

**Curso de Introdução à Instrumentação em
Engenharia
Módulo Básico**

**Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo – IPT
Divisão de engenharia Mecânica
Divisão de Tecnologia de Transportes
Divisão de engenharia Civil**

Mário Gongora Rubio

São Paulo, 2000

SUMÁRIO

1.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA.....	9
1.1.	SISTEMAS DE MEDIDAS	9
1.1.1.	O QUE É INFORMAÇÃO.....	9
1.1.2.	O QUE É MEDIÇÃO	10
1.1.3.	TIPOS DE MEDIDAS	10
1.1.4.	SINAIS.....	13
1.1.4.1.	Series temporais analógicas.....	13
1.1.4.2.	Sinais periódicos.....	14
1.1.4.3.	Sinais amostrados	14
1.1.4.4.	Sinais estocásticos	15
1.1.5.	SISTEMA GERAL DE MEDIDA.....	15
1.1.6.	MODELOS E DIAGRAMAS DE BLOCOS	16
1.1.7.	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	17
2.	ASPECTOS GERAIS EM INSTRUMENTAÇÃO	18
2.1.	ÁREA DE APLICAÇÃO	18
2.2.	ASPECTOS BÁSICO DE DESEMPENHO	18
2.2.1.	PRECISÃO, EXATIDÃO E INCERTEZA E CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS	18
2.2.2.	VELOCIDADE E CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS	18
2.2.3.	CAPACIDADE	18
2.3.	ASPECTOS OPERACIONAIS	18
2.3.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS BÁSICAS.....	18
2.3.2.	CONFIABILIDADE.....	18
2.3.3.	MANUTENÇÃO.....	18
2.4.	ASPECTOS FÍSICOS	18
2.4.1.	INTERFACE ELÉTRICA	18
2.4.2.	INTERFACE MECÂNICA	19
2.4.3.	INTERFACE TÉRMICA.....	19
2.5.	ASPECTOS ECONÔMICOS	19
2.6.	ASPECTOS ERGONÔMICOS	19
2.6.1.	MOSTRADORES.....	19
2.6.2.	CONTROLES.....	19
2.6.3.	JANELA AUDITIVA E VISUAL.....	19
2.7.	TESTES DE QUALIFICAÇÃO PARA INSTRUMENTOS E SENSORES	20
3.	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE UM INSTRUMENTO.....	21
3.1.	CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DOS INSTRUMENTOS	21
3.1.1.	SENSIBILIDADE.....	21
3.1.2.	GANHO	21
3.1.3.	EXATIDÃO	21
3.1.4.	PRECISÃO	21
3.1.5.	LINEARIDADE	22
3.1.6.	AJUSTE DE DADOS EXPERIMENTAIS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	22
3.1.7.	OFFSET	23
3.1.8.	DRIFT OU DERIVA DO ZERO	23
3.1.9.	REPETIBILIDADE.....	23
3.1.10.	HISTERESE	23

3.1.11.	RESOLUÇÃO.....	24
3.1.12.	BANDA DE ERRO ESTÁTICA	24
3.1.13.	CONCEITO DE INCERTEZA.....	24
3.2.	CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DOS INSTRUMENTOS	24
3.2.1.	CONSTANTE DE TEMPO.....	24
3.2.2.	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (LARGURA DE BANDA).....	25
3.2.3.	FREQUÊNCIA NATURAL	25
3.2.4.	RAZÃO DE AMORTECIMENTO	25
3.2.5.	FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE SUB-SISTEMAS	26
3.2.6.	SISTEMA DE ORDEM ZERO	26
3.2.7.	SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM	26
3.2.8.	SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM	27
3.3.	EFEITOS DE CARGA	29
3.3.1.	CARREGAMENTO	29
3.3.2.	CARREGAMENTO ELÉTRICO	30
3.3.3.	CARREGAMENTO DE UM VOLTÍMETRO	30
3.3.4.	CARREGAMENTO DE UM POTENCIÔMETRO	31
3.3.5.	CARREGAMENTO DE UMA PONTE DE WHEATSTONE	31
3.3.6.	CARREGAMENTO DE ELEMENTOS EM UM SISTEMA DE MEDIDA	32
3.4.	RUÍDO	33
3.4.1.	FONTES DE INTERFERÊNCIA	33
3.4.2.	TIPOS DE INTERFERÊNCIA.....	33
3.4.3.	FORMAS DE REDUÇÃO DA INTERFERÊNCIA.....	33
3.4.4.	RUÍDO ALEATÓRIO	34
3.4.5.	REJEIÇÃO DE RUÍDO	35
3.4.6.	RELAÇÃO SINAL - RUÍDO	35
3.5.	ERROS	35
3.5.1.	FONTES DE ERRO	36
3.5.2.	ESTATÍSTICA DE ERRO.....	36
3.5.3.	ERRO PROVÁVEL	38
3.5.4.	ADIÇÃO DE ERROS	38
3.5.5.	EXATIDÃO DE UM SISTEMA	39
3.6.	CONFIABILIDADE EM INSTRUMENTOS	39
3.6.1.	FALHAS (MTBF)	40
3.6.2.	DISPONIBILIDADE.....	40
3.6.3.	CURVA DA BANHEIRA	40
3.6.4.	PROJETO DE SISTEMAS COM ALTA CONFIABILIDADE	41
3.6.5.	REDUNDÂNCIA	41
3.6.6.	TIPOS DE REDUNDÂNCIA EM INSTRUMENTOS.....	42
3.6.6.1.	Redundância paralela.....	42
3.6.6.2.	Redundância “Stand-by”	42
3.6.6.3.	Redundância por voto majoritário	42
4.	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE TRANSDUÇÃO.....	44
4.1.	ESTRUTURAS BÁSICAS DE TRANSDUÇÃO	44
4.1.1.	ESTRUTURA SERIE	45
4.1.2.	ESTRUTURA DIFERENCIAL.....	45
4.1.3.	ESTRUTURA DE RAZÃO.....	46
4.1.4.	ESTRUTURA DE SERVO TRANSDUÇÃO	47
5.	ELEMENTOS BÁSICOS DE SENSORIAMENTO.....	48

5.1. DOMÍNIOS DE ENERGIA	48
5.2. CONVERSÃO NOS DIVERSOS DOMÍNIOS DE ENERGIA	49
5.3. TIPOS DE TRANSDUTORES	51
5.3.1. TRANSDUTORES AUTO-GERADORES OU ATIVOS	51
5.3.2. TRANSDUTORES MODULADOS OU PASSIVOS	51
5.3.3. TRANSDUTORES INVASIVOS	51
5.3.4. TRANSDUTORES INTRUSIVOS	51
5.4. ELEMENTOS DE CONTATO	52
5.5. ELEMENTOS RESISTIVOS	52
5.5.1. ELEMENTOS RESISTIVOS DE JUNÇÃO	52
5.5.2. POTENCIÔMETROS	53
5.6. TERMO-RESISTORES	55
5.6.1. RESISTÊNCIAS METÁLICAS	55
5.6.2. TERMISTORES	56
5.7. PIEZORESISTORES E STRAIN GAGES	58
5.8. ELEMENTOS COM ELETRODOS	60
5.8.1. MEDIDA DE POTENCIAIS (PH)	61
5.8.2. CONDUTIVIDADE EM SOLUÇÕES	62
5.9. ELEMENTOS CAPACITIVOS	62
5.9.1. ESTRUTURAS USADAS PARA SENSORES CAPACITIVOS	62
5.10. ELEMENTOS INDUTIVOS	63
5.10.1. ESTRUTURAS USADAS PARA SENSORES INDUTIVOS	64
5.10.2. TACO-GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL	65
5.11. ELEMENTOS COM TRANSFORMADORES (LVDT)	65
5.12. ELEMENTOS ELETRODINÂMICOS	66
5.12.1. BOBINA MÓVEL	66
5.13. ELEMENTOS RESSONANTES	67
5.13.1. CORDAS VIBRATÓRIAS	67
5.13.2. ESTRUTURAS VIBRATÓRIAS	68
5.14. ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS	69
5.15. ELEMENTOS TERMOELÉTRICOS	70
5.15.1. TERMOPARES	70
5.16. ELEMENTOS ÓPTICOS E FOTOSENSÍVEIS	72
5.16.1. CÉLULAS FOTOCONDUCTORAS	72
5.16.2. FOTOACOPADORES	72
5.16.3. FIBRAS ÓTICAS	73
5.16.3.1. Dispositivos de obturador	74
5.16.3.2. Detecção de intensidade modulação	74
5.16.3.3. Detecção de fase modulada	75
5.16.3.4. Detecção polarização modulada	75
5.16.3.5. Detecção de frequência ótica modulada	75
5.16.3.6. Detecção de modulação de cor	75
6. TRANSDUTORES UTILIZADOS PARA MEDIDAS EM ENGENHARIA	76
6.1. MEDIDAS MECÂNICAS	77
6.1.1. MEDIDAS DE FORÇA E PESO	77
6.1.1.1. Balança de braços iguais:	78
6.1.1.2. Balanceamento de molas:	78
6.1.1.3. Balanceamento de forças:	79
6.1.2. MEDIDAS DE ACELERAÇÃO	80
6.1.2.1. Medida de aceleração medindo deformações de um corpo	80
6.1.3. MEDIDAS DE PRESSÃO	81
6.1.3.1. Manômetro tipo U	82

6.1.3.2.	Transdutor de Pressão usando Elementos Elásticos Primários.....	83
6.1.4.	MEDIDAS DE DESLOCAMENTO.....	85
6.1.4.1.	Inductosyn :	85
6.1.4.2.	Codificador ou "Encoder":.....	86
6.1.5.	MEDIDAS DE DENSIDADE.....	87
6.1.6.	MEDIDAS DE NÍVEL	87
6.1.6.1.	Medida de Nível usando Ultra-Som	88
6.1.7.	MEDIDAS DE VAZÃO.....	89
6.1.7.1.	Placa de Orifício:.....	90
6.1.7.2.	Pitot:.....	90
6.1.7.3.	Rotâmetro:	91
6.2.	MEDIDAS TÉRMICAS	92
6.2.1.	MEDIDAS DE TEMPERATURA	92
6.2.1.1.	Lâminas bimetálicas:	92
6.2.1.2.	Dispositivos semicondutores de junção:.....	93
6.3.	MEDIDAS ELÉTRICAS	94
6.3.1.	MEDIDAS DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA	94
6.3.1.1.	Medida de Tensão DC:	94
6.3.1.2.	Medida de corrente DC.....	95
6.3.1.3.	Medida de tensão AC.....	95
6.3.1.4.	Multímetro Digital.....	96
6.3.1.5.	Medida de Potência.....	96
6.3.2.	MEDIDAS DE FREQUÊNCIA.....	97
6.4.	MEDIDAS DE RADIAÇÃO LUMINOSA	98
6.4.1.	FOTODIODOS	99
6.4.2.	FOTODETETORES SENSITIVOS A POSIÇÃO.....	100
6.5.	MEDIDAS QUÍMICAS	100
6.5.1.	MEDIDAS ANALÍTICAS (TÉCNICAS DE VOLTAMETRIA).....	101
6.5.2.	MEDIDAS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (ESPECTROSCÓPIO DE MASSA).....	101
6.6.	MEDIDAS MAGNÉTICAS	102
6.6.1.	MEDIDAS COM EFEITO HALL.....	102

7. ESTRUTURAS BÁSICAS DE CONDICIONAMENTO ANALÓGICO DE SINAIS PARA INSTRUMENTAÇÃO **103**

7.1.	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS	103
7.2.	FONTES E REFERÊNCIAS	103
7.2.1.	FONTES E REFERÊNCIAS DE TENSÃO.....	103
7.2.2.	FONTES DE CORRENTE.....	105
7.3.	PONTES	105
7.3.1.	PONTE DE WHEATSTONE.....	105
7.4.	AMPLIFICADORES	107
7.4.1.	AMPLIFICADOR INVERSOR	107
7.4.2.	AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR	107
7.4.3.	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	108
7.4.4.	AMPLIFICADOR DE CARGA	108
7.5.	DEMODULAÇÃO SÍNCRONA A FASE (PSD)	109
7.6.	CONVERSORES	112
7.6.1.	CONVERSOR TENSÃO/CORRENTE	112
7.6.2.	CONVERSOR AC/DC	113
7.6.3.	CONVERSOR RMS	113
7.6.4.	CONVERSOR TENSÃO/FREQUÊNCIA	114
7.6.5.	CONVERSOR FREQUÊNCIA/TENSÃO.....	115
7.7.	FILTROS ANALÓGICOS	115

7.7.1.	FILTRO PASSA BAIXA.....	115
7.7.2.	FILTRO PASSA ALTA	116
7.8.	GERADORES DE SINAL	116
7.8.1.	ONDA SENOIDAL (PONTE DE WIEN).....	116
7.8.2.	ONDA QUADRADA (555).....	117
7.9.	CIRCUITOS DE LINEARIZAÇÃO	118
7.9.1.	LINEARIZAÇÃO USANDO UM CONVERSOR LOGARÍTMICO	118
7.9.2.	LINEARIZAÇÃO USANDO UM MULTIPLICADOR ANALÓGICO.....	119
7.10.	OUTROS ELEMENTOS PARA PROCESSAMENTO ANALÓGICO DE SINAIS	120
7.10.1.	SOMADORES	120
7.11.	TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE RUÍDO EM INSTRUMENTAÇÃO	121
7.11.1.	TIPOS DE ACOPLAMENTO.....	121
7.11.1.1.	Acoplamento capacitivo.....	121
7.11.1.2.	Acoplamento indutivo.....	121
7.11.2.	CONEXÕES DE ATERRAMENTO	122
7.11.3.	CONEXÃO DE CABOS BLINDADOS	123

8. CIRCUITOS DIGITAIS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE EM INSTRUMENTAÇÃO..... 125

8.1.	CONTADORES	125
8.2.	PORTAS DE E/S DIGITAIS	126
8.3.	COMPARADORES E CHAVES ANALÓGICAS	127
8.3.1.	COMPARADORES	127
8.3.2.	CHAVES ANALÓGICAS	127
8.4.	CIRCUITOS SAMPLE/HOLD	128
8.5.	MULTIPLEXADORES ANALÓGICOS	129
8.6.	CONVERSORES D/A	130
8.6.1.	CONVERSOR A/D COM REDE RESISTÍVA PONDERADA.....	130
8.6.2.	CONVERSOR D/A TIPO REDE R-2R.....	131
8.7.	CONVERSORES A/D	131
8.7.1.	CONVERSORES A/D TIPO FLASH	131
8.7.2.	CONVERSOR A/D POR APROXIMAÇÕES SUCESSIVAS	132
8.8.	SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	133
8.9.	SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS USANDO REDE ETHERNET	135

9. TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS PARA INSTRUMENTAÇÃO..... 135

TÉCNICAS ANALÓGICAS DE TENSÃO E CORRENTE,	135
TÉCNICAS ANALÓGICAS POR TRANSMISSÃO DE FREQUÊNCIA E DIVERSAS MODULAÇÕES	135
TÉCNICAS DIGITAIS PARALELAS E SERIAIS	135
BARRAMENTOS PARA INSTRUMENTAÇÃO	135
TÉCNICAS DE RÁDIO-TELEMETRIA ANALÓGICA E DIGITAL	135

10. SISTEMAS COMPUTADORIZADOS PARA INSTRUMENTAÇÃO..... 136

SISTEMA TÍPICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS	136
SISTEMA IEE-488	136
SISTEMAS FIELD BUS	136
INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	136
SISTEMAS ORIENTADOS À INTERNET	136

**11. MÉTODOS BÁSICOS DE TRATAMENTO DE DADOS E USO DE SOFTWARES
COMERCIAIS PARA PROCESSAMENTO E APRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES..... 136**

EXCEL	136
MATLAB	136
SCILAB	136
MAPLE	136

12. BIBLIOGRAFIA..... 137

Introdução

Este curso pretende fornecer os conceitos básicos para a prática da Instrumentação Eletrônica em Engenharia, para isto apresenta-se de forma sucinta e simplificada dentro do possível os termos e conceitos que na nossa opinião são relevantes para-se obter uma noção clara desta disciplina.

A idéia principal deste texto(ainda não está na forma de apostila) é fornecer aos participantes do curso a informação básica para poderem acompanhar o desenvolvimento dos conceitos apresentados em aula

Este texto mostra os diversos conceitos teóricos, alguns tipos de transdutores e métodos de medida existentes, noções sobre condicionamento de sinais e processamento de informações normalmente usados em Instrumentação Eletrônica.

1. Fundamentos teóricos da Instrumentação eletrônica

1.1. Sistemas de medidas

Existe a necessidade do ser humano de obter informações do meio ambiente, A partir destas informações será possível modelar os fenômenos observados,

- Em engenharia a maioria das informações são obtidas de forma experimental.

Na Figura 1 apresenta-se um sistema generalizado de Pesquisa Experimental em Engenharia.

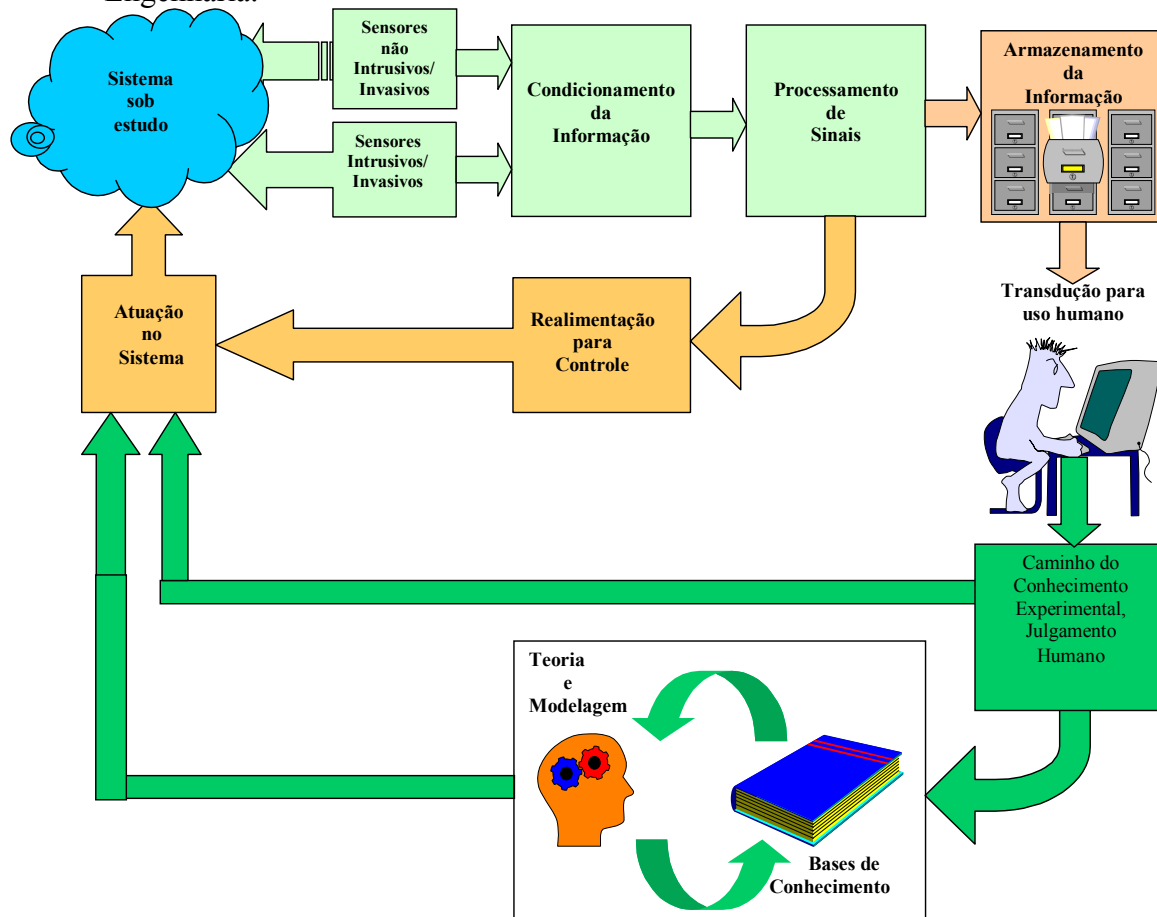


Figura 1 Sistema generalizado de Pesquisa Experimental em Engenharia

1.1.1. O que é informação

- Informação é aquilo que gera um significado na mente humana modificando nosso conhecimento.

O termo informação tem dois usos principais:

- Em linguagem comum ela relaciona uma coleção de fatos, idéias, entidades, conceitos e atributos que definem um sujeito ou objeto. (Ex. Enciclopédia).
- Em teoria de informação se refere à quantidade transferida numa mensagem passando por um canal de comunicação.
- Em Instrumentação aplicam-se os dois conceitos já que nos sistemas de medidas deve-se mapear a variável (isto é codificar a medida) e ainda transmiti-la através de um canal de comunicação.

- Nas ciências naturais a informação pode ser quantificada, definido-se a menor quantidade de informação (Ex. bit), ela pode ser representada de diversas formas, mas sempre limitada a um certo tipo de portador de energia ou massa.
- Existem cinco diferentes tipos de portadores de energia:
 1. Radiação
 2. Energia elétrica ou magnética
 3. Calor
 4. Energia Química
 5. Energia Mecânica.

1.1.2. O que é medição

- É o processo empírico e objetivo de designação de números a propriedades de objetos ou eventos do mundo real de forma a descreve-los.
- Outra forma de explicar este processo é comparando a quantidade ou variável desconhecida com um padrão definido para este tipo de quantidade, implicando então num certo tipo de escala, como mostrado pela Figura 2.

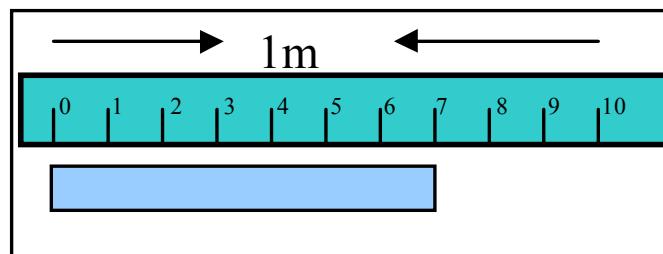
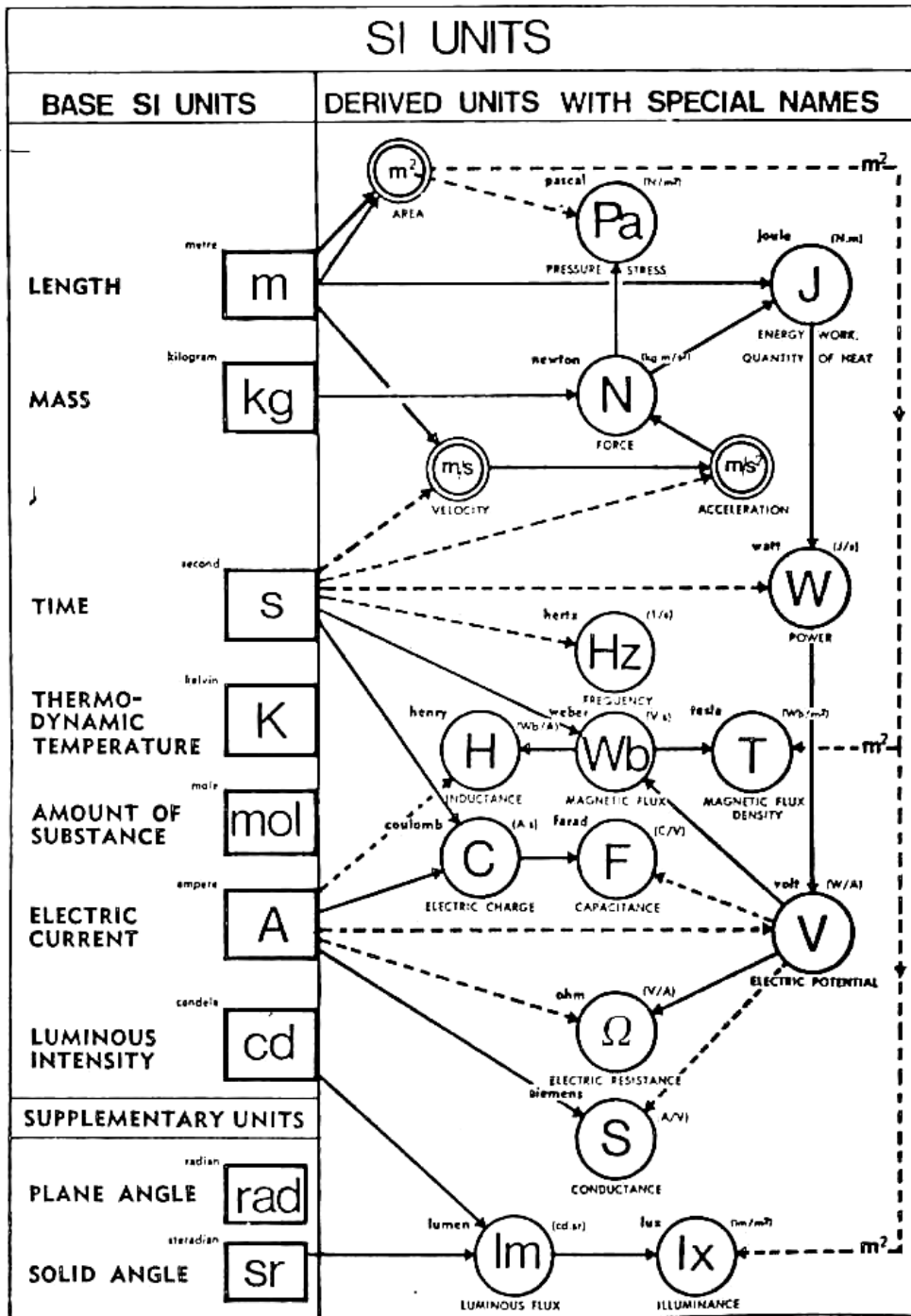


Figura 2 Representação de medição através de comparação

1.1.3. Tipos de medidas

- Medida Nominal: Quando duas quantidades do mesmo tipo são comparadas para saber se são iguais (Ex. duas cores, acidez de dois líquidos)
- Medida Ordinal: Quando é necessário ter informação a tamanhos relativos (Ex. Classificação por peso e altura de uma turma)
- Medida em Intervalos: Quando deseja-se uma informação mais específica, envolve-se então uma certa escala, sem incluir pontos de referência ou zero. (Ex. no caso anterior usar a escala de metros e quilogramas)
- Medidas Normalizadas: Define-se um ponto de referência e realiza-se a razão, dividindo cada medida pelo valor de referência, determinando as magnitudes relativas. (Ex. O maior valor obtido será 1, quando foi escolhido como referência o valor máximo medido).
- Medidas Cardinais: O ponto de referência é comparado com um padrão definido. Assim todo parâmetro físico pode ser medido contra uma referência padrão, como o Sistema Internacional de medidas SI.

Na Figura 3 representa o sistema internacional de unidades com as unidades básicas e as derivadas.



Legend Dotted lines indicate division, Unbroken lines indicate multiplication.

Figura 3 Sistema Internacional de Unidades

Na Tabela 1 a seguir apresentam-se as unidades legais do SI, agrupadas em unidades de:

- Espaço e tempo
- Mecânica e acústica
- Temperatura e calor
- Eletricidade magnetismo e luz
- Radiatividade, radiações ionizantes e física molecular

Tabela 1 Unidades legais do Sistema Internacional (S.I.)

Les unités de mesure légales en Suisse				
Grandeurs	Unités SI	Autres unités légales ¹⁾	Relation entre des unités légales	Unités n'étant plus autorisées ¹⁾
Espace et temps				
Longueur	m (mètre)			1 fm (Fermi) = 10 ⁻¹⁵ m 1 Å (ångström) = 10 ⁻¹⁰ m 1 mi (mille marin) = 1,852 km 1 UA (unité astron.) = 1,496 · 10 ¹¹ m 1 pc (parsec) = 3,0857 · 10 ¹⁶ m
Surface	m ² (mètre carré)	a (are), ha (hectare)	1 a = 100 m ² ; 1 ha = 10 000 m ²	1 b (barn) = 10 ⁻²⁸ m ²
Volume	m ³ (mètre cube)	l, L (litre)	1 l = 1 dm ³	
Angle plan	rad (radian)	° (degré), ' (minute), '' (seconde)	1 rad = 1 m/m 1° = (π/180) rad; 1' = 1°/60 1'' = 1'/60	1 gon = (π/200) rad
Angle solide	sr (stéradian)		1 sr = 1 m ² /m ²	
Temps	s (seconde)	min (minute), h (heure), d (jour)	1 min = 60 s; 1 h = 3 600 s 1 d = 86 400 s	
Vitesse	m/s	km/h	1 km/h = 0,277 8 m/s	1 M (mach) = env. 340 m/s 1 nœud = 0,514 444 m/s
Accélération	m/s ²			1 Gal = 10 ⁻² m/s ²
Fréquence	Hz (hertz)	1/s	1 Hz = 1/s	
Nombre de tours	1/s	1/min	1/s = 1 s ⁻¹ 1/min = 1 min ⁻¹ = (1/60) s ⁻¹	
Mécanique et acoustique				
Masse	kg (kilogramme)	g (gramme), t (tonne), u (unité de masse atomique), ct (carat métrique)	1 t = 1000 kg; 1 ct = 0,2 g 1 u = 1,660 565 5 · 10 ⁻²⁷ kg	1 q (quintal) = 100 kg
Masse linéique	kg/m	tex	1 tex = 10 ⁻⁶ kg/m = 1 g/km	1 den (denier) = 1/9 · 10 ⁻⁶ kg/m
Masse volumique	kg/m ³			
Quantité de mouvement	kg · m/s		1 kg · m/s = 1 N · s	
Moment d'inertie	kg · m ²			1 kp · m · s ² = 9,806 65 kg · m ²
Force	N (newton)		1 N = 1 kg · m/s ²	1 kp = 1 kgf = 1 kg ^a = 9,806 65 N 1 dyn = 10 ⁻⁵ N
Moment d'une force	N · m			1 kp · m = 9,806 65 N · m
Contrainte mécanique	N/m ²			1 kp/cm ² = 9,806 65 N/cm ²
Pression	Pa (pascal)	bar, mm Hg (millimètre de mercure) ²⁾	1 Pa = 1 N/m ² 1 bar = 10 ⁵ Pa 1 mm Hg = 1,333 22 · 10 ² Pa	1 at = 1 kp/cm ² = 0,980 665 bar 1 atm = 760 Torr = 1,013 25 bar 1 Torr = 1,333 22 mbar 1 barye = 0,1 Pa 1 pz (pièze) = 10 ³ Pa
Niveau de pression acoustique	Pa/Pa	dB (décibel)	Niveau de pression acoustique [dB] = 20 · log $\frac{\text{pression acoustique } [\mu\text{Pa}]}{20 \mu\text{Pa}}$	
Energie, travail, quantité de chaleur	J (joule)	kWh (kilowattheure), eV (électronvolt)	1 J = 1 N · m = 1 W · s 1 kWh = 3,6 MJ 1 eV = 1,602 189 · 10 ⁻¹⁹ J	1 cal = 4,186 8 J (cal int.) 1 kp · m = 9,806 65 J 1 CV · h = 2,647 8 MJ 1 erg = 10 ⁻⁷ J 1 th (thermie) = 4,185 5 MJ 1 SKE = 29,307 6 MJ
Puissance, débit thermique	W (watt)		1 W = 1 J/s = 1 N · m/s = 1 V · A	1 CV = 75 kp · m/s = 0,735 499 kW 1 kcal/h = 1,163 W
Niveau de puissance acoustique	W/W	dB (décibel)	Niveau de puissance acoustique [dB] = 10 · log $\frac{\text{puissance acoustique } [\text{W}]}{10^{-12} \text{ W}}$	
Viscosité dynamique	Pa · s		1 Pa · s = 1 N · s/m ²	1 P (poise) = 10 ⁻¹ Pa · s
Viscosité cinématique	m ² /s			1 St (stokes) = 10 ⁻⁴ m ² /s

Température et chaleur			
Température	K (kelvin)	°C (degré Celsius)	temp. [°C] = temp. [K] - 273,15 différence de temp.: 1°C = 1 K
Capacité thermique, entropie	J/K		1 kcal/°C = 4,186 8 kJ/K 1 Cl (clausius) = 4,186 8 J/K
Chaleur massique	J/(kg·K)		1 kcal/(kg·°C) = 4,186 8 kJ/(kg·K)
Energie int. massique	J/kg		1 kcal/kg = 4,186 8 kJ/kg
Conductivité therm.	W/(m·K)		1 kcal/(h·m·°C) = 1,163 W/(m·K)
Coefficient de transmission thermique	W/(m²·K)		1 kcal/(h·m²·°C) = 1,163 W/(m²·K)
Electricité, magnétisme et lumière			
Courant électrique	A (ampère)		
Charge électrique	C (coulomb)	A·h	1 C = 1 A·s; 1 A·h = 3600 C
Tension électrique	V (volt)		1 V = 1 W/A
Résistance électrique	Ω (ohm)		1 Ω = 1 W/A
Conductance électrique	S (siemens)		1 S = 1/Ω
Capacité électrique	F (farad)		1 F = 1 C/V
Flux d'induction magnétique	Wb (weber)		1 Wb = 1 V·s = 1 W·s/A 1 Mx (maxwell) = 10 ⁻⁸ Wb
Induction magnétique	T (tesla)		1 T = 1 Wb/m² 1 G (gauss) = 10 ⁻⁴ T
Inductance	H (henry)		1 H = 1 Wb/A
Intensité du champ magnétique	A/m		1 Oe (oersted) = 79,577 5 A/m
Intensité lumineuse	cd (candela)		1 IK (bougie intern.) = 1,019 cd 1 NK (nouvelle bougie) = 1 cd
Luminance	cd/m²		1 sb (stilb) = 10 ⁸ cd/m² 1 asb (aposilb) = (1/π) cd/m² 1 La (lambert) = (1/π) · 10 ⁴ cd/m²
Flux lumineux	lm (lumen)		1 lm = 1 cd·sr
Eclairement lumineux	lx (lux)		1 lx = 1 lm/m²
Radioactivité, radiations ionisantes et physique moléculaire			
Radioactivité	Bq (becquerel)	Ci (curie) ³¹	1 Bq = 1/s; 1 Ci = 37 · 10 ⁹ Bq
Dose absorbée	Gy (gray)	rd (rad) ³¹	1 Gy = 1 J/kg 1 rd = 0,01 Gy
Equivalent de dose	Sv (sievert)	rem (rem) ³¹	1 Sv = 1 J/kg 1 rem = 0,01 Sv
Exposition	C/kg	R (röntgen) ³¹	1 R = 0,000 258 C/kg
Quantité de matière	mol (mole)		
Masse molaire	kg/mol		

¹⁾ dans les transactions commerciales et les services de droit publique
²⁾ est également autorisé à côté du Pa dans le domaine de la santé publique
³⁾ est également autorisé en radioprotection et en médecine

1.1.4. Sinais

Nenhuma informação pode ser carregada desde uma fonte a um receptor sem algum transporte de energia ou massa, esta informação, vem como uma mudança de estado ou modulação da portadora de energia ou massa, isto é chamado de sinal.

Sinais então podem tomar a forma de variações de parâmetros, como pressão, deflexão de um feixe de luz, deslocamentos mecânicos, etc. Quatro tipos de sinais podem ser identificadas:

1.1.4.1. Series temporais analógicas

Sinais cuja amplitude ou frequência varia analógicamente no tempo, veja Figura 4.

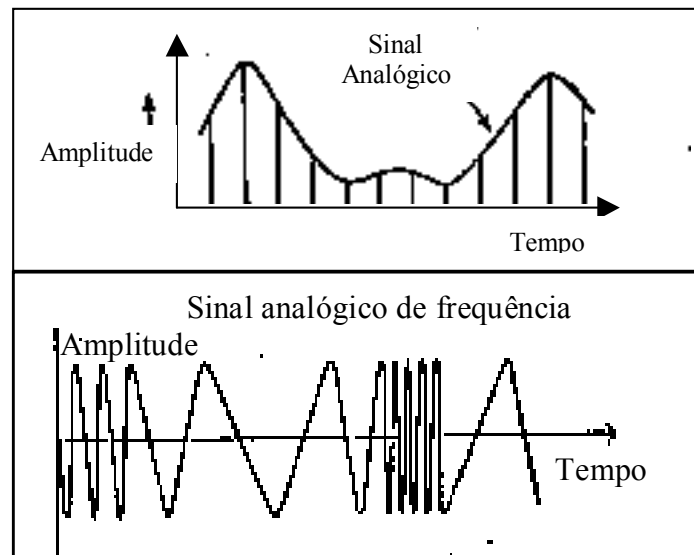


Figura 4 Sinais temporais analógicos em amplitude e frequência

1.1.4.2. Sinais periódicos

São sinais que podem transportar a informação através de uma modulação analógica da amplitude, frequência ou fase da portadora, veja Figura 5.

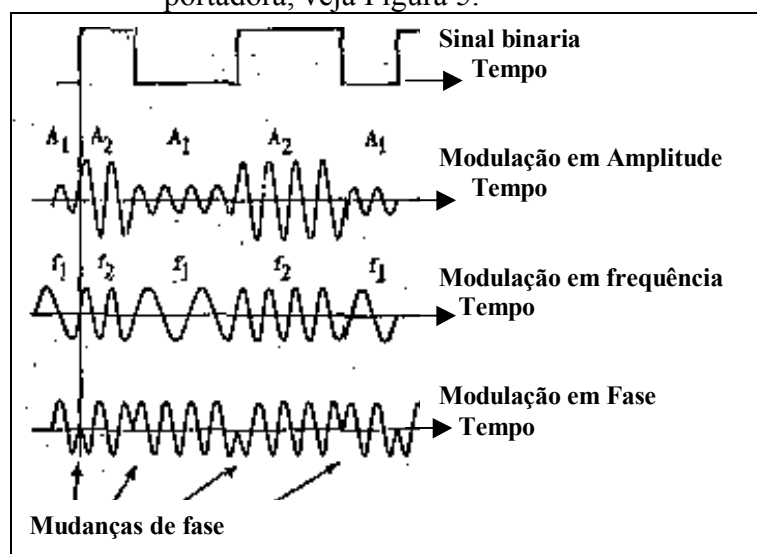


Figura 5 Sinais periódicos modulados em amplitude, frequência e fase

1.1.4.3. Sinais amostrados

São sinais que possuem valores discretos equidistantes no tempo, estes sinais podem ser multiplexados temporalmente podem realizar diversos tipos de modulação como:

- PAM (Modulação por amplitude de pulso)
- PWM (Modulação por largura de pulso)
- PPM (Modulação pela posição do pulso)
- PCM (Modulação por pulso codificado)
- A/D (Conversão analógica/Digital)

Veja na Figura 6 e Figura 7 .

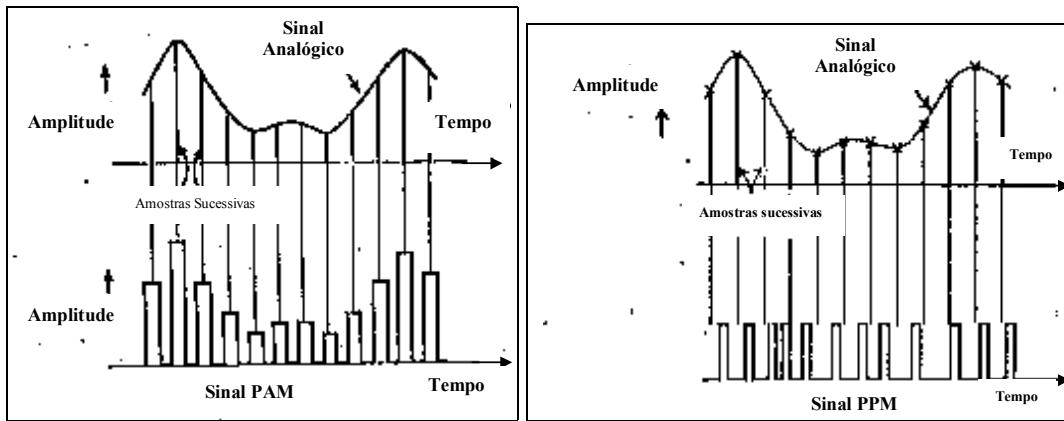


Figura 6 Sinais amostrados tipo PAM e PPM

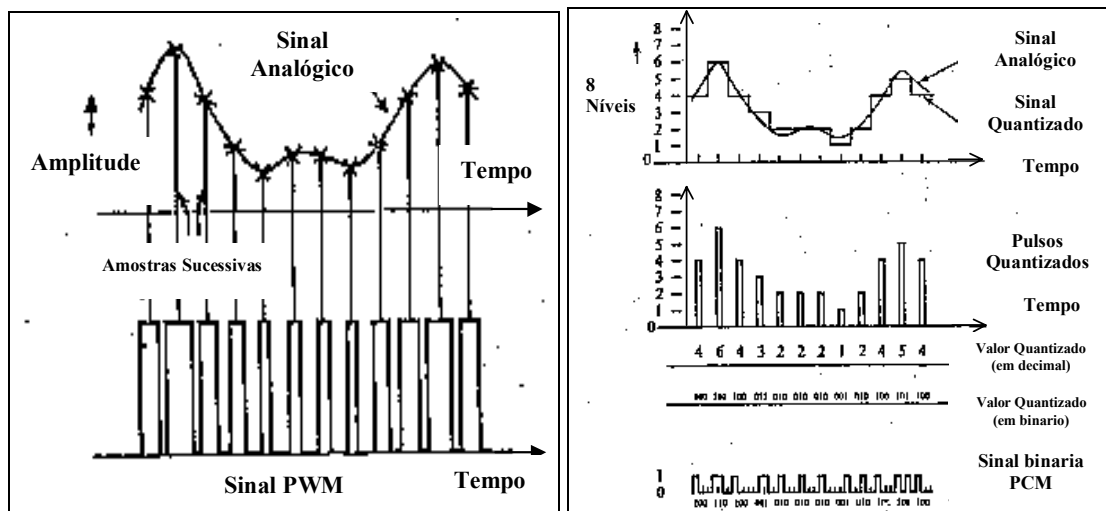


Figura 7 Sinais amostrados tipo PWM, PCM e A/D

1.1.4.4. Sinais estocásticos

Neste caso o valor instantâneo do sinal é descrito por uma função densidade de probabilidade em relação ao espaço e tempo. (Ex. ruído branco)

1.1.5. Sistema geral de medida

Os sistemas de medidas apresentam geralmente três elementos constituintes, mostrado na Figura 8:

- Elementos sensores
- Conversores de sinais
- Elementos mostradores ou atuadores

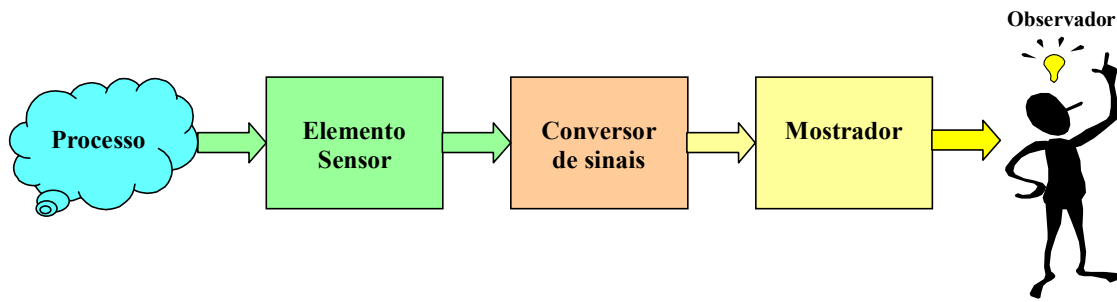


Figura 8 Forma geral de um sistema de medidas

1.1.6. Modelos e diagramas de blocos

Sistemas e instrumentos quando subdivididos, podem ser modelados de forma simples usando as equações constitutivas dos sub-sistemas, analogias físicas e diagramas de blocos para a sua representação veja Tabela 3.

Na Tabela 2 a seguir verifica-se uma analogia entre as variáveis mecânicas e elétricas

Tabela 2 Analogia entre variáveis mecânicas e elétricas

Survey of electromechanical analogies				
Electrical system	Mechanical system			
	Translation		Rotation	
	direct	indirect	direct	indirect
i	F	v	M	ω
u	v	F	ω	M
R	$\frac{1}{k}$	k	$\frac{1}{k}$	k
C	m	$\frac{1}{m}$	θ	$\frac{1}{\theta}$
L	$\frac{1}{C}$	C	$\frac{1}{C}$	C

Tabela 3 Símbolos para diagramas de blocos

Symbols for block diagrams					
Function	Branch	Summation	Subtraction	Sign inversion	General system
Symbol					
Equation	$y_1 = y_2 = x$	$y = x_1 + x_2$	$y = x_1 - x_2$	$y = -x$	$y = f(x, t)$
Function	Constant factor	Integrator	Non-linear system	Root calculation	Multiplier
Symbol					
Equation	$y = kx$	$y = \int x dt$	$y = f(x)$	$y = \sqrt[n]{x}$	$y = x_1 \cdot x_2$

1.1.7. Função de transferência

Em condições de estado estacionário define-se função de transferência de um sistema como a razão entre o sinal de saída Θ_o e o de entrada Θ_i

$$G = \frac{\Theta_o}{\Theta_i}$$

De acordo com o diagrama de blocos anterior para cada elemento constituinte do sistemas teremos uma função de transferência própria, assim, veja Figura 9:

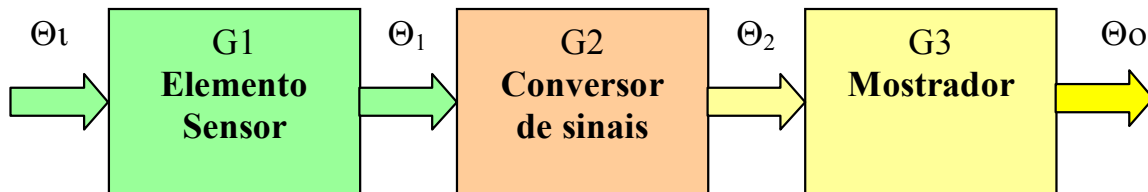


Figura 9 Funções de transferência do sistema de medidas

Desta forma teremos que as funções de transferência do elemento sensor (G1), conversor de sinais (G2) e elemento mostrador (G3) serão:

$$G_1 = \frac{\Theta_1}{\Theta_i}; G_2 = \frac{\Theta_2}{\Theta_1}; G_3 = \frac{\Theta_o}{\Theta_2}$$

A função de transferência do sistema pode-se escrever assim:

$$G = \frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{\Theta_1}{\Theta_i} \cdot \frac{\Theta_2}{\Theta_1} \cdot \frac{\Theta_o}{\Theta_2}$$

Ou seja:

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3$$

Então: **Um sistema com blocos em serie** apresenta uma função de transferência que é o **produto das funções de transferência individuais dos blocos.**

2. Aspectos Gerais em Instrumentação

As características gerais de um instrumento se manifestam nas especificações através dos seguintes aspectos:

- Aplicação
- Desempenho
- Operação
- Físico
- Econômico

2.1. Área de aplicação

É a área técnica para a qual o instrumento é adequado, (Ex. Análise experimental de tensões, Química analítica ou foto - elasticidade).

2.2. Aspectos básico de desempenho

2.2.1. Precisão, exatidão e incerteza e características estáticas

São características estáticas dos instrumentos, serão descritas adiante

2.2.2. Velocidade e características dinâmicas

São características dinâmicas dos instrumentos, serão descritas adiante

2.2.3. Capacidade

Limites físicos típicos e máximos de desempenho do instrumento

2.3. Aspectos operacionais

2.3.1. Características Físicas básicas

As características físicas de um instrumento devem incluir:

- Configuração física, dimensional, massa e volume
- Requerimentos de transporte e armazenamento
- Critérios de segurança e saúde para o operador

2.3.2. Confiabilidade

Este aspecto trata da probabilidade de um instrumento fazer uma certa função sob certas condições ou seja a probabilidade de não falhar em um certo tempo, parâmetros com MTBF usualmente são fornecidos.

2.3.3. Manutenção

Caso o instrumento falhe qual a probabilidade que num certo intervalo de tempo o instrumento possa ser concertado

2.4. Aspectos físicos

2.4.1. Interface Elétrica

As características da interface elétrica de um instrumento devem incluir:

- Potência
- Comunicações
- Compatibilidade electromagnética

2.4.2. Interface mecânica

As características da interface mecânica de um instrumento devem incluir:

- Características mecânicas típicas do instrumento
- Métodos de montagem do instrumento

2.4.3. Interface Térmica

As características da interface mecânica de um instrumento devem incluir:

- Necessidades do instrumento para remoção de calor
- Controle de temperatura interno ou externo

2.5. Aspectos econômicos

Dentre os aspectos econômicos a serem tomados em conta destacamos:

- Custo inicial
- Custo operacional
- Custo de instalação
- Peças de reposição

2.6. Aspectos Ergonômicos

A ergonomia tem como objetivos básicos:

- Criar boas condições de trabalho
- Realizar uma interface Homem - Máquina adequada
- Apresentar informações de forma a permitir sua correta interpretação
- Posicionar e implementar mecanismos de controle adequados ao ser humano

2.6.1. Mostradores

Os mostradores devem permitir:

- A apresentação de informação quantitativa
- A apresentação de informação qualitativa
- A apresentação de informações de “Status”
- A apresentação de informações de forma gráfica
- A apresentação de informações de forma alfanumérica ou simbólica

2.6.2. Controles

Os controles devem permitir:

- A introdução de informações quantitativas
- A introdução de informações alfanuméricas ou simbólicas
- A introdução de controles de emergência

2.6.3. Janela auditiva e visual

O ser humano apresenta limitações sensoriais que devem ser respeitadas, veja Figura 10:

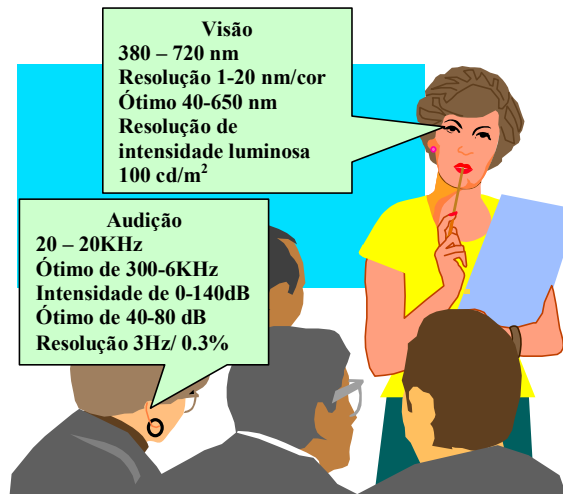


Figura 10 Limitação da visão e audição do ser humano.

2.7. Testes de qualificação para instrumentos e sensores

O objetivo de qualificar um instrumento ou sensor é estabelecer sua adequação para uma particular aplicação. Estes testes incluem procedimentos de medida de características típicas de :

- Calibração estática
- Calibração dinâmica
- Ambiente operacional
- Durabilidade
- Confiabilidade

Além destes testes outros procedimentos se fazem necessários para garantir a abrangência da qualificação:

- Exame visual
- Inspeção mecânica
- Testes para variações na excitação
- Teste para verificar efeitos de “warm-up”
- Testes para ruídos de contato
- Testes de sobre-excitação
- Testes para efeitos de posição

3. Especificação técnica de um instrumento

3.1. Características estáticas dos Instrumentos

3.1.1. Sensibilidade

A sensibilidade de um instrumento define-se como:

A razão entre a mudança y na saída, causada por uma mudança x na entrada:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

A diferença com função de transferência é que esta reflete também os aspectos dinâmicos do instrumento.

3.1.2. Ganho

O ganho de um sistema ou instrumento define-se como a saída dividida pela entrada

$$G = \frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}}$$

3.1.3. Exatidão

Qualidade da medição que assegura que a medida coincida com o valor real da grandeza considerada. O valor representativo deste parâmetro é o valor médio.

Quando o valor real ou correto é conhecido, a exatidão garante a rastreabilidade da medição. Isso significa que o valor pode passar de um laboratório para outro, sempre mantendo a medida exata. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala

3.1.4. Precisão

Qualidade da medição que representa a dispersão dos vários resultados, correspondentes a repetições de medições *quase iguais*, em torno do valor central. É usualmente associado ao erro padrão. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala

Na Figura 11 apresenta-se a relação entre precisão e exatidão.

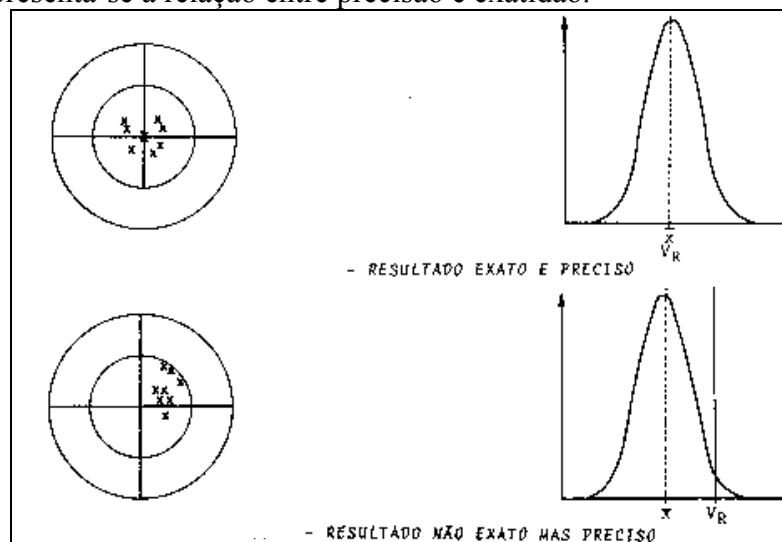


Figura 11 Relação entre precisão e exatidão

3.1.5. Linearidade

A linearidade de um instrumento indica a máxima aproximação da relação entrada – saída, com uma determinada linha reta. Geralmente quantifica-se a não – linearidade expressando-se como porcentagem do fundo de escala assim, veja Figura 12:

$$\%NL = \left(\frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}} \right) \cdot 100$$

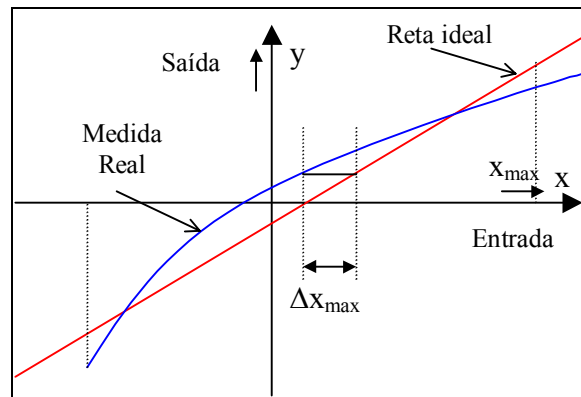


Figura 12 Não linearidade num sistema de medida

3.1.6. Ajuste de dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados

Este método ajusta uma série de valores medidos (y_1, y_2, \dots, y_n) a uma reta que apresenta a seguinte forma:

$$y = a \cdot x_i + b$$

com:

y = variável dependente (valores medidos)

x = variável independente (valores de entrada impostos)

a = inclinação da curva

b = intercepção da linha no eixo vertical

O método dos mínimos quadrados deseja minimizar a seguinte expressão:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - (a \cdot x_i + b)]^2$$

Após o processo de minimização podem-se obter os valores ajustados de a e b .

$$a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

3.1.7. Offset

Define-se como o desvio de zero do sinal de saída quando a entrada é zero

3.1.8. Drift ou deriva do zero

Descreve a mudança da leitura em zero do instrumento com o tempo.

3.1.9. Repetibilidade

É a capacidade do instrumento de reproduzir as mesmas saídas, quando as mesmas entradas são aplicadas, na mesma seqüência e nas mesmas condições ambientais

Este valor é expresso como sendo o valor pico da diferença entre saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem, veja Figura 13.

$$\%repetibilidade = \left(\frac{\text{Valor_Pico_de}(y_{ij\uparrow} - y_{ik\downarrow})}{F.S.} \right) \cdot 100$$

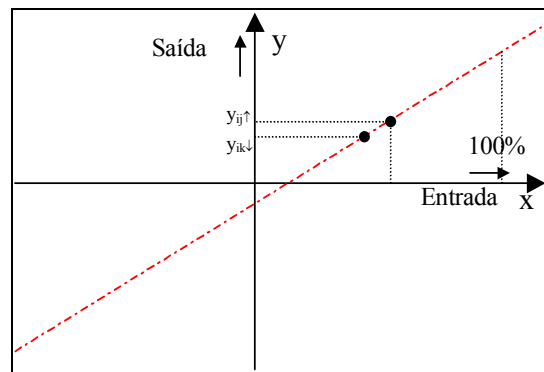


Figura 13 Repetibilidade em sistemas de medida

3.1.10. Histerese

Quando um certo valor de entrada é atingido, a primeira vez quando os valores de entrada estão aumentando, e a segunda vez quando eles estão diminuindo, a diferença das saídas é chamada de histerese, a qual pode ter diversas causas físicas.

Calcula-se a este parâmetro como sendo o valor pico da diferença das saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem, veja Figura 14.

$$\%histerese = \left(\frac{\text{Valor_Pico_de}(y_{i\uparrow} - y_{i\downarrow})}{F.S.} \right) \cdot 100$$

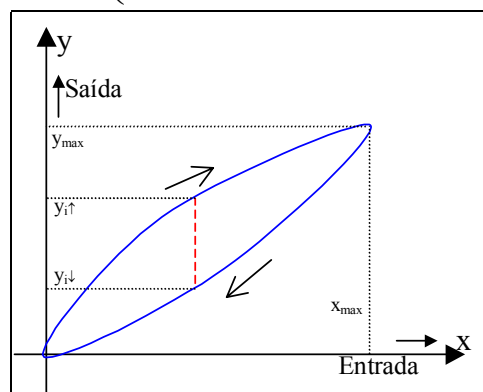


Figura 14 Histerese em sistemas de medida

3.1.11. Resolução

Define-se como o menor incremento de entrada o qual gera uma saída perceptível e repetitiva, quantificando-se como porcentagem do fundo de escala

$$\% \text{resolução} = \left[\frac{(\text{Valor}_{\text{mínimo de entrada}})}{(F.S.)} \right] \cdot 100$$

3.1.12. Banda de erro estática

Para levar em conta todos os efeitos que causam desvios em relação a um instrumento ideal, ou seja histerese, não-linearidade, repetibilidade, variações com outros parâmetros (Ex. Temperatura) define-se banda de erro estática, onde os valores admissíveis de erro estão dentro de uma faixa limitada por duas retas paralelas, onde os valores mais prováveis são indicados por uma reta mediana à esta faixa, veja Figura 15

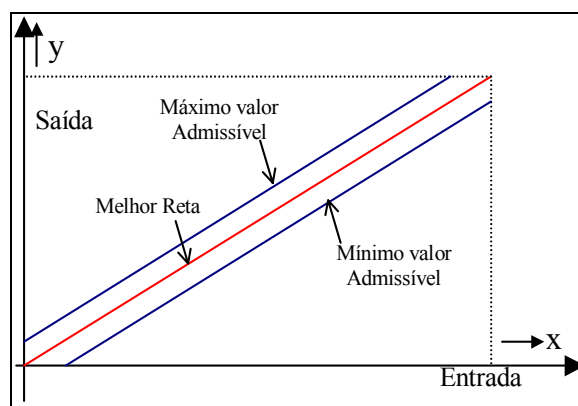


Figura 15 Banda de erro estático em sistemas de medida

3.1.13. Conceito de incerteza

Sabe-se que uma medição é um processo não repetitivo, portanto o resultado não é único. Assim mesmo que se tomem todos os cuidados para diminuir os erros inerentes das medidas sempre existe a chamada incerteza ou tolerância da medida.

Define-se incerteza como uma faixa de valores que pode ser associada a um certo nível de confiança e que deve ser calculada para cada método experimental adotado.

A incerteza deve ter sempre a mesma natureza que o valor básico. Ex. 0,876 L \pm 0,003 L

3.2. Características dinâmicas dos Instrumentos

Alguns termos que caracterizam um sistema dinamicamente serão apresentados a seguir:

3.2.1. Constante de tempo

Quando um sistema é submetido a uma entrada que apresenta uma variação abrupta (Ex. degrau), a saída toma um certo tempo para atingir seu valor final. A constante de tempo (τ) de um sistema é definida como o tempo que esse sistema toma para atingir 63,2 % do seu valor final, como mostrado na Figura 16.

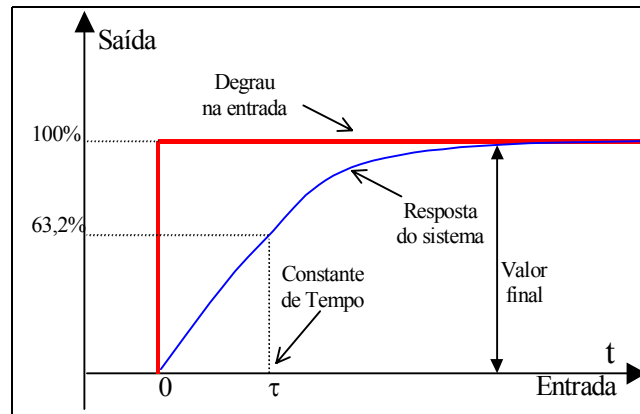


Figura 16 Constante de tempo de sistema de primeira ordem para excitação degrau

3.2.2. Resposta em frequência (Largura de Banda)

Quando o sinal aplicado a um instrumento apresenta uma variação com a frequência, chama-se resposta em frequência deste instrumento, a mudança da relação saída / entrada do instrumento, usualmente dado em dB (decibéis).

Define-se também largura de banda (Bw) como a faixa de frequência cuja relação (Saída/entrada) normalizada encontra-se entre 0 e -3 dB, veja Figura 17.

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{valor}}{\text{valor}_{\max}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3$$

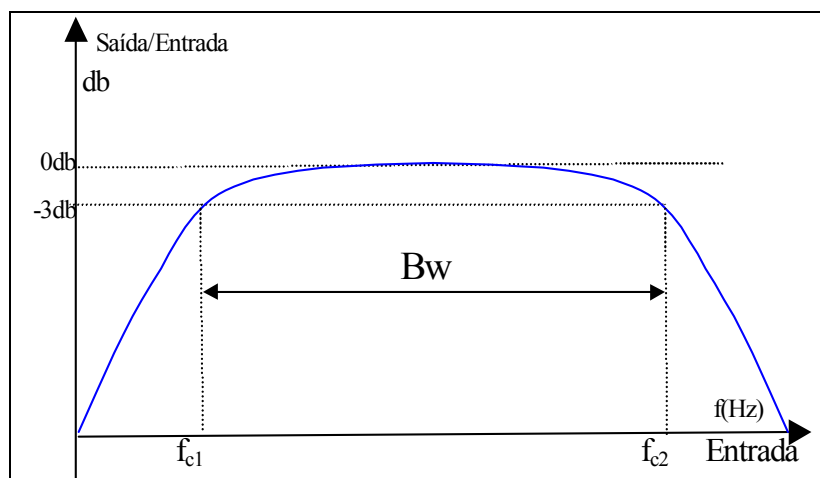


Figura 17 Resposta em frequência de um sistema passa-banda e largura de banda

3.2.3. Frequência natural

É a frequência de oscilação livre (ω_n) do sistema em questão, um instrumento deve ser projetado para ter sua frequência natural 5-10 vezes superior à máxima frequência de trabalho do instrumento.

3.2.4. Razão de amortecimento

É a característica de dissipação de energia (ξ) do sistema que junto com a frequência natural determina o limite da resposta em frequência do instrumento ou sistema.

3.2.5. Funções de transferência de sub-sistemas

Em sistemas lineares as funções de transferência podem ser classificadas de acordo com sua complexidade em sistemas de ordem (0,1,2..), em instrumentação para caracterização da informação divide-se o sistema em sub-sistemas mais simples, especificando as funções de transferência básicas.

3.2.6. Sistema de ordem zero

É por definição independente da frequência, fornecendo uma saída proporcional à entrada, veja Figura 18. Ex. Um potenciômetro quando usado como transdutor de deslocamento angular, fornece a seguinte função de transferência:

$$\frac{V}{\theta} = \left(\frac{V_f}{180} \right)$$

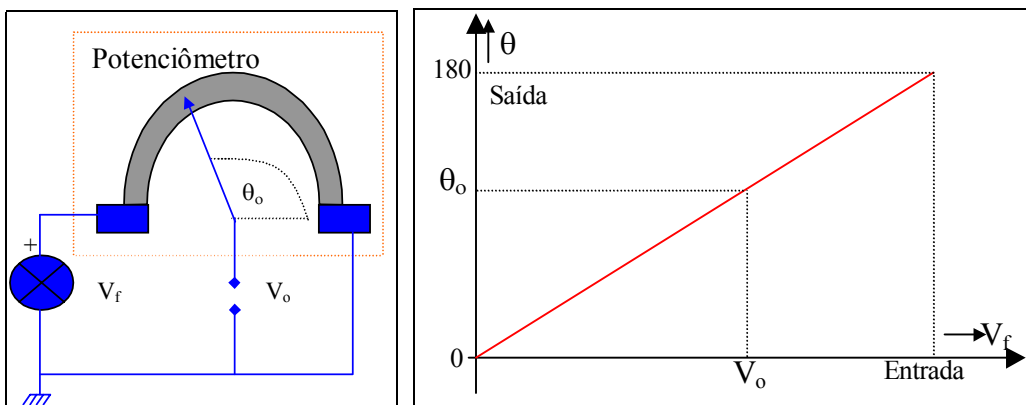


Figura 18 Sistema de ordem zero e sua característica de transferência

3.2.7. Sistema de primeira ordem

Estes sistemas geralmente contém um elemento que armazena energia e se comporta de acordo com a seguinte expressão

$$F(j\omega) = \frac{k}{(1 + j\omega\tau)}$$

Sendo: τ = Constante de tempo do sistema, k = Constante de ganho, $\omega = 2\pi f$

A resposta em frequência deste sistema será:

Amplitude:

$$|F(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{(1 + \omega^2\tau^2)}}$$

Fase

$$\phi = \text{tg}^{-1}(-\omega\tau)$$

Graficamente está apresentado na Figura 19 e Figura 20:

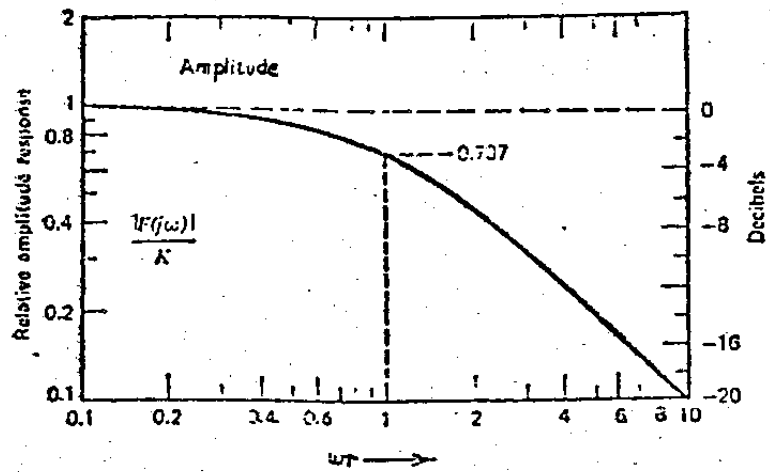


Figura 19 Resposta em frequência de um sistema de primeira ordem (Amplitude)

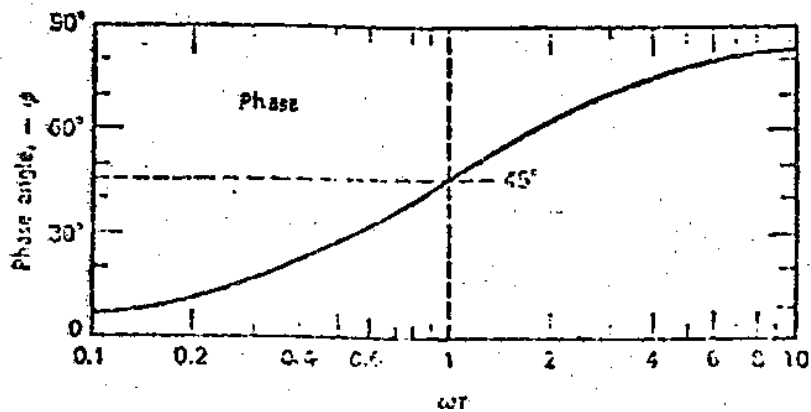


Figura 20 Resposta em frequência de um sistema de primeira ordem (Fase)

Como exemplo de um sistema de primeira ordem, apresentamos o termômetro a álcool e sua resposta a um degrau de temperatura, veja Figura 21:

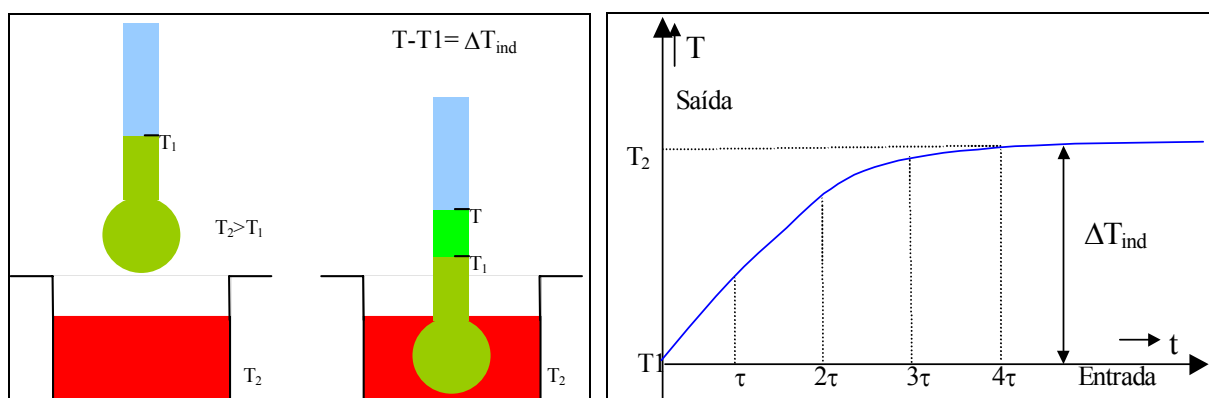


Figura 21 Sistema de primeira ordem e sua resposta degrau

3.2.8. Sistema de Segunda Ordem

Este é o sistema de maior ocorrência nas ciências experimentais, já que muitos sistemas podem ser aproximados a um sistema de segunda ordem.

A função de transferência deste sistema está dada por:

$$F(j\omega) = \frac{k}{\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\xi \cdot \left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) + 1}$$

A resposta em frequência deste sistema será:

Amplitude:

$$|F(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \cdot \left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right)^2}}$$

Fase

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2\xi}{\frac{\omega}{\omega_n} - \frac{\omega_n}{\omega}} \right)$$

Graficamente está mostrado na Figura 22e Figura 23:

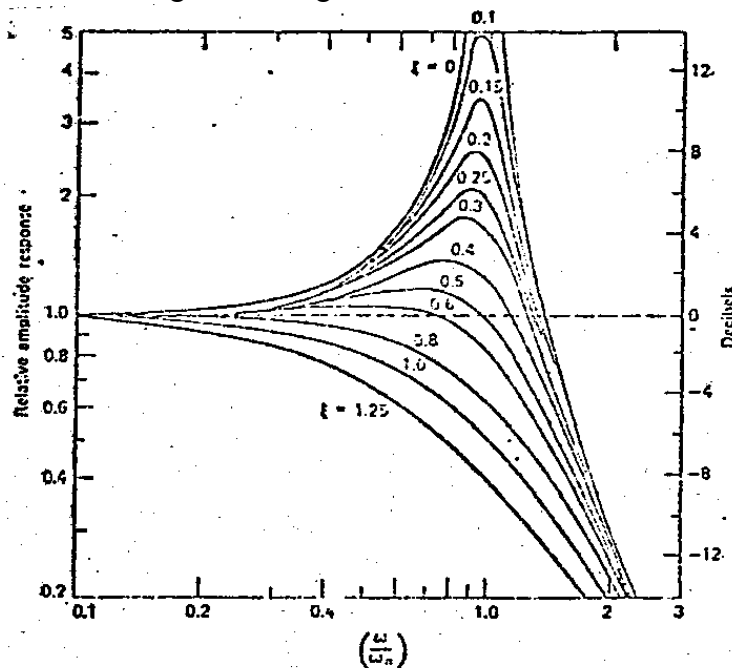


Figura 22 Resposta em frequência de um sistema de Segunda ordem (Amplitude)

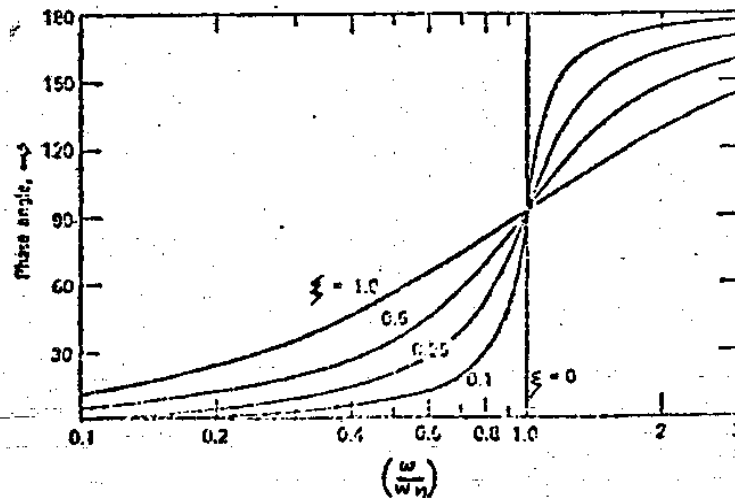


Figura 23 Resposta em frequência de um sistema de Segunda ordem (Fase)

A resposta a excitação degrau está apresentada na Figura 24

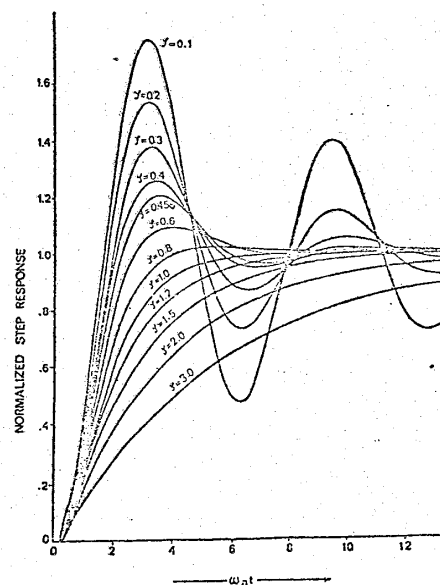


Figura 24 Resposta a degrau de um sistema de segunda ordem

3.3. Efeitos de carga

3.3.1. Carregamento

Entende-se como carregamento a modificação introduzida na medida, pelo instrumento ou sistema no ato da medição, isto acontece em todos os instrumentos em maior ou menor magnitude.

Da mesma forma quando se conectam entre si sub-sistemas, o sub-sistema precedente modifica suas características devido ao carregamento.

3.3.2. Carregamento elétrico

Em eletricidade utiliza-se o chamado “teorema de Thevenin” que afirma:

Todo circuito elétrico que apresenta dois terminais A - B, no qual uma carga elétrica pode ser colocada, comporta-se como se o circuito tive-se uma fonte (E_{th}) em serie com uma impedância (Z_{th}), onde a fonte (E_{th}) representa a diferença de potencial entre os pontos A - B com a carga (Z_l) desligada e (Z_{th}) é a impedância do circuito entre os ponto A e B quando todas as fonte tem sido substituídas por suas impedâncias internas, veja Figura 25.

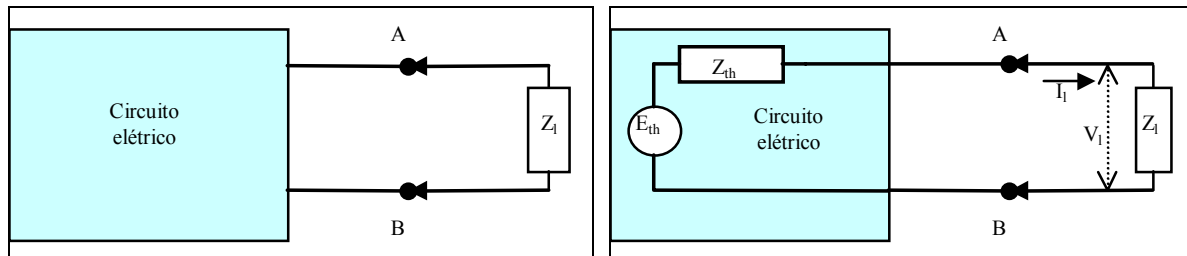


Figura 25 Circuito equivalente Thevenin de um circuito elétrico

Quando a carga (Z_l) é ligada aos terminais A-B a corrente que circula pelo circuito é:

$$I_l = \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_l}$$

A diferença de potencial na carga está dada por:

$$V_l = I_l \cdot Z_l = \frac{E_{th} \cdot Z_l}{Z_{th} + Z_l}$$

Verifica-se então que o efeito produzido pela conexão da carga no circuito depende da relação entre (Z_l) e (Z_{th}).

Assim a condição de máxima transferência de tensão implica em $Z_l \gg Z_{th}$ e a condição de máxima transferência de potência será para $Z_l = Z_{th}$.

O efeito de ligação da carga no circuito produz em erro de carregamento elétrico:

$$Erro_de_carregamento = E_{th} - V_l = E_{th} \cdot \left(1 - \frac{Z_l}{Z_{th} + Z_l} \right)$$

3.3.3. Carregamento de um Voltímetro

Quando um voltímetro com resistência R_m é conectado através de um circuito que apresenta uma resistência e tensão equivalente Thevenin R_{th} e E_{th} , a leitura indicada por este é:

$$V_m = \frac{E_{th} \cdot R_m}{R_{th} + R_m}$$

Então a precisão deste voltímetro é:

$$precisão = \frac{V_m}{E_{th}} \cdot 100\% = \frac{R_m}{R_{th} + R_m} \cdot 100\%$$

3.3.4. Carregamento de um potenciômetro

Considere um potenciômetro como o mostrado pela Figura 26 abaixo:

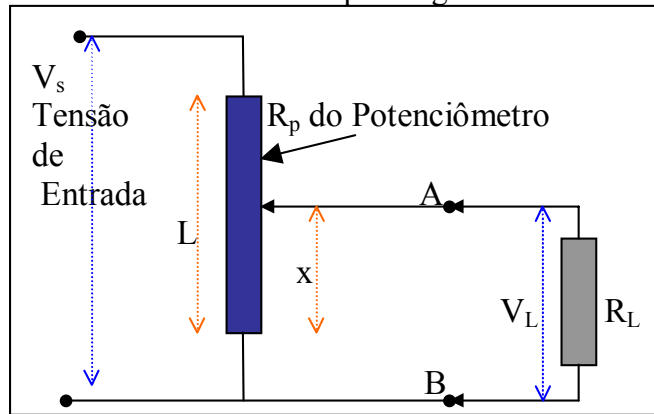


Figura 26 Carregamento de um potenciômetro

O cursor do dispositivo está a uma distância x do fim da pista que tem um comprimento total de L . Sabendo que a resistência por unidade de comprimento é uniforme e R_p é a resistência total do dispositivo, a tensão Thevenin equivalente, obtida medindo-se a tensão em circuito aberto em A-B, é:

$$E_{th} = V_S \cdot \left(\frac{x}{L} \right)$$

A resistência Thevenin equivalente do potenciômetro, a qual é obtida fazendo $V_S = 0$ e calculando a impedância nos terminais A-B é:

$$R_{th} = R_p \cdot \left(\frac{x}{L} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{L} \right) \right)$$

Ao carregar o circuito obtém-se uma tensão carga assim:

$$V_L = \frac{V_S \cdot \left(\frac{x}{L} \right)}{\left(\frac{R_p}{R_L} \right) \cdot \left(\frac{x}{L} \right) \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right) + 1}$$

O efeito de carregamento produz um erro de não linearidade, já que a relação entre V_L e x é não linear. Este erro está dado por:

$$E_{th} - V_L = V_S \cdot \left(\frac{x}{L} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{\left(\frac{R_p}{R_L} \right) \cdot \left(\frac{x}{L} \right) \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right) + 1} \right) \right)$$

3.3.5. Carregamento de uma ponte de Wheatstone

Uma ponte de Wheatstone é uma estrutura muito usada de instrumentação, veja na Figura 27 a seguir. A resistência e tensão Thevenin equivalentes serão:

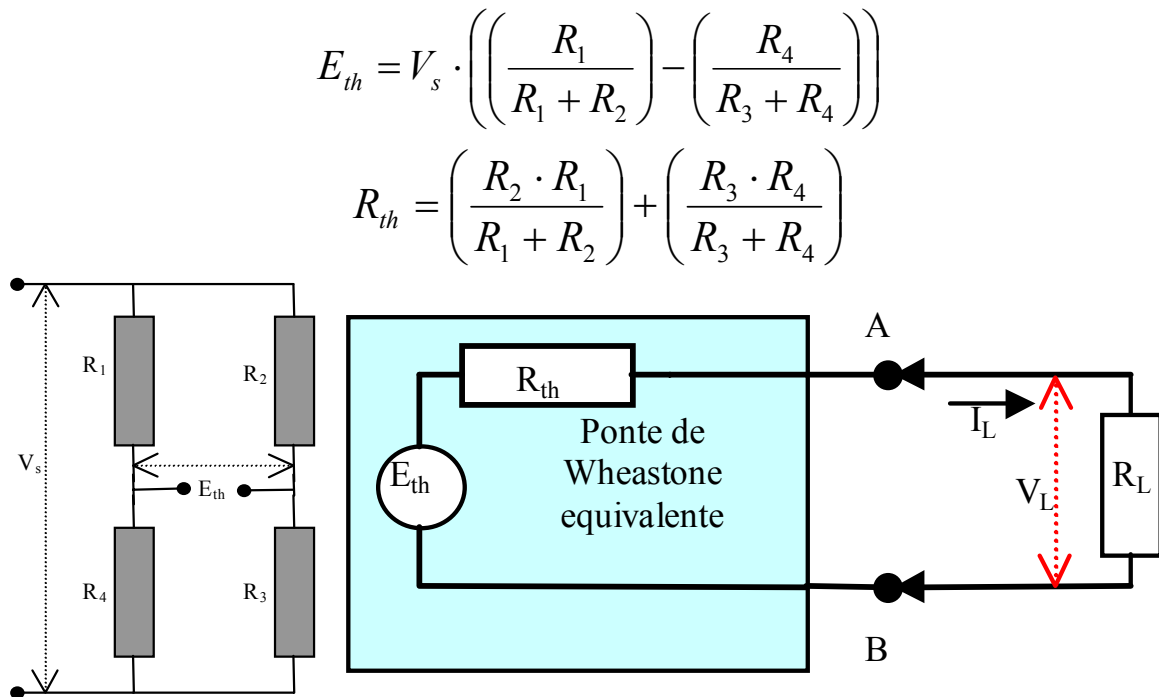


Figura 27 Carregamento de uma ponte de Wheatstone

A tensão de saída fica:

$$V_L = \left(\frac{R_L \cdot R_s \cdot (R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4)}{R_L \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4) + (R_1 \cdot R_2) + (R_3 \cdot R_4)} \right)$$

3.3.6. Carregamento de elementos em um sistema de medida

Consideremos o sistema simples de medida, que consiste num transdutor de entrada, um amplificador e um mostrador com circuitos equivalentes Thevenin da figura a seguir:

As tensões V_{in} e V_m ficam:

$$V_{in} = I_{in} \cdot R_{in} = \left(\frac{V_t \cdot R_{in}}{R_t + R_{in}} \right)$$

e

$$V_m = I_m \cdot R_m = \left(\frac{G \cdot V_t \cdot R_{in} \cdot R_m}{(R_t + R_{in}) \cdot (R_{out} + R_m)} \right)$$

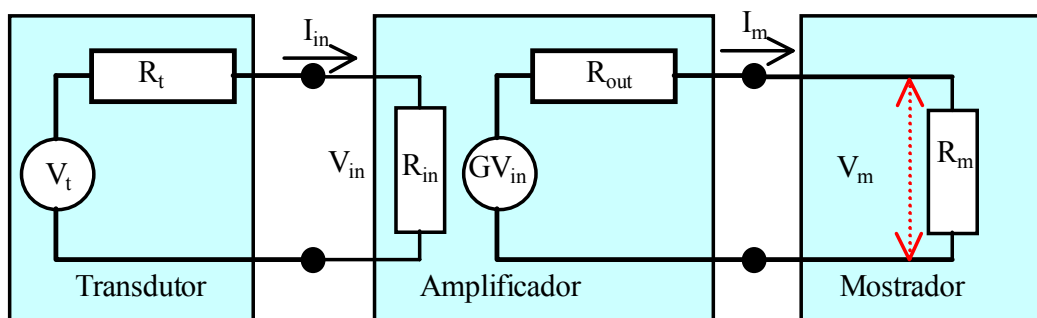


Figura 28 Carregamento de um sistema de medidas

3.4. Ruído

O termo ruído se usa geralmente para sinais indesejadas que aparecem durante o processo de medição e podem interferir com o sinal sendo medido, existem dois tipos básicos de ruído:

- **Ruído de Interferência**

Acontece devido à interação entre campos magnético ou elétricos externos com o sistema de medida, Ex. ruído produzido pela rede AC.

- **Ruído Aleatório**

Este ruído é devido ao movimento aleatório de elétrons e outros portadores de carga em componentes e sistemas eletrônicos.

3.4.1. Fontes de Interferência

- Mudanças de temperatura
- Choques mecânicos
- Equipamentos que possuem sistemas de ignição
- Equipamentos que possuem circuitos digitais ou que trabalham com sinais pulsados
- Chaveamentos em sistemas de distribuição elétrica
- Motores elétricos AC e DC e inversores para o seu controle
- Altas tensões e descargas corona
- Descargas em gases ionizados
- Geradores de RF ou microondas
- Outras fontes com alto conteúdo de frequências
- Materiais semicondutores em geral

3.4.2. Tipos de interferência

Existem vários tipos principais de interferência:

- **Acoplamento galvânico:** Quando diversos circuitos apresentam um acoplamento direto de interferências, através do mesmo terra.
- **Acoplamento indutivo:** também chamado de acoplamento magnético ou electromagnético. Neste caso uma corrente elétrica circulando num circuito próximo gera um campo magnético que varia, e que induz uma corrente no sistema de interesse.
- **Acoplamento capacitivo:** Os cabos de energia, terra e condutores do sistema estão separados por um dielétrico que é o ar, assim podem existir capacitâncias entre estes elementos, que permitem o acoplamento com o sistema de sinais de ruído.
- **Terras múltiplos:** Se um instrumento apresenta diversas conexões para o terra, isto permitira a produção de uma interferência no sistema de medida
- **Acoplamentos por RF ou Microondas:** Ruído pode ser acoplado através de ondas de rádio e microondas

3.4.3. Formas de Redução da interferência

Existem diversos métodos para reduzir interferências, entre eles:

- Utilização de pares trançados: diversos elementos de um sistema de medida podem ser conectados com pares trançados, assim o ruído induzido poderá se cancelar devido a direção das correntes já que os campos induzidos se cancelam, veja Figura 29.

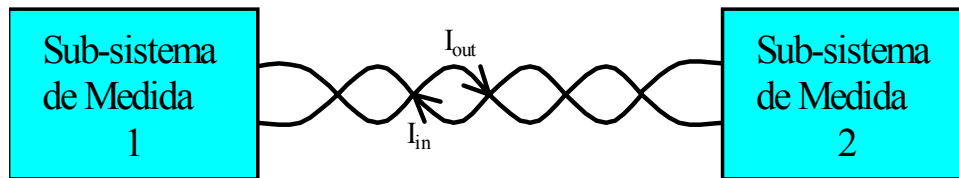


Figura 29 Redução de interferência usando pares trançados

- **Grade Eletrostática:** Com este método todo tipo de acoplamento capacitivo e magnético é evitado, já que o sistema de medida encontra-se cercado por uma grade metálica aterrada, este método pode apresentar o problema de múltiplos terras, veja Figura 30.

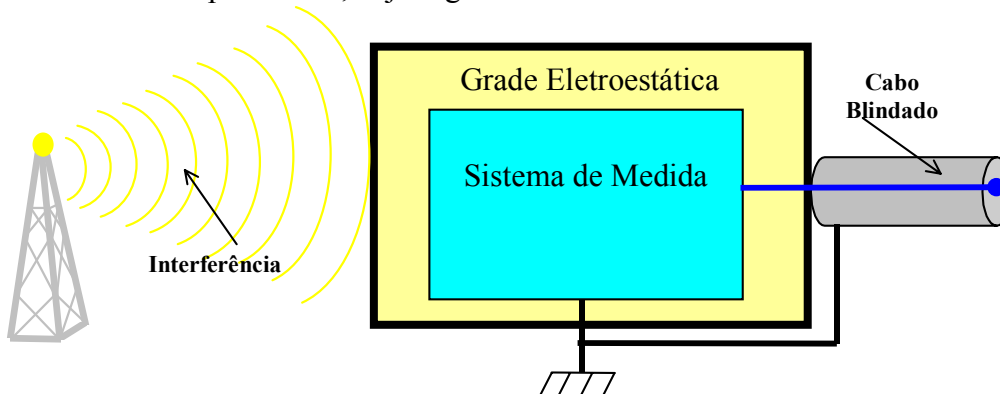


Figura 30 Redução de interferência usando grade eletrostática

- **Cabos blindados:** Trata-se de uma extensão do método anterior mas aplicado à transmissão das informações
- **Terra único:** definindo um único ponto de terra no sistema de medida evita-se o problema de terras múltiplos.
- **Filtragem do sinal:** Com esta técnica a largura de banda do sistema de medida é modificada para rejeitar o sinal de interferência.
- **Utilização de isolamento galvânica:** permite o desacoplamento de dois circuitos de forma a evitar certos tipos de interferências.
- **A utilização de amplificadores diferenciais e de instrumentação:** permitem eliminar a interferência quando esta se encontra em modo comum.

3.4.4. Ruído aleatório

O ruído aleatório podem aparecer de formas diversas:

- **Ruído Térmico:** Este ruído é gerado pelo movimento randômico dos elétrons e outros portadores de carga em resistores e semicondutores. A tensão RMS de ruído para uma certa largura de banda é dado por:

$$v_n = \sqrt{4 \cdot k \cdot R \cdot T \cdot \Delta f}$$

Com :

- k = Constante de Boltzmann
- R = Resistência do material
- T = Temperatura Absoluta
- ΔF = Faixa de frequência

- **Ruído “Shot”:** Este ruído é devido a flutuações randômicas na taxa de difusão de portadores de carga através das barreiras de potencial em junções P-N. A tensão RMS de ruído é dada por:

$$v_{ns} = \sqrt{2 \cdot k \cdot T \cdot r_d \cdot (\Delta f)}$$

Com: $r_d =$ Resistência diferencial do diodo $\cong 26/I_d(\text{mA})$

- **Ruído (1/f):** O ruído (1/f) ou “Flicker noise” deve-se ao fluxo de portadores de carga em médios descontínuos e fica predominante em frequências muito baixas, apresenta uma tensão RMS de ruído inversamente proporcional à frequência.
- **Más conexões:** Ruído pode resultar de más conexões devido a sujeira em contatos, contatos mecânicos mal feitos ou soldas frias

3.4.5. Rejeição de ruído

Trata-se da capacidade de um sistema rejeitar ruído e pode ser quantificada para duas formas típicas de ocorrência de ruído:

- Ruído em modo normal: corresponde a aquele ruído que ocorre junto ao sinal medido, o sistema de medida não consegue discriminar esta forma de ocorrência
- Ruído em modo comum: corresponde a aquele ruído que aparece entre o terminal de terra e um outro terminal do sistema de medida. Existem métodos (utilização de amplificadores diferenciais) que permitem a redução do ruído que ocorre desta forma.

Define-se razão de rejeição em modo comum (CMRR) como a habilidade do sistema de medida reduzir o erro na medida introduzido por um ruído que ocorre desta forma, assim:

$$CMRR(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{cm}}{V_e} \right)$$

com:

$V_{cm} =$ O valor pico do ruído em modo comum

$V_e =$ O valor pico do erro produzido na medida a uma certa frequência

3.4.6. Relação sinal - ruído

Define-se razão sinal-ruído como a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído no sistema de medida. A partir de este cálculo será possível saber que tipo de instrumento é necessário para realizar a medida desejada.

Para o caso de um resistor R temos então:

$$S/N(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)$$

Com:

$V_s =$ Tensão do sinal

$V_n =$ tensão de ruído

3.5. Erros

Os erros em instrumentação basicamente podem ser classificados como:

- **Erros randômicos:** são aqueles que variam de forma aleatória entre medidas sucessivas da mesma quantidade
- **Erros sistemáticos:** são aqueles que não variam de uma leitura para outra
- **Erros absolutos:** são definidos como a diferença entre o valor atual medido e o valor livre de erro (Padrão).

$$\delta X_a = X_i - X_s$$

com: x_i = valor atual da medida
 x_s = valor correto da medida

- **Erros relativos:** são definidos como os erros absolutos normalizados, ou seja o erro absoluto dividido por uma quantidade de referência, Ex. erros percentuais

$$\% \delta X_r = \left(\frac{X_i - X_s}{X} \right) \cdot 100$$

com: X = valor de referência

3.5.1. Fontes de erro

As fontes de erro em sistemas de medidas são de acordo a classificação anterior:

1. Erros randômicos

- **Erros de operação:** podem ter varias causas como erros de parallax e de incerteza nas medidas, dependendo principalmente do operador
- **Erros ambientais:** como mudanças de temperatura, interferência eletromagnética, etc.
- **Erros estocásticos:** como resultado de processos de ruído em materiais e componentes do instrumento.
- **Erros dinâmicos:** são erros devidos a múltiplos fatores que modificam o comportamento dinâmico do instrumento, como carregamentos dinâmicos variáveis.

2. Erros Sistemáticos:

- **Erros de construção:** Erros durante a fabricação do instrumento, problemas com tolerâncias de dimensões ou componentes fora de valor, etc.
- **Erros de aproximação:** devida a suposições, como linearidade entre duas variáveis
- **Erros de envelhecimento:** Erros resultantes de variações, em materiais e componentes integrantes do instrumento, com o tempo. Componentes se deterioram e variam seu valor ou materiais com processos de fadiga mudam suas características mecânicas variando sensibilidades, etc.
- **Erros de inserção:** São erros de carregamento, que acontecem quando o instrumento é inserido em certos locais para realizar medidas, como voltímetros, amperímetros, etc.
- **Erros aditivos:** são erros superpostos ao sinal de saída do instrumento e não dependem do valor numérico da saída, portanto provocam somente uma modificação no valor de zero no instrumento
- **Erros multiplicativos:** estes erros são caracterizados pela multiplicação da variável de entrada por um valor, Ex. variações de sensibilidade com diversos fatores.

3.5.2. Estatística de erro

Os resultados de uma serie de medições da mesma quantidade podem ser plotados como uma distribuição de frequência, sendo que frequência neste caso é o número de vezes que um valor particular ou faixa de valores ocorrem.. Esta distribuição mostra como os valores obtidos durante a medição variam, veja Figura 31. O espalhamento desta distribuição é uma indicação da imprecisão da medida.

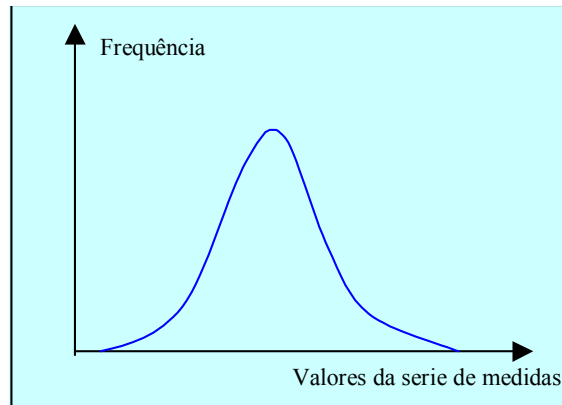


Figura 31 Distribuição de frequência para uma medida

A representação de um número de medidas de uma certa quantidade pode tomar as seguintes formas:

- **Média Aritmética (\bar{X}):** Representa-se como a soma de todos os resultados X_i dividida pelo número (n) de resultados considerados.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

- **Moda:** É o valor com maior frequência, se a distribuição de frequência é simétrica então a média e a moda apresentarão o mesmo valor, veja Figura 32.

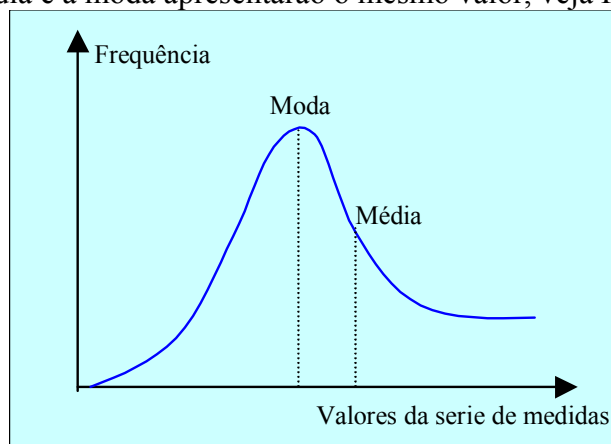


Figura 32 Moda e Média

- **Mediana:** É o valor que divide a distribuição de frequência em duas áreas iguais
- **Desvio Padrão:** A medida da precisão ou seja o espalhamento da distribuição de frequência pode ser medido com a raiz do desvio quadrático médio ou desvio padrão (σ). O desvio de uma medida (d) é a diferença entre o valor medido e a média aritmética:

$$d_i = X_i - \bar{X}$$

então o desvio padrão define-se:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

3.5.3. Erro provável

A distribuição de frequência de um conjunto de medidas mostra os desvios das varias medidas em relação à média. Como a distribuição de frequência frequentemente toma a forma de uma distribuição Gaussiana, veja Figura 33, cuja medida mais freqüente é a média e não apresenta erro.

Numa distribuição gaussiana a possibilidade de uma medida estar a um σ da média é de 68,3%, dentro de 2σ da média 95,5% e dentro de 3σ da média 99,7%, então a possibilidade de uma medida estar em $0,6745\sigma$ da média é de 50%. Define-se então como erro provável $0,6745\sigma$ da média.

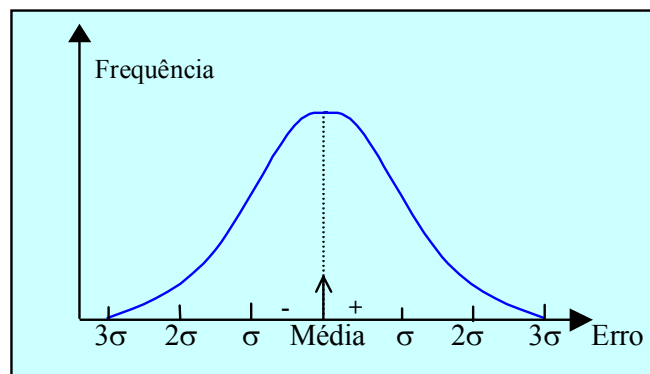


Figura 33 Distribuição gaussiana

Isto significa que se tomamos uma medida qualquer, da serie de medidas, esta terá 50% de chance de apresentar um erro não maior que $0,6745\sigma$ da média.

3.5.4. Adição de erros

Existem diversas formas de obter resultados a partir de um conjunto de medidas, cada medida apresenta um erro associado e dependendo da forma o erro final do resultado calculado pode variar. As diversas forma de obter o resultado podem ser:

- Soma ou subtração de medidas: neste caso o erro total é a soma dos erros absolutos
Sem erro temos:

$$X = A + B$$

Tomando em conta os erros:

$$X \pm \delta X = A \pm \delta A + B \pm \delta B$$

O erro neste caso é:

$$\delta X = \delta A + \delta B$$

- Multiplicação e divisão de medidas: Adiciona-se o erro percentual para obter o erro relativo percentual total. Sem erro a medida fica:

$$X = A \cdot B$$

Tomando em conta os erros:

$$X \pm \delta X = (A \pm \delta A) \cdot (B \pm \delta B) = A \cdot B \pm A \cdot \delta B \pm B \cdot \delta A$$

O erro neste caso é:

$$\delta X = A \cdot \delta B + B \cdot \delta A$$

O erro relativo percentual será

$$\frac{\delta X}{X} \cdot 100 = \frac{\delta B}{B} \cdot 100 + \frac{\delta A}{A} \cdot 100$$

3.5.5. Exatidão de um sistema

A função de transferência do elemento sensor de um sistema medida (G_1) na ausência de erros é:

$$\Theta_1 = G_1 \cdot \Theta_i$$

Tomando em conta erros no sistema e mantendo a entrada constante a função de transferência fica:

$$\Theta_1 \pm \delta\Theta_1 = (G_1 \pm \delta G_1) \cdot \Theta_i$$

A saída do conversor de sinais considerando o erro fica:

$$\Theta_2 \pm \delta\Theta_2 = (G_2 \pm \delta G_2) \cdot (G_1 \pm \delta G_1) \cdot \Theta_i$$

A saída do elemento mostrador de sinais considerando o erro fica:

$$\Theta_0 \pm \delta\Theta_0 = (G_3 \pm \delta G_3) \cdot (G_2 \pm \delta G_2) \cdot (G_1 \pm \delta G_1) \cdot \Theta_i$$

esta saída pode ser expressa assim:

$$\Theta_0 \pm \delta\Theta_0 = G_3 \cdot G_2 \cdot G_1 \cdot \left(1 \pm \frac{\delta G_3}{G_3} \pm \frac{\delta G_2}{G_2} \pm \frac{\delta G_1}{G_1} \right) \cdot \Theta_i$$

sabemos que sem erros a função de transferência de um sistema de medida é

$$\Theta_o = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \Theta_i$$

Obtém-se então o erro relativo na saída do sistema de medida como:

$$\frac{\delta\Theta_0}{\Theta_0} = \left(\frac{\delta G_3}{G_3} + \frac{\delta G_2}{G_2} + \frac{\delta G_1}{G_1} \right)$$

Assim o erro relativo na saída de um sistema de medidas é a soma dos erros relativos de cada elemento do sistema

3.6. Confiabilidade em Instrumentos

Define-se confiabilidade de um instrumento de medida como a possibilidade que o sistema o elemento do sistema opere com um certo nível de desempenho (Ex. 1% de exatidão), num certo período de tempo (Ex. 1 ano), em certas condições ambientais (Ex. 20°C).

A confiabilidade depende do uso, ambiente e local onde o instrumento está em operação, assim os seguintes fatores devem ser considerados:

- Conseqüências da falha em termos de risco para outros equipamentos ou pessoal
- Custo ou produção perdida resultante da falha
- Custo e tempo necessário para o reparo

- Custos das rotinas de teste e manutenção

Assim confiabilidade é uma variável estatística que depende do tempo $R(t)$ e geralmente é expressa de forma exponencial.

$$R(t) = \exp^{(-\lambda t)}$$

com: (λ) = taxa de falhas

3.6.1. Falhas (MTBF)

Define-se falha quando o instrumento sai de um especificado nível de desempenho. Se N itens foram testados durante um tempo t e os itens que falharam foram reparados e colocados de novo em funcionamento, então se durante esse tempo aconteceram N_f falhas, o tempo médio entre falhas é definido por:

$$MTBF = \frac{N \cdot t}{N_f}$$

Define-se ainda taxa de falhas (λ) o valor médio de falhas ou seja:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Uma taxa de falhas de 1/100000 por hora não significa que se 100000 itens foram observados durante uma hora 1 falhara, somente indica a probabilidade deste falhar. Na Tabela 4 seguinte apresentam-se valores típicos de taxa de falhas.

Tabela 4 Taxa de falhas em componentes

Componente	Taxa de falhas x 10 ⁻⁵ por hora
Resistor de carvão	0.05
Resistor de fio	0.01
Capacitor de papel	0.1
Capacitor de filme plástico	0.01
Transistor de silício de potência	0.08
Transistor de silício de baixa potência	0.008
Conexão com solda	0.001
Conexão com fio enrolado	0.0001

3.6.2. Disponibilidade

A disponibilidade de um sistema é a probabilidade de este sistema estar funcionando corretamente durante tempo específico, define-se assim:

$$Disponibilidade = \frac{\text{tempo}_{operacional}}{\text{tempo}_{operacional} + \text{tempo}_{n\tilde{a}o_operacional}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

com:

MTTR = tempo médio de reparo.

3.6.3. Curva da Banheira

Um instrumento ou sistema de medida típico apresenta uma taxa de falhas em função do tempo com três fases bem definidas, como mostrado na Figura 34 a seguir:

- Mortalidade infantil: A taxa de falhas cai exponencialmente até estabilizar num valor, estas falhas acontecem devido a problemas na manufatura, materiais e componentes, esta fase pode ser superada antes do instrumento sair da fábrica através de um período de "Burn-In".
- Vida útil: é a fase de vida normal do instrumento onde a taxa de falhas é baixa e constante e basicamente as falhas são eventos aleatórios.
- Fim de vida: Nesta fase a taxa de falhas aumenta exponencialmente principalmente por problemas de desgaste nos componentes e materiais.

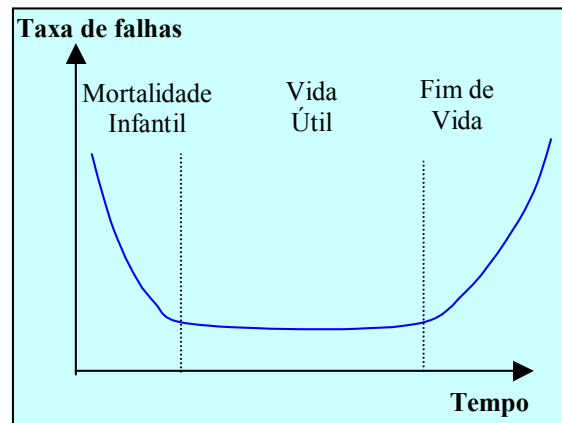


Figura 34 Curva da banheira

3.6.4. Projeto de sistemas com alta Confiabilidade

Vários fatores devem ser considerados durante o projeto de um instrumento para obter sistemas com alta confiabilidade:

- O instrumento deve possuir o mínimo número de componentes necessários para realizar a função desejada.
- Os componentes usados devem possuir uma história conhecida de confiabilidade.
- O uso de integração em larga escala aumenta a confiabilidade do instrumento, já que a confiabilidade de um circuito integrado depende muito pouco de sua complexidade.
- Os componentes devem estar operando nas faixas permitidas, a confiabilidade cai rapidamente quando aumenta o "stress", temperatura, umidade, tensão, vibração, etc.
- Os componentes devem ter um período de "Burn-In" para ultrapassar o estágio de mortalidade infantil.
- O equipamento deve ter sido testado em condições rigorosas, antes de entrar em serviço.
- O equipamento deve ser operado nas melhores condições possíveis.

3.6.5. Redundância

A confiabilidade de um instrumento pode ser aumentada usando componentes confiáveis, outra forma é introduzir no sistema redundância de algum tipo, isto é usando dois ou mais componentes, grupos de componente ou sistemas de maneira que o instrumento continue a funcionar mesmo que parte de ele falhe.

3.6.6. Tipos de redundância em instrumentos

A redundância em instrumentação apresenta os seguintes tipos:

3.6.6.1. Redundância paralela

No caso o sistema ou parte deste é operado usando dois ou mais componentes, grupos de componente ou sistemas em paralelo de maneira que o instrumento continue a funcionar mesmo que parte de ele falhe, veja Figura 35. Ex. Contatos de um relê ou contator em paralelo.

Neste caso a confiabilidade do sistema é dada por :

$$R_p = R_A + R_B - R_A R_B$$

Se $R_A=R_B=0.9$ então $R_p=0.99$

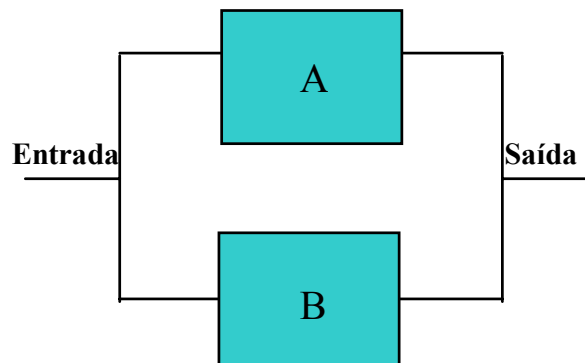


Figura 35 Redundância paralela

3.6.6.2. Redundância “Stand-by”

Neste caso existem dois sub-sistemas idênticos, um deles o A está ligado à saída através de uma chave. Se o sistema A falha a chave muda de estado e o sistema B entra em funcionamento, veja Figura 36. É necessário decidir que o sistema A falhou para tomar a ação de chaveamento. Neste caso a confiabilidade do sistema é dada por :

$$R_{SB} = R \cdot (1 - \ln(R))$$

Se $R_A=R_B=R=0.9$ então $R_{SB}=0.9948$

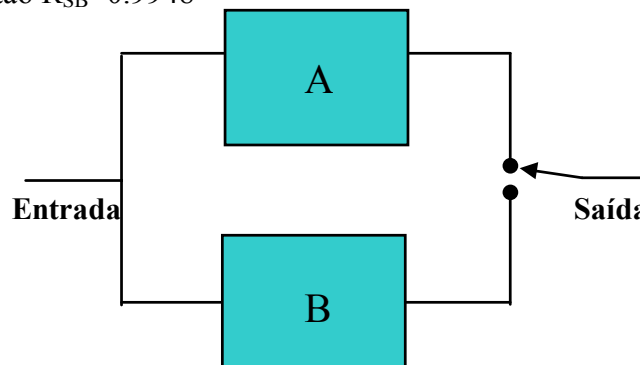


Figura 36 Redundância “Stand-by”

3.6.6.3. Redundância por voto majoritário

Quando é difícil ou impossível de decidir se a medida que está sendo realizada está correta, adicionando mais uma leitura ao sistema, somente será possível decidir que uma das medidas está errada, porém não dá para decidir qual medida está certa. Em sistemas de alta

confiabilidade implementa-se o esquema de votação majoritária, que contém pelo menos três sub-sistemas idênticos realizando a mesma leitura em conjunto com um dispositivo de votação majoritária, sendo então possível garantir uma medida confiável, veja Figura 37.

Neste caso supondo todos os sub-sistemas possuem confiabilidade R e o sistema de voto majoritário e perfeitamente confiável então a confiabilidade total do sistema dois de três é dada por :

$$R_p = 3 \cdot R^2 - 2 \cdot R^3$$

Se $R_A=R_B=R=0.9$ então $R_p=0.972$

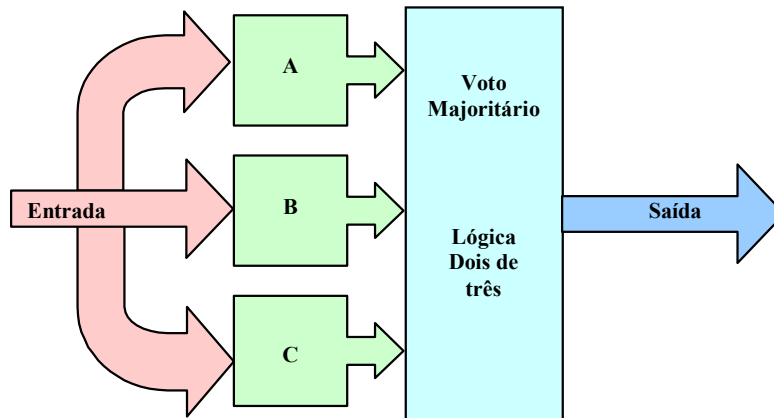


Figura 37 Redundância por voto majoritário

4. Princípios básicos de transdução

Transdutor pode ser definido como o dispositivo que converte energia de um domínio para outro. Ex. Mecânico - Elétrico. Estes podem ser encontrados nos estágios de entrada ou de saída dos sistemas de medida.

Os transdutores de entrada dos sistemas de medida denominam-se sensores e convertem uma quantidade física ou química de entrada numa outra (geralmente elétrica) na sua saída.

Os transdutores de saída dos sistemas de medida denominam-se atuadores e convertem uma quantidade (geralmente elétrica) de entrada numa outra física ou química na sua saída.

A função de um transdutor pode ser descrito de diversas formas, destacamos duas formas usuais:

- Estrutura Funcional: onde se descreve o método adotado para realizar a medida através de funções ou estruturas básicas.
- Estrutura Orgânica: onde se apresenta a função do sistema de medida através da implementação física de grupos de funções ou estruturas básicas.

Na Figura 38 abaixo um exemplo para um transdutor de pressão:

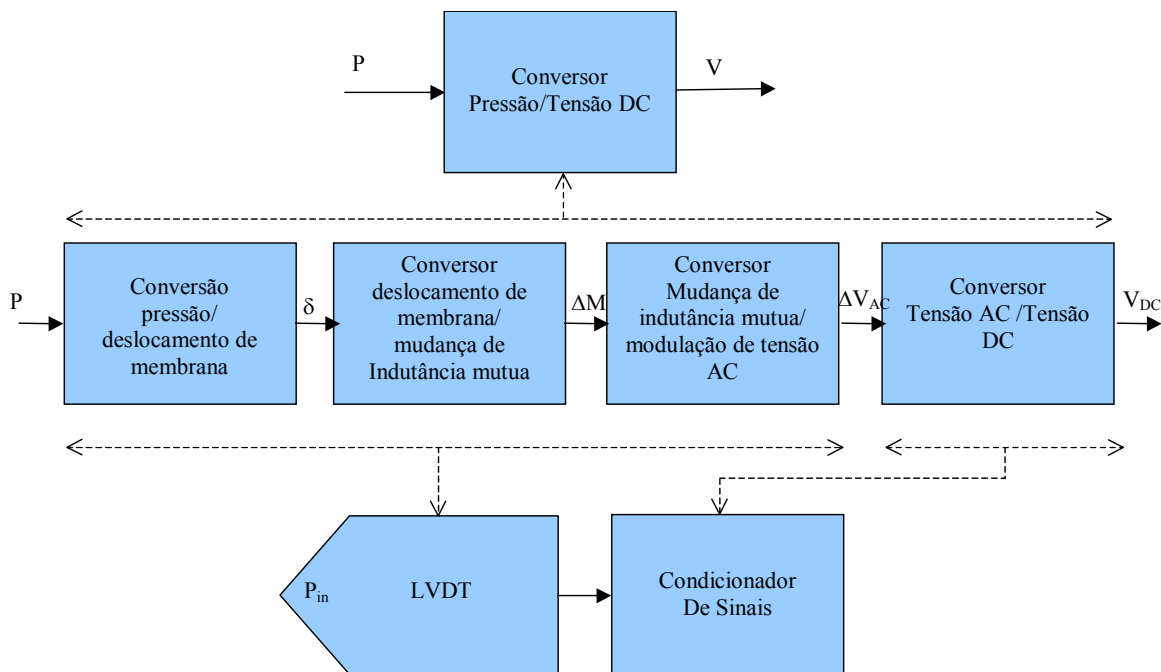


Figura 38 Descrição funcional e orgânica de um transdutor de pressão

4.1. Estruturas básicas de transdução

Apesar de existir uma diversidade enorme de estruturas de transdução, as principais podem ser agrupadas assim:

- Estrutura Serie
- Estrutura diferencial
- Estrutura de razão
- Estrutura de servo-transdução

4.1.1. Estrutura serie

Esta estrutura como já conhecemos constitui-se de diversos blocos em serie cada um possuindo sua própria função de transferência, assim este método fornece uma função de transferência global assim, para o caso de quatro blocos:

$$G = \frac{y_4}{x} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4$$

O erro associado a esta estrutura é:

$$\Delta y = y_4 - y'_4 = \Delta y_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4 + \Delta y_2 \cdot G_3 \cdot G_4 + \Delta y_3 \cdot G_4 + \Delta y_4$$

com : y'_i = saída do bloco sem erros.

Graficamente esta estrutura fica, veja Figura 39:

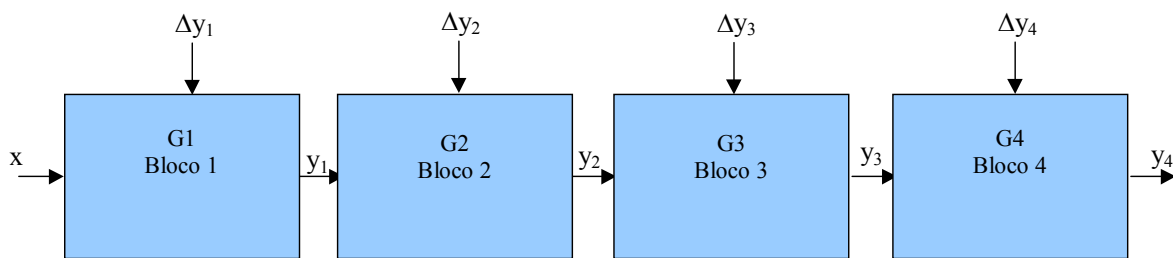


Figura 39 Estrutura serie

4.1.2. Estrutura diferencial

A estrutura diferencial usa dois canais de sinal ligados a um bloco subtrator, veja Figura 40, se as funções de transferência dos dois canais são idênticas e supondo que as saídas podem ser expressas como:

$$y_1 = G \cdot x_1 + y_o \quad \text{e} \quad y_2 = G \cdot x_2 + y_o$$

a saída desta estrutura será:

$$y = y_1 - y_2 = G \cdot (x_1 - x_2)$$

Existem duas formas de funcionamento desta estrutura:

- x_1 = variável e x_2 = constante
- $x_1 = -x_2$ neste caso a sensibilidade do sistema de duplica

Com a introdução de erros nas medidas as saídas dos blocos ficam:

$$y_1 = y'_1 + \Delta y_1 \quad \text{e} \quad y_2 = y'_2 + \Delta y_2$$

supondo (o que é muito razoável) que estes erros são similares a saída total da estrutura fica:

$$y = y_1 - y_2 = y'_1 - y'_2$$

com : y'_i = saída do bloco sem erros.

Isto significa que a estrutura diferencial fornece uma diminuição substancial nos erros que o método de medida apresenta., graficamente esta estrutura fica:

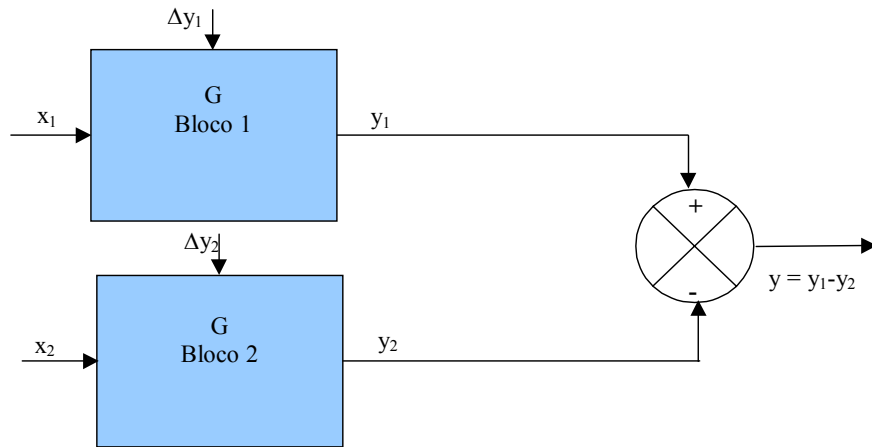


Figura 40 Estrutura diferencial

4.1.3. Estrutura de razão

Similarmente à estrutura diferencial a estrutura de razão inclui dois canais de medida em serie com sensibilidade G idêntica conectadas a um bloco cuja saída é a razão (divisão) das duas variáveis de entrada, veja Figura 41.

$$y = f\left(\frac{x_1}{x_2}\right)$$

Se os sinais de saída dos blocos são afetados pelos mesmos erros, os quais se manifestam como uma variação da sensibilidade, as saídas dos blocos ficam:

$$y_1 = (G + \Delta G) \cdot x_1 \quad \text{e} \quad y_2 = (G + \Delta G) \cdot x_2$$

então

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{x_1}{x_2}$$

Assim esta estrutura apresenta vantagens para a redução de erros gerados pela mudança da sensibilidade.

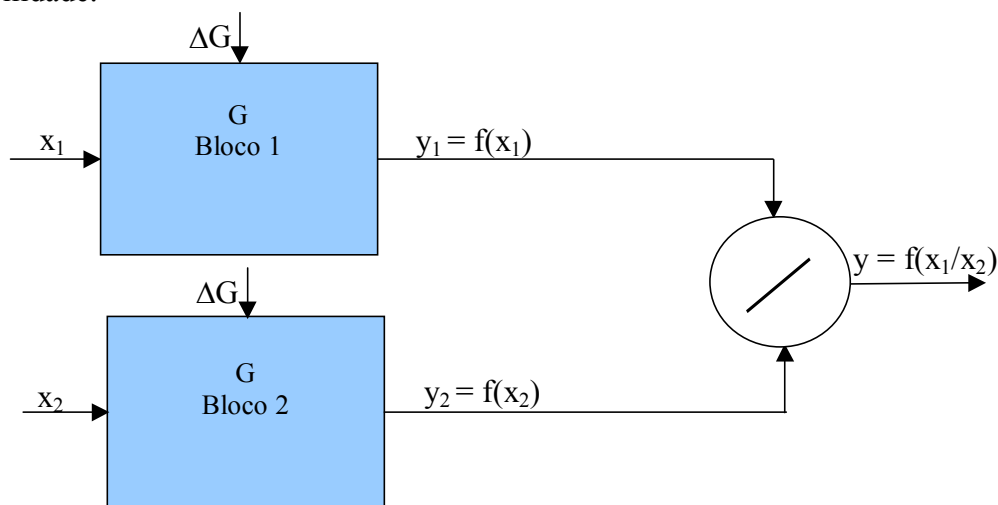


Figura 41 Estrutura de razão

4.1.4. Estrutura de servo transdução

Esta estrutura utiliza somente um canal de sinal e constitui-se por três blocos principais:

- Bloco subtrator para detectar erros
- Bloco de controle
- Bloco de realimentação ou atuador

O sistema funciona da seguinte maneira: O sinal (x) a ser medido aplica-se na entrada não inversora do bloco subtrator e o sinal realimentado (x_c) na entrada inversora, gerando-se na saída do bloco subtrator um sinal de erro. É bom lembrar que o sinal (x_c) deve possuir a mesma natureza física de (x). Ex. Força, deslocamento, etc.

A diferença entre (x) e (x_c) é tratada no bloco de realimentação de maneira a compensar permanentemente a variação do sinal de entrada, fornecendo uma saída de erro perto de zero.

Do diagrama de blocos mostrado pela Figura 42 obtemos:

$$y = G \cdot \Delta x \quad x_c = H \cdot y \quad e \quad \Delta x = x - x_c$$

sendo H e G as sensibilidades dos blocos de realimentação e controle respectivamente.

Verifica-se então:

$$x_c = G \cdot H \cdot \Delta x = GH \cdot (x - x_c)$$

como $GH \gg \gg \gg 1$ então a saída fica:

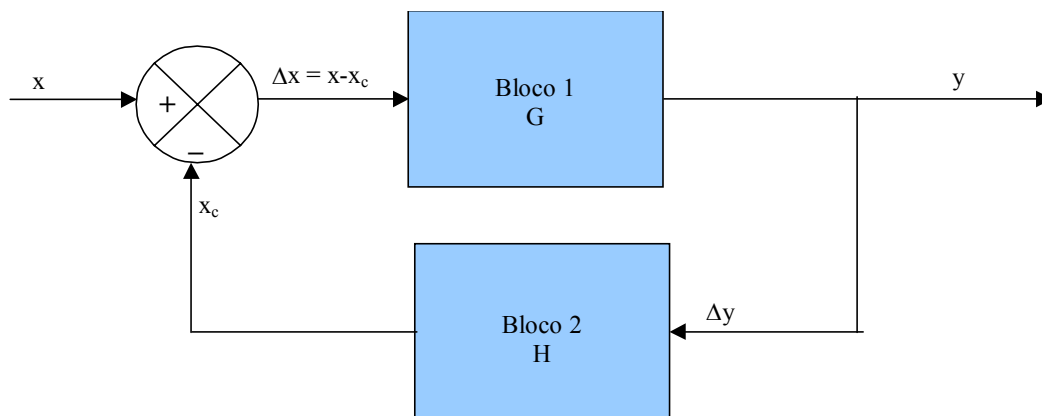


Figura 42 Estrutura de servo-transdução

Pode-se determinar o erro na saída (Δy) supondo que esta estrutura apresenta erros nos blocos 1 e 2 (ΔG e ΔH) respectivamente, se (x) é constante então:

$$\Delta y = \left[\frac{1}{(1 + GH)^2} \cdot \Delta G - \frac{G^2}{(1 + GH)^2} \cdot \Delta H \right] \cdot x$$

Verifica-se que variações no bloco 1 de controle são reduzidas por um fator $1/(1+GH)^2$.

Esta estrutura permite então a geração de transdutores muito sensíveis e com características metrológicas excelentes

5. Elementos básicos de sensoriamento

5.1. Domínios de energia

Podem-se distinguir seis diferentes domínios de energia

- Energia Luminosa: Energia relacionada com ondas eletromagnéticas de radio, microondas, infravermelho, luz visível ultravioleta, raios-X, raios gama etc. Ex. Intensidade luminosa, comprimento de onda, polarização, fase, refletância, transmitância, etc.
- Energia Mecânica: Energia relacionada a forças, deslocamentos e fluxos mecânicos além da energia gravitacional. Ex. Força, pressão, torque, vácuo, vazão, volume, espessura, massa, nível, posição, deslocamento, velocidade, aceleração, inclinação, rugosidade, etc.
- Energia Térmica: Energia relacionada à cinética de átomos e moléculas. Ex. Temperatura, calor, calor específico, entropia, fluxo de calor.
- Energia Elétrica: Energia relacionada à eletricidade em geral. Ex. Tensão, corrente, carga, resistência, indutância, capacitância, constante dielétrica, polarização elétrica, frequência, duração de pulsos, etc.
- Energia Magnética: Energia correspondente aos fenômenos do magnetismo em geral. Ex. Intensidade de campo, densidade de fluxo, momento magnético, magnetização, permeabilidade, etc.
- Energia Química: Energia relacionada com os fenômenos de interação química da matéria. Ex. Composição, concentração, taxa de reação, toxicidade, potencial de oxi-redução, PH, etc.

Em geral no caso dos transdutores de entrada ou sensores deseja-se converter estes sinais para o domínio elétrico ou do domínio elétrico para um dos seis apontados anteriormente no caso dos transdutores de saída ou atuadores, veja Figura 43 abaixo.

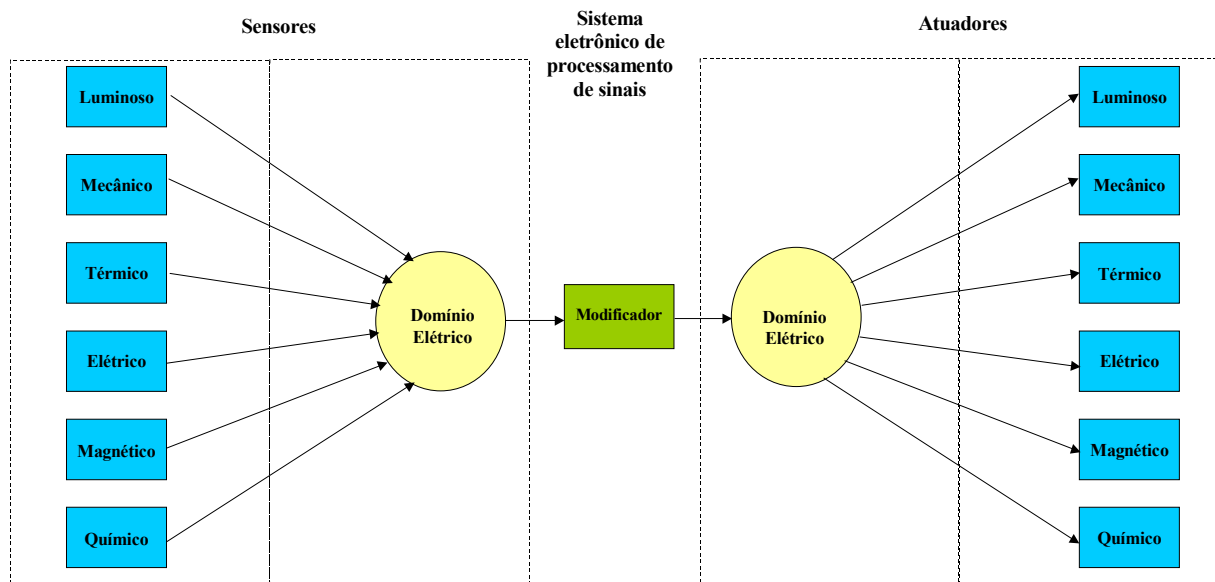


Figura 43 Diversas formas de transdução

5.2. Conversão nos diversos domínios de energia

Existem uma diversidade de efeitos físicos ou químicos utilizados para a realização de conversão de energia nos transdutores de entrada ou saída de um sistema de medida. Como em geral no caso dos transdutores de entrada ou sensores deseja-se converter estes sinais para o domínio elétrico ou do domínio elétrico para um demais domínios no caso dos transdutores de saída ou atuadores, apresentamos alguns dos efeitos mais usados para a implementação de sensores e atuadores, nas tabelas a seguir:

Tabela 5 Domínio de Energia Luminosa:

Efeito	Descrição
Fotovoltaico	Uma tensão é gerada pela radiação incidente na junção de dois materiais diferentes
Fotocondutividade	O aumento da condutividade elétrica de um material devido à incidência de uma radiação
Fotoeletricidade	Elétrons e lacunas são gerados e separados na área da junção devido a uma radiação incidente
Fotoluminiscência	Uma energia radiante é emitida devido à uma radiação incidente com menor comprimento de onda
Fotodieletricidade	A mudança de uma constante dialética devido a uma radiação incidente
Electrolumiscência	Uma energia radiante é emitida devido a ação de um campo elétrico
Incandescência	Emissão de radiação devido ao movimento térmico de átomos ativados por uma corrente elétrica

Tabela 6 Domínio de Energia Mecânica:

Efeito	Descrição
Piezoresistividade	Varição da resistência elétrica de um material devido à mudança da condutividade ou forma quando sujeito à deformações mecânicas
Piezoelasticidade	Geração de cargas superficiais devido a forças mecânicas e vice-versa
Magnetostricção	Deformação mecânica de um material devido ao campo magnético ou mudança de magnetização do material devido à deformação mecânica
Fotoelasticidade	Geração de refração dupla devido a forças mecânicas
Termoelasticidade	Geração de uma tensão em duas regiões de um metal devido a deformações mecânicas ou diferenças de temperatura na região
Triboeletricidade	Geração de cargas elétricas superficiais devido ao atrito entre dois materiais

Tabela 7 Domínio de Energia Térmica:

Efeito	Descrição
Termoeletricidade (Seebeck)	Geração de uma corrente elétrica num circuito fechado de dois condutores com diferentes temperatura de junção
Piezoelasticidade	Mudança de polarização elétrica devido à variações da temperatura
Incandescência	Emissão de energia luminosa devido ao aquecimento de um material
Peltier	Geração de uma diferença de temperatura entre duas junções devido a passagem de uma corrente elétrica
Nerst	Geração de um campo elétrico devido a um gradiente de temperatura e campo magnético
Supercondutividade	Mudança da condutividade para um valor perto de infinito abaixo de uma temperatura crítica
Eletro-termico	Geração de calor em um condutor devido a passagem de uma corrente elétrica
Termocondutividade	Mudança da condutividade elétrica devido à variações da temperatura

Tabela 8 Domínio de Energia Magnética:

Efeito	Descrição
Hall	Geração de um campo elétrico em um condutor, devido à corrente e campo magnético que encontram-se mutuamente perpendiculares
Magneto-resistência	Mudança da resistividade de um material devido ao campo magnético
Magnetostricção	Uma deformação mecânica é gerada num material ferromagnético pelo campo magnético incidente
Eletromagnético	Mudança da magnetização devido à uma corrente elétrica
Maggi-Righi-Leduc	Mudança da condutividade térmica devido ao campo magnético incidente
Suhl	Mudança de condutividade na superfície de um semiconductor devido ao campo magnético

Tabela 9 Domínio de Energia Química:

Efeito	Descrição
Volta	Geração de tensões entre dois metais diferentes
Galvano-elétrico	Geração de tensões entre dois metais diferentes quando imersos num eletrólito
Químico-magnético	A variação da magnetização de um material magnético pela absorção de um gás
Electroquímico	Mudança de estrutura devido a uma corrente elétrica
Termoquímico	Mudança de estrutura devido a uma variação da temperatura
Química-elétrica	Mudança na condutividade da superfície de um semiconductor quando em contato com um eletrólito

5.3. Tipos de transdutores

Existem diversas formas de classificar os transdutores (sensores e atuadores): em relação à energia de entrada, em relação à perturbação que introduzem no meio, em relação ao método de transdução, em relação ao tipo de sinal gerada, ou ainda pelos diversos estágios de transdução Ex. direto ou indireto, etc.

Uma importante característica em relação à energia necessária para torna-los operacionais distingue os transdutores em duas categorias:

- Transdutores Auto-geradores ou ativos
- Transdutores Modulados ou Passivos

Outra forma de caracterizar um transdutor é em relação à perturbação que o dispositivo introduz na medida realizada, assim temos:

- Transdutores Invasivos e Não-Invasivos
- Transdutores Intrusivos e Não Intrusivos

Também podemos classificar os transdutores pelo tipo de sinal que eles geram:

- Transdutores analógicos
- Transdutores digitais

5.3.1. Transdutores Auto-geradores ou ativos

Um transdutor Auto-gerador ou ativo é definido como um transdutor que não requer uma fonte de energia auxiliar para realizar a conversão entre dois domínios de energia. Ex. termopar, célula solar, etc.

5.3.2. Transdutores Modulados ou Passivos

Um transdutor modulado ou passivo é definido como um transdutor que requer uma fonte de energia auxiliar para realizar a conversão entre dois domínios de energia. Ex. Strain Gage, capacitâncias, etc.

5.3.3. Transdutores Invasivos

Os transdutores invasivos são aqueles que tem contato e apresentam interação físico-química com o processo onde se efetua a medida.

5.3.4. Transdutores Intrusivos

Os transdutores intrusivos são aqueles que tem interação físico-química com o processo onde se efetua a medida. Graficamente pode-se visualizar a diferença entre estes dispositivos, na Figura 44

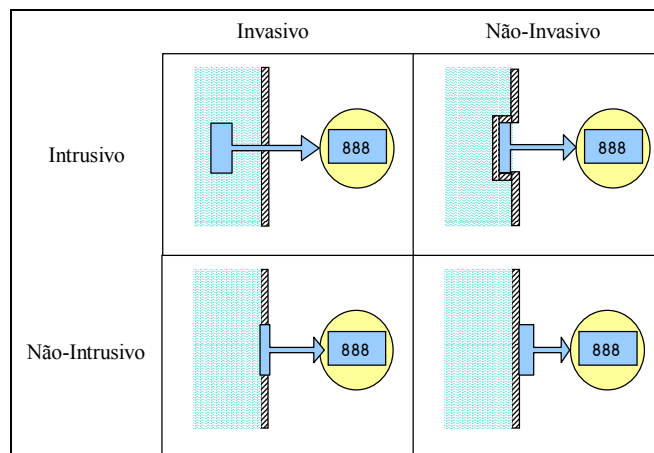


Figura 44 Definição dos termos Invasivo e Intrusivo

5.4. Elementos de contato

Os elementos de contato convertem deslocamentos em sinais elétricos pela abertura ou fechamento de contatos.

Na Figura 45 seguinte verificam-se varias formas de utilização deste método

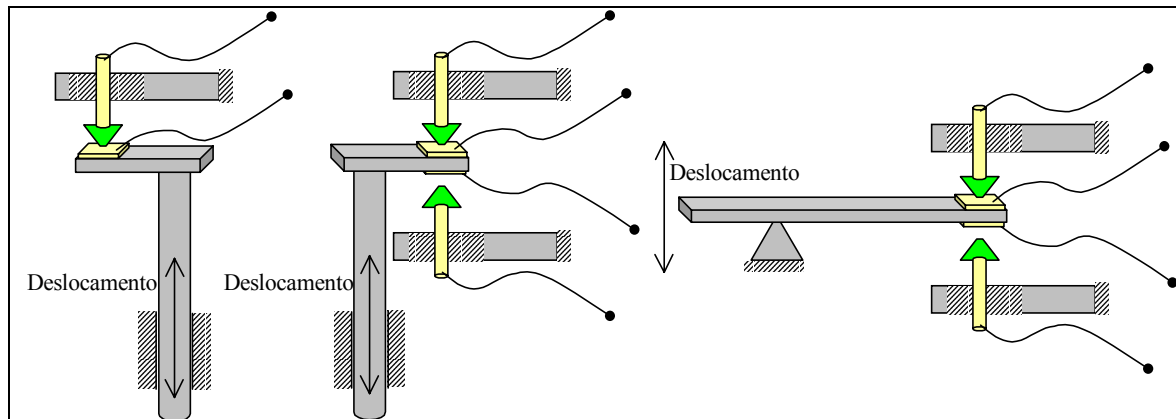


Figura 45 Elementos de contato

5.5. Elementos resistivos

Num transdutor resistivo a conversão do parâmetro medido se expressa numa variação de resistência na saída do elemento. Existem uma diversidade de elementos resistivos dos quais destacamos:

- Elementos resistivos de junção
- Elementos potenciométricos
- Elementos termoresistivos
- Elementos piezoresistivos
- Elementos fotocondutivos

5.5.1. Elementos resistivos de junção

Nestes elementos uma força ou deslocamento produz uma mudança de resistência no elemento. O elemento constitui-se de dois contatos e um ou vários discos de material resistivo, como carvão, grafite ou um plástico condutivo. Com o stress induzido pela força (F) ou deslocamento (δ) o caminho da corrente muda variando assim a resistência do elemento de forma não linear. Ex. Microfone de carvão usado nos antigos telefones, veja Figura 46.

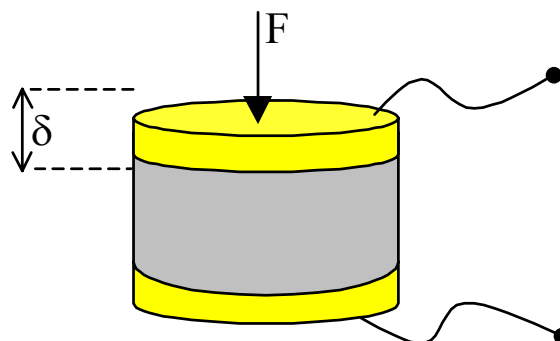


Figura 46 Elementos de junção resistiva

Neste caso para excitação por pressão ou força a resistência da junção pode ser descrita pela seguinte equação:

$$R_j = R_o + \frac{a}{F}$$

Com : R_j = resistência da coluna (Ω), R_o = Resistência constante(Ω), F = Força (N) e a = constante ($\Omega.N$)

5.5.2. Potenciômetros

Os elementos potenciométricos são utilizados para converter deslocamentos lineares ou angulares para mudanças de resistência elétrica. Este elemento possui uma resistência, um contato deslizante e três terminais para sua interconexão, veja Figura 47. A resistência ou elemento eletrocondutivo pode ser realizada por um resistência de fio enrolada, uma barra de carvão ou grafite, um material plástico, um filme fino ou espesso de metais ou óxidos metálicos.

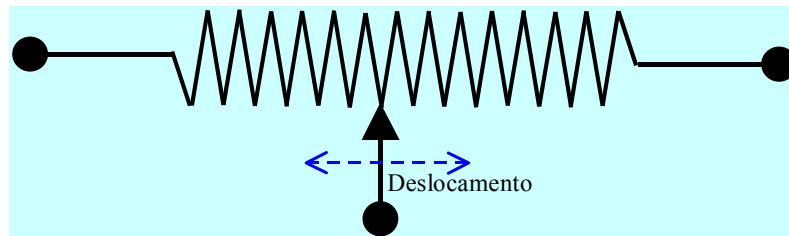


Figura 47 Potenciômetro

A resistência de um potenciômetro entre dois pontos A e B é dada por:

$$R = \rho \frac{x}{A}$$

com ρ = Resistividade do fio ($\Omega.m$), x = comprimento do fio entre os pontos A e B (m), e A = seção transversal do fio (m^2).

O potenciômetro em geral é ligado como um divisor de tensão e seu contato central é ligado à uma carga R_L , veja fig. 26. Supondo que o enrolamento é uniforme, que o fio não muda nem o diâmetro nem a resistividade, a tensão de saída do elemento é:

$$V_L = \frac{V_S \cdot \left(\frac{x}{L}\right)}{\left(\frac{R_p}{R_L}\right) \cdot \left(\frac{x}{L}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) + 1}$$

Com: x = comprimento do fio entre os pontos A e B (m), L = comprimento total (m) e R_p = Resistência total do dispositivo (Ω).

Uma forma interessante de ligar um potenciômetro é como reostato, onde se controla a corrente numa carga R_L de forma não linear, veja Figura 48. Então a corrente pode-se expressar assim:

$$I_L = \frac{V_s}{(R_2 + R_L)} = \frac{V_s}{R_p} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{R_L}{R_p}} \right)$$

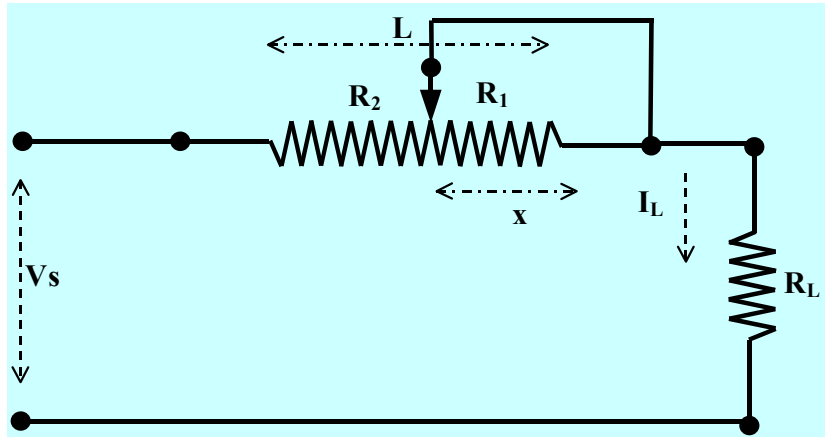


Figura 48 Ligação de um potenciômetro como reostato

Na Figura 49 apresentam-se algumas formas de construção destes dispositivos.

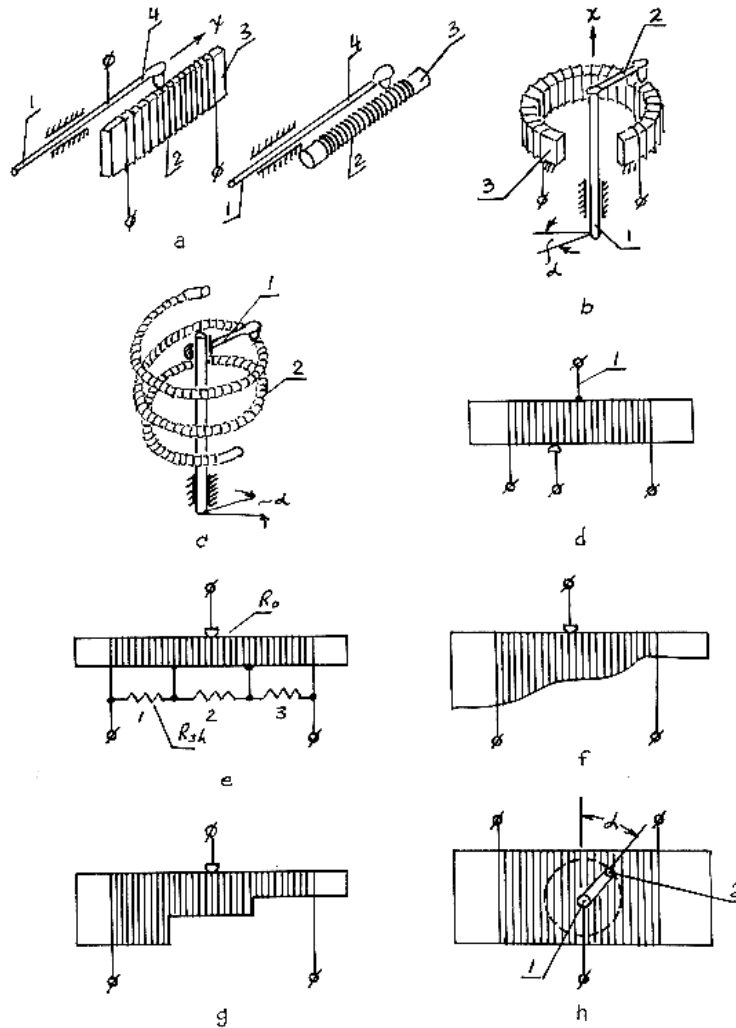


Figura 49 Algumas implementações de transdutores potenciométricos

Na Figura 49 observamos em (a) dispositivos para deslocamento linear, em (b) dispositivo para deslocamento angular, em (c) elemento multivoltas, em (d) elemento com conexão "tap" no meio do enrolamento, em (e, f, g) elementos para geração de características não lineares e em (h) geração de funções seno ou coseno em função do ângulo α .

5.6. Termo-resistores

São resistores que variam sua resistência de acordo com a temperatura incidente neles, destacamos aqui:

5.6.1. Resistências metálicas

Alguns metais apresentam coeficientes de variação da resistência com a temperatura elevados e podem ser utilizados como conversores termoresistivos ou (RTD).

A relação entre a resistência de um metal e a temperatura pode ser descrita assim:

$$R_t = R_o \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots)$$

Com: R_T = Resistência do dispositivo à uma temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) e α, β e γ = coeficientes de variação da resistência com a temperatura, específicos para cada metal.

Para o caso da Platina entre 0 e 850 $^{\circ}\text{C}$ temos:

- $\alpha_{\text{Pt}} = 3907 \times 10^{-6}/\text{K}$
- $\beta_{\text{Pt}} = -0.5768408 \times 10^{-6}/\text{K}^2$

Para o caso do Níquel entre -50 e 180 $^{\circ}\text{C}$ temos:

- $\alpha_{\text{Ni}} = 5470 \times 10^{-6}/\text{K}$
- $\beta_{\text{Ni}} = 0.639 \times 10^{-5}/\text{K}^2$
- $\gamma_{\text{Ni}} = 0.69 \times 10^{-8}/\text{K}^2$

Para o caso do Cobre entre -50 e 180 $^{\circ}\text{C}$ temos:

- $\alpha_{\text{Cu}} = 4260 \times 10^{-6}/\text{K}$

Graficamente pode-se visualizar o comportamento destes três metais, veja Figura 50:

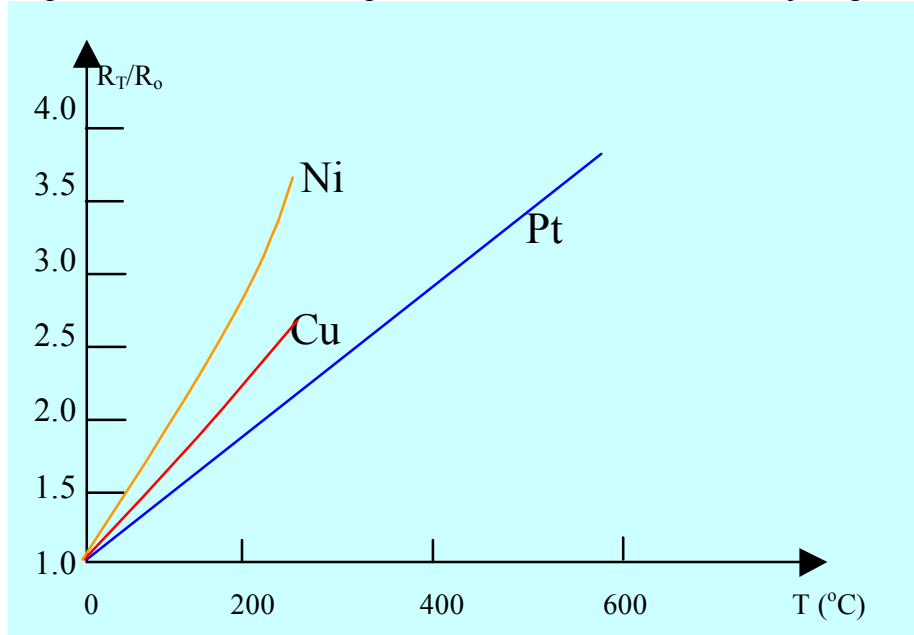


Figura 50 Variação da resistência com a temperatura para Platina, Níquel e Cobre

Uma forma usual de ligar estes elementos de forma a eliminar a resistência dos fios de ligação é usando três fios associados a uma ponte de Wheatstone, assim dois fios são utilizados para realizar a excitação do elemento sensor, já que este é um elemento passivo e um fio para extrair a tensão de saída junto com o outro braço da ponte de Wheatstone, na Figura 51 a seguir pode-se verificar o esquema.

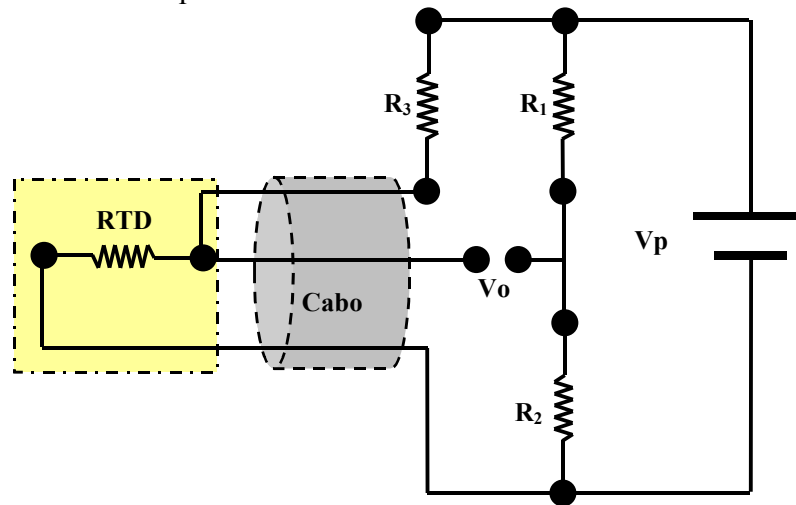


Figura 51 Ligação dos Termo-resistores com três fios.

5.6.2. Termistores

A resistência de alguns semicondutores apresenta mudanças exponenciais de resistência com a temperatura, em geral são óxidos metálicos como cromo, cobalto, ferro, manganês, rutênio e níquel, misturados em certas proporções para obter uma constante do termistor adequada. Um tipo de termistor denominado NTC, já que sua resistência decresce com a temperatura apresenta uma variação que pode ser expressa assim:

$$R_{NTC} = R_o \cdot e^{\frac{\beta}{T}}$$

com R_o = Resistência a uma temperatura de referência em K, T = temperatura absoluta em K, β = constante do termistor.

Um gráfico Resistência Vs. temperatura está apresentado na Figura 52 a seguir.

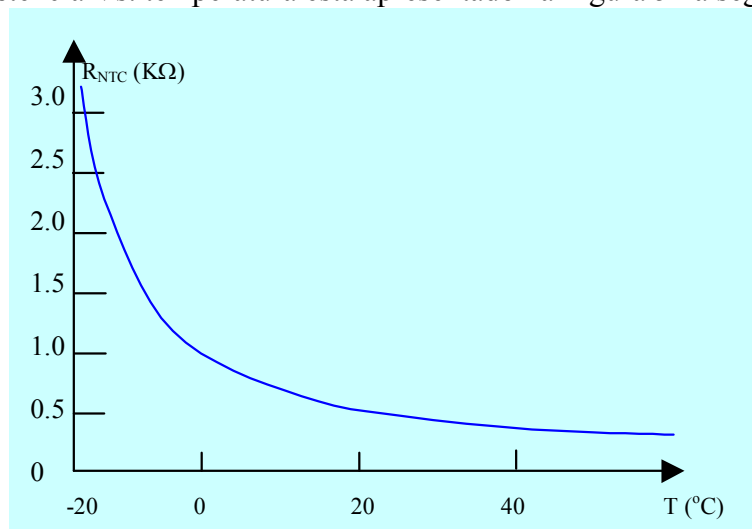
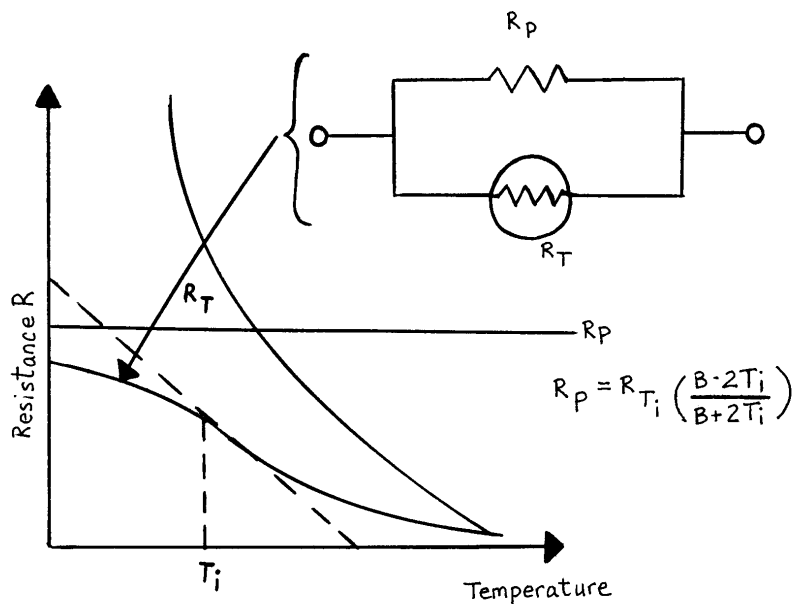
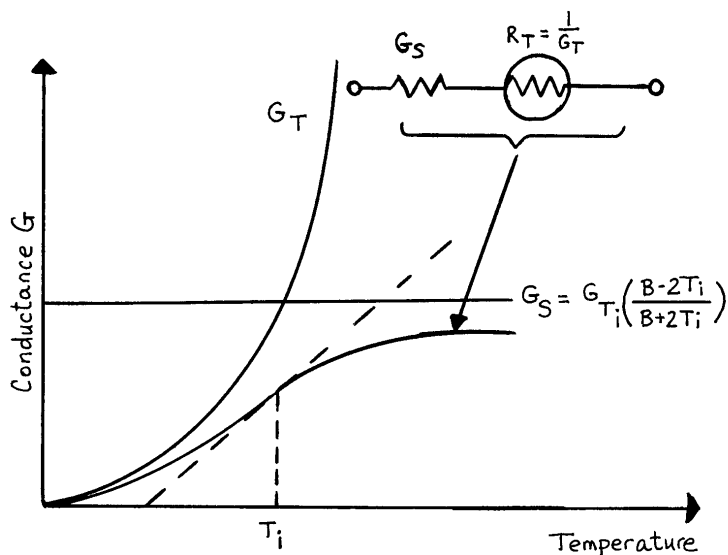


Figura 52 Variação com a temperatura de um termistor.

Os termistores quando associados a resistores fixos comuns podem ser linearizados, escolhendo o valor do resistor fixo e a forma de conexão, na Figura 53 abaixo verificam-se dois métodos de linearização de termistores.



Linearização usando resistor em paralelo



Linearização usando resistor em serie

Figura 53 Formas de linearização de termistores

5.7. Piezoresistores e strain gages

Os piezoresistores, strain gages ou extensômetros elétricos são dispositivos que produzem a mudança da resistência de um material condutivo em resposta a uma deformação mecânica. Este material pode ser um líquido, um plástico, um metal ou um semiconductor. Sabe-se que um resistor de acordo com a lei de OHM, pode ser expresso assim:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

Com: ρ = resistividade do elemento, l = comprimento do resistor e A = seção do resistor. A sua variação unitária está dada pelas variações de resistividade comprimento e seção:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Define-se Gage Factor como a variação unitária multiplicado pela deformação mecânica no elemento $\varepsilon = (\Delta l/l)$ em (μ strain):

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

Os strain gages são implementados usualmente das seguintes maneiras:

- Fios metálicos sem colar
- Fios metálicos colados numa superfície
- Filmes metálicos em base polimérica colados numa superfície
- Filmes finos depositados numa superfície
- Filmes espessos depositados numa superfície
- Semicondutores colados numa superfície
- Semicondutores difundidos ou implantados numa superfície

Na Figura 54 abaixo strain gage de filme metálico em base polimérica que podem ser colados numa superfície.

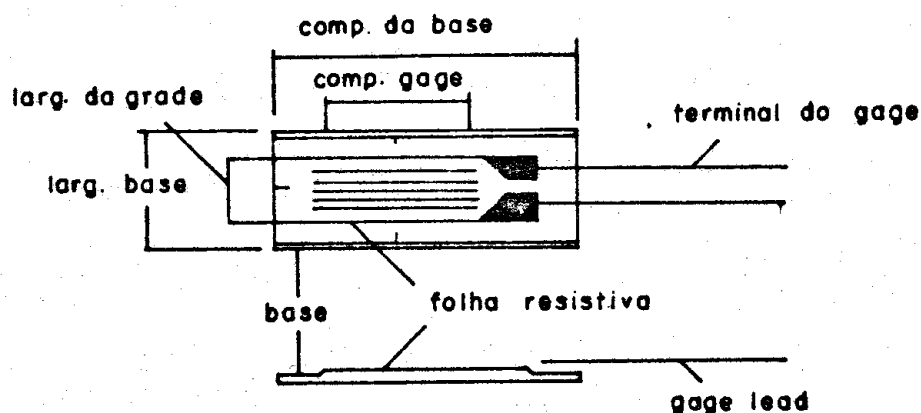


Figura 54 Strain-Gage ou extensômetro elétrico

Na Figura 55 são apresentadas diversas forma de ligar strain gages para maximizar sua saída quando conectados a uma ponte de Wheatstone.

Assim é possível realizar medidas usando 1, 2 e 4 strain gages colocado de forma adequada na ponte, para medir deformações uniaxiais de tensão ou compressão, deformações devido a dobras em tensão ou compressão, torque, força e deslocamento, etc.

No.	Application example	No. of gages	Circuitry	Output	Remarks	Connection to bridge box
1	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	1		$e_o = 1/4 K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $K_s = \text{Gage factor}$ $\epsilon_o = \text{Strain}$ $e_i = \text{Input voltage}$ $e_o = \text{Output voltage}$ $R_g = \text{Gage resistance}$ $R = \text{Fixed resistance}$	Suitable where ambient temperature change is small.	
2	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	1		$e_o = 1/4 K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$	Temperature-compensating method by using "SELCOM" gage (3-lead-wire arrangement) Temperature effects of lead wire are cancelled.	
3	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	1		$e_o = \frac{R_g \cdot R_B}{(R_g + R_B)} K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $R_B = \text{Ballast resistance}$	Suitable chiefly for semiconductor gage. Suitable where ambient temperature change is small.	—
4	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	2		$e_o = \frac{(1+\mu)}{4} K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $\mu = \text{Poisson's ratio}$ $R_{g1}, R_{g2} : \text{Gage resistance}$ $R : \text{Fixed resistance}$ $R_{g1} \dots \text{Strain} : \epsilon_o$ $R_{g2} \dots \text{Strain} : -\mu \epsilon_o$	Output: $(1+\mu)$ times Temperature compensation	
5	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	2		$e_o = 1/2 K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $R_{g1} \dots \text{Strain} : \epsilon_o$ $R_{g2} \dots \text{Strain} : \epsilon_o$ $R : \text{Fixed resistance}$	Output: Twice	
6	 Bending stress	2		$e_o = 1/2 K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $R_{g1} \dots \text{Bending strain} : \epsilon_o$ $R_{g2} \dots \text{Bending strain} : -\epsilon_o$ $R : \text{Fixed resistance}$	Output: Twice Temperature compensation Compressive (tensile) strain is cancelled.	
7	 Single-axial stress (uniform tension and compression)	2		$e_o = 1/4 K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $R_{g1} \dots \text{Strain} : \epsilon_o$ $R_{g2} \dots \text{Strain} : \epsilon_o$ $R : \text{Fixed resistance}$	Bending strain is cancelled	
8	 Torsional stress	4		$e_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot e_i$ $R_{g1}, R_{g3} \dots \text{Torsional strain} : \epsilon_o$ $R_{g2}, R_{g4} \dots \text{Torsional strain} : -\epsilon_o$	Output: 4 times Temperature compensation Bending stress is cancelled.	

Figura 55 Formas de ligação típicas usando strain gages

Outras configurações geométricas dos strain gages podem ser visualizadas na Figura 56, que permitem medir deformações em (a) dois eixos 90°, (b) três eixos 120°, (c) três eixos 45°, (d) padrões superpostos e (e) arranjo para medição de deformações radiais e tangenciais para sensores de pressão.

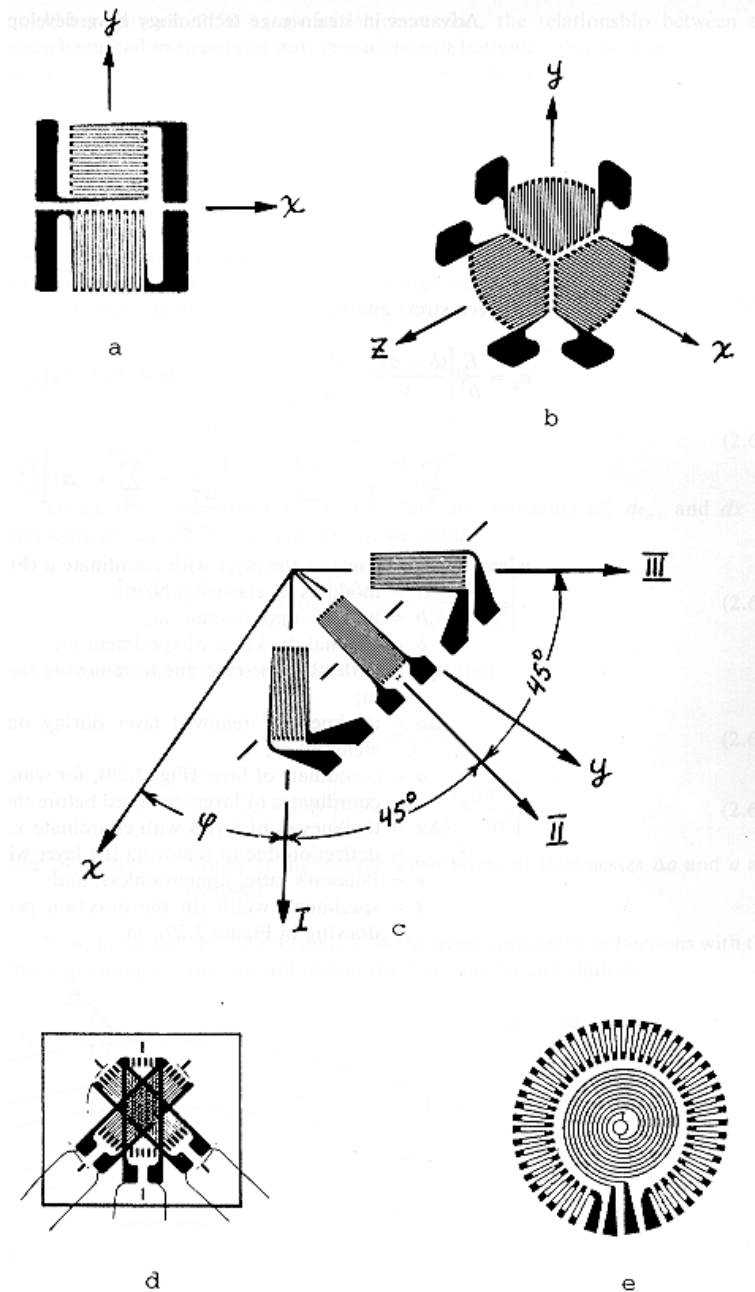


Figura 56 Padrões típicos para strain gages

5.8. Elementos com eletrodos

Os elementos com eletrodos convertem certas quantidades químicas em sinais elétricos, em geral são configurados como um reservatório com um fluido eletrocondutivo e dois ou mais eletrodos. Numa solução eletrolítica pode acontecer a dissociação que é a separação de moléculas em dois ou mais fragmentos ou ions, que possuem cargas elétricas.

Os ions positivos são chamados de cations dado que são atraídos pelo cátodo (-) da célula com eletrodos. Os ions negativos são chamados ânions dado que são atraídos pelo ânodo (+) da célula com eletrodos.

Se eletrodos metálicos são imersos numa solução com pequena concentração de ions positivos, alguns átomos dos eletrodo serão dissolvidos, para manter a neutralidade de carga, portanto um potencial elétrico aparecerá neste eletrodo, em relação a um eletrodo de referência, chamado potencial de Nerst:

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln(f \cdot c)$$

com: E = potencial no eletrodo(V), E_o = Potencial a temperatura e concentração padrão (V), R = 8,317 = Constante universal dos gases (J/K), T = temperatura absoluta (K), n = valência ionica, F = 96487 constante de Faraday (C/g-eq), c = concentração de ions (Mol/L), f = coeficiente de atividade ionica.

5.8.1. Medida de potenciais (pH)

O pH é definido como:

$$pH = \log_{10} \left(\frac{1}{\text{concentração_de_ions_de_Hidrogênio}} \right)$$

Um solução com pH = 7 é dita neutra, com pH >7 ácida e com pH <7 alcalina.

O PH de soluções é obtido a partir de medições da diferença de potencial entre dois eletrodos, um deles é o eletrodo de medida e o outro o eletrodo de referência ou eletrodo padrão de hidrogênio. Os eletrodos requerem uma construção especial para obter um potencial de Nerst assim:

$$E = E_o + b pH$$

com: E_o = Potencial para pH=0 (V), b = constante definida pelo tipo de eletrodos e temperatura da solução (V/pH).

Na Figura 57 a seguir pode-se verificar uma implementação dos eletrodos de referência e de medida para ions de hidrogênio. O eletrodo de medida de Ag-AgCl (Prata-Cloreto de Prata) está coberto por uma membrana de vidro permeável a ions de hidrogênio e o eletrodo de referência é mais complexo com o objetivo de gerar um potencial estável para realizar a medida. A tensão gerada pelos eletrodos é lida por um circuito eletrônico com uma impedância de entrada elevada.

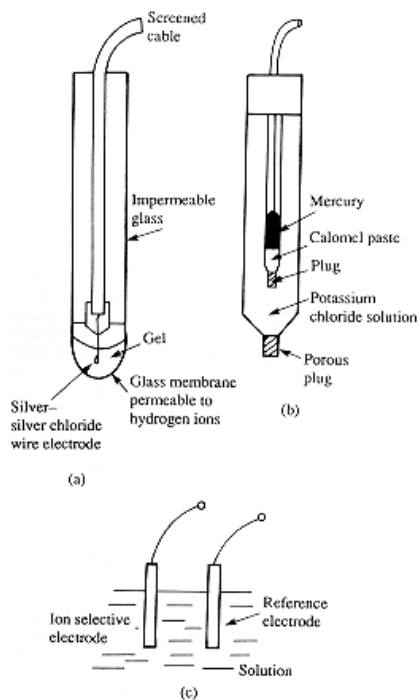


Figura 57 Eletrodos para medição do pH

5.8.2. condutividade em soluções

Outra aplicação de eletrodos em soluções é medição de condutividade elétrica, que pode ser determinada assim:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\lambda a} \cdot K_e$$

com λ = condutividade equivalente (S/cm), K_e = Constante do elemento, depende da geometria, (1/cm), a = atividade química.

Em geral para extrair a informação deve-se usar excitação AC para evitar polarização dos eletrodos.

Algumas configurações usadas para medir condutividade em soluções são apresentadas na Figura 58.

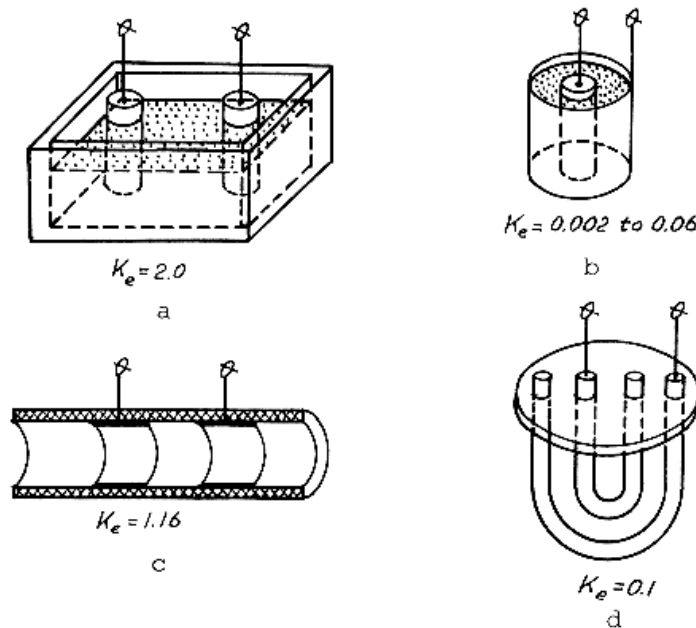


Figura 58 Configurações para medidas de condutividade

5.9. Elementos capacitivos

Um capacitor está formado por duas placas paralelas separadas por um material dielétrico e sua capacitância está dada por:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{\delta}$$

com: C = capacitância (F), ϵ = permitividade do dielétrico (F/m), δ = separação entre as placas (m), A = área comum entre as duas placas (m²), mudanças na separação entre as placas, área comum e dielétrico permitem usar estes elementos com transdutores.

5.9.1. Estruturas usadas para sensores capacitivos

Apresenta-se a seguir na Figura 59 estruturas utilizadas para a implementação de transdutores capacitivos, podemos agrupa-las da seguinte forma:

- Elementos com variações na separação das placas
- Elementos com variações na área comum
- Elementos com variações do dielétrico

Structures of Capacitive Elements

No.	Variable	Structure	Basic relationship	No.	Variable	Structure	Basic relationship
1	Gap δ		$C = \epsilon A \frac{1}{\delta \pm \Delta \delta}$	9	Position of a shaped dielectric		$C = f(\delta, A, \epsilon_0, \epsilon, \delta_1, x)$
2	Gaps δ for a differential scheme		$C_1 = \epsilon A \frac{1}{\delta \pm \Delta \delta}$ $C_2 = \epsilon A \frac{1}{\delta \pm \Delta \delta}$	10	Position of a liquid dielectric		$C = \frac{W}{\delta} [H \epsilon_0 + h(\epsilon - \epsilon_0)]$
3	Area A		$C = \frac{\epsilon}{\delta} (A \pm \Delta A)$ $\Delta A = f(\Delta)$	11	Dielectric constant is a function of force, strain, temperature, and moisture content (F, lambda, t^o, and phi, respectively)		$C = \frac{A}{\delta} \epsilon(F, \lambda, t^o, \phi)$
4	Areas A for a differential scheme		$C_1 = \frac{\epsilon}{\delta} (A \pm \Delta A)$ $C_2 = \frac{\epsilon}{\delta} (A \mp \Delta A)$ $\Delta A = f(\Delta)$	12	Thickness of a dielectric film		$C = \frac{A}{\delta - \delta_f + \frac{\delta_f}{\epsilon_f}}$
5	Area A for an angular displacement		$C = \frac{\epsilon}{\delta} (A \pm \Delta A)$ $\Delta A = f(\Delta)$	13	Thicknesses and dielectric constants in a multi-dielectric structure		$C = \frac{A}{\frac{\delta_1}{\epsilon_1} + \frac{\delta_2}{\epsilon_2} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\epsilon_n}}$
6	Areas A for a differential angular displacement		$C_1 = \frac{\epsilon}{\delta} (A \pm \Delta A)$ $C_2 = \frac{\epsilon}{\delta} (A \mp \Delta A)$ $\Delta A = f(\Delta)$	14	Thicknesses and a dielectric constant in a multiplate structure. n is the number of plates		$C = \frac{A \epsilon}{\delta} (n - 1)$
7	Presence or absence of a dielectric		$C' = \frac{\epsilon_0}{\delta} A$ $C'' = \frac{\epsilon}{\delta} A$	15	Angular displacement. w is plate's width		$C = \frac{\epsilon w}{\alpha} \ln \frac{R}{r}$
8	Position of a dielectric		$C = \frac{w}{\delta} [l \epsilon_0 + l(\epsilon - \epsilon_0)]$				

Figura 59 Estruturas usadas em elementos capacitivos

5.10. Elementos indutivos

Indutância e propriedade de um dispositivo de reagir às mudanças de corrente elétrica que circulam através do elemento. Esta propriedade pode ser modificada variando as características do caminho magnético, através variações no comprimento, área, gap, permeabilidade da parte ferromagnética, conexão ou colocação do enrolamento. A indutância de uma bobina com um núcleo ferromagnético expressa-se assim:

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2}{\mu_r A}$$

Sendo L = Indutância (H), R = Relutância do elemento(1/H), $N = N_0$ de voltas, A = área de uma volta (m^2), l = comprimento da bobina (m), veja Figura 60.

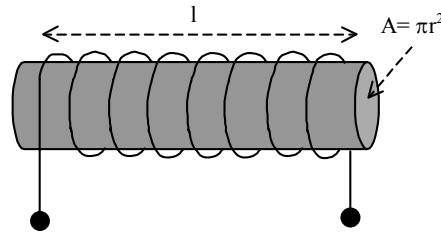


Figura 60 Indutância típica

5.10.1. Estruturas usadas para sensores indutivos

Na Figura 61 são apresentadas diversas configurações para elementos indutivos:

Structures of Inductive Elements

No.	Variable	Structure	Basic relationship	No.	Variable	Structure	Basic relationship
1	Gap δ in a single closed-magnetic-path circuit		$L = \frac{N^2}{R}$ $R = \frac{2(\delta \pm \Delta\delta)}{\mu_0 A}$	9	Displacement Δx of halves of two coils		$L = L_1 + L_2 \pm 2L_{12}$ $L_{12} = f(x \pm \Delta x)$
2	Gaps δ_1 and δ_2 in a differential closed-magnetic-path circuit		$L_1 = \frac{N_1^2}{R_1}, L_2 = \frac{N_2^2}{R_2}$ $R_1 = \frac{2(\delta_1 \pm \Delta\delta)}{\mu_0 A_1}$ $R_2 = \frac{2(\delta_2 \mp \Delta\delta)}{\mu_0 A_2}$	10	Displacement x of a sliding contact along the length of the inductor		$L = \frac{(N\mu)^2}{R}$
3	Area A in a single closed-magnetic-path circuit		$L = \frac{N^2}{R}$ $R = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu_0(A \pm \Delta A)}$	11	Displacement Δx of a countercore		$L = f(\Delta x, y(x))$
4	Areas A_1 and A_2 in a differential closed-magnetic-path circuit		$L_1 = \frac{N_1^2}{R_1}, L_2 = \frac{N_2^2}{R_2}$ $R_1 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu_0(A_1 \pm \Delta A_1)}$ $R_2 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu_0(A_2 \mp \Delta A_2)}$	12	Displacement x of a short circuited turn		$L = f(x)$ See text
5	Area A in a single, closed-path, angular-displacement circuit		$L = \frac{N^2}{R}$ $R = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu_0[A \pm \Delta A(\varphi)]}$	13	Thickness d of an electro-conductive rod (wire)		$L = f(d)$ See text
6	Areas A_1 and A_2 in a differential, closed-path angular-displacement circuit		$L_1 = \frac{N_1^2}{R_1}, L_2 = \frac{N_2^2}{R_2}$ $R_1 = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\delta}{A} + \frac{\delta_1}{A_1 \pm \Delta A_1(\varphi)} \right]$ $R_2 = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\delta}{A} + \frac{\delta_2}{A_2 \mp \Delta A_2(\varphi)} \right]$	14	Proximity Δx of an electro-conductive part to a coil inducing eddy currents in the part		$L = f(x)$ See text
7	Core's displacement Δx in a single, open-path circuit		$L = f(\Delta x)$ See text	15	Permeability μ , which is a function of force, pressure, strain, temperature, etc. (F, P, λ , and t° , respectively)		$L = \frac{N^2}{R}$ $R = R_0 + \frac{l}{A\mu(F, P, \lambda, t^\circ, H)}$
8	Armature's displacement Δx in a single, open-path circuit		$L = f(\Delta x)$ See text	16	Position of a discrete-output-modulating member		$L_1 > L_2$

Figura 61 Estruturas usadas em elementos indutivos

5.10.2. Taco-gerador de relutância variável

Um elemento muito usado rotação de eixos é o taco-gerador de relutância variável, configurado como um ímã, com uma bobina, e uma roda dentada, como mostrado na Figura 62 a seguir:

A relutância do circuito muda cada vez que passa um dente perto do ímã, assim o campo que passa através da bobina flutua ao redor de um valor médio, de forma senoidal. Esta mudança de campo induz uma tensão senoidal na bobina com amplitude e frequência proporcional à velocidade angular da roda dentada.

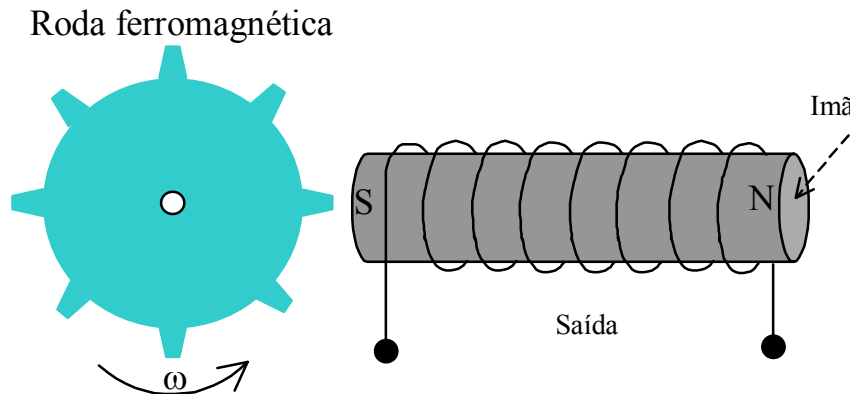


Figura 62 Taco-gerador de relutância variável

A tensão induzida numa bobina de N voltas é:

$$E = N\phi_a n\omega \sin(n\omega t)$$

com ϕ_a = Amplitude da variação do campo, n = No de dentes, ω = velocidade angular da roda.

5.11. Elementos com transformadores (LVDT)

O LVDT (Linear variable differential transformer) ou transformador diferencial linear variável é um dispositivo que apresenta uma bobina primária e duas bobinas secundárias, as quais podem ser conectadas em serie de forma que suas saídas se subtraem.

Ainda este dispositivo possui um núcleo ferromagnético conectado a uma barra não magnética que permite sua movimentação longitudinal. Este dispositivo pode ser usado para medidas de deslocamentos em geral, e indiretamente pode medir diversos parâmetros mecânicos como força, pressão, aceleração e movimentos angulares, veja Figura 63.

Quando o primário é excitado por uma tensão senoidal e o núcleo encontra-se no centro do dispositivo, as tensões induzidas nos secundários são idênticas e em sentido contrário, então a saída do dispositivo será nula. Se o núcleo se movimenta em qualquer direção a tensão resultante já não será nula e permitirá a medida de deslocamento em torno desse ponto.

Para uma tensão senoidal de excitação com frequência angular (ω), no primário, obtém-se na saída dos secundários tensões assim:

$$E_{o1} = k_1 \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad e \quad E_{o2} = k_2 \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

Os valores de (k_1 e k_2) dependem do grau de acoplamento entre primário e secundário para uma certa posição do núcleo, (ϕ) é a diferença de fase entre o sinal no primário e secundário.

A tensão de saída fica:

$$E_o = (k_1 - k_2) \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

Quando o núcleo se desloca entre os dois secundários introduz uma diferença de fase que chega a 180°, porem para qualquer direção entorn do ponto de nulo a tensão aumenta mostrando um comportamento do tipo valor absoluto.

Então quando $k_1=k_2$ o núcleo está na posição central e a tensão de saída é zero, quando $k_1>k_2$

$$E_o = (k_1 - k_2) \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

e quando $k_1 < k_2$

$$E_o = (k_2 - k_1) \cdot \sin(\omega t + (\pi - \phi))$$

Esta característica é usado para distinguir a região em que se encontra o núcleo quando se mede deslocamento. Um circuito eletrônico chamado detetor síncrono a fase é utilizado para gerar tensões positivas e negativas quando o núcleo se encontra fora da região de nulo.

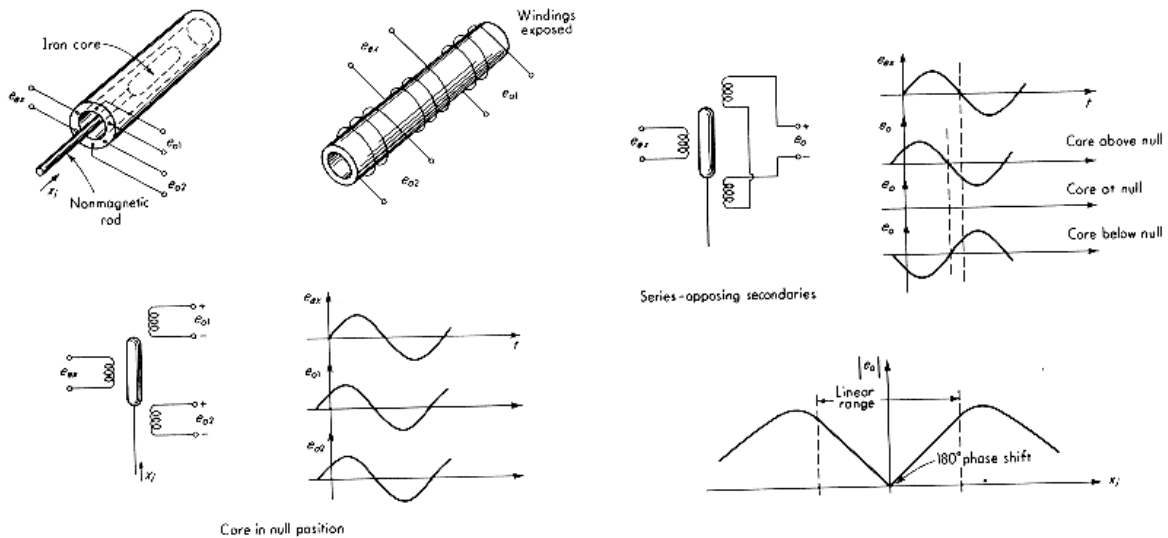


Figura 63 LVDT

5.12. Elementos eletrodinâmicos

A operação dos elementos eletrodinâmicos esta baseada nos princípios de interação eletromagnética. Ex. A tensão e (V) induzida em um condutor de comprimento l (m) movimentando-se em ângulo reto em relação a um campo magnético B (T) com velocidade v (m/s) é dada por:

$$e = Blv$$

A diferença de potencial que aparece numa bobina de N voltas devido a um fluxo Φ (Wb) que está variando é proporcional à derivada deste fluxo e ao numero de voltas, assim:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

5.12.1. Bobina móvel

Na Figura 64 apresenta-se dois exemplos de dispositivos de bobina móvel. Em (a) uma bobina de N voltas está solidária a um diafragma cônico similar ao utilizado em alto-falantes e um imã permanente coloca um campo perpendicular à direção da corrente na bobina. A

bobina é excitada ao longo do eixo x devido a uma pressão acústica gerando uma tensão na bobina de diâmetro d (m):

$$e = \pi B d N \frac{dx}{dt}$$

O sistema pode ser movimentado por uma massa sísmica para medir aceleração ou vibrações. Em (b) utiliza-se modulação do fluxo magnético Φ (Wb) por uma armadura que se movimenta mudando a relutância R (1/H) do circuito magnético, gerando uma tensão e (V) induzida na bobina assim:

$$e = N \Phi R \frac{k}{R_0} \frac{dx}{dt}$$

com R_0 = Relutância para $x = 0$ e k uma constante.

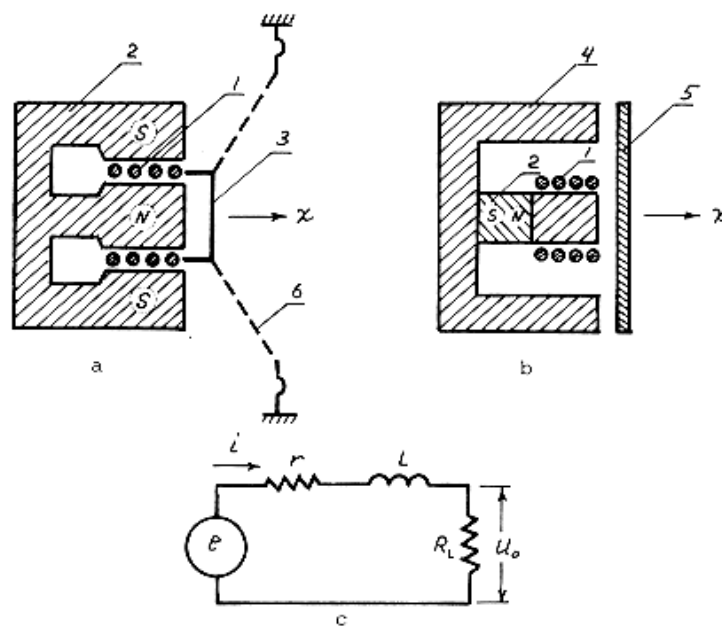


Figura 64 Transdutor eletrodinâmico

5.13. Elementos ressonantes

Os elementos ressonantes fazem parte da classe de transdutores digitais, já que fornecem as informações de saída em frequência, muito fácil de adquirir em sistemas digitais.

Existem diversas formas de implementar estes elementos:

- Cordas vibratórias
- Estruturas vibratórias
- Ressonadores piezoelétricos, acústicos e de microondas

5.13.1. Cordas vibratórias

Este é o dispositivo ressonante mais simples, constitui-se por uma corda com uma certa tensão entre dois suportes, um dos suportes é fixo e o outro acopla uma força ou um deslocamento a ser medido.

Adjacente à corda de comprimento l (m) um detetor de vibrações recolhe e amplifica a vibração da corda e gera uma realimentação para excitar um gerador de vibrações que atua sobre a corda mantendo a oscilação. A corda é colocada em ressonância através de um pulso

fornecido pelo gerador de vibrações e daí em diante é mantida sua oscilação com amplitude constante na frequência natural do sistema, veja Figura 65.

Qualquer mudança na carga devido a um stress σ (N/m²) muda a tensão e portanto a frequência natural f (Hz) do sistema. Esta frequência pode ser expressa assim:

$$f_i = \frac{i}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

sendo i = a ordem do modo de vibração e ρ = densidade do material da corda (kg/m³)

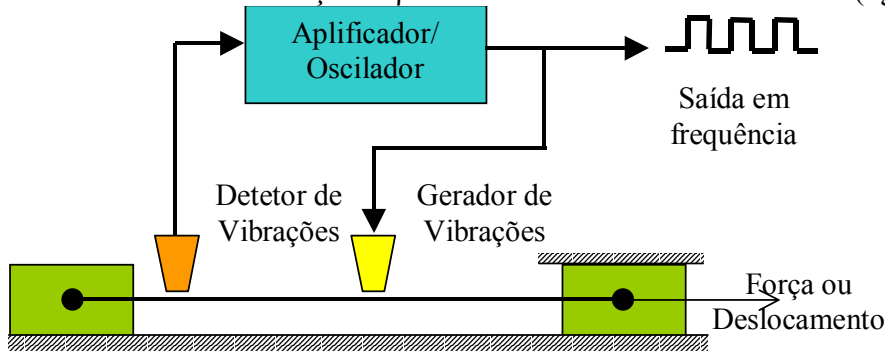


Figura 65 Corda vibratória

5.13.2. Estruturas vibratórias

Existe uma família de transdutores que usa estruturas mecânicas vibratórias como vigas, tubos, cápsulas, cilindros, etc. que permitem medir parâmetros como: pressão, densidade, velocidade angular, aceleração, força, etc.

Como exemplo de estruturas vibratórias apresentamos um medidor de densidade de líquidos que utiliza dois tubos em paralelo, por onde um líquido flui. Nos extremos dos tubos existe uma estrutura rígida de sustentação permitindo a oscilação dos tubos, A estrutura de sustentação está conectada com a entrada do sistema por conexões flexíveis para evitar interferências externas, veja Figura 66.

Entre os dois tubos estão instalados dispositivos de captação e excitação de vibrações, os quais colocam os tubos em um modo de vibração lateral, cuja frequência depende da rigidez mecânica do tubo, da sua massa por unidade de comprimento e seu conteúdo.

A relação entre a densidade ρ = (Kg/m³) do fluido e a frequência de saída f (Hz) é:

$$\rho = k \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right)^2 - 1$$

Com: ω_o = frequência a densidade zero, k = constante

A calibração deste dispositivo é realizada com líquidos de densidades conhecidas, com o dispositivo na vertical para evitar depósitos nos tubos e numa vazão conhecida não necessariamente constante.

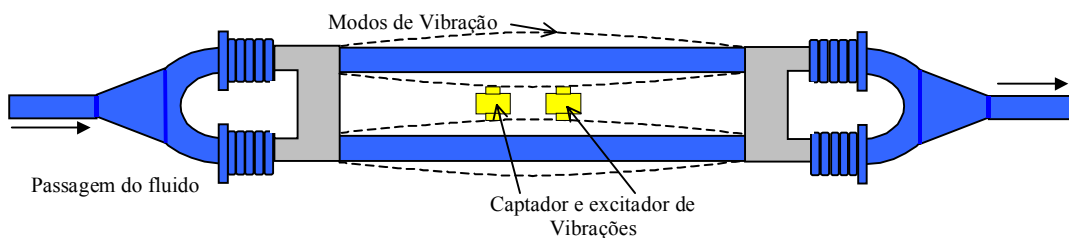


Figura 66 Estrutura vibratória

5.14. Elementos piezoelétricos

Os dispositivos piezoelétricos produzem trabalho mecânico quando excitados eletricamente, ou podem gerar energia elétrica quando atuados mecanicamente. São usados materiais como quartzo, titanato de bário e PZT (titanato zirconato de chumbo), também são usados polímeros flexíveis como o PVDF (Polivinilo de Flúor).

Estes dispositivos encontram as seguintes áreas de aplicação:

- Conversão de deslocamentos, acelerações, forças, pressão, tensão e deformação (efeito direto)
- Produção de deslocamentos, forças ou ondas acústicas em resposta a uma tensão aplicada (efeito reverso)
- Operação em estruturas ressonantes para melhorar a eficiência de radiação de energia. Ex. Filtragem, geração de pulsos, etc. (efeito direto - reverso).

Na Figura 67 temos uma ilustração de como funciona o efeito piezoelétrico em cristais como o quartzo.

Os átomos de silício estão em perfeita coordenação com os átomos de oxigênio formando o tetraedro SiO_4 que configura a estrutura básica do cristal. Cada átomo de oxigênio é compartilhado com dois átomos de Si. Cada íon de Si com carga $+4e$ é acoplado com 4 íons de O com carga $-2e$. Sem nenhuma excitação (mecânica ou elétrica) todas as cargas se compensam tornando o material neutro eletricamente. Se a célula é deformada ao longo do eixo x ou Y íons de O são deslocados e cargas elétricas positivas e negativas aparecem. Da mesma forma quando o cristal é excitado com uma tensão elétrica uma deformação mecânica modificará a forma do cristal de forma dinâmica.

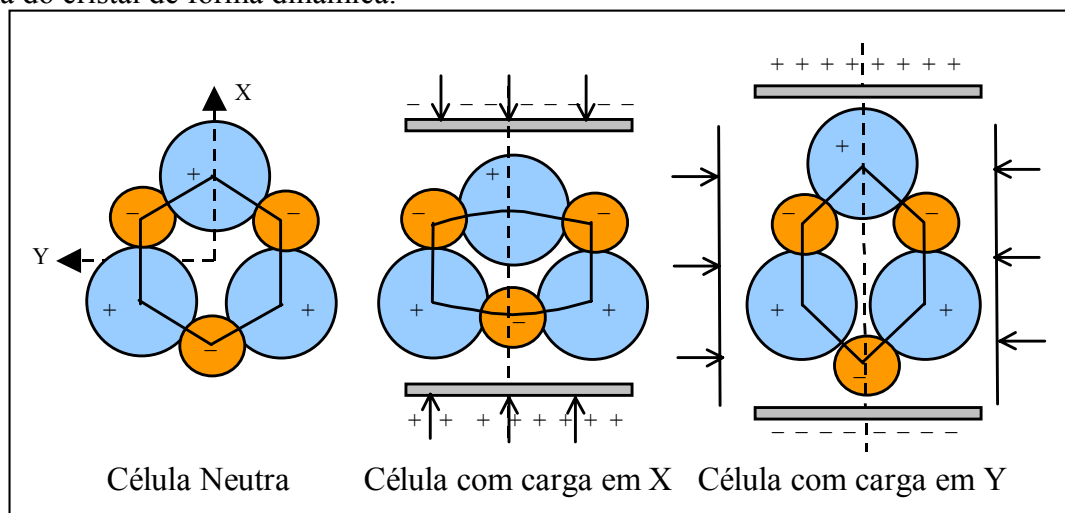


Figura 67 Piezoelectricidade em quartzo

Os materiais comerciais piezoelétricos são materiais policristalinos e portanto os domínios piezoelétricos devem ser orientados através de um processo de polarização.

Existem diversos modos possíveis de deformação de um cristal piezoelétrico:

- Cisalhamento de espessura
- Cisalhamento de face
- Expansão de espessura
- Expansão transversal de comprimento
- Expansão paralela de comprimento
- Expansão planar

Na Figura 68 apresentam-se estes modos graficamente e as suas aplicações típicas.

Basic Actions of Piezoelectric Elements

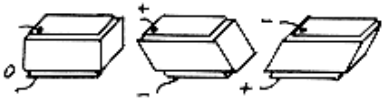

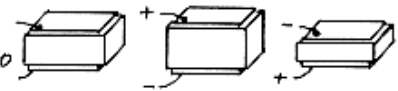

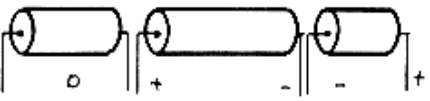
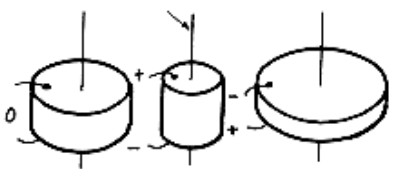
Basic deformations	Typical applications
<p>Thickness shear</p> 	<p>Delay-line transducers; ultrasonic transducers; accelerometers; high-frequency resonators</p>
<p>Face shear</p> 	<p>Headphones; microphones; twister "Bimorph" phonograph cartridges</p>
<p>Thickness expansion</p> 	<p>Delay-line transducers; ultrasonic testing and cleaning transducers; high-frequency resonators</p>
<p>Transverse length expansion</p> 	<p>Sonar transducers and hydrophones; "Bimorph" phonograph cartridges; headphones; microphones; tweeters; clock drivers; heart pacers</p>
<p>Parallel length expansion</p> 	<p>Sonar radiating transducers; ultrasonic bonders and welders; ultrasonic solder cleaners</p>
<p>Poled along this axis</p>  <p>Planar expansion</p>	<p>"Bimorphs" and "Unimorphs" for labs; tweeters for cameras, radios, and simple alarms; transmitters and receivers for intrusion alarms</p>

Figura 68 Modos de deformação de elementos piezoelétricos

5.15. Elementos Termoelétricos

Os elementos termoelétricos ou termopares desenvolvem um potencial elétrico proporcional à diferença de temperatura entre junções frias e quentes de metais diferentes.

Os termopares apresentam uma faixa de trabalho larga (desde quase -270 até 2700 °C), muito baratos e fáceis de usar.

5.15.1. Termopares

Através da junção de dois metais diferentes existe uma diferença de potencial, dependente dos metais usados e a temperatura na junção. Assim um termopar são dois fios metálicos que formam um circuito com duas junções como o mostrado na Figura 69.

Quando a temperatura é igual nas duas junções o potencial produzido é zero, quando a temperatura é diferente nas duas junções existe um potencial efetivo, para isto uma das junções é tomada como referência e se mantém a temperatura constante. Também deve ser inserido um medidor para realizar a leitura.

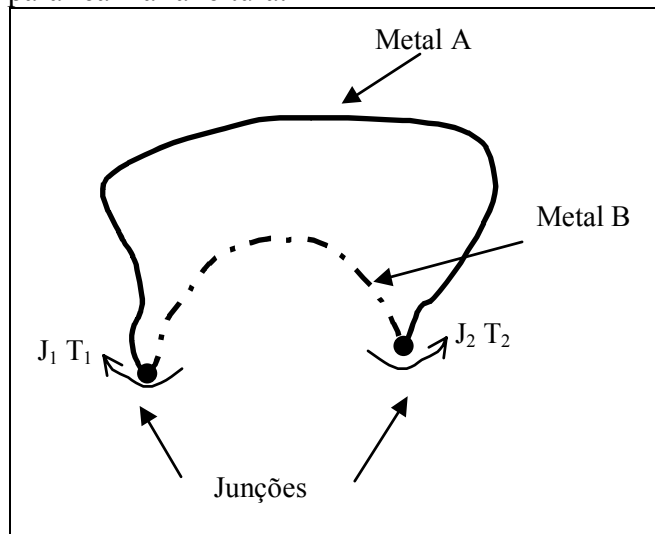
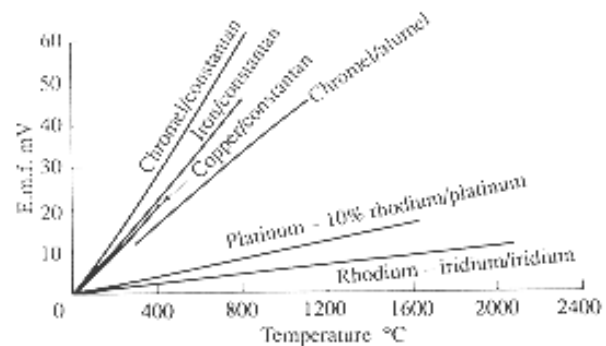


Figura 69 Termopar e comparação dos vários tipos

Na Figura 70 verificam-se as faixas de aplicação e sensibilidades de termopares típicos, assumindo que uma das junções está a 0 °C

Thermocouples			
Type	Materials	Range °C	Sensitivity $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ in range 0-100 °C
E	chromel - constantan	-200 to 980	63
J	iron - constantan	-200 to 850	53
K	chromel - alumel	-200 to 1300	41
N	nicrosil-nisil	-200 to 1300	28
R	platinum - platinum/rhodium 13%	0 to 1400	6
S	platinum - platinum/rhodium 10%	0 to 1400	6
T	copper - constantan	-200 to 370	43

Note: The range is that for constant use.



Thermoelectric e.m.f.-temperature graphs

Figura 70 Sensibilidade e faixa de temperatura para diversos termopares

Uma forma usual de realizar medidas com termopares é o método de junção de referência, como mostrado na Figura 71.

Os fios do termopar são ligados a um bloco isotérmico que varia sua temperatura com a temperatura ambiente. Esta temperatura de referência é medida de forma independente por um sensor semiconductor e um circuito de compensação que fornece uma tensão de E_{comp} a qual é subtraída da tensão medida, corrigindo assim a leitura no voltímetro

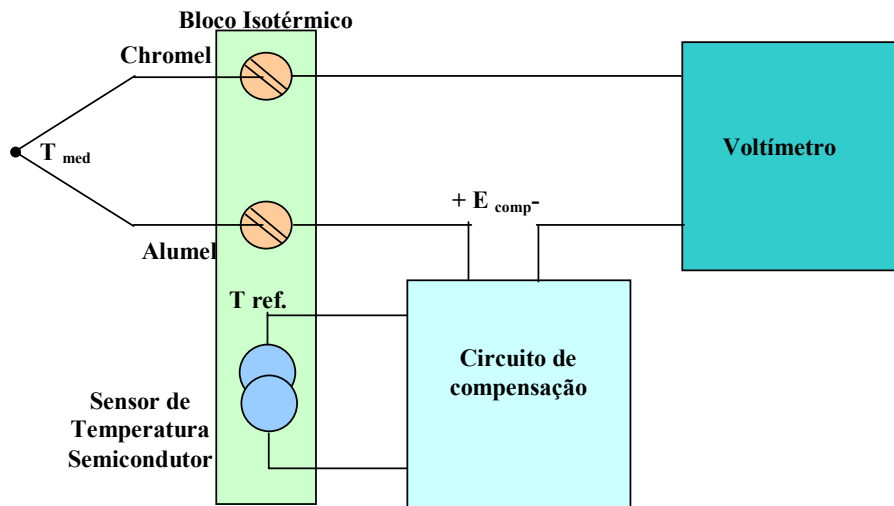


Figura 71 Técnica de medição com termopar usando bloco isotérmico

5.16. Elementos ópticos e fotosensíveis

A seguir apresenta-se alguns dos elementos básicos usados em transdutores ópticos e fotosensíveis.

5.16.1. Células fotocondutoras

Estas células são resistores dependentes da iluminação. Neste caso um elétron que absorve um fóton de frequência ν pode ser levado da banda de valência para a banda de condução de um semicondutor, aumentando a condutividade deste material, veja Figura 72 .



Figura 72 Célula fotocondutora

Na Tabela 10 temos alguns dos materiais e as faixas espectrais de trabalho.

Tabela 10 Materiais fotocondutores

Fotocondutor	Faixa espectral (μm)
Sulfeto de cádmio (CdS)	0.47 - 0.71
Seleneto de Cádmio (CdSe)	0.6 - 0.77
Sulfeto de chumbo (PbS)	1.0 - 3.0
Seleneto de Chumbo (PbSe)	1.5 - 4.0

5.16.2. Fotoacopladores

Um fotoacoplador é um dispositivo que consiste de um elemento emissor de fótons cujo fluxo é acoplado através de uma isolamento transparente a um certo tipo de dispositivo fotodetector.

O elemento emissor pode ser uma lâmpada de Néon ou incandescente ou um LED (Diodo emissor de luz). Os dispositivos fotodetetores podem ser um fotocondutor, um fotodiodo ou um fototransistor.

Na Figura 73 apresenta-se um fotoacoplador usado para a leitura de código de barras que utiliza um diodo emissor de luz infravermelho e um fotodiodo como detetor, montados de forma adequada para receber luz refletida através de lentes esféricas.

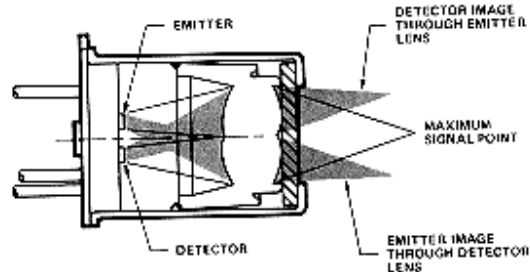
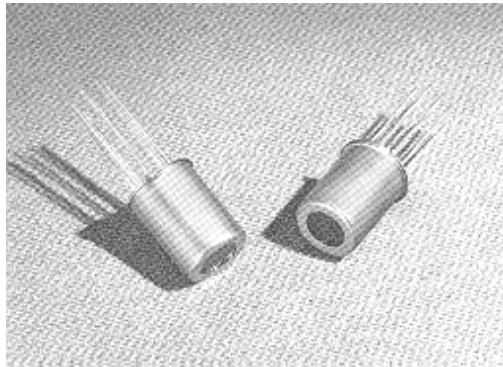


Figura 73 Fotoacoplador para leitora de código de barras

A forma básica de conexão deste dispositivo e sua sensibilidade com a distância focal são mostradas na Figura 74.

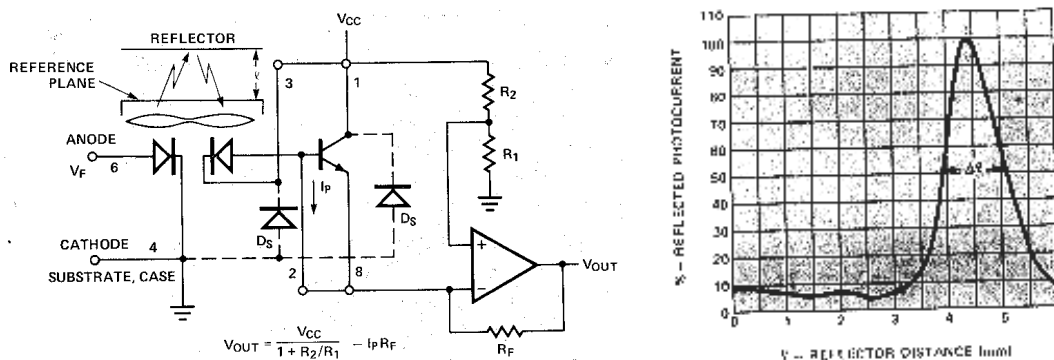


Figura 74 Circuito básico de medida e sensibilidade Vs. distância do alvo.

5.16.3. Fibras óticas

O que caracteriza um meio dielétrico cristalino, do ponto de vista ótico é o seu índice de refração (n) o qual define o comportamento da luz ao passar de um meio ao outro

$$n = \frac{\text{velocidade_de_propagação_no_vácuo}}{\text{velocidade_de_propagação_no_meio}}$$

Um raio luminoso ao passar de um meio de refração n_1 para um meio n_2 com $n_1 > n_2$ pode ser refratado ou refletido, dependendo do ângulo de incidência (α). Existe uma condição em que pode-se obter reflexão total (α_c), é usando este conceito que permitiu a realização das fibras óticas que seguem o princípio da reflexão total.

Uma fibra ótica é um capilar formado por dois materiais cristalinos e homogêneos. O material que ocupa o centro da fibra chama-se núcleo e externo de casca o qual possui um índice de refração menor que o núcleo para possibilitar o fenômeno de reflexão total, veja Figura 75.

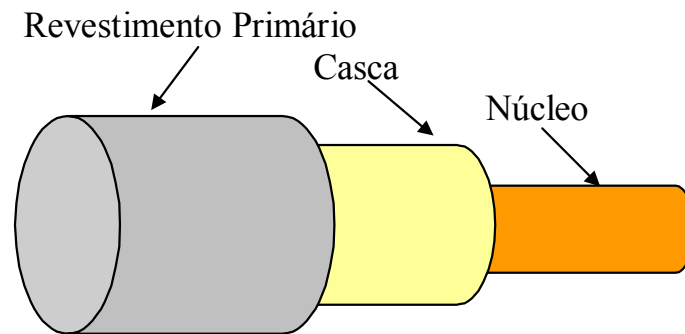


Figura 75 Fibra ótica

Existem diversos tipos de fibras desde o ponto de vista de variação do índice de refração do material, uma muito usada é a fibra com índice degrau onde os coeficientes do núcleo e casca são constantes, na Figura 76 verifica-se um pulso ótico acoplado a uma fibra deste tipo e sua resposta de saída.

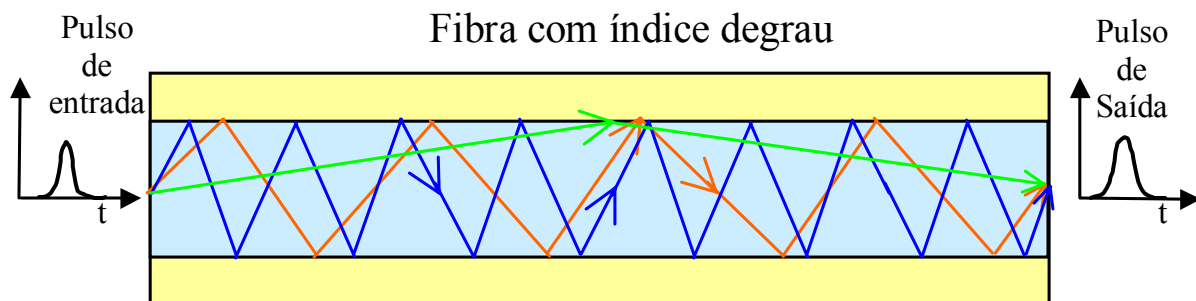


Figura 76 Propagação de um pulso ótico numa fibra

Usando fibras óticas é possível implementar diversos métodos para fabricar sensores:

5.16.3.1. Dispositivos de obturador

Estes utilizam a interrupção de um caminho ótico para efeitos de transdução, veja Figura 77:

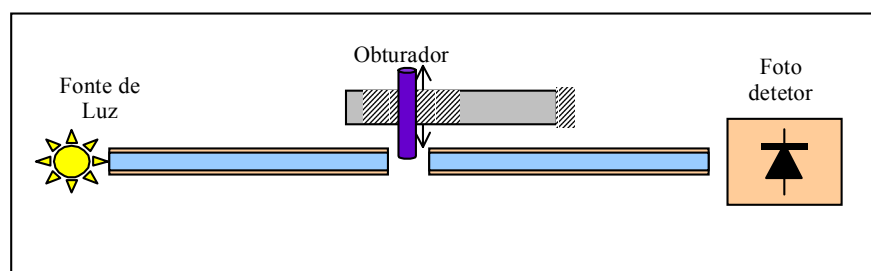


Figura 77 Dispositivos de obturador

5.16.3.2. Detecção de intensidade modulação

Neste caso acontece uma modulação (usando-se microdobraduras, refletores ou mascaras.) de intensidade luminosa durante sua passagem por uma fibra, como na Figura 78.

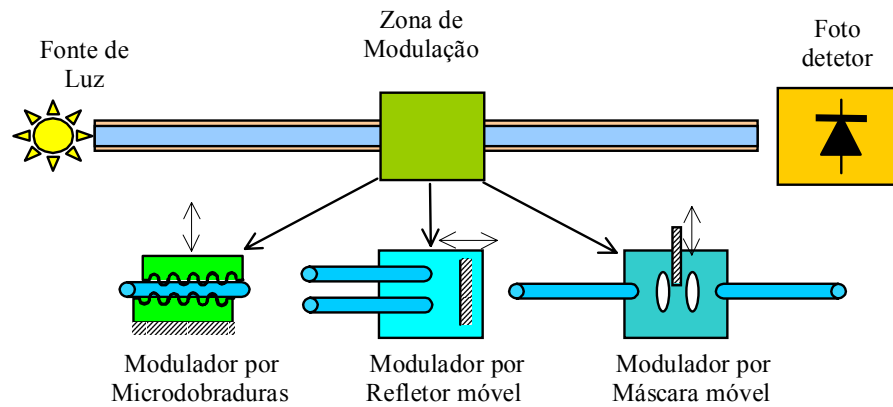


Figura 78 Modulação de intensidade luminosa

5.16.3.3. Detecção de fase modulada

Usando métodos interferométricos é possível demodular a fase ótica, a qual normalmente é produzida por :

- Mudança de comprimento da fibra Ex. deformação longitudinal
- Mudança de índice de refração da fibra Ex. Temperatura
- Dimensões geométricas transversais Ex. Expansão térmica

5.16.3.4. Detecção polarização modulada

A mudança de polarização da luz que transita por uma fibra pode ser produzida pelos seguintes mecanismos:

- Rotação de Faraday
- Efeito eletro-ótico
- Efeito foto-elástico

5.16.3.5. Detecção de frequência ótica modulada

A modulação de frequência ótica acontece principalmente pelo efeito Doppler, que permite sua utilização para fins de transdução Ex. Anemômetro Doppler.

5.16.3.6. Detecção de modulação de cor

Existem diversas formas em que a modulação por cor pode ser usada:

- Em análise químico usando soluções de indicação Ex. pH
- Fosforescência
- Luminescência

Em geral usam-se técnicas de espectrometria para realizar a demodulação.

6. Transdutores utilizados para medidas em engenharia

A seguir apresentamos exemplos de métodos de medição utilizados para converter diversos tipos de sinais (mecânicos, luminosos, químicos, térmicos, etc.) em sinais elétricos adequados para sistemas A/D de aquisição de dados.

Assim serão apresentados alguns métodos para fazer transdução de sinais como:

- **Medidas Mecânicas**
 - Medidas de aceleração
 - Medidas de força
 - Medidas de pressão
 - Medidas de deslocamento
 - Medidas de densidade
 - Medidas de nível
 - Medidas de vazão
- **Medidas Térmicas**
 - Medidas de temperatura
 - Dispositivos semicondutores de junção
- **Medidas Elétricas**
 - Medidas de tensão, corrente e potência
 - Medidas de frequência
- **Medidas de Radiação**
 - Medidas com fotodiodos
 - Medidas com fotodetetores sensíveis a posição
- **Medidas Químicas**
 - Medidas analíticas (Voltametria)
 - Medidas de composição química (Espectroscopia de massa)
- **Medidas Magnéticas**
 - Medidas com efeito Hall

6.1. Medidas Mecânicas

Nas medidas mecânicas trata-se em geral de monitorar um parâmetro mecânico e convertê-lo numa grandeza elétrica Ex. Tensão, corrente, carga, etc. Na Tabela 11 apresentam-se as principais variáveis mecânicas que são de interesse em engenharia:

Tabela 11 Parâmetros Mecânicos

Parâmetro	Aplicação
Força	<ul style="list-style-type: none"> • Carga • Pressão • Tensão • Potência
Dimensões	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura • Forma • Rugosidade • Volume
Velocidade	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • Angular • vazão
Aceleração	<ul style="list-style-type: none"> • Vibração
Massa	<ul style="list-style-type: none"> • Peso • Carga • Densidade
Deslocamento	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • Angular • Deformação • Posição • Tamanho • Nível • Área
Outras	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidade • Dureza • Concentração de fase

A seguir apresentaremos exemplos de métodos de transdução para algumas das medidas mecânicas apontadas acima.

6.1.1. Medidas de força e Peso

Força é definida como:

$$F = M \cdot a$$

com: M = massa do corpo (Kg)
a = aceleração (m/s²)

A unidade para Força é o Newton (N = Kg m/s²).

O peso em (KgF) de um corpo de massa (M) em repouso é definido como:

$$W = M \cdot g$$

com: g = aceleração da gravidade

O valor de g depende do local, em São Paulo pode-se considerar como $g=9,80665 \text{ m/s}^2$
 Na Tabela 12 apresentam-se alguns métodos usados para medir forças e pesos:

Tabela 12 Métodos usados para medir forças

Princípio	Método	Características
Balança de Alavanca	• Braços iguais	Direta, + precisa, medidas estáticas
	• Braços desiguais	Direta, + precisa, medidas estáticas
Balace de forças	• Balance de Forças	Indireta, + precisa, medidas estáticas e dinâmicas
Elementos Elásticos	• Balance de Molas	Indireta, - precisa, medidas estáticas
	• Células de Carga	Indireta, + precisa, medidas estáticas e dinâmicas
	• Anel de carga	Indireta, - precisa, medidas estáticas
	• Sensor Piezoelétrico	Direta, + precisa, só medidas dinâmicas
Pressão	• Pressão Hidráulica	Indireta, - precisa, medidas estáticas e dinâmicas

As balanças de alavanca são métodos que usam o princípio dos momentos, Ex. Em equilíbrio estático a soma algébrica dos momentos é zero. O momento de uma força ao redor de um eixo é o produto da força pela da distância perpendicular (comprimento do braço).

6.1.1.1. Balança de braços iguais:

Este dispositivo constitui-se por uma viga rígida, um pivô central, onde se aplica uma força conhecida num extremo e uma força desconhecido no outro, a força conhecida é modificada até o indicador fornecer uma indicação nula, nesse instante os momentos gerados são iguais e contrários, então tem-se:

$$F_d \cdot d - F_c \cdot d = 0 \Rightarrow F_d = F_c$$

Em geral comparam-se com este método pesos, porem é possível comparar pesos e forças. Veja na Figura 79 o esquema deste dispositivo:

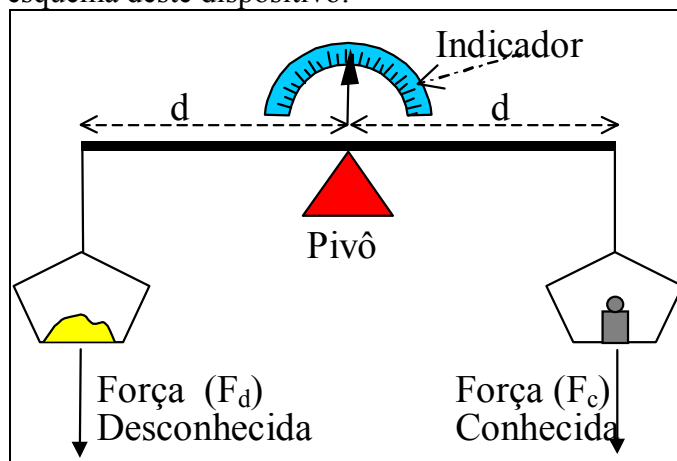


Figura 79 Balança de braços iguais

6.1.1.2. Balanceamento de molas:

Neste caso a extensão de uma mola da a indicação da força aplicada, veja na . Neste caso a força F em (N) é aplicada um prato que se encontra sobre uma mola helicoidal, o deslocamento x em (m) da mola devido à força aplicada no estado estacionário é:

$$x = \frac{F}{k}$$

sendo k = constante da mola.

Na Figura 80 esta apresentado o método cuja precisão é baixa e somente serve para medidas estáticas.

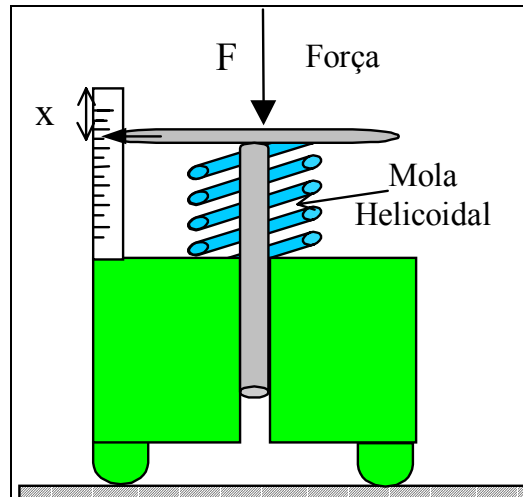


Figura 80 Medida de força pelo deslocamento de uma mola

6.1.1.3. Balanceamento de forças:

Este é um dispositivo com realimentação de forças. O sistema constitui-se por um sensor de deslocamento e um atuador eletromagnético.

Na Figura 81 pode ser verificado o método de balanceamento de forças onde a força desconhecida é aplicada através de um prato que está solidário a um eixo que movimenta o núcleo de um LVDT, dispositivo que mede o deslocamento produzido por esta força.

O deslocamento medido é convertido num sinal elétrico e aplicado a um circuito de amplificação, este circuito por sua vez gera uma corrente elétrica fornecida à uma bobina que se encontra dentro de um circuito magnético.

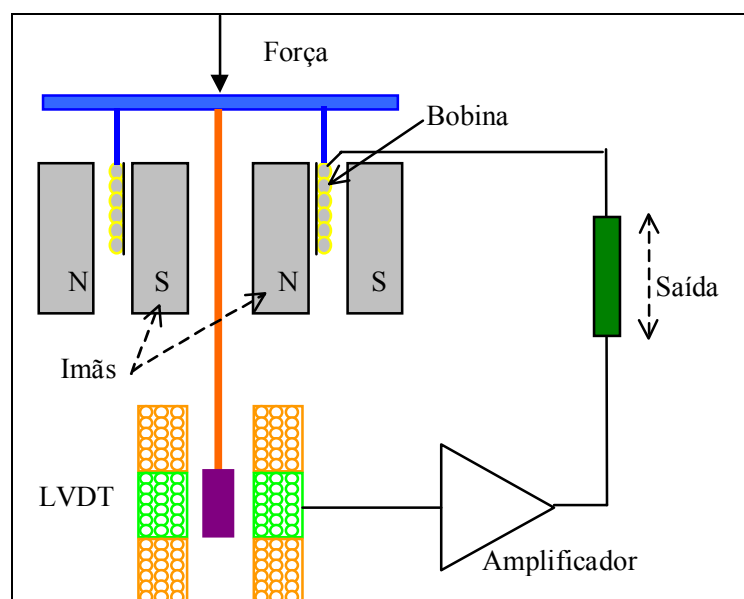


Figura 81 Medida de força usando balanceamento de forças

Ao se aplicar uma corrente na bobina esta interage com o campo magnético, dos ímãs permanentes, gerando uma força mecânica que se opõe à força aplicada, o circuito de controle varia a corrente de forma a colocar o sistema em equilíbrio dinâmico (isto é gerando um força igual e contrária a aplicada).

6.1.2. Medidas de aceleração

A posição de um ponto (p) ao longo de uma linha reta pode ser descrita em qualquer instante (t) através do seu deslocamento tendo em conta uma certa origem, veja Figura 82.

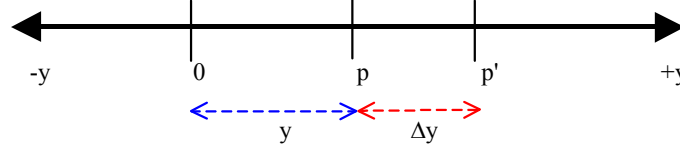


Figura 82 Trajetória retilínea de um ponto (p)

A velocidade (v) do ponto (p) num intervalo de tempo é a taxa instantânea de variação do deslocamento, e pode ser expressa assim:

$$v = \frac{dy}{dt}$$

Da mesma forma a aceleração (a) do ponto (p) num intervalo de tempo é a taxa instantânea de variação da velocidade e se expressa assim:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$$

A unidade de aceleração é m/s², sendo usual sua expressão em "g".

O sensoriamento de aceleração é basicamente realizado de forma indireta, medindo-se deslocamentos, forças, deformações, primariamente, para, depois usar um outro mecanismo de transdução para o domínio elétrico, veja a Tabela 13.

Tabela 13 Mecanismos de conversão para medir aceleração

Mecanismo de conversão	Tipo de Conversão
Deformação + Piezoresistividade	Indireto/ Modulado
Força + Piezoelectricidade	Direto/ auto-gerador
Potenciômetro	Indireto/ Modulado
Indutância Variável	Indireto/ Modulado
Capacitância variável	Indireto/ Modulado
Balanceamento de Forças	Indireto/ Modulado

6.1.2.1. Medida de aceleração medindo deformações de um corpo

No mecanismo de deformação associado a piezoresistividade uma massa inercial está solidária a uma viga ou estrutura elástica, onde se encontram alojados os strain gages. A aceleração agente no dispositivo associada a massa inercial (M) gera uma força (F = M.a) que flexionará a viga convertendo a aceleração em uma deformação mecânica. A sensibilidade desta conversão primaria fica:

$$S_{\epsilon} = \frac{\epsilon}{a} = \frac{6 \cdot M \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot E}$$

com: E = Módulo de elasticidade do material da viga

b = Largura da viga
 h = espessura da viga
 d = distância até o strain gage

A sensibilidade elétrica de uma ponte completa de Wheatstone é:

$$S_e = \frac{V_o}{\epsilon} = V_p \cdot GF$$

com : V_p = Tensão de alimentação da ponte de Wheatstone
 GF = "Gage Factor" do extensômetro elétrico

Na Figura 83 encontra-se um diagrama deste tipo de acelerômetro.

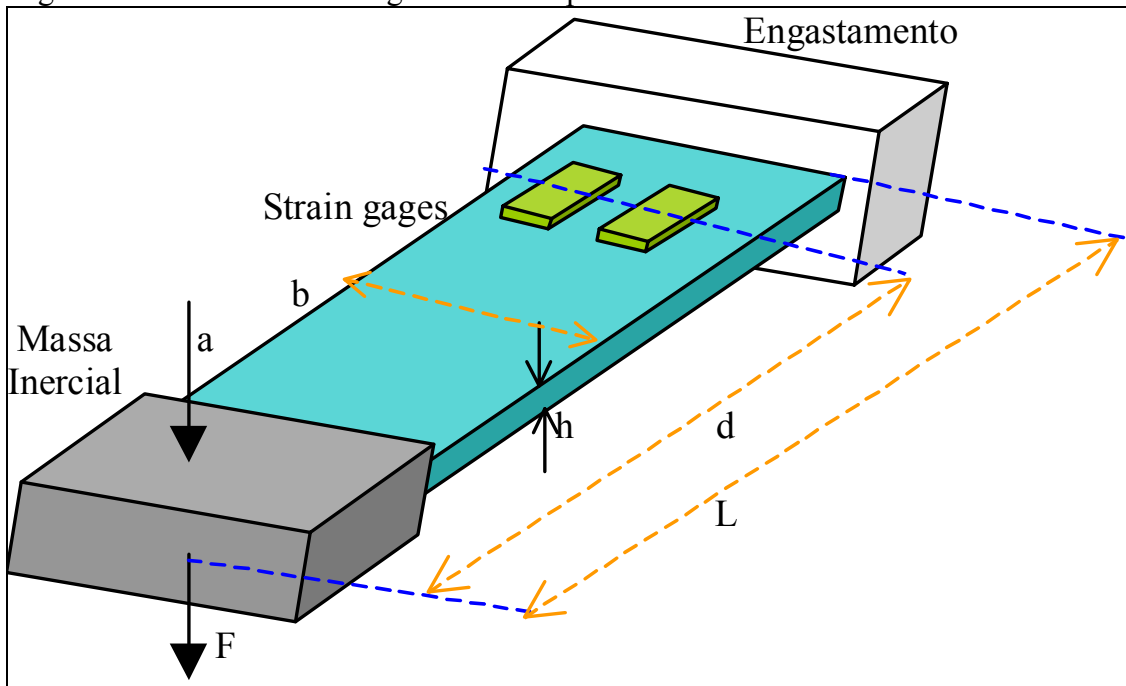


Figura 83 Acelerômetro usando Strain Gages

Então a sensibilidade do acelerômetro fica:

$$S_{acc} = \frac{6 \cdot M \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot V_p \cdot GF$$

6.1.3. Medidas de pressão

Pressão é uma força (F) atuando numa superfície (S), e mede-se como força por unidade de área, Pascal (Pa) no sistema SI, apesar de serem usadas outras unidades como bar, PSI, Kg/cm², etc. A pressão pode ser expressa assim:

$$P = \frac{dF}{dS}$$

Existem diversas formas de referenciar a pressão:

- Pressão Absoluta
A pressão é medida em relação ao vácuo (pressão zero)
- Pressão "Gage"
A pressão é medida em relação à pressão ambiente ou barométrica

- Pressão Diferencial

É a diferença de pressão entre dois pontos de medida

Veja na Figura 84 graficamente estes conceitos :

Existem inúmeras formas de conversão de pressão em sinais elétricos, na sua maioria indireta, ou seja a variação de pressão é convertida numa grandeza auxiliar Ex. deslocamento que depois convertido num sinal elétrico.

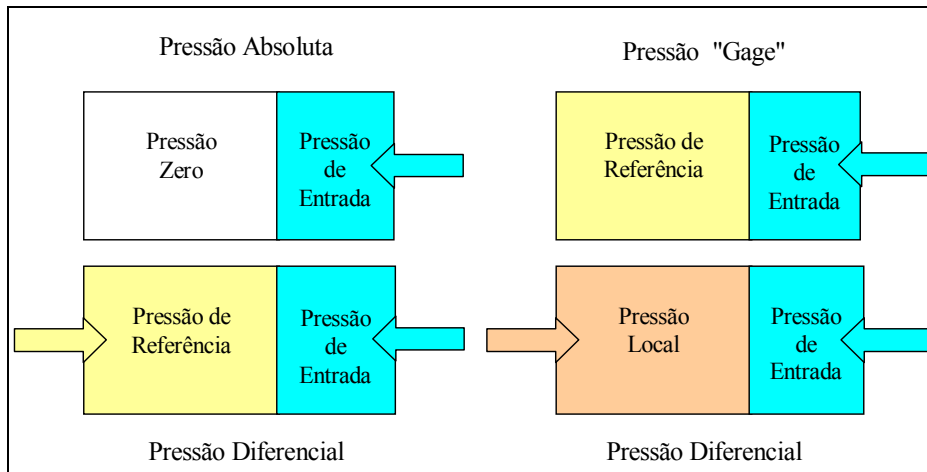


Figura 84 Diversas formas de referenciar pressão

A forma de transdução mais usada é a indireta mecânica onde a pressão é convertida inicialmente numa outra variável mecânica como deformação ou deslocamento.

6.1.3.1. Manômetro tipo U

Consideremos agora um manômetro do tipo U, este dispositivo nos permite converter pressão diferencial em deslocamento relativo, veja a Figura 85.

A diferença de pressão entre os gases sobre o líquido do manômetro, produz uma diferença de altura (h).

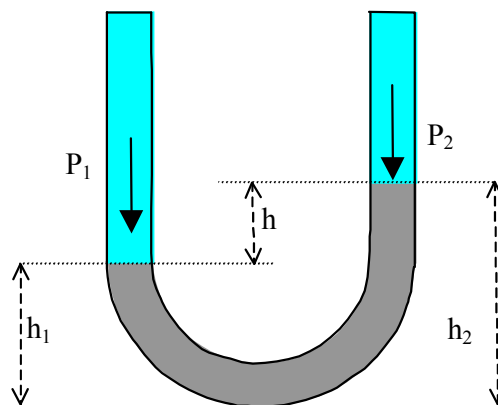


Figura 85 Manômetro tipo U

Isto pode ser expresso pela seguinte expressão, com o fluido em repouso:

$$P_1 + h_1 \rho g = P_2 + h_2 \rho g$$

com ρ = densidade do fluido manométrico e g = aceleração da gravidade, assim:

$$\text{Pressão Diferencial} = P_1 - P_2 = h \rho g$$

Normalmente se usa água, álcool ou mercúrio como líquido manométrico e deve-se tomar em conta os efeitos de variação da densidade com a temperatura.

6.1.3.2. Transdutor de Pressão usando Elementos Elásticos Primários

Analisaremos a seguir o transdutor de pressão que utiliza elementos elásticos primários, com uma estrutura orgânica como mostrada na Figura 86.

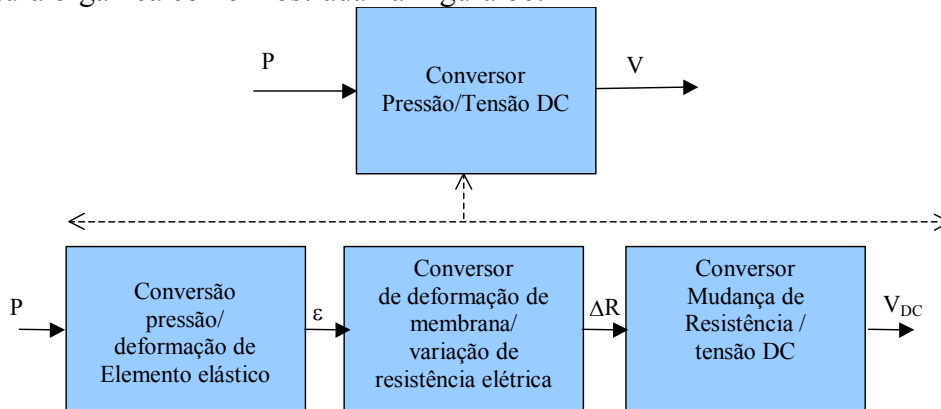


Figura 86 Estrutura orgânica de um sensor de pressão usando membrana

Na Figura 87 apresentam-se os elementos elásticos mais usados para realizar a conversão primária de pressão para algum tipo de deslocamento.

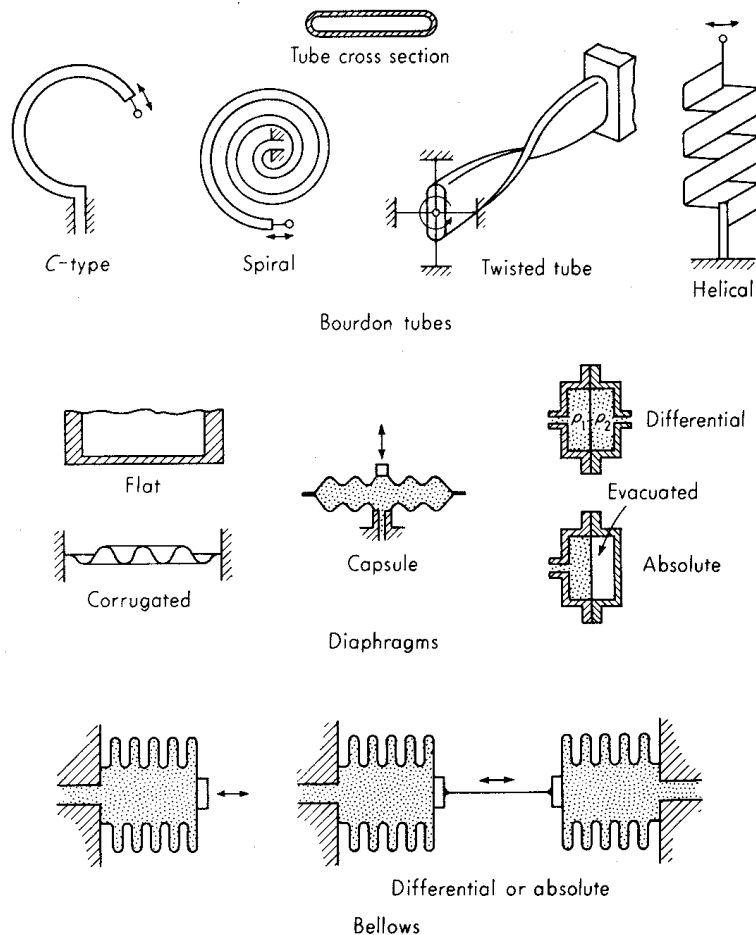


Figura 87 Elementos elásticos usados para medir pressão

Tomando o caso de um diafragma plano, engastado no seu perímetro, com raio (R_0) e espessura (h) ao aplicar uma pressão (q) na sua superfície aparecem duas deformações mecânicas importantes, uma no sentido radial e outra no sentido tangencial, expressadas da seguinte forma:

$$\varepsilon_r(\alpha R_o) = \frac{3}{8} \cdot \frac{q}{E} \cdot \frac{R_o^2}{h^2} \cdot (1 - \nu^2) \cdot (1 - 3\alpha^2)$$

$$\varepsilon_t(\beta R_o) = \frac{3}{8} \cdot \frac{q}{E} \cdot \frac{R_o^2}{h^2} \cdot (1 - \nu^2) \cdot (1 - \beta^2)$$

com: $(\alpha R_o) = R_r$ distancia onde se encontra o strain gage (1 e 3)
 $(\beta R_o) = R_t$ distancia onde se encontra o strain gage (2 e 4)
 $E =$ Módulo de elasticidade do material do diafragma
 $\nu =$ Coeficiente de Poisson do material

Estas deformações podem ser medidas com 4 strain gages configurados em ponte de Wheatstone e ligados como mostrado na seguinte figura.

A sensibilidade para um posicionamento adequado dos strain gages no diafragma fica:

$$S_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{q} = 0.3741 \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{R_o^2}{h^2} \cdot (1 - \nu^2)$$

A sensibilidade elétrica de uma ponte completa de Wheatstone é:

$$S_e = \frac{V_o}{\varepsilon} = V_p \cdot GF$$

A sensibilidade deste esquema de transdução fica:

$$S_{press\tilde{a}o} = \frac{V_o}{q} = 0.3741 \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{R_o^2}{h^2} \cdot (1 - \nu^2) \cdot V_p \cdot GF$$

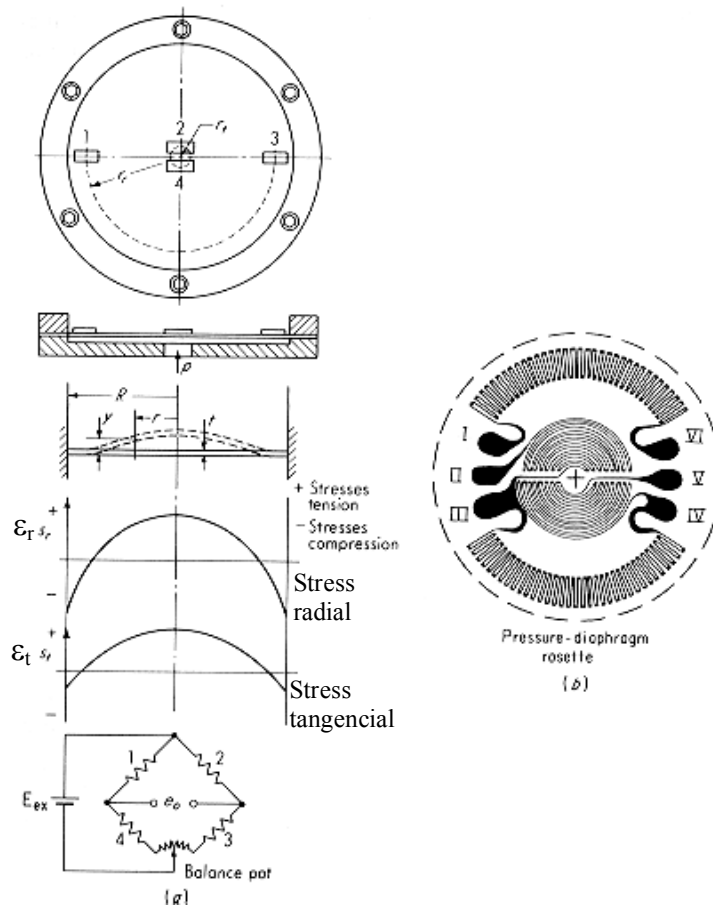


Figura 88 Medida de pressão com diafragma plano.

6.1.4. Medidas de deslocamento

Na Tabela 14 e Tabela 15 apresentam-se alguns dos métodos para medidas de deslocamentos lineares e angulares respectivamente.

Tabela 14 Métodos de medida de deslocamentos lineares

Princípio	Método	Características
Mecânico	<ul style="list-style-type: none"> Réguas metálicas Micrômetros Paquímetros 	Faixa +, precisão para leituras visuais Faixa ±, Boa precisão para leituras visuais Faixa +, Boa precisão para leituras visuais
Pneumático	<ul style="list-style-type: none"> Comparadores pneumáticos 	Faixa ±, Precisão ±,
Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> Capacitância variável Indutância variável LVDT Inductosyn 	Faixa ±, Precisão +, Boa resolução Faixa -, Precisão ±, Linearidade - Faixa -, Precisão +, Confiabilidade + Faixa -, Precisão ++, Resolução++
Óptico	<ul style="list-style-type: none"> Foto - células com fenda Interferometria Franjas de Moire 	Faixa -, Resolução +, Estabilidade + Precisão ++, Faixa +, Resolução + Faixa ±, Resolução +, Confiabilidade +

Tabela 15 Métodos de medida de deslocamentos angulares

Princípio	Método	Características
Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> Potenciometro Resolver Synchro 	Faixa +, Precisão ±, pode medir + que 360° Faixa 360°, Resolução +, Precisão+ Serve para transmissão remota de angulos
Encoders	<ul style="list-style-type: none"> Incrementais Codificados 	Deslocamentos relativos, Precisão +, Resolução + Deslocamentos absolutos, Precisão +, Resolução +
Ópticos	<ul style="list-style-type: none"> Auto - colimadores 	Para medidas de deslocamentos angulares muito pequenos,

Serão mostrados a seguir o método indutivo (Inductosyn) para deslocamentos lineares e o método de encoder para deslocamentos angulares.

6.1.4.1. Inductosyn :

Este dispositivos é utilizado nas máquinas de controle numérico e possui uma estrutura como a mostrada na Figura 89. Consta de uma régua estática onde por cima um cursor se movimenta. A régua contém um filme metálico com a forma de uma onda quadrada, com um período (g) em (mm). O cursor tem dois padrões semelhantes e quando acoplado à régua o sistema se comporta como um transformador plano, assim o cursor será o primário e a régua o secundário. Se são aplicadas tensões e_1 e e_2 no primário assim:

$$e_1 = e \cdot \text{sen}(\omega t) \quad e \quad e_2 = e \cdot \text{cos}(\omega t)$$

com ω = frequência da excitação

A tensão no secundário será:

$$e_s = e_x \cdot \text{sen}(\omega t + gs)$$

sendo s = o deslocamento da bobina e_1 num período, e_s completará um ciclo quando o deslocamento e igual a um período da régua.

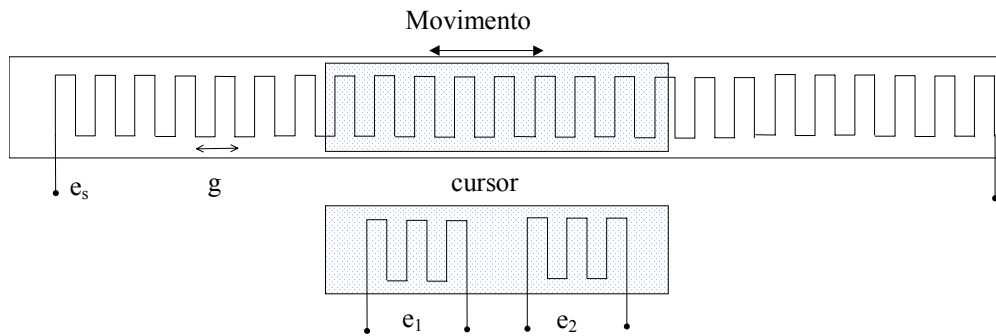


Figura 89 Inductosyn

6.1.4.2. Codificador ou "Encoder":

Um método direto para medição da posição ou deslocamento angular de eixo é a utilização de codificadores digitais angulares.

Os codificadores digitais são de dois tipos:

- Incrementais: são aqueles que requerem um sistema de contagem para adicionar incrementos gerados por um disco girante.
- Absolutos: Fornecem uma saída digital para qualquer posição angular do eixo, existem diversas formas de realizar estes dispositivos usando técnicas de ("Slip Ring" anel com contatos deslizantes, magnéticas e ópticas.)

Na Figura 90 apresenta-se um disco com uma codificação binária e um sistema de extração da informação óptico, usando uma fonte de iluminação (lâmpada, LED, Emissor UV ou IV) e um sistema de dispositivos foto-sensíveis (foto-células, fotodiodos, detetores de UV ou IV) com uma fenda para definir a região ativa.

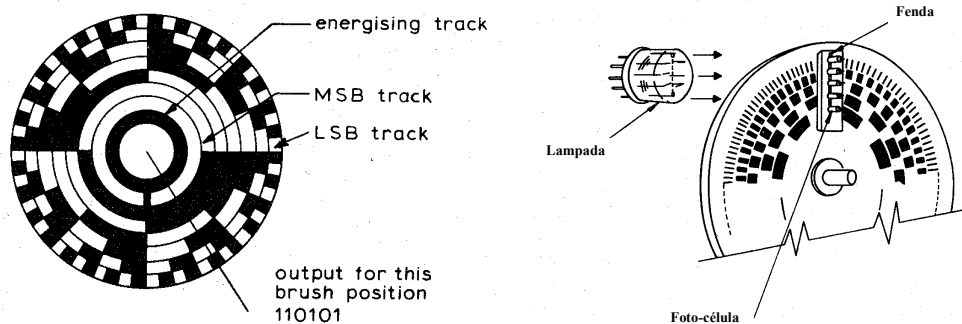


Figura 90 Encoder digital com Slip Ring e foto-célula

Um dos códigos binários mais utilizados é o chamado código de GRAY o qual permite a mudança de um bit por vez, na tabela a baixo verificam-se o código de GRAY de 0 até 7.

Tabela 16 Código GRAY

Decimal	Binário	GRAY
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

6.1.5. Medidas de densidade

Densidade é definido como massa por unidade de volume, densidade relativa é a razão entre a massa de um certo volume e a massa do mesmo volume de água a 4 °C.

Na Tabela 17 verificam-se alguns dos métodos usados para efetuar estas medidas.

Tabela 17 Métodos para medição de densidade

Princípio	Método	Características
Peso	Balace de forças	Indireto, Medidas contínuas
Flutuação	Célula de Carga Hidrômetro Tubo de força e torque	Indireto, Medidas contínuas Indireto, simples Indireto, altas temperaturas
Pressão	Pressão diferencial Bubbler	Indireto, líquidos corrosivos Indireto, ambientes abertos
Ressonância	Tubo vibrante	Indireto, gases
Radiação	Gama	Indireto, materiais sólidos

Os instrumentos de flutuação são os mais simples e baratos, consideremos o hidrômetro que se constitui por um tubo de vidro com uma massa, o qual flutua numa profundidade determinada pela densidade do líquido onde ele se encontra imerso, veja Figura 91. O peso do hidrômetro então é igual ao peso do fluido deslocado pelo dispositivo. Uma forma similar e que permite conversão elétrica e medir a força gerada pelo deslocamento produzido pelo peso do tubo e usar strain gages para realizar a conversão elétrica.

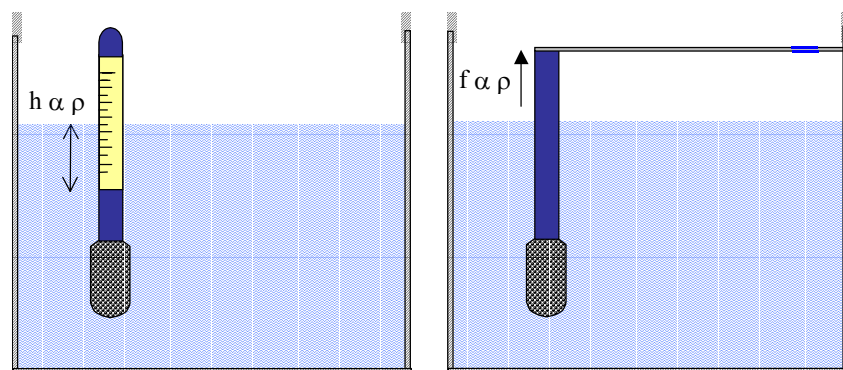


Figura 91 Métodos de medida de densidade em líquidos por flutuação

6.1.6. Medidas de nível

Os principais métodos utilizados para realizar medidas de nível utiliza os seguintes princípios:

- Observação visual
- Usando Flutuadores
- Medindo Deslocamentos
- Medindo Pressão
- Usando termistores
- Medindo capacitâncias
- Usando ultra-som
- Medindo resistividade elétrica

Na Figura 92 apresentam-se esquemas de alguns métodos usados para medir nível de líquidos.

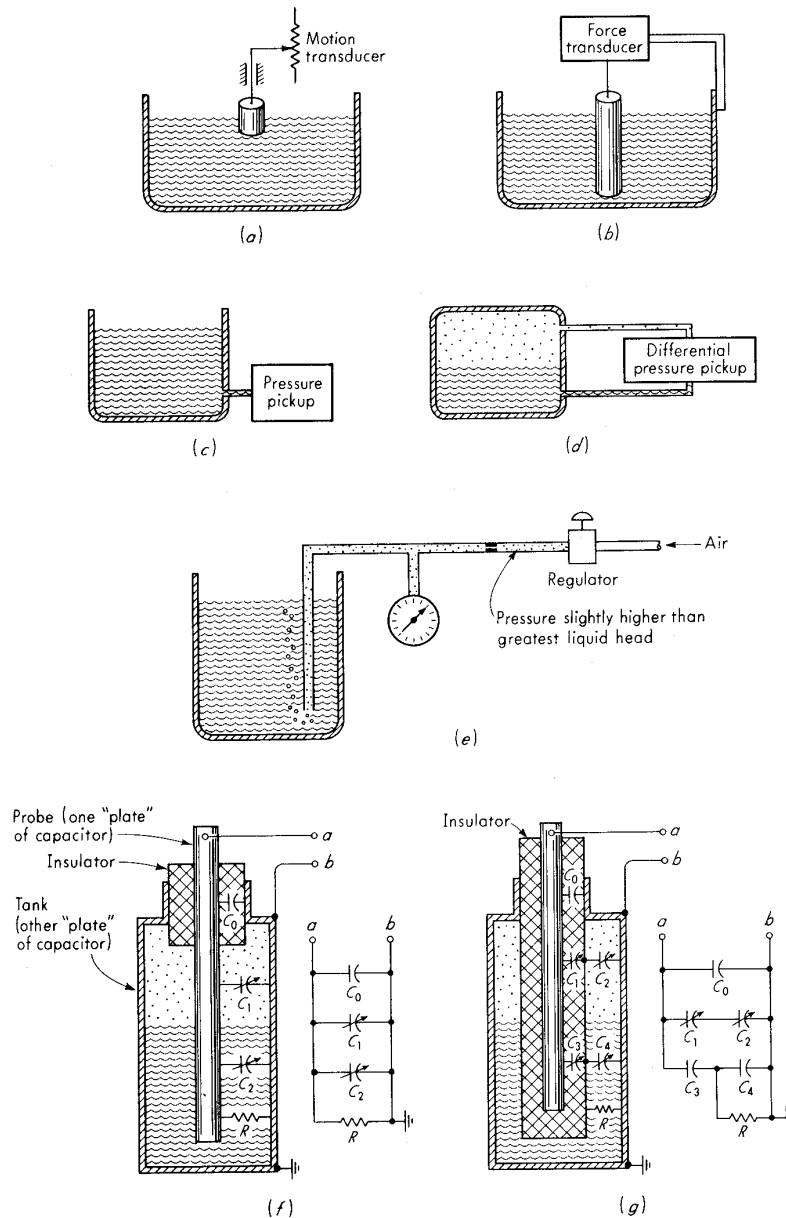


Figura 92 Alguns métodos para medidas de nível

6.1.6.1. Medida de Nível usando Ultra-Som

O método Ultrasônico para medida de níveis ou deslocamentos utiliza um circuito eletrônico que fornece um trem de pulsos para excitar um transdutor piezoelétrico o qual gera um frente de onda de pressão acústica que se propaga no ar até atingir um anteparo plano ou a parte superior do fluido. Parte da energia acústica deste frente de onda retorna para o transdutor em forma de um eco após um certo intervalo de tempo.

Medindo-se este intervalo de tempo e conhecendo a velocidade do som no ar pode-se calcular a distância entre o transdutor e o anteparo, segundo a seguinte equação:

$$d = \frac{C_0 \cdot \tau}{2}$$

Com C_0 = velocidade do som no ar (m/s), $\tau = (t_{r1} - t_{r2})$, t_{r1} : início da transmissão (s) e t_{r2} : recepção do eco (s).

A velocidade do som no ar é uma função da temperatura T (°C), pressão barométrica, umidade relativa e viscosidade do ar. Destas variações as mais significativas são as devidas à temperatura que podem ser expressas assim:

$$C_0 = 331.31 \cdot \sqrt{\frac{T}{273.16}}$$

Assim compensando devidamente as variações com a temperatura é possível medir nível de líquidos ou deslocamentos de anteparos com este método.

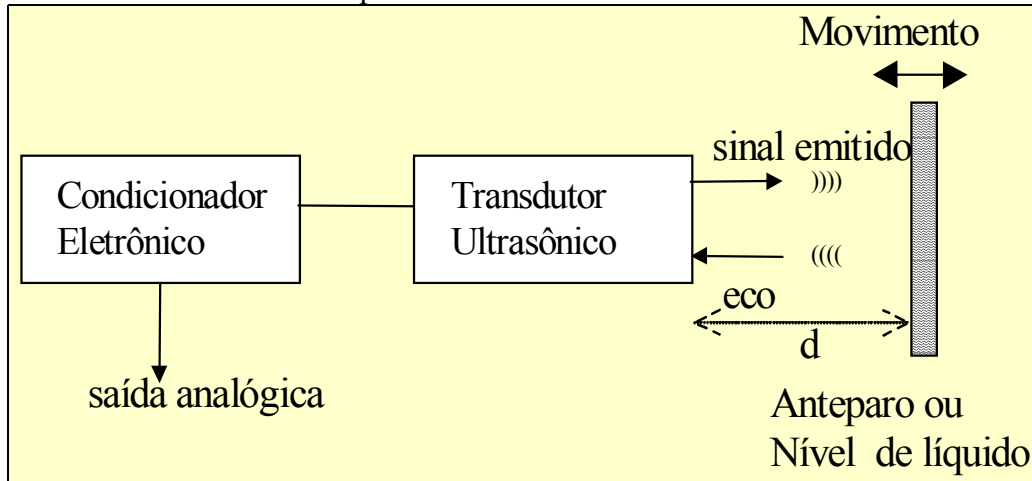


Figura 93 Método ultrassônico para medição de deslocamentos

O transdutor piezoelétrico para uso no ar, fisicamente é um cristal piezoelétrico de PZT alojado num receptáculo e apoiado num material adequado para fornecer amortecimento posterior de forma a absorver ou refletir a energia na parte traseira deste e um material para acoplamento acústico anterior com impedância acústica específica para acoplamento com o ar. Na figura a seguir verifica-se a aplicação deste método para medição de nível de fluidos.

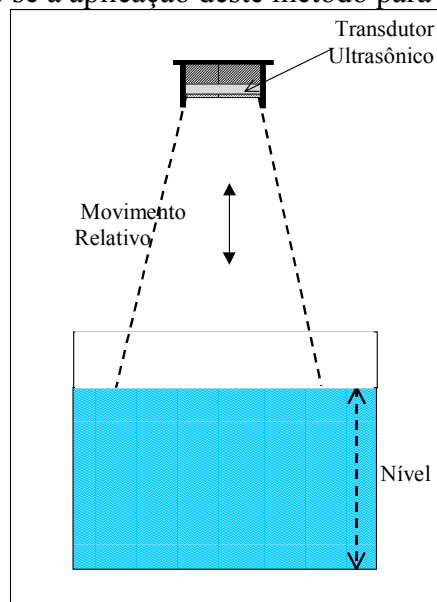


Figura 94 Método ultrassônico para medição de nível

6.1.7. Medidas de vazão

Se a velocidade média de um fluido através de uma tubulação é (v), então em um tempo (t) o fluido se deslocou uma distância (vt). Se a seção da tubulação é (A) o volume de fluido que se

movimentou através do tubo num tempo (t) é: (Avt). A vazão volumétrica define-se então como:

$$Q = \frac{A \cdot v \cdot t}{t} = A \cdot v$$

Apresentamos a seguir três métodos básicos para medida de vazão.

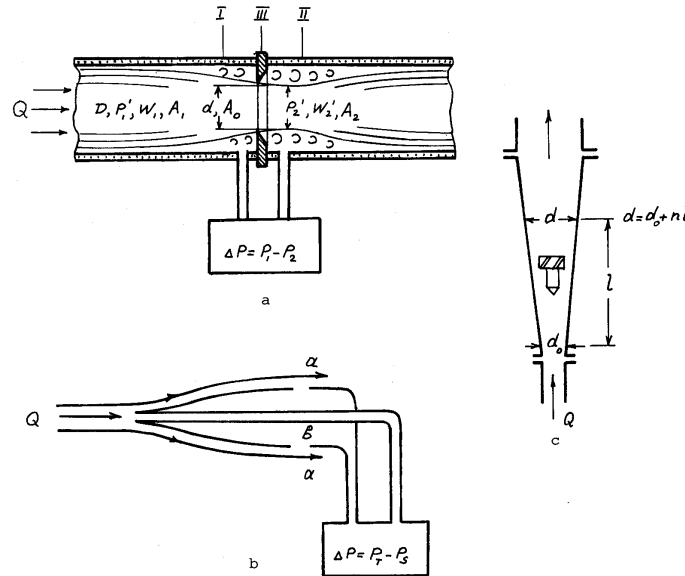


Figura 95 Métodos básicos para medição de vazão

6.1.7.1. Placa de Orifício:

Este dispositivo constitui-se por uma placa com um orifício de área (Ao) e diâmetro (d) que gera uma perda de carga na tubulação. Medindo-se a pressão nas regiões I e II (veja Figura 95a) é possível quantificar a vazão volumétrica no sistema. Para fluidos não compressíveis a vazão fica:

$$Q = \alpha \cdot A_o \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}$$

com: α = Coeficiente geométrico do sistema
 ρ = Densidade do fluido (N/m³)

6.1.7.2. Pitot:

Um tubo de Pitot é um dispositivo que possui orifícios nas paredes paralelos e perpendiculares à direção do fluxo e que fornece a velocidade deste pela diferença entre as pressões total ou de estagnação (PT), no ponto (b) e estática (PS) em (Pa), no ponto (a), (veja Figura 95b).

Assim a velocidade (v) em (m/s) deste fluido esta dada por:

$$v = \xi \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_T - P_S)}$$

com: ξ = coeficiente experimental entre 0,98 e 0,99

6.1.7.3. Rotâmetro:

Este dispositivo contém um flutuador colocado num tubo com área variável, (veja Figura 95c). O fluxo na direção vertical posiciona o flutuador numa certa altura de equilíbrio proporcional à vazão volumétrica. A escala ao longo do tubo pode ser ajustada dependendo da massa do flutuador.

A vazão volumétrica para um rotâmetro pode ser expressa de forma simplificada assim:

$$Q = k \cdot (A_t - A_f)$$

com k = constante que depende do coeficiente de descarga

A_f e A_t = áreas do flutuador e do tubo respectivamente

Se a área do tubo é tal que A_t varia linearmente com a posição (l) do flutuador então a vazão volumétrica fica:

$$Q = k_1 + k_2 \cdot l$$

com k_1 e k_2 constantes.

Existem diversas outras formas de realizar medições de vazão, veja na Figura 96 uma seleção dos principais métodos utilizados.

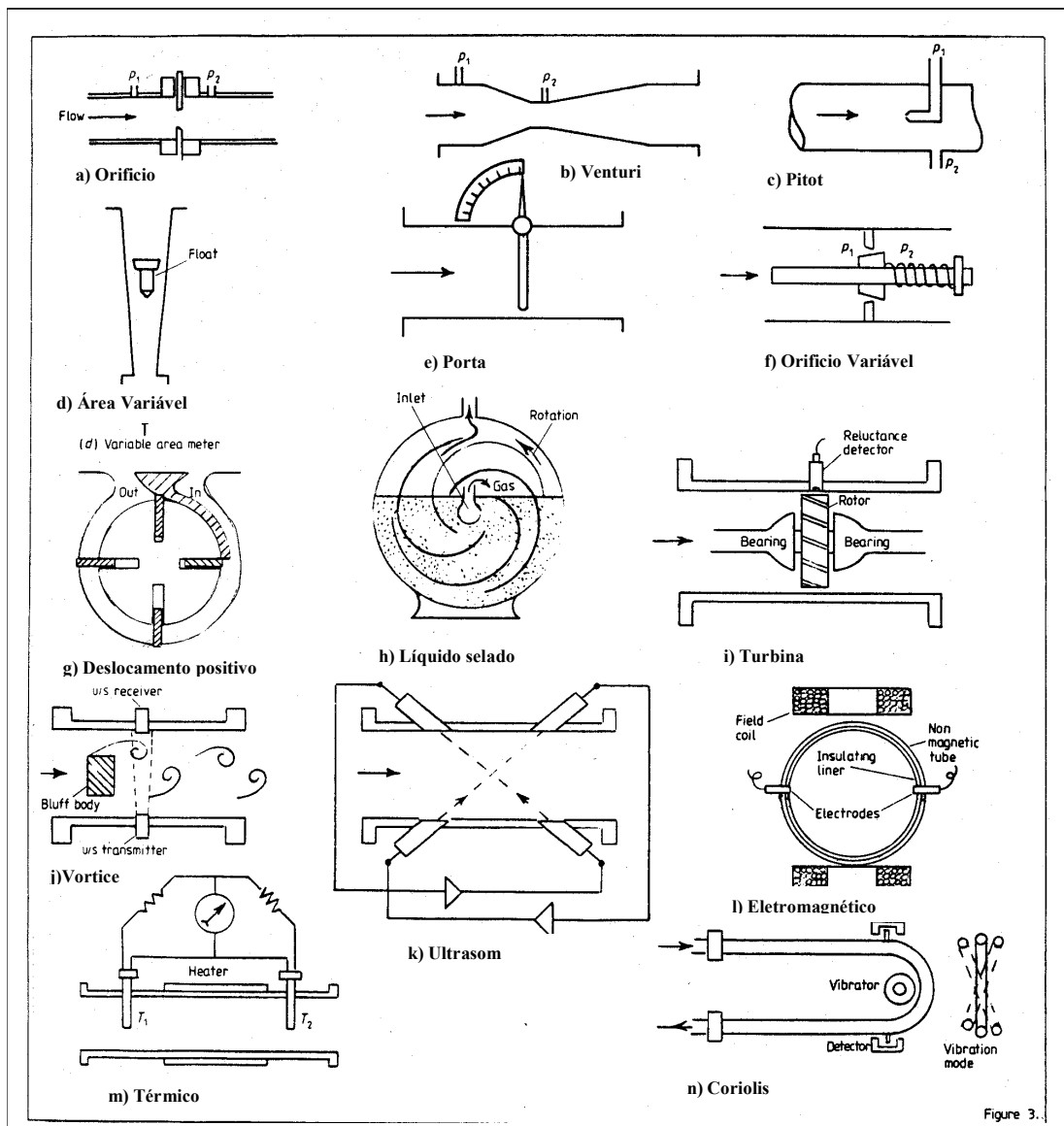


Figura 96 Métodos usados para medição de vazão

6.2. Medidas Térmicas

Na tabela a seguir podem-se verificar os diversos princípios usados para medição de temperatura

Tabela 18 Métodos usados para medir Temperatura

Princípio	Método	Características
Expansão	<ul style="list-style-type: none"> Lâminas bimetálicas Líquido em vidro Líquido em metal Vapor de pressão 	Termostatos, Faixa +, Precisão – Faixa +, Precisão -, frágeis Faixa +, Precisão -, robustos Faixa -, Precisão -, robustos
Resistência	<ul style="list-style-type: none"> Metal Termistores Junções em semicondutores 	Faixa +, Precisão ++, robustos Faixa +, Precisão -, não linear, resposta rápida Faixa -, Precisão -, robustos
Termo-elétrico	<ul style="list-style-type: none"> Termopares 	Faixa +, Precisão +, robustos
Pirômetros	<ul style="list-style-type: none"> Filamento de radiação Duas cores 	Faixa +++, Precisão +, não contato Faixa +++, Precisão +, não contato Faixa +++, Precisão +, não contato

6.2.1. Medidas de temperatura

A unidade do sistema SI para temperatura é o Kelvin (K) que se relaciona com a unidade usual °C assim:

$$Temperatura_em_K = Temperatura_em_^{\circ}C + 273,15$$

6.2.1.1. Lâminas bimetálicas:

Este dispositivo constitui-se por duas lâminas de dois metais diferentes solidarias. Como os metais apresentam diferentes coeficientes de expansão térmica, uma variação da temperatura resulta numa curvatura das lâminas. Este movimento é utilizado para implementar termostatos com configurações como as mostrados na Figura 97.

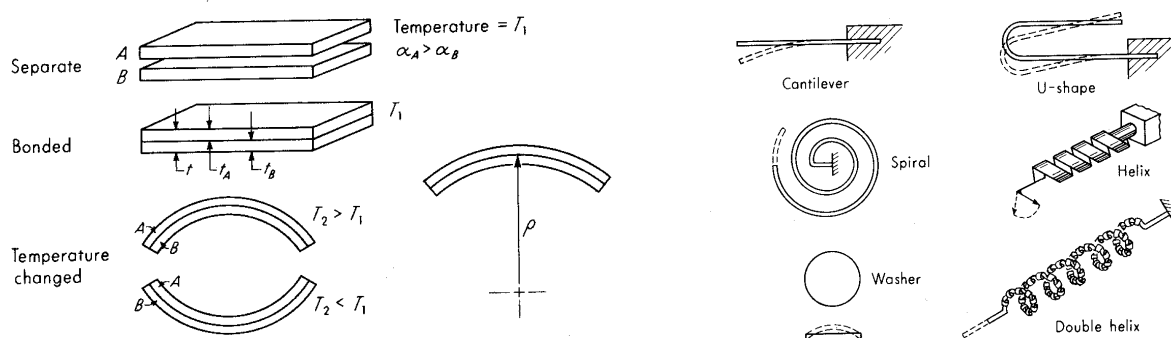


Figura 97 Lâminas bimetálicas

Para estes dispositivos o raio de curvatura está dado aproximadamente por:

$$\rho = \frac{2t}{3(\alpha_a - \alpha_b)(T_2 - T_1)}$$

Com: t = espessura da lâmina, α_a, α_b = coeficientes de expansão dos materiais e (T₂-T₁) a variação da temperatura local.

6.2.1.2. Dispositivos semicondutores de junção:

Os diodos e transistores possuem características com a temperatura que permitem sua utilização para medição de temperatura, na Figura 98 apresenta-se um dispositivo que utiliza a seguinte propriedade dos transistores de silício: Se dois transistores idênticos são operados numa razão constante (r) de corrente de coletor, então sua tensão base-emissor é dada pela seguinte equação:

$$V_{BE} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln(r)$$

Com : k = Constante de Boltzman, q = Carga do elétron e T = Temperatura absoluta em (K)
 O dispositivo apresentado converte esta tensão numa corrente de 1 μA/°C. Assim a corrente de saída do dispositivo fica:

$$I_o = \frac{\left(\frac{kT}{q} \right) \ln(r)}{R_5}$$

Este circuito deve ser polarizado com tensões entre 5 e 15VDC e pode ser ligado de diversas formas para medir a temperatura numa faixa de -55 até 150 °C.

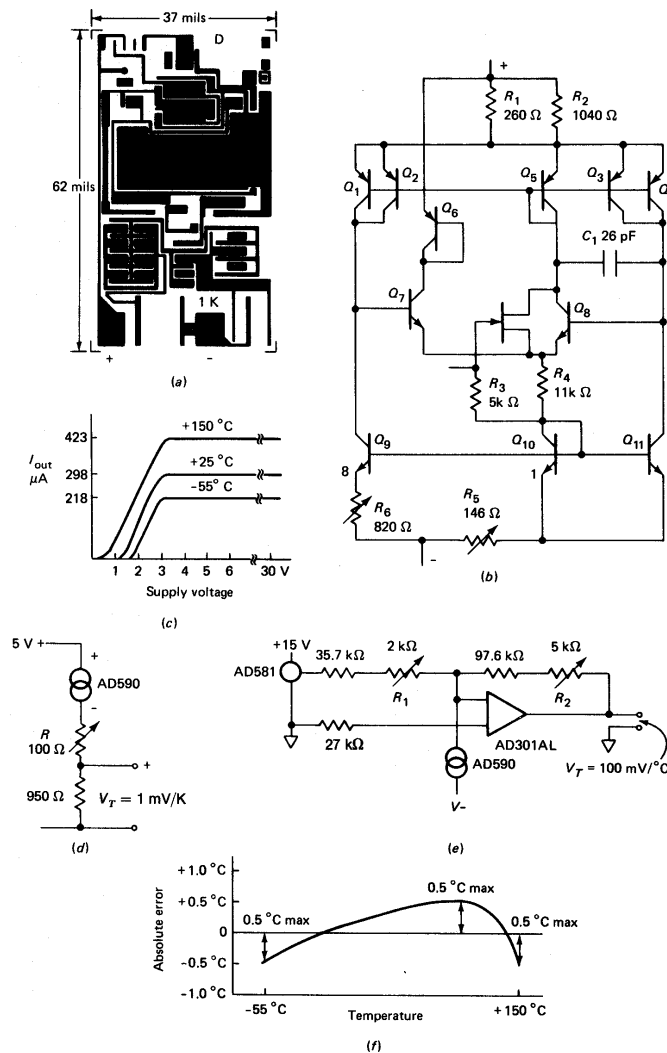


Figura 98. Sensores de temperatura de junção semicondutora.

6.3. Medidas Elétricas

Em eletricidade são realizadas medidas para quantificar parâmetros elétricos como os mostrados na tabela a seguir:

Tabela 19 Medidas elétricas usuais

Parâmetro	Método	Características
Corrente DC	<ul style="list-style-type: none"> • Bobina móvel • Multímetro • Galvanômetro • Multímetro Digital Eletrônico 	Faixa +, Precisão - Faixa +, Precisão - Faixa -, Precisão -, Faixa ++, Precisão ++,
Corrente AC	<ul style="list-style-type: none"> • Bobina Móvel • Multímetro • Multímetro Digital Eletrônico 	Faixa +, Precisão - Faixa +, Precisão - Faixa ++, Precisão ++,
Tensão DC	<ul style="list-style-type: none"> • Bobina Móvel • Multímetro • Multímetro Digital Eletrônico • Conversores A/D 	Faixa +, Precisão - Faixa +, Precisão - Faixa ++, Precisão ++ Faixa ++, Precisão ++
Potência	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamômetro 	Faixa ++, Precisão ++
Frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Contadores • Multímetro Digital eletrônico • Ponte de Wein 	Faixa +, Precisão ++ Faixa ++, Precisão + Faixa ++, Precisão ++
Impedância	<ul style="list-style-type: none"> • Ohmímetro • Pontes AC 	Faixa ++, Precisão + Faixa ++, Precisão +

6.3.1. Medidas de tensão, corrente e potência

6.3.1.1. Medida de Tensão DC:

Um forma simples de medir tensão DC é utilizando o dispositivo de bobina móvel de D'Arsonval que é constituída por uma bobina móvel acoplada a uma agulha indicadora, um ímã permanente, um sistema mecânico de suspensão e uma resistência de compensação de variações com a temperatura, veja na figura abaixo.

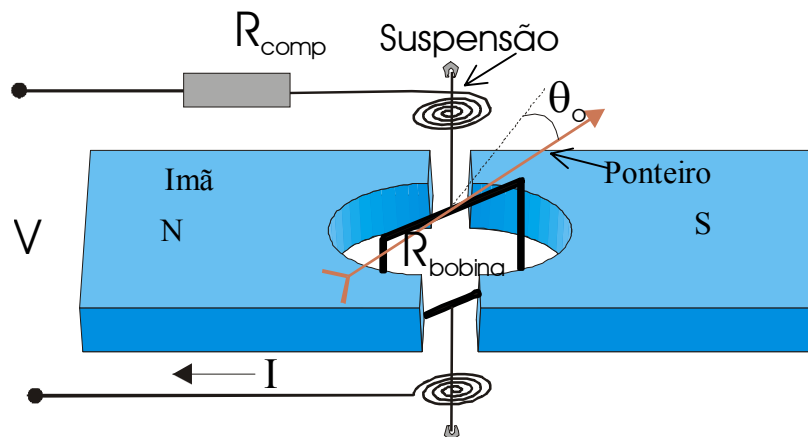


Figura 99 Medida de tensão DC com dispositivo de D'Arsonval

O dispositivo é basicamente sensível a corrente DC proporcional à tensão aplicada na sua entrada, esta mesma corrente interage com o campo magnético do ímã provocando um giro desta bobina ao redor do eixo de suspensão e portanto indicando um certo valor numa escala em Volts. A resistência em serie tem como função compensar o sistema das variações da resistência da bobina com a temperatura, fazendo com que o resistor de compensação apresente um TCR inverso ao TCR da bobina móvel. O ângulo de giro da agulha em (graus), está dado por :

$$\theta_o = k \cdot I = \frac{V}{(R_{bobina} + R_{comp})}$$

6.3.1.2. Medida de corrente DC

O método básico para medida de corrente DC consiste na utilização de um resistor tipo "SHUNT" colocado em serie com o circuito e um voltímetro DC para a medição da tensão DC no sensor, veja Figura 100. O valor desta resistência R_{shunt} é muito baixo para não limitar a corrente que está sendo transferida pelo circuito e o valor da resistência de entrada do voltímetro R_m deverá ser muito maior que a do resistor Shunt.

Assim a tensão lida será proporcional a corrente de entrada:

$$I_{Shunt} = \frac{I_M \cdot R_{comp}}{R_{Shunt}}$$

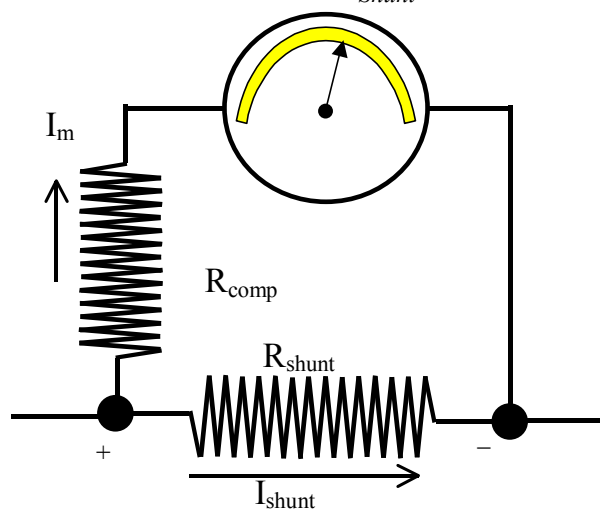


Figura 100 Medida de corrente DC

6.3.1.3. Medida de tensão AC

O método básico de medida de tensões AC é a utilização de um circuito que converte a tensão AC em DC e após isto medir a tensão DC com o método já apresentado, veja na Figura 101 o diagrama de blocos para esta medida.

O valor lido é o valor RMS (Root Mean Square) do sinal AC, no caso de um sinal senoidal com valor pico de A_o , tem-se:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A_o^2 \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right]^2 dt} = \frac{A_o}{\sqrt{2}}$$

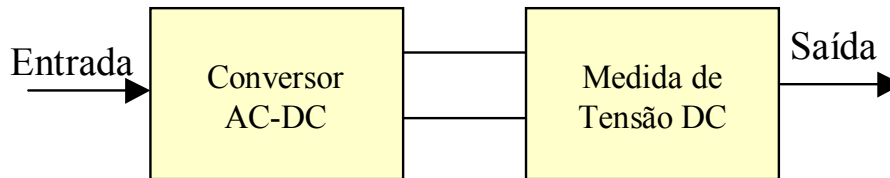


Figura 101 Diagrama de blocos de um medidor de tensão AC

6.3.1.4. Multímetro Digital

Os multímetros são instrumentos que podem medir diversos parâmetros como (Resistência, tensão DC ou AC e Corrente DC ou AC), este instrumento pode ter varias faixas para cada parâmetro e seu mostrador apresenta ao resultados de forma digital com um certo número de dígitos, na Figura 102 apresenta-se o diagrama de blocos deste instrumento.

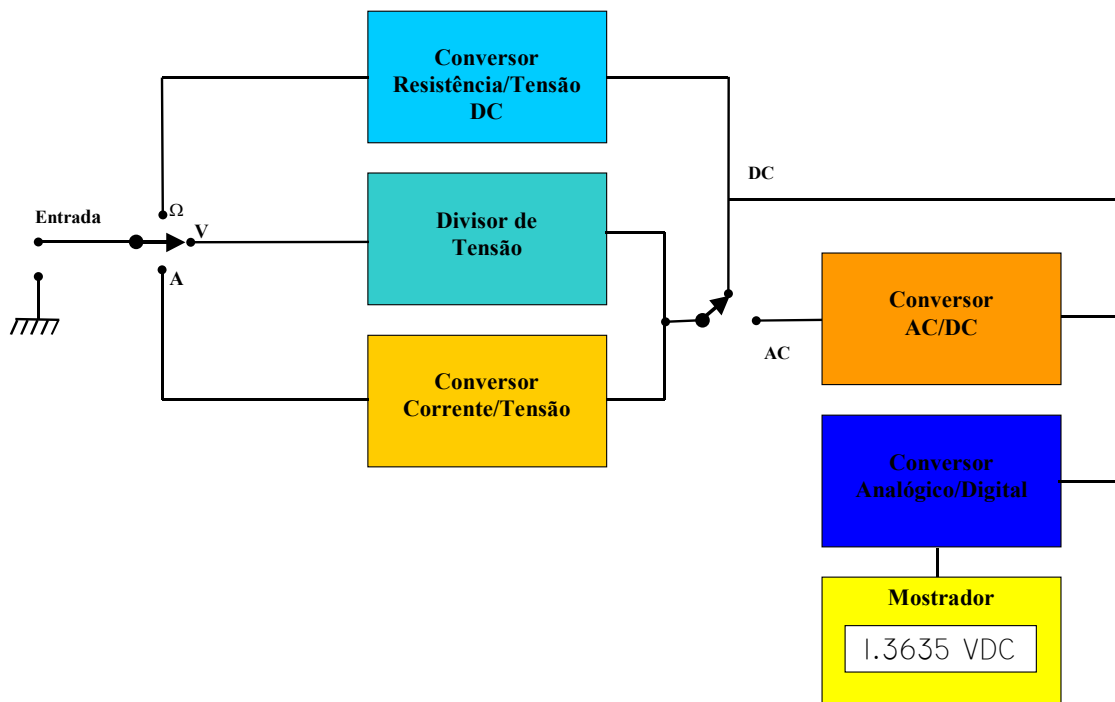


Figura 102 Diagrama de blocos de um multímetro digital de 4 1/2 dígitos.

6.3.1.5. Medida de Potência

Potência é a indicação da quantidade de trabalho realizado em certo tempo, ou seja:

$$potência = P = \frac{trabalho}{tempo} = \frac{w}{t}$$

A unidade para medida de potência é o Watt (W). Em geral a potência em circuitos elétricos é expressa em termos de corrente e tensão, assim temos que para os sinais DC:

$$w = qV \quad e \quad I = \frac{q}{t}$$

com q = carga em (Coulombs)
então:

$$P = \frac{q \cdot V}{q/I} = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

Então é possível medir potência DC usando um medidor de corrente DC e um medidor de tensão DC ligado de forma conveniente no local onde se deseja realizar a medida. Na Figura 103 pode ser visualizada uma forma de realizar esta medida.

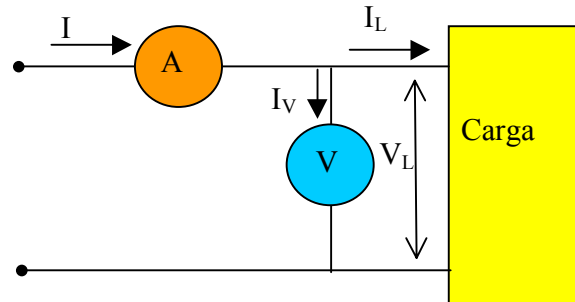


Figura 103 Medida de Potência DC numa carga

6.3.2. Medidas de frequência

Um método bastante simples e preciso para medir frequência de um sinal periódico é utilizar um contador de frequência. Este constitui-se em um processador do sinal de entrada, circuito este gera pulsos padrões proporcionais à frequência de entrada. Um circuito que gera um intervalo de tempo de forma precisa ($T = K/f_c$), sendo f_c a frequência de um relógio de referência. Este sinal abre e fecha uma porta digital e permite a passagem de um certo número de pulsos a um circuito contador digital o qual transfere esta informação periodicamente a um mostrador digital calibrado em Hz.

O número que aparece no mostrador está dado por:

$$N_x = \frac{T \cdot f_x}{f_c}$$

Se a porta é aberta exatamente durante 1 segundo a contagem acumulada no contador é igual à frequência média da entrada em Hz, se a porta é aberta durante 10 segundos a contagem acumulada no contador é igual à frequência média da entrada em décimos de Hz.

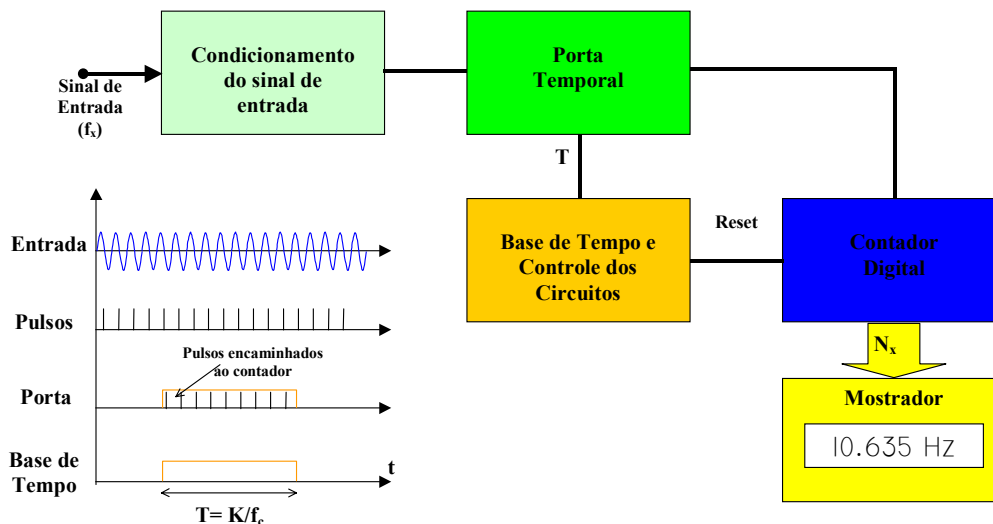


Figura 104 Diagrama de blocos de um contador de frequência

Os contadores digitais são projetados de maneira a gerar códigos binários compatíveis com o mostrador utilizado.

6.4. Medidas de Radiação Luminosa

As radiações eletromagnéticas cobrem uma faixa frequência enorme, veja a seguir figura do espectro electromagnético. Assim os diversos fenômenos diferenciam-se basicamente pela sua frequência característica ou seu comprimento de onda.

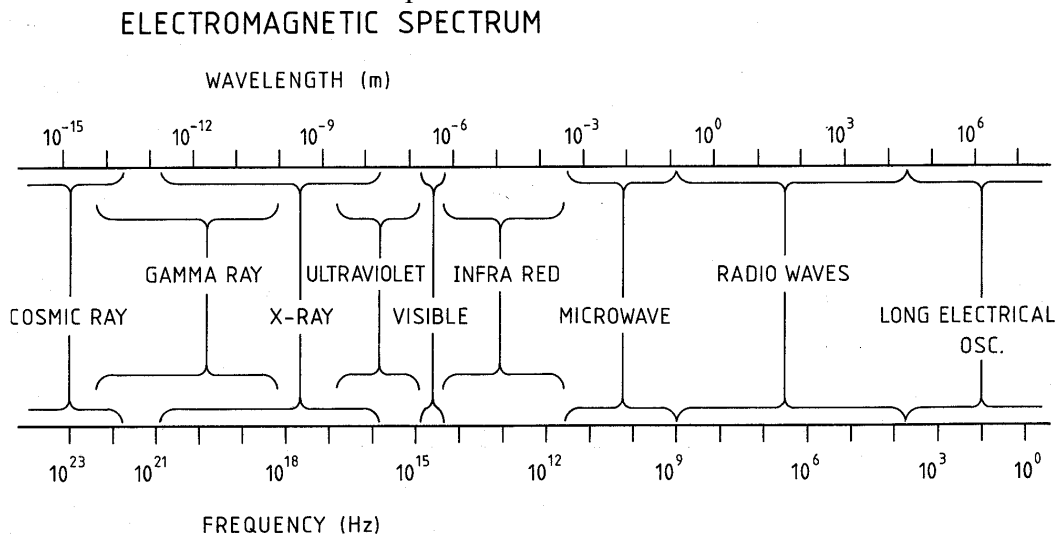


Figura 105 Espectro Electromagnético

No caso do espectro luminoso, veja espectro abaixo, a energia de um fóton E_p é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional a seu comprimento de onda:

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

sendo: h = constante de Planck = 6.626×10^{-34} Js, ν e λ = frequência (Hz) e comprimento de onda (m) respectivamente e c = velocidade da luz no vácuo 2.998×10^8 m/s.

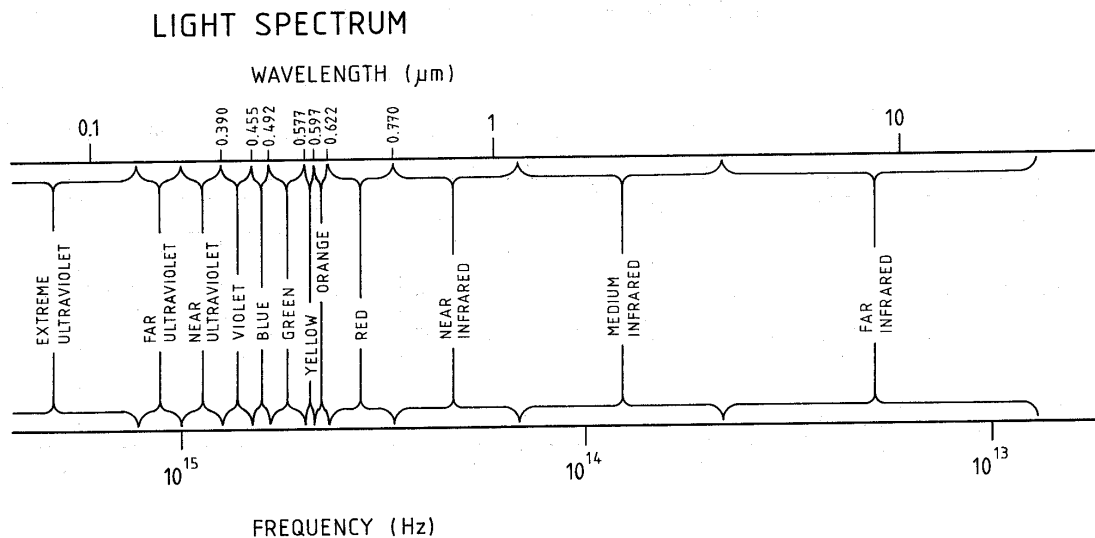


Figura 106 Espectro luminoso

A Luz pode ser modificada, de diversas formas, pelo parâmetro a ser medido como mostrado na tabela a seguir:

Tabela 20 Parâmetros ópticos usados para medidas

Parâmetro	Modificação	Medidas
Direção da Propagação	<ul style="list-style-type: none"> • Desvios • Reflexão • Refração • Transmissão 	Posição angular Deformação
Fluxo	<ul style="list-style-type: none"> • Atenuação por absorção • Modulação (Tudo-Nada) 	Composição Química Densidade Velocidade de rotação
Frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito Doppler 	Velocidade de deslocamento
Intensidade Comprimento de Onda	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição espectral de energia 	Temperatura da fonte
Fase	<ul style="list-style-type: none"> • Defasagem entre duas ondas 	Posição Dimensão deslocamento
Polarização	<ul style="list-style-type: none"> • Rotação do plano de polarização por birrefringência 	

6.4.1. Fotodiodos

São dispositivos semicondutores constituídos por uma junção p-n e uma janela que permite a incidência de luz. Estes dispositivos apresentam uma sensibilidade menor que as células fotocondutoras mas uma velocidade elevada o que o faz adequado para recepção de informação óptica.

Este dispositivo apresenta dois modos de funcionamento:

- Modo Fotocondutor: onde o diodo é polarizado reversamente, então a corrente no circuito é proporcional à intensidade luminosa incidente
- Modo Fotovoltáico: Neste caso o diodo não é polarizado, gerando uma tensão proporcional à intensidade luminosa incidente

A seguir apresentam-se circuitos básicos para os dois modos de operação.

Tensão de saída no modo fotocondutivo $V_o = R_m \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) I_r$

Tensão de saída no modo fotovoltáico $V_o = R_m \cdot I_{cc}$

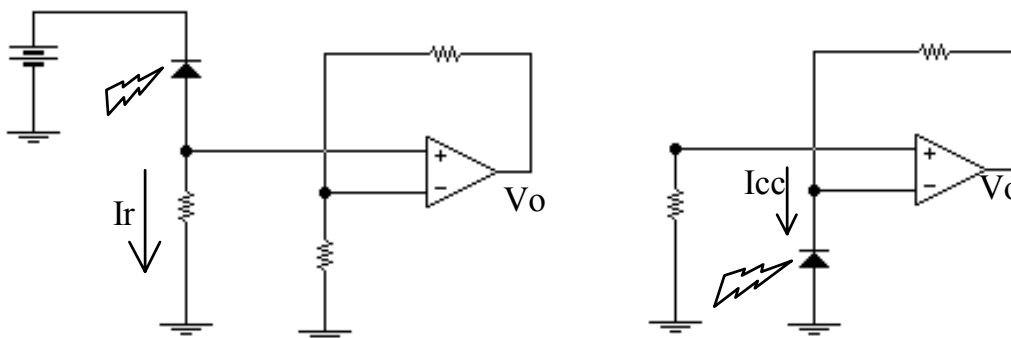


Figura 107 Ligação de fotodiodos a) Modo fotocondutivo, b) Modo fotovoltáico

6.4.2. Fotodetecores sensitivos a posição

São dispositivos opto-eletrônicos que converte um ponto de luz incidente em informação contínua de posição num plano. Este dispositivo funciona devido ao efeito fotoelétrico lateral: Quando numa junção p-n é iluminada por fótons pares elétron-lacuna são gerados e separados pelo campo elétrico da região de depleção. Com terminais apropriados será possível coletar uma fotocorrente que pode ser medida através da junção. Na Figura 108 apresentam-se as configurações deste dispositivo, que possui quatro terminais, dois na parte superior e dois na parte inferior. Os terminais na parte inferior são colocados perpendiculares aos terminais da parte superior. As fotocorrentes geradas pela luz incidente são medidas como duas correntes de entrada x_1 e x_2 e duas correntes de saída y_1 e y_2 , a relação entre estas correntes fornece a informação de posição do ponto de luz incidente na área em questão.

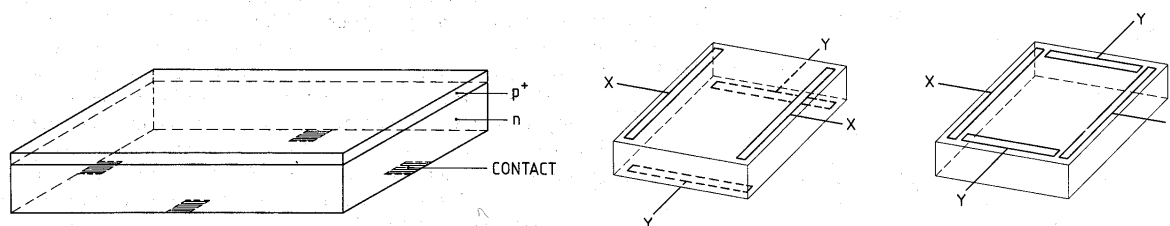


Figura 108 (PSD) Detetor sensitivo a posição

A posição do ponto luminoso nas direções x e y está dada por :

$$y = \frac{L_y}{2} \cdot \left(\frac{y_1 - y_2}{y_1 + y_2} \right) \quad \text{e} \quad x = \frac{L_x}{2} \cdot \left(\frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \right)$$

Sendo L_y e L_x as dimensões físicas do dispositivo

6.5. Medidas Químicas

Alguns métodos usado para medidas químicas são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 21 Métodos usados para medidas químicas

Princípio	Método	Características
Cromatografia	<ul style="list-style-type: none"> Papel Líquido Gás 	Separação de moléculas, não muito preciso Melhor resolução e precisão Usado para materiais voláteis
Eletroquímica	<ul style="list-style-type: none"> Condutividade Células Galvânicas Polarografia 	Medida de concentração de ions em eletrólitos Medida de concentração de ions em eletrólitos Medida de concentração de ions
Espectroscopia	<ul style="list-style-type: none"> UV e Visível Absorção de IV Emissão atômica Fluorescência Absorção atômica 	Método quantitativo Identifica estrutura em análise quantitativa Muito sensitivo na identificação de metais Muito sensitivo e seletivo para detecção de elementos Analise de certos metais
Massa	<ul style="list-style-type: none"> Espectroscopia de Massa 	Método extremamente sensitivo e preciso
Térmico	<ul style="list-style-type: none"> Termo-gravimetria Analise térmico diferencial 	Determina peso em função da temperatura Determina temperatura de reações e transições

6.5.1. Medidas analíticas (Técnicas de Voltametria)

A voltametria permite o estudo da composição de uma solução através das relações corrente-potencial numa célula eletroquímica e com a resposta corrente-tempo de um microeletrodo mantido a um potencial controlado. Os métodos voltamétricos mais utilizados são:

- Voltametria DC com varredura linear de potencial, Ex. Voltametria Cíclica
- Métodos de degrau de potencial, Ex. Voltametria de onda quadrada
- Voltametria de corrente AC sensível a fase, Ex. Voltametria AC
- Métodos Hidrodinâmicos, Ex. Método do disco girante
- Cronoamperometria, Ex. Voltametria de decapagem anódica
- Sistema de potencial controlado em fluxo, Ex. Detecção amperométrica

Um exemplo de instrumentação voltamétrica e o controle potencioestático de um eletrodo de trabalho e a medida da corrente nesse eletrodo. Num potencioestato de três eletrodos, o eletrodo de referência é posicionado muito perto do eletrodo de trabalho, o eletrodo auxiliar é o terceiro eletrodo na célula eletroquímica, a função do potencioestato é observar o potencial do eletrodo de trabalho (cátodo ou ânodo) em relação ao eletrodo de referência, veja o diagrama de blocos deste instrumento na figura a seguir.

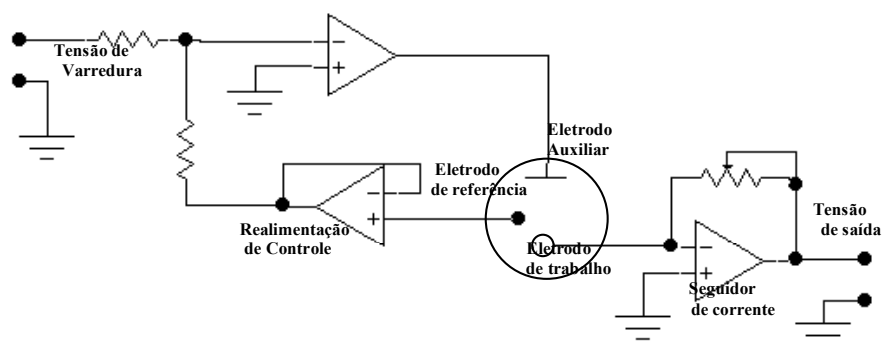


Figura 109 Potencioestato

6.5.2. Medidas de composição química (Espectroscópio de massa)

Este método é uma técnica de análise muito popular já que fornece informação qualitativa e quantitativa sobre a composição atômica ou molecular de materiais orgânicos e inorgânicos. Funcionalmente um espectrometro de massa cumpre as seguintes funções:

- Cria fragmentos iônicos gasosos da amostra a ser analisada
- Seleciona estes fragmentos de acordo com a massa (razão massa/carga)
- Mede a relativa abundância dos fragmentos iônicos de cada massa

O diagrama de blocos deste método está apresentado a seguir:

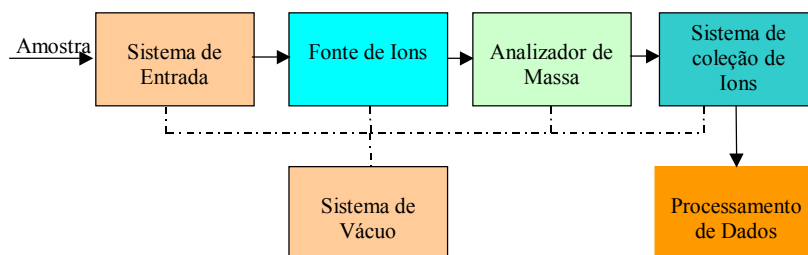


Figura 110 Diagrama de blocos de um espectroscópio de massa

6.6. Medidas Magnéticas

Dentro dos efeitos magnéto-elétricos mais utilizados atualmente em instrumentação eletrônica destacamos o efeito Hall que passamos a explanar.

6.6.1. Medidas com efeito Hall

Um dispositivo Hall é tipicamente uma placa pequena de metal ou semicondutor de comprimento l , espessura t e largura w . Quando uma corrente I_x passa pela placa, a qual está sujeita a uma densidade de fluxo magnético B_z perpendicular ao plano da placa, uma tensão Hall aparecerá nos contatos laterais como mostrado na figura abaixo.

Esta tensão esta dada por :

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{t}$$

sendo R_H = constante Hall do material,

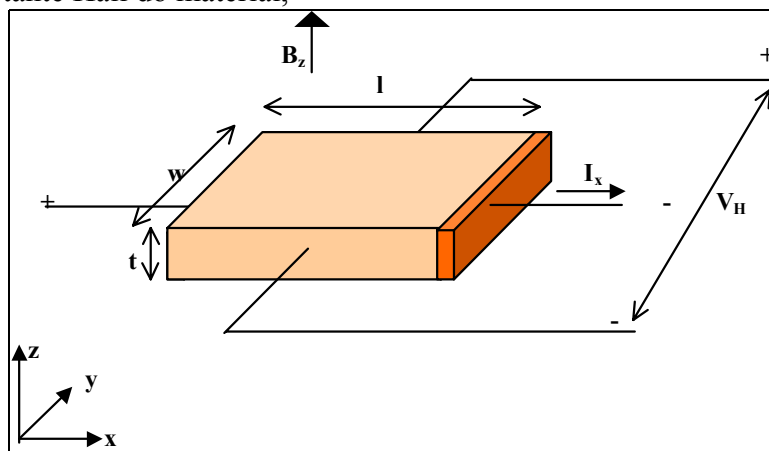


Figura 111 Efeito Hall

O circuito magnético associado a um sensor Hall modifica a tensão Hall dependendo da sua posição relativa, veja a figura abaixo, para uma medida de deslocamento.

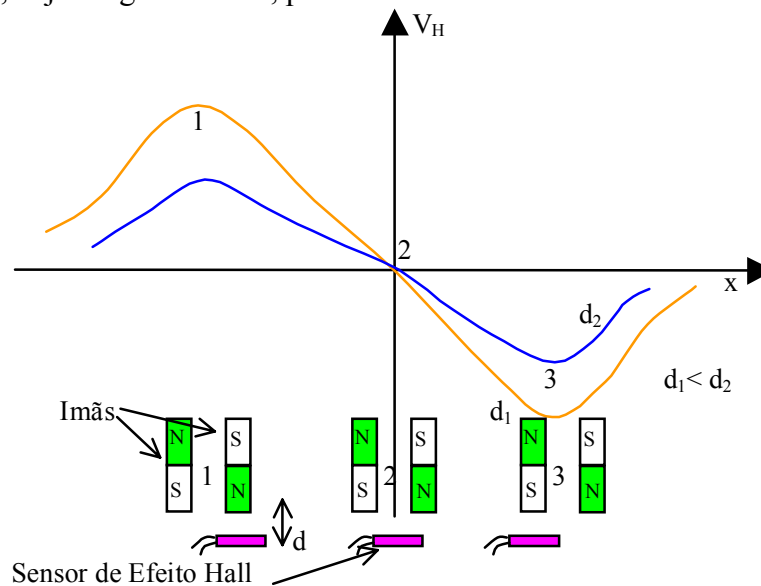


Figura 112 Sensor de deslocamento usando dispositivo Hall

7. Estruturas básicas de Condicionamento analógico de sinais para instrumentação

Nesta seção serão apresentados conceitos básicos e circuitos com aplicações adequadas para condicionamento analógico de sinais em instrumentação.

7.1. Amplificadores Operacionais

Os amplificadores operacionais são dispositivos muito usados para o condicionamento analógico de sinais eletrônicos em instrumentação

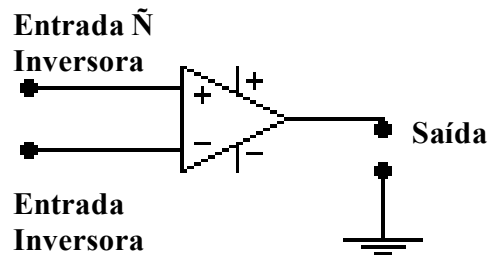


Figura 113 Amplificador Operacional Ideal

Um amplificador operacional ideal apresenta as seguintes características:

- Ganho Infinito
- Impedância de Entrada Infinita
- Largura de Banda Infinita
- Impedância de Saída Zero
- Tensão de Offset e Corrente de Offset Zero

Existem duas regras fundamentais para o funcionamento adequado de um amplificador operacional ideal com realimentação externa:

- A saída fará tudo o possível para fazer que a diferença de tensão entre os terminais Não Inversor e Inversor seja Zero.
- Nas entradas do amplificador não flui corrente.

7.2. Fontes e referências

Freqüentemente são necessárias fontes de tensão e corrente reguladas para fornecimento de energia aos circuitos de instrumentação com correntes e tensões controladas.

São necessárias também referências de tensão e de corrente para fornecer pontos de referência para realizar diversas operações (como ajuste de zero, variação de frequência, referências para diversos tipos de conversores, etc.) e usualmente estas apresentam uma regulação e estabilidade muito grande em comparação às fontes reguladas

7.2.1. Fontes e referências de tensão

Um circuito clássico de regulador de tensão é o 723 e se constitui por uma fonte de referência de tensão, um amplificador de erro, um transistor de controle e circuitos auxiliares de controle, na figura a seguir temos um regulador de tensão positiva usando este C.I. Neste caso utiliza-se a saída de referência e aplica-se na entrada não inversora do amplificador de erro e com um divisor de tensão que define a tensão de saída, a resistência de 6,8 Ohms controla a corrente máxima de saída para 50 mA.

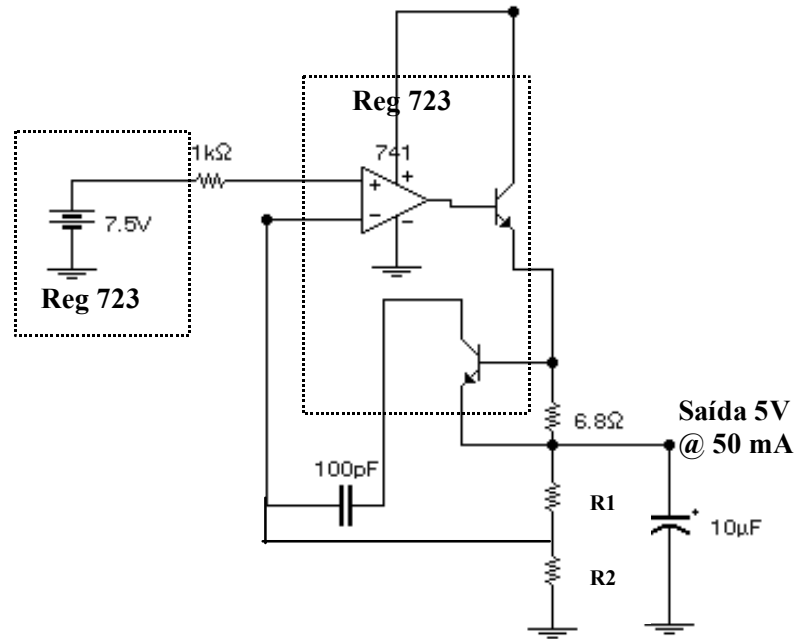


Figura 114 Fonte de tensão usando 723

Outros dispositivos usados como fontes reguladas são da família 78XX e 79XX fontes de três terminais usados para regular sinais positivos e negativos respectivamente.

Referências de tensão são necessárias em circuitos eletrônicos em geral, quando uma precisão ou estabilidade da tensão é requerida. Em geral são usados diodos Zener ou referências do tipo "Bandgap" que utilizam dois transistores acoplados de forma a cancelar os coeficientes de variação com a temperatura envolvidos.

A tensão V_{BE} de um transistor geralmente apresenta um coeficiente de variação com a temperatura negativo ($-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$), a idéia é gerar uma tensão com um coeficiente de variação com a temperatura positivo que quando somados cancela a variação.

Considere o seguinte circuito:

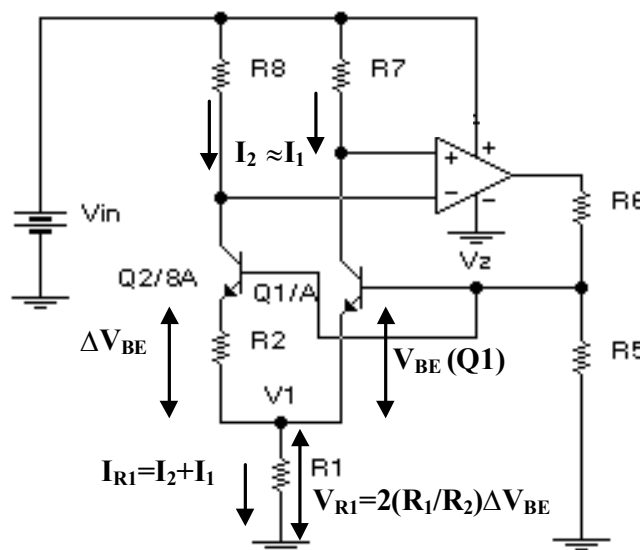


Figura 115 Referência de tensão tipo "BandGap"

A tensão V_{R1} excita dois transistores com diferentes densidades de corrente, amplificando ΔV_{BE} que agora apresenta um coeficiente de temperatura positivo, e ajustado para compensar a variação de V_{BE} com a temperatura. A soma das tensões V_Z é:

$$V_Z = V_{BE} + V_{R1} = V_{BE} + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \Delta V_{BE} = V_{BE} + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_1}{J_2}\right) = 1.205$$

Esta tensão é amplificada para obter uma tensão de saída de 2,5 Volts na saída

$$V_{out} = V_Z \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right) = 2.5$$

7.2.2. Fontes de corrente

Fontes de corrente podem ser necessárias para certas aplicações em instrumentação Ex. (Circuito Potenciostato) estes podem ser derivados das fontes de tensão reguladas ou a partir de referências de tensão, como o circuito mostrado na figura abaixo.

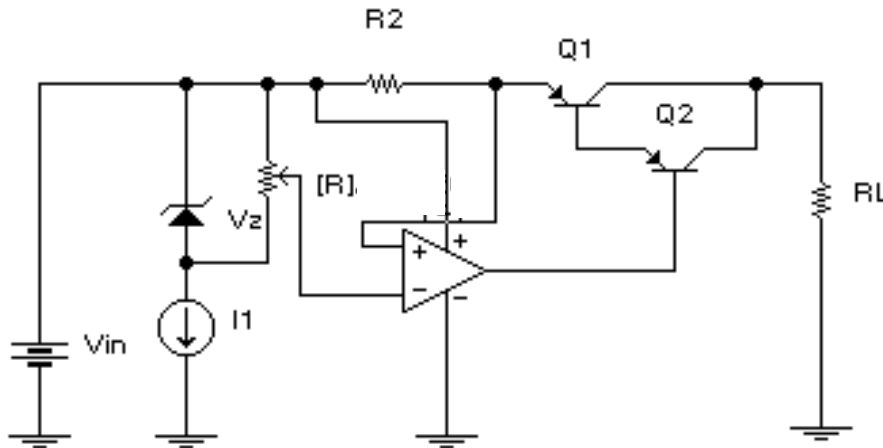


Figura 116 Fonte regulada de corrente

Neste caso utiliza-se uma referência de tensão na entrada, um resistor (R_2) para monitorar a corrente e um circuito de controle de corrente formado pelo amplificador operacional e os transistores de saída,

7.3. Pontes

Em instrumentação alguns tipos de pontes usados para extração de informação proveniente de elementos sensores resistivos, capacitivos ou indutivos, nesta seção apresentaremos a ponte de Wheatstone.

7.3.1. Ponte de Wheatstone

É de longe a estrutura mais popular em instrumentação usando elementos resistivos, esta estrutura constitui-se por quatro resistências (R_1, R_2, R_3, R_4) interligadas como mostrado na figura a seguir. A tensão de saída deste circuito para excitação de tensão constante fica:

$$V_o = V_p \cdot \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \right)$$

A ponte é dita balanceada quando $R_1 R_3 = R_2 R_4$

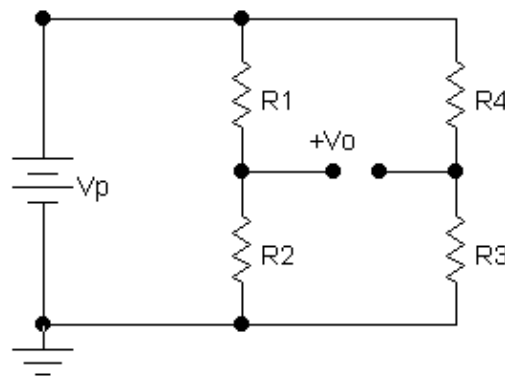


Figura 117 Ponte de Wheatstone (Tensão Constante)

Em instrumentação uma ou várias resistências da ponte podem ser substituídas por elementos sensores resistivos, sendo assim o elemento pode ser descrito como

$$R_i = R_{oi} + \Delta R_i = R_{oi} \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_i}{R_{oi}}\right)$$

Sendo ΔR_i = a variação de resistência devido ao parâmetro físico e R_{oi} = o valor inicial para uma excitação de referência. Para "Strain Gages":

$$\Delta R_i = k \cdot \varepsilon_i$$

com k = "Gage Factor" e ε = deformação mecânica na direção principal do gage.

Estas variações em geral para o caso de "Strain Gages" são muito pequenas (da ordem de 10^{-3} Ω) então a saída pode ser aproximada assim, supondo que todas as resistências variam:

$$\frac{V_o}{V_p} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

ou seja:

$$\frac{V_o}{V_p} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Esta estrutura permite então combinando as diversas deformações montar diversos esquemas de medida:

- Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon$ então a saída da ponte será nula
- Se $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$ e $\varepsilon_1 = \varepsilon$ então a saída da ponte será:

$$\frac{V_o}{V_p} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon)$$

- Se $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$ e $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$ então a saída da ponte será:

$$\frac{V_o}{V_p} = \frac{k}{2} \cdot (\varepsilon)$$

- Se $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ ou seja estou medindo uma deformação produzida por uma tensão e uma produzida por uma compressão a saída da ponte será

$$\frac{V_o}{V_p} = (k\varepsilon)$$

Neste caso é possível aumentar a sensibilidade da ponte usando quatro gages medindo tensão e compressão.

7.4. Amplificadores

Amplificadores são elementos rotineiramente usados em instrumentação com o objetivo primordial de elevar o nível ou valor de um parâmetro (tensão ou corrente) para ajustar uma sensibilidade de um transdutor.

7.4.1. Amplificador Inversor

É o esquema de amplificação de sinal mais popular, a tensão de saída, consta de um amplificador operacional e duas resistências interligadas no terminal inversor do operacional é expressa por:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$

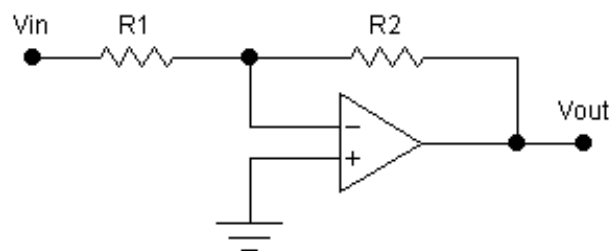


Figura 118 Amplificador inversor

7.4.2. Amplificador Não Inversor

Este tipo de amplificador não muda o sinal da tensão de entrada e permite ajuste para ganhos maiores que 2 e sua impedância de entrada é elevada. A tensão de saída deste circuito é :

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{in}$$

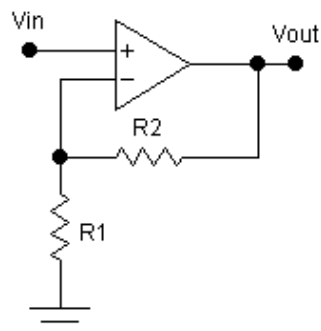


Figura 119 Amplificador não inversor

7.4.3. Amplificador de Instrumentação

O amplificador de Instrumentação é um bloco operacional que fornece ganho diferencial, respondendo somente à diferença de tensão entre seus dois sinais de entrada e apresentando uma impedância de entrada elevada e uma impedância de saída baixa. Este esquema é muito utilizado para extrair informação da ponte de Wheatstone apresentada anteriormente.

O esquema mais popular é o que utiliza três amplificadores operacionais, como mostrado na figura abaixo:

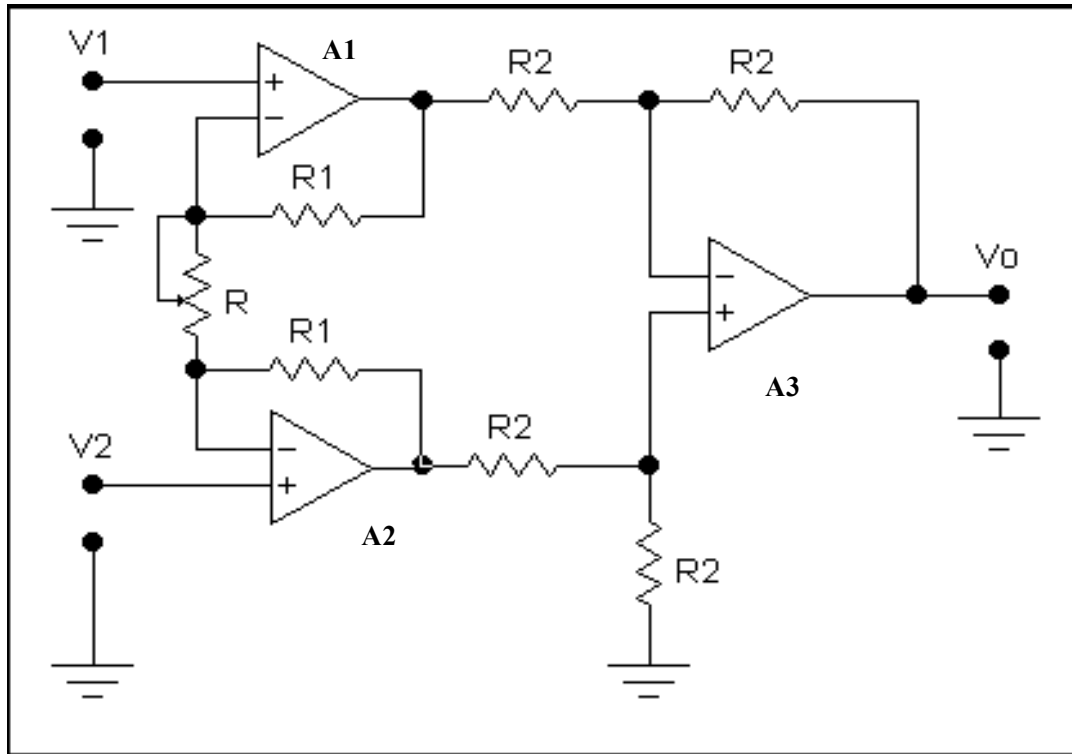


Figura 120 Amplificador de instrumentação

Este amplificador constitui-se por um estágio diferencial seguido de um subtrator. Os dois amplificadores de entrada (A_1 , A_2) são ligados na configuração não inversora e o amplificador de saída (A_3) está conectado como um amplificador diferencial de ganho unitário.

A saída de tensão deste circuito pode ser expressa assim:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) \cdot (V_2 - V_1)$$

7.4.4. Amplificador de carga

Os transdutores piezoelétricos precisam de um condicionador de sinais diferente já que a carga elétrica produzida é proporcional à força mecânica aplicada. O circuito da figura abaixo permite realizar a conversão carga/tensão elétrica, assim a tensão de saída, supondo que o amplificador é ideal e a carga gerada pelo transdutor chega totalmente a C_1 , está dada por:

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_1}$$

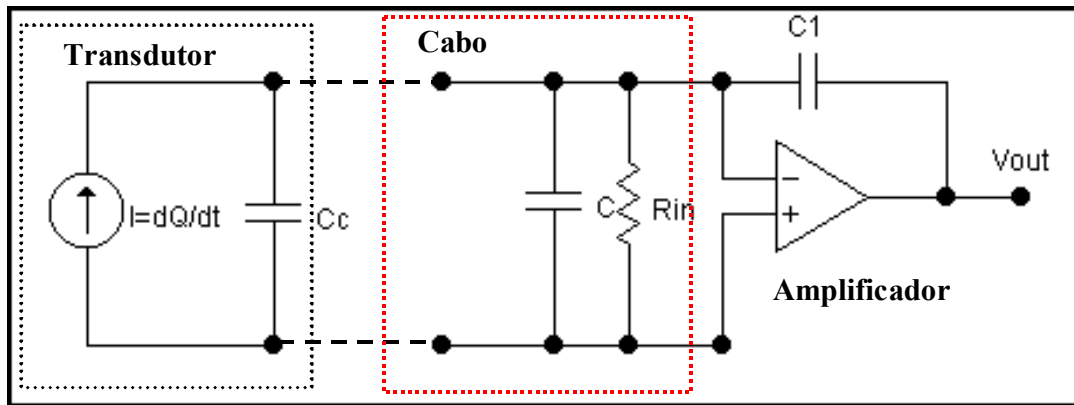


Figura 121 Amplificador de Carga

7.5. Demodulação Síncrona a fase (PSD)

Este é um método que limita a largura de banda de detecção o suficiente para incluir a faixa de frequências de interesse reduzindo significativamente o ruído superposto ao sinal, especialmente o ruído tipo 1/f.

A detecção síncrona em fase requer que o parâmetro a ser medido seja modulado, sendo a frequência de portadora, pelo menos, 10 vezes maior que a máxima frequência do sinal.

Na figura abaixo apresenta-se um diagrama de blocos deste dispositivo.

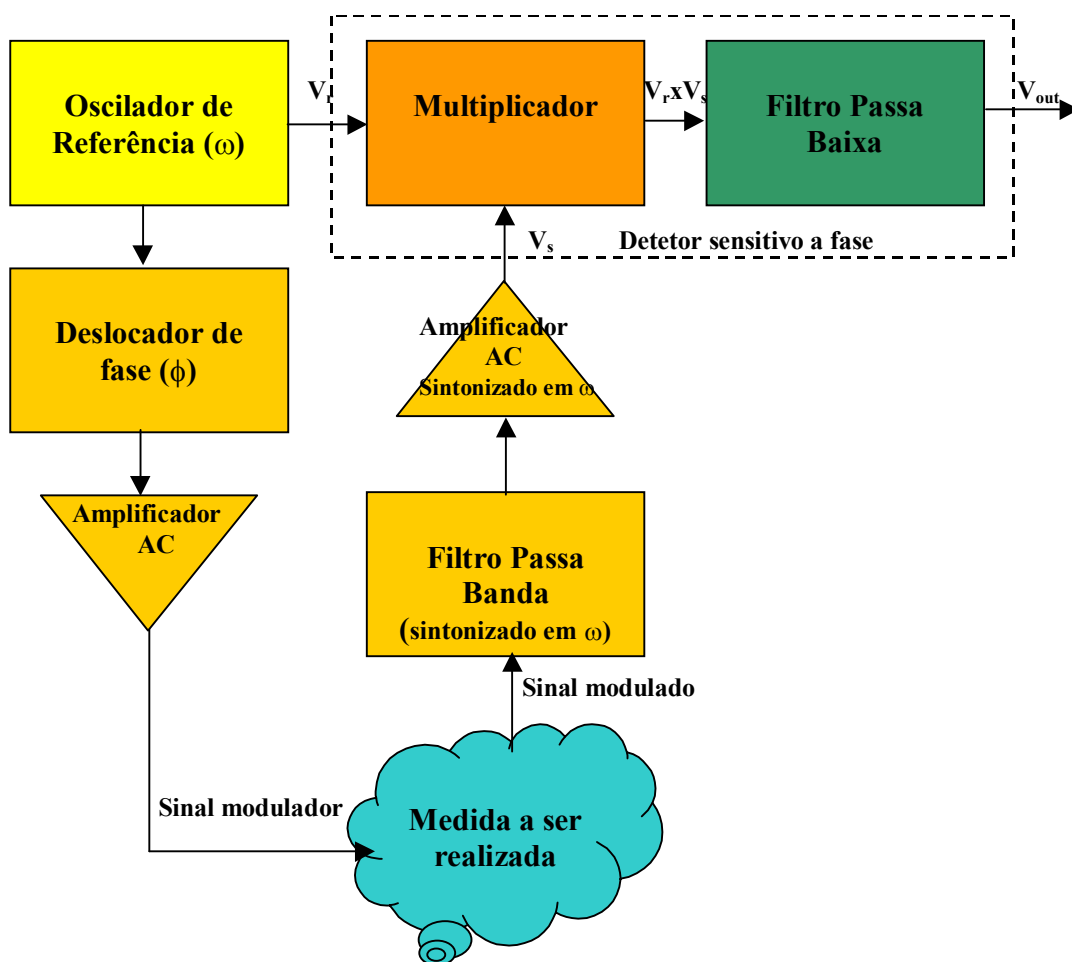


Figura 122 Demodulador sensível a fase.

Este sistema consta de um oscilador que fornece um sinal de referência (v_r) com frequência (ω) e amplitude (V_r) constante, assim:

$$v_r = V_r \cdot \cos(\omega t)$$

Um circuito que desloca a fase do oscilador num ângulo (ϕ), um circuito amplificador que fornece um sinal modulador. O parâmetro a ser medido então após a modulação gera um sinal com a mesma frequência do oscilador, mas, com amplitude a fase diferente.

Este sinal passa por um filtro passa banda e um amplificador AC sintonizado e fornecido ao detetor síncrono a fase, da seguinte forma:

$$v_s = V_s \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

O detetor sensível a fase constitui-se por um circuito multiplicador e um filtro passa baixa, na saída do multiplicador temos:

$$v_r \cdot v_s = \frac{V_s \cdot V_r}{2} \cdot [\sin(2\omega t + \phi) + \sin(\phi)]$$

A primeira parcela é um termo AC com duas vezes a frequência da portadora e a segunda parcela é um termo DC, o qual é obtido passando o sinal através de um filtro passa baixa, assim:

$$V_{out} = \frac{V_s \cdot V_r}{2} \cdot \sin(\phi)$$

Esta é a equação básica de todos os sistemas de detecção síncrona a fase, supondo que V_r é mantido constante existem dois modos de operação do dispositivo:

- Se $\sin(\phi)$ é mantido constante ($\phi=90^\circ$) o detetor produz um sinal V_{out} linear bipolar (dentro de uma certa faixa) correlacionando com V_s e o parâmetro desejado
- Se V_s é mantida constante a saída V_{out} estará correlacionada com a diferença de fase (ϕ) entre o sinal de referência e o sinal modulado

Graficamente estes modos de operação estão apresentados na figura a seguir:

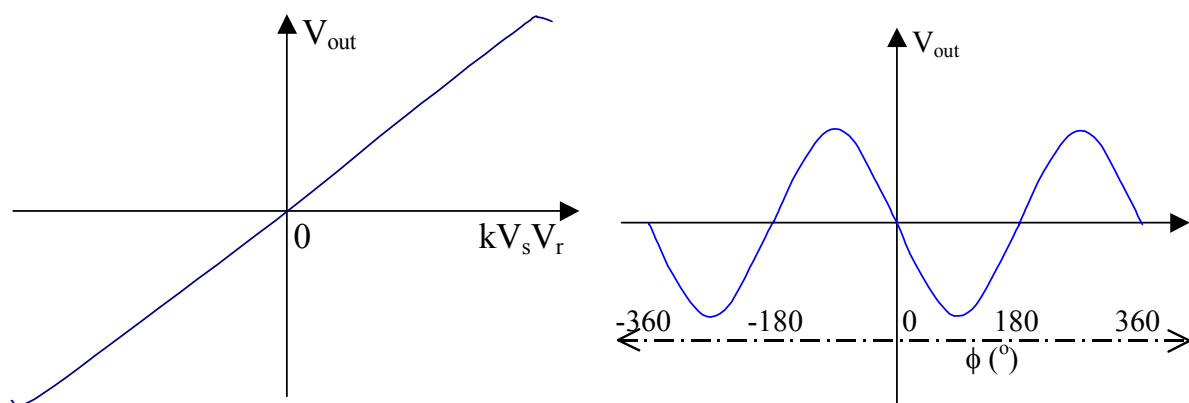


Figura 123 Modos de Operação do PSD

Uma forma simples de implementar um demodulador síncrono a fase é usando o circuito mostrado na figura a seguir, que possui uma chave analógica, um amplificador inversor e um filtro passa baixo, o sinal modulado é chaveado usando o sinal de referência, ou moduladora, que possui uma diferença de fase.

Desta forma quando a fase $\phi = 90^\circ$ ou 270° o sinal de saída é zero.

Para fase $\phi = 0^\circ$ ou 180° o sinal de saída apresenta um nível DC como mostrado anteriormente.

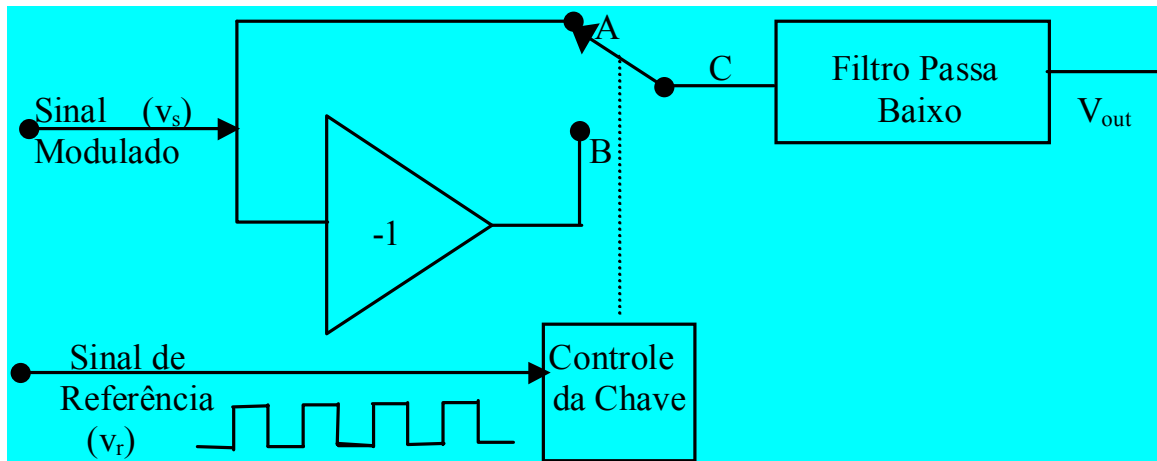


Figura 124 Detetor sensível a fase usando chave analógica

Os sinais obtidos em C e os níveis DC fornecidos após o filtro passa baixa, são apresentados na figura a seguir:

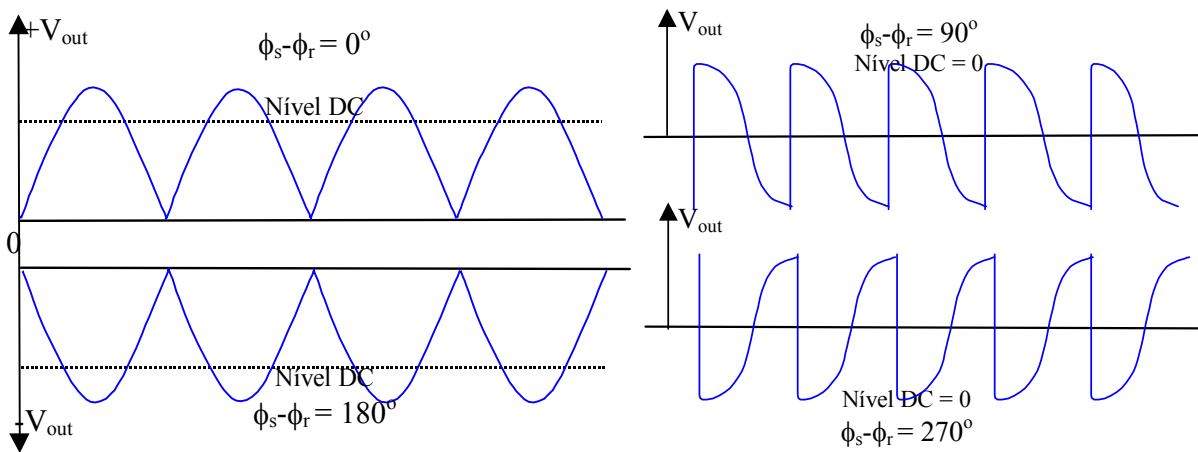


Figura 125 Sinais de saída de um PSD

7.6. Conversores

Em instrumentação é necessário realizar diversos tipos de conversões para compatibilizar sinais analógicos (conversão tensão-corrente) ou para extrair informações embutidas nestes sinais (Conversão AC-DC, RMS) ou para formatar um sinal de uma forma adequada para transmissão de sinais (Conversão V/F e F/V).

7.6.1. Conversor Tensão/Corrente

Existem diversos circuitos que permitem realizar esta conversão, para cargas (flutuantes ou referidas ao terra), apresenta-se na figura abaixo um método para converter uma tensão diferencial numa corrente para uma carga aterrada.

Este circuito constitui-se por um amplificador diferencial de três amplificadores operacionais e um outro amplificador operacional que realimenta a tensão na carga para o subtrator do segundo estágio. A tensão de saída V_{out} fica:

$$V_o = G \cdot (V_2 - V_1) + V_{ref}$$

Esta tensão também pode ser expressa como:

$$V_o = R \cdot I_L + V_{ref}$$

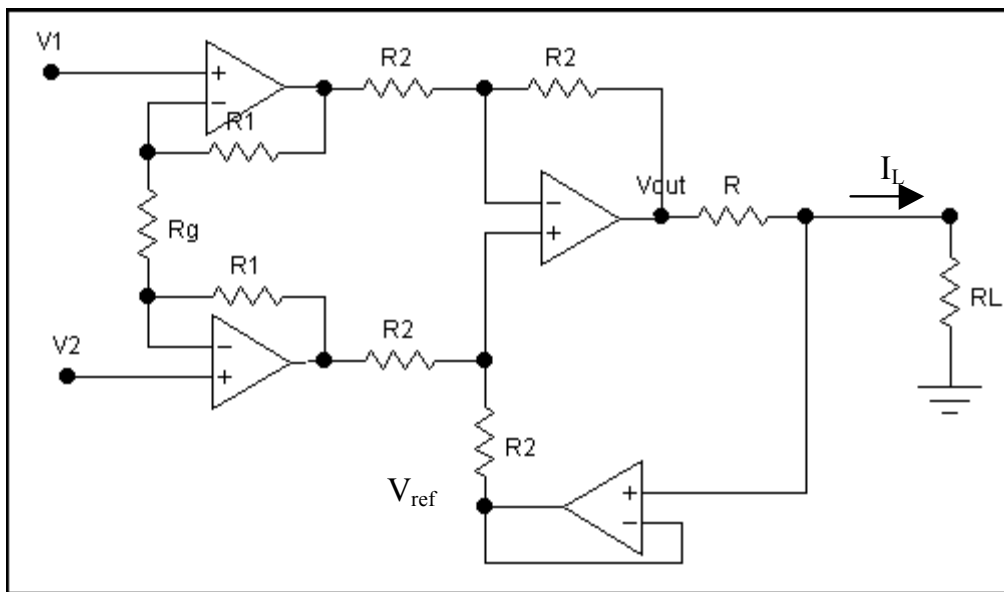


Figura 126 Conversor Tensão/Corrente

assim a corrente da saída será

$$I_L = \frac{G}{R} \cdot (V_2 - V_1)$$

com

$$G = \left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right)$$

7.6.2. Conversor AC/DC

A medida de uma corrente ou tensão alternada implica geralmente numa conversão AC-DC, que pode ser o valor absoluto ou o valor RMS ou o valor pico a pico do sinal em questão. No circuito abaixo apresentamos um conversor de valor absoluto. Neste caso o amplificador A1 funciona como um retificador de media onda onde:

- $V_1 = -V_{in}$ para $V_{in} \geq 0$ e
- $V_1 = 0$ para $V_{in} \leq 0$

O amplificador A2 fornece a seguinte saída

$$V_{out} = -(V_{in} + 2V_1)$$

assim a saída será :

- $V_{out} = V_{in}$ para $V_{in} \geq 0$ e
- $V_{out} = -V_{in}$ para $V_{in} \leq 0$

Adicionando um capacitor no amplificador A2 teremos na saída um sinal filtrado correspondente ao valor absoluto de V_{in} ou seja $V_{out} : |V_{in}|$

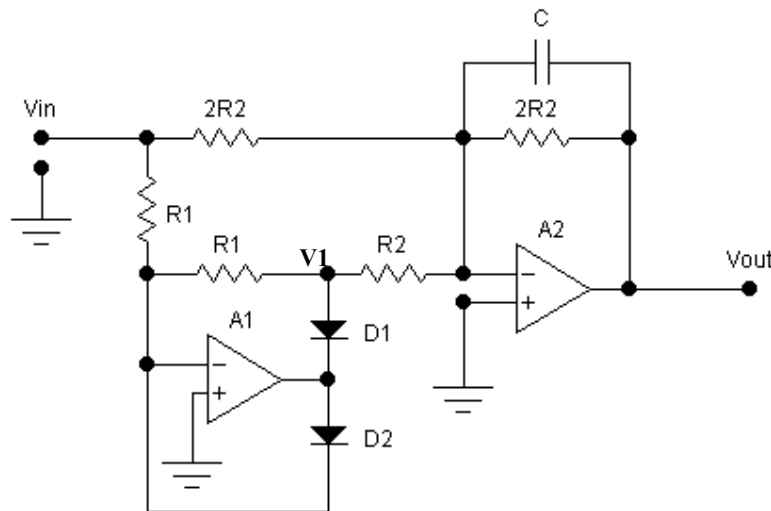


Figura 127 Conversor AC-DC

7.6.3. Conversor RMS

O conversor AC/RMS calcula o valor "Root Mean Square" de um sinal AC, o valor RMS é definido como:

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt\right)}$$

onde T representa o intervalo de medida.

Usualmente se utilizam efeitos térmicos para obter esta informação. Considere a figura abaixo S1 e S2 são sensores de temperatura que fornecem uma saída em tensão para o amplificador A2, o amplificador A1 esta excitando a resistência R1 com uma tensão V_{in} dissipando uma potência igual a:

$$P_{R1} = \frac{V_{in}^2}{R_1}$$

Esta potência dissipada se manifesta como um aquecimento do resistor R1 para T1.

O amplificador mantém a temperatura $T_2 = T_1$ gerando uma tensão na saída V_{out} a qual é aplicada no resistor R_2 dissipando uma potência igual a :

$$P_{R2} = \frac{V_{out}^2}{R_2}$$

Como as duas temperaturas são iguais então as potências dissipadas pelos dois circuitos são iguais portanto se $R_1 = R_2$ então

$$V_{out} = Valor_RMS_de_V_{in}$$

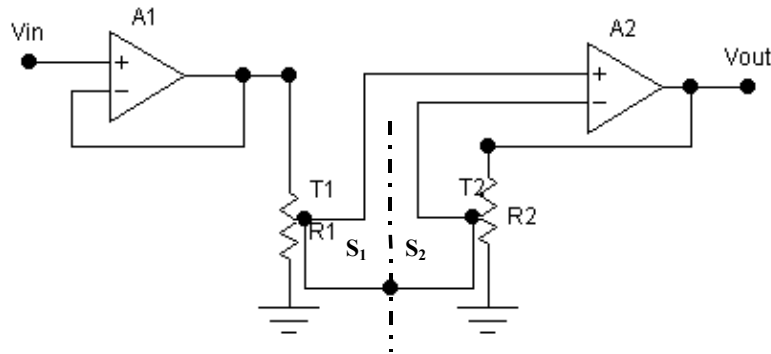


Figura 128 Conversor RMS

7.6.4. Conversor Tensão/Frequência

Na conversão Tensão/Frequência uma tensão analógica é convertida de forma linear numa frequência na saída.

Um dispositivo muito usado é o AD537 que fornece uma saída de frequência assim:

$$f = \frac{V_{in}}{10RC}$$

Este circuito consta de um circuito de entrada que converte a tensão da entrada numa corrente máxima de 1 mA usando um resistor R na entrada, acoplado a seguir com um circuito conversor de corrente para frequência (multivibrador astável) cuja frequência é controlada por uma capacitância externa e um estágio de saída para formatar o sinal de frequência gerado.

Na figura abaixo verificamos um forma de transmitir um sinal analógico em distâncias longas usando dois fios.

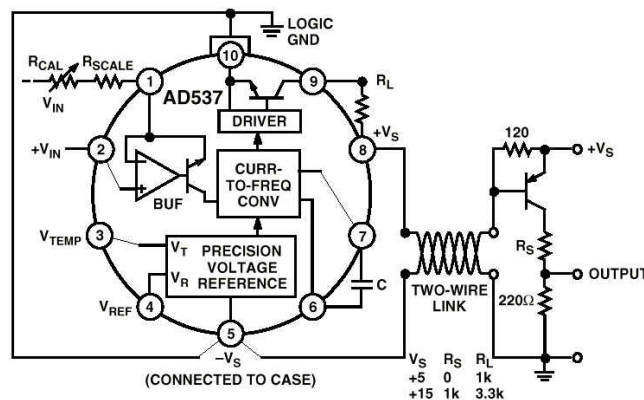


Figura 129 Conversor Tensão/frequência

7.6.5. Conversor frequência/Tensão

O conversor Frequência/Tensão realiza a função inversa regenerando uma tensão elétrica na sua saída para uma certa frequência na entrada. Na figura abaixo temos o diagrama de um circuito típico usado para esta função. Cada vez que o sinal de entrada cruza o nível de comparação o circuito mono-estável é excitado e chaveia uma fonte de corrente de 1 mA para a entrada de um circuito integrador pelo tempo determinado por C1. Na medida que a frequência aumenta a quantidade de carga injetada em C2 aumenta proporcionalmente, a tensão de saída é estabilizada e ajustado o ganho com os resistores R1 e R3.

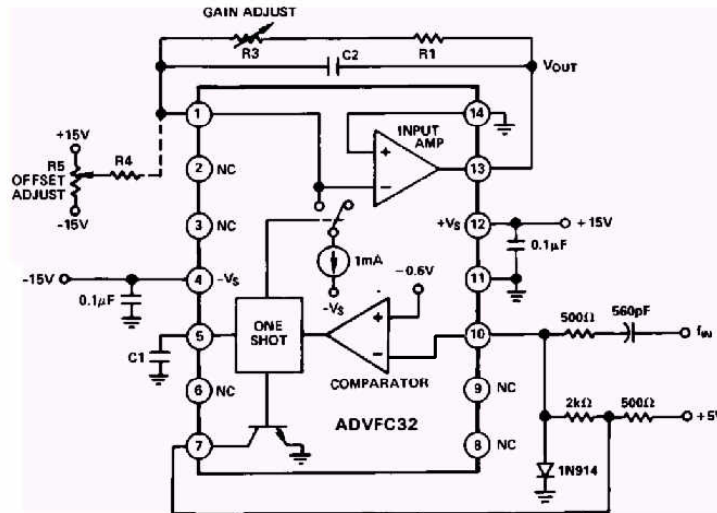


Figura 130 Conversor Frequência/tensão

7.7. Filtros Analógicos

Em instrumentação é usual filtrar os sinais analógicos, com o objetivo de limitar sua banda ou retirar do sinal ruídos e outros sinais indesejáveis. Os filtros são implementados com o auxílio de circuitos RC, RL ou RCL. Também são usados circuitos ativos que melhoram as características de filtragem, usando somente circuitos RC e amplificadores operacionais.

7.7.1. Filtro Passa Baixa

É um circuito que permite a passagem de sinais com frequências abaixo de uma certa frequência (f_0), e atenua os sinais com frequências superiores a esta, como mostrado no diagrama abaixo.

O circuito mostrado na figura apresenta uma característica de segunda ordem e neste caso $R1=R2=R3=R$, utilizando $C1=C2=C=1/\omega_0 R$, com $\omega_0 =$ frequência de corte do circuito.

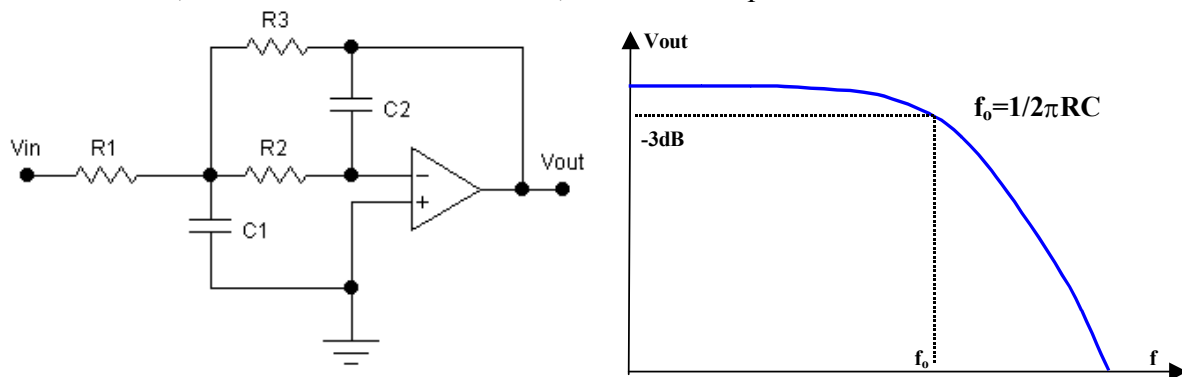


Figura 131 Filtro Passa Baixa

7.7.2. Filtro Passa Alta

É um circuito que permite a passagem de sinais com frequências acima de uma certa frequência (f_o), e atenua os sinais com frequências inferiores a esta, como mostrado no diagrama abaixo.

O circuito mostrado na figura apresenta uma característica de segunda ordem e neste caso $C1=C2=C3=C$, utilizando $R1=R2=R=1/\omega_o C$, com ω_o = frequência de corte do circuito.

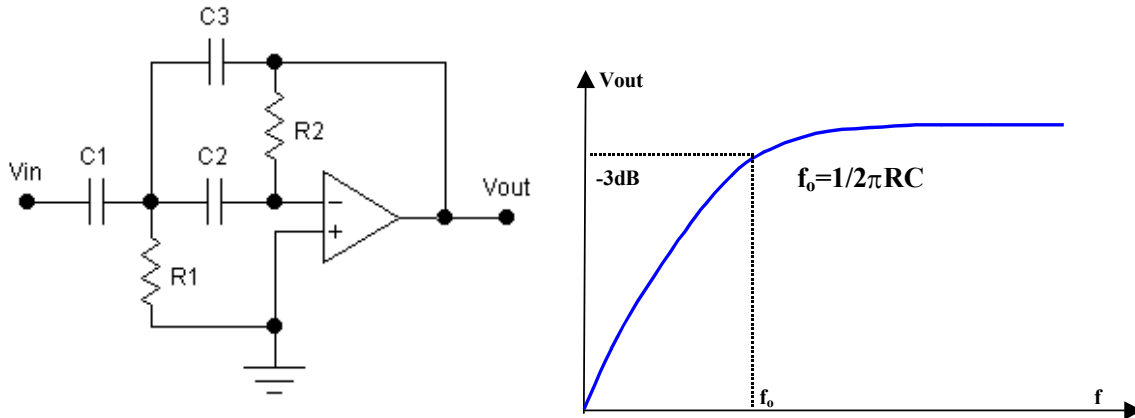


Figura 132 Filtro Passa Alto

Combinando circuitos passa baixa e passa alta é possível implementar filtro passa banda (um passa baixa em serie com um passa alta, com $f_{cpb} > f_{cpa}$) ou corta banda (um passa baixa em paralelo com um passa alta e suas saídas num somador com $f_{cpa} > f_{cpb}$).

7.8. Geradores de Sinal

Os circuitos geradores de sinal são necessários para trabalhar com sensores modulados ou para fornecer sinais de referência, os sinais mais usados em instrumentação são:

- Ondas senoidais,
- Ondas quadradas,
- Pulsos periódicos

Apresentamos alguns circuitos para geração destes sinais.

7.8.1. Onda Senoidal (Ponte de Wien)

Os geradores de forma de onda senoidal são implementados usando realimentação através de um circuito dependente da frequência (circuito RC) que produz um diferença de fase nula numa certa frequência, nesta frequência o sinal é atenuado, então este sinal deve ser amplificado para manter a oscilação e ainda pode-se adicionar um circuito para manter a amplitude da oscilação estável.

No circuito abaixo apresenta-se um circuito que controla a frequência de operação, a frequência central deste circuito é definido pelo resistor R1 e capacitores C1 e modificada pelo resistor R2, o resistor Ro tem como objetivo ajustar o ganho do sistema para manter a oscilação.

A frequência central deste circuito está dado por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi R_1 C_1 \sqrt{\alpha}}$$

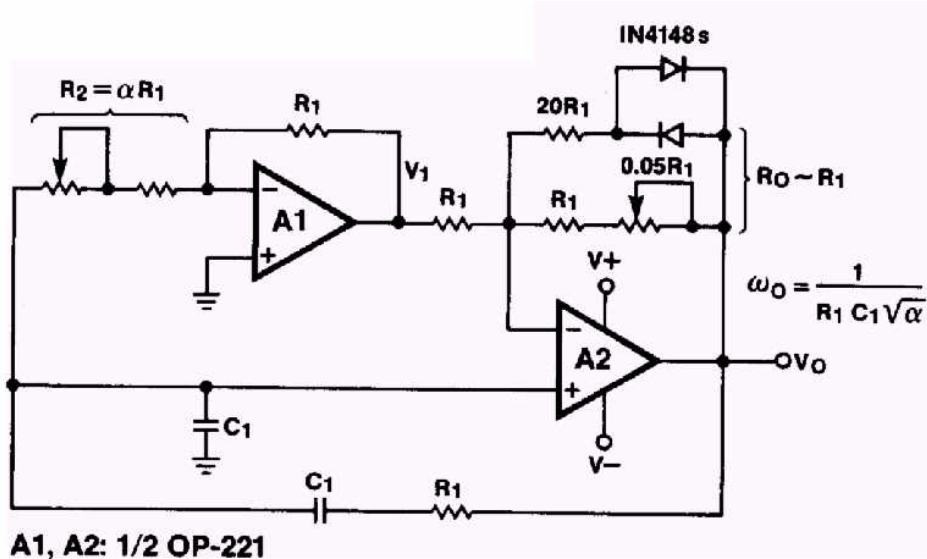


Figura 133 Gerador de onda senoidal

7.8.2. Onda quadrada (555)

Uma forma de onda muito usada em Instrumentação eletrônica é a onda quadrada, gerada muito facilmente por um circuito de temporização muito popular em eletrônica, o 555. Este dispositivo consiste de dois comparadores de tensão, um Flip Flop, um transistor de descarga e um circuito divisor de tensão que define os níveis de comparação do comparador. Este dispositivo apresenta três modos de operação:

- mono-estável
- Astável (oscilador)
- Retardo de tempo

No modo astável o 555 utiliza-se dois resistores externos para definir os tempos de carga e descarga de um capacitor externo, gerando formas de onda no capacitor e a saída do circuito como mostrado na figura abaixo.

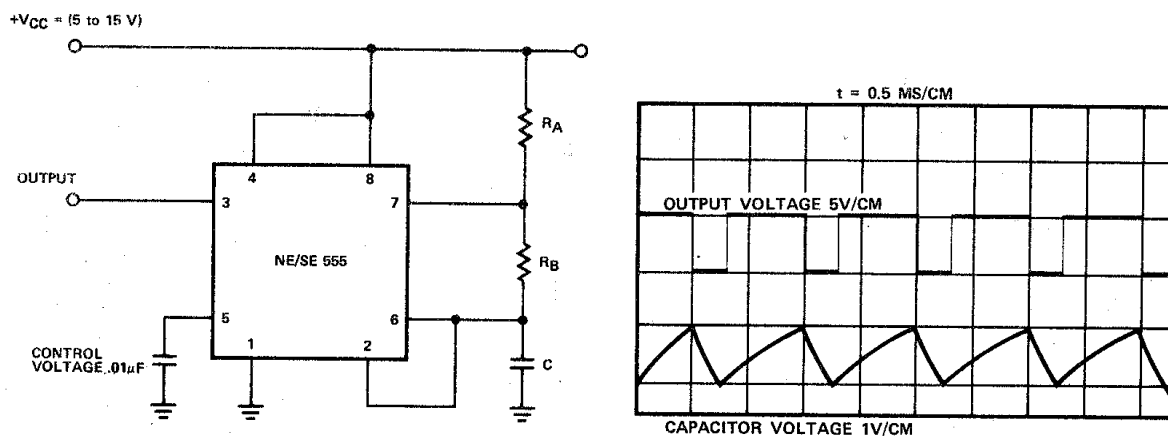


Figura 134 O 555 como gerador de onda quadrada

Neste caso a frequência de oscilação está dada por:

$$f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C}$$

No gráfico abaixo apresentam-se os valores dos parâmetros necessários para gerar ondas quadradas de 0,1 Hz até 100 KHz.

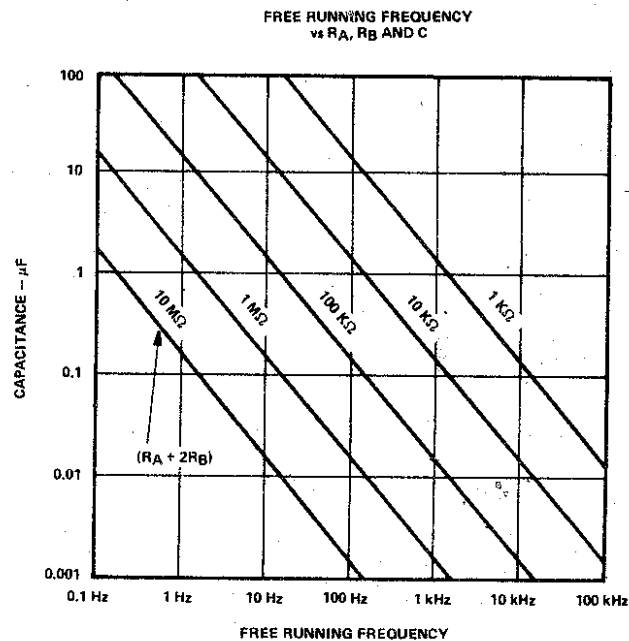


Figura 135 Gráfico para cálculo de parâmetros no 555

7.9. Circuitos de linearização

Linearização se faz necessária quando a saída de um transdutor não é linear, para realizar esta linearização existem três técnicas principais:

- Modificação de parâmetros do transdutor
- Modificação do sinal gerador pelo transdutor em Hardware
- Modificação do sinal gerador pelo transdutor por Software

Um exemplo de modificação de parâmetros do transdutor é o exemplo de linearização de um termistor apresentado anteriormente.

- A seguir apresentamos métodos de modificação do sinal gerador pelo transdutor em Hardware

7.9.1. Linearização usando um conversor logarítmico

Muitos transdutores fornecem sinais em tensão V_m com a seguinte forma:

$$V_m = V_o \cdot e^m$$

A utilização de um conversor logarítmico permite a obtenção de um sinal proporcional ao logaritmo do sinal de entrada em relação a um sinal de referência V_{ref} .

Nesse caso

$$V_s = -k \cdot \log\left(\frac{V_m}{V_{ref}}\right)$$

Fazendo $V_{ref} = V_o$ obtém-se

$$V_s = -k \cdot m$$



Figura 136 Conversor Logarítmico

7.9.2. Linearização usando um multiplicador analógico

Um multiplicador analógico é um dispositivo que fornece uma saída em tensão igual ao produto de duas entradas em tensão multiplicado por uma constante de escalonamento. Considere o exemplo da saída de uma ponte de Wheatstone com um elemento transdutor cuja resistência varia com um certo parâmetro físico, a saída da ponte é:

$$V_m = \frac{V_p}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}}$$

Esta não é uma saída linear para ΔR grandes. Na figura abaixo a saída do somador pode ser escrita assim:

$$V_o = b \cdot \frac{V_m V_s}{k} + a \cdot V_m$$

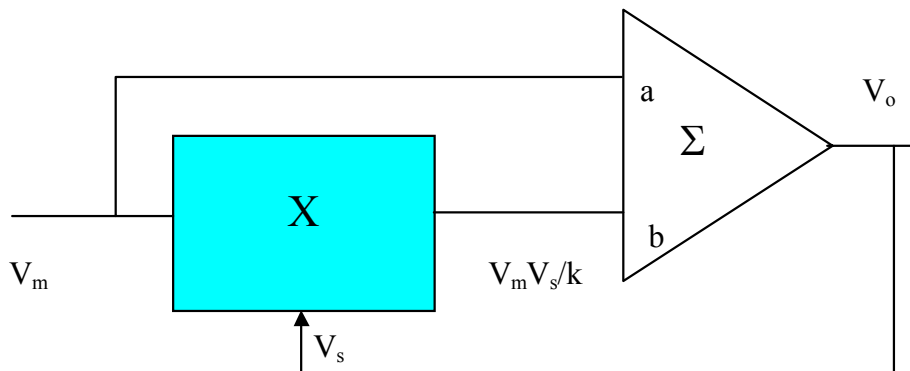


Figura 137 Método de linearização usando multiplicador analógico

Substituindo e simplificando Obtém-se :

$$V_o = a \cdot \frac{V_p}{4} \frac{\Delta R}{R} \cdot \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta R}{2R}\right) \cdot \left(1 - \frac{b \cdot V_p}{4k}\right)} \right]$$

Fazendo :

$$b = \frac{4k}{V_p}$$

a saída fica:

$$V_o = a \cdot \frac{V_p}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

7.10. Outros elementos para processamento analógico de sinais

Existem muitos circuitos que podem ser usados em conjunto para obter um circuito complexo de processamento analógico de sinais, a seguir apresentamos alguns outros elementos que são bastante usados.

7.10.1. Somadores

Muitas vezes é necessário somar aritmeticamente sinais analógicos, o circuito abaixo cumpre esta função, dando a cada entrada um peso diferente. A saída do circuito é :

$$E_o = -R_f \left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} \right)$$

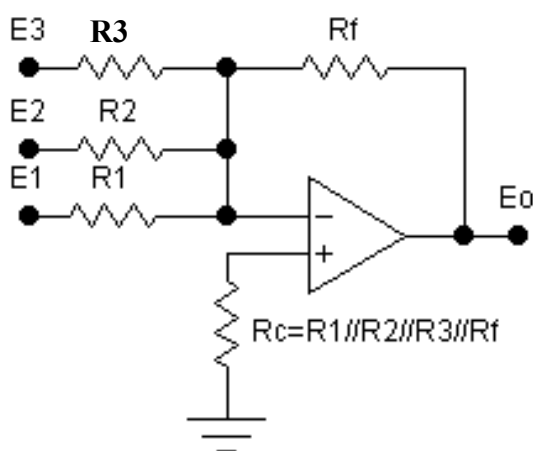


Figura 138 Circuito Somador Inversor

7.11. Técnicas de redução de ruído em instrumentação

Como foi mostrado anteriormente os maiores problemas em instrumentação são ruído e interferência eletromagnética, assim existem para solucionar este problema devem ser seguidas os seguintes passos:

- Identificar a fonte de ruído,
- Determinar o canal pelo qual o ruído se acopla com o instrumento em questão,
- Determinar o circuito que é susceptível à interferência.

7.11.1. Tipos de acoplamento

Existem duas formas principais de acoplamento de ruído em circuitos eletrônicos:

- Capacitivo
- Indutivo

7.11.1.1. Acoplamento capacitivo

Um exemplo simples de acoplamento capacitivo é o circuito da figura a seguir que consta de dois condutores elétricos a uma pequena distância um do outro.

O condutor 1 é considerado neste caso a fonte de ruído e o condutor 2 o circuito afetado pelo ruído, C_{12} , C_{1G} , C_{2G} são capacitâncias parasitas. A tensão de ruído produzida no condutor 2 pela tensão em V_1 é:

$$V_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Rs \cdot (C_{12} + C_{2G})}} \cdot V_1$$

com $s = j\omega$, esta tensão depende da frequência do sinal no condutor 1.

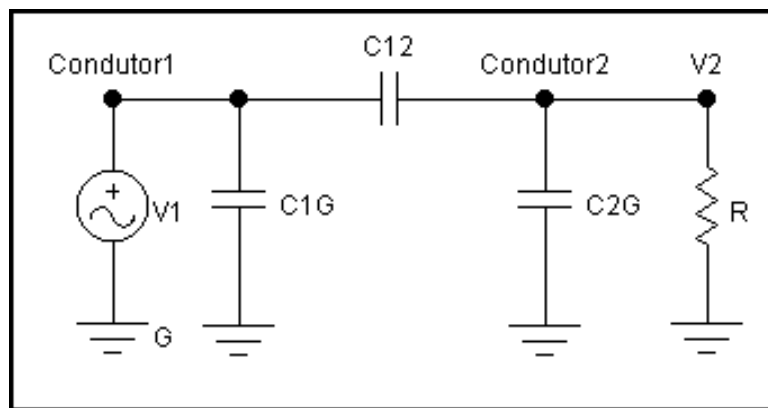


Figura 139 Exemplo de acoplamento capacitivo

7.11.1.2. Acoplamento indutivo

Uma densidade de fluxo magnético B que varia senoidalmente com o tempo, induz uma tensão V_2 numa malha fechada de área A , assim:

$$V_2 = sBA \cos(\theta)$$

Considere o circuito da figura abaixo. Caso o campo magnético tenha sido gerado por uma corrente I_1 num condutor separado, a equação anterior pode ser expressa assim:

$$V_2 = sMI_1$$

sendo V_2 a tensão de ruído induzida no condutor 2 pela corrente que circula no condutor 1.

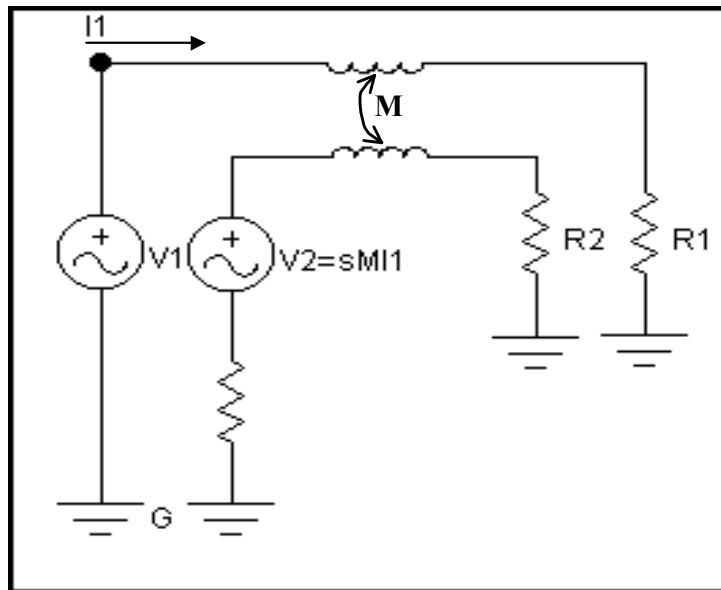


Figura 140 Acoplamento Indutivo

Para reduzir este acoplamento devem-se adotar as seguintes precauções:

- O condutor 2 deve ser separado do condutor 1
- A densidade do campo magnético B corta a área de interação num ângulo θ , o coseno desse ângulo pode ser reduzido pela orientação do condutor afetado
- A área do circuito de recepção deve ser minimizada, colocando o condutor 2 perto de um plano de terra
- A utilização de pares trançados pode cancelar as tensões induzidas

7.11.2. Conexões de aterramento

Os circuitos eletrônicos devem ser interligados com o terra para fechar os circuitos elétricos, se isto não é realizado com critério teremos problemas de interferência entre os diversos circuitos acoplados que podem ter natureza diferente (Ex. Circuitos analógicos misturados com circuitos digitais). Nos diagramas abaixo verificam-se duas formas de interligar os terras sendo esta primeira maneira incorreta já que pode produzir uma tensão de ruído elevada.

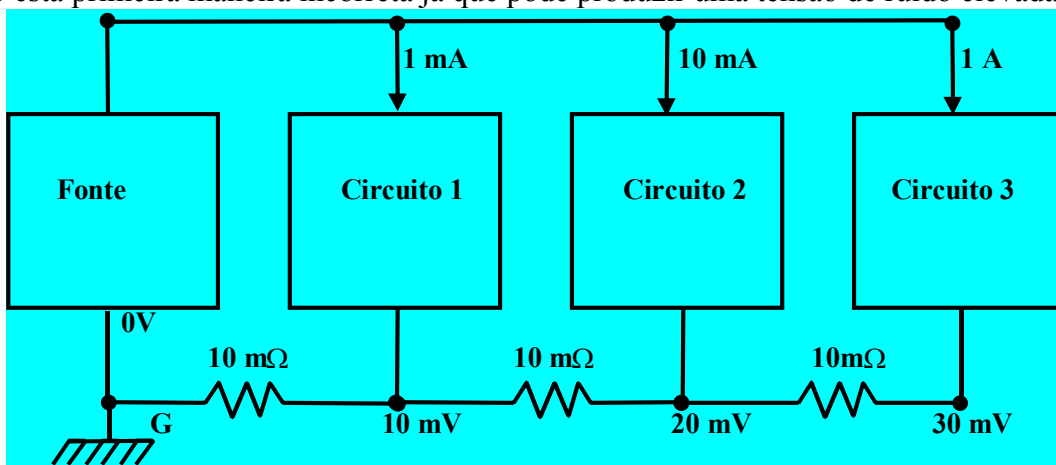


Figura 141 Conexão do aterramento em cascata

Comparando os dois esquemas verificamos que aquele que interliga todos os circuitos num terra só, não misturando as correntes dos diversos circuitos é o mais adequado desde o ponto de vista de interferência.

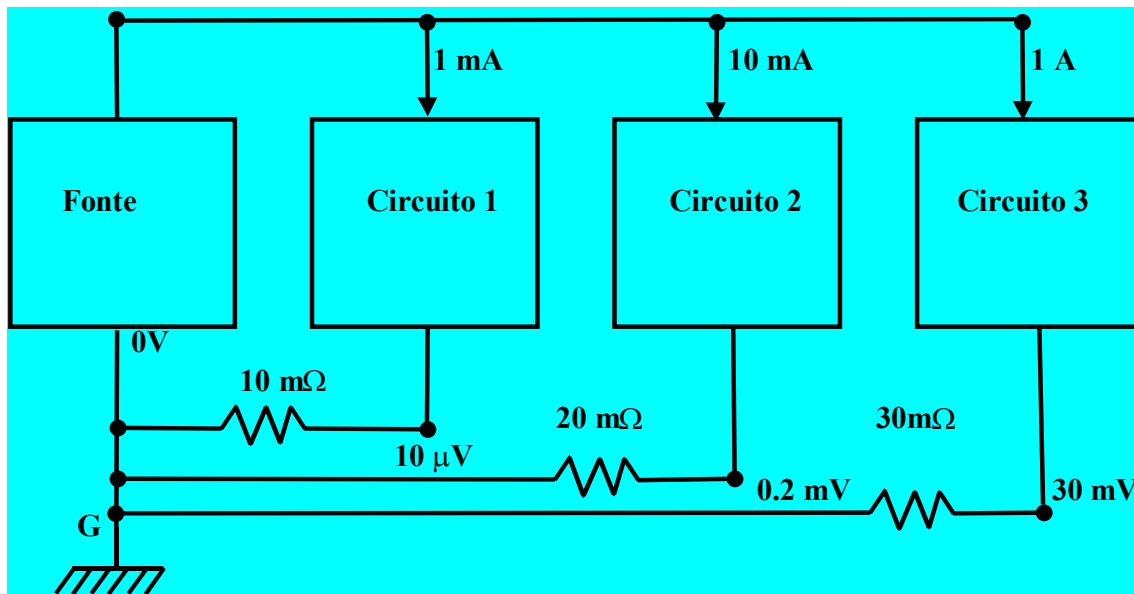


Figura 142 Conexão de aterramento com terra único

7.11.3. Conexão de cabos Blindados

Considere o circuito de um amplificador interligado por um cabo com blindagem. O circuito consiste numa fonte flutuante ligada a um amplificador com um dos seus terminais aterrado. Existem diversas formas de aterramento (A-D) para tentar evitar ruídos, estas apresentam as seguintes características:

- Conexão A: A conexão de um dos terminais da fonte flutuante à blindagem, permitindo o fluxo de corrente e produzindo um sinal de ruído em série com o sinal V_s
- Conexão B: Neste caso C_1 e C_2 formam um divisor de tensão capacitivo, supondo $V_s = 0$ a tensão gerada na entrada do amplificador é:

$$V_{in} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (V_{G1} + V_{G2})$$

- Conexão C: Nesta situação supondo $V_s = 0$, obtém-se uma $V_{in} = 0$, tornando esta conexão satisfatória.
- Conexão D: Neste caso para $V_s = 0$ o esquema produz uma tensão:

$$V_{in} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (V_{G1})$$

Concluindo, para uma boa conexão da blindagem é necessário conectar um dos terminais do amplificador na blindagem.

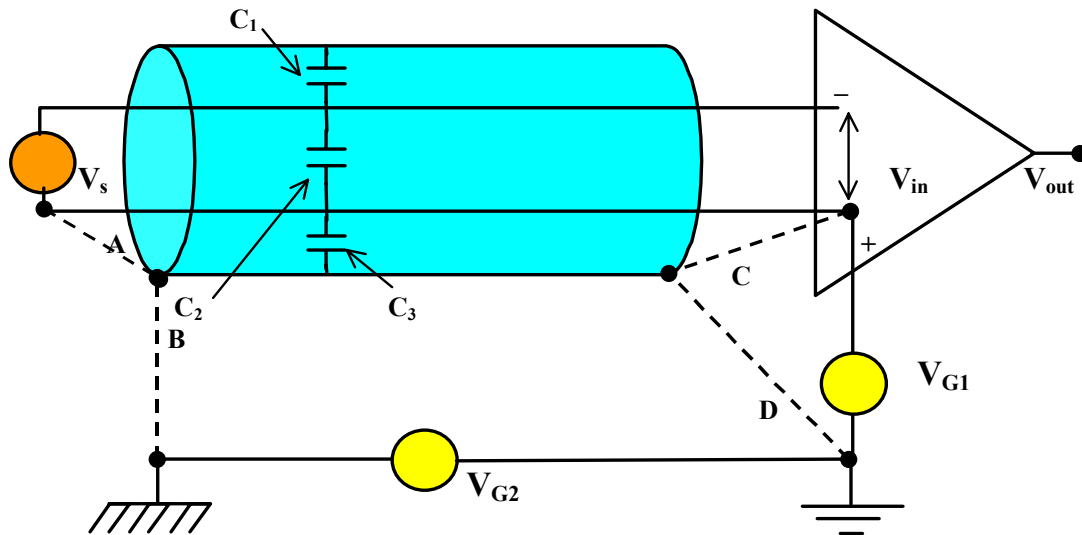


Figura 143 Ligação da blindagem para sinal flutuante e amplificador aterrado

No caso de onde o sinal de entrada é aterrado ligado a um amplificador diferencial, a melhor ligação é a mostrada na figura abaixo.

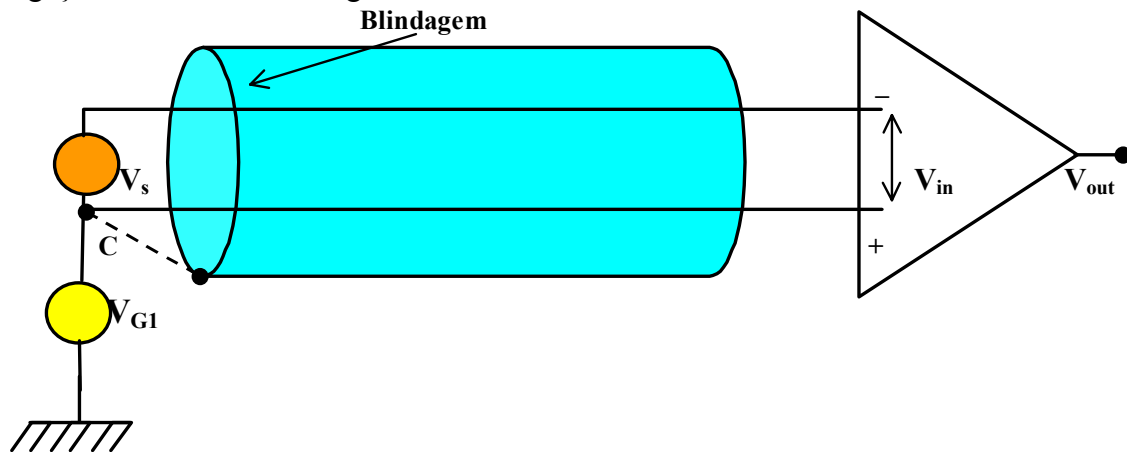


Figura 144 Ligação de blindagem para sinal aterrado e amplificador diferencial

8. Circuitos digitais para aquisição de dados e controle em instrumentação

O objetivo primordial da conversão de sinais (de ou para sinais elétricos) realizada pelos transdutores, é o de transferir informação para um computador digital, que trabalha com informações binárias ("0" ou "baixo" e "1" ou "Alto").

A revolução do processamento de informação digital se baseia principalmente nos seguintes aspectos:

- Eficiência de processamento
- Eficiência de transmissão num canal de informação
- Imunidade ao ruído
- Facilidade de armazenamento
- Facilidade de armazenamento de uma massa muito grande de informações

Seguir apresentamos alguns elementos muito usados para realizar esta função de transferência de sinais elétricos analógicos em sinais elétricos digitais

8.1. Contadores

São dispositivos que contam eventos representados por níveis de que variam ou pulsos, o contador deve-se lembrar o número em que se encontra e pode contar incrementando ou decrementando o resultado, como mostrado no diagrama de blocos de um contador "up-down" tipo paralelo.

Neste contador os pulsos de entrada entram na porta "clock" e pode contar usando código binário ou decimal, incrementar ou decrementar, dependendo dos sinais "binary/decade" e "up/down" respectivamente. Este tipo de contador permite ainda o chamado "Preset" isto é começar a contagem com uma condição inicial.

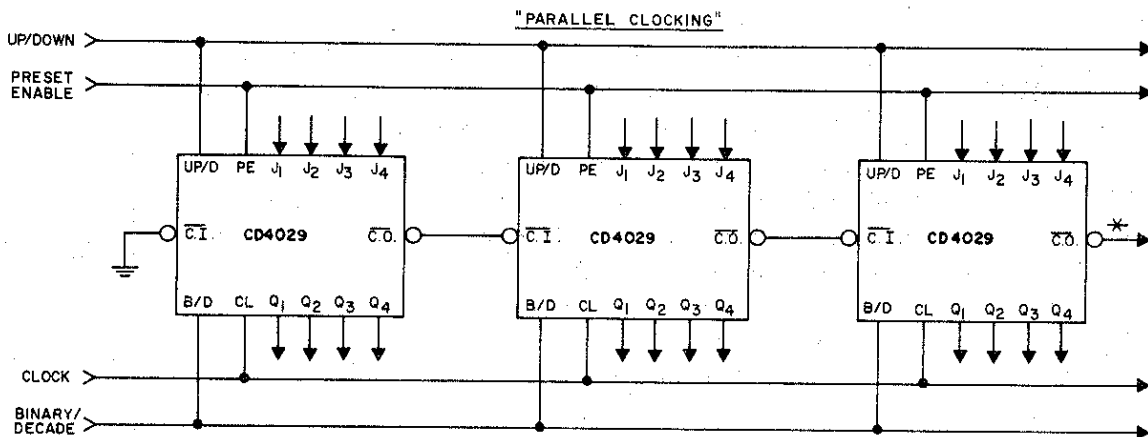


Figura 145 Diagrama de blocos de contador "Up-Down"

Cada dígito é representado por 4 bits (de forma binária ou decimal), na carta de tempos a seguir verifica-se a contagem (no primeiro estágio do contador apresentado acima) quando o dispositivo está habilitado para contagem decimal.

Pode-se ver a contagem até 10 quando o sinal de "vai um" ou "carry" é ativado, nesse instante o circuito recebe o comando de "down" então começa uma contagem reversa e continua contando até chegar em zero, quando um novo sinal de "carry" é gerado e então é ativado o estágio seguinte.

Um pulso depois é acionado o sinal de "preset" que carrega o número 6 permitindo introduzir uma condição inicial.

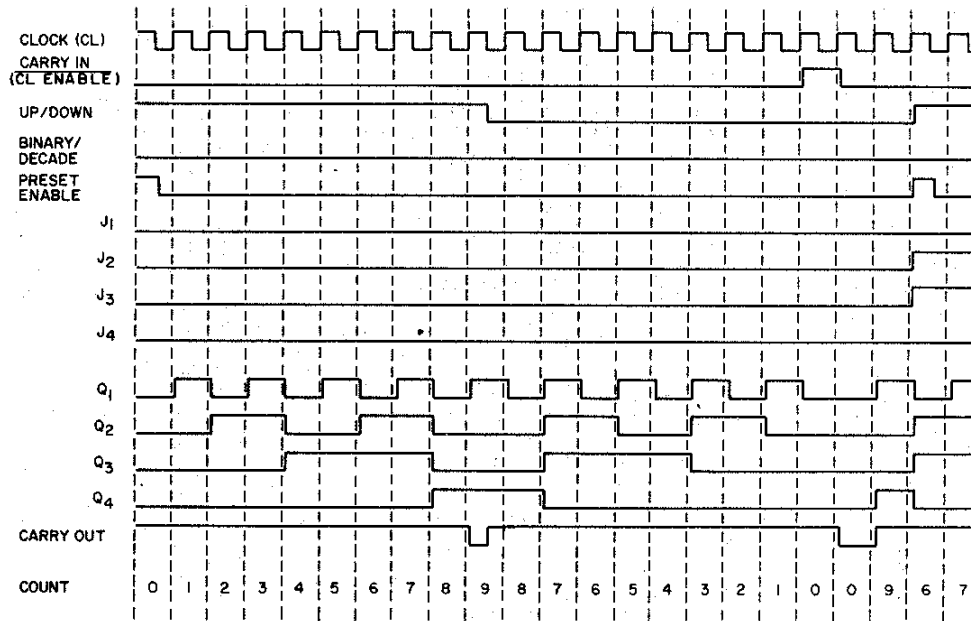


Figura 146 Carta de tempos para contador "Up-Down"

8.2. Portas de E/S digitais

As portas digitais permitem a entrada e saída de informações digitais, com estas entradas podem ser introduzidas informações binárias ou pulsos diretamente a um sistema de aquisição de dados ou podem ser transferidos sinais de controle gerados externamente. Com as saídas podem ser exercidas funções de controle ou comando no sistema de medida. Estes elementos podem permitir fluxo de informação de forma bidirecional como mostrado na figura.

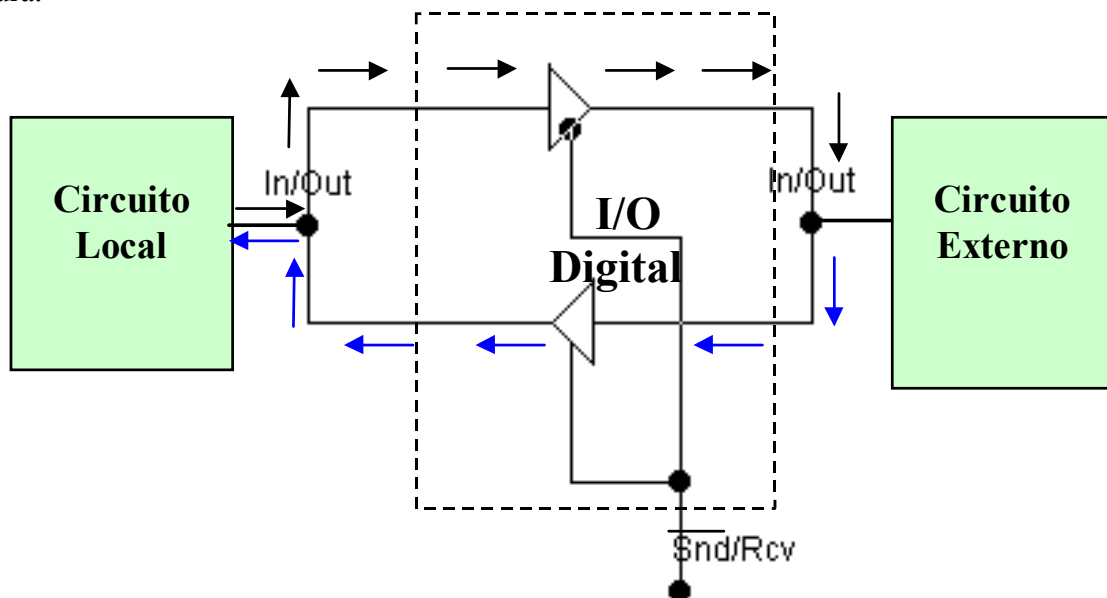


Figura 147 Porta de I/O digital bidirecional.

8.3. Comparadores e chaves analógicas

8.3.1. Comparadores

Um circuito comparador tem como objetivo gerar um sinal digital de acordo com uma condição em suas entradas, este apresenta o seguinte comportamento:

$$V_{out} = "1" \text{ Lógico_quando_} \Delta V > 0 \text{ e } V_{out} = "0" \text{ Lógico_quando_} \Delta V < 0$$

sendo $\Delta V = V_+ - V_-$

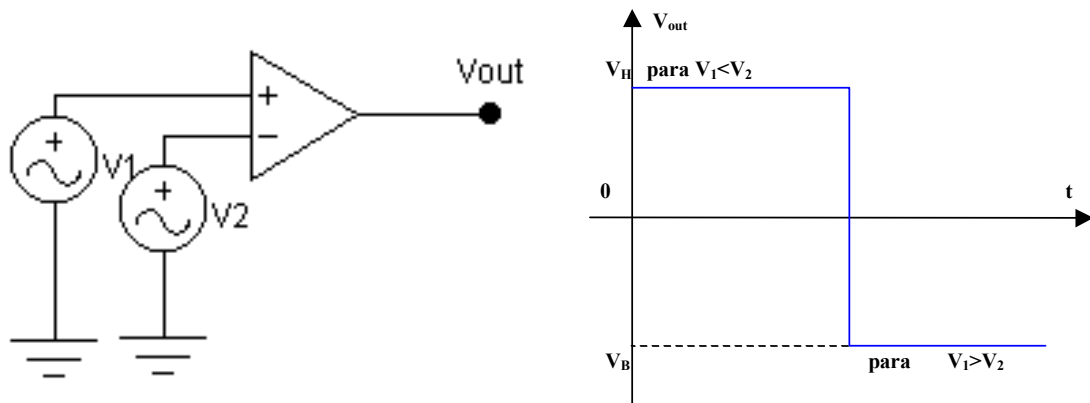


Figura 148 Circuito Comparador

Um exemplo de utilização é a monitoração de uma janela de tensão, como pode mostra a figura a seguir. Neste caso a saída é "1" Lógico para $E1 < Ei < E2$ e "0" Lógico para qualquer outra situação

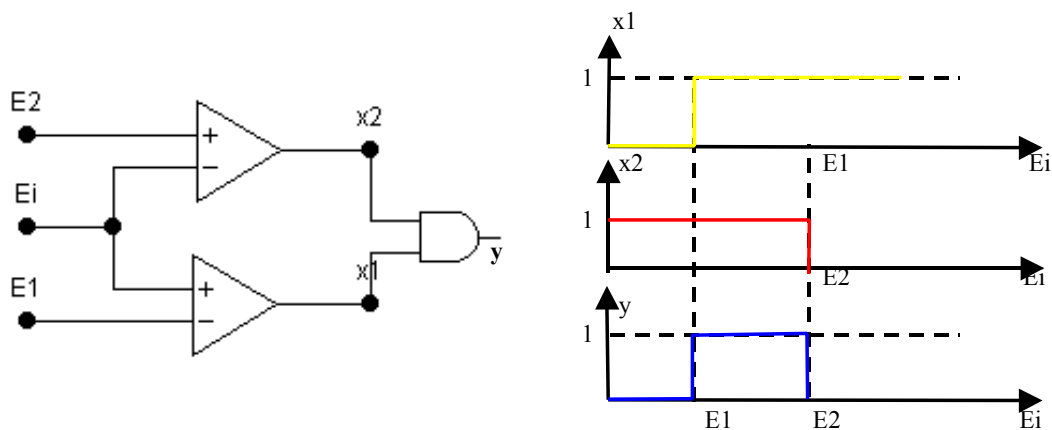


Figura 149 Comparador de Janela.

8.3.2. Chaves analógicas

Um dos elementos de controle mais comuns em eletrônica são as chaves, sendo muito populares as chaves eletromecânicas. Estes elementos permitem o chaveamento de sinais originadas pelos transdutores, através dos dispositivos Multiplexadores analógicos. As técnicas de eletrônica tem permitido a realização destas chaves, adequadas para chavear sinais analógicos, que apresentam o seguinte comportamento:

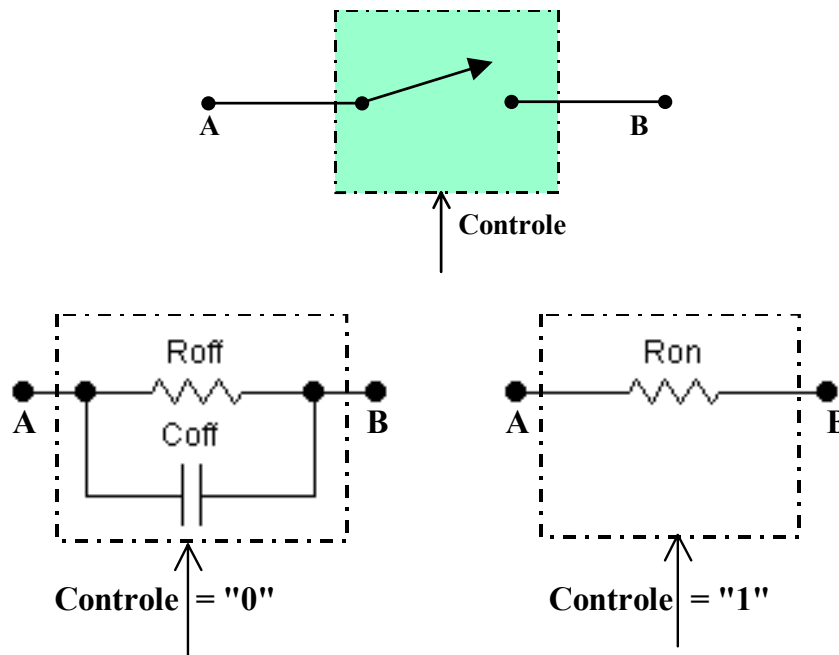
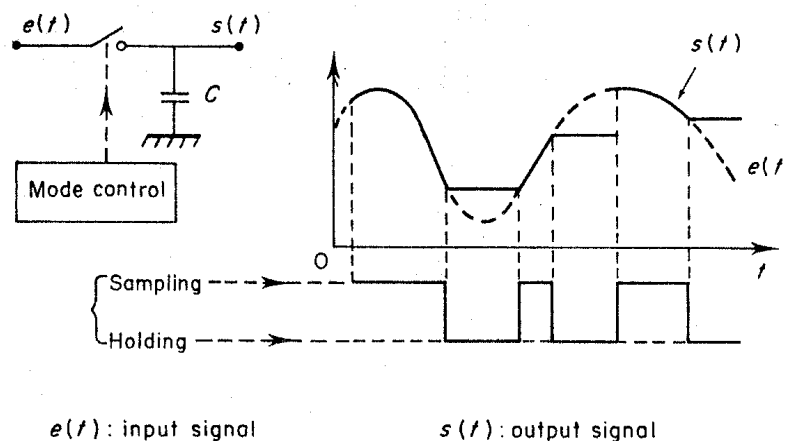


Figura 150 Símbolo e modelo de uma chave analógica

Este dispositivo apresenta duas entradas / saídas A e B e um sinal de controle. Quando o sinal de controle é "0" lógico (um nível de tensão baixo) a chave apresenta uma resistência R_{off} e uma Capacitância C_{off} entre os terminais A-B, esta resistência é de um valor elevado (da ordem de $10^8 \Omega$) e uma capacitância de acoplamento muito baixa (da ordem de 10^{-10} F). Quando o sinal de controle é "1" lógico (um nível de tensão alto) a chave apresenta uma resistência R_{on} entre os terminais A-B, esta resistência é de um valor muito baixo (da ordem de $10^{-2} \Omega$), assim este dispositivo chaveia sinais analógicos dentro de certos limites de tensão. Em geral são usados transistores de efeito de campo (JFET, MOSFET ou CMOSFET) para implementar estas chave

8.4. Circuitos Sample/Hold

O circuito Sample/Hold tem como objetivo "congelar" um sinal analógico para ser aplicado depois num circuito conversor A/D, com isto se evita que durante a conversão A/D o sinal esteja variando. Este circuito configura-se como uma chave analógica seguida de um capacitor



$e(t)$: input signal $s(t)$: output signal

Figura 151 Circuito "Sample/Hold"

O sinal $e(t)$ é aplicado na entrada e gerado um sinal $s(t)$ na saída como mostrado na figura acima, dependendo da posição da chave analógica, assim, quando a chave está fechada o sinal de saída segue o sinal de entrada "Sample", mas, quando a chave está aberta a saída mantém o ultimo sinal fixo "Hold".

Uma forma prática de implementar um circuito Sample/Hold está mostrada na figura abaixo, usando uma configuração com realimentação que aumenta a rapidez e precisão do dispositivo e elimina problemas de "offset" e efeitos de modo comum.

Quando a chave está fechada a saída do primeiro amplificador, que possui ganho em malha aberta A é

$$V_{o1} = A \cdot (V_o - V_{in})$$

Então a saída será :

$$V_{o1} = \frac{A}{A-1} \cdot (V_{in})$$

Como o ganho do amplificador é muito elevado temos que:

$$V_{o1} = V_o = (V_{in})$$

Quando a chave está aberta o amplificador de entrada tenta entrar em saturação devido ao seu ganho então um dos diodos entra em funcionamento, controlando a situação.

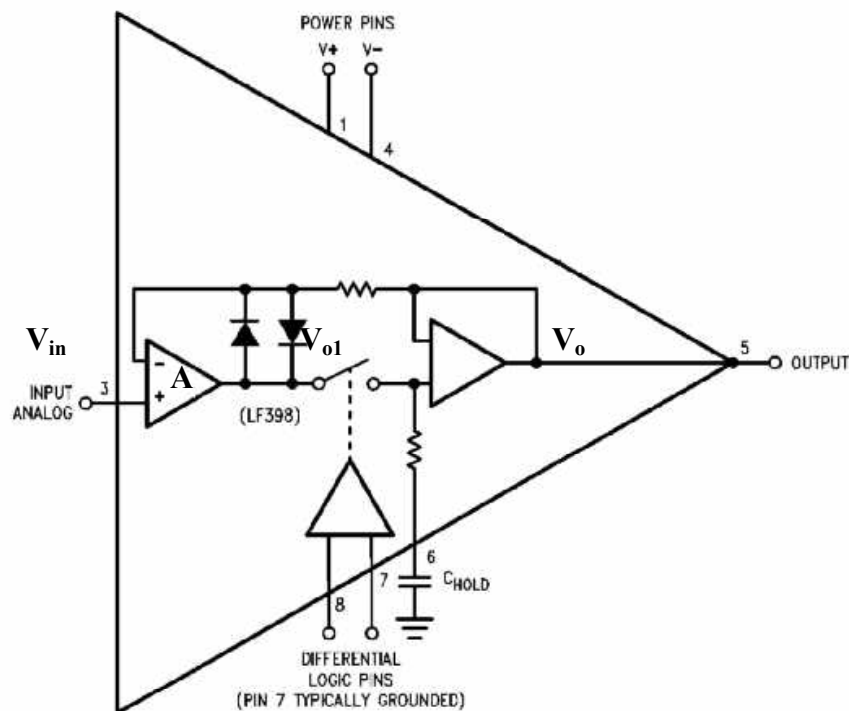


Figura 152 "Sample/Hold" típico

8.5. Multiplexadores Analógicos

Um multiplexador analógico está composto de várias chaves analógicas e um amplificador cassador de impedâncias, quando alguma das chaves é fechada o sinal analógico correspondente presente na entrada pode ser transmitido sem atenuação ou distorção As chaves são fechadas sequencialmente (sequência controlada por um circuito digital associado ao dispositivo), podendo conectar sinais analógicos de diversas fontes a uma saída só.

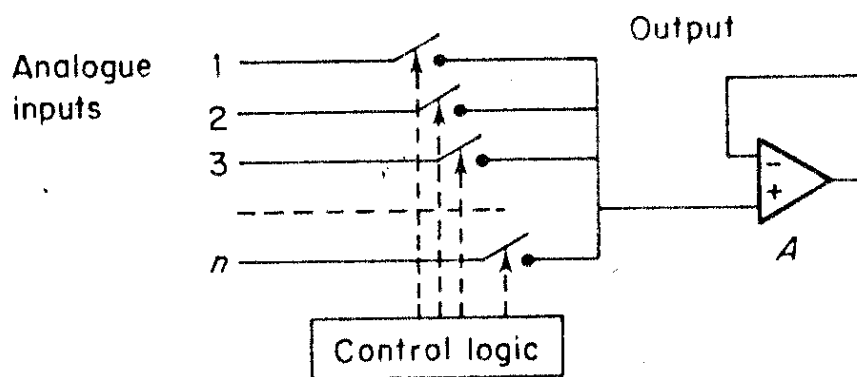


Figura 153 Multiplexador analógico

Quando o sinal é flutuante ou diferencial e o amplificador da saída é diferencial, este esquema pode ser duplicado para chavear sinais diferenciais.

Os multiplexadores analógicos são usualmente associados a dispositivos "Sample/Hold" para obter amostras de diversos canais analógicos de forma sequencial

8.6. Conversores D/A

Um conversor digital/analógico fornece um sinal analógico (em forma de tensão ou corrente) proporcional a um sinal digital na sua entrada.

Em geral estes circuitos utilizam referências de tensão aplicadas a redes resistivas interligadas por um conjunto de chaves analógicas que são comandadas pela informação digital.

8.6.1. Conversor A/D com rede resistiva ponderada

Este circuito utiliza a configuração mostrada na figura abaixo (onde se apresenta um exemplo para um conversor de 8 bits), a rede resistiva é ponderada segundo a regra binária (2^n). As chaves analógicas quando fechadas (devido a ocorrência de um "1" lógico) permitem a passagem de uma corrente que se soma na saída, com as outras correntes geradas.

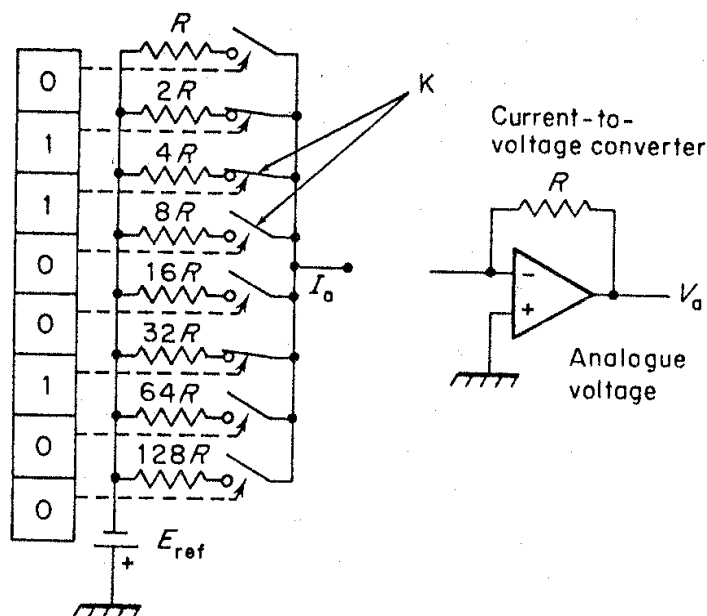


Figura 154 Conversor A/D com rede resistiva ponderada

O circuito fornece uma corrente de saída total, assim:

$$I_a = E_{ref} \cdot \left(\frac{Bit1}{R} + \frac{Bit2}{2R} + \dots + \frac{Bitn}{2^n R} \right)$$

Então se o $Bit_i = 0$ essa parcela não se soma ao valor final, se o $Bit_i = 1$ essa parcela se soma ao valor final.

Este sinal de corrente pode ser convertido num sinal de tensão usando-se circuitos de conversão de corrente /tensão.

8.6.2. Conversor D/A tipo rede R-2R

O ajuste de resistores proporcionais a potências de dois é na prática muito complicado, para tanto foram desenvolvidas redes resistivas com valores mais simples de realizar como as redes R-2R.

Na figura abaixo apresenta-se um conversor com rede R-2R (para o caso de 4 bits). As chaves analógicas usadas são chaves de duas posições ora ligam o resistor para a fonte de referência E_{ref} , ora para terra, gerando uma corrente na saída a qual pode ser convertida por sua vez numa tensão elétrica

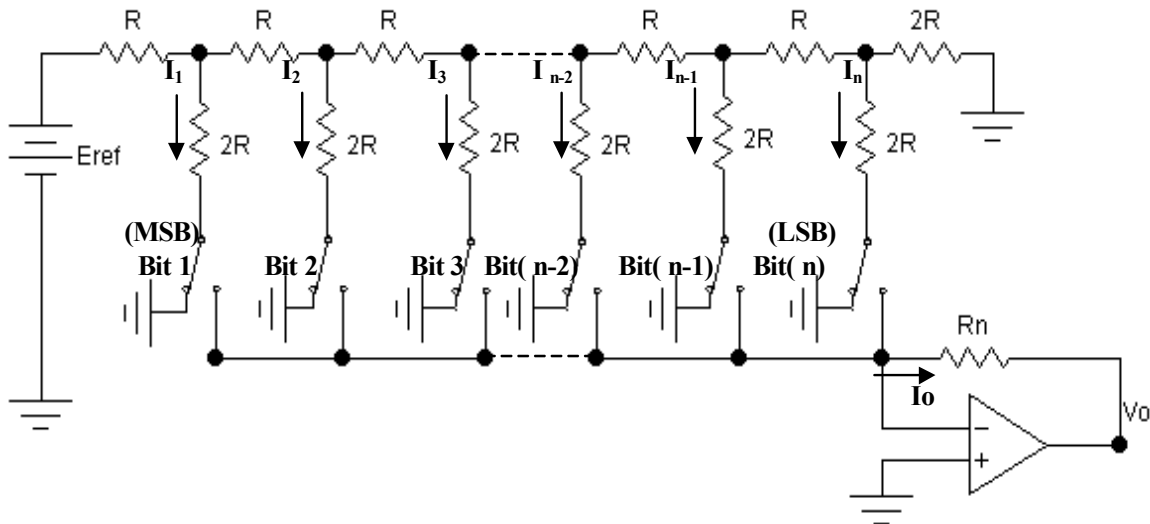


Figura 155 Conversor D/A tipo rede R-2R

Este circuito apresenta a uma saída em tensão assim:

$$V_o = - \frac{No \text{ Binário}}{2^n} \cdot E_{ref}$$

8.7. Conversores A/D

Os conversores analógico/digital (A/D) são dispositivos que convertem um sinal analógico num sinal digital equivalente. Existem diversos tipos de A/D's, a saber:

- Tipo Paralelo ou Flash
- Tipo aproximação sucessiva
- Tipo contagem de pulsos

8.7.1. Conversores A/D tipo Flash

Este método se constitui por de n comparadores de tensão que comparam um sinal de referência (diferente para cada um, gerado por um sinal E_{ref} e divisores de tensão) com o sinal

de entrada simultaneamente. A saída destes comparadores é aplicada a um circuito digital que toma uma decisão e codifica a informação e a disponibiliza na saída.

Na figura abaixo esta mostrada a implementação para um conversor de três bits. Oito números binários são obtidos a partir de 7 comparadores.

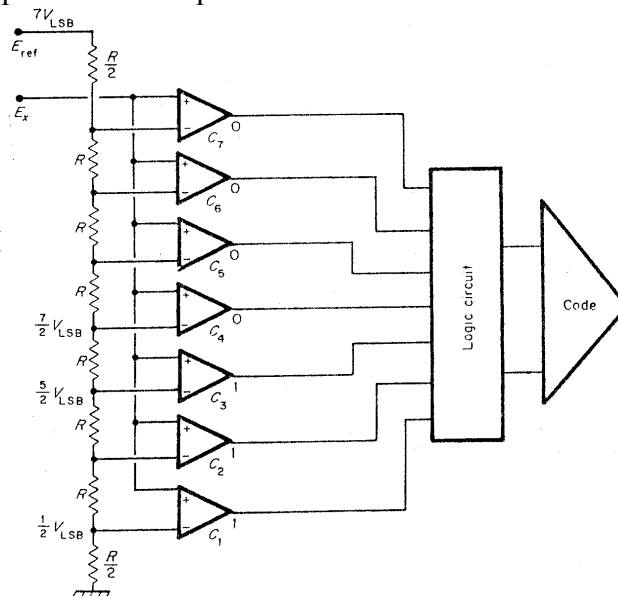


Figura 156 Conversor A/D tipo Flash

É evidente a vantagem deste tipo de conversor, já que sua velocidade depende somente do tempo de chaveamento dos comparadores e portas digitais.

Desafortunadamente o número de elementos cresce geometricamente com a resolução, assim para um conversor de n bits, serão necessários $2^n - 1$ comparadores

8.7.2. Conversor A/D por aproximações sucessivas

Este conversor é muito popular devido porque permite atingir resoluções de até (32 bits) de forma rápida (taxas de conversão de até 1 MHz) e este tempo é independente da tensão de entrada. O método de conversão consiste na geração de um sinal através de um conversor D/A o qual é comparado com o sinal de entrada. A entrada digital do conversor D/A é a saída do conversor A/D.

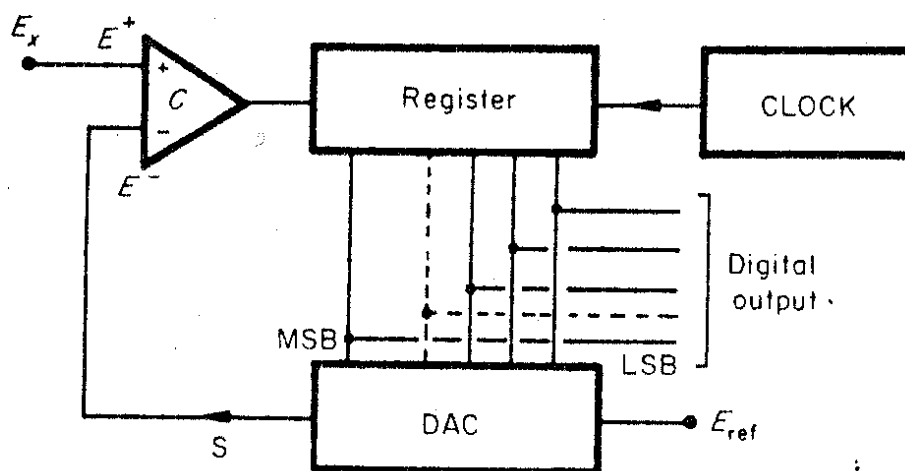


Figura 157 Conversor A/D por aproximações sucessivas

O processo de conversão (para o caso de um sistema A/D com três bits de resolução) apresenta três fases:

- Fase 1: O sinal E_x é comparado com o bit mais significativo (MSB) que corresponde a $E_{ref}/2$, se $E_x > E_{ref}/2$ então $B_1 = 1$, se não então $B_1 = 0$
- Fase 2: E_x é comparado agora com: $B_1 E_{ref}/2 + E_{ref}/4$ se $E_x > B_1 E_{ref}/2 + E_{ref}/4$ então $B_2 = 1$, se não então $B_2 = 0$
- Fase 3: E_x é comparado agora com: $B_1 E_{ref}/2 + B_2 E_{ref}/4 + E_{ref}/8$ se $E_x > B_1 E_{ref}/2 + B_2 E_{ref}/4 + E_{ref}/8$ então $B_3 = 1$, se não então $B_3 = 0$

No caso mostrado no diagrama abaixo a saída é: $E_x = E_{ref} \cdot \left(\frac{(101)_2}{2^3} \right)$

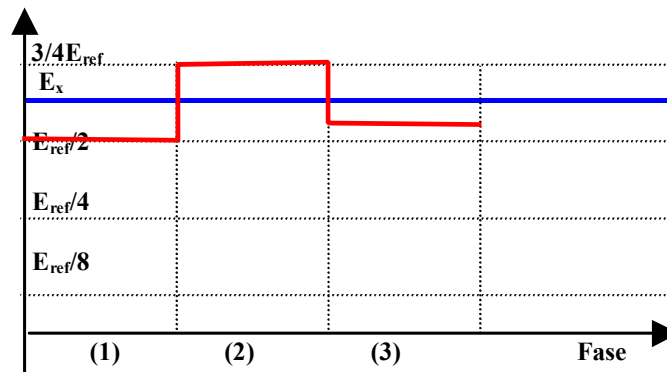


Figura 158 Conversão por aproximações sucessivas (caso para três bits)

8.8. Sistemas de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados são a forma de transferir informação do mundo analógico ao digital, assim eles constituem-se por um certo "Hardware" associado a um determinado "Software" tudo isto integrado num computador pessoal (PC). Na figura pode-se observar os diversos componentes de um sistema típico.

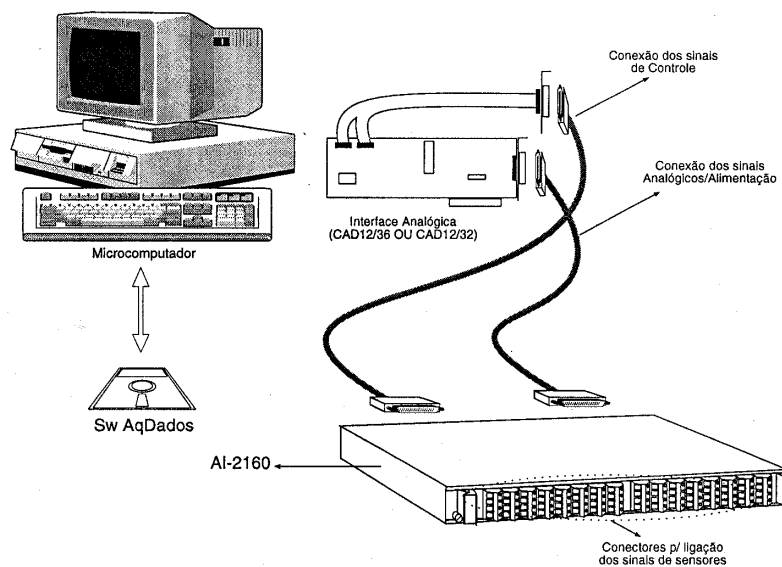


Figura 159 Sistema típico de aquisição de dados

O "Hardware" de um sistema de aquisição de dados apresenta tipicamente a estrutura mostrada abaixo.

É fácil observar que este sistema integra todos os circuitos apresentados anteriormente, desta forma entradas analógicas são aplicada a um multiplexador e depois a um circuito Sample/Hold, antes de entrar num conversor A/D.

Este sistema apresenta também entradas/saídas digitais, entradas para contadores de frequência e saídas D/A. O sistema inteiro possui um sistema digital de controle que permite a supervisão do computador PC.

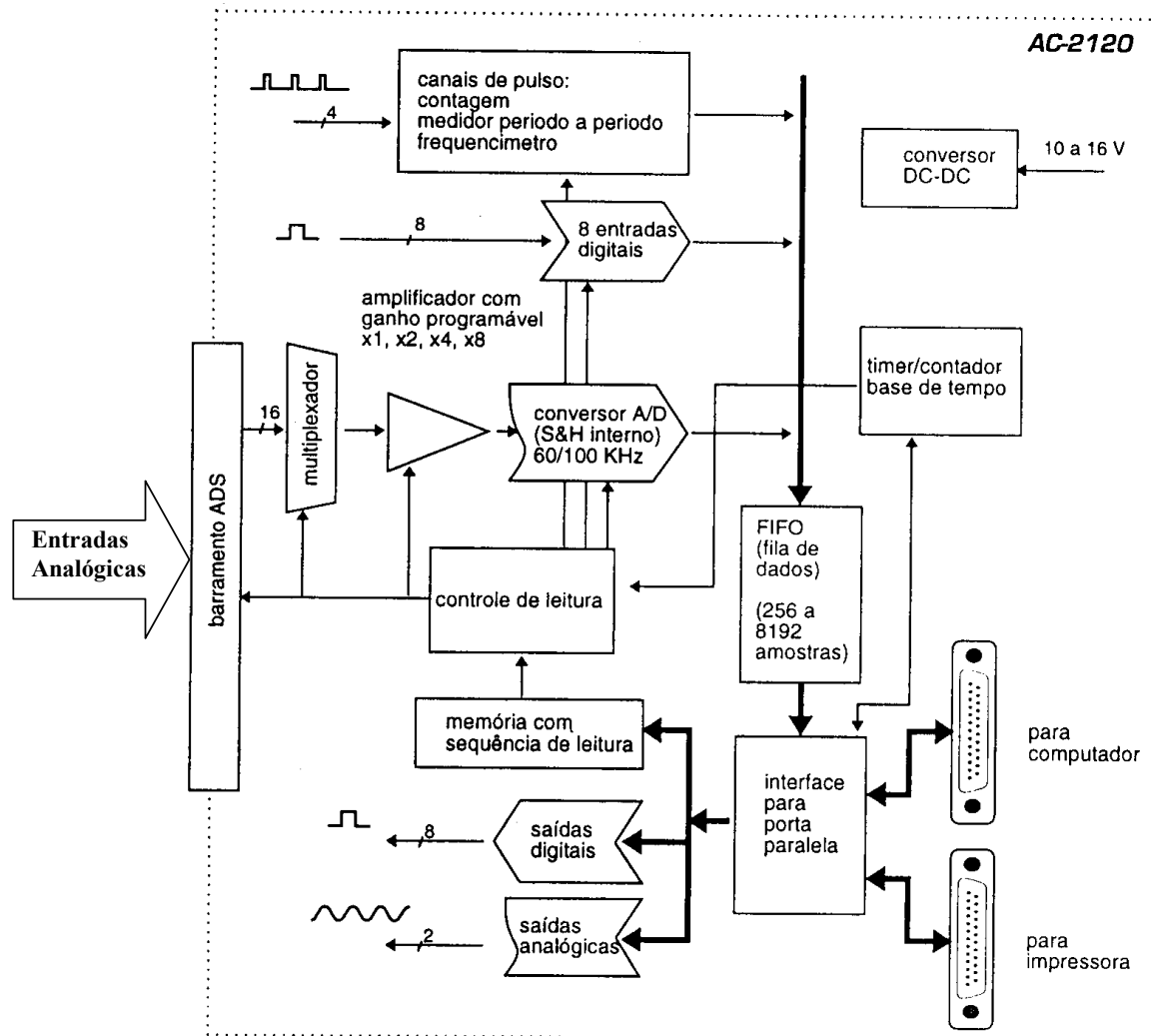


Figura 160 Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados

8.9. Sistemas de aquisição de dados usando rede Ethernet

Com a aparição das redes "Ethernet" e "Intranets" não é necessário para o sistema de aquisição de dados um computador dedicado, sendo suficiente uma interface de rede, de maneira que este possa se comunicar com um computador remoto que exerce as funções de controle e supervisão, a figura a seguir mostra o diagrama de blocos de um sistema deste tipo.

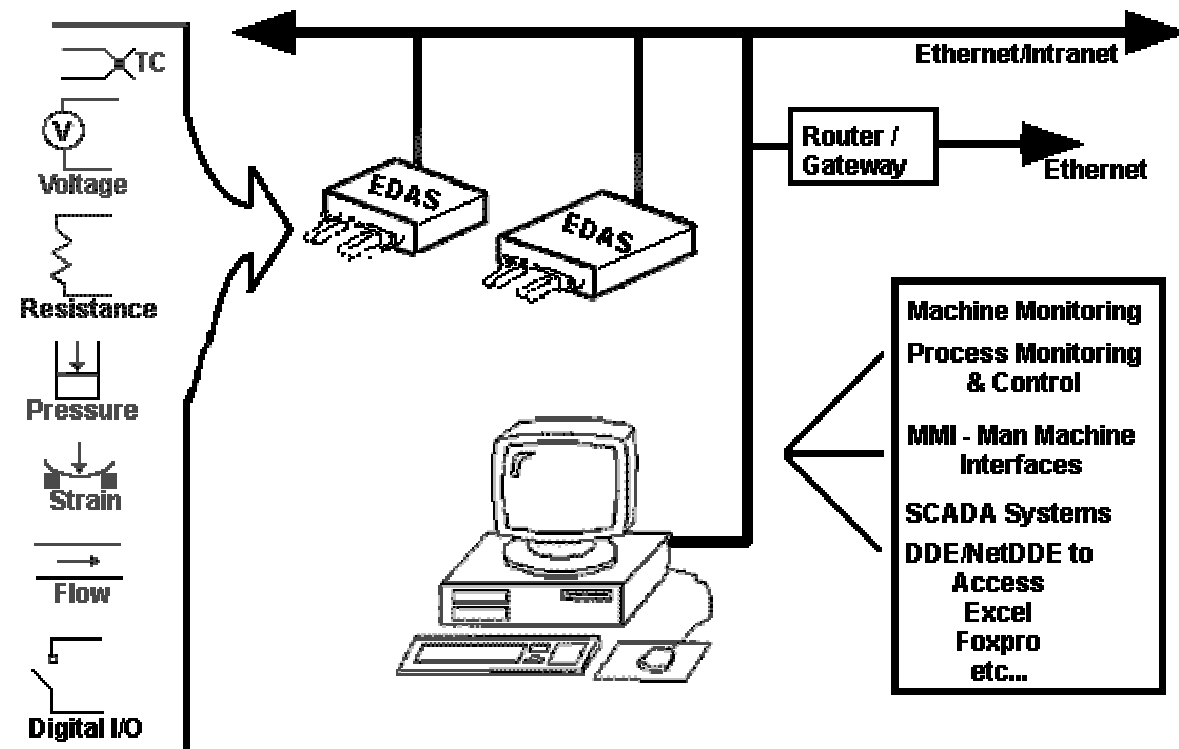


Figura 161 Sistemas de aquisição de dados usando rede Ethernet

9. Técnicas de transmissão de dados para instrumentação

- 9.1. Técnicas analógicas de tensão e corrente,
- 9.2. Técnicas analógicas por transmissão de frequência e diversas modulações
- 9.3. Técnicas digitais paralelas e seriais
- 9.4. Barramentos para instrumentação
- 9.5. Técnicas de rádio-telemetria analógica e digital

10. Sistemas Computadorizados para Instrumentação

Sistema típico de aquisição de dados

Sistema IEE-488

Sistemas Field Bus

Instrumentação virtual

Sistemas orientados à Internet

11. Métodos básicos de tratamento de dados e uso de softwares comerciais para processamento e apresentação de informações

EXCEL

MATLAB

SCILAB

MAPLE

12. Bibliografia

- 1- Ash G, *Les capteurs en Instrumentation Industrielle*, Dunod, 1983
- 2- Bolton W, *Instrumentation and Measurement Pocket Book*, Newnes ,1996
- 3- Ciureanu P. & Middelhoek S. (ed), *Thin Film Resistive Sensors*, IOP, Publishing, 1992.
- 4- Clayton, G.B., *Operational Amplifiers*, Butterworths, 1979
- 5- Dally, J. W., Riley W. F. & Mc Connell K. G., *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley, 1984
- 6- Doebelin E.O. *Measurement Systems, Application and design*, Mc Graw Hill, 1990
- 7- Hoffmann K, *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, HBM, 1989
- 8- Horowitz P.& Hill W., *The Art of Electronics*, Cambridge University Press, 1980
- 9- Jones B. E. (ed), *Instrument Science and Technology*, Vol 1&2, Adam Hilger,1983
- 10- Khazan A. D. *Transducers and their elements*, Prentice Hall, 1994
- 11- Lang T.T. *Electronic of Measuring Systems*, John Wiley, 1987
- 12- Middelhoek S. & Audet S. A., *Silicon Sensors*, Academic Press, 1989
- 13- Sheingold D. H., *Analog-Digital Conversion Notes*, Analog Devices, 1977
- 14- Sydenham P. H. (ed), *Handbook of Measurement Science*, Vol 1 & 2, John Wiley, 1983
- 15- Van Putten A. F .P., *Electronic Measurement Systems*, Prentice Hall, 1988
- 16- Woolvet G. A., *Transducers in Digital Systems*, Peter Peregrinus, 1977