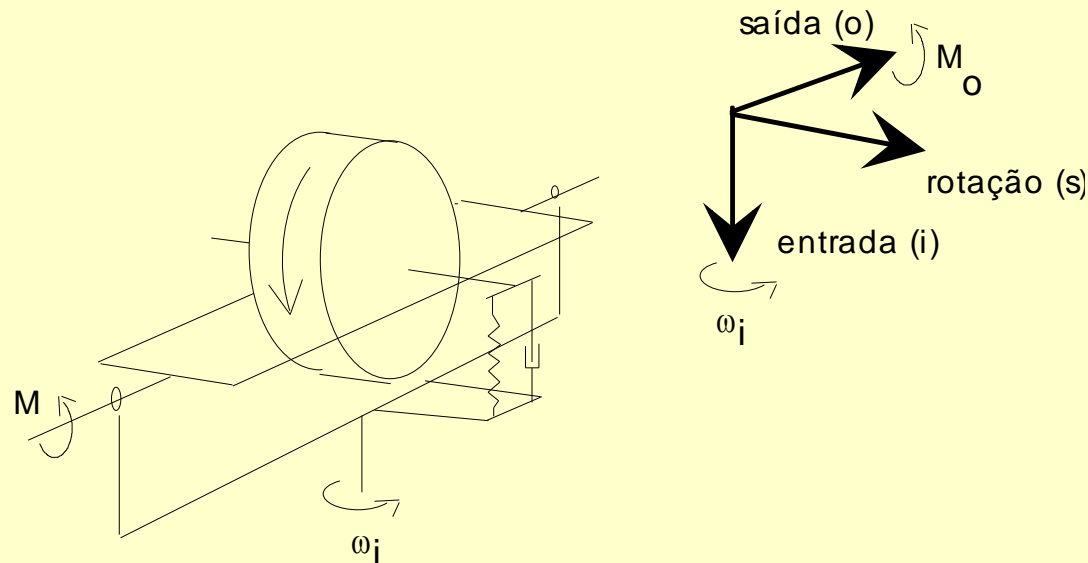


fig. o princípio do giroscópio

# Velocidade angular velocidades inerciais

---

## Comentários:

- sensores usuais: rotação entre um referencial fixo e um eixo de rotação
- sensores inerciais: rotação em relação a um referencial de inércia (para veículos, aviões, barcos...)
- para manter a rotação, o corpo móvel é um motor eléctrico em rotação a cerca de 400Hz
- mecânica sensíveis, com desgaste das partes em contacto, requerem calibração periódica

# Velocidade angular outros sensores inerciais

- Outros princípios físicos:
  - interferências laser (com fibra óptica)
  - força de Coriolis com sensores piezoelétricos
- sem partes móveis são mais pequenos, robustos e duradouros, e por vezes mais baratos

## sensor de velocidade angular piezoelétrico Murata enc 05s

gama de medida	$\pm 90$	$^{\circ}/s$
zero ou offset (para $\omega = 0$ )	2.5	Vdc
sensibilidade (scale factor)	0.8	mVdc/ $(^{\circ}/s)$
linearidade	5	% FS
deriva do zero (offset drift)	$\pm 0.5$	Vdc
estabilidade da sensibilidade (scale factor drift)	$\pm 20$	%
largura de banda	50	Hz
ruído	200	mV <sub>rms</sub>
alimentação	2.5/5	Vdc
corrente de alimentação	10	mA
peso	3.5	g
dimensões	20x13.2x7.1	mm