

  
 Instrumentação de Controle - 167347  
 Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)  
 Universidade de Brasília (UnB)

---

**Sensores e Transdutores**

---

Prof. Geovany A. Borges  
 e-mail: [gaborges@ene.unb.br](mailto:gaborges@ene.unb.br)



Laboratório de Robótica e Automação (LARA)  
 Grupo de Robótica, Automação e Visão Computacional (GRAV)  
 Departamento de Eng. Elétrica - Universidade de Brasília (UnB)



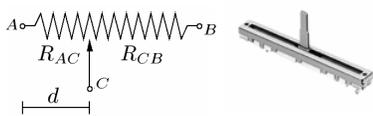
**Tópicos de estudo**

- Elementos resistivos
- Elementos capacitivos
- Elementos indutivos
- Elementos termoeletrônicos
- Elementos optoeletrônicos
- Elementos de campo magnético
- Elementos de piezoeletrônicos
- MEMs

Instrumentação de Controle
Prof. Geovany A. Borges
2

**Elementos resistivos**

- Potenciômetros lineares
  - Deslizantes



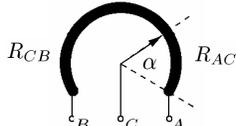

$$R_{AC} = K \cdot d$$

$$R_{AC} + R_{CB} = R$$

Instrumentação de Controle
Prof. Geovany A. Borges
3

**Elementos resistivos**

- Potenciômetros lineares
  - Rotativos




$$R_{AC} = K \cdot \alpha$$

$$R_{AC} + R_{CB} = R$$

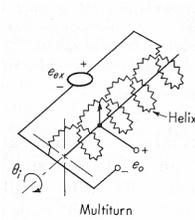
Instrumentação de Controle
Prof. Geovany A. Borges
4

**Elementos resistivos**

- Potenciômetros lineares
  - Rotativos (multivoltas)

$$R_{AC} = K \cdot \alpha$$

$$R_{AC} + R_{CB} = R$$

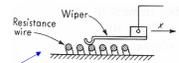


Multiturn

Instrumentação de Controle
Prof. Geovany A. Borges
5

**Elementos resistivos**

- Potenciômetros lineares
  - Materiais
    - Fio enrolado:
      - Possui erro de resolução diferente de zero
      - Baixo coeficiente térmico
    - Filme de carbono
      - Sem erro de resolução
      - Alta variação com a temperatura
    - Plástico condutivo
      - Baixa não-linearidade devido ao processo de fabricação a laser
      - Alto coeficiente térmico




Instrumentação de Controle
Prof. Geovany A. Borges
6

## Elementos resistivos

- Potenciômetros lineares
  - Características:
    - Impedância de saída variável
    - Aplicável para baixas velocidades
    - Não-linearidade
    - Potenciômetros logarítmicos

## Elementos resistivos

- Termômetro resistor (RDT)
  - Relação característica:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots)$$

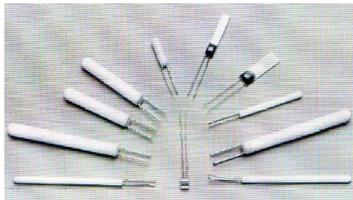
- Pequena não-linearidade
- Cobre e níquel (baixo custo)
- Platina (alto custo, inerte)



Pt100

## Elementos resistivos

- Termômetro resistor (RDT)
  - Exemplo: sondas PT100 LABFACILITY



## Elementos resistivos

- Termômetro resistor (RDT)
  - Exemplo: sondas PT100 LABFACILITY

### SPECIFICATIONS

Sensor type Unless stated all detectors are Pt100 to BS EN60751:1996, BS1904:1984, DIN 43760:1988 and IEC 751:1983  
 Ro 100 Ohms  
 Temperature range Wire wound -200 to +800°C  
 Thin film -50°C to maximum value shown below.

### Resistance v temperature and tolerances for Pt100 thermometers to IEC 751

Temperature (°C)	Resistance (Ω)	Tolerance		Temperature (°C)	Resistance (Ω)	Tolerance					
		Class A (±°C) (±Ω)	Class B (±°C) (±Ω)			Class A (±°C) (±Ω)	Class B (±°C) (±Ω)				
-200	18.52	0.55	0.24	1.3	0.56	500	280.98	1.15	0.38	2.8	0.93
-100	60.26	0.35	0.14	0.8	0.32	600	313.71	1.35	0.43	3.3	1.06
0	100.00	0.15	0.06	0.3	0.12	650	329.74	1.45	0.46	3.6	1.13
100	138.51	0.35	0.13	0.8	0.30	700	345.28	—	—	3.8	1.17
200	175.86	0.55	0.20	1.3	0.48	800	375.70	—	—	4.3	1.28
300	212.05	0.75	0.27	1.8	0.64	850	390.48	—	—	4.6	1.34
400	247.09	0.95	0.33	2.3	0.79						

## Elementos resistivos

- Termistor (PTC e NTC)
  - Relação característica não-linear:

$$R_T = K \exp\left(\frac{\beta}{T}\right)$$

ou ainda

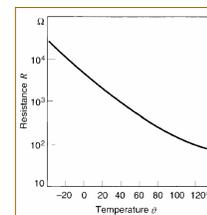
$$R_T = R_{T_1} \exp\left(\beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right]\right)$$

onde geralmente

$$T_1 = 298K \text{ (25°C)}$$

## Elementos resistivos

- Termistor (PTC e NTC)
  - Exemplo: NTCs da Bosch



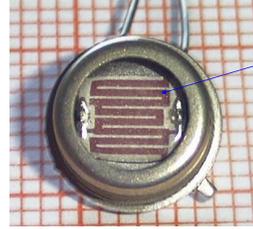
## Elementos resistivos

- Termistor (PTC e NTC)
  - Exemplo: NTCs da Bosch

Technical data			
Part number	0 280 130 026	0 280 130 093	
Measuring range	°C	-30...+130	-40...+130
Tolerance at	°C	1,2	1,2
	°C	3,4	3,4
Nominal resistance at 20 °C	kΩ	2,5 ±5 %	2,5 ±5 %
Electrical resistance at	kΩ	8,25...10,58	8,727...10,087
	°C	2,28...2,72	2,375...2,625
+80 °C	kΩ	0,290...0,364	≤ 5
Nominal voltage	V	≤ 5	≤ 5
Measured current, max.	mA	5	1
Max. power loss at	mW	15	—
ΔT = 1K and stationary air 23 °C	s	—	44
Thermal time constant	s	—	44
Guide value for permissible vibration acceleration (sinusoidal vibration)	m · s <sup>-2</sup>	600	≤ 300
Degree of protection	IP	54A	—
Corrosion-tested as per	DIN	50 018	—

## Elementos resistivos

- Resistor dependente de luz (LDR)



Material foto-condutor

$$R = \frac{R_{\text{escuro}} \cdot a\phi^{-\gamma}}{R_{\text{escuro}} + a\phi^{-\gamma}}$$

$$0,5 \leq \gamma \leq 1$$

$\phi$  : intensidade luminosa

## Elementos resistivos

- Resistor dependente de luz (LDR)
  - Exemplo: Fococélulas da Silonex

- Features
- Four photoconductive materials
  - Tolerance: ±40% @ 1 f.c. ±33% @ 2 f.c.

Electrical Characteristics (I <sub>a</sub> =25°C, source at 2854 Å)							
Silicon	Conductive Spectral	IR (1 f.c.)	IR (2 f.c.)	R <sub>0</sub> (100 f.c.)	Min. R <sub>0</sub> (100 f.c.)	Max. R <sub>0</sub> (100 f.c.)	V <sub>max</sub> (Volts)
Part No.	Material	Peak (nm)	(Kohms) (Ω)	(Kohms) (Ω)	(ohms)	(Kohms) (Ω)	(peak AG or DC)
NSL-4912			9,3		150	550	80
NSL-4922			4,0		80	250	80
NSL-4932			1,7		50	100	80
NSL-4942	Type 4		0,725		30	50	80
NSL-4952	CdS	515	40		860	2400	320
NSL-4962			17		500	1000	320
NSL-4972			7,25		260	400	320
NSL-4982			114		2500	6800	320
NSL-5912	Type 5		1,5		100	100	170
NSL-5922	CdS	550	3,0		300	200	170
NSL-5932			6,0		500	400	250
NSL-5942			0,0		700	600	250
NSL-6922	Type 6		0,510		50	300	170
NSL-6952	CdSe	690	2,7		200	720	170
NSL-9912	Type 9		11		350	3500	170
	CdS						

Specifications subject to change without notice. (1) 5 sec. after removal of test light. (2) 5 sec. after removal of test light. (3) cells light adapted at 50 to 50 f.c. for 16 hrs minimum prior to electrical tests.

## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Relação característica:

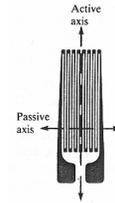
$$\frac{\Delta R}{R_0} = G \cdot e$$

Compressão:

Fator "gauge":

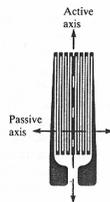
$$e = \frac{\Delta l}{l}$$

$$G = 1 + 2\nu + \frac{1}{e} \frac{\Delta \rho}{\rho}$$



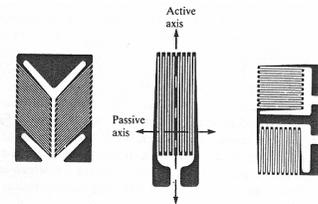
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Propriedades:
    - Baixa variação da resistência com a temperatura (ligas metálicas)
    - Baixo coeficiente linear de dilatação térmica (ligas metálicas)



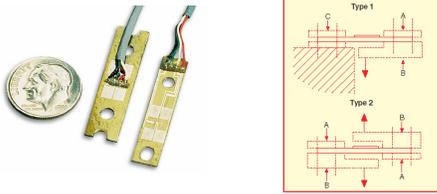
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Configurações:



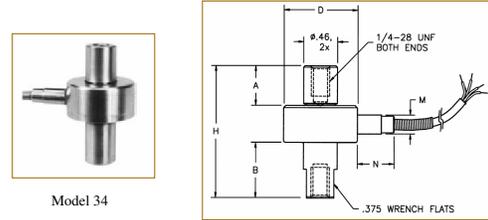
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Exemplos: Célula de carga para pequenas pressões (Omega), uso em ponte.



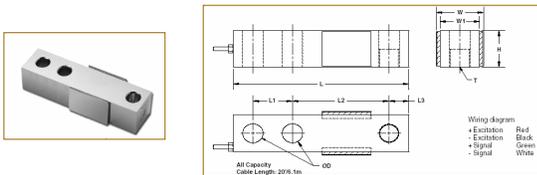
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Exemplos: Células de carga em miniatura (Sensotec)



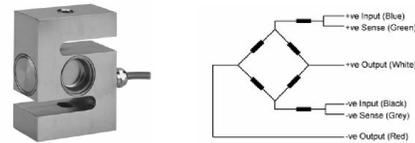
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Exemplos: Célula de carga simples (Vishay), uso em ponte.



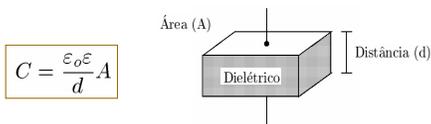
## Elementos resistivos

- Extensômetros
  - Exemplos: Célula de carga em S (Vishay), uso em ponte.



## Elementos capacitivos

- Capacitor de placas paralelas
  - Relações:

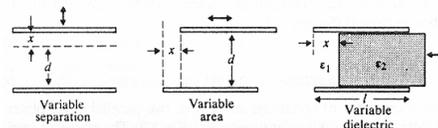


$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

$\epsilon_0$ : permissividade do vácuo

## Elementos capacitivos

- Configurações (I)



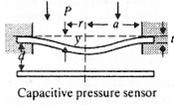
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d+x}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} (A - wx)$$

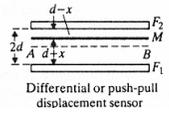
$$C = \frac{\epsilon_0 w}{d} (\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1)x)$$

## Elementos capacitivos

### ■ Configurações (II)



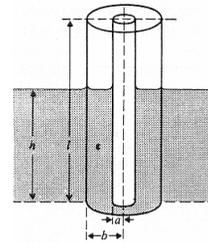
$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{(1 - \nu^2)a^4}{16Edt^3} P$$



$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d+x} A \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d-x} A$$

## Elementos capacitivos

### ■ Configurações (III)

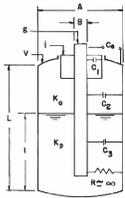


$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} (l + (\epsilon - 1)h)$$

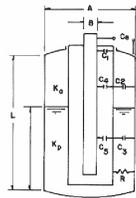
água:  $\epsilon = 80$

## Elementos capacitivos

### ■ Configurações (IV)



Líquidos isolantes

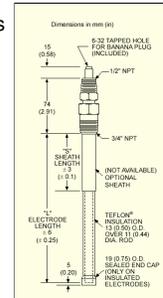


Líquidos condutores

## Elementos capacitivos

### ■ Exemplos

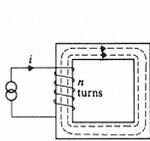
- LV5204 – sensor de nível de líquidos



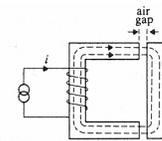
Preço: US\$224.00 (modelo LV5204-Y1-12-Z0 comprimento 12", www.omega.com)

## Elementos indutivos

### ■ Sensores de indutância/relutância variável



$$\text{Indutância: } L = \frac{n^2}{\mathcal{R}}$$

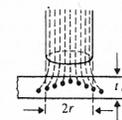
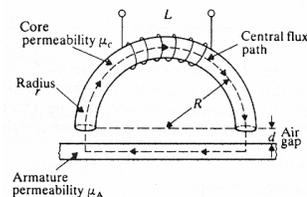


$$\text{Relutância: } \mathcal{R} = \frac{1}{\mu\mu_0 A}$$

Permeabilidade do espaço livre:  $\mu_0$

## Elementos indutivos

### ■ Sensores de indutância/relutância variável



## Elementos indutivos

- Sensores de indutância/relutância variável

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{núcleo} + \mathcal{R}_{ar} + \mathcal{R}_{armadura}$$

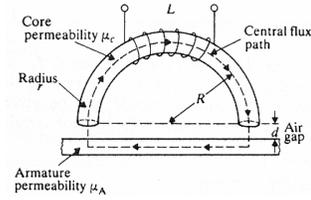
$$\mathcal{R}_{núcleo} = \frac{R}{\mu_o \mu_n r^2}$$

$$\mathcal{R}_{ar} = \frac{2d}{\mu_o \pi r^2}$$

$$\mathcal{R}_{armadura} = \frac{R}{\mu_o \mu_a r t}$$

## Elementos indutivos

- Sensores de indutância/relutância variável

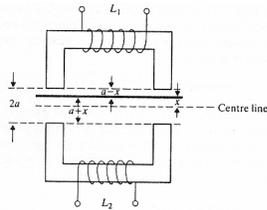


$$L = \frac{n^2}{\mathcal{R}_0 + kd}$$

$$k = \frac{2}{\mu_o \pi r^2}$$

## Elementos indutivos

- Sensores de indutância/relutância variável

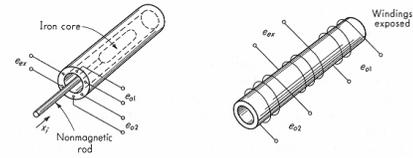


$$L_1 = \frac{L_0}{1 + k(a - x)/\mathcal{R}_0}$$

$$L_2 = \frac{L_0}{1 + k(a + x)/\mathcal{R}_0}$$

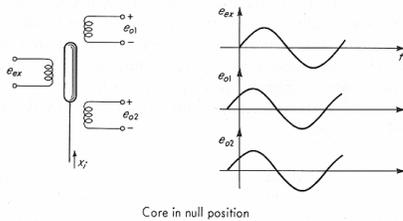
## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)



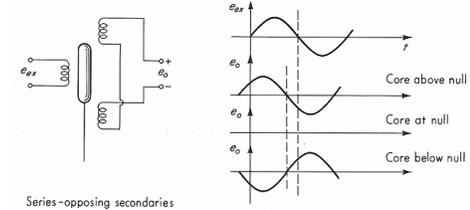
## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)



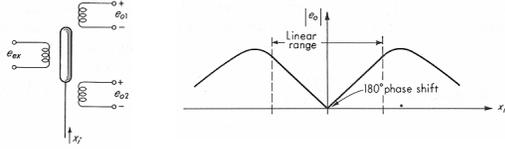
## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)



## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)



## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)
  - Exemplo: Série PR750 (Macro Sensors)

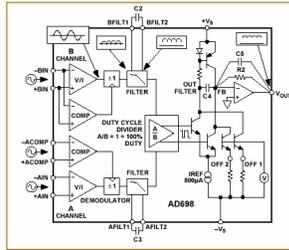
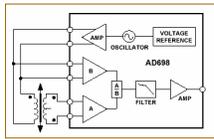


### General Specifications

<b>Input Voltage:</b>	3.0 Vrms (nominal)
<b>Input Frequency:</b>	2.5 - 3.0 kHz
<b>Linearity Error:</b>	$\leq \pm 0.25\%$ of FSO
<b>Repeatability Error:</b>	$< 0.01\%$ of FSO
<b>Hysteresis Error:</b>	$< 0.01\%$ of FSO
<b>Operating Temperature:</b>	-55 F to +220 F (-55 C to +105 C)
<b>Thermal Coefficient of Sensitivity:</b>	-0.01%/F (nominal) (-0.02%/C nominal)
<b>Vibration Tolerance:</b>	20 g to 2 kHz
<b>Shock Survival:</b>	1000 g, 11 ms

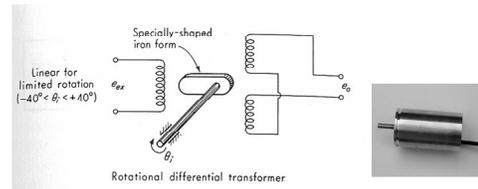
## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT)
  - Exemplo: AD698 Condicionador de sinal para LVDTs (Analog Devices)



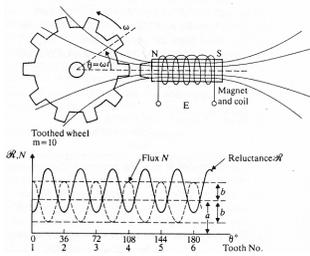
## Elementos indutivos

- Transformador Diferencial Variável Rotativo (RVDT)



## Elementos indutivos

- Sensores eletromagnéticos



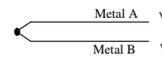
$$E = \dot{E} \sin(\omega_E t)$$

$$\dot{E} = bm\omega_r$$

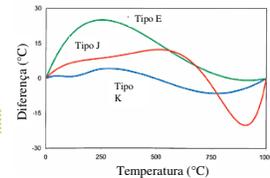
$$\omega_E = m\omega_r$$

## Elementos termoeétricos

- Termopares
  - Efeito Peltier



$$\text{Efeito Peltier: } V^+ - V^- = E_T^{AB}$$

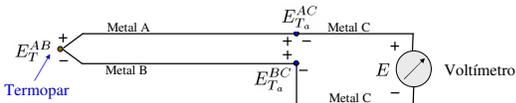


$$E_T^{AB} = a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + \dots$$

## Elementos termoeétricos

### Termopares

- Conexão direta a um voltímetro (errado)



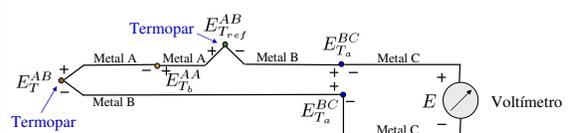
$$E = E_{T_a}^{BC} + E_T^{AB} - E_{T_a}^{AC}$$

$$E = a_1^{BC}T_a + a_2^{BC}T_a^2 + a_3^{BC}T_a^3 + \dots + a_1^{AB}T + a_2^{AB}T^2 + a_3^{AB}T^3 + \dots - a_1^{AC}T_a - a_2^{AC}T_a^2 - a_3^{AC}T_a^3 - \dots$$

## Elementos termoeétricos

### Termopares

- Conexão direta a um voltímetro (correto)



$$E = E_{T_a}^{BC} + E_T^{AB} + E_{T_b}^{AA} - E_{T_{ref}}^{AB} - E_{T_a}^{BC}$$

$$= E_{T_b}^{AB} - E_{T_{ref}}^{AB}$$

$$= a_1^{AB}(T - T_{ref}) + a_2^{AB}(T^2 - T_{ref}^2) + a_3^{AB}(T^3 - T_{ref}^3) + \dots$$

## Elementos termoeétricos

### Termopares

- Compensação da junção fria ( $E_{T_{ref}}^{AB}$ )

- Manter junção fria sob temperatura controlada (conhecida) e somar  $E_{T_{ref}}^{AB}$  à medição  $E$ .

- Usar um circuito de compensação automática, que mede a temperatura da junção fria usando outro sensor. Por aproximação, temos que

$$E_{T_{ref}}^{AB} \approx a_1^{AB}T_{ref}$$

Então, um simples amplificador somador e um sensor de temperatura ambiente podem ser usados para compensar  $E_{T_{ref}}^{AB}$ .

## Elementos termoeétricos

### Termopares

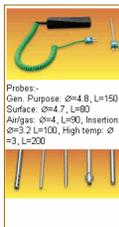
Table 8.2 Thermocouple data and characteristics (m.f. values are after British Standards Institution B.S. 4937, 1974<sup>10</sup>)

Type	Temperature ranges (°C)	E.M.F. values (µV)	Tolerances	Extension leads	Characteristics
Iron v. constantan Type J	16 v.w.g. 0-500 10 v.w.g. 0-600	$E_{100.0} = 5268$ $E_{200.0} = 10777$ $E_{300.0} = 16325$ $E_{400.0} = 21388$	0 to 300°C ±3°C above 300°C ±1%	as for thermocouple	Oxidizing and reducing atmospheres have little effect. Should be protected from moisture, oxygen and sulphur-bearing gases.
Copper v. constantan Type T	21 v.w.g. -100 to +400	$E_{100.0} = -3378$ $E_{200.0} = -4277$ $E_{300.0} = 9386$ $E_{400.0} = 20969$	0 to 100°C ±1°C above 100°C ±1%	as for thermocouple	Recommended for low and sub-zero temperatures. Resists oxidizing and reducing atmospheres up to approx 300°C. Requires protection from acid fumes.
Nickel-Chromium v. Nickel-Aluminium Classed v. Alumel Type K	16 v.w.g. 0-950°C 10 v.w.g. 0-1150	$E_{100.0} = 4095$ $E_{200.0} = 10158$ $E_{300.0} = 20490$ $E_{400.0} = 41269$	0 to 400°C ±3°C above 400°C ±0.75%	as for thermocouple	Recommended for oxidizing and inert conditions. Rapidly contaminated in sulphurous atmospheres. Not suitable for reducing atmospheres.
Platinum v. Platinum-10% rhodium Type R	0-1400 (depending on sheath)	$E_{500.0} = 3400$ $E_{600.0} = 5582$ $E_{800.0} = 9203$ $E_{1000.0} = 13224$	0 to 1100°C ±1°C 1100 to 1400°C ±2°C	Copper Copper/Nickel	Rapidly poisoned by reducing atmospheres. Particularly susceptible to many metal vapours, therefore important that non-metal sheath be used.

## Elementos termoeétricos

### Termopares

- Exemplo: termopares tipo K (LABFACILITY)



- A range of probes for general purpose, insertion, air/gas, surface, and high temperature measurement
- An economical solution to multi-application temperature measurement
- Universal handle suits range of plug-in probes
- The stainless steel probes are terminated directly with miniature thermocouple plugs allowing direct connection to thermocouple instruments and circuits or plugging in to the universal handle.
- The universal handle has a miniature socket allowing any plug-in probe to be fitted to form a complete hand-held sensor and also has an extendable coiled lead with miniature plug for connection to instruments.

Probe	Temperature	Features
General purpose	350°C (max)	General purpose probe
Surface	850°C (Max)	Spring loaded copper disc tip
Air/gas	750°C (Max)	Fast response
Insertion	350°C (Max)	Chisel tip
High temperature	1100°C (Max)	Bendable mineral insulation probe
Handle		Nylon, with 1.5cm coiled lead and miniature plug

## Elementos termoeétricos

### Termopares

- Exemplo: LT 1025 circuito de compensação de junção fria para termopares E, J, K, R, S e T (Linear Technology)

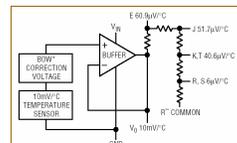
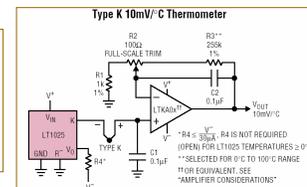


Diagrama de blocos

US\$ 4.28 (www.farnell.com)

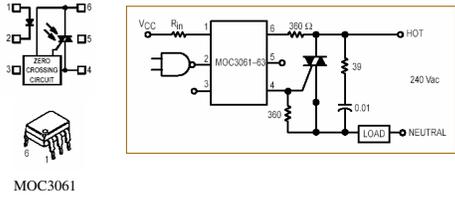


Aplicação típica



## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Opto-acopladores



MOC3061

## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Opto-acopladores



IL300

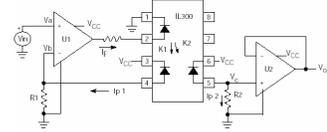
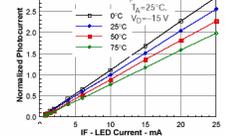
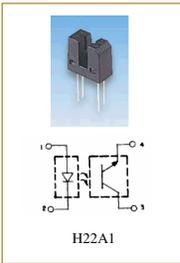


Figure 6. Normalized servo photocurrent vs. LED current and temperature

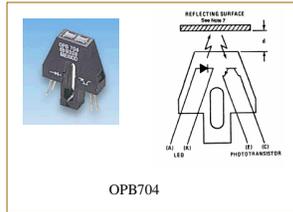


## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Chaves ópticas



H22A1



OPB704

## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Decodificador óptico absoluto



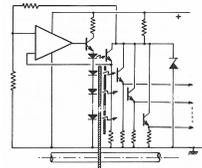
Versão encapsulada

## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Decodificador óptico absoluto



Sensor óptico e Disco codificado



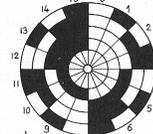
Circuito de condicionamento

## Elementos opto-eletrônicos

### ■ Decodificador óptico absoluto



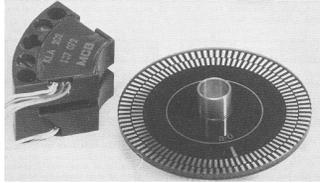
Disco codificado em binário



Disco codificado em Gray

## Elementos opto-eletrônicos

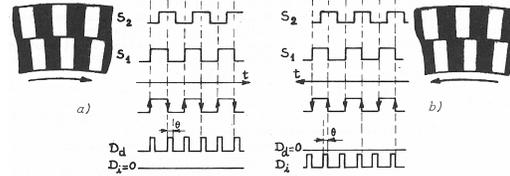
- Decodificador óptico incremental
  - Descrição



Sensor óptico e disco  
Canais A e B, e top zero (Z)

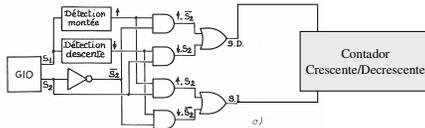
## Elementos opto-eletrônicos

- Decodificador óptico incremental
  - Descrição



## Elementos opto-eletrônicos

- Decodificador óptico incremental
  - Técnicas de medição
    - Contagem de pulsos em um intervalo



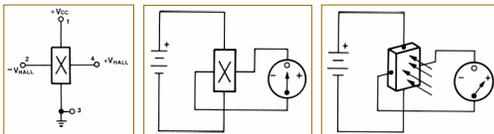
- Fácil implementação
- Velocidade proporcional ao número de pulsos
- Não tem problema de singularidade na velocidade nula
- Resolução pobre para baixas velocidades
- Baixa taxa de amostragem

## Elementos opto-eletrônicos

- Decodificador óptico incremental
  - Técnicas de medição
    - Período entre pulsos
      - Implementação mais complexa
      - Velocidade inversamente proporcional ao período
      - Problema de singularidade na velocidade nula
      - Boa resolução pobre para baixas velocidades
      - Taxa de atualização depende da faixa de velocidade de trabalho
  - Técnicas de aumento da resolução
    - Contagem nas transições de subida e de descida
    - Multiplicação de pulsos por portas XOR

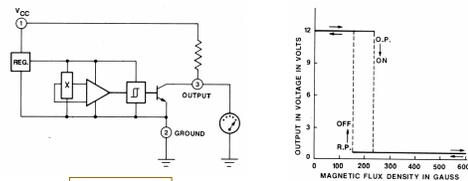
## Elementos de campo magnético

- Sensores a efeito Hall



## Elementos de campo magnético

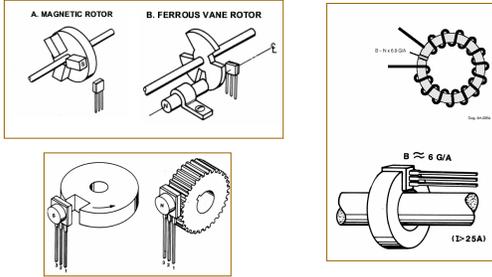
- Sensores a efeito Hall: Exemplos de aplicação



Chave simples

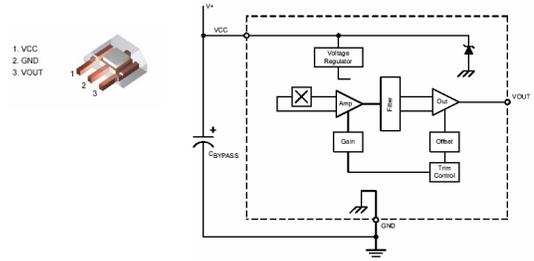
## Elementos de campo magnético

- Sensores a efeito Hall: Exemplos de aplicação



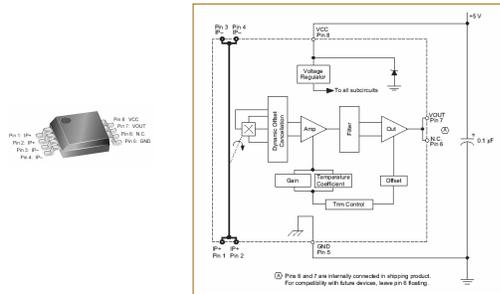
## Elementos de campo magnético

- Sensores a efeito Hall: A1301



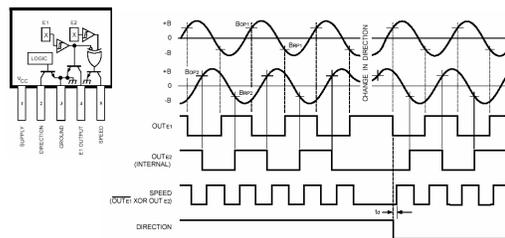
## Elementos de campo magnético

- Sensores a efeito Hall: ACS704



## Elementos de campo magnético

- Sensores a efeito Hall: A3422

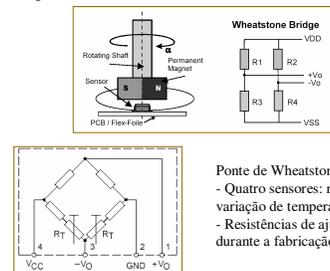


## Elementos de campo magnético

- Sensores magneto-resistivos
  - Certas ligas ferro-magnéticas possuem a propriedade de variar sua resistência sob a incidência de um campo magnético.
  - Para pequenos campos, a resistência do material varia com a magnitude e a direção do campo magnético.
  - Se o campo magnético é muito forte, o sensor satura, de modo que a resistência não é mais influenciada pela magnitude, apenas pela direção.
  - Vantagens da saturação: imunidade ao coeficiente de temperatura do ímã, insensibilidade ao espaço entre o ímã e o sensor, insensibilidade à magnitude do campo.

## Elementos de campo magnético

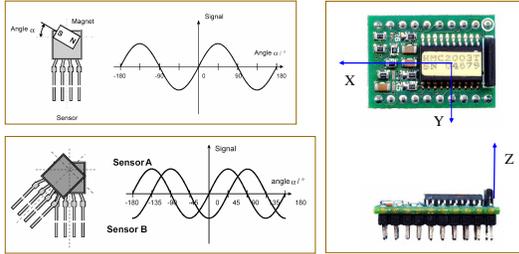
- Sensores magneto-resistivos: exemplos de aplicação.



Ponte de Wheatstone:  
 - Quatro sensores: reduzida sensibilidade a variação de temperatura.  
 - Resistências de ajuste de zero calibradas durante a fabricação

## Elementos de campo magnético

- Sensores magneto-resistivos: exemplos de aplicação.



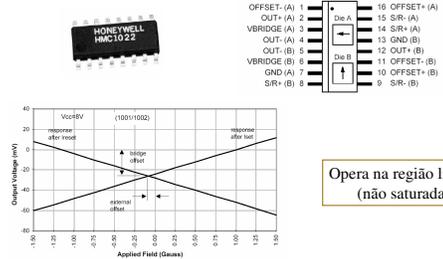
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

73

## Elementos de campo magnético

- Sensores magneto-resistivos: HCM1022 (Honeywell)



Opera na região linear (não saturada)

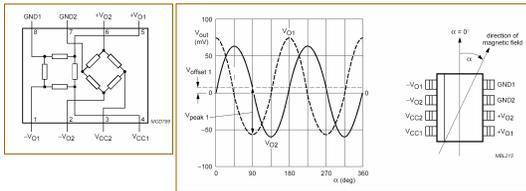
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

74

## Elementos de campo magnético

- Sensores magneto-resistivos: KMZ43T (Philips)



Opera na região de saturação Para medição de ângulo

Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

75

## Elementos piezoelétricos

- Propriedades do efeito piezo-elétrico
  - Conversão entre energias mecânica e elétrica (nos dois sentidos)
  - Aplicações: microfones, cápsulas sonoras (inclusive ultra-som)
- Propriedades do efeito piezo-resistivo
  - Conversão entre deformação mecânica e resistência elétrica
  - Aplicações: sensores de micro-força e de pressão.

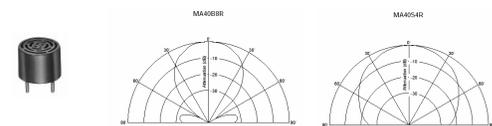
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

76

## Elementos piezoelétricos

- Elemento piezo-elétrico: MA40B8R/S (Murata)



Part Number	Construction	Using Method	Nominal Freq. (kHz)	Overall Sensitivity (mV/g)	Sensitivity (dB)	S.P.L. (dB)	Dirac (g)	Cap. (pF)	Operating Temp. Range (°C)	Detectable Range (m)	Resolu. (mm)	Max. Input Voltage (Vpp)
MA40B8R	Open struct.	Receiver	40	-	-83 typ. (0dB-10VPa)	-	50	2000	-30 to 85	-	0.2 to 6	9
MA40B8S	Open struct.	Transmitter	40	-	-	130 typ. (0dB-0.02mPa)	50	2000	-30 to 85	0.2 to 6	9	40 Continuous signal

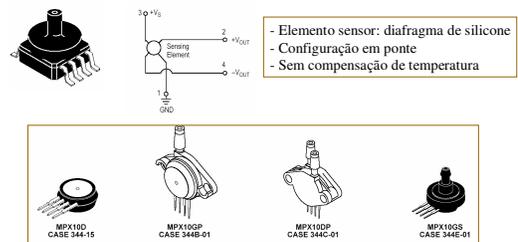
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

77

## Elementos piezoelétricos

- Elemento piezo-resistivo: MPX10 (Freescale)



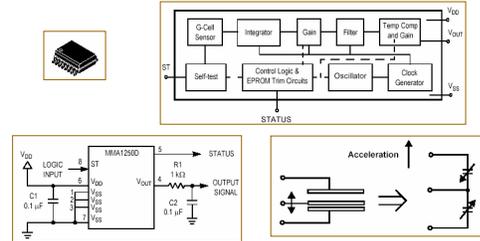
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

78

## MEMs

- **Acelerômetros: MMA1250 – acelerômetro ±5g (Freescale), com auto-teste.**



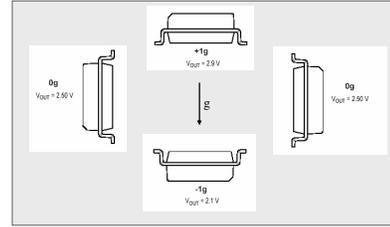
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

79

## MEMs

- **Acelerômetros: MMA1250 – acelerômetro ±5g (Freescale), com auto-teste.**



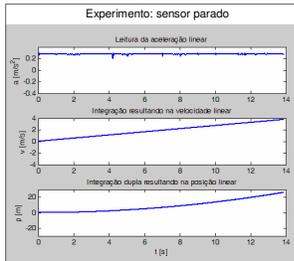
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

80

## MEMs

- **Acelerômetros: ADXL203.**



- Relação ideal:

$$\frac{dv(t)}{dt} = a(t) \quad \frac{dp(t)}{dt} = v(t)$$

- Integração (aprox. primeira ordem):

$$v(k) = v(k-1) + Ta(k)$$

$$p(k) = p(k-1) + Tv(k)$$

- Modelo de medição:

$$\frac{d^2p(t)}{dt^2} = s \cdot a(t) + b + w(t)$$

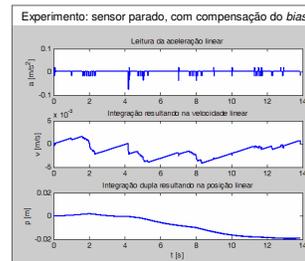
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

81

## MEMs

- **Acelerômetros: ADXL203.**



- Relação ideal:

$$\frac{dv(t)}{dt} = a(t) \quad \frac{dp(t)}{dt} = v(t)$$

- Integração (aprox. primeira ordem):

$$v(k) = v(k-1) + Ta(k)$$

$$p(k) = p(k-1) + Tv(k)$$

- Modelo de medição:

$$\frac{d^2p(t)}{dt^2} = s \cdot a(t) + b + w(t)$$

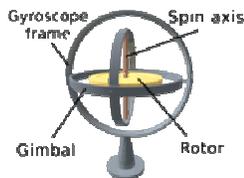
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

82

## MEMs

- **Girômetros**
  - Erroneamente chamados de giroscópios
  - Giroscópio mecânico: descrição e características



Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

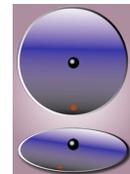
83

## MEMs

- **Girômetros**
  - Girometro eletrônico MEMs: princípio de medição
    - Força de Coriolis

Força fictícia devido ao movimento projetado de um corpo de massa  $m$  se deslocando em linha reta com velocidade  $v$  sobre uma superfície girante a uma velocidade angular  $\Omega$

$$F_C = -2m\Omega \times v$$



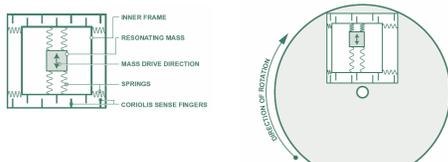
Instrumentação de Controle

Prof. Geovany A. Borges

84

## MEMs

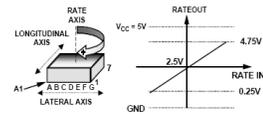
- Girômetros
  - Girômetro eletrônico MEMs: princípio de medição
    - Implementação Analog Devices



Fonte: John Geen e David Krakauer, *New iMEMS® Angular-Rate-Sensing Gyroscope*, Analog Dialogue 37-03 (2003)

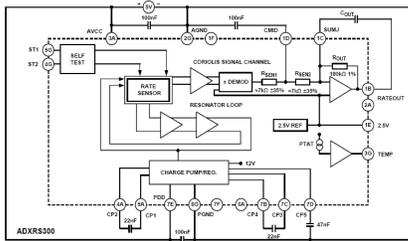
## MEMs

- Girômetros
  - Girômetro eletrônico (tecnologia MEMs): ADXRS300



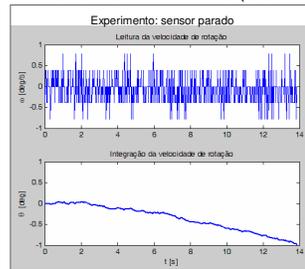
## MEMs

- Girômetros
  - Girômetro eletrônico (tecnologia MEMs): ADXRS300



## MEMs

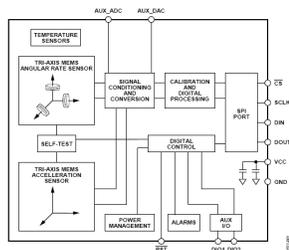
- Girômetros
  - Girômetro eletrônico (tecnologia MEMs): ADXRS300



- Relação ideal:
 
$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t)$$
- Integração (aprox. primeira ordem):
 
$$\theta(k) = \theta(k-1) + T\omega(k)$$
- Modelo de medição:
 
$$\frac{d\theta(t)}{dt} = a \cdot \omega(t) + b + v(t)$$

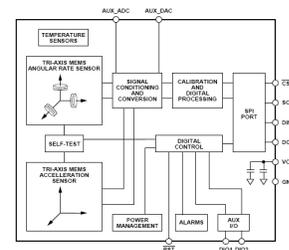
## MEMs

- Girômetros
  - Girômetro eletrônico (tecnologia MEMs): ADIS16350



## MEMs

- Girômetros
  - Girômetro eletrônico (tecnologia MEMs): ADIS16350



## Referências

- John P. Bentley, "Principles of Measurement Systems", Second Edition, Longman Scientific & Technical, 1988.
- Ernest O. Doebelin, "Measurement Systems", Third Edition, McGraw-Hill, 1983.
- Georges Asch, "Les Capteurs en Instrumentation Industrielle", Cinquième Édition, Dunod, 1999.