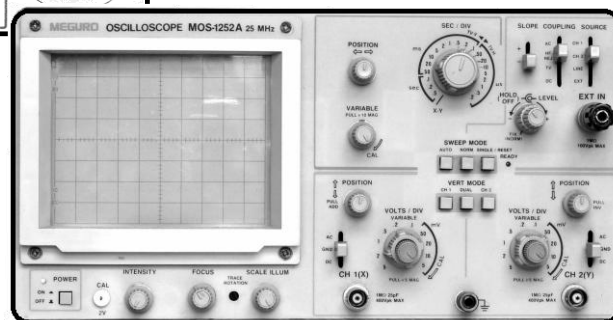
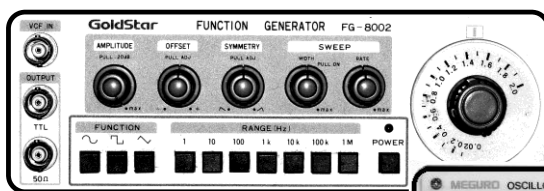
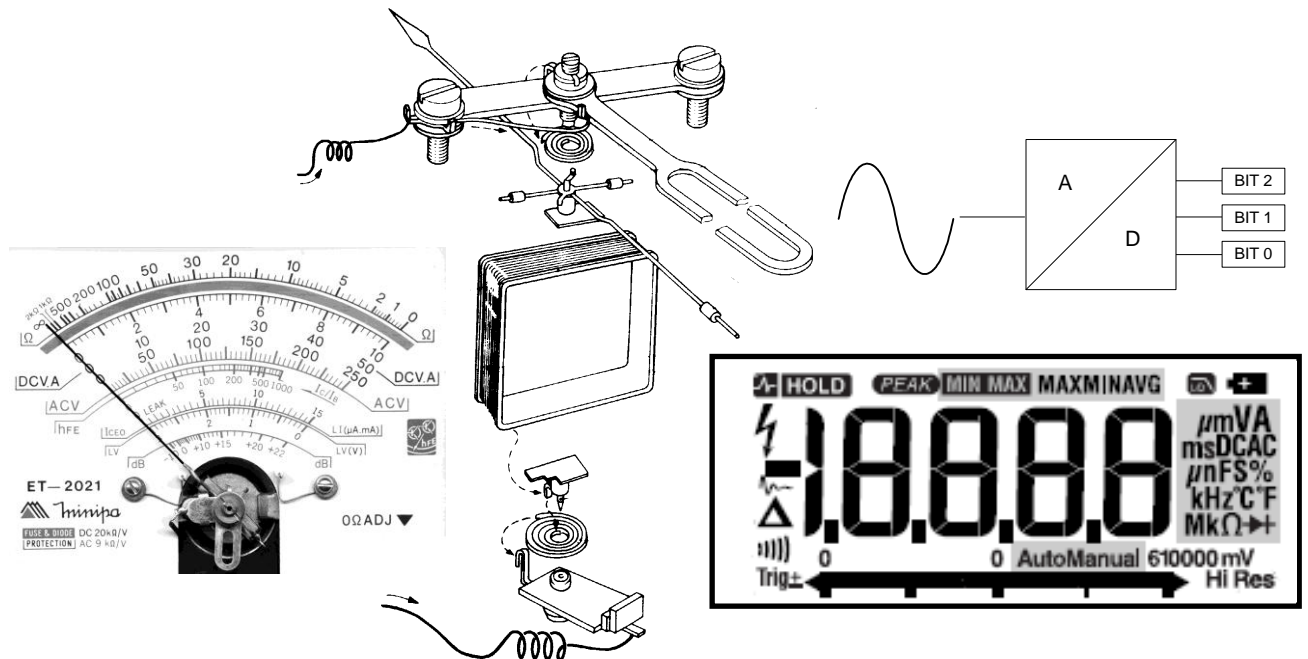


Medidas Eléctricas



ÍNDICE

1	CONCEITOS BÁSICOS DE MEDIÇÃO ELÉTRICA	
1.1	Erros de Medidas	1
1.2	Exatidão e Precisão	2
1.3	Exemplos de Relatórios de Aferição de Instrumentos	3
1.4	Conceito de Calibração de Instrumentos de Medição Elétrica	5
	EXERCÍCIOS	5
1.5	Termos Técnicos Utilizados	6
1.6	Simbologia Básica	7
1.7	Processos de Leitura	8
	EXERCÍCIOS	9
2	INSTRUMENTOS ANALÓGICOS	
2.1	Princípios Básicos de Funcionamento	
2.1.1	Conjugado Motor	10
2.1.2	Conjugado Restaurador	12
2.1.3	Conjugado de Amortecimento	13
2.1.4	Apoio do Conjunto Móvel	14
2.1.5	Instrumentos Analógicos na Atualidade	15
	EXERCÍCIOS	16
2.2	Aplicações dos Instrumentos Analógicos	
2.2.1	Medição de Sinais Contínuos com Instrumentos Galvanométricos	17
2.2.2	Revisão de Sinais Alternados	18
2.2.3	Medição de Sinais Alternados com Instrumentos de Bobina Móvel	20
2.2.4	Medição de Sinais Alternados com Instrumentos de Ferro Móvel	21
2.2.5	Resumo de Medição de Sinais Alternados	22
2.2.6	Medição de Resistências Elétricas	23
2.2.7	Especificações do Multímetro Minipa ET-2021.....	24
	EXERCÍCIOS	26
3.	INSTRUMENTOS DIGITAIS	34
3.1.	Circuitos Atenuadores e Condicionadores de Sinais	
3.1.1.	Voltímetro	35
3.1.2.	Amperímetro	35
3.1.3.	Ohmímetro	36
3.2.	Conversor Analógico-Digital	36
3.3.	Display	37
3.4.	Medição Correta do Valor Eficaz de Sinais Alternados	38
3.5.	Medição de Outras Variáveis	38
3.6.	Exatidão de Instrumentos Digitais	38
3.7.	Especificações do Multímetro M-2666K da ELENCO	39
3.8.	Funções no Display do Multímetro Modelo 87 da Fluke	40
3.9.	Considerações Finais	40
	EXERCÍCIOS	41
4.	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OSCILOSCÓPIOS E GERADORES DE FUNÇÕES	
4.1.	Geradores de Funções	
4.1.1.	Um Instrumento Comercial	42
4.1.2.	Especificações	43
4.1.3.	Operação	43
4.2.	Osciloscópios	45
4.2.1.	Um Instrumento Comercial	46
4.2.2.	Especificações	47
4.2.3.	Operação	48

5. PONTES DE MEDIÇÃO	
5.1. Ponte de Wheatstone	50
5.1.1. Análise da Sensibilidade da Ponte	51
5.1.2. Utilização Prática de uma Ponte de Wheatstone	53
5.2. Ponte de Kelvin	53
5.3. Aplicações de Pontes de Medição	
5.3.1. Medição de Temperatura Através de Termoresistências	54
5.3.2. Medição de Peso Através de <i>Strain Gages</i>	55
EXERCÍCIOS	56
6. MEDIÇÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICAS	
6.1. Potência em Corrente Alternada (Revisão)	61
6.2. Método do Voltímetro/Amperímetro	61
6.3. Wattímetros Eletrodinâmicos	62
6.4. Cuidados na Ligação do Instrumento	63
6.5. Um Instrumento Comercial	64
EXERCÍCIOS	65
7. MEDIÇÃO DE ÂNGULO DE FASE (φ)	
7.1. Defasagem de Sinais Eléctricos (Revisão)	66
7.2. Método do Wattímetro, Amperímetro e Voltímetro	66
7.3. Método dos Três Voltímetros	67
7.4. Método dos Três Amperímetros	67
7.5. Um Instrumento Comercial	68
EXERCÍCIOS	70
EXPERIÊNCIA 1 – GALVANÔMETRO	71
EXPERIÊNCIA 2 – INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS EM CC	72
EXPERIÊNCIA 3 – INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS EM CA	73
EXPERIÊNCIA 4 – PONTE DE WHEATSTONE	75
EXPERIÊNCIA 5 – WATTÍMETRO E FASÍMETRO	76
BIBLIOGRAFIA	77

SITE DA UNIVERSIDADE:

WWW.UNISANTA.BR/ENGELETRONICA

1 – CONCEITOS BÁSICOS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO ELÉTRICA

1.1 - Erros de Medidas

Podem ser classificados em sistemáticos ou acidentais:

Sistemáticos - que obedecem sempre a um mesmo padrão, e estão ligados a falhas dos materiais empregados ou erro de leitura do operador, quando este tem, por exemplo, uma deficiência visual que o leva sempre a leituras erradas;

Acidentais - causados por condições aleatórias, como mau contato nas conexões do instrumento ao circuito a ser medido.

As causas de erros mais importantes são:

- Erros de fabricação - devido a defeitos próprios dos materiais utilizados e dos sistemas de medida empregados;
- Erros ambientais - devido a mudanças de temperatura do ambiente, campos eléctricos, magnéticos etc.;
- Erros de montagem - devido aos procedimentos de medição adotados;
- Erros pessoais - devido a observações errôneas do operador.

Formas de expressar um erro de medição:

- Erro absoluto - dados dois valores, um correto e o outro, obtido através de medição, errado, se denomina erro absoluto a diferença entre ambos.

$$\text{Erro absoluto} = |\text{Valor indicado} - \text{Valor verdadeiro}|$$

- Erro relativo - é o quociente entre o erro absoluto e o valor correto.

$$\text{Erro relativo} = \frac{|\text{Valor indicado} - \text{Valor verdadeiro}|}{\text{Valor verdadeiro}}$$

- Erro porcentual - equivale ao erro relativo multiplicado por 100.

Quando o valor indicado é superior ao valor correto, diz-se que houve erro por excesso (para mais); quando ocorre o inverso, o erro é por falta (para menos).

Exemplo 1

Se é sabido que o valor correto de uma tensão é de 125V, e o valor indicado foi 128V, teremos:

$$\text{Erro absoluto} = 128 - 125 = 3V$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{128 - 125}{125} = 0,024$$

$$\text{Erro porcentual} = \frac{128 - 125}{125} \times 100 = 2,4\%$$

erro por excesso ou para mais

Exemplo 2

Um instrumento indicou uma corrente de 52A quando se sabe que a corrente é de 55A, logo:

$$\text{Erro absoluto} = |52 - 55| = 3\text{A}$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{|52 - 55|}{55} = 0,0545$$

$$\text{Erro percentual} = \frac{|52 - 55|}{55} \times 100 = 5,45\%$$

erro por falta ou para menos

1.2 - Exatidão e Precisão

As definições abaixo de exatidão e precisão foram tiradas da norma ABNT:

“Exatidão: característica de um instrumento de medição que exprime o afastamento entre a medida nele efetuada e o valor de referência aceito como verdadeiro. O valor da exatidão de um instrumento de medição ou de um acessório é definido pelos limites da variação na indicação”.

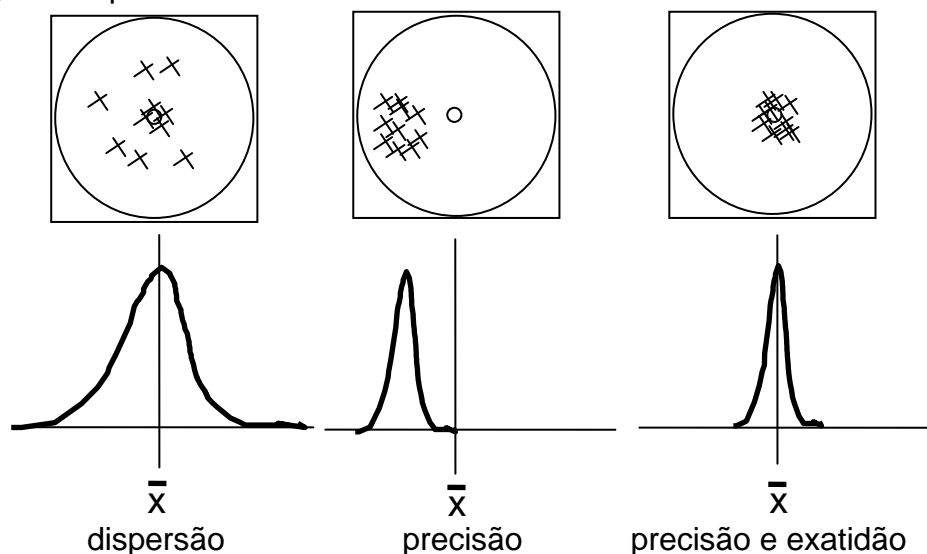
“Precisão: característica de um instrumento de medição determinada através de um processo estatístico de medições, que exprime o afastamento mútuo entre as diversas medidas obtidas de uma grandeza dada, em relação à média aritmética dessas medidas. Um instrumento preciso não é necessariamente exato, embora o seja na maioria dos casos”.

Ou seja:

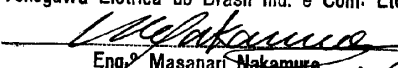
exatidão é o *desvio* entre o valor indicado em um instrumento e o valor padrão;

precisão é a *repetição* de um mesmo valor nas indicações de um instrumento em várias medições sucessivas de um valor padrão, mesmo que essas indicações não sejam iguais ao padrão.

No diagrama abaixo estão representados três alvos. No da esquerda, as marcações são dispersas o que evidencia que não houve nem precisão nem exatidão; no central as marcações se concentram ao redor de um ponto, são precisas mas não exatas; e finalmente, no da direita, houve uma concentração de marcações ao redor do centro do alvo, ou seja, houve precisão e exatidão.



1.3 - Exemplos de Relatórios de Aferição de Instrumentos

CENTRO DE AFERIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS	
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - LABORATÓRIO CREDENCIADO PELO INMETRO SOB Nº 032	
CERTIFICADO DE AFERIÇÃO Nº: 0541/95	
FOLHA: 1/2	
SOLICITANTE: UNIVERSIDADE STA. CECILIA ORDEM SERV.: JA1-5F-0770	
OBJETO:	. NOME: Cossifimetro . FABRICANTE: YOKOGAWA ELECTRIC, Japão . MODELO: 2039-02 . Nº DE SERIE: 05884M . CARACTERÍSTICAS: Analógico, escala útil 0,5-1,0-0,5 600-00-600, classe de exatidão: $\pm 3\%$ do valor fiducial. Faixas de corrente: 1/5A (0,2 - 10A) Faixas de tensão: 120V (60 - 300V)
DATA DE AFERIÇÃO: 06.07.95	
DESCRIÇÃO DO ENSAIO: A aferição foi executada através de medição comparativa, utilizando-se instrumentos rastreados aos padrões nacionais do INMETRO. O resultado da aferição está contido em tabelas que relacionam o valor padrão aplicado ao instrumento com sua indicação e a incerteza estimada de medição.	
CONDIÇÕES AMBIENTAIS: $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ / $(60 \pm 10)\%$ U.R.	
PADRÕES UTILIZADOS:	
Multímetro digital M/ 3458A Classe: 10ppm (CC / ohm) 100ppm (CA) Nº de serie: 2823A08218 Certificado de aferição: nº 040/95 (INMETRO) Validade da aferição: 06.03.96	
Wattímetro Conversor M/ 2885 nº de serie: 45GU0030 Classe: 0,02% Certificado de aferição: nº 151/94 (INMETRO) Validade da aferição: 23.11.95	
Fonte Padrão CA M/ 2558 Nº de serie: 49AZ0232 Classe: 0,08% Certificado de Aferição: nº 0197/95 (RBC) Validade da aferição: 18.03.96	
RESULTADOS OBTIDOS: Vide folhas anexas.	
São Paulo 07 / 07 / 95 Yokogawa Elétrica do Brasil Ind. e Com. Ltda.  Eng.º Masanari Nakamura Gerente Técnico	
Este certificado é valido exclusivamente para o objeto ensaiado, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. A sua reprodução só podera ser total e dependerá da autorização formal deste laboratório.	

YOKOGAWA ◆

Yokogawa Elétrica do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

Praça Acapulco, 31 St. Amaro
04675-190 São Paulo SP BrasilTel: 011 548 2666
Fax: 011 522 5231

Tlx: 11 57755 YOKO BR

CENTRO DE AFERIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - LABORATÓRIO CREDENCIADO PELO INMETRO SOB Nº 032

Continuação do Certificado de Aferição nº: 0541/95

FOLHA: 2/2

OBJETO: Cossifimetro
 MODELO: 2039-02
 Nº DE SERIE: 05884M

Data de aferição: 06.07.95

RESULTADOS OBTIDOS:**A.) FAIXAS DE 1A/120V/60Hz**

Valor indicado		Valor padrão
0,5		0,499
0,7	(adiant.)	0,693
0,9		0,892
1,0		0,999
0,9		0,910
0,7	(atras.)	0,708
0,5		0,498

B.) FAIXAS DE 5A/120V/60Hz

Valor indicado		Valor padrão
0,5		0,498
0,7	(adiant.)	0,693
0,9		0,892
1,0		1,000
0,9		0,911
0,7	(atras.)	0,708
0,5		0,498

Incerteza total estimada deste laboratório:

W/VAR/VA/F.P

V = 100 V - I = 5 A
 F.P=0 ou 1 - 47 a 63 Hz

±0,04%

V = 75 a 300 V
 I = 0,5 a 20 A
 F.P=0 a 1 - 47 a 400 Hz

±0,07%

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto ensaiado, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. A sua reprodução só poderá ser total e dependerá da autorização formal deste laboratório.

YOKOGAWA ◆**Yokogawa Elétrica do Brasil Indústria e Comércio Ltda.**Praça Acapulco, 31 - Sto. Amaro
04675-190 São Paulo - SP - BrasilTel: 011 548.2666
Fax: 011 522.5231

Tlx: 11 57755 YOKO BR

1.4 – Conceito de Calibração de Instrumentos de Medição Eléctrica

Até o ano de 1995 eram utilizados os termos Aferição e Calibração com sentidos diferentes. Por Aferição entendia-se a comparação entre os valores gerados por um padrão de referência e o valor efetivamente medido pelo instrumento sob análise. De outra parte, por Calibração entendia-se o ato de abrir o instrumento e executar sua manutenção, até que este voltasse a medir dentro dos parâmetros estabelecidos pelo fabricante e, após esta intervenção, ele retornava ao laboratório onde era então procedida a Aferição.

A partir de 1996 estes termos sofreram uma mudança no vocabulário técnico nacional a fim de adequarem-se a terminologia internacional ou VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia.

Hoje, a palavra Aferição caiu em desuso. Em seu lugar foi incluída a palavra Calibração e, o que entendia-se até então por calibração, passou a chamar-se de Ajuste.

Assim sendo, quando nos referimos a uma Calibração na verdade queremos dizer o ato de comparar as leituras da unidade sob teste com os valores gerados pela Unidade de Medição Padrão, ao passo que um Ajuste corresponde a manutenção no instrumento que apresentou um erro muito grande durante o processo de calibração.

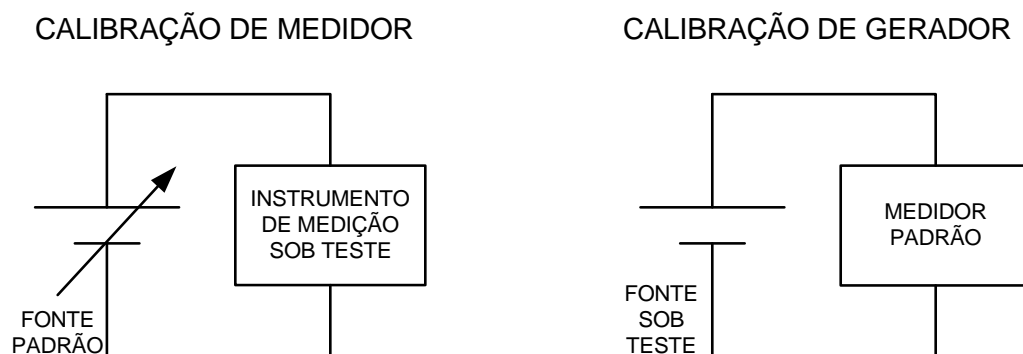
(fonte: http://www.pucrs.br/labelo/fale_perg_freq.php#diferenac)

No item “Descrição do Ensaio” do certificado mostrado nas páginas anteriores pode-se ler:

“A aferição (*calibração*) foi executada através de medição comparativa, utilizando-se instrumentos rastreados aos padrões nacionais do INMETRO”.

Isso significa que a calibração é feita comparando-se o instrumento sob teste com um instrumento padrão gerador de tensão ou corrente, bem como à cargas resistivas padrão. Esse tipo de dispositivos (fontes e cargas padrão) são utilizados apenas como referência para calibração de equipamentos eléctricos de medição.

Abaixo podem ser vistos os diagramas de conexão para calibração de instrumentos de medição e para geradores, que podem ser para sinais contínuos ou alternados.



EXERCÍCIOS

1.1 - Um voltímetro indica 11,6V quando é efetuada uma medida de uma fonte padrão de 12V. Determine os erros absoluto, relativo e percentual na medição.

Respostas: 0,4V; 0,033; 3,33% para menos

1.2 – Um amperímetro indicou uma corrente de 1,68A em uma medição. Sabe-se que o erro foi de 5% para mais. Determine o valor real da corrente medida, e os erros absoluto e relativo.

Respostas: 1,60A; 0,08A; 0,05 para mais

1.5 – Termos Técnicos Utilizados

- **Natureza do instrumento:** Amperímetro, Voltímetro, Wattímetro etc.
- **Natureza do conjugado motor:** caracteriza o princípio físico do instrumento.
- **Escala do instrumento (ou alcance ou fundo de escala):** valor máximo que o instrumento é capaz de medir.
- **Classe de exatidão:** limite de erro que pode ocorrer em qualquer escala; é representada por um número denominado de índice de classe, que deve ser compreendido como uma percentagem sobre o valor de fundo de escala.

ex.: classe de exatidão = 1,5 e escala de 300V

$$\text{erro} = 300 \times \frac{1,5}{100} = 4,5V$$

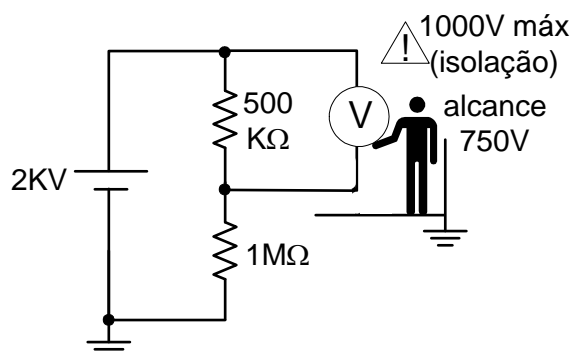
o erro admissível é o mesmo para qualquer valor medido:

- em 150V, o erro admissível será de $\pm 4,5V$, ou seja de 145,5V até 154,5 V;
- em 15V, o erro admissível será também de $\pm 4,5V$, ou seja de 11,5V até 19,5 V;

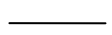







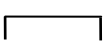











A medição será tanto mais exata quanto mais próxima do fundo de escala estiver a indicação.

Como exemplos de classes de exatidão, podemos citar:

- Instrumentos de Laboratório : 0,1 a 0,3 ou melhor
- Instrumentos de Ensaio: 0,5 a 1,5
- Instrumentos de Serviço: 2 a 3 ou maior
- **Linearidade:** capacidade de produzir uma indicação proporcional à grandeza medida:
 - se a tensão aplicada ao instrumento for duplicada, a indicação também o será.
- **Discrepância:** é a diferença entre valores medidos para uma mesma grandeza.
- **Repetibilidade:** indicação de um mesmo valor em diversas medições de uma mesma grandeza em condições idênticas.
- **Sensibilidade:** é o valor da grandeza medida necessário para gerar uma deflexão de uma divisão na escala. É geralmente indicada por div/ μA ou mm/ μA . Em instrumentos digitais está relacionada com a resolução (quantidade de bits) do conversor análogo/digital do equipamento de medição.
- **Resolução:** relação entre o valor de fundo de escala e o número de divisões da escala. É o menor incremento que se pode assegurar na leitura de um instrumento. Em instrumentos digitais está relacionada com a quantidade de dígitos do display.
- **Mobilidade:** menor variação na grandeza medida capaz de causar um deslocamento perceptível.
- **Perda própria:** potência consumida pelo instrumento no fundo de escala.
- **Eficiência:** relação entre o valor de fundo de escala e a perda própria.
- **Rigidez dielétrica:** isolamento elétrico entre a parte ativa, ligada ao potencial eléctrico a ser medido, e a carcaça do instrumento. Analise e comente o desenho abaixo.

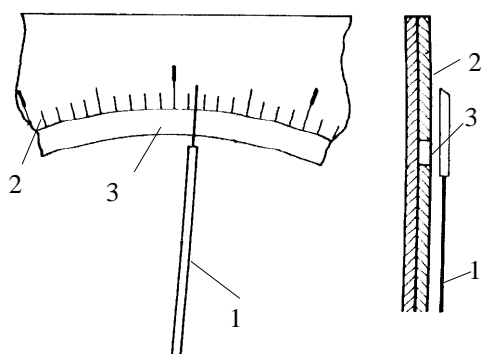


1.6 – Simbologia Básica

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	CORRENTE CONTÍNUA
	CORRENTE ALTERNADA (MONOFÁSICA)
	CORRENTE CONTÍNUA E ALTERNADA
	CORRENTE ALTERNADA TRIFÁSICA
	TENSÃO DE ENSAIO (ISOLAMENTO) 500V (60HZ)
	TENSÃO DE ENSAIO 2KV (60HZ)
	INSTRUMENTO NÃO SUJEITO A TENSÃO DE ENSAIO
	MOSTRADOR NA POSIÇÃO VERTICAL
	MOSTRADOR NA POSIÇÃO HORIZONTAL
	INSTRUMENTO DE BOBINA MÓVEL
	INSTRUMENTO DE BOBINA MÓVEL COM RETIFICADOR
	INSTRUMENTO DE FERRO MÓVEL
	INSTRUMENTO ELETRODINÂMICO
	INSTRUMENTO ELETROSTÁTICO
	INSTRUMENTO BIMETÁLICO
	BLINDAGEM ELETROSTÁTICA
	BLINDAGEM MAGNÉTICA
	TERMINAL DE ATERRAMENTO
	ATENÇÃO! LEIA AS INSTRUÇÕES ANTES DE USAR!
	ATENÇÃO! ALTA TENSÃO NO INSTRUMENTO!

1.7 - Processos De Leitura

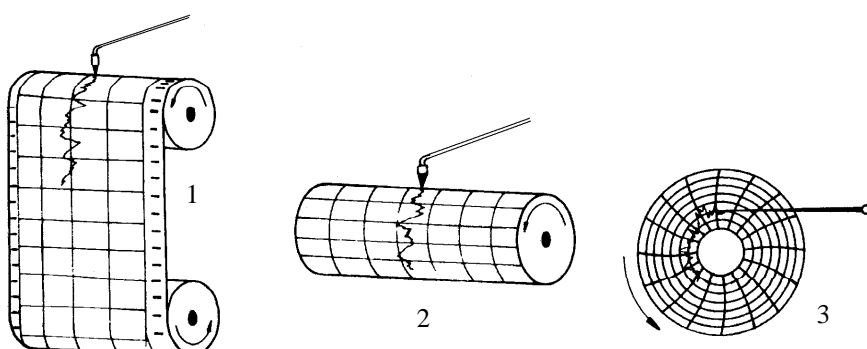
1.7.1 - Indicadores



Indicam, sobre uma escala graduada, o valor da grandeza que se destinam a medir.

Na figura ao lado podemos observar o dispositivo indicador (ponteiro) (1), a escala graduada (2) e o espelho para eliminação do erro de paralaxe (3).

1.7.2 - Instrumentos Registradores



Os instrumentos de medida com dispositivo registrador desenharam a variação de uma grandeza em função do tempo (caso mais geral) ou em função de outra grandeza. Os registros ou cartas permitem o estudo de uma grandeza ao longo

do tempo, para o controle de processos em funcionamento e para a detecção de perturbações nos ciclos normais de funcionamento.

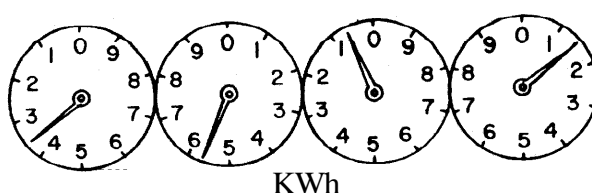
Acima vemos três exemplos de cartas registradoras: de rolo de papel (1), de tambor (2), que registra apenas uma volta, e é geralmente empregado em registradores rápidos e de folha circular (3), que permite uma visão de toda a carta a um só tempo.

Os registradores que utilizam cartas do tipo 1 trabalham com velocidades entre 5 e 72000 mm/h, enquanto que para o tipo 3 uma rotação completa pode demorar desde algumas horas até dias.

Atualmente os registradores gráficos de papel têm sido substituídos por sistemas microprocessados, que podem mostrar em uma tela os sinais monitorados e, além disso, armazenar os valores coletados para posterior análise.

1.7.3 - Instrumentos Acumuladores ou Totalizadores

Indicam o valor acumulado da grandeza medida, a partir do momento em que foram instalados. Abaixo, temos o mostrador de um medidor desse tipo utilizado na medição do consumo de energia residencial.



KWh

EXERCÍCIOS

1.3 - Dado um instrumento com classe de exatidão 1,5 e fundo de escala 100V, determinar os erros percentuais máximos para uma medição de 10V e outra de 90V.

respostas: 15% e 1,67%

1.4 - Um galvanômetro apresenta uma deflexão de 8 divisões quando é atravessado por uma corrente de $40\mu\text{A}$. Determinar sua sensibilidade.

resposta: 0,2div/ μA

1.5 - Um instrumento com fundo de escala de 150V possui 30 divisões. Determinar sua resolução.

resposta: 5V/div

1.6 - Um voltímetro de fundo de escala 100V tem resistência interna $R_i=100\text{K}\Omega$. Determinar sua perda própria e eficiência.

respostas: 100mW e 1000 Ω /V

1.7 - Um amperímetro tem fundo de escala 5A e resistência interna $R_i=0,1\Omega$. Determinar sua perda própria e eficiência.

respostas: 2,5W e 2A/W

1.8 - Um instrumento com classe de exatidão declarada de 0,8 indicou uma tensão de 49,5V na escala de 100V, ao medir uma tensão de 50V fornecida por uma fonte padrão. Verificar se o instrumento está dentro de sua classe de exatidão, justificando.

resposta: sim

1.9- Determine as resoluções para os vários alcances dos instrumentos abaixo:

Analógico



ALCANCE	RESOLUÇÃO
1V	
10V	
100V	
1000V	

Digital

ALCANCE	INDICAÇÃO MÁXIMA	RESOLUÇÃO
200mV	199.9	
2V	1.999	
20V	19.99	
200V	199.9	
750V	750	

**respostas: analógico 50mV/div, 0,5V/div, 5V/div, 50V/div
digital 100 μV , 1mV, 10mV, 100mV, 1V,**

2- INSTRUMENTOS ANALÓGICOS

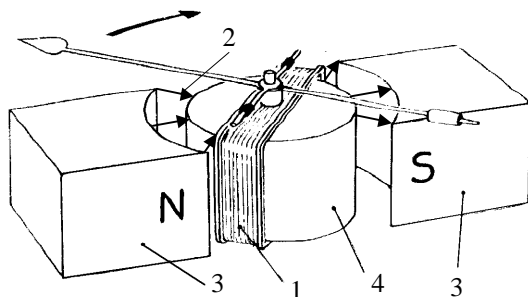
2.1 – Princípios Básicos de Funcionamento

2.1.1 - Conjugado Motor

Os instrumentos analógicos para medição de sinais eléctricos têm, sempre, um conjunto móvel que é deslocado aproveitando um dos efeitos da corrente eléctrica, sendo o mais comum o efeito magnético. Preso ao conjunto móvel está um ponteiro que se desloca na frente de uma escala graduada, indicando o valor da grandeza medida.

a – Instrumentos de Bobina Móvel ou Galvanômetros

Em muitas verificações de grandezas eléctricas, é necessário medir ou comprovar a existência de correntes muito pequenas, até a ordem de microampéres. Os dispositivos utilizados para detectar correntes dessa magnitude são denominados galvanômetros ou instrumentos de bobina móvel (BM).

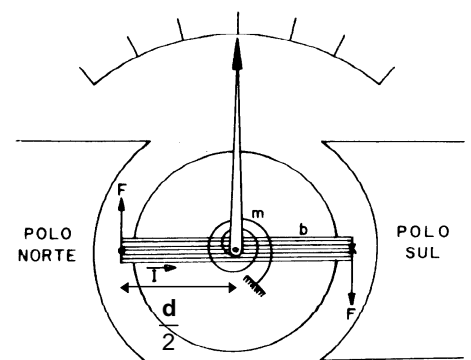
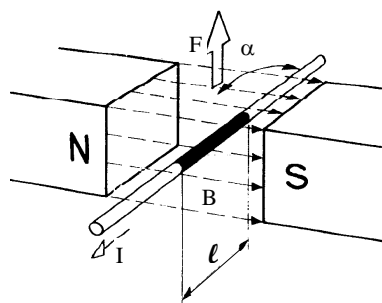


Na figura à esquerda, quando a bobina (1) é percorrida por uma corrente contínua, é criado nela um campo magnético, que interage com o campo (2) formado pelo ímã permanente (3). Um núcleo de ferro (4) concentra e orienta as linhas de força do campo magnético.

Nessas circunstâncias, são geradas as duas forças F , indicadas na figura à direita, que produzem um conjugado em relação ao eixo de rotação do sistema, fazendo girar a bobina em torno desse eixo. Essa interação entre corrente e campo é chamada de conjugado motor (C_m):

$$C_m = F \times \frac{d}{2} + F \times \frac{d}{2}$$

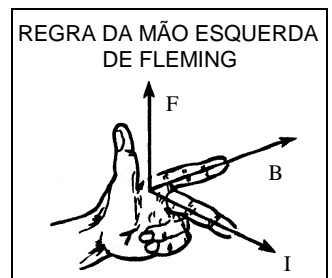
$$C_m = F \times d$$



Para entender o conjugado motor de dispositivos como os galvanômetros, é necessário recordar as interações entre o campo magnético de um ímã permanente e a corrente eléctrica que atravessa um condutor submetido a esse campo.

Na figura à esquerda, um condutor percorrido por uma corrente I é introduzido no campo magnético com

densidade de fluxo B de um ímã permanente, sendo ℓ o comprimento do fio imerso no campo. Nessas condições uma força F , normal ao plano determinado pelo condutor e pela direção do campo, irá atuar sobre o condutor. O sentido da força é determinado pela regra da mão esquerda de Fleming (aplicada a motores eléctricos), mostrada à direita. Este tipo de instrumento tem, portanto, polaridade definida, e só funciona adequadamente quando submetido a um sinal contínuo.



O valor da força é dado por: $F = BIl \sin \alpha$, onde α é o ângulo entre o campo magnético e a corrente que percorre o condutor.

Conforme já vimos, $C_m = Fd$ e $F = BIl \sin \alpha$, portanto: $C_m = nBI\ell d \sin \alpha$, onde n é o número de espiras da bobina do conjunto móvel.

Na figura abaixo pode se notar que o fluxo é uniforme e direcionado de forma radial pelo cilindro de ferro doce (C), mais permeável ao campo magnético que o ar à sua volta. A corrente que circula na bobina móvel corta o fluxo magnético em um ângulo de 90° na região do entreferro, qualquer que seja a posição da bobina, o que torna o valor de F independente de α , pois sendo este ângulo constante e igual a 90° , $\sin \alpha$ na equação será sempre 1. Podem-se observar também o sentido da corrente na bobina ($\odot \otimes$), as forças resultantes F e o ângulo de deflexão θ do conjunto móvel.

Logo: $C_m = nBI\ell d$ onde, n , B , ℓ , e d são parâmetros internos do galvanômetro, que iremos representar por Φ . Portanto: $C_m = \Phi I$ (sendo $\Phi = nB\ell d$). Convém observar que ℓ e d passam a ser, agora, as dimensões da bobina móvel.

b – Instrumentos de Ferro Móvel

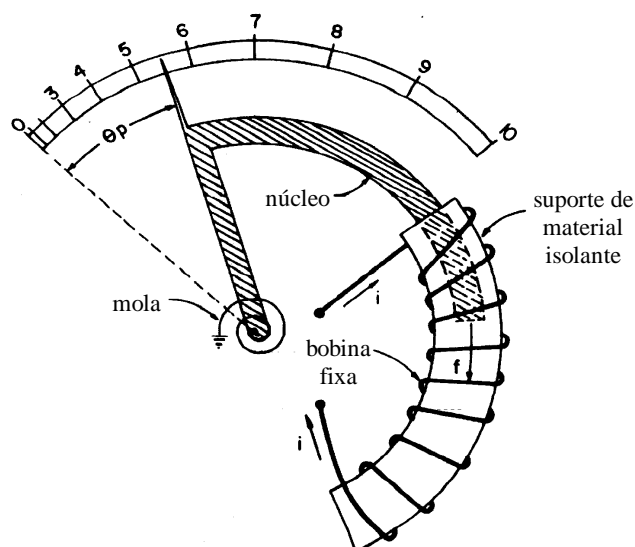
Esses dispositivos são conhecidos como instrumentos de lei quadrática, porque, em cada um deles, a deflexão é proporcional ao quadrado do valor eficaz da tensão ou corrente a eles aplicada. Caso seja aplicada uma tensão contínua, a deflexão também será proporcional a ela, embora possam ocorrer erros em função do magnetismo residual no núcleo do instrumento. Ou seja, o instrumento indica o valor eficaz de um sinal CA ou o valor contínuo de um sinal CC.

Uma das características principais destes instrumentos é a indicação relativamente independente da forma de onda da grandeza aplicada, enquanto que nos instrumentos de bobina móvel esse é, como será visto adiante, um fator crítico que obriga ao cálculo do Fator de Forma da onda (relação entre os valores eficaz e médio do sinal) para correção da escala.

Também conhecidos como ferromagnéticos ou eletromagnéticos, seu princípio físico de funcionamento baseia-se na ação do campo magnético criado pela corrente a ser medida percorrendo uma bobina fixa, sobre uma peça de ferro doce móvel.

Ao lado temos o diagrama de um instrumento deste tipo, também conhecido como instrumento de atração (ou de núcleo mergulhador). A corrente i , qualquer que seja sua natureza (alternada ou contínua) e sentido, origina na bobina fixa um campo, que atrai o núcleo de ferro doce.

Dada a complexidade do conjunto móvel, é quase impossível o cálculo do conjugado motor pelo método direto como foi feito para os instrumentos de bobina móvel. Será utilizado para isso o método da variação da energia armazenada no sistema em relação ao deslocamento do conjunto móvel, conforme é demonstrado a seguir.



Sendo a energia armazenada em um indutor definida por $W = \frac{1}{2}Li^2$, teremos

$$C_m = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2}i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{conjugado motor instantâneo})$$

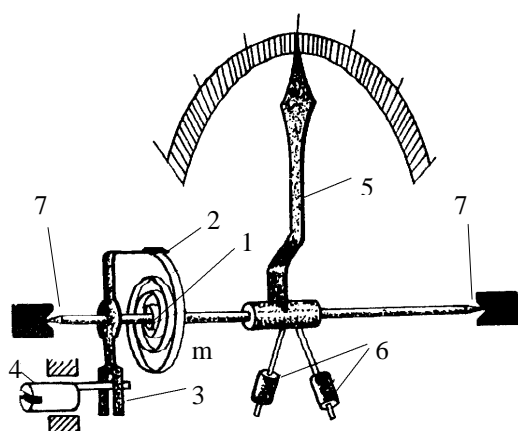
A deflexão será proporcional ao conjugado motor médio: $C_m(\text{med}) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2}i^2 \frac{dL}{d\theta} dt$, e sendo somente i dependente do tempo teremos: $C_m(\text{med}) = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \right)$. Entre parênteses na equação anterior temos lei^2 , ou seja, a indicação do instrumento é proporcional ao quadrado do valor eficaz da grandeza aplicada.

Estes instrumentos podem ser utilizados como amperímetros ou voltímetros, sendo que no segundo caso utiliza-se um resistor multiplicador R_m em série com a bobina.

Suas principais características são:

- perda própria elevada;
- robustez;
- indicados para instrumentos de painel (C.E. de 1 a 3%);
- limite de frequência baixo (cerca de 200 Hz), em função das perdas por histerese e Foucault.

2.1.2- Conjugado Restaurador



Na figura ao lado, a mola m , que possui uma extremidade presa ao eixo do conjunto móvel (1) e outra ao conjunto de correção de zero (2), fica sob tensão mecânica, e se opõe ao movimento de rotação originado pelo conjugado motor. Essa oposição é o conjugado restaurador (C_r) ou antagonista, cujas funções são criar uma situação de equilíbrio em relação à força que gera o conjugado motor e fazer o conjunto móvel voltar à posição de repouso inicial quando cessar o efeito do conjugado motor.

A intensidade do conjugado restaurador é dada pela fórmula:

$$C_r = K\theta$$

onde K é a constante de torção da mola (constante elástica) e θ o ângulo de desvio do conjunto móvel (deflexão).

Nessa figura podem ser vistos também a haste (3) e o parafuso (4) de correção de zero, o ponteiro (5), o dispositivo compensador da gravidade (6), cuja função é fazer com que o centro de gravidade do conjunto móvel coincida com seu eixo de rotação, eliminando o efeito da gravidade sobre o conjunto, e os pivôs de sustentação (7).

Na posição de repouso inicial (zero), teremos:

$$C_m = 0 \quad (\text{e também } C_r = 0).$$

Na posição de equilíbrio (durante uma medida), teremos:

$$C_m = C_r \quad (\text{força do conjugado motor equilibrada com a da mola})$$

2.1.3- Conjugado de Amortecimento

Para evitar oscilações do conjunto móvel ao redor do ponto de equilíbrio é criado, por meio de artifícios externos, um conjugado de amortecimento (C_a), que também evita os deslocamentos bruscos do conjunto móvel ao sair da posição de repouso e ao voltar a ela, cessado o conjugado motor. Este conjugado pode ser entendido como uma frenagem ou limitação de velocidade do conjunto móvel.

O conjugado de amortecimento é diretamente proporcional à velocidade angular ($\frac{d\theta}{dt}$) do conjunto móvel, sendo $C_a = D \times \frac{d\theta}{dt}$, onde D é a constante de amortecimento.

Relembrando:

$\theta(t) \rightarrow$ ângulo

$\frac{d\theta}{dt} \rightarrow$ velocidade angular (primeira derivada)

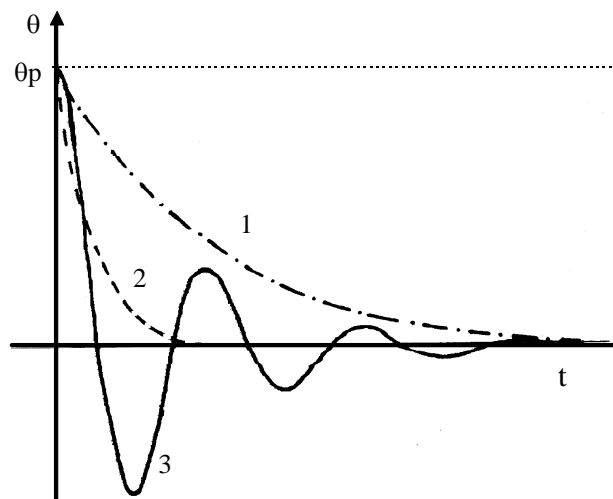
$\frac{d^2\theta}{dt^2} \rightarrow$ aceleração angular (segunda derivada)

O gráfico abaixo representa a posição (deflexão) do ponteiro, $\theta(t)$, em função do tempo, e mostra como o ponteiro de um instrumento analógico retorna de uma ponto θ_p qualquer da escala para a posição de repouso.

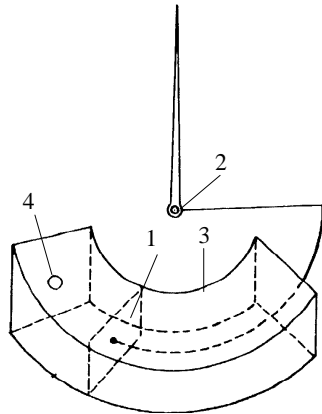
A curva 1 se aproxima exponencialmente do zero, sendo que o conjunto móvel atinge a posição de repouso em um tempo muito longo, possuindo um coeficiente de amortecimento D muito elevado. Os instrumentos com essas características são chamados de sobreamortecidos.

A curva 2 representa um coeficiente de amortecimento muito menor que o anterior, sendo o tempo necessário para atingir o ponto de repouso inferior àquele. Neste caso, o instrumento é dito criticamente amortecido. Esta situação representa o retorno do ponteiro ao repouso no menor tempo possível sem que haja uma oscilação como a da curva 3.

A curva 3 é uma função semiperiódica. A amplitude das oscilações vai decrescendo exponencialmente em torno do zero, atingindo essa posição após algum tempo. Nessa situação o conjunto móvel do instrumento fica oscilando ao redor da posição de repouso, o que significa que o seu coeficiente de amortecimento é muito pequeno. Esse tipo de instrumento é denominado subamortecido.

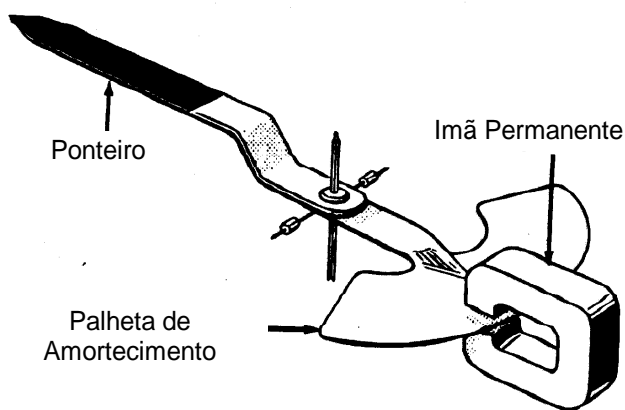


a- Amortecimento por Atrito Sobre o Ar



É provocado pela reação do ar sobre uma fina palheta metálica (êmbolo) (1) presa ao eixo de rotação (2) do conjunto móvel que se movimenta dentro de uma câmara (3). Um orifício (4) regula a saída de ar da câmara e, conseqüentemente, o grau de amortecimento do conjunto.

b- Amortecimento Eletromagnético (por Correntes de Foucault)



Em alguns instrumentos o amortecimento é obtido enrolando-se a bobina móvel sobre um leve corpo de alumínio, no qual são originadas correntes de Foucault quando a bobina se movimenta.

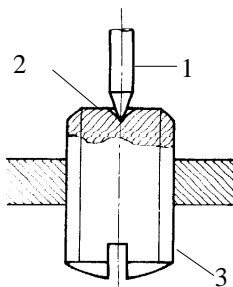
O mesmo princípio é utilizado no diagrama ao lado. Quando a palheta de amortecimento (geralmente de alumínio) se movimenta cortando o fluxo magnético do ímã permanente, são geradas correntes sobre ela.

Nos dois casos, as correntes geradas irão produzir campos magnéticos em oposição aos campos dos ímãs permanentes, criando forças opostas ao deslocamento do conjunto móvel, e conseqüentemente conjugados de amortecimento.

2.1.4- Apoio do Conjunto Móvel

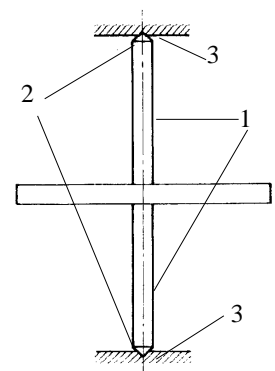
Esta é a parte mais delicada da construção de instrumentos elétricos, devendo o apoio do conjunto móvel ser feito de modo a proporcionar o mínimo de atrito.

a- Apoio por Eixo (pivô)



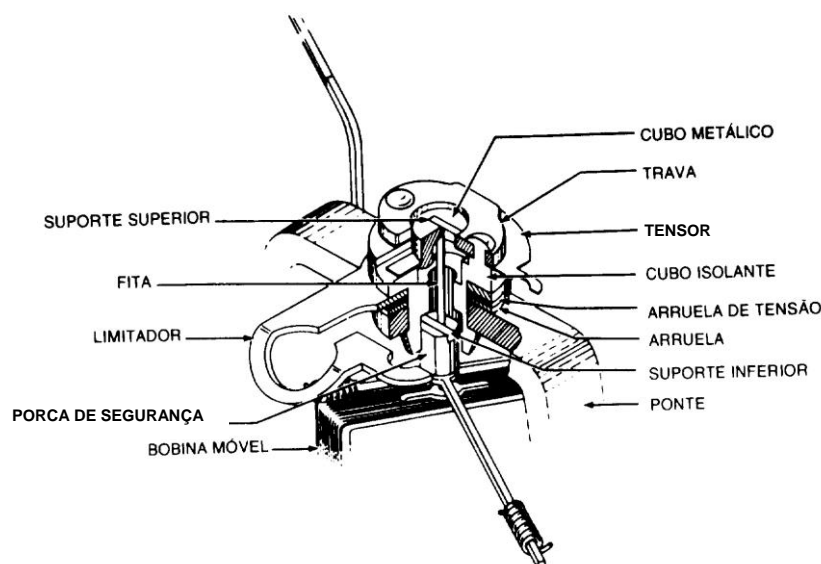
Normalmente utilizada em dispositivos onde o conjunto móvel apresenta massa elevada. Na figura à direita, vemos a representação esquemática de um sistema de apoio utilizando pivôs. O eixo (1) é feito de aço, tendo nas extremidades dois bicos de aço duro (2) repousando sobre apoios de rubi ou safira sintética (3).

No detalhe à esquerda, podemos notar o eixo (1), o apoio de rubi (2) e o parafuso de ajuste do conjunto (3).



b- Suspensão "Taut Band"

As fitas de torção ou tensão (conhecidas como sistema de suspensão Taut Band, mostrado abaixo), vêm sendo largamente utilizadas em diversos instrumentos de medição, aumentando sua sensibilidade à corrente em relação aos que utilizam eixos e mancais. A tensão necessária à fita é produzida por uma mola (TENSOR). Esse tipo de instrumento é praticamente insensível a variações de temperatura e choques mecânicos, além de suportar maiores sobrecargas.



2.1.5 – Instrumentos Analógicos na Atualidade

Os idéia básica dos instrumentos de bobina móvel utilizados atualmente, remonta a 1882, quando um cientista francês chamado Arsène d'Arsonval (1851-1940) criou um galvanômetro que leva seu nome. Os princípios que levaram à sua invenção já tinham, na época, cerca de cem anos (o nome galvanômetro vem de Luigi Galvani (1737-1798), cientista italiano que desenvolveu várias pesquisas relacionadas com a corrente elétrica).

Apesar disso, esse tipo de instrumento continua, ainda hoje, a desempenhar um papel importante nas medição de sinais elétricos, mesmo com o avanço, nos últimos trinta anos, de sistemas digitais e posteriormente de sistemas microprocessados.

Quanto ao seu princípio de funcionamento, estudado neste capítulo, podemos dizer que continua útil atualmente. Basta olhar para uma unidade de foco do laser de um drive de CD-ROM ou DVD. Toda a idéia do galvanômetro está lá: ímãs e bobinas móveis, para posicionar a lente sobre a trilha óptica da mídia e focar o feixe. É através dessa unidade que o sistema óptico consegue manter uma leitura correta de discos cuja superfície não é totalmente plana e onde a posição das trilhas se altera.

O conhecimento básico destes e de outros conceitos é extremamente importante para qualificar um profissional.

EXERCÍCIOS

2.1 - Determinar as características básicas de um galvanômetro (Φ , K , r_g), sabendo que:

$I_o=1\text{mA}$; $L = 2\text{cm}$; $d=1\text{cm}$; $\theta= 1,2\text{rad}$ (fundo de escala); $B=0,2\text{T}$ ($1\text{T}= 1\text{N/Am}$); $n=100$; resistência do fio da bobina (AWG 41, aprox. $0,004\text{mm}^2$) : $4,5\Omega/\text{m}$

respostas: $\Phi=4.10^{-3}\text{ Nm/A}$; $K= 3,33.10^{-6}\text{ Nm/rad}$; $r_g = 27\Omega$

2.2 - Calcular o valor do resistor que deve ser ligado com o galvanômetro do exercício 1, para que possamos medir com ele uma tensão de 10V (fundo de escala). Desenhar o circuito.

resposta: $R= 9973\Omega$

2.3 - Calcular o valor do resistor que deve ser ligado com o galvanômetro do exercício 1, para que possamos medir com ele uma corrente de 1A (fundo de escala). Desenhar o circuito.

resposta: $R= 0,027\Omega$

2.4 - Calcular a perda própria em cada um dos instrumentos dos exercícios 2 e 3 .

respostas: ex.2 $P= 10\text{mW}$ ex.3 $P= 27\text{mW}$

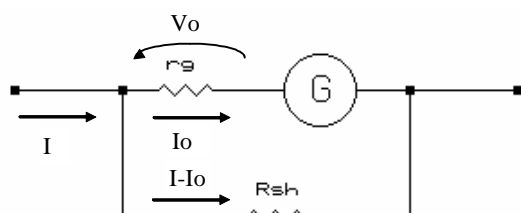
2.2- Aplicações dos Instrumentos Analógicos

2.2.1 – Medição de Sinais Contínuos Com Instrumentos Galvanométricos (Bobina Móvel)

Um galvanômetro é basicamente um dispositivo indicador de pequenas correntes. Quando adequadamente associado a outros componentes, pode destinar-se a indicação de outras grandezas, desde a diferença de potencial eléctrico (Vôltímetro) e valores elevados de corrente (Amperímetro) até temperatura, pressão etc., desde que estas últimas tenham sido adequadamente convertidas, por transdutores, para corrente eléctrica.

a - Amperímetros

Sempre que é necessário medir uma corrente superior à corrente de fundo de escala (I_o) do dispositivo, utiliza-se um resistor de derivação de corrente denominado de shunt (derivação ou desvio, em inglês). Através desse resistor é desviada a corrente superior a I_o , que de outra maneira danificaria o dispositivo. Esse artifício, bem como a equação para determinação de R_{sh} são mostrados em seguida.



$$R_{sh} = \frac{V_o}{I - I_o} \Rightarrow R_{sh} = \frac{r_g I_o}{I - I_o}$$

A

tensão de fundo de escala V_o pode ser determinada pelo produto da corrente de fundo de escala I_o pela resistência da bobina móvel r_g :

$$V_o = r_g I_o$$

Quando é necessário construir um instrumento com vários alcances de medição, é utilizada uma chave comutadora (no caso de um pólo, três posições) para diversos resistores de shunt, um para cada alcance, como mostra o desenho ao lado.

A resistência interna do instrumento será:

$$R_{iA} = r_g // R_{sh}$$

Outro tipo de limitador de corrente é o denominado derivador ou shunt de Ayrton. Nessa montagem cujo diagrama se encontra ao lado, podem-se estabelecer as seguintes relações:

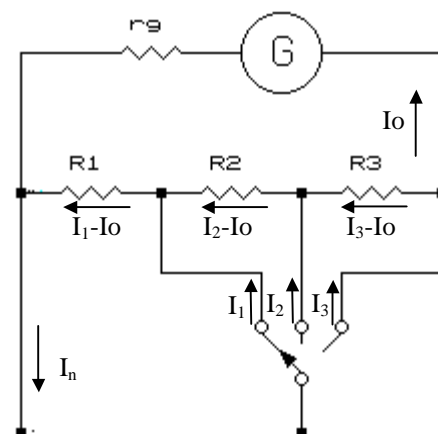
$$\text{para } I_n = I_1 \rightarrow (I_1 - I_o)R_1 = I_o(r_g + R_2 + R_3)$$

$$\text{para } I_n = I_2 \rightarrow (I_2 - I_o)(R_1 + R_2) = I_o(r_g + R_3)$$

$$\text{para } I_n = I_3 \rightarrow (I_3 - I_o)(R_1 + R_2 + R_3) = I_o r_g$$

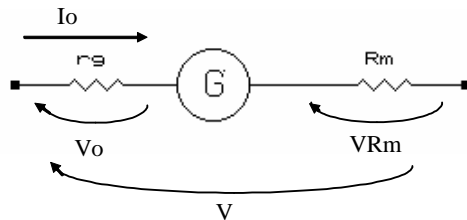
$$\text{sendo } I_1 > I_2 > I_3$$

Este é o método mais utilizado na construção de amperímetros de múltiplas escalas comutadas por chave, pois ao contrário do anterior, não desconecta o shunt do galvanômetro na comutação da chave, o que causa uma sobrecorrente no mesmo que poderia danificá-lo.



b - Voltímetros

Quando se deseja medir tensões superiores à tensão de fundo de escala do galvanômetro (V_o), utiliza-se um resistor ligado em série com o mesmo, denominado resistor multiplicador (R_m), que limita a tensão e a corrente. O diagrama abaixo mostra um circuito simples e sua equação:



A resistência interna do instrumento será:

$$R_{iV} = r_g + R_m$$

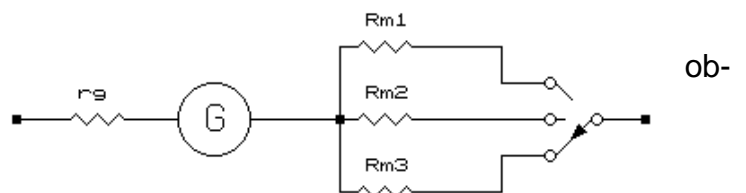
$$V_{Rm} = V - V_o \text{ e sendo}$$

$$V_{Rm} = R_m I_o \text{ e } V_o = r_g I_o, \text{ teremos:}$$

$$R_m I_o = V - r_g I_o, \text{ ou}$$

$$R_m = \frac{V - r_g I_o}{I_o}$$

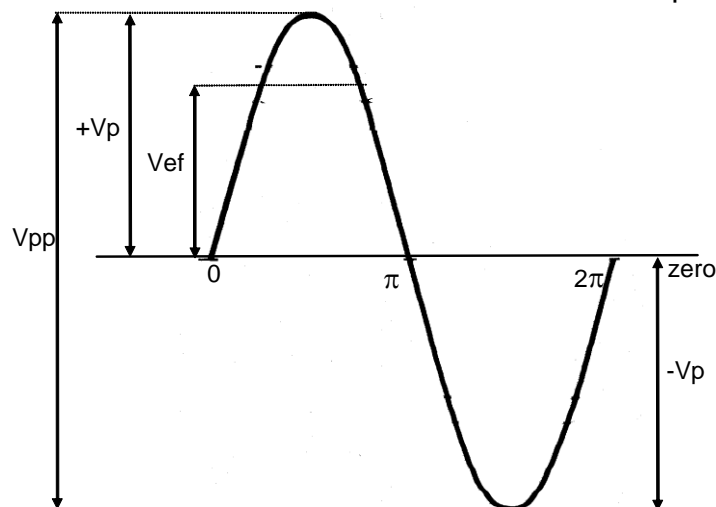
No circuito ao lado podemos servir um voltímetro para 3 alcan-
ces.



2.2.2– Revisão de Sinais Alternados

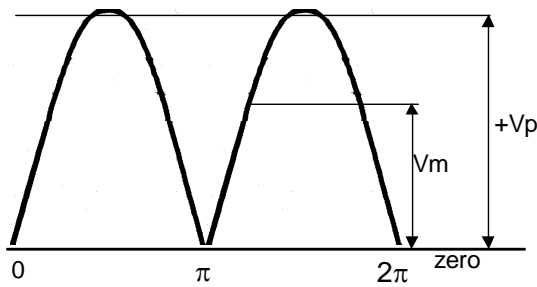
Neste item vamos abordar a maneira de se determinar o valor eficaz e o valor médio após a retificação de tensões e correntes alternadas.

Excetuando-se alguns casos especiais, onde é realmente necessária a medição dos valores de pico ou médio, a maneira mais utilizada para representar um sinal alternado é a tensão eficaz ou RMS (de *root mean square* ou raiz quadrada da média dos quadrados). A única maneira correta de medir a capacidade de transferência de energia de uma forma de onda (entenda-se o trabalho realizado) é através de seu valor eficaz, que equivale à amplitude que uma tensão contínua precisa ter para transferir a mesma energia que uma tensão alternada em um dado período de tempo.



Os valores de pico (V_p ou I_p , $V_{m\acute{a}x}$ ou $I_{m\acute{a}x}$) e de pico a pico (V_{pp} ou I_{pp}) são intuitivos e podem ser entendidos com a simples observação do gráfico acima.

a – Valor médio



O valor médio (V_m ou I_m , representado no gráfico da tensão retificada em onda completa, abaixo) é a média das tensões instantâneas do período T de um ciclo da onda:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

(válida para qualquer forma de onda)

e sendo $v(t) = V_p \sin \omega t$ e $T = \pi$ teremos:

$$V_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_p \sin \omega t dt \quad \text{ou} \quad V_m = \frac{V_p}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{V_p}{\pi} [-\cos \pi - (-\cos 0)]$$

que resulta em

$$V_m = \frac{2V_p}{\pi}$$

(válida apenas para ondas senoidais)

Convém lembrar que o valor médio de um sinal alternado simétrico (semiciclos positivo e negativo iguais) é zero.

b – Valor eficaz ou RMS

A quantidade de energia ΔE dissipada em um resistor de valor R , quando uma tensão de valor v é aplicada a ele por um determinado período de tempo Δt , é dada por:

$\Delta E = \frac{v^2}{R} \Delta t$. Para tensões que variam com o tempo, teremos $dE = \frac{v^2(t)}{R} dt$, sendo a quantidade total de energia transformada em calor no resistor, no intervalo entre $t=0$ e $t=T$ igual a: $E = \int_0^T \frac{v^2(t)}{R} dt$ ou $E = \frac{1}{R} \int_0^T v^2(t) dt$.

Se for considerada uma tensão contínua V_{cc} sobre o resistor do exemplo, a energia dissipada será: $E = \frac{V_{cc}^2}{R} T$.

Como o valor eficaz de uma tensão alternada é definido como o valor de tensão contínua que produz, sobre um resistor, a mesma quantidade de energia que essa tensão alternada em um determinado intervalo de tempo ($V_{ef}=V_{cc}$), temos que :

$$\frac{1}{R} \int_0^T v^2(t) dt = \frac{V_{cc}^2}{R} T, \quad \text{ou} \quad \int_0^T v^2(t) dt = V_{ef}^2 T$$

Dessa relação obtemos a fórmula geral para determinação de uma tensão eficaz:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

(válida para qualquer forma de onda)

Para uma tensão alternada senoidal, onde $v(t)=V_p \sin \omega t$ e sendo $T=2\pi$, teremos:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_p^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{V_p^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t dt}$$

A regra de integração é : $\int \sin^2 x dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin 2x}{4}$, logo:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]_0^{2\pi}} = \sqrt{\frac{V_p^2}{2\pi} \left[\frac{2\pi}{2} - \frac{\sin 4\pi - \sin 0}{4} \right]}, \text{ ou}$$

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad \text{(válida apenas para ondas senoidais)}$$

A tabela a seguir traz as relações entre as formas de medição de sinais alternados senoidais puros, com o valor médio expresso para retificação de onda completa:

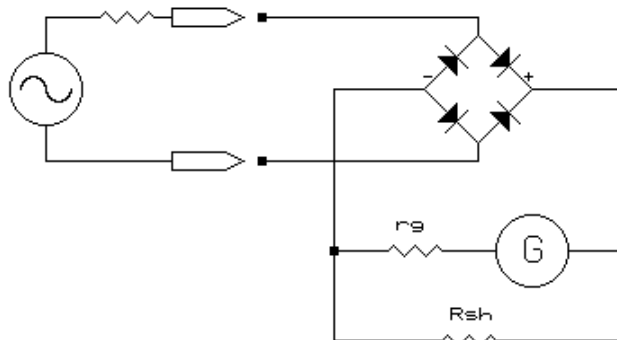
	média	pico	pico a pico	eficaz
média	1,000	1,572	3,144	1,111
pico	0,636	1,000	2,000	0,707
pico a pico	0,318	0,500	1,000	0,353
eficaz	0,899	1,414	2,828	1,000

2.2.3 – Medição de Sinais Alternados Com Instrumentos de Bobina Móvel

a – Voltímetros e Amperímetros

Conforme já foi visto anteriormente, um galvanômetro funciona apenas com tensão contínua. Se uma tensão alternada com frequência industrial (60 Hz) for aplicada a um dispositivo desse tipo, dada a rapidez com que a tensão muda de polaridade, o ponteiro permanecerá parado (na realidade vibrando) na posição de repouso.

A solução para se efetuar medições em corrente alternada utilizando um galvanômetro é retificar a tensão, como mostra o esquema abaixo para um amperímetro. Para esse caso, teremos sobre o dispositivo uma tensão contínua pulsante de onda completa, semelhante ao gráfico da página anterior.



O desvio do conjunto móvel (θ) será proporcional ao valor médio da corrente alternada:

$$I_m = \frac{2I_p}{\pi}$$

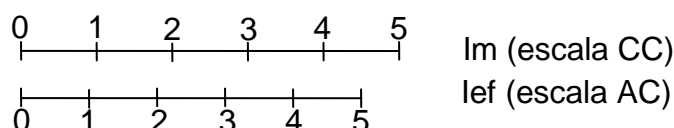
b - Fatores de Forma e de Pico

Como o desvio do conjunto móvel é proporcional ao valor médio de uma tensão variável, as escalas dos galvanômetros são construídas de modo a indicar esse valor. No entanto, a forma mais usual (e também a mais útil) de medir uma tensão não contínua é o valor eficaz, como foi visto no item 4.2. Portanto, se desejarmos transformar um galvanômetro em um instrumento de medição de tensão ou corrente alternadas, devemos construir outra escala, proporcional à variação do valor eficaz. A relação entre o valor eficaz e o valor médio (sendo este último o que o galvanômetro indica quando submetido a uma corrente alternada retificada, e que coincide com os valores da escala do instrumento para tensão contínua) pode ser determinada por um fator, que é único *para uma determinada forma de onda*, e que se denomina Fator de Forma (FF):

$$FF = \frac{I_{ef}}{I_m} = \frac{\frac{I_p}{\sqrt{2}}}{\frac{2I_p}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \Rightarrow FF = 1,11$$

(para um sinal alternado senoidal retificado em onda completa)

Podemos então afirmar que, para uma corrente alternada senoidal retificada em onda completa, $I_{ef} = 1,11 I_m$ e, através dessa relação, construir a nova escala de indicação para valores alternados senoidais:



Uma escala semelhante à acima pode ser encontrada nos multímetros, que efetuam medições tanto de grandezas alternadas quanto de contínuas.

Outra relação utilizada é o Fator de Pico (FP), que associa o valor de pico com o valor eficaz de um sinal:

$$FP = \frac{I_p}{I_{ef}} = \frac{I_p}{\frac{I_p}{\sqrt{2}}} \Rightarrow FP = 1,41$$

(para um sinal alternado senoidal retificado em onda completa)

2.2.4 – Medição de Sinais Alternados Com Instrumentos de Ferro Móvel

a – Voltímetros e Amperímetros

A deflexão destes instrumentos é proporcional ao quadrado do valor eficaz do sinal aplicado, sendo sua indicação o próprio valor eficaz do sinal. Sua escala é geralmente não linear, como pode ser visto na pág. 11. Outras características são descritas na pág. 12. São ainda hoje largamente utilizados em painéis elétricos, pela sua robustez e pela relativa independência em relação à forma de onda na indicação do valor eficaz do sinal medido.

2.2.5 – Resumo de Medição de Sinais Alternados (para onda simétricas)

	QUALQUER ONDA	ONDA SENOIDAL	ONDA QUADRADA	ONDA TRIANGULAR
ONDA COMPLETA	$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$	$V_m = \frac{2V_p}{\pi}$ $V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$	$V_m = V_p$ $V_{ef} = V_p$	$V_m = \frac{V_p}{2}$ $V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{3}}$
$\frac{1}{2}$ ONDA	$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$	$V_m = \frac{V_p}{\pi}$ $V_{ef} = \frac{V_p}{2}$	$V_m = \frac{V_p}{2}$ $V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$	$V_m = \frac{V_p}{4}$ $V_{ef} = \frac{V_p}{2,46}$

Instrumentos de Bobina Móvel (BM) ou galvanométricos

- sua deflexão é proporcional ao valor médio da grandeza medida
- com retificação do sinal aplicado sua indicação será o valor médio da onda
- com retificação do sinal aplicado e escala corrigida sua indicação será:

$$V_{ind} = V_{m_{onda}} \cdot FF_{inst} \quad (FF_{inst} = 1,11 \text{ para instrumentos comerciais})$$
- para ondas senoidais a indicação será exatamente o valor eficaz da onda, pois a escala dos instrumentos comerciais é corrigida para esse tipo de sinal; para outros tipo de onda apresentará erro.

Instrumentos de Ferro Móvel (FM)

- sua deflexão é proporcional ao valor eficaz da grandeza medida
- sua indicação será:

$$V_{ind} = V_{ef_{onda}}$$
- sua indicação será equivalente ao valor eficaz de quase todos os tipos de forma de onda.








INPUT WAVEFORM	DISPLAY MULTIPLIER FOR MEASUREMENT CONVERSION			
	PK-PK	0-PK	RMS	AVG
SINE 	2.828	1.414	1.000	0.900
RECTIFIED SINE (FULL WAVE) 	1.414	1.414	1.000	0.900
RECTIFIED SINE (HALF WAVE) 	2.828	2.828	1.414	0.900
SQUARE 	1.800	0.900	0.900	0.900
RECTIFIED SQUARE 	1.800	1.800	1.272	0.900
RECTANGULAR PULSE  D=X/Y	0.9/D	0.9/D	0.9/D ^{1/2}	0.9D
TRIANGLE SAWTOOTH 	3.600	1.800	1.038	0.900

Figure 2-2. Waveform Conversion

Convém lembrar que mesmo os instrumentos digitais apresentarão erro ao medir ondas não senoidais, pois a correção da sua indicação é feita pelo fator de forma do sinal senoidal (1,11).

Apenas em uma classe de instrumentos digitais esse erro não ocorre: são os chamados instrumentos *True RMS* ou instrumentos com indicação do valor eficaz real.

A tabela ao lado, de 1979, foi retirada do manual do multímetro digital Fluke modelo 8020A. O fabricante alerta para a indicação errônea em ondas não senoidais e informa os fatores de correção para as formas de onda mais comuns.

Em inglês a indicação das formas de medição de sinais alternados é um pouco diferente:

eficaz $\Rightarrow V_{eff}$ ou V_{rms}

médio $\Rightarrow V_{avg}$

(avg de *average*, médio)

pico $\Rightarrow V_{pk}$

(pk de *peak*, pico)

2.2.6 – Medição de Resistências Eléctricas

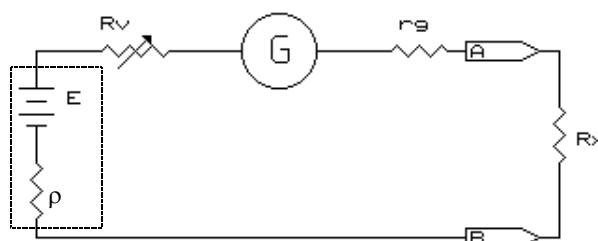
A medição da resistência eléctrica é obtida através de métodos indirectos, com a medição da corrente que circula por um resistor desconhecido (que chamaremos de R_x) e/ou da tensão sobre ele.

Para medições de resistências baixas (geralmente inferiores a 1Ω), são utilizadas pontes de medição, que serão estudadas mais adiante; resistências de valores médios (de 1Ω a $1M\Omega$) são determinadas através de ohmímetros; e, finalmente, resistências altas (acima de $1M\Omega$) são obtidas com o auxílio de instrumentos denominados megômetros.

O instrumento que se propõe a medir um valor de resistência, possui na maioria das vezes uma fonte de tensão interna, que pode ser de alguns volts, como no caso dos multímetros de bancada, até milhares de volts, no caso dos megômetros.

a – Ohmímetro Série

Este é o método mais comum de medição de resistências. O diagrama abaixo é uma simplificação dos instrumentos comerciais existentes, mas que possibilita o estudo de seu princípio de funcionamento.



Uma fonte de tensão E , com uma resistência interna ρ , alimenta um galvanômetro cuja corrente é limitada pelo resistor variável R_v . Os pontos A e B (pontas de prova) do circuito são interligados ao resistor cujo valor se deseja determinar. A deflexão do galvanômetro será inversamente proporcional ao valor do resistor:

- para $R_x=0$ (A e B em curto) $I_x=I_o$ (fundo de escala)
- para $R_x=\infty$ (A e B em aberto) $I_x=0$ (início da escala).

A escala do instrumento será redesenhada para indicar valores ôhmicos.

Este tipo de instrumento deve ser calibrado antes de se efetuar uma medida, curtocircuitando-se os pontos A e B ($R_x=0$) e ajustando R_v para que o instrumento indique zero em sua escala. Tal procedimento é necessário devido ao fato de que a resistência interna ρ da bateria aumenta com a descarga da mesma, o que poderá levar a erros de medição.

Podemos definir as equações do circuito:

$$1) E=(\rho+R_v+r_g+R_x)I_x \quad (\text{para } R_x \text{ qualquer})$$

$$2) E=(\rho+R_v+r_g)I_o \quad (\text{para } R_x=0)$$

Igualando-se 1 e 2, teremos:

$(\rho+R_v+r_g+R_x)I_x=(\rho+R_v+r_g)I_o$, onde $(\rho+R_v+r_g)=R_T$ (resistência interna do ohmímetro).

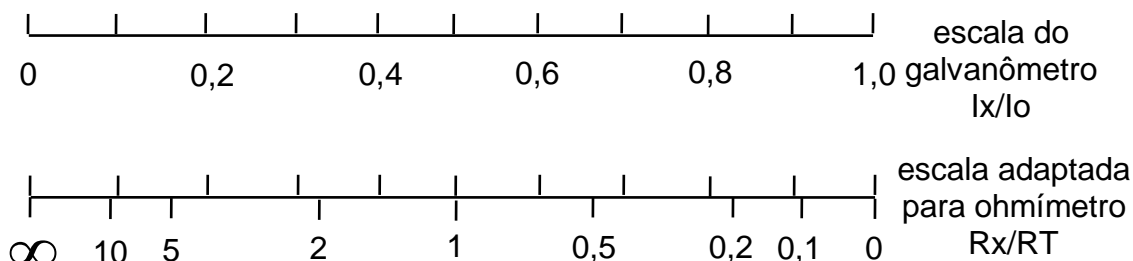
A equação ficará: $(R_T+R_x)I_x= R_T I_o$, ou $\frac{I_x}{I_o} = \frac{R_T}{R_T + R_x}$

Dividindo-se o 2º membro por R_T , teremos: $\frac{I_x}{I_o} = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_T}}$

Para um valor de R_T genérico igual a 1, teremos:

R_x	0	$R_T/10$	$R_T/5$	$R_T/2$	R_T	$2R_T$	$5R_T$	$10R_T$	∞
I_x/I_o	1	0,91	0,833	0,67	0,5	0,33	0,167	0,091	0
R_x/R_T	0	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	máx

A escala de medição de resistências pode, a partir da tabela, ser então desenhada:



Como é possível notar, a escala é exponencial (não linear).

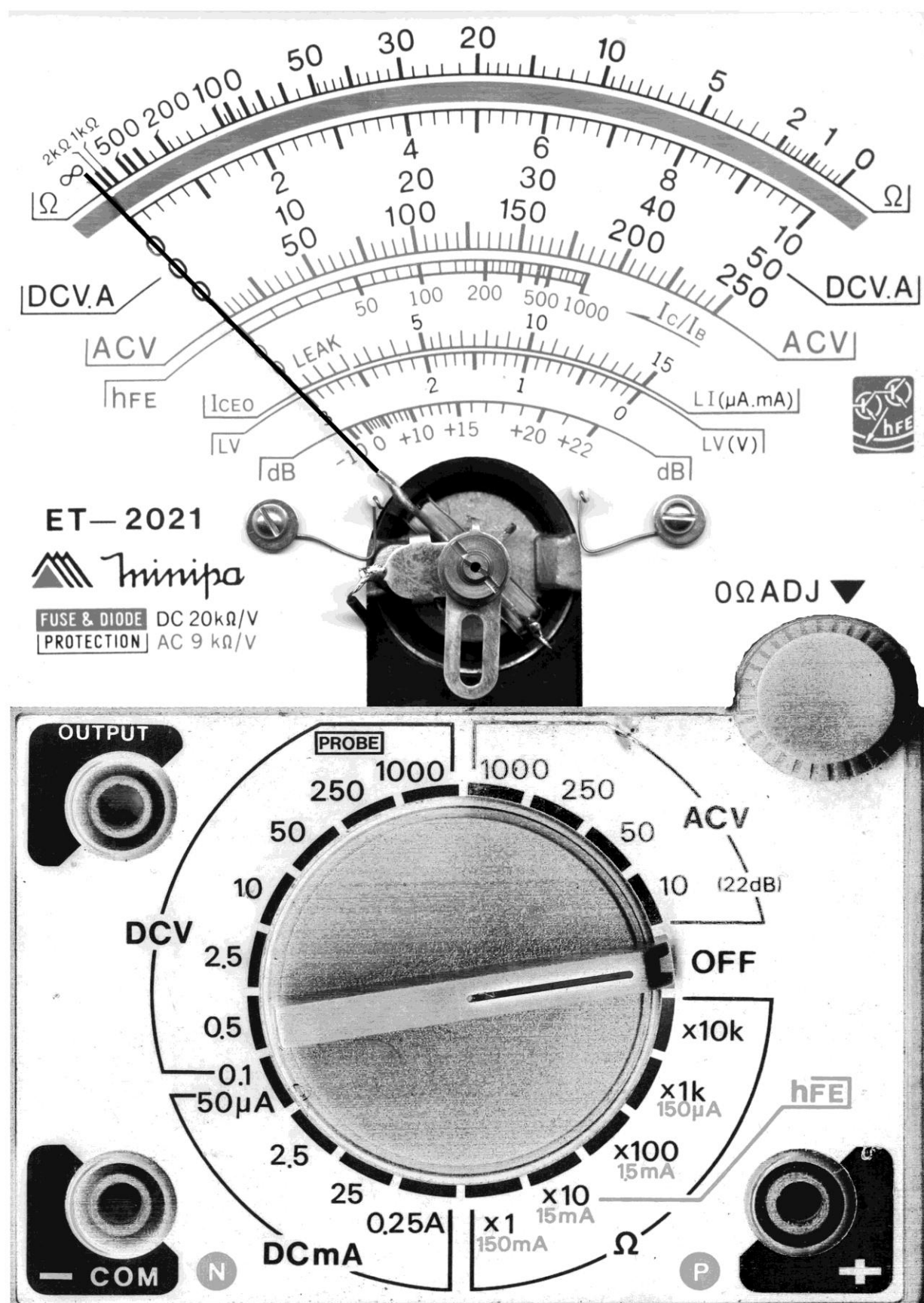
Para se determinar o valor de R_x a partir da relação I_x/I_o , fazemos:

$$R_x = \left(\frac{I_o}{I_x} - 1 \right) R_T$$

2.2.7 – Especificações do Multímetro Minipa ET-2021

Na próxima página é mostrado o painel de um instrumento analógico denominado multímetro, que efetua múltiplas medidas de grandezas eléctricas. De seu manual foram retiradas as seguintes informações:

Painel frontal ⇒ (-) COM terminal de entrada comum (negativo) ⇒ (+) INPUT terminal de entrada positivo ⇒ OUTPUT terminal com capacitor ⇒ Chave seletora de funções e faixas ⇒ Potenciômetro de ajuste de zero ⇒ Ajuste de zero mecânico Especificações Gerais ⇒ Baterias: 2 X 1,5V e 1 X 9V ⇒ Temperatura de Operação: 0°C a 40°C ⇒ Temperatura de Armazenamento: -20°C a 70°C ⇒ Umidade Relativa: menor que 80% ⇒ Dimensões: 148(A) X 98(L) X 40(P) mm ⇒ Peso: 330g ⇒ Acessórios: Manual de Operação, Pontas de Prova ⇒ Acessórios Opcionais: Bolsa para Transporte Especificações Eléctricas Tensão CC Faixas: 0,1V / 0,5V / 2,5V / 10V / 50V / 250V / 1000V Sensibilidade: 20KΩ/V Exatidão: ±3% do fundo de escala (fs)	Tensão CA Faixas: 10V / 50V / 250V / 1000V Sensibilidade: 9KΩ/V Exatidão: ±4% do fundo de escala (fs) Corrente CC Faixas: 50μA / 2,5mA / 25mA / 250mA Exatidão: ±3% do fundo de escala (fs) Resistência Faixas: RX1 / RX10 / RX100 / RX1KΩ / RX10KΩ Exatidão: ±3% do arco da escala Centro: 20Ω Decibéis Faixa: -10dB a +22dB para a faixa de 10VCA Adicionar 14/28/40dB para as faixas de 50/250/1000VCA Transistor hFE: fator de amplificação CC 0 – 1000 LEAK, I _{ceo} , I _I : corrente de fuga LV: tensão sobre os terminais OUTPUT Detectar sinal CA eliminando componente CC
--	---



(ampliação de aproximadamente 1,7 vezes)

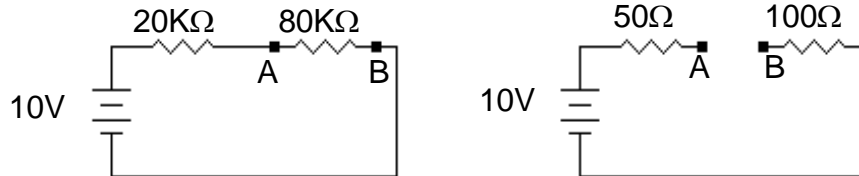
EXERCÍCIOS

2.5 - (P3 1º Sem. 95) Dado um galvanômetro com $I_0 = 100\mu\text{A}$ e $r_g = 1\text{K}\Omega$,

a) projetar com esse galvanômetro os seguintes instrumentos:

- um voltímetro com alcances de 1V, 10V e 50 V;
- um amperímetro (*não utilizar derivador de Ayrton*) com alcances de 1mA, 100mA e 500mA.

b) determinar o erro porcentual de medição que os instrumentos projetados causariam se fossem interligados aos pontos A e B dos circuitos abaixo:

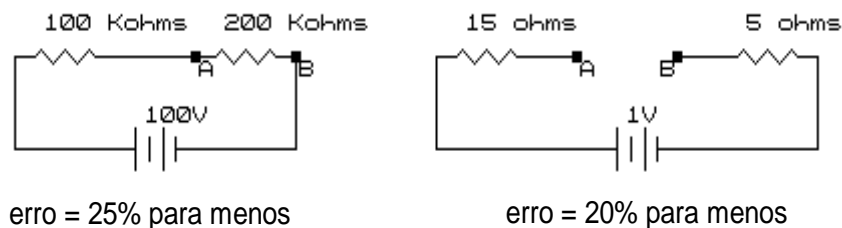


Obs.: por "projetar", entende-se:

- efetuar os cálculos dos valores dos componentes necessários aos dispositivos;
- desenhar os diagramas esquemáticos dos dispositivos.

Respostas: $R_m = 9\text{K}\Omega$, $99\text{K}\Omega$ e $499\text{K}\Omega$; $R_{sh} = 111,11\Omega$, $1,001\Omega$ e $0,2\Omega$;
erro volt. 13,75% para menos; erro amp. 0,66% para menos.

2.6 - Um galvanômetro com $r_g = 1\text{K}\Omega$ foi utilizado para a montagem de um voltímetro de 100V e um amperímetro de 100 mA. Ao serem corretamente introduzidos os instrumentos nos circuitos abaixo (entre os pontos A e B) foram obtidos os erros assinalados. Determinar I_0 , R_m , R_{sh} , R_i volt, e R_i amp.



erro = 25% para menos

erro = 20% para menos

Respostas: $I_0 = 0,5\text{mA}$; $R_m = 199\text{K}\Omega$; $R_{sh} = 5,025\Omega$; $R_{i_{\text{volt}}} = 200\text{K}\Omega$; $R_{i_{\text{amp}}} = 5\Omega$

2.7 - Um voltímetro-amperímetro com duas escalas (escala 1 para 10V ou 0,1A e escala 2 para 50V ou 0,5A) foi danificado e alguns de seus componentes destruídos. Foi possível levantar algumas de suas características, que estão na tabela abaixo. Determine, demonstrando através de cálculos, as restantes, completando a tabela de forma a reconstruir o instrumento.

r_g	I_0	EFICIÊNCIA	R_{m1}	R_{m2}	R_{sh1}	R_{sh2}
		A	10V	50V	0,1A	0,5A
		$10\text{K}\Omega/\text{V}$		$498\text{k}\Omega$		

Respostas: $r_g = 2\text{K}\Omega$; $I_0 = 100\mu\text{A}$; $R_{m1} = 98\text{K}\Omega$; $R_{sh1} = 2,002\Omega$; $R_{sh2} = 0,4\Omega$

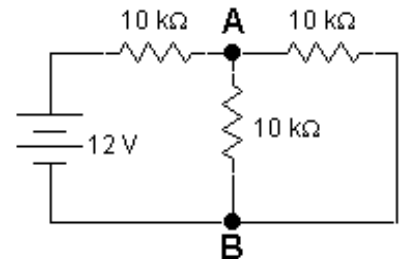
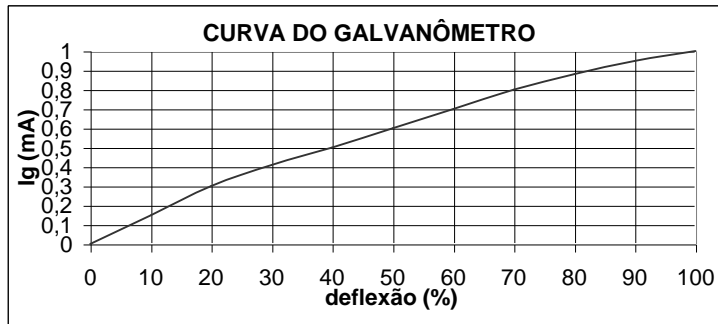
2.8 - Projete um amperímetro utilizando derivador de Ayrton, para as escalas de $1\mu\text{A}$, $2\mu\text{A}$ e $5\mu\text{A}$. As características do galvanômetro são: $r_g = 100\Omega$ e $I_0 = 0,5\mu\text{A}$.

Respostas: $R_{sh} = 20\Omega$, 30Ω e 50Ω .

2.9 - (P1 2/00) Um galvanômetro com $I_0 = 1\text{mA}$ e $r_g = 500\Omega$, cuja curva de linearidade aparece abaixo, foi utilizado na construção de um voltímetro de 10V de fundo de escala. Determinar:

- o valor do resistor multiplicador R_m ;
- a indicação do voltímetro quando se aplica ao mesmo 5V;
- a eficiência do voltímetro em Ω/V ;
- o erro porcentual na medição da tensão entre os pontos A e B do circuito dado.

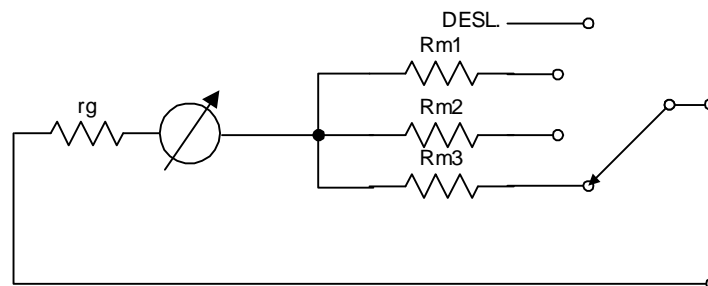
Obs. Nos itens b) e d) deve ser considerada a curva de linearidade do galvanômetro.



Respostas a- 9,5KΩ; b- 4V; c- 1000Ω/V; d- 50% para menos

2.10 - (P1-1-01) Dado o diagrama abaixo, e sabendo que os dados do galvanômetro são: $r_g = 1\text{K}\Omega$ e $I_0 = 1\text{mA}$:

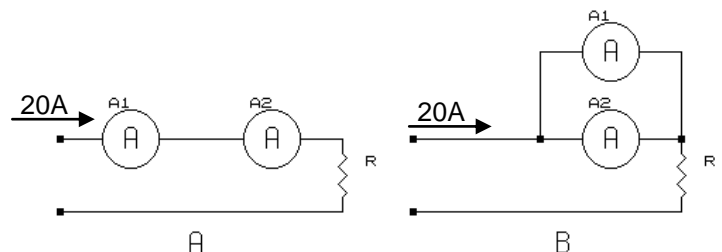
- Projetar o voltímetro para os alcances de 10V, 100V e 300V.
- Determinar o erro porcentual nas medições das três escalas, caso o resistor R_{m2} sofra uma alteração de 10%, para mais, em seu valor.



Respostas a- 9KΩ, 99KΩ, 299KΩ; b- 9,01% para menos

2.11 - (P1-2-01) Os amperímetros A1 e A2 dos circuitos abaixo foram construídos a partir de galvanômetros com $I_0 = 1\text{mA}$ e $r_g = 1\text{K}\Omega$. Na montagem A, as quedas de tensão em A1 e A2 foram respectivamente 0,2V e 0,5V. Sabendo que os instrumentos são lineares determine:

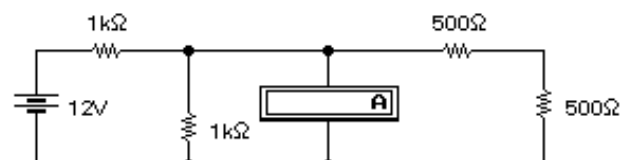
- as indicações nos mesmos instrumentos para a montagem B;
- os alcances (fundo de escala) de cada instrumento;
- os valores dos respectivos resistores de shunt.



Respostas a- 14,29A, 5,71A; b- 100A, 40A; c- 0,01Ω, 0,025Ω

2.12 - (P1-2-97) Um amperímetro foi acidentalmente instalado no circuito abaixo. Sabe-se que a R_i do instrumento é $1,25\Omega$, seu alcance 20mA e que, quando seu galvanômetro é utilizado para implementar um voltímetro com 50V de alcance, o valor de R_m é $99,95\text{K}\Omega$. Determinar:

- (1,5) a corrente indicada pelo instrumento;
- (1,5) a corrente I_0 do galvanômetro;
- (1,0) o valor da R_{sh} do amperímetro.

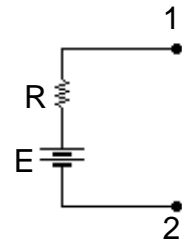


Respostas: a) 11,96mA; b) 500μA c) 1,28Ω;

2.13 – (P3-2-97) Dois voltmímetros para tensão contínua, V1 e V2, têm as seguintes características:

- a- V1: mede de 0 a 120V, com corrente de fundo de escala no galvanômetro de 40mA
- b- V2: mede de 0 a 120V, com corrente de fundo de escala no galvanômetro de 50mA

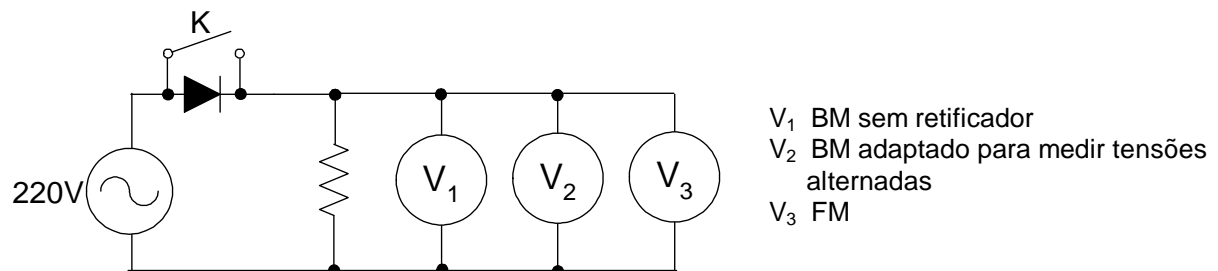
Quando V1 é ligado sozinho entre os pontos 1 e 2 do circuito ao lado, ele indica 60V. Quando V2 é ligado sozinho entre os mesmos pontos, ele indica 54V. Determinar os valores de E e R da figura.



Respostas: 108V e 2400Ω

2.14- Dado o diagrama abaixo determinar, para as duas posições da chave (desenhar todas as formas de onda):

- a- a indicação dos instrumentos
- b- o erro percentual em cada medição
- c- o fator de forma do instrumento para medir corretamente ½ onda senoidal



Respostas:

chave fechada $V_1 = \text{zero}$; $V_2 = 220V$, 0 %; $V_3 = 220V$, 0%;

chave aberta $V_1 = 98,79V$, 36,31% para menos; $V_2 = 109,66V$; 29,3% para menos; $V_3 = 155,1V$; 0%;

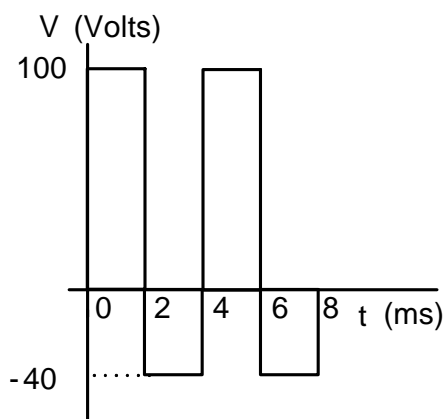
fator de forma = 1,57 ($\pi/2$)

2.15 - Um voltmímetro AC de bobina móvel, para onda senoidal, utiliza uma ponte para retificar a tensão alternada. Um dos diodos dessa ponte abriu. Determine:

- a- o erro percentual nas medições;
- b- qual o fator de forma da tensão que chega ao galvanômetro.

Respostas: erro =50% para menos; FF = 1,57.

2.16 - A forma de onda abaixo é medida com dois voltmímetros:



V_1 - instrumento de ferro móvel

V_2 - instrumento de bobina móvel com retificador de onda completa (escala corrigida pelo F.F.=1,11)

Determinar:

- a- as indicações dos dois instrumentos;
- b- o erro percentual nas medições
- c- o fator de forma que o instrumento deveria ter para medir corretamente a forma de onda do gerador

Respostas: $V_1=76,16V$; 0%; $V_2=77,7V$; 2% para mais; F.F.=1,088

2.17 - Para o exercício anterior, caso um dos diodos responsáveis pela retificação do semiciclo positivo abra, determinar:

- a) o valor indicado pelo instrumento;
- b) o valor eficaz da tensão (½ onda).

Respostas: $V_{ind}=22,2V$; $V_{ef}=28,28V$

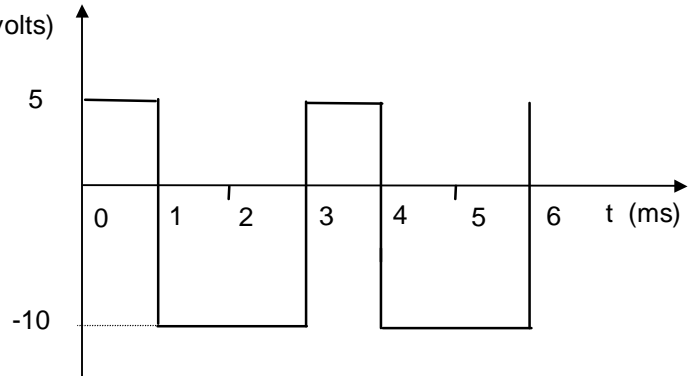
2.18 – A partir das fórmulas da tabela da pág. 22, determinar os Fatores de Forma e Pico para sinais senoidais, triangulares e quadrados simétricos, para meia onda e onda completa.

Respostas:

onda comp.: senoidal $FF=1,11$; $FP=1,41$; quadrado $FF=1,00$; $FP=1,00$; triangular $FF=1,15$; $FP=1,73$;
1/2 onda: senoidal $FF=1,57$; $FP=2,00$; quadrado $FF=1,41$; $FP=1,41$; triangular $FF=1,63$; $FP=2,46$;

2.19 - Um galvanômetro foi utilizado para construir um voltímetro e possui duas escalas selecionadas por chave: uma para tensão contínua e outra para alternada senoidal (ponte retificadora de onda completa e $FF=1,11$).

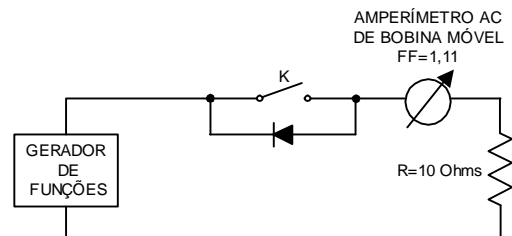
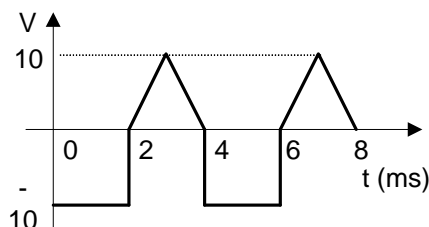
- Determinar a indicação na escala alternada do instrumento para a forma de onda abaixo e o erro percentual da indicação.
- Determinar o fator de forma que a V (volts) escala deveria ter para se medir a forma de onda dada.
- Qual seria a tensão indicada na escala contínua? (Assumir que a polaridade do instrumento está correta.)
- Qual seria a tensão indicada se um dos diodos responsáveis pela retificação do semiciclo negativo abrisse?
- Qual seria a indicação de um voltímetro de ferro móvel ao qual fosse aplicada a forma de onda do gráfico?



Respostas: a) $V_{ind}=9,25V$, erro 6,81% para mais; b) $FF_{onda}=1,04$; c) -5V ou +5V;
 d) $V_{ind}=1,84V$; e) $V_{FM}=8,66V$

2.20 – (P1-2-98) O gerador de funções do circuito fornece a onda abaixo, que tem $FF=1,088$ e $V_{ef}=8,16V$. Determinar:

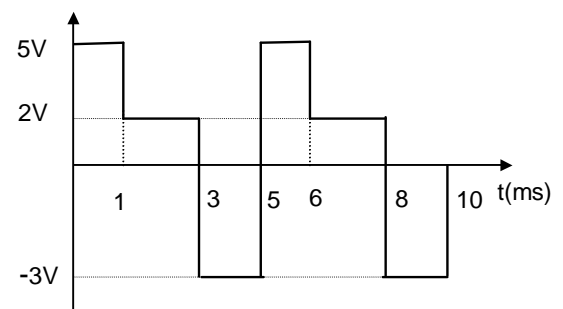
- (2,0) a corrente indicada pelo amperímetro com a chave K fechada;
- (1,0) o erro na medição do valor eficaz da corrente;
- (2,0) a corrente indicada pelo amperímetro com a chave K aberta.



Respostas: a) 832,5mA; b) 2,02% para mais; c) 0,555A

2.21 – (P1-2-97) A forma de onda abaixo foi aplicada a um instrumento galvanométrico adaptado para medir tensões alternadas, com $FF=1,11$. Pede-se:

- (1,5) a tensão indicada pelo instrumento (V_{ef});
- (1,5) o fator de forma da onda;
- (1,5) desenhar o diagrama do dispositivo;
- (1,5) a indicação do instrumento (em V_{ef}) caso um dos diodos responsáveis pelo semiciclo negativo abrisse.



Respostas: a) 3,33V; b) 1,063; d) 2V

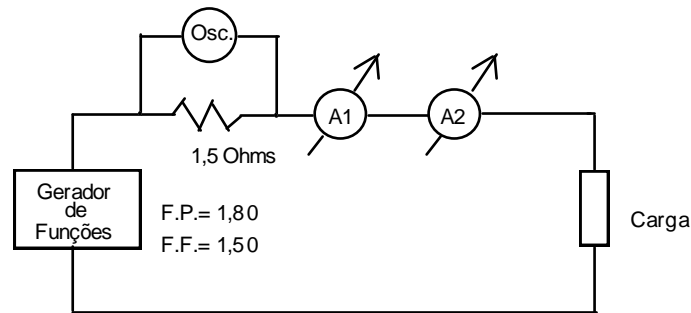
2.22 - Caso uma onda quadrada simétrica de 100Vp fosse aplicada a dois instrumentos, V1 de Bobina Móvel com $FF=1,11$ e V2 de Ferro Móvel, quais seriam os valores indicados e quais os fatores de forma e de pico da onda?

Respostas: $V1=111V$; $V2=100V$; $FF=1,00$; $FP=1,00$

2.23 - No circuito abaixo, o osciloscópio indica uma onda simétrica de 16,5 Vpp. Calcular as indicações dos amperímetros A1 e A2, sabendo que:

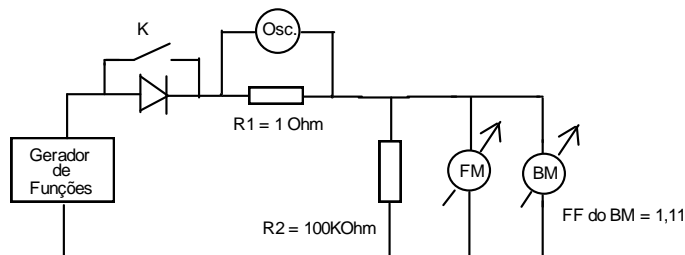
A1 - instrumento de ferro móvel

A2 - instrumento de bobina móvel com retificador de onda completa (escala corrigida pelo F.F.=1,11)



Respostas: A1=3,06A ; A2=2,26A

2.24 - (P1-1-95) Dado o circuito e sabendo que a forma de onda é simétrica em amplitude, determinar:



condição chave K	
fechada	aberta
FF = 1,3	VFM = 50 Vef *
FP = 1,5	VBM = 30,8 Vef *
VR1 = 2mVpp**	VR1 = 1mVp**

(* valores indicados pelos instrumentos)

(** valores lidos no osciloscópio)

- determinar as tensões indicadas em cada um dos instrumentos para a chave K fechada (considerar o fator de forma da escala);
- determinar o Fator de Forma da onda retificada para a chave K aberta.

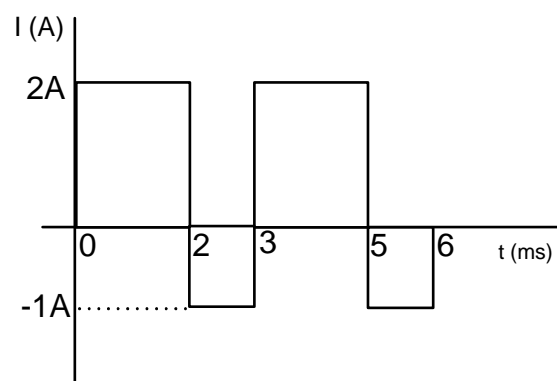
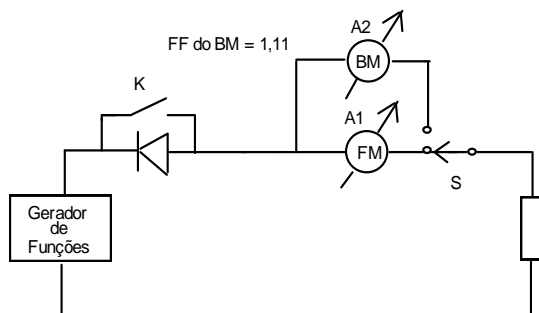
Respostas: VFM=66,6V; VBM=56,8V; FF=1,80

2.25 - (P3-1-95) A corrente no circuito abaixo, é medida por dois amperímetros, selecionados através da chave S:

A1 – instrumento de ferro móvel

A2 – instrumento de bobina móvel com retificador de onda completa (FF = 1,11)

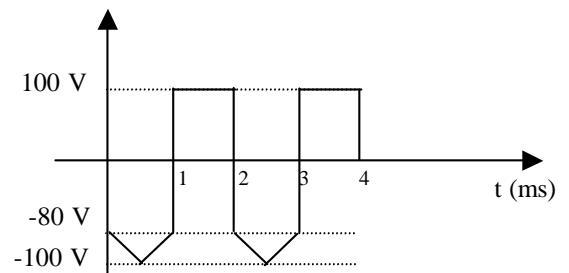
- calcular as indicações dos dois instrumentos (considerar o fator de forma da escala) para a chave K fechada;
- repetir o item a) , para a chave K aberta;
- determinar o fator de forma para cada caso.



**Respostas: a) IFM=1,73A; IBM=1,85A; FF=1,04;
b) IFM=0,58A; IBM=0,37A; FF=1,76**

2.26 – (P1-1-01) Um voltímetro foi construído com um galvanômetro e preparado para medir AC (FF=1,11). Um dos diodos (responsável pelo semiciclo negativo) da ponte retificadora do instrumento abriu. Determine a indicação do mesmo para uma tensão senoidal de 100Vpp e para a forma de onda ao lado.

Respostas senóide: 17,67V; gráfico: 55,5V



2.27 – (P2-1-00) Três formas de onda, todas simétricas com 10Vpp e período de 1ms, são aplicadas a dois instrumentos, X e Y, sendo obtidas as indicações abaixo. Determinar:

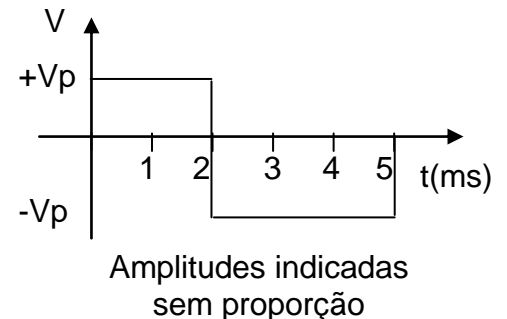
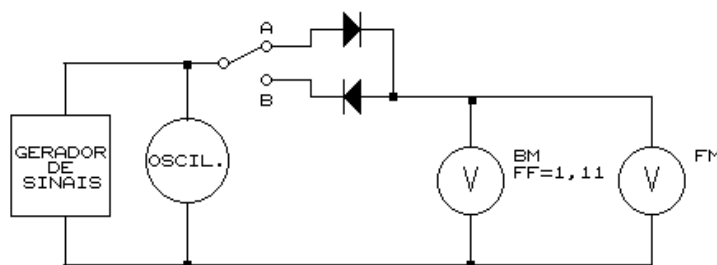
- qual o instrumento de Ferro Móvel (FM) e qual o de Bobina Móvel (BM) com FF = 1,11 (através de cálculos)
- quais os valores de tensão medidos não mostrados na tabela
- o erro percentual nas medições do instrumento de BM para as três formas de onda

ONDA	FF	FP	MEDIÇÕES		ERRO BM (%)
			Instrumento X (V)	Instrumento Y (V)	
TRIANGULAR	1,15	1,73	2,78	2,89	3,8 (para menos)
QUADRADA	1,00	1,00	5,55	5	11 (para mais)
SENOIDAL	1,11	1,41	3,54	3,54	0

Respostas a- X é BM e Y é FM; b-, c- em negrito na tabela

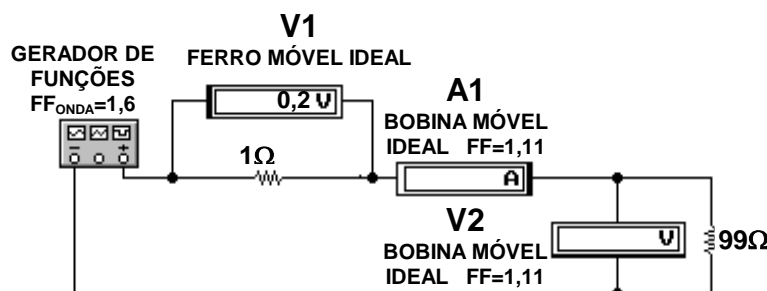
2.28 – (P2-2-00) No circuito abaixo, o osciloscópio apresentou a forma de onda dada. A indicação do instrumento de bobina móvel com a chave na posição A foi 5V. A indicação do instrumento de ferro móvel com a chave na posição B também foi 5V. Determinar:

- Os valores de pico positivo (+Vp) e negativo (-Vp) da onda;
- o valor indicado pelo instrumento de ferro móvel com a chave na posição A;
- o valor indicado pelo instrumento de bob. móvel com a chave na posição B.



Respostas a- +Vp = 11,25V, -Vp = 6,46V; b- 7,12V; c- 4,3V;

2.29 – (P3-2-98) Do circuito abaixo pede-se:



- indicação de A1 (escala Ief);
- a indicação de V2 (escala Vef);
- a tensão do gerador (Vef).

Obs.: A1 e V2 são instrumentos galvanométricos adaptados para medição de tensão e corrente alternadas através de pontes retificadoras de onda completa.

Respostas: a) 138,75mA; b) 13,74V c) 20V;

2.30 – (P2-2-97) Uma forma de onda simétrica de 10Vpp e frequência 60Hz é aplicada a dois instrumentos, um de Ferro Móvel e outro de Bobina Móvel ($FF=1,11$). O instrumento de FM indicou 4V e o de BM 3,5V na escala corrigida para AC. Determinar o Fator de Forma da onda.

Resposta: 1,269

2.31 – (P3-2-97) Um amperímetro é utilizado para medir corrente em um circuito composto por um gerador senoidal de 10Vpp aplicado a um resistor de 100Ω , sendo a indicação 35,46mA. O gerador foi substituído por um de onda quadrada simétrica em amplitude e semi-período, também de 10Vpp, sendo a indicação 55,5mA. Determinar se o instrumento é de Bobina Móvel com retificador de onda completa ou de Ferro Móvel.

Obs.: o período da onda quadrada pode assumir qualquer valor.

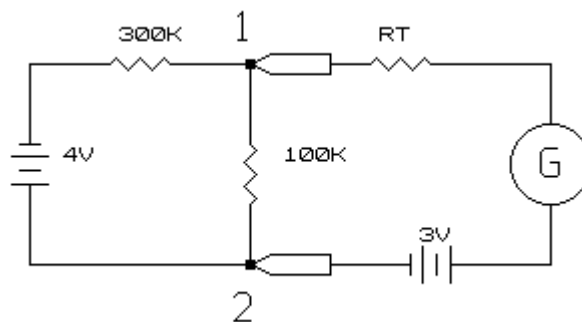
Resposta: Bobina Móvel (Justificar!)

2.32 – Um ohmímetro série é constituído por uma pilha $E = 1,5V$ e $\rho = 1\Omega$, uma resistência variável R_v , na faixa de 0 a 400Ω e um galvanômetro com $I_o = 10\text{ mA}$ e $r_g = 10\Omega$. Pede-se:

- a- que valor de R_v fará o galvanômetro indicar deflexão máxima quando a $R_x = 0$?
- b- que valor de R_x indicará meia deflexão?

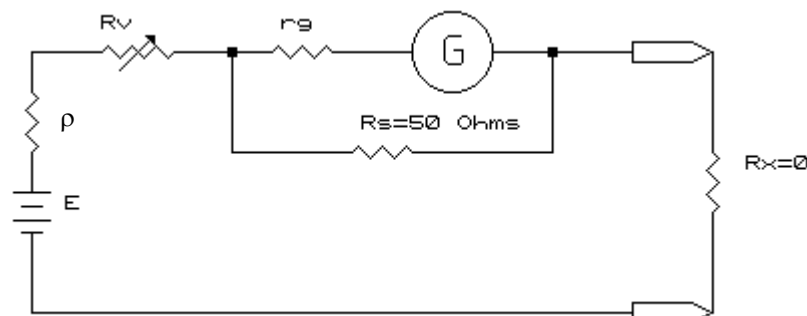
Respostas: a- $R_v = 139\Omega$; b- $R_x = 150\Omega$

2.33 – Um ohmímetro consta de uma pilha $E = 3V$, em série com uma resistência $R_T = 60K\Omega$ e um galvanômetro graduado em ohms. O instrumento é acidentalmente ligado entre os pontos 1 e 2 do circuito abaixo. Que valor em ohms indica esse ohmímetro?



Resposta: indicação do ohmímetro = $41,25K\Omega$

2.34 – Um galvanômetro tem $I_o = 0,1\text{ mA}$, $r_g = 50\Omega$. O mesmo é colocado no ohmímetro abaixo, onde a R_v está ajustada para 7400Ω e a pilha possui uma $E = 1,5V$, com $\rho = 75\Omega$. Determinar a variação de R_v necessária para zerar o ohmímetro quando a tensão da pilha varia para 1,1V, supondo ρ constante.



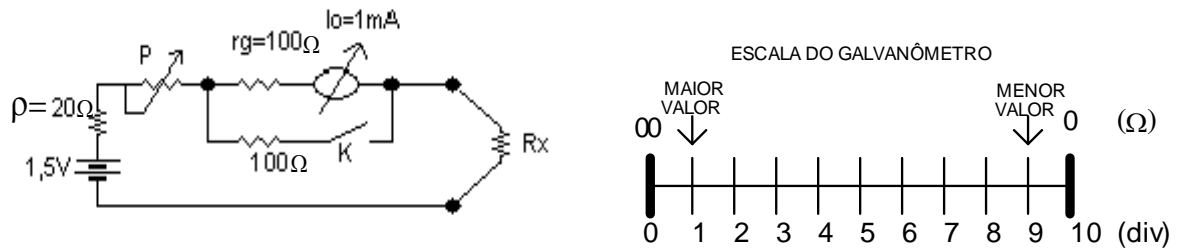
Resposta: $\Delta R_v = 2K\Omega$

2.35 – P2-2-97 O galvanômetro de um ohmímetro série com $R_T = 5K\Omega$ indicou centro de escala durante a medição de dois resistores em paralelo. Um dos resistores era de $27K\Omega$. determinar o valor do outro resistor.

Resposta: 6136Ω

2.36 – (P2 1º Sem/95) Dado o circuito do ohmímetro determinar, para a chave K aberta e fechada:

- o valor de P para calibrar o instrumento;
- o valor de R_x para o galvanômetro indicar meio de escala;
- o maior e menor valores de R_x mensuráveis em função da escala do galvanômetro.



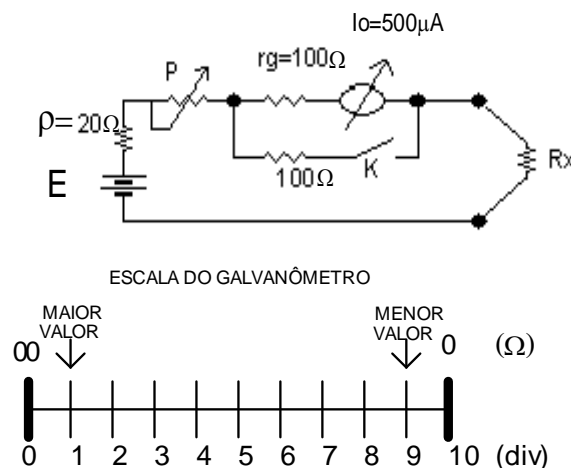
Respostas:

chave K aberta- $P=1380\Omega$; $R_x=1500\Omega$; $R_{x\text{máx}}=13500\Omega$ $R_{x\text{mín}}=166,7\Omega$.

chave K fechada- $P=680\Omega$; $R_x=750\Omega$; $R_{x\text{máx}}=6750\Omega$ $R_{x\text{mín}}=83,3\Omega$.

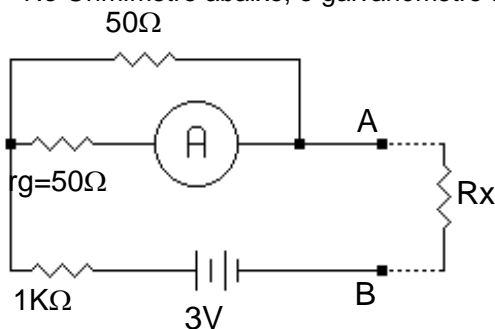
2.37 – P2-2-98 Dado o circuito do ohmímetro determinar:

- E sabendo que, para a chave K aberta, o valor de R_x para centro de escala é $12K\Omega$;
- o maior e menor valores de R_x mensuráveis para a chave K fechada.



Respostas: a) $12K\Omega$; b) $54K\Omega$ e $666,7\Omega$

2.38 – No Ohmímetro abaixo, o galvanômetro tem um fundo de escala de 1 mA. Determinar:



- o maior valor de R_x mensurável, para $I_g=10\mu A$;
- o menor valor de R_x mensurável;
- o valor de R_x para meia deflexão;
- o novo valor que o resistor de $1K\Omega$ deverá assumir para "zerar" o instrumento, com os pontos A e B curto-circuitados.

Respostas: a) 148.975Ω ; b) 475Ω ; c) 1975Ω ; d) 1475Ω

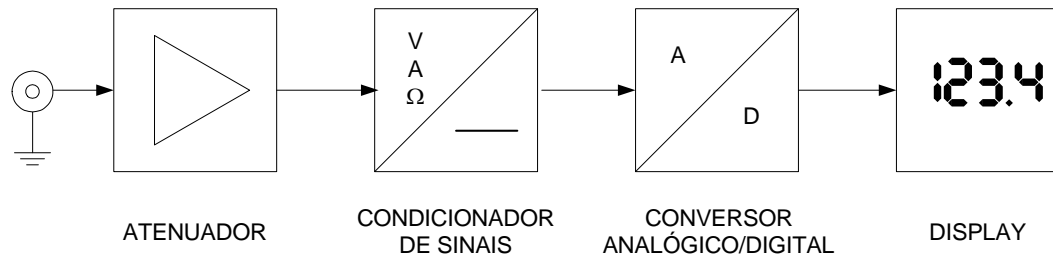
2.39 – Um ohmímetro série é constituído por uma bateria de 9V, com $\rho=10\Omega$, um potenciômetro de $10K\Omega$ e um galvanômetro com $I_o=1mA$ e $r_g=90\Omega$. Os valores máximo e mínimo de corrente que o galvanômetro pode detectar com exatidão são $950\mu A$ e $50\mu A$. Pede-se:

- desenhar o diagrama esquemático do ohmímetro;
- determinar o valor em que deve ser ajustado o potenciômetro para calibrar o instrumento;
- determinar a resistência interna total (R_T) do instrumento;
- determinar os valores máximo e mínimo de resistências que podem ser medidos.

Respostas: b) 8900Ω ; c) $9K\Omega$; d) $R_{x\text{máx}}=171K\Omega$, $R_{x\text{mín}}=473,7\Omega$.

3- INSTRUMENTOS DIGITAIS

A diferença entre os instrumentos digitais e os analógicos não se resume apenas na substituição do galvanômetro por um display: novos conceitos foram necessários para desenvolver esse tipo de dispositivo. O diagrama de blocos de um instrumento típico pode ser visto a seguir.



O estágio atenuador serve para adequar o nível do sinal elétrico a ser medido, geralmente tensão, corrente ou resistência, ao estágio condicionador de sinais, que converte as variáveis tensão e corrente alternadas e resistência (e outras) em tensão contínua. O conversor analógico/digital converte o sinal a ser medido em um número binário, que é formatado para, em seguida, ser mostrado no display.

Será usado como exemplo o multímetro digital M-2666K da ELENCO, vendido em forma de kit para montagem, e que é acompanhado por um manual detalhado que pode ser obtido em: <http://www.electronickits.com/kit/complete/meas/m-2666k.pdf>.

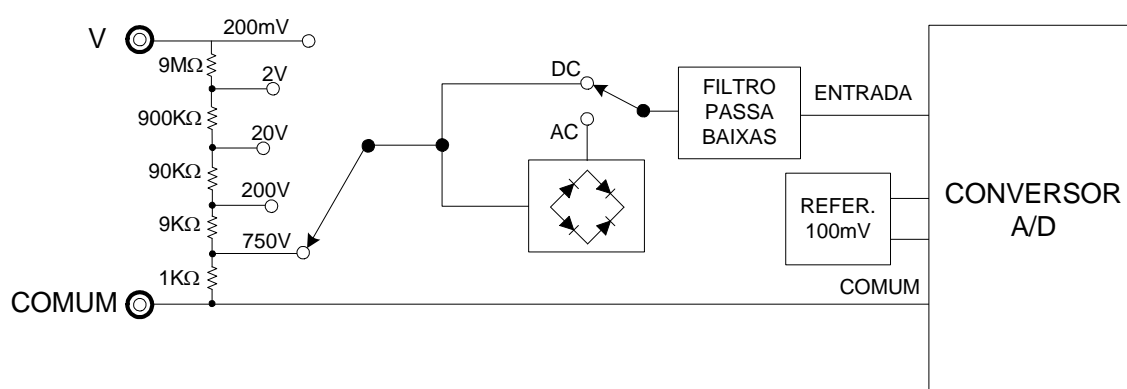


3.1- Circuitos Atenuadores e Condicionadores de Sinais

3.1.1 – Voltímetro

O sinal a ser medido passa por um divisor de tensão com relação de 1000:1. Caso 100V sejam aplicados à escala de 200V do voltímetro o divisor fará com que apenas 100mV cheguem ao conversor A/D. Caso o sinal seja alternado, este será retificado antes do conversor, desde que seja selecionada a opção AC no painel do instrumento.

É interessante observar que ao contrário dos instrumentos analógicos, onde a resistência interna muda para cada escala selecionada, neste tipo de divisor a resistência apresentada ao circuito que está sendo medido é sempre constante e, no exemplo, igual a 10M Ω . Não se utiliza portanto a relação Ω/V demonstrada nos voltímetros analógicos.



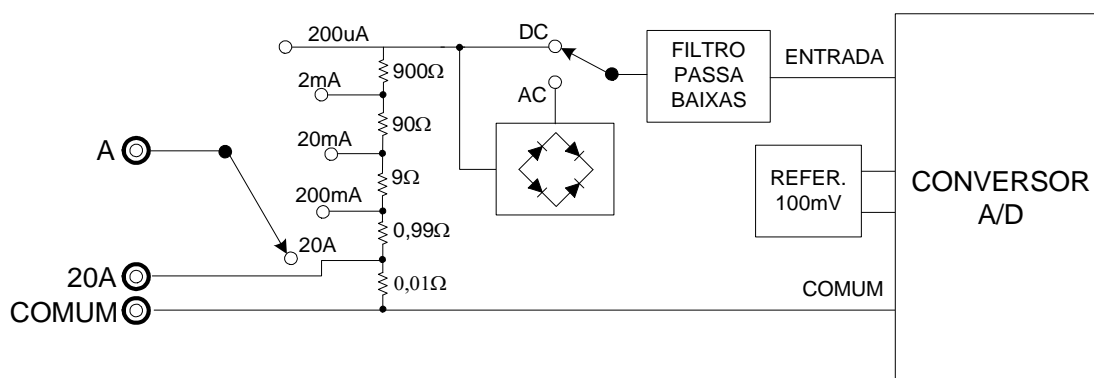
3.1.2- Amperímetro

A posição da chave determina qual ou quais resistores constituirão o shunt de corrente. No alcance de 200mA, a corrente a ser medida passa por uma resistência de 1 Ω (0,99 Ω + 0,01 Ω). Caso seja aplicada uma corrente de 100mA nesse alcance, a tensão entregue ao conversor A/D será de 100mV.

No alcance de 20A, é necessário mudar a ponta de prova do borne A para o borne 20A, pois a chave seletora não suporta esse nível de corrente.

Correntes alternadas, da mesma forma que no voltímetro, serão retificadas desde que seja selecionada a opção AC.

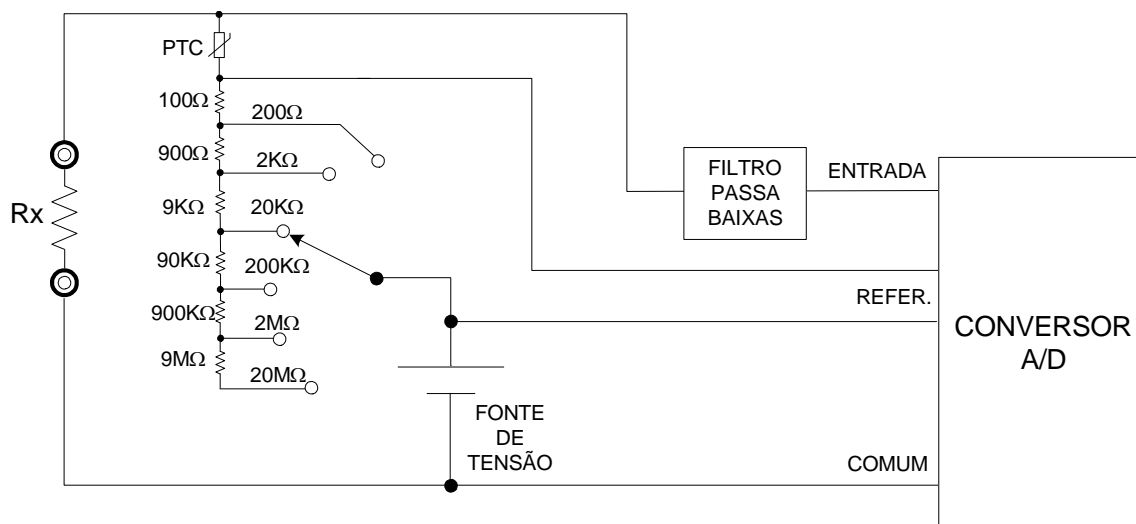
A resistência interna do instrumento varia para cada alcance selecionado.



3.1.3- Ohmímetro

Uma fonte alimentará os resistores da chave de alcances e o resistor a ser medido R_x , que estão ligados em série. As tensões sobre os resistores da chave e sobre R_x serão proporcionais aos valores de cada um deles, sendo a corrente em todos a mesma. A tensão sobre os resistores da chave serve de referência; a tensão sobre R_x será aplicada ao conversor A/D. A relação entre as duas determina o valor de R_x .

O circuito apresenta um resistor dependente da tensão (PTC - *Positive Temperature Coefficient* – Coeficiente Positivo de Temperatura), cuja resistência aumenta com o aumento da temperatura. Caso seja aplicada uma tensão elevada à entrada de medição de resistências, o PTC se aquecerá em função do aumento da corrente e protegerá o circuito do instrumento.

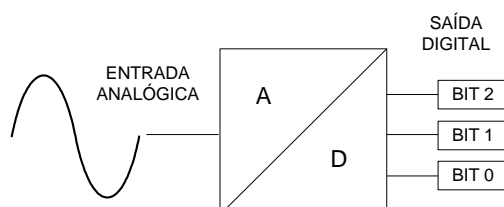


3.2- Conversor Analógico-Digital

Este tipo de dispositivo codifica um sinal elétrico (analógico) em uma sequência de valores binários (digitais). Algumas características básicas dos conversores A/D devem ser conhecidas:

- **Resolução** é definida pela quantidade de bits em que o conversor transforma o sinal analógico. Quanto maior o número de bits, melhor a resolução.
- **Tempo de conversão** é o tempo que o dispositivo demora para converter o sinal analógico para binário. Quanto menor, melhor.
- **Tensão máxima de entrada** é a maior tensão que pode ser aplicada ao dispositivo.

Imaginemos um conversor A/D de 3 bits (um valor muito baixo e que apresentará erros elevados). Os 3 bits irão gerar oito (2^3) combinações.



Para um sinal de 7V aplicado a esse conversor, a resolução será:

$$\text{Res} = V_{in} \frac{1}{2^N - 1} = 7 \frac{1}{2^3 - 1} \quad \text{ou} \quad \text{Res} = 1V$$

V_{in} é a tensão analógica de entrada e N o número de bits do conversor.

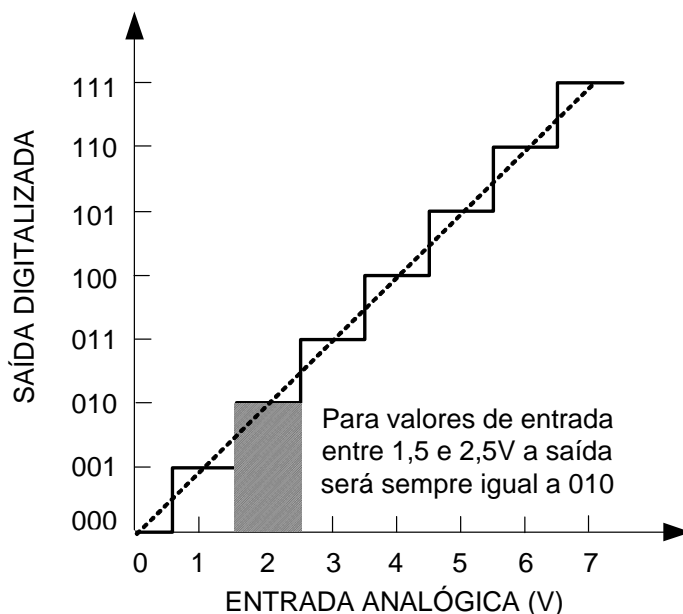
O diagrama abaixo representa as faixas de conversão do dispositivo.

ANALÓGICO	DIGITAL
0 a 0,499	000
0,5 a 1,499	001
1,5 a 2,499	010
2,5 a 3,499	011
3,5 a 4,499	100
4,5 a 5,499	101
5,5 a 6,499	110
6,5 a 7,0	111

As faixas de 0 a 0,499V e de 6,5 a 7,0V, no início e no final da excursão do sinal de entrada, representam o erro de quantização do conversor. Esses valores equivalem à metade do valor da resolução do conversor, ou seja, 0,5V, que geralmente aparece nos manuais como $\frac{1}{2}$ LSB (LSB – *Least Significant Bit* ou Bit Menos Significativo), que é o bit que representa a menor variação do número binário. Na faixa central (entre 0,5V e 6,5V) as transições da saída digitalizada ocorrem em passos iguais aos da resolução (1,0V).

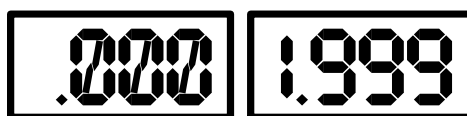
Caso seja aplicado ao conversor um sinal analógico de 1,5V, a saída digital será 010b. Se a tensão aumentar para 1,6V, a saída continuará a mesma, e só irá mudar para 011b quando a entrada atingir 2,5V. Ou seja, a saída muda a partir de “saltos” de 1,0V (que é a resolução do dispositivo) na entrada.

Se o conversor fosse de 8 bits, que possibilita 256 (2^8) combinações, sua resolução seria $7V/255$, ou 27,45mV, sensivelmente melhor que o exemplo anterior, mas ainda bem menor que os dispositivos comerciais de hoje, que são geralmente de 12 bits e têm uma resolução de 1,71mV (para 7V) com suas 4096 possíveis combinações.



3.3- Display

Os displays normalmente utilizados são os de $3\frac{1}{2}$ dígitos, o que significa que o instrumento permite uma leitura de 0 a 9 nos três dígitos menos significativos e vazio ou 1 no mais significativo.



O ponto decimal é definido pela escala selecionada. No exemplo anterior a escala é de 2V. A indicação máxima desse tipo de instrumento não é, portanto, o valor de fundo de escala selecionado: no alcance de 2V o maior valor indicado é o de 1.999V; no de 200V será 199.9V. Exceção para os instrumentos com alcance de 750V, que indicam inclusive este valor.

É importante também conhecer o tempo de atualização do display, que não tem, necessariamente, nada a ver com o tempo de conversão já comentado. Nos instrumentos comerciais, o display é geralmente atualizado a cada 300ms. Caso o intervalo de atualização fosse menor, a indicação poderia ficar flutuando dada a sensibilidade do sistema, o que dificultaria a leitura.

Existem instrumentos cujos displays possuem uma quantidade de dígitos maior, e que oferecem maior resolução na leitura, a um custo também maior.

3.4- Medição Correta do Valor Eficaz de Sinais Alternados

Instrumentos analógicos para medição de sinais alternados são construídos para trabalhar unicamente com ondas senoidais. Caso outro tipo de onda seja aplicada a eles, a indicação apresentará erro.

Os instrumentos digitais convencionais também apresentam essa deficiência, com exceção de uma classe denominada *True RMS* (Valor Eficaz Real), onde o sinal é adequadamente processado pelo instrumento e a indicação é o seu valor eficaz, independente da forma de onda.

Instrumentos não *True RMS* podem apresentar erros de medição de até 40%, principalmente em medições de corrente em que são aplicadas a eles ondas com distorção harmônica alta. Esse tipo de distorção da onda de corrente é muito comum em máquinas elétricas e também em fontes chaveadas e inversores de tensão.

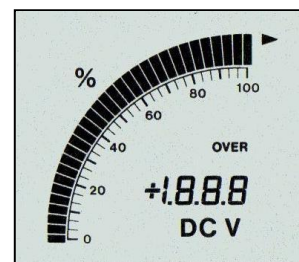
3.5- Medição de Outras Variáveis

Este tipo de instrumento também incorpora muitas vezes a medição de outras variáveis elétricas, como frequência, capacitância, indutância, condutância, verificação do estado de diodos (polarização direta e reversa), ganho (h_{FE}) de transistores, níveis lógicos TTL e temperatura. Também é comum encontrar um sinalizador acústico para auxiliar na medição de continuidade.

Muitos modelos possuem uma indicação tipo bargraph (ver mod 2302 da Yokogawa ao lado) que permite uma visualização rápida da grandeza da variável que está sendo medida (o que é bem mais fácil em instrumentos analógicos) e até registro de valores máximos e mínimos obtidos durante as medições.

Seleção automática de alcances também é bastante comum atualmente. Basta selecionar a grandeza a ser medida (tensão ou corrente, por exemplo) e o instrumento se adequará automaticamente indicando a grandeza na escala correta.

Outra facilidade é a comunicação direta com microcomputadores, geralmente via interface serial, que permite utilizar o instrumento como um sensor de variáveis elétricas que podem ser registradas para análises posteriores.



3.6- Exatidão de Instrumentos Digitais

A interpretação do erro de indicação em instrumentos digitais difere um pouco da estudada para os analógicos. Na tabela do item 3.7 referente à escala de tensão contínua, para o tópico Exatidão, na faixa de 20V, lê-se:

$\pm 0,5\%$ da leitura ± 2 dígitos

Supondo uma tensão de 10V aplicada ao instrumento, o cálculo do erro será:

a- $0,5\%$ da leitura

0,5% de 10V, o que equivale a **50mV**

b- ± 2 dígitos

no alcance de 20V, o maior valor indicado será 19,99V e o menor dígito da indicação equivale a 10mV; 2 dígitos seriam, portanto, 20mV

Finalmente, o erro absoluto admissível para essa medição seria **$\pm(50\text{mV}+20\text{mV})$** , ou uma variação de mais ou menos 70mV em relação ao sinal real.

Já o erro porcentual ficaria:

$$\frac{10,07 - 10}{10} \times 100\% \text{ ou } \pm 0,7\%$$

3.7- Especificações do Multímetro M-2666K da ELENCO

Display: LCD 3 ½ dígitos, 0,9" de altura, leitura máxima 1999

Polaridade: Sinal “-” automático para polaridade negativa

Indicação de sobrecarga: dígito mais significativo em “1” ou “-1”

Indicação de bateria fraca: Mensagem “BAT” no display

Temperatura de operação: de 0°C a 50°C

menos de 80% de umidade relativa do ar até 35°C

menos de 70% de umidade relativa do ar de 35°C a 50°C

Temperatura de armazenamento: -15°C a 50°C

Coeficiente de temperatura: de 0°C a 18°C e de 28°C a 50°C

fator de multiplicação da exatidão de menos de 0,1 por °C

Alimentação: bateria de 9V

Duração da bateria: 100 horas (zinco-carbono)/200 horas (alcalinas)

Dimensões (sem estojo): 90,2 X 193 X 42,5 mm

Peso (sem estojo): 300g

Acessórios: par de pontas de prova

Faixas de Medição (Exatidão: 1 ano de 18°C a 28°C)

Tensão Contínua

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	TENSÃO MÁXIMA
200mV	100µV	±0,5% da leitura ±2 dígitos	1000V CC ou pico CA
2V	1mV		
20V	10mV		
200V	100mV		
1000V	1V	±0,8% da leitura ±2 dígitos	

Tensão Alternada

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	TENSÃO MÁXIMA
200mV	100µV	±1,5% da leitura ±2 dígitos	750V CA 50Hz a 400Hz
2V	1mV	±1,0% da leitura ±2 dígitos	
20V	10mV		
200V	100mV		
750V	1V	±1,5% da leitura ±2 dígitos	

Resistência

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	CORRENTE DE TESTE	PROTEÇÃO DE ENTRADA
200Ω	0,1Ω	±1,0% da leitura ±2 dígitos	Aprox. 1,2mA	Através de PTC
2KΩ	1Ω	±0,8% da leitura ±2 dígitos		
20KΩ	10Ω			
200KΩ	100Ω			
2MΩ	1KΩ			
20MΩ	10KΩ	±2,0% da leitura ±2 dígitos		

Corrente Contínua

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	PROTEÇÃO
200µA	100nA	±1,5% da leitura ±2 dígitos	Fusível 250V/2A
2mA	1µA		
20mA	10µA		
200mA	100µA	±2,0% da leitura ±2 dígitos	10A por 15s no máximo
20A	10mA	±2,5% da leitura ±2 dígitos	

Corrente Alternada

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	PROTEÇÃO
200µA	100nA	±1,0% da leitura ±2 dígitos	Fusível 250V/2A
2mA	1µA		
20mA	10µA		
200mA	100µA	±1,5% da leitura ±2 dígitos	10A por 15s no máximo
20A	10mA	±2,0% da leitura ±2 dígitos	

Capacitância

FAIXA	RESOLUÇÃO	EXATIDÃO	FREQÜÊNCIA DE TESTE
2nF	1pF	±2,5% da leitura ±2 dígitos	400Hz
20nF	10pF		
200nF	100pF		
2µF	1nF		
20µF	10nF	±5,0% da leitura ±2 dígitos	
200µF	100nF		

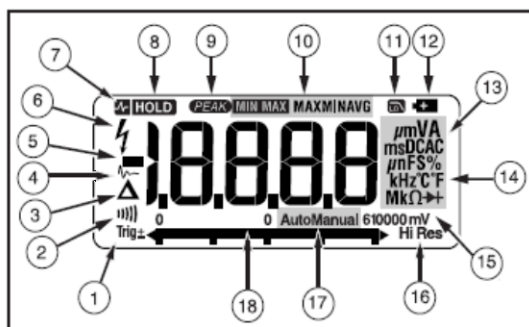
Transistor h_{FE}

FAIXA	CONDIÇÃO DE TESTE
NPN	2mA 3V
PNP	

Diodo

Medição da resistência direta da junção em KΩ, com corrente máxima de teste de 1mA
--

3.8- Funções no Display do Multímetro Modelo 87 da Fluke



Número	Função	Indicação
①	\pm	Indicador de polaridade da barra gráfica analógica.
	Trig \pm	Polaridade de acionamento de Hz e ciclo de atividade.
②		O bípier de continuidade está ativado.
③	Δ	O modo relativo (REL) está ativado.
④		O nivelamento está ativado.

Número	Função	Indicação
⑬	A, μ A, mA	Ampère (amp), microampère, miliampère
	V, mV	Volt, milivolt
	μ F, nF	Microfarad, nanofarad
	nS	Nanosiemen
	%	Porcentagem. Usada para medições de ciclo de atividade.
	Ω , M Ω , k Ω	Ohm, megaohm, quilo-ohm
	Hz, kHz	Hertz, quilohertz
	AC DC	Corrente alternada, corrente contínua
⑭	$^{\circ}$ C, $^{\circ}$ F	Graus Celsius, graus Fahrenheit
⑮	610000 mV	Mostra a faixa selecionada
⑯	HiRes	O multímetro está no modo de alta resolução (HiRes). HiRes=19.999
⑰	Auto	O multímetro está no modo de ajuste de faixa automático e seleciona automaticamente a faixa com melhor resolução.
	Manual	O multímetro está no modo de ajuste de faixa manual.

Número	Função	Indicação
⑤	-	Indica leituras negativas. No modo relativo, este sinal indica que a entrada presente é menor que a referência armazenada.
⑥		Indica presença de entrada de alta tensão. Aparece se a tensão de entrada é de 30 V ou mais (CA ou CC). Também aparece no modo de filtro passa-baixas e nos modos de calibração, Hz e ciclo de atividade.
⑦		O modo AutoHOLD está ativado.
⑧		O congelamento da tela está ativado.
⑨		Indica que o multímetro está no modo Peak Min Max e que o tempo de resposta é 250 μ s (somente no 87).
⑩		Indicadores do modo de gravação de mínimo-máximo.
⑪		Modo de filtro passa-baixas (somente no 87). Consulte "Filtro passa-baixas" (87).
⑫		Pilha fraca. $\Delta \Delta$ Atenção: Para evitar leituras falsas, que podem apresentar risco de choque elétrico ou lesão física, troque a pilha assim que o indicador de pilha fraca se acender.

Número	Característica	Indicação
⑱		O número de segmentos depende do valor da escala completa da faixa selecionada. No modo de operação normal, o zero (0) se encontra à esquerda. O indicador de polaridade à esquerda do gráfico indica a polaridade da entrada. O gráfico não funciona com funções de contador de frequência, capacitância ou pico, mín. e máx. Para obter mais informações, consulte a seção "Barra gráfica". O gráfico de barras apresenta uma função de zoom, conforme descrito em "Modo Zoom".
--		Foi detectado estado de sobrecarga.

3.9- Considerações Finais

Os instrumentos digitais apresentam uma série de vantagens sobre os analógicos:

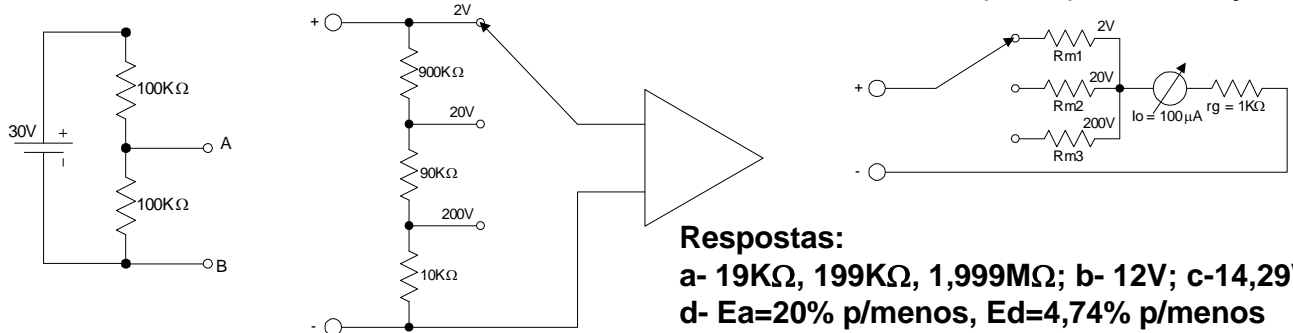
- facilidade de leitura, com menor possibilidade de erros do operador
- maior resolução
- maior exatidão
- indicação da polaridade do sinal
- raramente danificado por sobrecargas
- mecanicamente mais resistente
- capacidade de agregar novas funções
- capacidade de comunicação com dispositivos externos...

EXERCÍCIOS

3.1- (P3-2-08) Dois instrumentos, um digital e outro analógico, cujos diagramas são mostrados abaixo, são ligados, um de cada vez, aos pontos A e B do circuito. Determinar:

- a- os valores dos resistores multiplicadores do instrumento analógico;
- b- a indicação do instrumento analógico;
- c- a indicação do instrumento digital;
- d- o erro percentual nas indicações;

Obs.: O alcance selecionado nos instrumentos deve ser o mais adequado para a medição.



Respostas:

a- 19KΩ, 199KΩ, 1,999MΩ; b- 12V; c-14,29V; d- Ea=20% p/menos, Ed=4,74% p/menos

3.2- Deseja-se medir uma tensão alternada senoidal de 220V (rede elétrica) utilizando um conversor A/D com resolução de 10 bits. A entrada do conversor suporta, no máximo, $\pm 5V$ ($V_{m\acute{a}x}$) e sua Z_{in} (impedância de entrada) é de $1M\Omega$. Dimensione o sistema de redução de tensão de entrada de duas formas:

- a- um transformador isolador;
- b- um divisor de tensão resistivo ($P_{m\acute{a}x}$ no divisor $\leq 1W$).

Respostas: a) transf. 220V/3V b) R1=53066Ω e R2=734Ω

3.3- Comente as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos de redução de tensão do exercício 3.2 em relação a: isolamento da tensão da rede; custo e facilidade de construção e perdas em potência.

3.4- Determinar o erro devido ao efeito de carga no item b do exercício 3.2.

Resposta: 0,067% para menos

3.5- Qual a resolução da medição de tensão no exercício 3.2?

Resposta: Res=215mV

3.6- Deseja-se medir, utilizando um conversor A/D uma corrente alternada que varia de 0 a 18A em uma rede de 110V (senoidal). O conversor possui as seguintes características:

- resolução de 12 bits;
- $V_{m\acute{a}x} = \pm 2,5V$;
- $Z_{in} = 10M\Omega$.

Dimensionar o sistema, utilizando:

a- um Transformador de Corrente (TC) de 50:1 em conjunto com um resistor de shunt;

b- um resistor de shunt em série com a corrente.

Resposta: a) Rsh=3,94Ω b) Rsh=78,8mΩ

3.7- Qual a resolução da medição do exercício 3.6?

Resposta: Res=4,4mA

3.8- Sabendo que o módulo conversor A/D do exercício 3.6 possui entradas configuráveis para valores máximos de tensão de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2,5V$, $\pm 1,25V$ e $\pm 0,625V$, redimensione o sistema para que possa ser utilizada a entrada de máxima sensibilidade.

Resposta: a) Rsh=984mΩ b) Rsh=19,7mΩ

Erros dos sistemas de conversão analógico-digitais

Os gráficos a seguir apresentam alguns dos erros mais comuns em sistemas digitais de conversão.

Erros por subamostragem

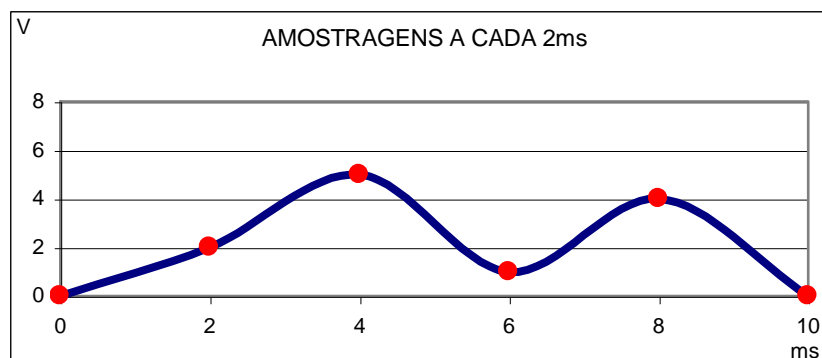
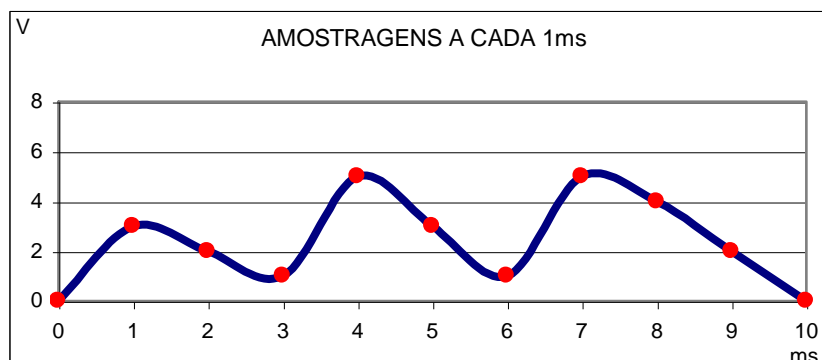
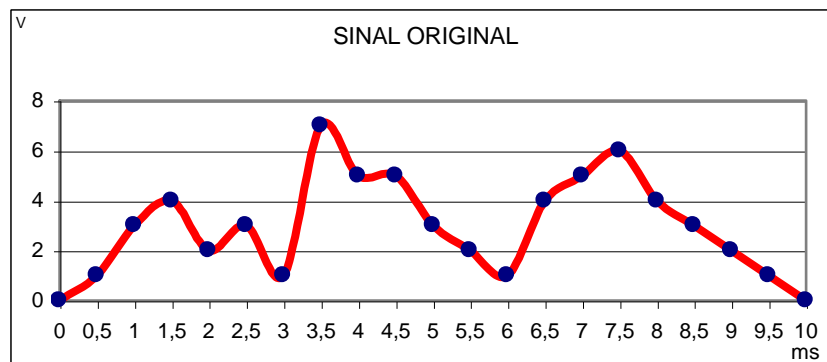
O intervalo de amostragem (intervalo entre as leituras que o sistema de conversão faz do sinal amostrado) é fundamental para capturar corretamente esse sinal. No primeiro dos três gráficos abaixo é mostrado um sinal em sua forma original. Os pontos no gráfico são os instantes em que o sinal foi lido pelo sistema de conversão, no caso a cada 0,5ms.

No segundo gráfico, a amostragem é feita a cada 1ms. É visível a perda de informação: os pontos 0,5ms, 1,5ms ... até 9,5ms não foram amostrados e, portanto, não foram armazenados, resultando em uma deterioração da qualidade do sinal.

No terceiro gráfico a situação é pior ainda. As amostragens são feitas a cada 2ms, resultando em uma perda muito maior de informação do sinal original.

A conclusão é óbvia: quanto maior a taxa de amostragem (menor o intervalo entre as leituras) maior será a resolução e exatidão das medidas.

Este é um erro por subamostragem, ou amostragem (leitura) abaixo da ideal para o sinal em questão.

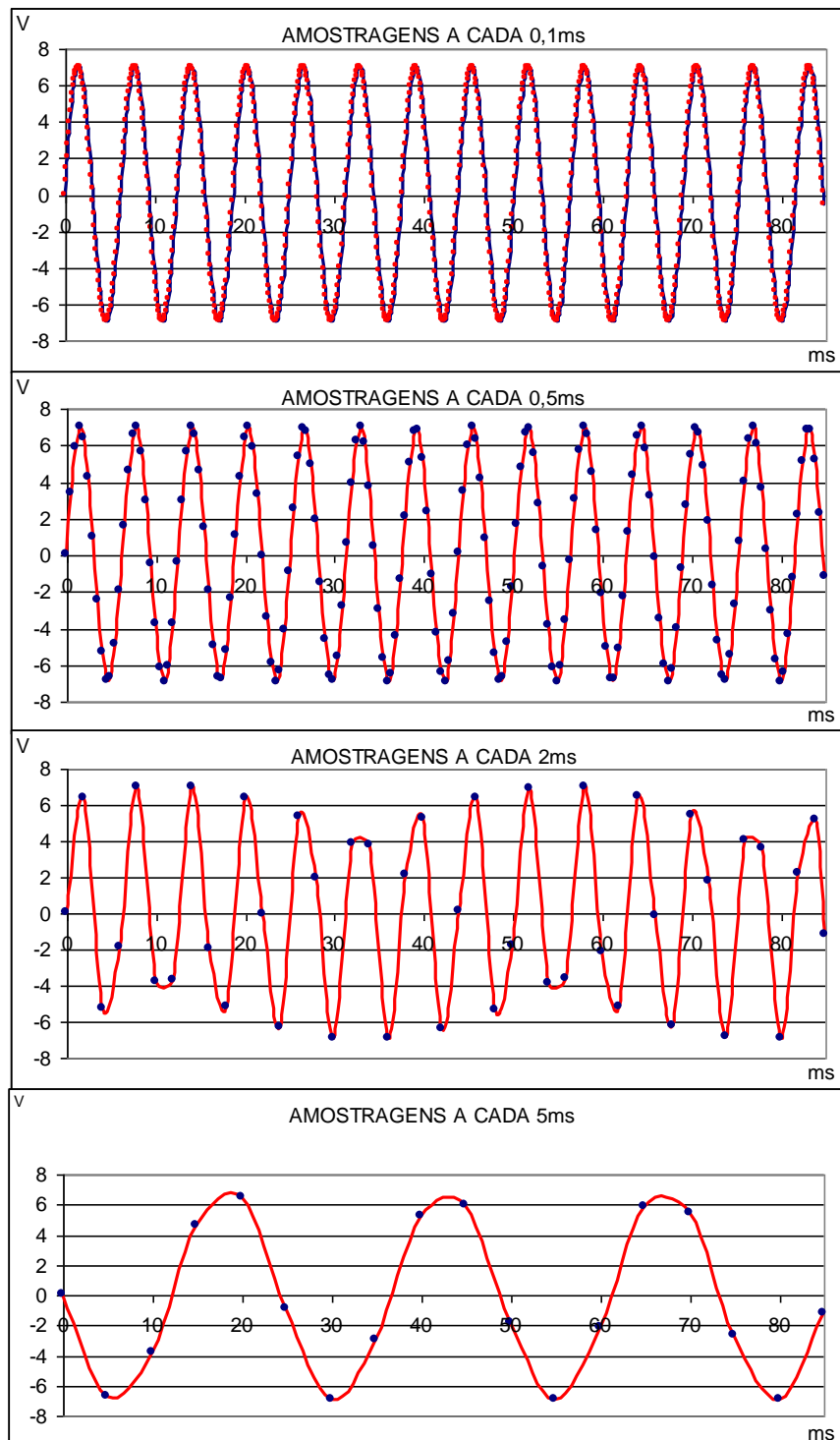


Erros por subamostragem e *alias*

Além da perda de informação, a subamostragem pode também gerar uma interpretação errada do sinal amostrado, fazendo com que este aparente ter uma frequência muito inferior à real.

Isso é demonstrado nos gráficos abaixo, onde o sinal original pode ser visto no primeiro com uma amostragem é de 0,1ms. À medida em que o intervalo de amostragens aumenta para 0,5ms, 2ms e 5ms, a leitura do sinal vai sofrendo alterações, resultando no último gráfico em um sinal com a mesma forma de onda da original mas com frequência muito menor.

O termo *alias* significa pseudônimo, apelido e no caso representa a idéia de um sinal apenas semelhante ao original, como um reflexo distorcido em um espelho.



Mais uma vez fica claro que o ideal são taxas de amostragem bem superiores à frequência do sinal amostrado.

4- PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OSCILOSCÓPIOS E GERADORES DE FUNÇÕES

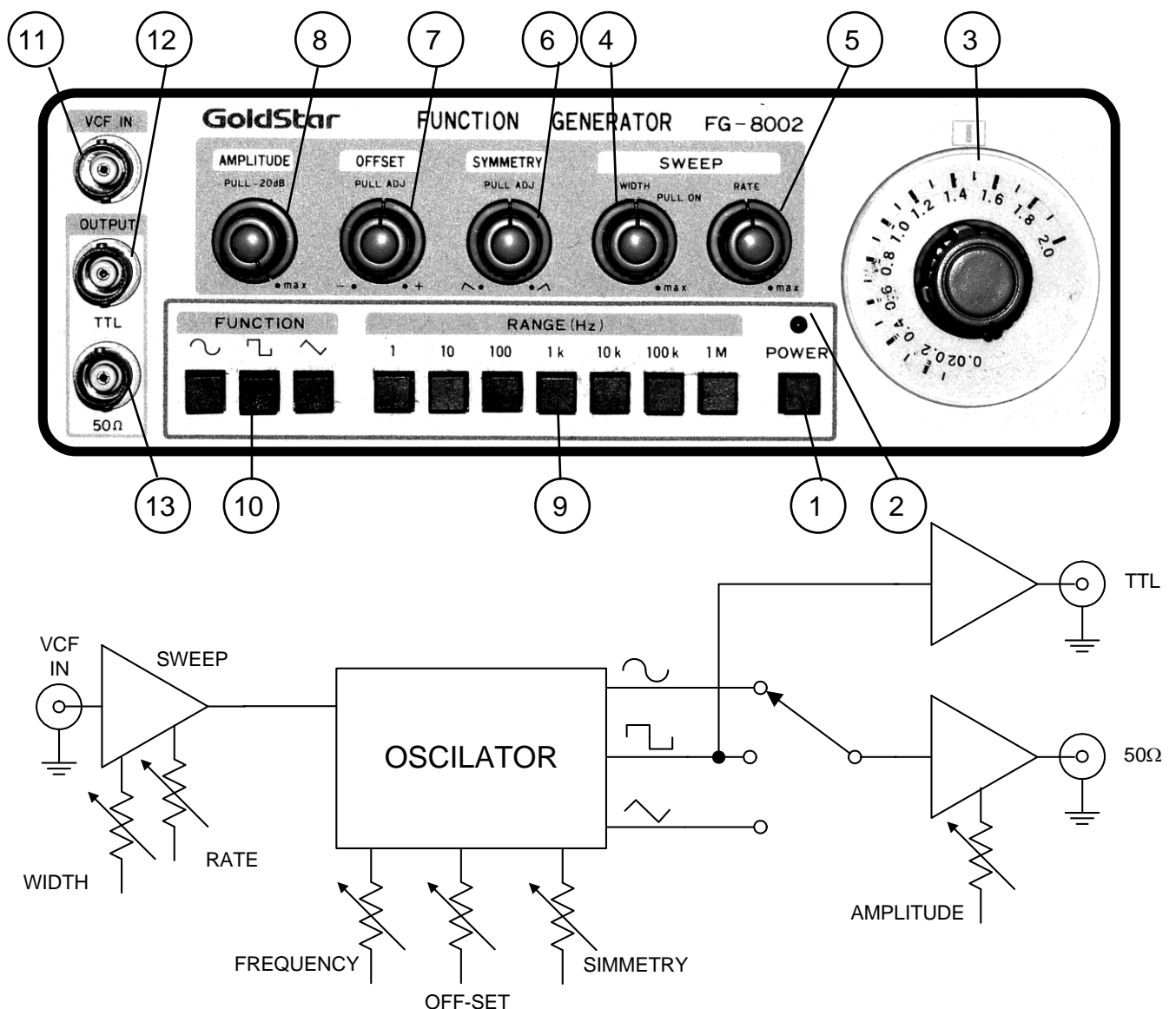
Geradores de funções e osciloscópios são dois instrumentos fundamentais para ensaios em circuitos eléctricos, o primeiro para gerar formas de onda e o segundo para visualizá-las. O objetivo deste capítulo é mostrar o princípio básico de funcionamento desses equipamentos e seus recursos mais comuns, de forma a possibilitar o seu uso adequado em laboratório. Foram utilizados, propositalmente, equipamentos diferentes dos existentes no Laboratório, mas que possuem os recursos disponíveis na média dos modelos comerciais.

4.1- Geradores de Funções

Este tipo de instrumento fornece, geralmente, formas de onda senoidais, quadradas e triangulares, com amplitude de alguns milivolts até alguns volts, em várias frequências.

4.1.1- Um instrumento comercial

Em seguida serão apresentados detalhes do Gerador de Funções FG-8002 GOLDSTAR.



4.1.2- Especificações

- FREQUÊNCIA DE TRABALHO
 - o 0,02Hz A 2MHz
- FORMAS DE ONDA DE SAÍDA
 - o Senoidal, quadrada, triangular, quadrada com nível TTL, rampa
- EXATIDÃO DA FREQUÊNCIA DE SAÍDA
 - o $\pm 5\%$ (Faixas de 1, 10, 100, 1K, 10K, 100K); $\pm 8\%$ (Faixa de 1M)
- ONDA SENOIDAL
 - o Distorção: $\pm 1\%$ (10Hz a 100KHz)
- ONDA QUADRADA:
 - o Simetria: $\pm 3\%$ (em 1KHz)
 - o Tempo de subida e descida: 100ns ou menos
- ONDA TRIANGULAR:
 - o Linearidade: $\pm 1\%$ (10Hz a 100KHz); $\pm 5\%$ (100KHz a 2MHz)
- SAÍDA TTL
 - o Tempo de subida e descida: 25ns ou menos
- VARREDURA
 - o Largura: 1:1 a 100:1
 - o Taxa: 20ms a 2s (0.5Hz a 50Hz)
- SAÍDA
 - o Tensão máxima: 20Vpp (circuito aberto); 10Vpp (em 50 Ω)
 - o Atenuador: -20dB
 - o Impedância 50 $\Omega \pm 10\%$
- CONDIÇÕES AMBIENTAIS
 - o Temperatura de armazenamento: -20°C a +60°C
 - o Temperatura de operação: 0°C a +35°C
 - o Umidade para operação: 35% a 85%
 - o Faixa ideal de temperatura: 23°C $\pm 5^\circ\text{C}$
 - o Estabilidade de frequência:
 - $\pm 0,5\%$ (18°C a 28°C); $\pm 10\%$ (0°C a 18°C, 28°C a 35°C)

4.1.3 - Operação

1- POWER (ENERGIA)

Esta chave liga o equipamento quando pressionada.

2- Led POWER (Led indicador de ENERGIA)

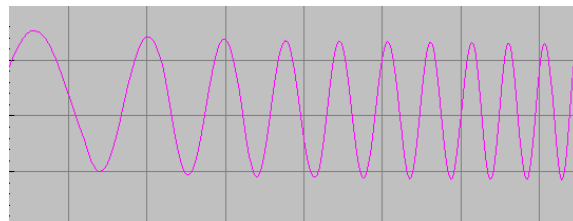
Quando acesa indica que o equipamento está ligado.

3- Frequency Dial (ajuste fino de frequência)

Potenciômetro que possibilita variar a frequência fornecida pelo gerador dentro da faixa definida pelo seletor de frequências (9).

4- SWEEP WIDTH/PULL ON Control (LARGURA DA VARREDURA/PUXAR PARA LIGAR)

Este controle varia continuamente a frequência do sinal dentro de uma determinada faixa. Quando o botão é puxado, é selecionada a varredura interna; girando o botão é efetuado o ajuste da frequência de varredura. No sentido anti-horário é obtida a menor varredura (1:1) e no sentido horário a maior (1:100). Empurrando o botão é habilitada a varredura externa, que é controlada pela aplicação de uma tensão externa à entrada de tensão de controle (11). Na prática, o que acontece é mostrado no desenho acima, onde ocorre uma variação de 10Hz até aproximadamente 50Hz, em uma velocidade definida pelo Controle de Taxa de Varredura (5).



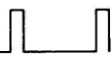





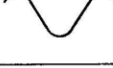
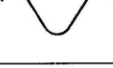
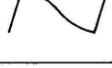
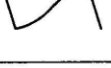
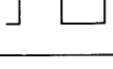
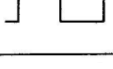
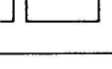
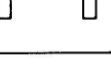


5- SWEEP RATE Control (TAXA DE VARREDURA)

Controla a frequência do gerador interno de varredura.

6- SYMMETRY Control (Ajuste de SIMETRIA)

Controla a simetria (*duty cycle* – ciclo de trabalho) do sinal de saída, na faixa de 10:1 até 1:10.

Knob position Waveform	PUSH	PULL		
		Center	Counter-clockwise	Clockwise
Square Wave				
Triangle Wave				
Sine Wave				
TTL Wave				

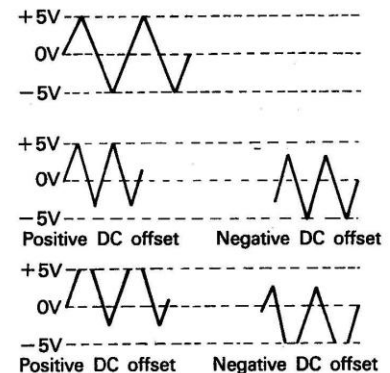
7- DC OFFSET Control (Deslocamento do nível contínuo)

Soma (quando acionado no sentido horário) ou subtrai (no sentido anti-horário) um nível contínuo ao sinal gerado, na faixa de $\pm 10V$ em circuito aberto ou $\pm 5V$ com carga de 50Ω

A. Zero DC offset with Maximum signal

B. Offset limits without clipping

C. Excessive offset



All examples : Output terminated in 50Ω

8- AMPLITUDE/PULL –20Db Control (AMPLITUDE/PUXAR para –20dB)

Controla o nível de saída do gerador (tensão de saída). A máxima atenuação é de 20dB com o botão pressionado e de 40dB com o botão puxado

9- FREQUENCY RANGE Selector (Seletor de FAIXAS DE FREQUÊNCIA)

Frequency Ranges Faixas de Frequência	Desired Output Frequency Frequência de saída desejada
1	0,02Hz ~ 2Hz
10	2Hz ~ 20Hz
100	20Hz ~ 200Hz
1K	200Hz ~ 2KHz
10K	2KHz ~ 20KHz
100K	20KHz ~ 200KHz
1M	200KHz ~ 2MHz

10- FUNCTION Selector (Seletor de FUNÇÃO)

Pressionar para selecionar a forma de onda desejada: senoidal, quadrada ou triangular.

11- VCF IN (Entrada VCF – Voltage Control Frequency Tensão de Controle da Frequência)

A frequência do sinal fornecido pode ser variada através da aplicação de tensão neste conector. Uma faixa de 0 a +10V de tensão produz uma variação de 100:1. Para obter a máxima variação possível, posicione o ajuste fino de frequência (3) para o mínimo (abaixo de 0,2).

12- TTL – OUTPUT (SAÍDA TTL)

Fornecer ondas quadradas com nível de tensão TTL (0 a 5V).

13- OUTPUT Connector (Conector de SAÍDA)

Sinal de saída definido pelo seletor de funções (10).

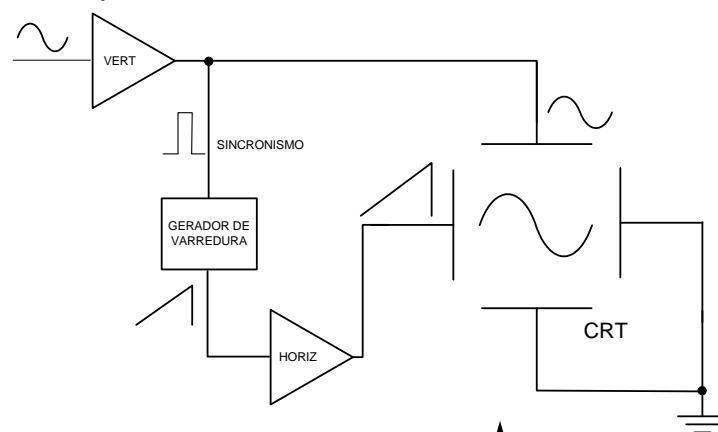
4.2- Osciloscópios

Osciloscópios são instrumentos que permitem visualizar formas de onda de sinais eléctricos, geralmente em função do tempo.

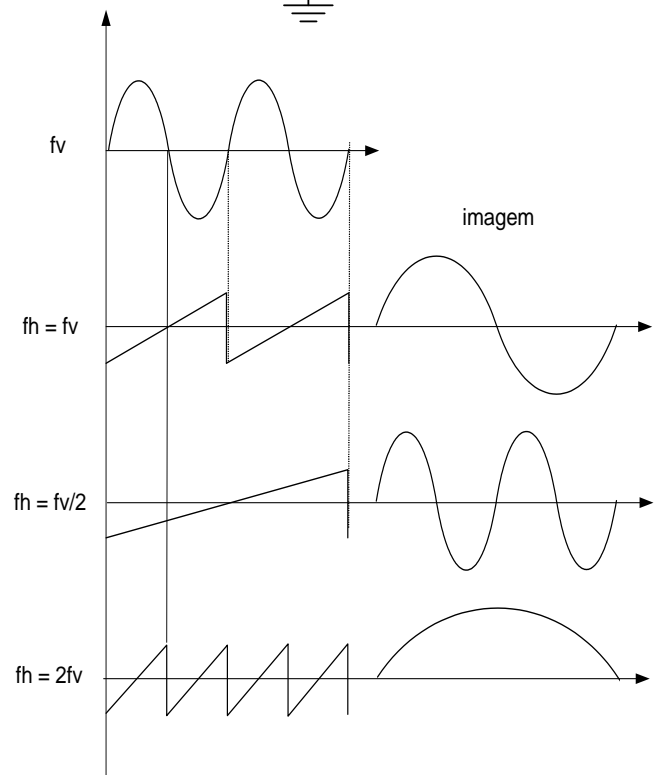
Tanto os instrumentos analógicos, que utilizam tubos de raios catódicos (CRT's) como os digitais, que utilizam displays de cristal líquido (LCD) têm o mesmo princípio básico de funcionamento.

Na tela desses instrumentos é mostrada uma imagem onde, no eixo vertical tem-se a representação da amplitude do sinal a ser analisado, que é aplicado, devidamente adequado através de atenuadores, ao amplificador vertical e, no eixo horizontal, é aplicada através do amplificador horizontal, a frequência de varredura, que representa o período do sinal. A interação dessas duas frequências forma a imagem na tela do instrumento.

Para que a imagem fique estável é necessário sincronizar o sinal de varredura horizontal, que é gerado internamente no osciloscópio, com o sinal a ser visualizado que é aplicado ao vertical. Isso é conseguido através do circuito de sincronismo (*TRIGGER – GATILHO*). Caso o sincronismo não seja adequado a imagem fica instável na tela, deslocando-se para os lados.

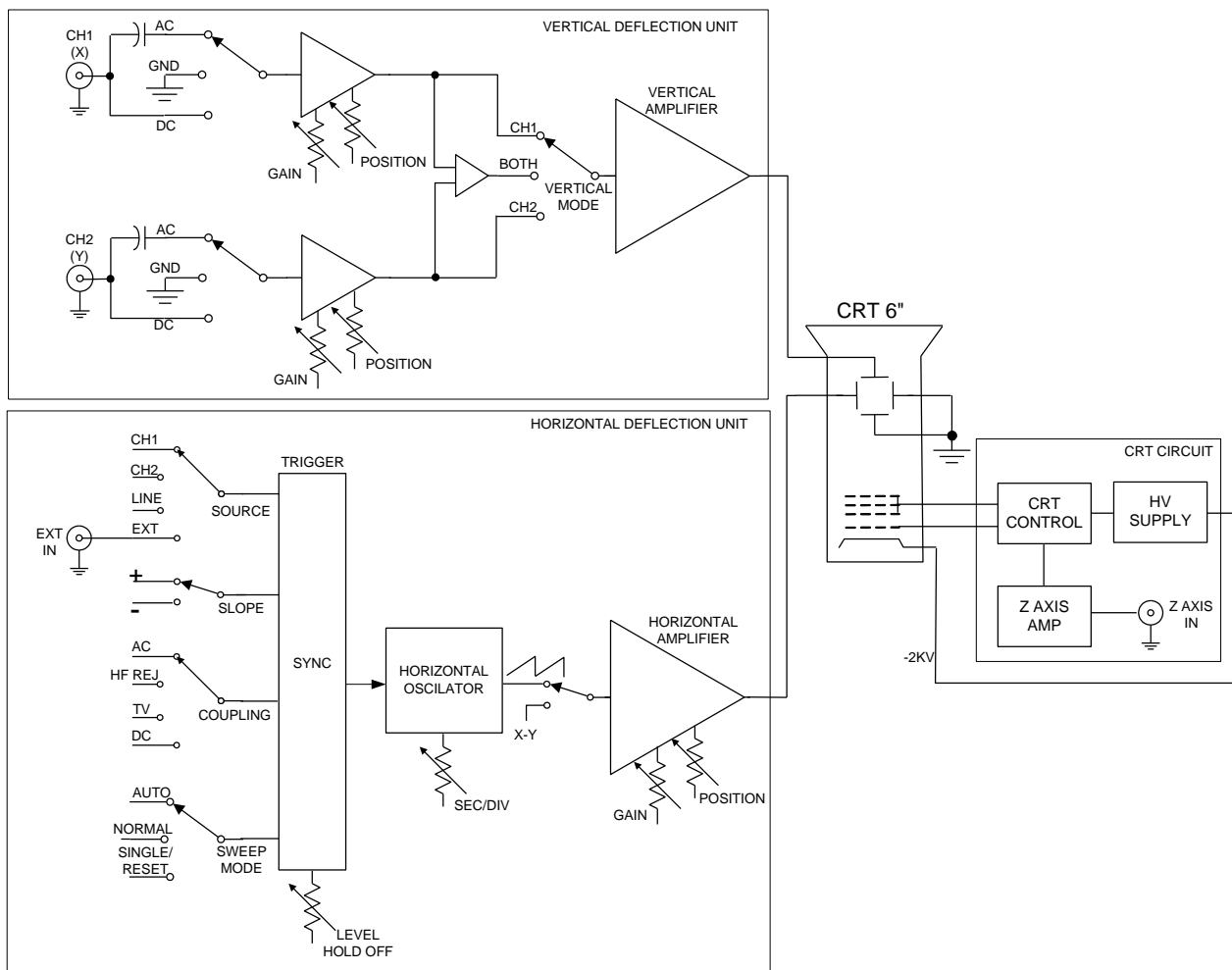
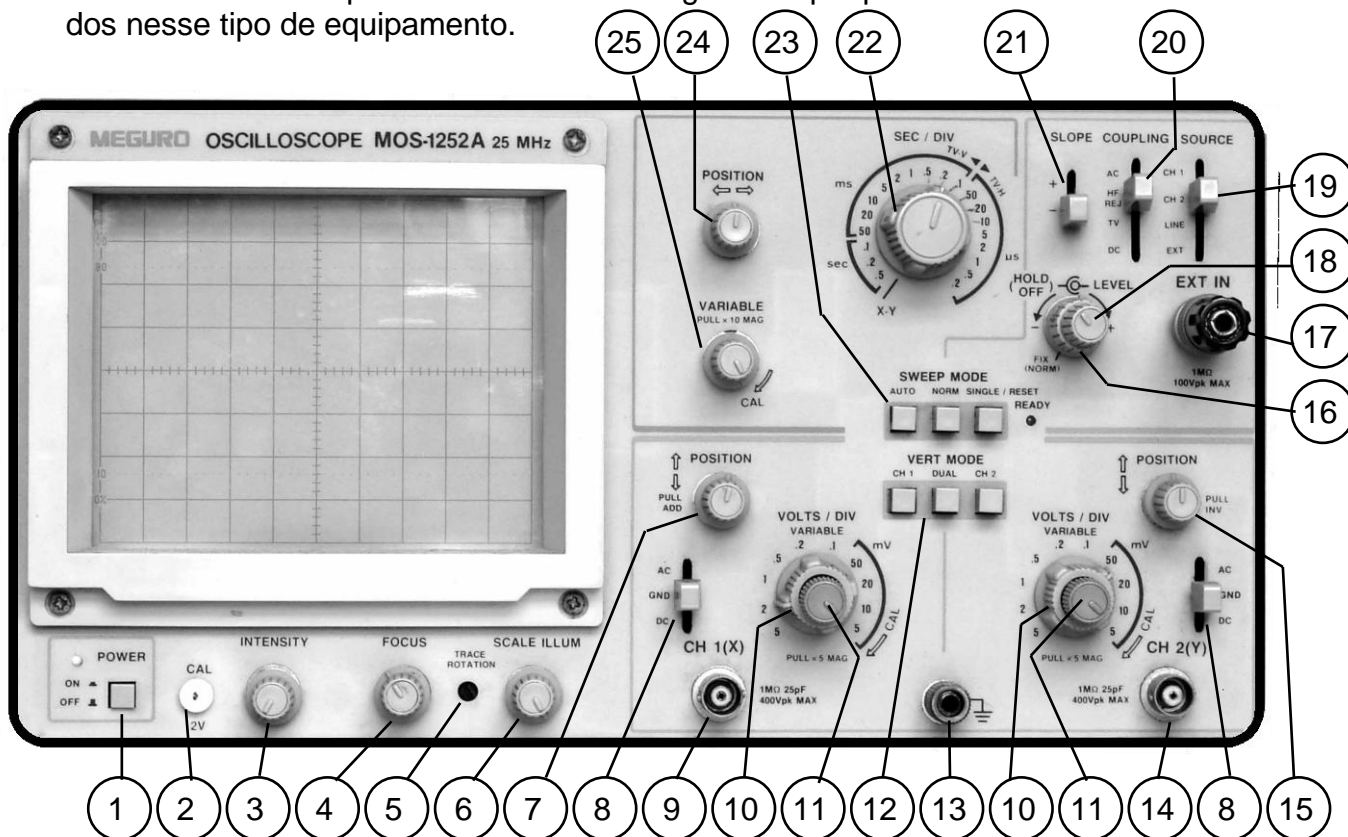


A visualização de um ou mais ciclos do sinal amostrado (f_v) (ou mesmo menos de um ciclo) é função da frequência ajustada na varredura horizontal (f_h), que é um sinal dente de serra. Cada ciclo desse sinal corresponde a uma varredura da tela (deslocamento do ponto brilhante na tela da esquerda para a direita). Quando o sinal de varredura, que é normalmente indicado em segundos é ajustado para um valor baixo como 0,5s, é possível ver o ponto se movendo na tela. Nessa situação, o ponto demora meio segundo para se deslocar uma divisão, da esquerda para a direita da tela. Se o sinal de varredura for ajustado para períodos menores, o tempo de deslocamento é muito reduzido, não sendo mais possível visualizar um ponto se deslocando, em função das persistências do olho humano (que continua percebendo uma imagem até algum tempo depois dela deixar de existir) e da própria tela (que continua emitindo luz mesmo após o ponto haver passado).



4.2.1- Um instrumento comercial

A seguir serão apresentadas as características básicas do osciloscópio MOS-1252A MEGURO que é relativamente antigo mas que possui os recursos mais utilizados nesse tipo de equipamento.



4.2.2 – Especificações

- ESTÁGIO VERTICAL
 - Fator de deflexão: 5mV a 5V/div $\pm 3\%$, em dez passos na seqüência 1-2-5 com ajuste fino
 - Ampliação: 5 vezes
 - Banda passante, -3dB CC: CC a 25MHz
CA: 10Hz a 25MHz
(referência em 50Hz, 8 div.)
 - Tempo de subida: aprox. 14ns (aprox. 23ns na ampliação de 5X)
 - Overshoot: menos de 3%
 - Impedância de entrada: 1M Ω
 - Tensão máxima de entrada: 400Vpp ou 200V (CC + pico CA)
 - Modos de operação: CH1, CH2, DUAL e ADD
 - Frequência de Chopper: aprox. 250KHz
 - Separação de canais: acima de 60dB em 50KHz; 30dB em 25KHz
- ESTÁGIO HORIZONTAL
 - Modo de varredura: AUTO, NORMAL e SINGLE
 - Período de varredura: 0,2 μ s a 0,5s/div, em vinte passos na seqüência 1-2-5, com ajuste fino e X-Y
 - Ampliação: 10 vezes
 - Exatidão no período de varredura: 3% (6% na ampliação de 10X)
 - Linearidade: 3% (6% na ampliação de 10X)
 - Operação em modo X-Y: CH1 eixo x; CH2 eixo Y
Sensibilidade: a mesma de CH1
Resposta de frequência: CC a 1MHz (-3dB)
 - Modo EXT HOR: varredura definida pelo sinal aplicado ao terminal EXT IN
Sensibilidade: aprox. 0,1V/div
Resposta de frequência: CC a 1MHz (-3dB)
- TRIGGER (GATILHAMENTO)
 - Fonte: CH1, CH2, LINE e EXT
 - Sensibilidade: INT: 0,5 div. ou mais (CC a 15MHz)
1,0 div. ou mais (CC a 25MHz)
EXT: 50mVpp ou mais (CC a 15MHz)
100mVpp ou mais (CC a 25MHz)
 - Acoplamento: AC, HF REJ, TV e DC
AC atenua componentes do sinal abaixo de 10Hz
HF REJ atenua componentes do sinal acima de 50KHz
 - Polaridade: + ou -
 - Modo: AUTO, NORMAL e SINGLE
 - Ajuste de nível: possível de 50Hz a 25MHz
 - Entrada externa: através do terminal EXT IN
Impedância de entrada: 1M Ω , 30pF
Tensão de entrada máxima: 100V (CC + pico CA)
- MODULAÇÃO DE INTENSIDADE (EIXO Z)
 - Tensão de entrada: 3Vpp ou mais (o brilho é obtido no semiciclo negativo)
 - Resistência de entrada: aprox. 5K Ω
 - Entrada máxima: 50Vpp (CC + pico CA)
 - Faixa de frequência: CC a 5MHz
- GERAL
 - Tensão de aceleração do tubo: aprox. 2,1KV
 - Tensão de calibração: 2Vpp $\pm 2\%$, onda quadrada positiva de 1 KHz

4.2.3 – Operação

- 1- *POWER Pushbutton* (ENERGIA)
Botão liga-desliga.
- 2- *CAL 2V Terminal* (Terminal de calibração)
Fornece uma onda quadrada de 1KHz e 2Vpp; utilizado para verificar o ganho do amplificador, compensação da forma de onda da ponta de prova etc.
- 3- *INTENSITY Control* (controle de brilho)
Ajusta o brilho do feixe na tela.
- 4- *FOCUS Control* (ajuste de FOCO)
Ajusta a definição do feixe na tela.
- 5- *TRACE ROTATION Adjuster* (Ajuste de ROTAÇÃO DO FEIXE)
Utilizado para compensar o efeito do campo magnético da terra na inclinação do feixe.
- 6- *SCALE ILLUM Control* (Controle de LUMINOSIDADE DA ESCALA)
Permite iluminar a retícula da escala.
- 7- *POSITION/PULL ADD Control* (Controle de POSIÇÃO/SOMA)
Controle da posição vertical do feixe. No modo X-Y controla a posição do eixo X. Quando puxado (modo ADD - SOMA) , os sinais de entrada dos canais CH1 e CH2 são algebricamente somados.
- 8- *AC-GND-DC Switch* (Chave CA-TERRA-CC), em CH1 e CH2
AC: o sinal de entrada é acoplado capacitivamente ao amplificador vertical
GND: aterra a entrada do amplificador vertical e abre o circuito de entrada
DC: o sinal de entrada é acoplado diretamente ao amplificador vertical.
- 9- *CH1(X) Connector* (Terminal CH1 (X))
Conector BNC para aplicação do sinal de entrada do canal 1.
- 10- *VOLTS/DIV Switch* (Chave VOLTS/DIV) ,em CH1 e CH2
Seleciona o fator de deflexão (atenuação ou ganho do amplificador vertical) entre 5mV/div e 5V/div em 10 passos.
- 11- *VARIABLE VOLTS/DIV Control* (Controle VARIÁVEL de VOLTS/DIV) , em CH1 e CH2
Ajuste fino do ganho vertical. Permite a variação contínua do ganho do amplificador vertical, entre cada um dos passos da chave VOLTS/DIV (10). Quando totalmente na posição horária (*CAL – Calibrated – Calibrado*) indica que os valores da chave VOLTS/DIV (10) são válidos. Fora dessa posição, a indicação da chave não é mais correta. Quando puxado, o ganho é aumentado em cinco vezes (5X).
- 12- *VERT MODE Pushbutton Selector* (MODO VERTICAL Seletor tipo pushbutton)
CH1: mostra apenas o sinal de CH1 na tela
DUAL: mostra os sinais de CH1 e CH2 na tela, em operação alternada ou multiplexada (*chopper – cortador*), controlado pela chave SEC/DIV (22); o circuito de *chopper* atua entre 0,5s e 1ms/div, com uma frequência de aproximadamente 250KHz; o modo alternado funciona entre 0,5ms e 0,2μs/div
CH2: mostra apenas o sinal de CH2 na tela.
- 13- *Ground Terminal* (Terminal de terra)
Terra do chassis do osciloscópio, ligado ao terra do cabo de alimentação CA.
- 14- *CH2(Y) Connector* (Terminal CH2 (Y))
Conector BNC para aplicação do sinal de entrada do canal 2.
- 15- *POSITION/PUSH INVert Control* (Controle de POSIÇÃO/INVERSÃO)
Controle da posição vertical do feixe. No modo X-Y controla a posição do eixo Y. Quando puxado (modo INV - INVERSÃO) , o sinal de entrada do canal CH2 é invertido.

- 16- *HOLDOFF Control* (Controle HOLDOFF = manter à distância, isolar)
Permite seleccionar uma parte do sinal complexo amostrado para geração do sincronismo;
- 17- *EXT IN Connector* (Terminal de entrada EXTERNO)
Conector BNC para entrada de sinais de gatilho (trigger) externo. No modo de operação X-Y é possível utilizar o sinal aplicado a esta entrada como sendo o eixo X.
- 18- *LEVEL Control* (Controle de NÍVEL)
Seleciona o ponto inicial da forma de onda de sincronismo onde a varredura é iniciada; na posição totalmente anti-horária (FIX - NORM) o sinal de sincronismo é mantido fixo
- 19- *SOURCE Selector* (Seletor de FONTE)
Seleciona a fonte do sinal de gatilho:
CH1: sincronismo através do sinal aplicado a CH1
CH2: sincronismo através do sinal aplicado a CH2
LINE: sincronismo através do sinal da rede eléctrica de alimentação
EXT: sincronismo através do sinal aplicado ao conector EXT IN (17).
- 20- *COUPLING Selector* (Seletor de ACOPLAMENTO)
Seleciona o modo de gatilho:
AC: os sinais de sincronismo são acoplados capacitivamente ao circuito de sincronismo; frequências abaixo de 10Hz são atenuadas
HF REJ: atenua os sinais de sincronismo acima de 50KHz
TV: para uso na observação de sinais de TV; são utilizadas as posições TV-V (0,5s ~0,1ms) e TV-H (50 μ s~0,2s) da chave de SEC/DIV (22)
DC: os sinais de sincronismo são directamente acoplados ao circuito de sincronismo
- 21- *SLOPE Selector* (Seletor de INCLINAÇÃO)
Seleciona a subida positiva ou negativa do sinal amostrado para gerar o sincronismo
- 22- *SEC/DIV Switch* (Chave SEG/DIV)
Seleciona os sinais de varredura horizontal entre 0,5s/DIV e 0,2 μ s/DIV, na sequência 1-2-5, em 20 faixas; selecciona também, as opções X-Y, TV-V e TV-H de varredura
- 23- *SWEEP MODE Pushbutton Switch* (Chave Pushbutton de MODO DE VARREDURA)
AUTO: para sincronismo normal; a varredura é gerada mesmo sem um sinal adequado de sincronismo;
NORM: para sincronismo normal; nenhuma imagem é mostrada sem um sinal adequado de sincronismo;
SINGLE/RESET (ÚNICO/RESET): mostra apenas uma varredura na tela até que ocorra um reset, que é feito pressionando esta chave quando o LED READY (PRONTO) está aceso;
- 24- *POSITION Control* (Controle de POSIÇÃO)
Posiciona a imagem horizontalmente;
- 25- *VARIABLE/PULL X10 MAG Control* (VARIÁVEL/PUXAR X10 AMPLIAÇÃO)
Permite variar a frequência de varredura ajustada pela chave SEC/DIV (22) em aproximadamente 2,5 vezes; na posição CAL (CALIBRADO) a posição daquela chave está calibrada. Quando puxado, a varredura aumenta em dez vezes.
- 26- *Z-AXIS INPUT Connector* (Conector de ENTRADA do EIXO Z)
Conector BNC localizado na parte traseira (não mostrado) do equipamento, que permite modular a intensidade do brilho da imagem na tela.

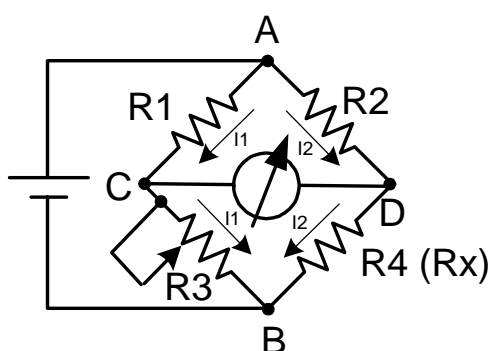
Mais detalhes sobre funcionamento e operação de osciloscópios podem ser obtidos em:

<http://oscilloscope-tutorials.com/oscilloscope/oscilloscope.asp>

5 – PONTES DE MEDIÇÃO

Os circuitos em ponte permitem a medição de componentes de circuitos eléctricos com exactidão e sensibilidade. Na sua configuração básica, a ponte de Wheatstone, possibilita a determinação dos valores de resistências eléctricas com uma resolução bem acima da obtida por ohmímetros convencionais. Essa configuração, com pequenas modificações que resultam na ponte de Kelvin, é também utilizada na medição de temperatura e força-peso, através de sensores adequados. Por fim, pontes para medição de circuitos reativos, utilizando fontes alternadas, permitem a obtenção de impedância, reactância, indutância e capacitância desses circuitos. Nosso estudo ficará restrito às pontes de corrente contínua, Wheatstone e Kelvin.

5.1- Ponte de Wheatstone



A ponte de Wheatstone é formada por quatro resistores, sendo pelo menos um deles ajustável e outro desconhecido. Utiliza-se como detector da ponte um galvanômetro de alta sensibilidade, geralmente do tipo de zero central.

O circuito ao lado mostra uma ponte de Wheatstone típica, na condição de equilíbrio. O princípio de medição consiste em ajustar o valor da resistência do resistor variável (R_3) de tal modo que os pontos C e D fiquem com o mesmo potencial eléctrico, o que pode ser constatado pela indicação zero do detector. Nessa situação a corrente entre os pontos C e D será, obviamente, zero.

Na condição de equilíbrio teremos:

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

$$R_3 I_1 = R_4 I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2)$$

Igualando as equações (1) e (2), teremos: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = K$ (relação entre os braços da ponte).

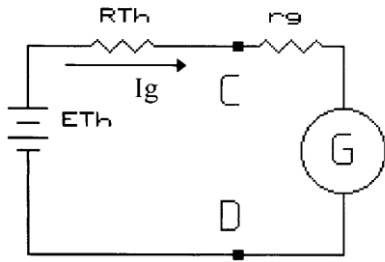
Podemos determinar o valor da resistência desconhecida fazendo:

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} = R_x$$

Modelos comerciais apresentam uma escala associada ao movimento do eixo do resistor variável R_3 , onde pode ser lido o valor de R_x .

5.1.1- Análise da Sensibilidade da Ponte

A tensão sobre o detetor da ponte pode ser determinada por Thèvenin:



$$R_{Th} = R_1 // R_3 + R_2 // R_4$$

$$E_{Th} = V_{AC} - V_{AD} = R_1 I_1 - R_2 I_2 \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad (4) \text{ e } I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4} \quad (5)$$

Substituindo (4) e (5) em (3), teremos:
$$E_{Th} = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) \quad (6)$$

Como $I_g = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + r_g}$, para a condição de equilíbrio sendo $I_g = 0$, teremos $E_{Th} = 0$.

Portanto (da eq. (6)):
$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} = 0 \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4}.$$

Considerando a menor variação de R_4 que a ponte pode detectar como sendo ΔR_4 , teremos:

$$E_{Th} = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + (R_4 + \Delta R_4)} \right), \text{ ou } E_{Th} = E \frac{R_1 R_2 + R_1 R_4 + R_1 \Delta R_4 - R_1 R_2 - R_2 R_3}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + \Delta R_4)}.$$

Na condição de equilíbrio, $R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$ ou $R_1 R_4 = R_2 R_3$, o que nos permite simplificar o numerador da equação e sendo ΔR_4 muito pequeno, podemos desprezá-lo no denominador. A equação ficará portanto:
$$E_{Th} = E \frac{R_1 \Delta R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)},$$
 e utilizando a relação $\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4}$, podemos escrever:
$$E_{Th} = E \frac{R_2 \Delta R_4}{(R_2 + R_4)(R_2 + R_4)} \text{ ou}$$

$$E_{Th} = \frac{E R_2 \Delta R_4}{(R_2 + R_4)^2} \quad (7).$$

A menor variação de R_4 detectável pela ponte dependerá da relação R_2/R_4 e da sensibilidade do galvanômetro que deverá ser capaz de detectar pequenos valores de tensão (E_{Th}).

Para obter a máxima sensibilidade, vamos derivar E_{Th} em relação a R_2 e igualar a zero (obtenção do ponto máximo da função), para determinar a relação entre R_2 e R_4 que produz o maior valor de E_{Th} quando R_4 varia ΔR_4 :

$$\frac{dE_{Th}}{dR_2} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dR_2} \left(\frac{E R_2 \Delta R_4}{(R_2 + R_4)^2} \right) = 0,$$

sendo a regra de derivação $d\left(\frac{U}{V}\right) = \frac{U'V - UV'}{V^2}$, teremos:

$$\frac{E\Delta R_4(R_2 + R_4)^2 - ER_2\Delta R_4 2(R_2 + R_4)}{(R_2 + R_4)^4} = 0,$$

equação que simplificada resultará em $R_2 = R_4$, que é a condição de máxima sensibilidade da ponte. Obviamente é necessário que $R_1 = R_3$ para que haja equilíbrio.

Portanto, o maior valor de E_{Th} é obtido a partir da igualdade $R_2 = R_4$. Por outro lado, a corrente $I_g = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + r_g}$ depende de E_{Th} , constante para uma determinada relação R_2/R_4 , de r_g , constante para um determinado galvanômetro, e de $R_{Th} = R_1//R_3 + R_2//R_4$.

Sendo a relação R_2/R_4 dependente de R_4 e portanto constante, a única variação possível será em R_1 e R_3 . Ou seja, quanto menor for a associação $R_1//R_3$, maior será I_g , e maior a sensibilidade da ponte.

Resumidamente, as formas de se aumentar a sensibilidade de uma ponte de Wheatstone são:

- 1- fazer $R_2 = R_4$, para se obter a máxima E_{Th} ;
- 2- aumentar E para, para obter um aumento de E_{Th} ;
- 3- diminuir os valores de R_1 e R_3 , mantendo a proporção entre eles constante, para diminuir R_{Th} ;
- 4- substituir o galvanômetro por outro com r_g menor, para aumentar a corrente I_g .

Pode-se entender o conceito de sensibilidade de uma ponte de Wheatstone através de um exemplo simples:

situação 1 em uma determinada ponte uma variação de 1% em R_4 (R_x) leva a uma corrente de $1\mu A$ no galvanômetro;

situação 2 após alterações na ponte, a mesma variação no mesmo valor de R_4 leva a uma corrente de $2\mu A$ no galvanômetro.

A ponte da situação 2 tem mais sensibilidade, pois para a mesma variação de R_4 a corrente no detector (galvanômetro) foi maior.

$$\text{Substituindo } R_2 \text{ por } R_4 \text{ na eq. (7), teremos: } E_{Th} = \frac{ER_4\Delta R_4}{(R_4 + R_4)^2} \text{ ou } E_{Th} = \frac{E\Delta R_4}{4R_4} \text{ (8),}$$

$$\text{e a relação entre } \Delta R_4 \text{ e } R_4 \text{ ficará: } \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{4E_{Th}}{E} \text{ (9).}$$

$$\text{Substituindo } E_{Th} \text{ na eq. } I_g = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + r_g}, \text{ ficaremos com: } I_g = \frac{E}{4(R_{Th} + r_g)} \frac{\Delta R_4}{R_4} \text{ (10)}$$

$$\text{ou } \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{4I_g(R_{Th} + r_g)}{E} \text{ (11).}$$

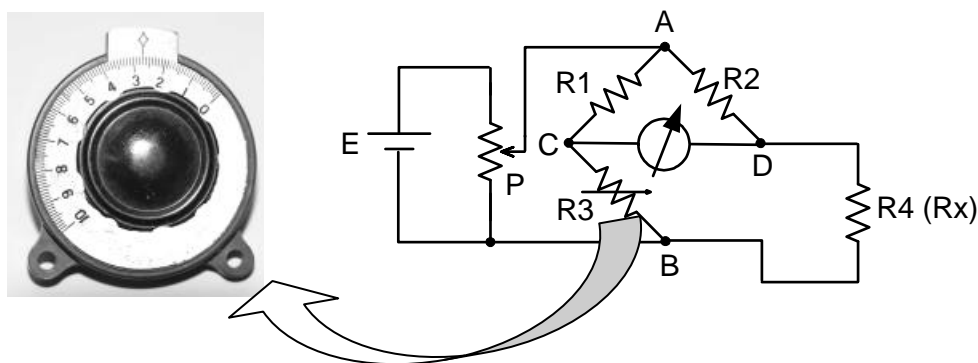
É conveniente ressaltar que as fórmulas (8), (9), (10) e (11) só são aplicáveis para a condição de máxima sensibilidade da ponte: $R_2 = R_4$ e $R_1 = R_3$.

5.1.2- Utilização prática de uma Ponte de Wheatstone

Na maioria dos instrumentos de medição, o galvanômetro ou display indica o valor da grandeza medida. Na pontes de medição, em geral, deve-se balancear a ponte para obter, de forma indireta, uma leitura do valor do componente a ser medido (em nosso modelo, R_4 ou R_x). O procedimento consiste em variar o valor do resistor R_3 até se obter o equilíbrio, ou seja: $R_2 R_3 = R_1 R_4$. O eixo de R_3 (que pode ser um potenciômetro ou uma chave ligando resistores em série) está associado a uma escala no painel do instrumento. Nessa escala é lido o valor de R_x .

O potenciômetro P é usado para aumentar gradativamente a tensão de alimentação da ponte, evitando que um desbalanceamento grande provoque uma corrente I_g muito alta, o que poderia danificar o galvanômetro.

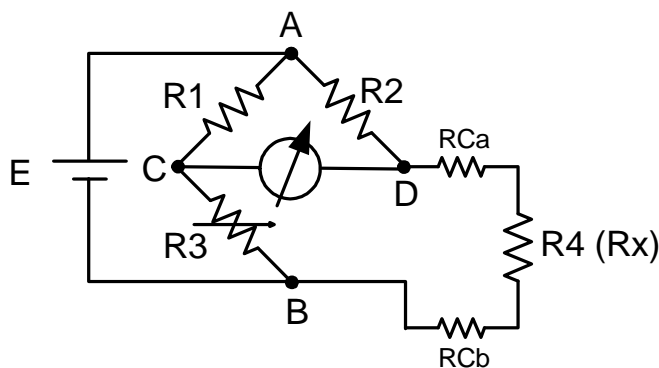
Pontes digitais apresentam o valor ôhmico diretamente em um display.



5.2- Ponte de Kelvin

Em algumas situações as pontes de medição podem apresentar erros devido às resistências dos cabos de conexão do resistor a ser medido ou da resistência de contato dos terminais de conexão da própria ponte ao resistor. Esse problema se acentua quando a resistência a ser medida é muito pequena (geralmente inferior a 1Ω) ou quando os cabos que a ligam à ponte são longos e possuem uma resistência que pode afetar a medição.

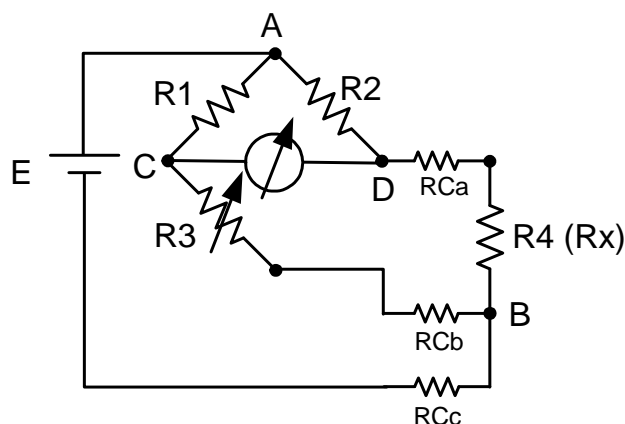
O diagrama abaixo exemplifica esse problema:



O valor medido pela ponte não será apenas o do resistor R_4 , mas também o das duas resistências de conexão R_{Ca} e R_{Cb} , pois a resistência equivalente ligada aos pontos D e B é: $R_{Ca} + R_4 + R_{Cb}$.

A ponte de Kelvin, através de uma pequena alteração efetuada na ponte de Wheatstone, evita esse problema.

Um terceiro condutor, representado por RCc , é ligado ao circuito, como mostra o diagrama abaixo, onde $R1$ deve ser, obrigatoriamente, igual a $R2$ e as resistências de conexão RCa e RCb iguais entre si:



A equação de equilíbrio descrita anteriormente, fica agora:

$$R2.(R3 + RCb) = R1.(R4 + RCa)$$

Sendo $R1 = R2$, temos que $R3 + RCb = R4 + RCa$

Se os condutores das resistências de conexão forem idênticos ($RCa = RCb$) a equação anterior se reduz a:

$$R3 = R4$$

o que demonstra que a resistência da conexão não mais influi na medição, mas isso ocorre apenas quando a ponte está em equilíbrio.

Condições para o projeto de uma ponte de Kelvin:

1. $R1 = R2$
2. $RCa = RCb$

5.3- Aplicações de pontes de medição

5.3.1- Medição de temperatura através de termoresistências

Termoresistências tipo Pt100 são utilizadas para medição de temperatura. Operam na faixa de -200°C a $+850^{\circ}\text{C}$ e se baseiam no fato de que, com a variação da temperatura, a resistência ôhmica também varia. São construídas com um fio de platina (Pt) de alta pureza, encapsulado em um bulbo de cerâmica ou vidro. A 0°C sua resistência ôhmica é de exatamente 100Ω . Para cada $^{\circ}\text{C}$ de aumento de temperatura, sua resistência aumenta, linearmente, $0,39\Omega$; para cada $^{\circ}\text{C}$ de diminuição a resistência cai, também de forma linear, $0,39\Omega$.

Um projeto utilizando esse tipo de sensor deve levar em conta, além das características já apresentadas, o fato de que a corrente elétrica que circula pelo sensor irá provocar um aquecimento no mesmo, introduzindo um erro na medição. Esse erro será diretamente proporcional à corrente que passa pelo sensor e maior, porcentualmente, quando a temperatura medida for próxima a 0°C . Por norma, a potência máxima desenvolvida em um termoresistor não deve ser maior $0,1\text{mW}$, ou cerca de 1mA para 0°C , quando o valor da resistência é de 100Ω .

Esse tipo de dispositivo é normalmente fornecido com 3 condutores, para possibilitar a implementação através de uma ponte de Kelvin. Dessa forma, mesmo com o Pt100 instalado à distância da ponte, o erro devido à resistência dos cabos de conexão é praticamente nulo. Nesse caso, a ponte deve ser implementada através de um circuito eletrônico adequado, não sendo utilizado um galvanômetro para a leitura da temperatura.

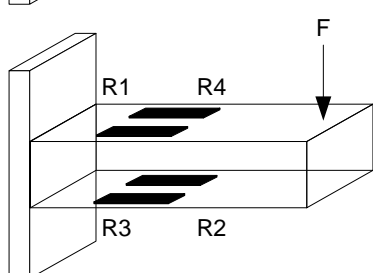
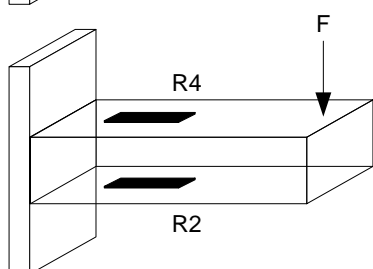
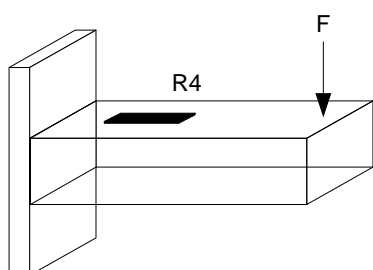
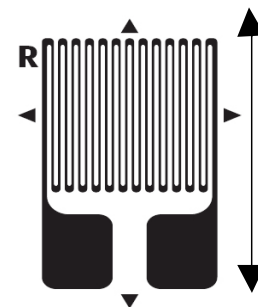
5.3.2- Medição de peso através de *strain gages*

Strain gages (também grafado como *strain gauges*) ou sensores de deformação mecânica são dispositivos utilizados para medir o alongamento ou contração de materiais. São também conhecidos como extensômetros e o método como extensometria. Existem diversos tipos desses sensores, sendo um dos mais comuns o resistivo, que possui diversas formas e tamanhos.

Um exemplo desse tipo de sensor é mostrado ao lado. Consiste geralmente de um filme de poliéster, que serve de base, no qual é depositada uma trilha de material resistivo. O dispositivo é colado, com adesivos especiais, ao material do qual se deseja obter informações mecânicas, e quando sofre uma deformação como a indicada pela seta, o comprimento total L da trilha aumenta, enquanto que sua secção transversal S diminui. Sabendo que

$R = \frac{\rho L}{S}$ (onde ρ é a resistividade do material do sensor) é possível

concluir que a resistência R do sensor aumenta com o alongamento (quando L aumenta e S diminui) e diminui com a contração (quando L diminui e S aumenta). A variação de resistência obtida é relativamente pequena, o que torna os circuitos em ponte adequados para este tipo de aplicação, pela sua sensibilidade em detectar pequenas variações de resistência.



Os desenhos ao lado mostram blocos de um material que está fixo (do lado esquerdo) mas que possui capacidade de fletir quando submetido à força F .

No primeiro caso, apenas um *strain gage* foi colado ao material. Sua variação, quando o bloco for submetido à força, pode ser transformada em um sinal elétrico através de uma ponte de Wheatstone, onde estão os resistores $R1$, $R2$ e $R3$.

No segundo caso dois *strain gages* são colados ao bloco. Para o sentido da força aplicada, quando a resistência de $R4$ aumenta (pois seu comprimento aumenta junto com a superfície do material) a de $R2$ diminui (pois seu comprimento também diminui). Com dois resistores variando de forma oposta, a tensão de saída da ponte aumenta em relação ao caso anterior.

A última montagem apresenta quatro *strain gages* ligados em ponte. Essa é a configuração que apresenta maior tensão de saída entre as três, para uma mesma força aplicada. Além disso, é também imune a erros causados pela temperatura, que poderia dilatar ou contrair o bloco e alterar o valor das resistências.

Este tipo de dispositivo é bastante utilizado em balanças, sejam elas comerciais (supermercados e farmácias) ou de grande porte (rodoviárias e industriais), além de ser aplicado em inúmeros outros dispositivos de medição, para converter força mecânica em sinal elétrico.

EXERCÍCIOS

5.1- Para as quatro combinações apresentadas abaixo para uma ponte de Wheatstone, complete a tabela e analise os resultados. A fonte de alimentação é de 10V, a resistência interna do galvanômetro é 500Ω e a variação de R_4 é de 2,5% para mais.

	R1	R2	R3	R4	ΔR_4	R4'	RTh	ETh	Ig
a	1K Ω	10K Ω	100 Ω						
b	100 Ω	100 Ω	1K Ω						
c	1K Ω	1K Ω	1K Ω						
d	100 Ω	1K Ω	100 Ω						

Respostas (para Ig) : a) 13,55 μ A; b) 29,62 μ A; c) 40,98 μ A; d) 58,45 μ A.

5.2- Uma ponte de Wheatstone tem as seguintes características: $R_1=R_2=R_3=100\Omega$, $R_4=100,1\Omega$, $E=3V$, $r_g=50\Omega$. A sensibilidade do galvanômetro é de 10 div/ μ A. Determinar:

- a- quantas divisões deflexiona o ponteiro do galvanômetro;
- b- qual a sensibilidade da ponte (Ω /div).

respostas: a) 50 div; b) 2m Ω /div

5.3- Os valores das resistências de uma ponte de Wheatstone são os seguintes: $R_1=1000\Omega$, $R_2=500\Omega$ e $R_3=100\Omega$. A bateria é de 3V, e o galvanômetro com sensibilidade de $S=4$ div/ μ A tem $r_g=90\Omega$. Determinar:

- a- o valor de R_x (R_4) para a ponte ficar em equilíbrio;
- b- a corrente que circula pelo galvanômetro quando R_4 varia 0,5 Ω para menos;
- c- a sensibilidade da ponte (Ω /div).

respostas: a) 50 Ω ; b) 10,98 μ A; c) 11,38 m Ω /div.

5.4- Para medir um resistor com exatidão de 0,5% em uma ponte de Wheatstone, qual deverá ser a mínima corrente detectável pelo galvanômetro? Os dados da ponte são: $R_1=1K\Omega$, $R_2=2K\Omega$, $R_3=1K\Omega$, $E=6V$ e $r_g=1K\Omega$.

respostas: $I_{g\min} \leq 3\mu A$.

5.5- Qual a menor variação de R_4 mensurável por uma ponte, sabendo que a menor corrente detectável pelo galvanômetro é 1 μ A, que tem $r_g=100\Omega$ e que $R_1=R_3=1K\Omega$, $R_2=R_4=100\Omega$ e $E=5V$.

resposta: $\Delta R_4=0,052\Omega$

5.6- Deseja-se construir uma ponte de Wheatstone, com o fim específico de medir resistores de 200 Ω com o máximo de sensibilidade e exatidão de 1%. Sabendo-se que $R_1=1K\Omega$, $E=12V$ e que a menor corrente que o galvanômetro de zero central disponível é capaz de indicar é da ordem de 30 μ A ao redor do zero e que sua $r_g=1k\Omega$, determinar:

R_2 e R_3 ;

se o galvanômetro disponível pode ser utilizado, justificando a resposta.

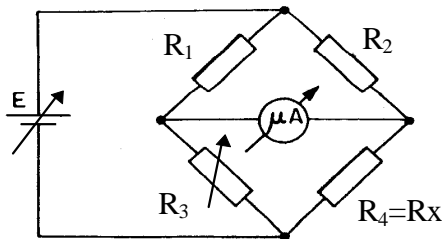
Respostas: a) $R_2=200\Omega$, $R_3=1K\Omega$; b) não, pois a $I_g=18,85\mu A$ no circuito.

5.7- P2-2-97 Uma ponte de Wheatstone foi construída com o objetivo específico de medir, com a máxima sensibilidade, resistores de 150Ω com uma exatidão de $\pm 1\%$. Durante os testes de performance, constatou-se que o galvanômetro de zero central apresentava uma deflexão de 40% da escala, equivalente a 20 divisões, para o lado positivo, quando se ligava à ponte um resistor de 155Ω (R_4 ou R_x). Sabe-se que o galvanômetro tem uma $r_g=1K\Omega$, com $I_o=\pm 100\mu A$ e que $R_1=R_3=100\Omega$. Determinar :

- o valor da tensão de alimentação E ;
- se a ponte está funcionando corretamente (desenhar a escala do galvanômetro, indicando a região de medição dentro do padrão de $\pm 1\%$).

Respostas: a) 5,5V; b) $S(\Omega)=0,25\Omega/\text{div}$, e para $\Delta R_4=1,5\Omega$, o n° de div. = 6, logo o funcionamento esta correto

5.8- Deseja-se medir, com a ponte de Wheatstone abaixo, resistores de 1000Ω com exatidão de 2%. Sabendo-se que $R_1=R_2=R_3=1K\Omega$, que a fonte E foi ajustada para 5V, que o galvanômetro de zero central disponível tem sensibilidade para deflexionar a partir de uma corrente de $50\mu A$ e que sua $r_g=100\Omega$, determinar, justificando todas as respostas:



- se a ponte atende a necessidade;
- quais as modificações necessárias (em resistores e tensão de alimentação) para aumentar ao máximo a sensibilidade da ponte e se esta, com as modificações, atende a necessidade.

Obs.: a fonte E é ajustável de 0 a 10 V e, em equilíbrio, a ponte deve consumir no máximo 100mA.

Respostas: a) não atende; b) atende para $R_1=R_3=52,63\Omega$ e $E=10V$.

5.9- P3-2-97 Deseja-se projetar uma ponte de Wheatstone para medir resistores de 100Ω . A ponte será alimentada por 4 pilhas de 1,5V cada, ligadas em série, e que poderão fornecer, em conjunto, no máximo 50mA com a ponte em equilíbrio. O galvanômetro disponível é de zero central, com $I_o=\pm 50\mu A$. e $r_g=1K\Omega$. Quando o erro no resistor medido for de 5% para mais, a deflexão deverá ser de 40% da escala. A ponte deve ter a maior sensibilidade possível. Pede-se:

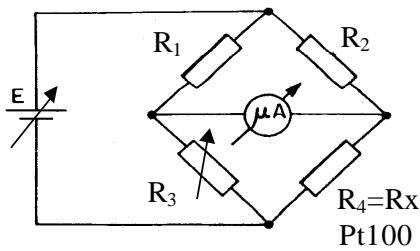
- Desenhar a ponte, indicando os valores dos resistores e da fonte de alimentação;
- Verificar se a corrente máxima que as pilhas podem fornecer não foi excedida.

Respostas: a) $R_1=R_3=5218\Omega$, $E=6V$; b) 30,58mA

5.10- P3-2-98 Uma ponte de Wheatstone, projetada para medir resistores de 100Ω , tem as seguintes características: $E=10V$; $R_1=R_3=1K\Omega$; $R_2=100\Omega$; $r_g=100\Omega$; $I_o=\pm 1mA$ (zero central); mobilidade do galvanômetro (I_{min} para deflexão) = $10\mu A$. Determinar o valor percentual da exatidão da ponte.

Resposta: 0,26%

5.11- Termoresistências tipo Pt100 são utilizadas para medição de temperatura. A 0°C sua resistência ôhmica é de exatamente 100Ω . Para cada $^{\circ}\text{C}$ de aumento de temperatura, sua resistência aumenta, linearmente, $0,39\Omega$; para cada $^{\circ}\text{C}$ de diminuição a resistência cai, também de forma linear, $0,39\Omega$.



Deseja-se construir, utilizando um Pt100 e uma ponte de Wheatstone com galvanômetro de zero central, um termômetro com resolução de $1^{\circ}\text{C}/\text{div}$, que indique 0°C na posição central. Os materiais disponíveis são: uma fonte de 10V e um galvanômetro de zero central com I_0 de $\pm 50\mu\text{A}$, $r_g = 100\Omega$ e $S = 1\text{div}/\mu\text{A}$.

Determinar os valores dos demais componentes do projeto, considerando que a máxima potência que deve ser dissipada pelo sensor (Pt100) é de $0,1\text{mW}$ para a temperatura de 0°C e utilizando para o cálculo dos demais resistores a temperatura de centro de faixa positiva (25°C) do termômetro.

Resposta: $R_1 = 17705\Omega$; $R_2 = 9900\Omega$; $R_3 = 178,84\Omega$

5.12- No exercício 5.11 foi desenvolvido o projeto de uma ponte de Wheatstone utilizando um termoresistor Pt100. Determine os erros absoluto e percentual na indicação obtida para as seguintes situações:

- quando as temperaturas forem de 1°C , 10°C , 40°C e 50°C ;
- quando a temperatura medida for de 25°C e os cabos de conexão do sensor forem de $0,75\text{mm}^2$ (aprox. 18AWG) e tiverem 15m de comprimento cada (o cabo em questão tem uma resistência de $0,021\Omega/\text{m}$).

Resposta: a) $0,025^{\circ}\text{C}$, 2,5% p/ mais; $0,16^{\circ}\text{C}$, 1,6% p/ mais; $0,61^{\circ}\text{C}$, 1,5% p/ menos; $1,26^{\circ}\text{C}$, 2,52% p/ menos; b) $1,57^{\circ}\text{C}$, 6,28% p/ mais.

5.13- A partir dos resultados obtidos no exercício 5.12, quais as suas conclusões a respeito da linearidade de uma ponte de Wheatstone? Ela é adequada para a utilização proposta ou necessita alguma correção adicional?

5.14- Projete novamente o termômetro do exercício 5.11, utilizando agora uma ponte de Kelvin, para as condições descritas no item b do ex. 5.12. Além das limitações já utilizadas para potência dissipada no Pt100, observe também as condições para o projeto da ponte de Kelvin: $R_1 = R_2$ e $R_{Ca} = R_{Cb}$. Como essa ponte só elimina o efeito das resistências dos cabos de conexão quando está em equilíbrio, a leitura terá de ser feita através do ajuste do potenciômetro representado por R_3 , quando o galvanômetro indicar zero.

Respostas: $R_1 = 12450,75\Omega$; $R_2 = 12450,75\Omega$; $R_3 = 100\Omega$

5.15- P2-2-98 Em um ensaio de uma Ponte de Wheatstone foram obtidos os valores da tabela abaixo:

R_1, R_2, R_3	$R_{4\text{med}}$ (equilíbrio)	$R_{4'}$ (desequilíbrio)	n° de divisões (desequilíbrio)	Sensibilidade Ω/div
combinação A	200	210	2	5
combinação B	200	240	10	4 *
combinação C	200	260	12	5

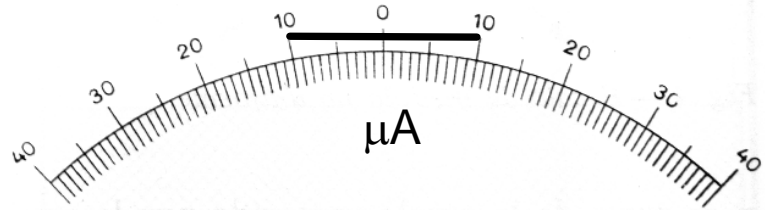
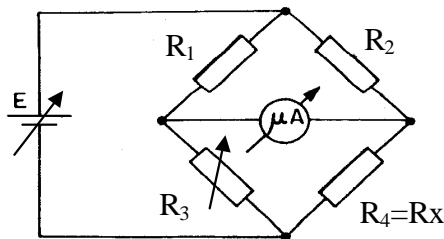
Determinar:

- a sensibilidade Ω/div para cada combinação;
- qual das três combinações pode medir resistores com maior exatidão (**justifique!**).

Respostas em negrito (* combinação mais sensível das três.)

5.16- P2 2/01 Uma empresa tem uma linha de montagem de resistores de 45Ω , que precisam ser entregues aos clientes com uma variação máxima de $\pm 2\%$ em seu valor. Para efetuar a conferência das resistências é utilizada uma Ponte de Wheatstone, projetada para a máxima sensibilidade e alimentada por 8 pilhas de 1,5V em série, e em cujo galvanômetro, que tem uma r_g de 100Ω , foi desenhada uma faixa (mostrado abaixo) que define a deflexão para a variação de R_4 proposta. Determine:

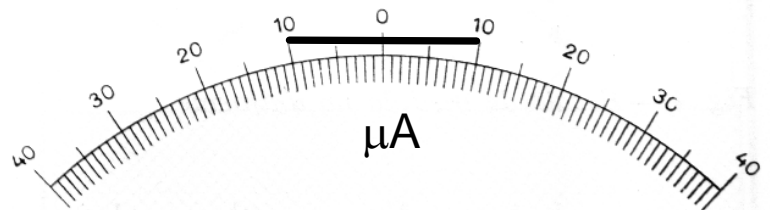
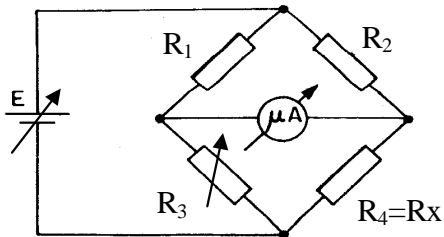
- O valor dos resistores R_1 , R_2 e R_3 da Ponte;
- As alterações nos valores dos resistores para a faixa desenhada no galvanômetro ocupar 50% da escala, mantendo a tensão de alimentação e a característica de máxima sensibilidade.



UTILIZAR A VARIAÇÃO DE R_4 PARA MAIS NOS CÁLCULOS

Respostas a- $R_2 = 45\Omega$, $R_1 = R_3 = 11634,56\Omega$; b- $R_1 = R_3 = 5694,56\Omega$;

5.17- P2 1/00 Deseja-se construir uma ponte de Wheatstone para medir, com a máxima sensibilidade, resistores de 111Ω , com exatidão de 1%. Deve ser utilizado o galvanômetro cujo painel aparece abaixo, cuja $r_g = 1K\Omega$. A faixa escura ao redor do zero

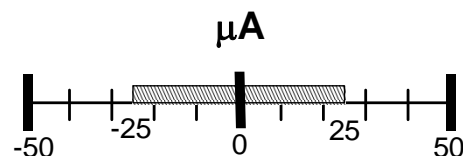
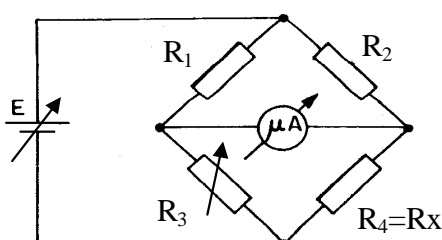


central indica a região onde a variação de R_x será de $\pm 1\%$. Sabendo-se que a fonte é fixa e igual a 9V, determinar os valores de R_1 , R_2 e R_3 .

Respostas $R_2 = 111\Omega$; $R_1 = R_3 = 2366,44\Omega$

5.18- P2 2/00 Deseja-se projetar uma ponte de Wheatstone para o fim específico de medir resistores de 100Ω com 1% de exatidão. A escala do galvanômetro utilizado, cuja r_g é igual a 100Ω , é mostrada abaixo. A região em destaque ($\pm 25\mu A$) representa a faixa de $\pm 1\%$ de exatidão do instrumento. A tensão de alimentação é fornecida por 6 pilhas de 1,5V em série. Determinar:

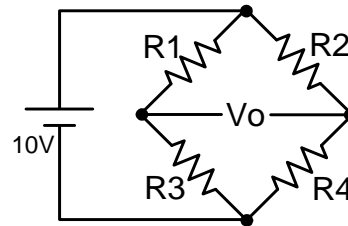
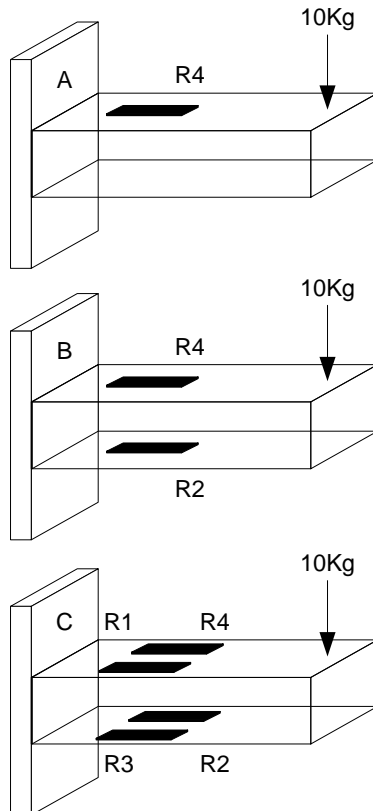
- Os valores de R_1 , R_2 e R_3 , para obter a máxima sensibilidade;
- para quanto seria alterada a exatidão do instrumento, caso os valores de R_1 e R_3 fossem alterados para $5K\Omega$, mantendo a indicação nos limites da região em destaque.



Respostas a- $R_2 = 100\Omega$, $R_1 = R_3 = 1490,5\Omega$; b- 3%

5.19- Considere um bloco de alumínio fixado em um dos lados, como nas figuras abaixo e submetido, na outra extremidade, a uma flexão causada por um peso de 10Kg. Serão utilizados *strain gages* resistivos, com $R = 100\Omega$, fixados ao bloco e ligados em ponte. Os resistores que complementam a ponte, quando necessário, também são de 100Ω . A variação da resistência dos *strain gages*, quando o peso é aplicado, é da ordem de 0,1%. A tensão de alimentação da ponte é de 10V. Determine:

- a tensão de saída V_o da ponte para cada um dos casos apresentados, analisando a sensibilidade da ponte para cada caso;
- qual dos três casos apresenta maior sensibilidade a variações de temperatura, justificando adequadamente.

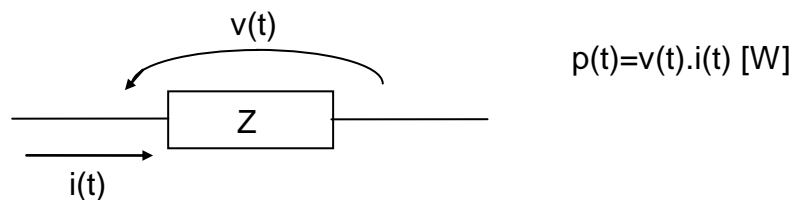


Respostas a- 2,5mV, 5mV, 10mV; b- caso A

6- MEDIÇÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICAS

6.1- Potência em Corrente Alternada (Revisão)

→ **Potência Instantânea** potência real dissipada na carga em uma unidade de tempo



→ **Potência Ativa (Média)** potência real dissipada na carga

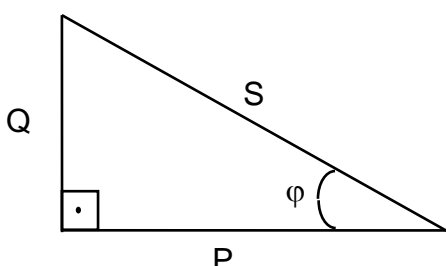
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \Rightarrow P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$

onde $v(t) = V_p \sin \omega t$ [V], $i(t) = I_p \sin(\omega t \pm \varphi)$ [A] e φ é a defasagem entre corrente e tensão.

Resolvendo a integral, teremos:

$$P = V_{ef} \times I_{ef} \times \cos \varphi \text{ [W]}$$

A partir do triângulo das potências, encontramos:



→ **Potência Reativa** dissipada nos componentes reativos da carga (XL e XC)

$$Q = V_{ef} I_{ef} \sin \varphi \text{ [VAR]}$$

→ **Potência Aparente** produto $V \times A$ desconsiderando a defasagem

$$S = V_{ef} I_{ef} \text{ [VA]}$$

6.2- Método do Voltímetro/Amperímetro

Uma forma simples de medir a potência consumida por uma carga é utilizando um voltímetro e um amperímetro que indicam, respectivamente, a corrente que passa pela carga e a tensão sobre ela.

Esse método só é válido quando:

- a tensão da fonte é contínua ou
- a tensão da fonte é alternada e a carga resistiva.

Nos dois casos anteriores não ocorre defasagem entre corrente e tensão no circuito, as medidas dos instrumentos V e A são corretas em função do tempo e o produto das indicações representa a potência ativa [W] na carga:

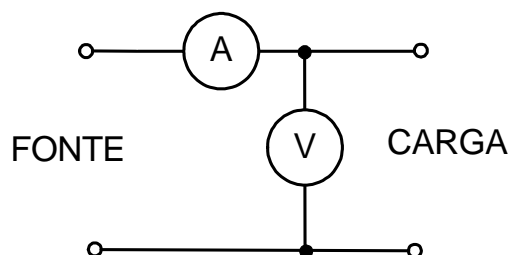
$$V \times A = P \text{ [W]}$$

Caso a fonte seja alternada e a carga reativa ocorrerá defasagem, e o produto das indicações dos instrumentos (valores eficazes) resultará na potência aparente [VA] na carga:

$$V \times A = S \text{ [VA]}$$

Nesse caso, para determinar a potência ativa, é necessário saber o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão e aplicar a fórmula:

$$P = V_{ef} \times I_{ef} \times \cos \varphi \text{ [W]}$$



6.3- Wattímetros Eletrodinâmicos

Sendo a potência eléctrica uma relação entre duas grandezas (tensão e corrente), para sua medição é necessário um instrumento que consiga medir, simultaneamente, essas grandezas, apresentando como resultado um valor resultante que, em uma escala adequada, será interpretado como potência.

Os instrumentos denominados eletrodinâmicos, possuem as características necessárias para a medição de potência eléctrica. Esses instrumentos apresentam as mesmas características básicas dos de ferro móvel e eletrostáticos já estudados: podem ser utilizados tanto em corrente alternada como em contínua, sua resposta é quadrática e apresentam relativa independência do valor indicado em relação à forma de onda.

Nesse tipo de instrumento, o campo magnético não é, como nos galvanômetros, fornecido por um ímã permanente, e sim por bobinas de campo (também chamadas de bobinas de corrente - B_c) por onde circula a corrente da carga. A uma bobina móvel (chamada de bobina de potencial - B_p) aplica-se, com a devida atenuação, a tensão da carga. O movimento do conjunto móvel (bobina B_p) resulta da interação entre os campos magnéticos produzidos pelas correntes i_c (em B_c) e i_p (em B_p).

A energia armazenada no campo magnético das bobinas B_c e B_p pode ser calculada por:

$$E = \frac{1}{2} L_c \cdot i_c^2 + \frac{1}{2} L_p \cdot i_p^2 + M i_c i_p$$

onde:

$L_c \rightarrow$ indutância da bobina B_c

$L_p \rightarrow$ indutância da bobina B_p

$M \rightarrow$ indutância mútua entre B_c e B_p .

Para um desvio $d\theta$ do conjunto móvel,

teremos:

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{d\left(\frac{1}{2} L_c i_c^2\right)}{d\theta} + \frac{d\left(\frac{1}{2} L_p i_p^2\right)}{d\theta} + \frac{d(M i_c i_p)}{d\theta}$$

Como os dois primeiros termos independem de θ , sua derivada é zero e a equação fica:

$$\frac{dE}{d\theta} = i_c i_p \frac{dM}{d\theta}$$

onde $\frac{dE}{d\theta}$ é o Conjugado Motor instantâneo para o dispositivo (ver item 7.1). Para determinar o Conjugado Motor médio fazemos:

$$C_m = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dE}{d\theta} dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_c i_p \frac{dM}{d\theta} dt$$

Como $i_p = \frac{v(t)}{R_p}$ (onde R_p é a resistência da bobina de potencial) e $i_c = i(t)$, teremos:

mos:

$$C_m = \frac{dM}{d\theta} \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \frac{v(t)}{R_p} dt = \frac{1}{R_p} \frac{dM}{d\theta} \frac{1}{T} \int_0^T i(t) v(t) dt \quad \text{onde} \quad \frac{1}{T} \int_0^T i(t) v(t) dt = P$$

Finalmente:

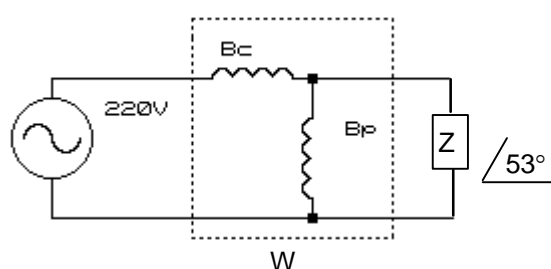
$$C_m = \frac{1}{R_p} \frac{dM}{d\theta} P$$

ou seja, o Conjugado Motor é proporcional à potência ativa dissipada na carga.
Como $C_m = K\theta$ podemos escrever a fórmula acima como:

$$K\theta = \frac{1}{R_p} \frac{dM}{d\theta} P \text{ ou } \theta = \frac{1}{KR_p} \frac{dM}{d\theta} P$$

6.4 - Cuidados na Ligação do Instrumento

Suponhamos a situação abaixo, onde um Wattímetro eletrodinâmico é conectado a um circuito ao qual está ligada uma carga Z, para medição de potência ativa.



As limitações do instrumento são:

- Bobina de Corrente: 10A
- Bobina de Potencial: 300V

A máxima potência mensurável pelo instrumento será portanto:

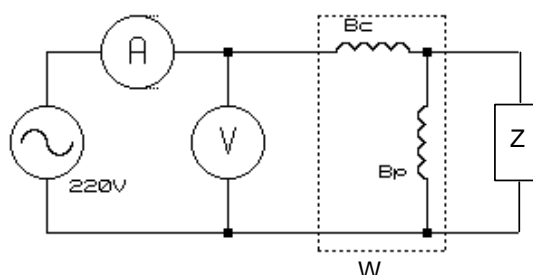
$$P = VI = 300 \cdot 10 = 3000W$$

Sendo a indicação do instrumento 2400W, e sabendo os valores de φ e da tensão V, podemos determinar a corrente:

$$P = VI \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{2400}{220 \cos 53^\circ} \Rightarrow I = 18A$$

Ou seja, embora a indicação de potência (2400W) esteja abaixo do limite do instrumento (3000W), uma das grandezas medidas (18A) ultrapassou o limite permitido (10A).

Para evitar este problema, é conveniente sempre efetuar a montagem abaixo para medições com o Wattímetro, cuidando sempre que as medidas de corrente e tensão não excedam as limitações do instrumento.



6.5- Um instrumento comercial

Em seguida serão apresentados alguns detalhes do wattímetro modelo 2041 da Yokogawa.

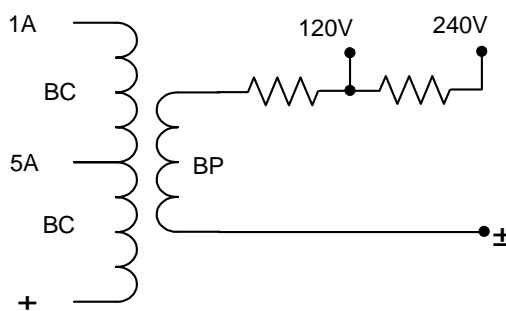
Faixas de medição, impedância interna e perdas:

ALCANCES		FAIXAS DE MEDIÇÃO		IMPEDÂNCIA INTERNA	PERDAS
TENSÃO	CORRENTE	120V		12000Ω	1,2VA
			240V	24000Ω	2,4VA
1/5A	1A	120W	240W	0,93Ω	0,93VA
	5A	600W	1,2KW	0,034Ω	0,84VA

Especificações

- Exatidão: $\pm 0,5\%$ sobre o fundo de escala
- Dimensões: 180 X 260 X 140mm
- Peso: aprox. 2,8Kg
- Comprimento da escala: aprox. 135mm
- Número de divisões da escala: 120
- Frequência de trabalho: DC, 25 a 1000Hz
- Capacidade de sobrecarga: Bobina de potencial 50%
Bobina de corrente 100%
- Efeitos do auto-aquecimento: aprox. $\pm 0,15\%$
- Diferença entre as medições DC e AC: aprox. 0,1%
- Efeitos da temperatura externa: aprox. 0,2% / 10°C
- Efeitos do campo magnético externo: aprox. 0,65% / 400A/m

Diagrama interno:



Conexões:

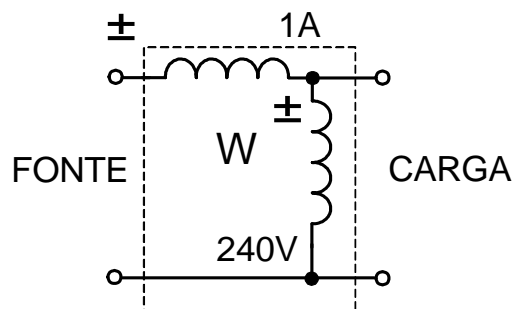
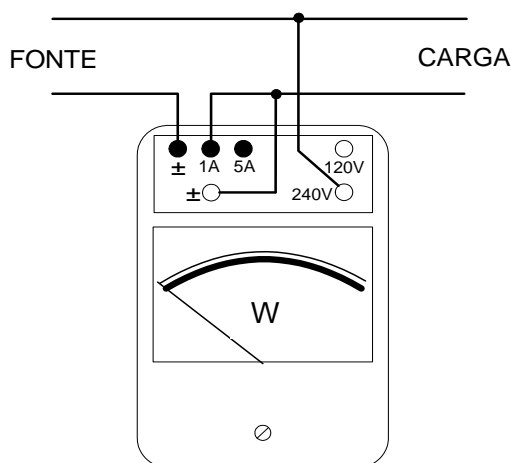


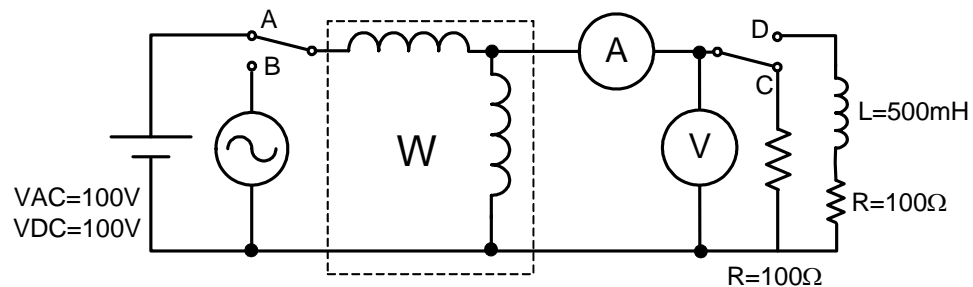
Tabela de correção de escala.

Como o galvanômetro do instrumento possui apenas uma escala, de 0 a 120, é necessário efetuar a correção da leitura para cada combinação tensão/corrente que for utilizada. Caso sejam utilizadas as faixas de 5A e 120V, o multiplicador será 5, e os valores lidos no instrumento deverão ser corrigidos por essa constante. A escala, nesse caso, valerá de 0 a 600W.

FAIXA DE CORRENTE	FAIXA DE TENSÃO	
	120V	240V
1A	1	2
5A	5	10
MULTIPLICADOR		

EXERCÍCIOS

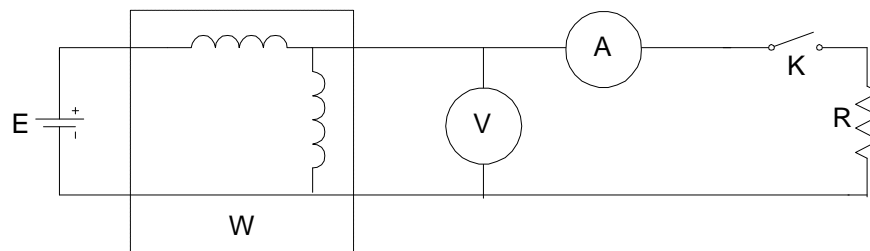
6.1- Dado o circuito abaixo, determine os valores de potência dissipada nas cargas R e Z obtidos pelo wattímetro (W) e pelo método do voltímetro/amperímetro (V/A), para todas as combinações possíveis das chaves. Determine também as indicações do amperímetro e do voltímetro para cada situação. Todos os instrumentos são ideais.



Respostas: (W e V/A) AC 100W, 100W; AD 100W, 100W; BC 100W, 100W; BD 22W, 46,9VA

6.2- P3-2-98 Com a chave K aberta, o Wattímetro W do circuito abaixo indica 1W; com a chave K fechada a indicação é 91,9W. Sabe-se que $E=100V$, $R=100\Omega$ e que o Wattímetro W é ideal. Determinar:

- R_v (resistência interna do Voltímetro V);
- R_a (resistência interna do Amperímetro A);
- a perda total nos instrumentos V e A;
- a indicação de W caso V e A fossem ideais.



Respostas: a) $R_v=10K\Omega$; b) $R_a=10\Omega$; c) $P_t=9,26W$; d) $W=100W$

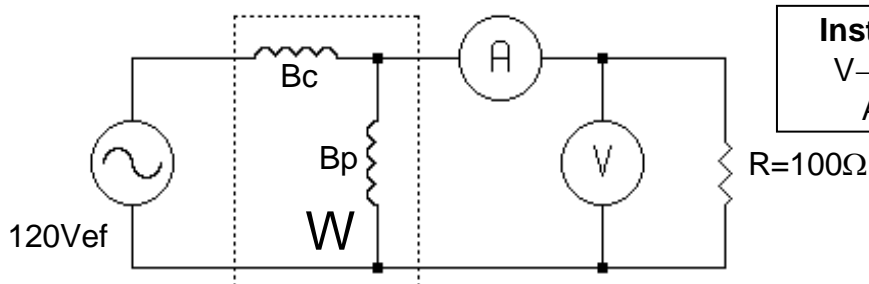
6.3- Dado o circuito abaixo, determinar:

- a indicação do Wattímetro com os instrumentos (V e A) no circuito;
- a indicação do Wattímetro sem os instrumentos (V e A) no circuito;
- erro porcentual devido aos instrumentos (V e A);
- a potência calculada a partir das indicações de V e A.

Obs.:

considerar o Wattímetro ideal;

considerar os instrumentos V e A não ideais (utilizar valores de R_i fornecidos).



Instrumentos de Ferro Móvel

V → alcance 200Vef $R_i=1K\Omega$

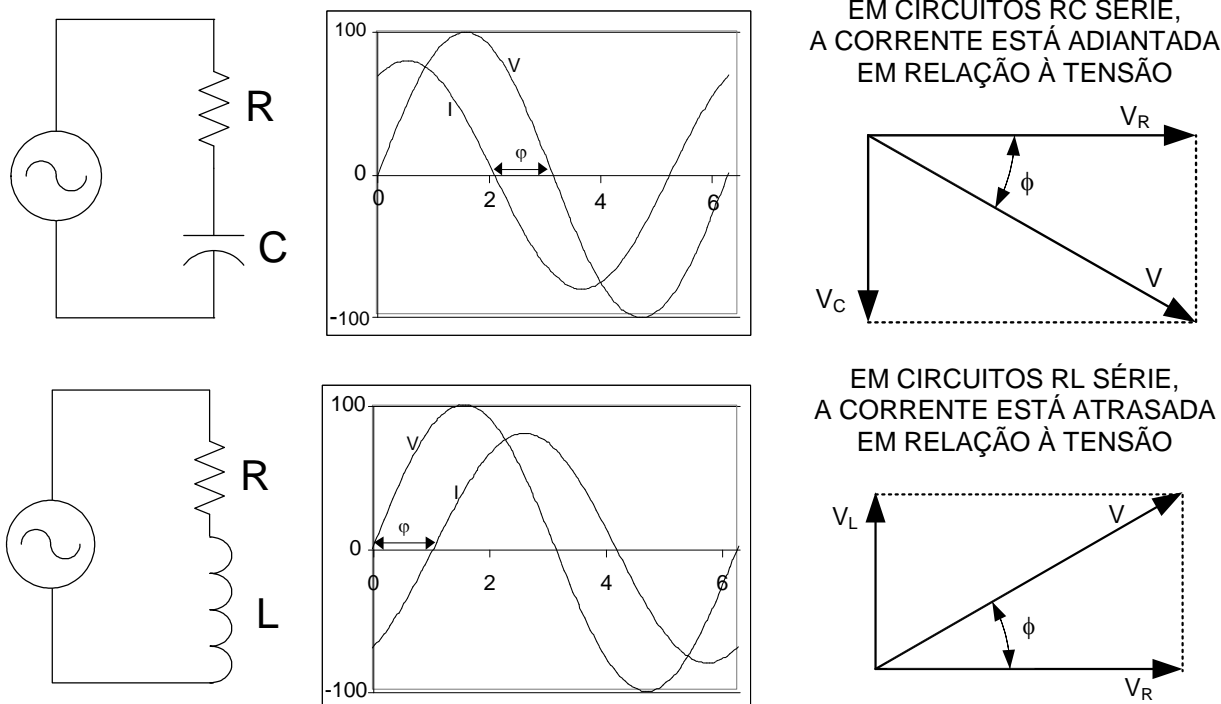
A → alcance 2Aef $R_i=1\Omega$

Respostas: a) 156,7W; b) 144W; c) 8,82% para mais; d) 155W

7 - MEDIÇÃO DE ÂNGULO DE FASE (φ)

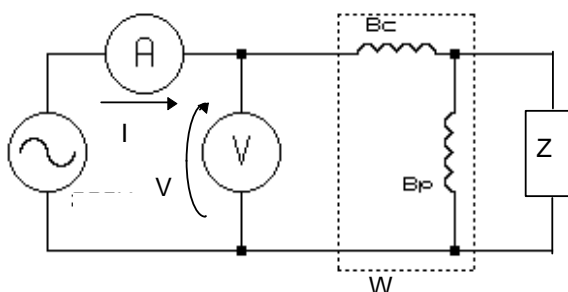
7.1- Defasagem de Sinais Eléctricos (Revisão)

Componentes reativos (indutores e capacitores) em circuitos de corrente alternada, provocam uma defasagem entre tensão e corrente no circuito. O ângulo de defasagem entre tensão e corrente é φ . De forma simplificada, isso pode ser visto a seguir.



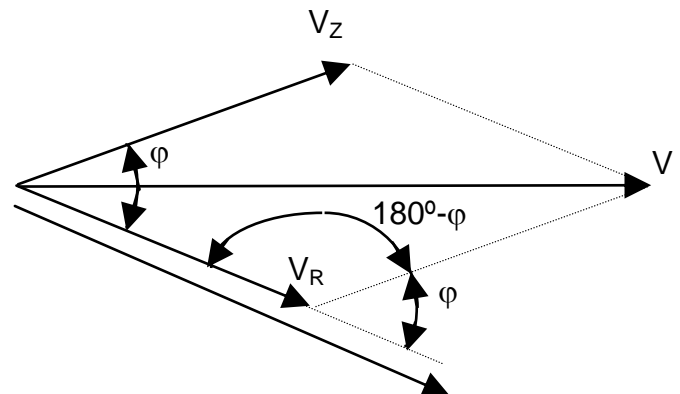
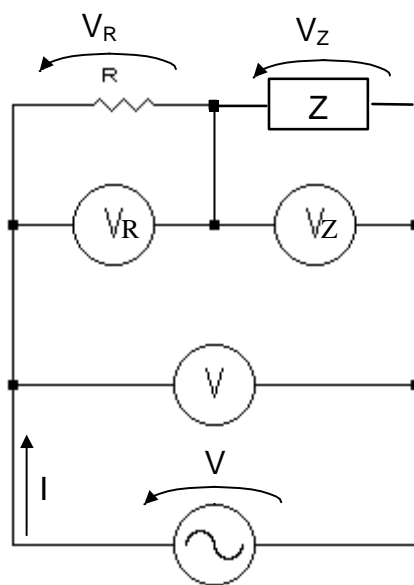
7.2- Método do Wattímetro, Amperímetro e Voltímetro

Sendo $P = VI \cos \varphi \Rightarrow \cos \varphi = \frac{P}{VI}$. A partir do circuito abaixo, podemos determinar a potência, a tensão e a corrente do circuito, e portanto calcular o ângulo φ e o Fator de Potência da carga Z .



7.3- Método dos Três Voltímetros

No diagrama abaixo, a tensão V_R está em fase com a corrente I , enquanto que V_Z está defasada de um ângulo φ . O diagrama fasorial correspondente é mostrado abaixo à direita.



O valor de R não altera o ângulo φ da impedância Z . Apenas a relação de fase entre a tensão total e a corrente total é modificada.

O valor do ângulo φ pode ser determinado à partir da Lei dos Cossenos:

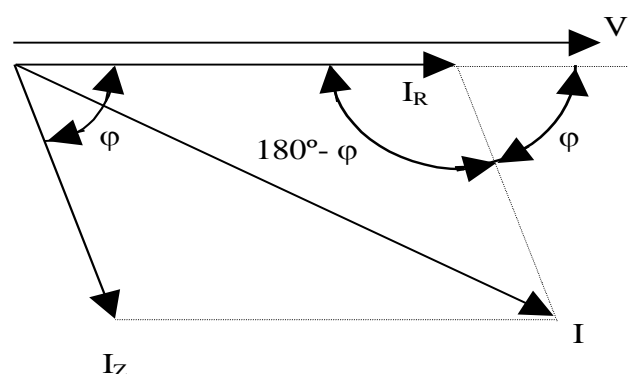
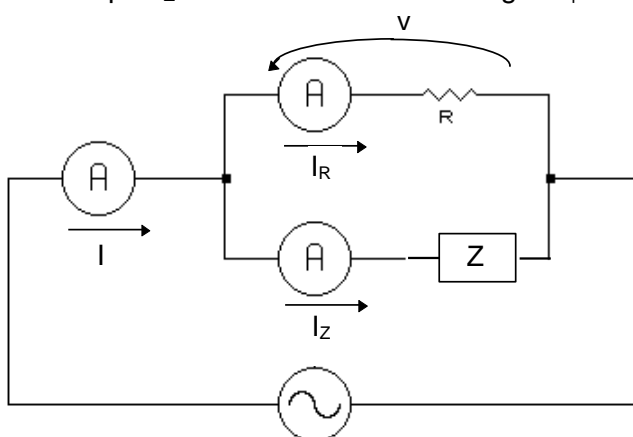
$$V^2 = V_R^2 + V_Z^2 - 2V_R V_Z \cos(180^\circ - \varphi)$$

As condições ideais para medição (maior exatidão) serão obtidas com :

- r_{V_R} (resistência interna do Voltímetro V_R) $\gg R$
- r_{V_Z} (resistência interna do Voltímetro V_Z) $\gg Z$
- $Z \approx R$

7.4- Método dos Três Amperímetros

Este método é análogo ao anterior: a corrente I_R está em fase com a tensão V , enquanto que I_Z está defasada de um ângulo φ .



Pela Lei dos Cossenos, teremos:

$$I^2 = I_R^2 + I_Z^2 - 2I_R I_Z \cos(180^\circ - \varphi)$$

Da mesma maneira que no item anterior, as condições ideais para medição (maior exatidão) serão obtidas quando:

- r_{I_R} (resistência interna do Amperímetro I_R) $\ll R$
- r_{I_Z} (resistência interna do Amperímetro I_Z) $\ll Z$
- $Z \approx R$

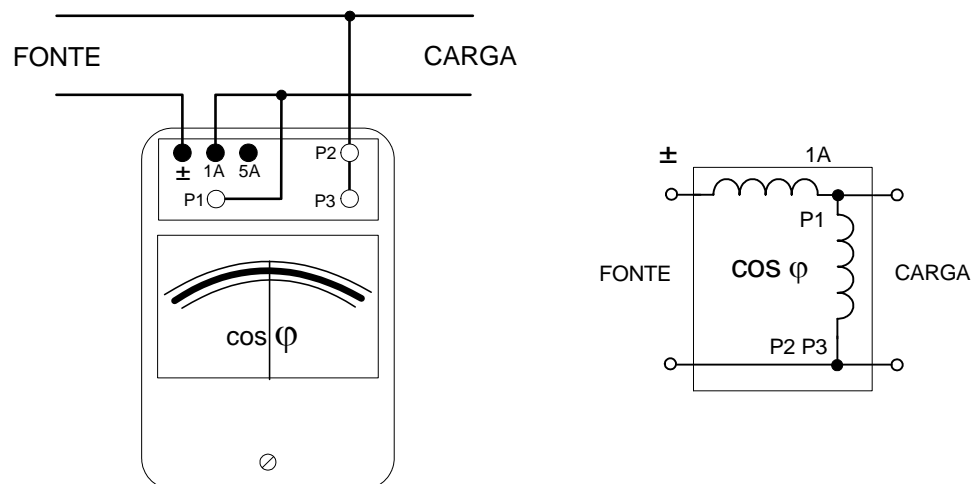
7.5 - Um instrumento comercial

O medidor de fator de potência modelo 2039 da Yokogawa, utiliza um circuito eletrônico para determinar a diferença de fase entre corrente e tensão em um sinal elétrico. Suas especificações e princípio de funcionamento são descritos a seguir.

Especificações

- Faixa de medição: $\cos \varphi = 0,5$ (*lag* - atrasado) – 1,0 – 0,5 (*lead* - adiantado)
- Exatidão: $\pm 3^\circ$ no valor indicado
- Comprimento da escala: aprox. 135mm
- Dimensões: 260 X 180 x 120mm
- Peso: aprox. 2,9Kg
- Influência da tensão: $\pm 1,5^\circ$ na faixa de 60 a 300V
- Influência da corrente: $\pm 3^\circ$ na faixa de 20 a 200% da escala
- Influência do auto-aquecimento: $\pm 1,5^\circ$ (0 – 15 min)
- Influência da temperatura externa: $1^\circ / 10^\circ\text{C}$
- Influência do campo magnético externo: $2^\circ/400\text{A/m}$
- Influência da frequência: $1,5^\circ$ (45 a 65 Hz)

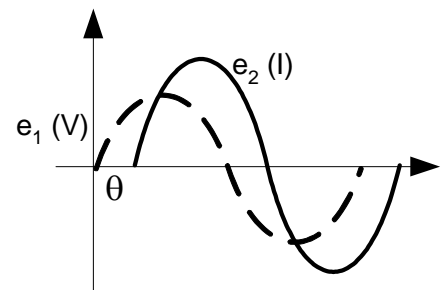
Conexões



Princípio de funcionamento

As fontes e_1 e e_2 representam os sinais de tensão e corrente defasados, de um circuito reativo, onde:

- a tensão e_1 , é obtida a partir da tensão do circuito
- a tensão e_2 , é obtida a partir da corrente do circuito
- as tensões e_1 e e_2 estão defasadas de um ângulo θ
- as tensões de pico de e_1 e e_2 são maiores que a tensão do zener (e_z)



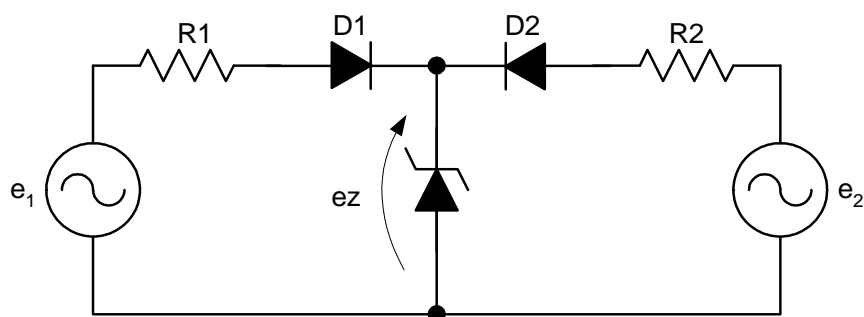
Os gráficos mostram:

- 1- a tensão no zener apenas com o sinal e_1 aplicado ao circuito
- 2- a tensão no zener apenas com o sinal e_2 aplicado ao circuito
- 3- a tensão no zener para ambos os sinais aplicados

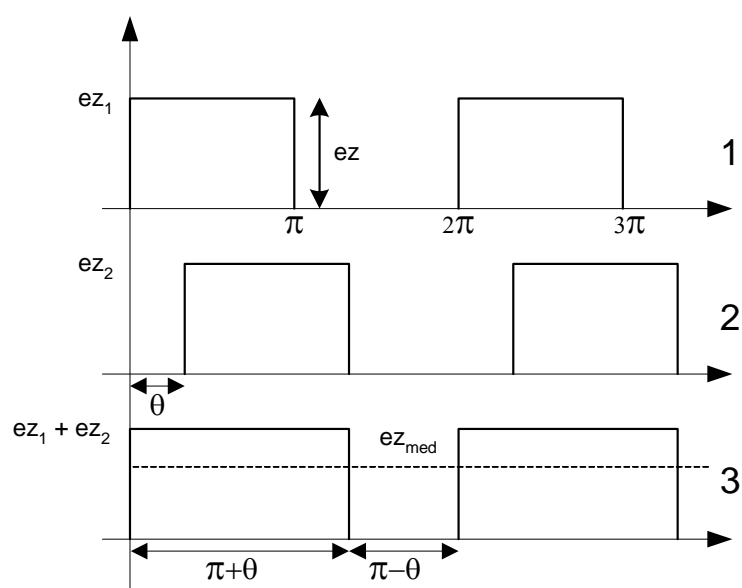
Em todos os casos os sinais são grampeados em e_z pelo zener.

$$e_{zméd} = \frac{1}{2\pi}(\pi + \theta)e_z$$

O galvanômetro mede a tensão e_z em relação ao valor e_1 , ou seja, apenas a defasagem θ é indicada no instrumento.



Circuito equivalente

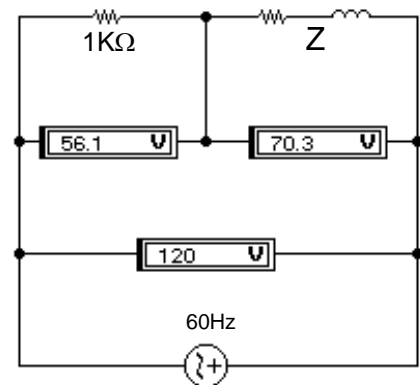


EXERCÍCIOS

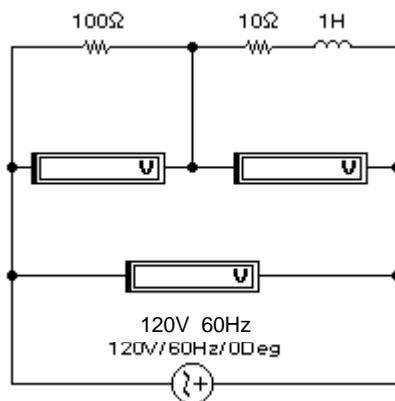
7.1- No circuito abaixo foi efetuada a medição do ângulo de fase da impedância Z pelo método dos três voltmíetros. Pede-se:

- a- determinar o valor desse ângulo;
- b- determinar o valor da impedância Z .

Respostas: a) $\approx 37^\circ$; b) $1250/37^\circ \Omega$.



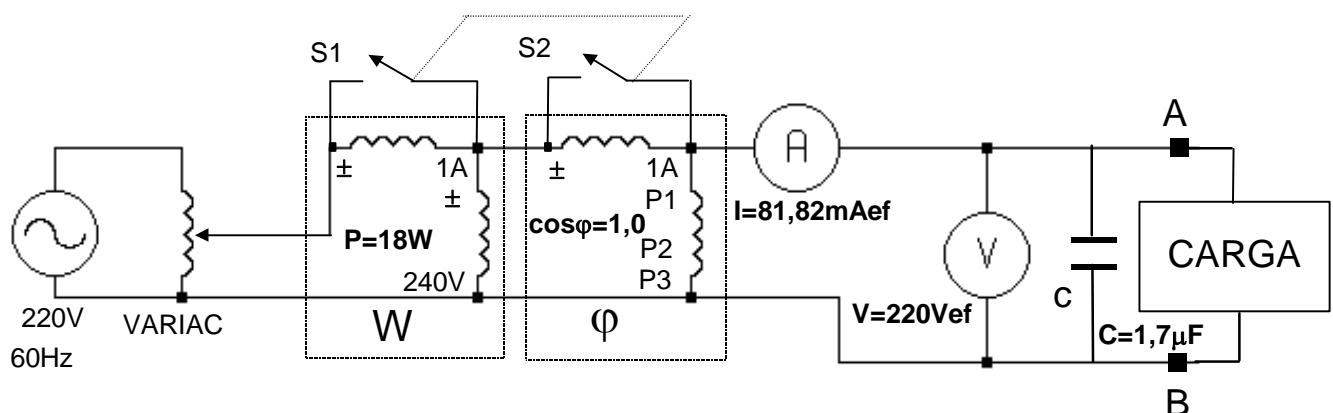
7.2 Dado o circuito abaixo, determine a indicação do três instrumentos, bem como o ângulo φ da impedância através dessas indicações.



Respostas: $V_R=30,6V$; $V_Z= 115,4V$; $V=120V$; $\varphi= 88,5^\circ$.

7.3- No circuito abaixo foram determinadas as medidas indicadas nos instrumentos, com o capacitor C para correção do Fator de Potência ligado. Determinar:

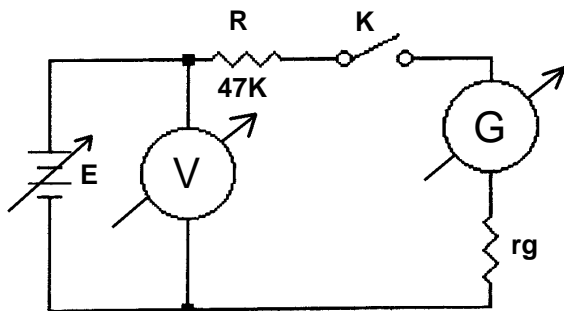
- a) (0,5) o valor que o Wattímetro indicará sem a correção do Fator de Potência;
- b) (1,0) o valor que o amperímetro indicará sem a correção do Fator de Potência;
- c) (0,5) o valor do ângulo de fase da carga.



Respostas: a) não se altera; b) 162,9mA; c) 60°

EXP. 1 – CARACTERÍSTICAS DOS GALVANÔMETROS

1ª PARTE - Determinação da linearidade e da sensibilidade.



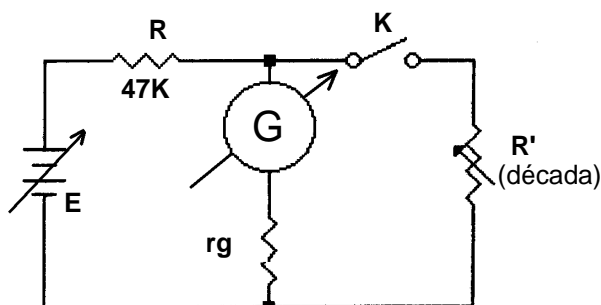
- Montar o circuito ao lado com a chave K aberta e o galvanômetro curto circuitado; ajustar, se necessário, o zero mecânico do galvanômetro. A fonte E deve ser ajustada para zero Volt.
- Retirar o curto-circuito do galvanômetro (manter o instrumento sem o curto até o final da experiência, repondo-o somente para transporte).
- Fechar K e em seguida aumentar a tensão E de forma a obter uma deflexão do ponteiro entre zero e o valor máximo.
- Preencher a tabela com os valores de E para cada posição do ponteiro (div).
- Calcular e preencher na mesma tabela, os valores de $I=E/R$.

div	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	-
E														V
I														μA

f- Construir o gráfico da deflexão (quantidade de divisões) em função da corrente I (corrente no eixo X e número de divisões no Y). A partir do gráfico, calcular a sensibilidade em [divisões/ μA].

S= div/ μA

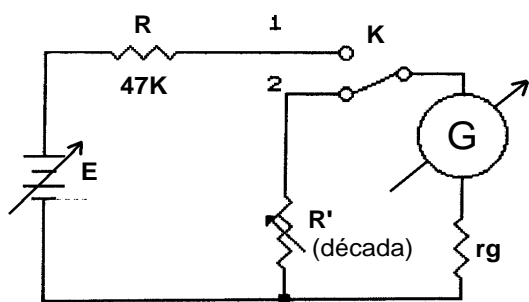
2ª PARTE - Determinação de resistência interna r_g .



$r_g =$ Ω

- Montar o circuito ao lado com a chave K aberta; ajustar, se necessário, o zero mecânico do galvanômetro. A fonte E deve ser ajustada para zero Volt.
- Ajustar E de forma que a deflexão seja de aproximadamente 80% do fundo de escala.
- Fechar K e ajustar R' de modo que a deflexão seja a metade da inicial. Como $R \gg R'$ e $R \gg r_g$, a variação de corrente no circuito com a inserção de R' será muito pequena, e pode-se dizer que $R' \approx r_g$. Anotar esse valor.

3ª PARTE - Determinação da resistência externa de amortecimento crítico (R_{ac}).



$R_{ac} =$ Ω

- Montar o circuito ao lado com a chave K na posição 2; ajustar, se necessário, o zero mecânico do galvanômetro. A fonte E deve ser ajustada para zero Volt.
- Posicionar a chave K em 1, ajustar E para que a deflexão seja de aproximadamente 80% e R' para aproximadamente 20 X r_g . Colocar em seguida a chave K na posição 2.
- Passar a chave K para a posição 1 e rapidamente voltar para a 2. Observar a oscilação do ponteiro do galvanômetro ao redor do zero.
- Diminuir o valor de R' e repetir o item c, até que o ponteiro vá a zero sem oscilar. Nesse instante, $R' \approx R_{ac}$. Anotar o valor de R_{ac} .
- Continuar diminuindo o valor da década gradativamente até zero, observando o efeito sobre a velocidade do conjunto móvel.

EXP. 2 – INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS EM CC

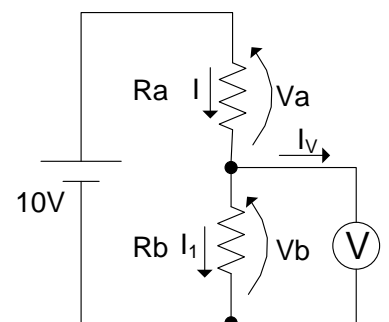
1ª PARTE – Indicações e resolução

- Ajustar os instrumentos Bobina Móvel (BM) e Digital (DIG), para medição de tensão contínua, nos alcances de 10V e 20V respectivamente. Manter os mesmos alcances para toda a experiência.
- Conectar os dois instrumentos simultaneamente à fonte de tensão contínua.
- Ligar a fonte e ajustá-la para zero Volt.
- Variar a fonte de zero a 10V, de acordo com a tabela abaixo, tomando como referência o instrumento BM e anotando as indicações de DIG.
- Comparar e comentar os resultados obtidos.

VOLTS											
BM	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
DIG											
COMENTÁRIOS											

2ª PARTE – Efeito de carga

- Construir um divisor de tensão com dois resistores (R_a e R_b) de $1K\Omega$.
- Medir e anotar na coluna **R** os valores dos dois resistores.
- Aplicar ao divisor uma tensão contínua de 10V.
- Medir e anotar nas colunas V_{BM} e V_{DIG} a tensão sobre o resistor R_b , utilizando um instrumento de cada vez.
- Repetir os itens (b) e (d) para os divisores de tensão com resistores de $100K\Omega$ e $1M\Omega$.
- Calcular as resistências internas dos instrumentos para os alcances selecionados, com os resultados do divisor onde houve maior erro. Utilizar como referência para cálculo o diagrama ao lado com as correntes e tensões.
- Comparar e comentar os resultados obtidos.

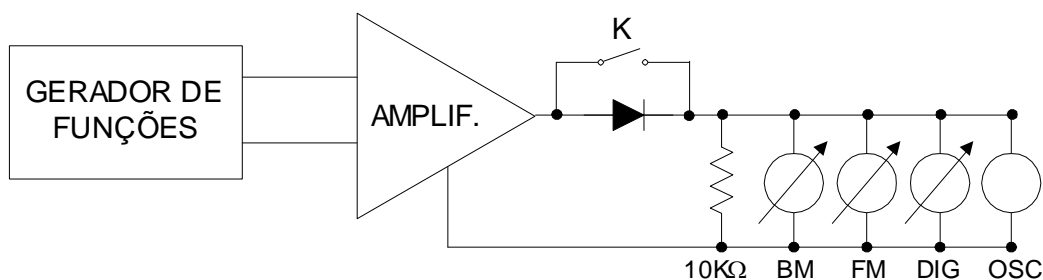


	1K Ω			100K Ω			1M Ω			R_{iBM}	R_{iDIG}
	R	V_{BM}	V_{DIG}	R	V_{BM}	V_{DIG}	R	V_{BM}	V_{DIG}		
R_a											
R_b											
	Ω	V	V	K Ω	V	V	M Ω	V	V	K Ω	M Ω

COMENTÁRIOS

EXP. 3 – INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS EM CA

1ª PARTE – Resposta em função da forma de onda



- Montar o circuito acima, onde BM é o Voltímetro de Bobina Móvel (Multímetro), FM é o Voltímetro de Ferro Móvel, DIG é o Voltímetro Digital e OSC é o osciloscópio.
- Ajustar o Gerador de Funções para 60 Hz, forma de onda senoidal, de modo a obter na saída do Amplificador de Áudio uma senóide sem distorção (verificar através do osciloscópio), com $4V_{ef}$ (ou o valor inferior mais próximo) medidos através do Voltímetro de Ferro Móvel.
- Preencher as tabelas, observando cada uma das condições de medida e utilizando os alcances mais adequados à cada medição.
- Efetuar os cálculos solicitados.
- Comparar e comentar os resultados obtidos

CHAVE K FECHADA (onda completa)					
FM	BM	DIG	OSC		
$4V_{ef}$	ESCALA CA	ESCALA CA		$V_p = \frac{V_{pp}}{2}$	$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$
	V_{ef}	V_{ef}	V_{pp}	V_p	V_{ef}

CHAVE K ABERTA (meia onda)							
FM	BM		DIG		OSC		
4Vef	ESCALA CA	ESCALA CC	ESCALA CA	ESCALA CC		$V_{ef} = \frac{V_p}{2}$	$V_{med} = \frac{V_p}{\pi}$
	Vef	Vm	Vef	Vm	Vp	Vef	Vm
	FATOR DE FORMA DO INSTRUMENTO DE BM		FATOR DE FORMA DO INSTRUMENTO DIG			FATOR DE FORMA DA ONDA	
	$FF = \frac{V_{ef}}{V_{med}}$						

COMENTÁRIOS

Continua...

2ª PARTE - Resposta em função da frequência

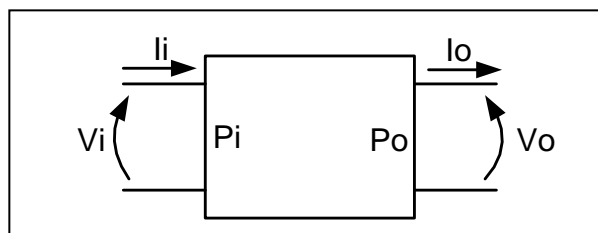
a- Anotar a faixa de frequência na qual o instrumento de Ferro Móvel trabalha:

- b- Conectar apenas o Voltímetro de Ferro Móvel no circuito.
 c- Manter a chave K fechada e variar a frequência do gerador, **mantendo a tensão de saída constante** em 20Vpp (ou o valor inferior mais próximo) sem distorção.
 d- Preencher a tabela abaixo com os valores de tensão obtidos no instrumento, utilizando os alcances mais adequados à cada medição..
 e- Repetir os itens c e d, substituindo o Voltímetro de Ferro Móvel pelo Voltímetro de Bobina Móvel.
 f- Repetir os itens c e d, substituindo o Voltímetro de Bobina Móvel pelo Voltímetro Digital.
 g- Construir, em uma única folha de papel mono-log, as curvas de resposta freq. X dB (freq. no eixo log) dos três instrumentos. Obs.: resposta em dB=20log(V'/V), onde V' = valor de tensão medido em cada frequência e V = valor de tensão medido em 60 Hz.
 h- Comparar e comentar os resultados obtidos

Freq.	60	100	130	150	200	300	500	1000	1500	2000	2500	Hz
BM												Vef
FM												
DIG												

COMENTÁRIOS

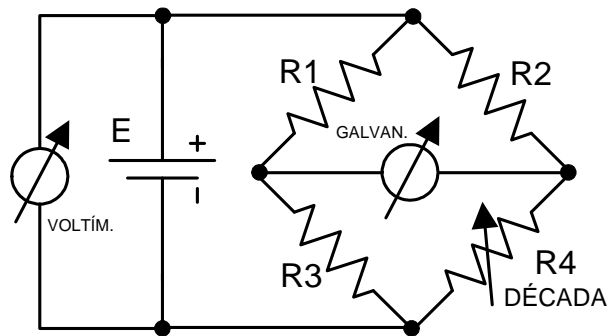
Revisão de decibéis



$$Bel = \log \frac{P_o}{P_i} \quad dBel = 10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad (\text{para } R_o = R_i)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \therefore \quad P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad e \quad P_i = \frac{V_i^2}{R}$$

$$dB = 10 \log \left(\frac{V_o^2 / R}{V_i^2 / R} \right) = 10 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right)^2 \Rightarrow dB = 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right)$$

EXP. 4 - PONTE DE WHEATSTONE

a- Montar o circuito acima, utilizando os valores da linha 1 da tabela. **Não ligar a fonte ainda.** Posicionar o potenciômetro de ajuste de tensão da fonte para o mínimo. O resistor variável R4 é a década de resistores.

b- Calcular o valor de R4 para obter o equilíbrio da ponte e anotar na tabela na coluna **R4calc**.

$$R_4 = \frac{R_2 \times R_3}{R_1}$$

c- Ajustar R4 para o valor calculado. Ligar a fonte e aumentar **gradativamente** a tensão até 10V, observando continuamente o galvanômetro. Reajustar R4 de modo a obter o perfeito equilíbrio da ponte. Anotar o novo valor de R4 na tabela na coluna **R4med**.

d- Variar R4 até que o detetor acuse um certo número de divisões (de dez a vinte). Anotar o novo valor de R4 na coluna **R4'** e o número de divisões na coluna **DIV**.

e- Calcular e anotar a relação Ohms/divisão na coluna **Ω/div**:

$$\frac{\Omega}{div} = \frac{R_4' - R_{4med}}{n^\circ div} \quad \text{ou} \quad \frac{\Omega}{div} = \frac{R_{4med} - R_4'}{n^\circ div}$$

f- Diminuir a tensão da fonte para zero. Alterar os valores dos resistores do circuito de acordo com a linha 2, 3 e 4 da tabela e repetir os passos de b- até e-.

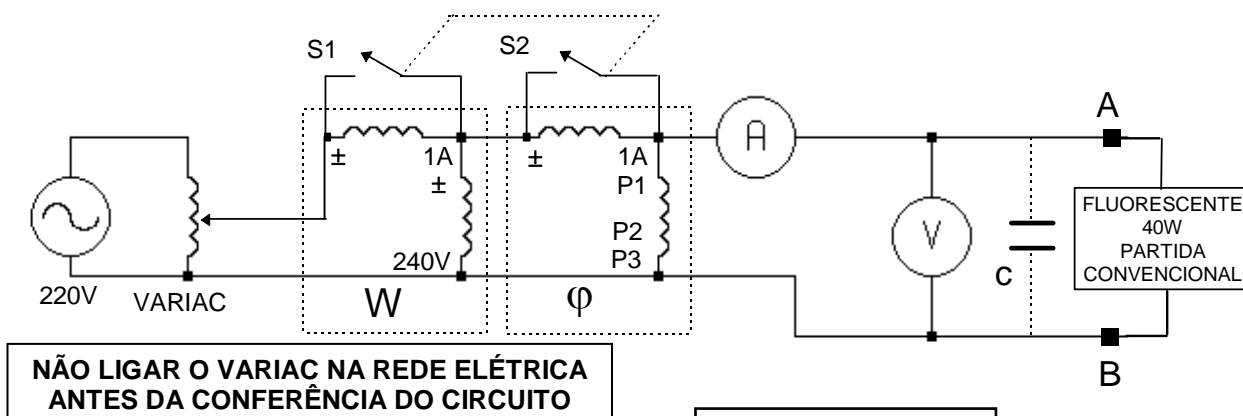
(Não desligar a fonte: diminuir a tensão para zero e desconectar o pólo positivo)

g- Comparar e comentar os resultados obtidos, do ponto de vista da sensibilidade da ponte.

	R1	R2	R3	R4calc	R4med	R4'	DIV	Ω/div
1	1KΩ	10KΩ	100Ω					
2	100Ω	100Ω	1KΩ					
3	1KΩ	1KΩ	1KΩ					
4	100Ω	1KΩ	100Ω					

COMENTÁRIOS

EXP. 5 - WATTÍMETRO E FASÍMETRO



- a- Anotar o F.P. do reator de partida convencional: F.P. =
- b- Montar o circuito da figura, com o Variac ajustado para 0 (zero) V.
- c- Curto circuitar as bobinas de corrente do Wattímetro e do Fasímetro através das chaves S1 e S2. O Amperímetro deve estar no alcance de 1 A e o Voltímetro no de 300V. Não ligar o capacitor C ao circuito ainda.

(d) Este passo, na primeira vez, deve ser feito sob supervisão do professor.

Ligar o Variac na rede elétrica e ajustá-lo para 220V, observar no Amperímetro o transitório de corrente e aguardar o acendimento da lâmpada. Só então, retirar os curtos das bobinas de corrente.

(e) Anotar as leituras dos instrumentos **V**, **A**, **P₁** e **cosφ (med)** nas colunas respectivas.

f- Diminuir a tensão do Variac para 0 (zero) V e desligá-lo da rede elétrica.

g- Desligar a carga, abrindo o circuito em A ou B. Religar o Variac e reajustá-lo, para 220 V. Anotar a indicação do Wattímetro (**P₂**), que corresponde à potência absorvida pelos instrumentos.

P₂ = W

(h) Diminuir a tensão do Variac para 0 (zero) V, desligá-lo da rede elétrica e curto-circuitar as bobinas de corrente.

(i) Calcular: $\cos \varphi = \frac{P_1 - P_2}{V \times I}$ e anotar na coluna **cosφ (calc)** (comparar com a leitura do Fasímetro); $P = P_1 - P_2$, $S = V \times I$ e $Q = V \times I \times \sin \varphi$ (utilizar φ calculado) e anotar nas colunas **P**, **S** e **Q**. Construir o triângulo das potências.

j- Calcular e anotar o valor do capacitor C necessário para corrigir o Fator de Potência.

$$X_c = \frac{V^2}{Q}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

C = μF (valor calculado)

k- Associar os capacitores fornecidos de forma a obter um valor aproximadamente igual a C calculado, anotar o valor real de C na tabela e ligá-lo ao circuito de acordo com o diagrama. Repetir os itens **(d)**, **(e)**, **(h)** e **(i)**.

l- Comentar os resultados.

	V	A	P ₁	cosφ (med)	cosφ (calc)	P	S	Q
sem capacitor								
com capacitor C = <input type="text"/> μF								
(valor real)	V _{ef}	A _{ef}	W	-	-	W	VA	VAR

COMENTÁRIOS

BIBLIOGRAFIA

- Medeiros F^o, Solon de, Medição de Energia Elétrica, Editora Guanabara Koogan, 1976.
- Medeiros F^o, Solon de, Fundamentos de Medidas Eléctricas, Editora Guanabara Koogan, 1981.
- Vázquez, José Ramirez, Medidas Electricas - Enciclopedia CEAC de Eletricidad, Ediciones CEAC, 1984.
- Stout, Melville B., Curso Básico de Medidas Eléctricas, Vols. 1 e 2, Editora da Universidade de S. Paulo, 1975.
- Electronics International (periódico), McGraw-Hill, 18/03/76.
- Ueno e Yamamoto, Estudos de Física - Eletricidade, Vol. 3, Editora Moderna, 1982.
- Heldfrick e Cooper, Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição, Editora Prentice Hall do Brasil, 1994.
- Areny, Ramón Pallás, Instrumentacion Electronica Basica, Editora Marcombo, 1987
- Jones e Chin, Electronic Instruments and Measurements, Prentice-Hall, 1991
- Manuais dos instrumentos citados
- Páginas da Internet citadas