

INSTRUMENTOS DE MEDIDAS ELÉTRICAS

© Prof. Engº Luiz Antonio Vargas Pinto
2008



Introdução	2
Conceitos básicos:	3
Diferença de potencial (DDP):	3
Corrente elétrica	3
Potência:	4
Lei de Ohm:	4
Curva característica:	4
Associação de resistores:	4
Galvanômetros	5
Princípio de funcionamento	5
Bobina móvel.....	6
Princípio de funcionamento.....	6
Detalhes construtivos.....	7
Escala.....	8
Consumo próprio.....	8
Sobrecargas.....	8
Amperímetro	9
Determinação da resistência interna de amperímetro	10
Voltímetro	10
Transformadores de potência	13
Instrumentos eletrodinâmicos	14
Amperímetro eletrodinâmico	15
Voltímetro eletrodinâmico	16
Wattímetro eletrodinâmico	16
Instrumento Ferrodinâmico	17
Tipos	17
Amortecimento	17
Escala	18
Derivadores shunt	18
Aspectos construtivos	18
Medição de Fator de Potência	18

Introdução

Medida elétrica é um conjunto de técnicas modernas de grande valor utilizada para resolução de problemas de pesquisa em geral e, principalmente, aqueles referentes a controle de processos industriais. Também poderão ser solucionados problemas de controle de diversos processos físicos que não sejam elétricos tais como temperatura, vazão, pressão, umidade, velocidade, etc.. Logo de início temos três problemas para efetuar a medição elétrica:

1. O que medir ?
2. Com que medir ?
3. Como avaliar esta medição ?

No nosso caso, o primeiro problema, que é o que mais nos interessa, podemos dizer que existe uma vasta quantidade de grandezas possíveis de medirmos. Em medição elétrica as mais importantes são:

- corrente elétrica
- diferença de potencial
- frequência
- potência
- resistência
- capacitância
- indutância
- fator de potência

e, utilizando transdutores:

- temperatura (com termopares e termoresistências)
- velocidade (com geradores)
- pH, umidade (com emissores)
- vazão e pressão (com transdutores)

Os instrumentos podem ser divididos de acordo com o emprego e sistema de medição com o qual funcionam. Assim temos os seguintes sistemas:

1. bobina móvel
2. ferro móvel
3. lâminas vibráteis (Hz, rpm)
4. eletrodinâmico (W, A, V, VAR, COS ϕ)
5. de ímã móvel (A, V)
6. eletrônico digital (A, V, Hz)
7. fio aquecido
8. eletrostático

Quanto ao emprego podemos dividi-los em:

- indicadores: apenas indicam a grandeza medida naquele instante.
- reguladores: indicam a grandeza do instante e tem a capacidade de influir no processo para adequá-lo as necessidades pré estabelecidas
- registradores: indica a grandeza medida e registra este valor medido no decorrer do tempo em fita cassete, papel, etc.

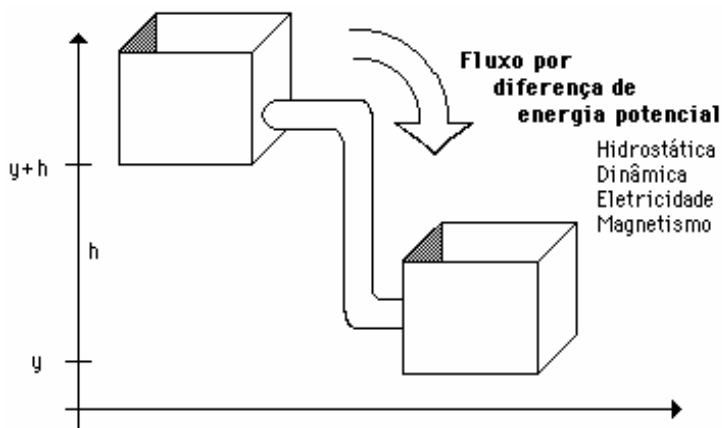
Quanto ao uso podemos classificá-los em:

- instrumentos de painéis e quadros
- instrumentos portáteis

Assim é necessário que ao se efetuar uma medição se tenha em mente a necessidade de se optar por um instrumento adequado a medição que se deseja efetuar.

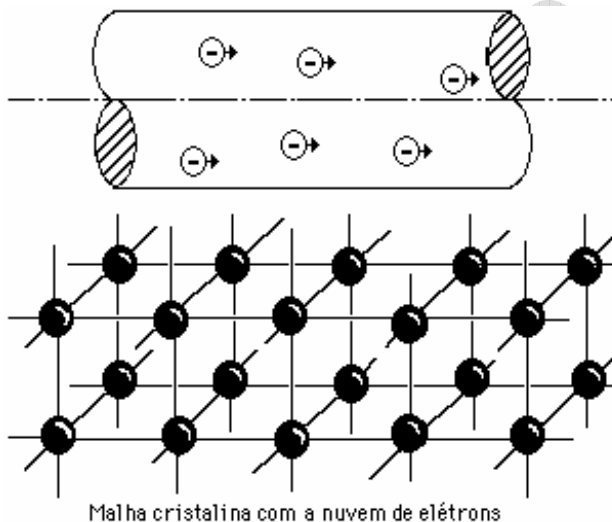
Conceitos básicos:

Diferença de potencial (DDP):



Lembrando que a diferença de potencial permite a existência da corrente elétrica, vamos defini-la:

Corrente elétrica



Malha cristalina com a nuvem de elétrons

Considere a corrente elétrica como se as cargas em movimento percorressem um tubo isolante com uma restrição como a da figura 1:

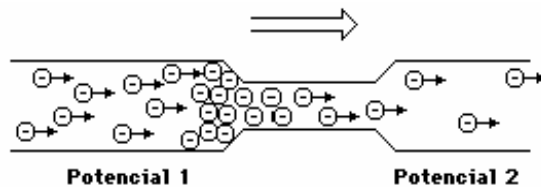
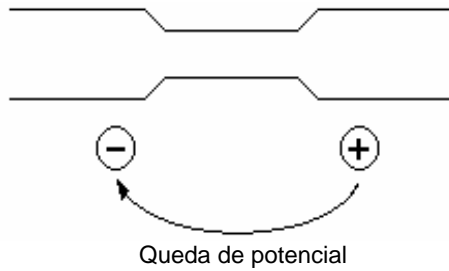


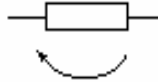
Figura 1

Observe que existe uma alta concentração de elétrons na "entrada" da restrição devido ao deslocamento do fluxo de cargas. É fácil notar que o potencial 1 é mais negativo do que o potencial 2 e isto é o mesmo que dizer que o potencial 2 é mais positivo que o potencial 1 pois a concentração de elétrons é menor naquele local. Ou mesmo ainda: Surgiu uma diferença de potencial.

Eletricamente podemos representar esta redução (queda) de tensão elétrica da seguinte forma:



O que representa uma restrição a passagem de elétrons o que denominamos de **resistência elétrica**, esquematicamente representada como segue:



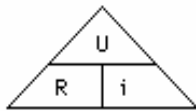
Agora já sabemos o quê medir, resta saber como fazê-lo.

Potência:

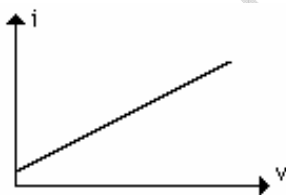
$$P = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{\Delta Q \cdot U}{\Delta t} \Rightarrow \boxed{P = U \cdot i}$$

Lei de Ohm:

$$\boxed{U = R \cdot i}$$



Curva característica:



- Linear - não linear
- Passivo - Ativo
- Simétrico - Assimétrico

Associação de resistores:

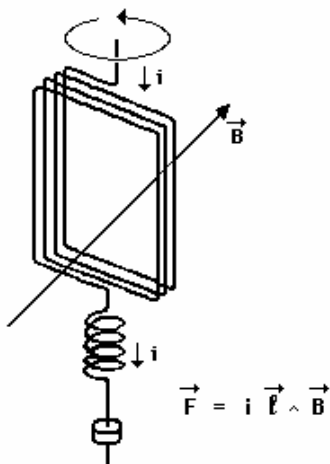
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad [\text{Série}]$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad [\text{Paralelo}]$$

Galvanômetros

Princípio de funcionamento

É o mesmo da balança de dois pratos, ou seja um determinado peso já conhecido se opõe a outro desconhecido e que desejamos determinar. O equilíbrio entre os dois determina sua equivalência. No instrumento de medida elétrica a ação de uma corrente produz uma força que desloca um elemento móvel. A força contrária de uma mola espiral produz um equilíbrio de forças fazendo com que este elemento pare em algum lugar. Um ponteiro colocado no eixo deste elemento móvel e este ponteiro se deslocando sobre uma escala proporciona a leitura. O ponteiro irá parar quando o momento de torção produzido pela ação da corrente e o momento de torção produzido pela mola tiverem a resultante nula, isto é, se equilibrem da mesma forma que os pratos da balança.



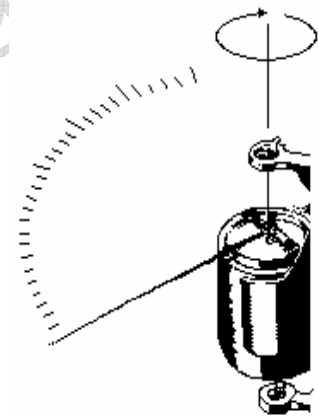
O problema começa pelo fato de que a sensibilidade da bobina à passagem da corrente elétrica é um fator decisivo sobre a construção desta. Isto é o mesmo que dizer que o limite é a corrente da bobina.

Quando sujeita a uma corrente elevada, máxima para a bobina a força exercida sobre a mesma (conjugado) será máxima. Da mesma forma que quando a corrente é zero, o conjugado não existe. Assim podemos ter como limites $i_{max} < i < i_{min}$.

Aproveitando esse deslocamento, registrando-o em uma escala numérica,

teremos um registro visual deste deslocamento, ou seja podemos ver na figura 2. A construção de dispositivos mecânicos com sensibilidade suficiente para aplicações práticas foi conseguido com mecanismos como o ilustrado na figura 2. Note a ausência de elementos mecânicos no desenho, pois este visava demonstrar a construção elétrica. Mostramos em seguida os dispositivos com características mecânicas na figura 3 onde o mesmo galvanômetro aparece com sua respectiva mola de retorno assim como os contrapesos que permitiam o perfeito ajuste da sensibilidade mecânica.

Podemos observar na figura 3 a distribuição mecânica de sua estrutura. Observe os parafusos que ajustam a pressão do eixo do ponteiro. Ali mesmo ainda podemos ver a mola restauradora, responsável pelo retorno do ponteiro ao ZERO da escala. Essa mola ainda tem uma outra característica além do retorno: É preciso vencer a pressão dessa mola para por o ponteiro em movimento o que exige uma corrente mínima que gere um conjugado capaz de fazer isto. Os contrapesos ainda servem para dar equilíbrio ao conjunto do ponteiro permitindo um movimento mais suave deste não afetando a leitura.



Galvanômetro

Figura 2

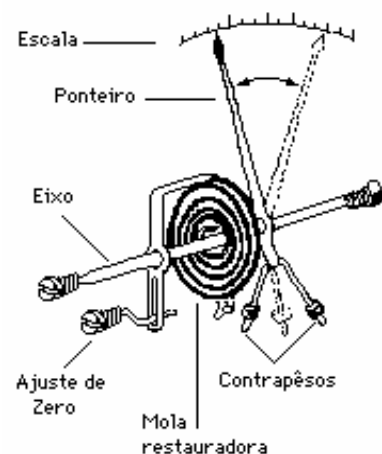
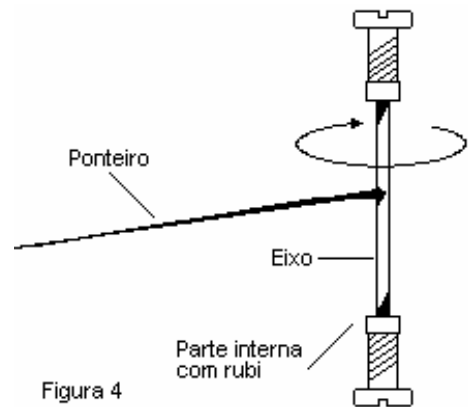


Figura 3

No detalhe do ponteiro com eixo da figura 4 seguinte, podemos ver o efeito dos parafusos de pressão sobre o eixo. Não é mostrado na figura mas existe no engate do eixo com os parafusos uma área de contato que nos primeiros aparelhos era feita justamente de alguma pedra preciosa tal como Safira ou mais comumente Rubi. Isto melhorava o coeficiente de atrito do eixo com os parafusos sem perder a qualidade de movimento de rotação. Podendo ser também feito de uma liga de Bronze-Berílio



Bobina móvel

Este instrumento foi aperfeiçoado pelo físico D'Arsonval, e por esta razão é também conhecido como sistema de Arsonval. É o instrumento mais utilizado em medições elétricas. Tem um elevado grau de aperfeiçoamento técnico. Por se tratar de um sistema simples que permite elevada sensibilidade e considerável robustez mecânica se tornou insubstituível em numerosas aplicações.

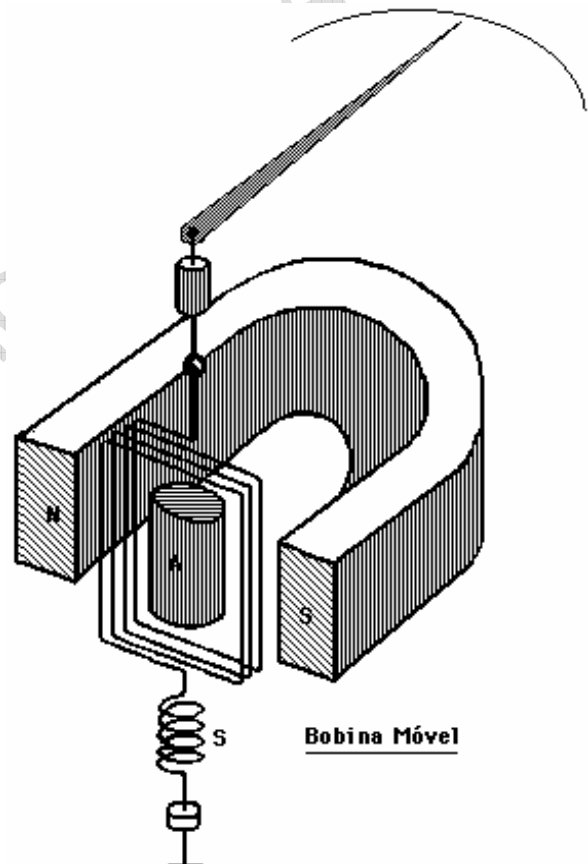
Princípio de funcionamento

Seu funcionamento é baseado no funcionamento do motor elétrico, um condutor percorrido por uma corrente elétrica inserido num campo magnético. Uma bobina de fios bem finos e inserida num campo magnético criado por um ímã permanente. Esta bobina tem a capacidade de girar pois se encontra suportada por um eixo. O momento contrário de torção é dado por uma ou duas molas espirais. Ao ser aplicada uma corrente elétrica na bobina, esta cria um campo magnético perpendicular ao plano da bobina que procura ficar na mesma direção do campo do ímã permanente. Esta tendência da bobina em ficar perpendicular ao campo do ímã permanente cessa assim que a força exercida pela mola anular a força criada pela passagem da corrente na bobina. A bobina dentro do campo magnético do ímã permanente e percorrida por uma corrente i e estará sujeita a um momento elétrico:

$$M_E = n i S B \omega_s$$

Onde:

- n = número de espiras da bobina
- i = corrente em Ampére
- S = área da bobina (m^2)
- B = campo magnético do ímã



O momento de torção contrario, criado pela mola espiral, aumenta com o deslocamento da bobina:

$$M_M = K \alpha \omega_s$$

Onde:

K = constante da mola

α = deslocamento angular da bobina

O movimento do ponteiro cessa quando os dois momentos de torção se equilibrarem e o ponteiro ali permanecerá parado, ou seja:

$$M_E = M_M$$

$$n i S B \omega_s = K \alpha \omega_s$$

$$\alpha = i \frac{n S B}{K}$$

$$\alpha = i \frac{n S B}{K}$$

$$\alpha = \pm C i$$

ou seja, podemos dizer que o desvio é proporcional à corrente I da bobina. O gráfico determinado por esta função é linear (linha reta) passando por zero, isto significa que o instrumento tem escala linear, as distâncias entre os pontos de valores inteiros são iguais. Na prática pequenas imperfeições do conjunto originam deformações na linearidade que entretanto, para a pratica não são de grande importância. O sinal \pm na equação do momento provocado pela bobina indica que o sentido da torção dependera do sentido da corrente. Isto eqüivale a dizer que o instrumento de bobina móvel somente poderia ser utilizado em corrente continua, se no entanto utilizarmos diodos retificadores este aparelho também se prestará a medição de corrente alternada. Devido as suas características, este tipo de instrumento é apropriado para as leituras de valores pequenos de corrente. Atualmente são construídos aparelhos que chegam a medir valores da ordem de $10\mu A$. Para valores maiores são empregadas resistências Shunt que ampliam os valores de medição destes aparelhos para valores ate $10.000A$.

Detalhes construtivos

No projeto do circuito magnético deve-se ter em conta a obtenção de mínima porcentagem de fugas, além de uma proteção contra a influência de campos magnéticos externos. Quanto ao amortecimento do ponteiro no instrumento de bobina móvel utiliza-se exclusivamente o método do amortecimento eletromagnético baseado nas correntes de Foucault que diz: *“Quando uma massa de cobre ou alumínio se movimenta em um campo magnético, aparecem nela correntes induzidas que se fecham sobre si mesmas”*

Estas correntes se desenvolvem em planos perpendiculares a direção do campo estando submetidas a Lei de Lenz, ou seja, que tendem a opor-se ao movimento que as produz: *“Toda a corrente induzida tem um sentido tal que tende a opor-se à causa que a produz”*

A massa metálica fica, desta forma freada, sendo que este efeito é tanto maior quanto maior for a velocidade de deslocamento da bobina.

Portanto o quadro de alumínio tem tão e somente a finalidade de provocar o efeito de amortecimento e servir de suporte para a bobina. Nestes aparelhos podem ser observados três tipos de suspensão do elemento móvel:

1. suspensão a eixo
2. suspensão a fita
3. suspensão a fita sob tensão

Também podemos utilizar o sistema de eixo com mola, principalmente em aparelhos indicadores utilizados em painéis. Os principais tipos são:

1. sistema com imã externo
2. sistema com imã interno
3. sistema para desvios de até 270°

Nos sistemas de imã interno e externo, o desvio máximo do ponteiro é de aproximadamente 90° , entretanto alguns fabricantes conseguem, por intermédio de projetos especiais de seu sistema magnético um desvio de até 110° , que proporciona uma escala mais ampliada e portanto melhor exatidão na leitura.

Escalas

O instrumento de bobina móvel possui escala linear. Geralmente as escalas são de fundo branco com divisões em preto mas há casos como na aviação, por exemplo, as escalas são de fundo preto com divisões e números em tinta fluorescente.

Consumo próprio

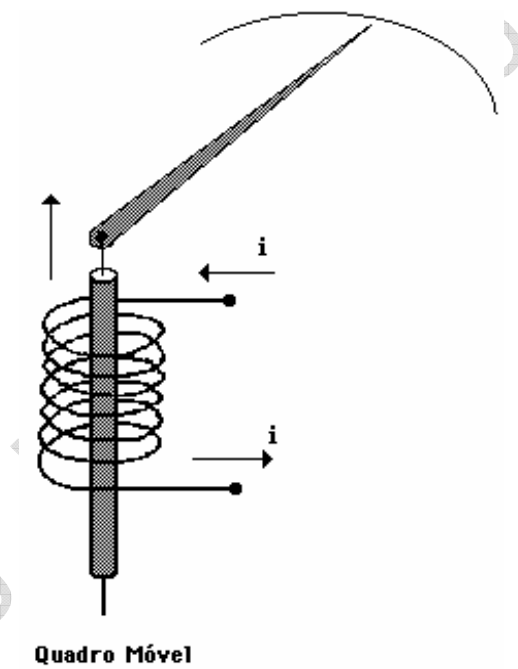
O consumo destes aparelhos pode ser determinado pela corrente de máxima deflexão ou pela queda de tensão no instrumento. Este consumo, normalmente é indicado pelo fabricante do aparelho.

Amperímetros: μW ou mW e/ou resistência interna do aparelho.

Voltímetros: $\Omega/Volt$, isto é, para cada tensão aplicada existe uma resistência.

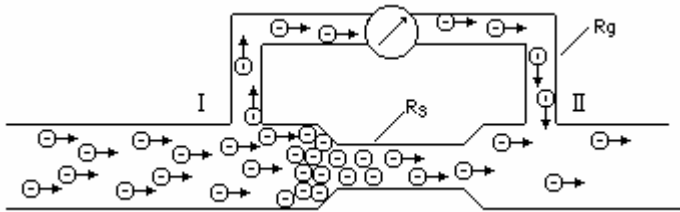
Sobrecargas

Não suportam sobrecargas. Em condições normais, segundo normas o instrumento deverá suportar continuamente 20% acima do valor nominal de corrente ou tensão. Para curta duração a sobrecarga poderá ser de valores que cheguem ao dobro de seu valor nominal.

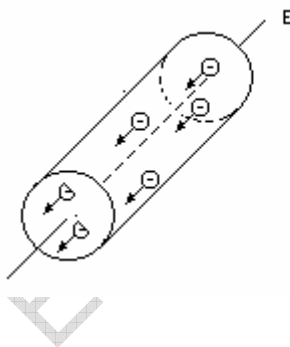
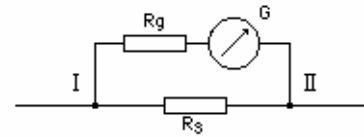


Amperímetro

Considere a seguinte situação:



Vamos desviar uma pequena parcela de elétrons acumulados na entrada e devolvê-los a saída após medir a quantidade destes que passou pela abertura extra. Em primeiro lugar note que com a abertura adicional, alguns elétrons “fugirão” por ali uma vez que há grande quantidade destes se aglomerando na entrada e os mesmos se repelem. Da mesma forma para retornar a circulação após a entrada já é mais difícil pois são impedidos eletricamente pelos que lá se encontram (ambos são negativos). Assim concluímos que embora mais lentamente eles fluirão do lado II da nova tubulação. O que registramos com o galvanômetro é a diferença de elétrons, que se for dimensionado corretamente é proporcional ao fluxo maior. Para criarmos esta proporcionalidade é necessário a introdução de uma restrição para forçar a aglomeração dos elétrons e permitir a sua fuga de uma parte pela derivação secundária. Se não fizéssemos isto - inserir uma restrição ao fluxo principal - não haveria razão para o fluxo de elétrons passar pela restrição secundária. Afinal, não existe elétron “curioso”, isto é, que de livre e espontânea vontade passe pela derivação secundária. E se assim não o fizéssemos não haveria como medir o fluxo. Na realidade isto é possível e até usado (amperímetro alicate) mas é inviável construirmos galvanômetros para correntes elevadas por essa razão nós os construimos desta forma. A principal característica é que R_g deve ser muito baixa para permitir que o maior fluxo de elétrons flua por ali e R_s deve ser alto para que apenas uma pequena parcela de corrente elétrica flua permitindo avaliar o montante de elétrons. Daqui para frente, dedicaremos uma boa parte deste curso no cálculo de resistores que compõe uma AMPERIMETRO. Podemos também definir corrente elétrica como cargas elementares em movimento, ou:



Onde: $Q = \text{Carga elétrica [Coulomb]}$

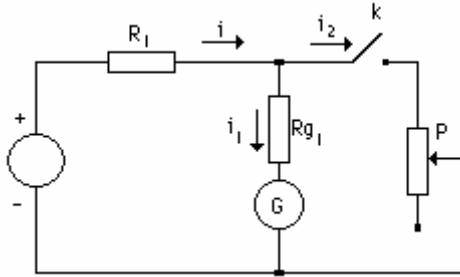
$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\Delta Q = n \cdot e$$

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Determinação da resistência interna de amperímetro

Dado o circuito abaixo, com a chave k aberta:



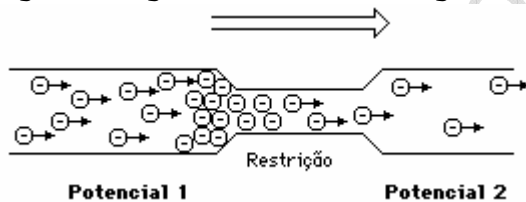
de onde podemos concluir que $i = i_1 + i_2$ com $i_2=0$. A corrente que vemos no amperímetro é $i = i_1$. Em seguida fechamos a chave k e, ajustando o potenciômetro fazemos com que a nova corrente seja $i = i_1' = i_1/2$, e como existem apenas duas cargas em paralelo (P e o amperímetro) e a corrente no amperímetro é a metade da anterior, concluímos que a outra metade está passando pelo potenciômetro, pois a corrente total está sendo mantida. Dessa forma concluímos que:

$$i' = i_1' + i_2' \Rightarrow i_2' = i_1/2$$

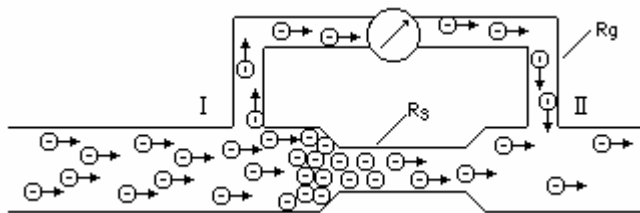
e assim, acabamos por concluir que se $i_1' = i_2'$ então $R_{g1} = P$

Voltímetro

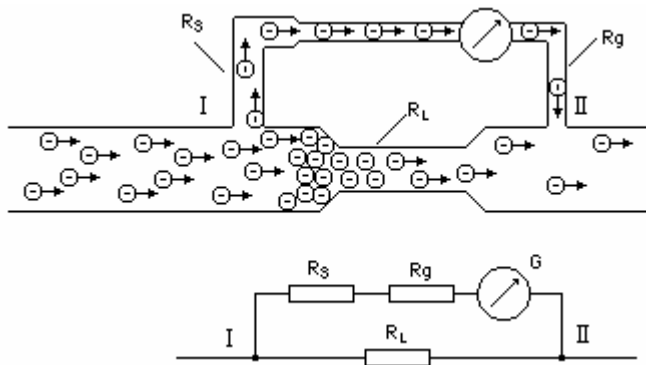
O voltímetro é um aparelho destinado a medir diferença de potencial, então retomemos a figura original onde restringimos a passagem de corrente elétrica:



Da mesma forma, fazemos:



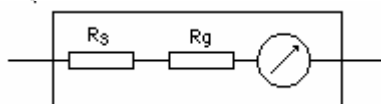
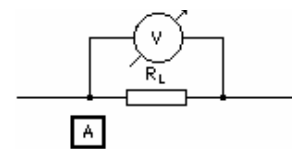
Analisando da mesma forma que nos amperímetros, é notório que o potencial em II é maior que em I, e por essa mesma razão o que vemos no galvanômetro pode ser interpretado como a diferença de potencial entre I e II. A grande diferença de análise reside no fato de que a restrição não é pertencente ao aparelho, mas sim uma restrição própria do circuito onde flui a corrente elétrica (resistência). O fluxo de cargas que passa pelo galvanômetro é a diferença entre I e II. Logo teríamos alguma coisa do tipo:



Compreender este mecanismo não é tão difícil como parece. Considere que se a restrição secundária definida por R_s fosse suficientemente larga que o caminho fosse inclusive mais fácil do que pelo normal, evidentemente que as cargas passariam por ali e não mais pela via normal o que causaria a eliminação da DDP existente e o aparelho nada mais mostraria ou até mesmo queimaria por efeito JOULE devido ao excesso de corrente. Assim tanto melhor quanto mais restrição houver ou R_s é melhor tanto quanto maior. Por outro lado se R_s for infinito a quantidade de corrente seria ZERO e nada mediríamos. Isto é o mesmo que dizer que há um valor ideal e ao mesmo tempo deve ser elevado o máximo possível. Entretanto é o momento ideal de lembrarmos que independente do aparelho ser um amperímetro ou voltímetro é claro que ambos são consumidores de corrente elétrica. Na verdade apenas espera-se que eles consumam apenas o estritamente necessário. Uma outra coisa também interessante lembrar é que somente podemos medir alguma diferença de potencial se medirmos sobre uma carga, uma vez que somente assim é possível haver uma DDP. Para caracterizarmos um voltímetro o ideal seria:

- 1 - Constituído por um resistor em série com o galvanômetro;
- 2 - R_s deve ser elevado para preservar as características do circuito no qual se deseja medir a DDP;
- 3 - O aparelho deve ser necessariamente ligado em paralelo.

Por todas essas razões, podemos afirmar que diferentemente dos amperímetros este não é inserido no circuito mas colocado em paralelo com a carga a ser medida. Observe que a corrente encontra o nó **A** e, ainda que em pequena parcela, quase insignificante, a corrente elétrica, de acordo com Kirchoff desvia uma pequena parcela para o voltímetro, proporcionalmente. É incorreto afirmarmos que, mesmo perfeito, este instrumento ainda interfere no circuito ao qual esta conectado. Lembre-se de que ele também é uma carga. Além disso, é preciso que uma parte da corrente desviada no nó **A** chegue ao galvanômetro para mover o ponteiro e indicar a DDP. Como a DDP é função da corrente elétrica é correta esta afirmação. O voltímetro, ou voltômetro, como a maioria dos instrumentos analógicos não é imune a interferências eletromagnéticas e térmicas, fatores determinantes de sua qualidade, principalmente pelo fato de que sob o aspecto construtivo são apenas resistores associados em série e paralelo aqui representados por R_s .



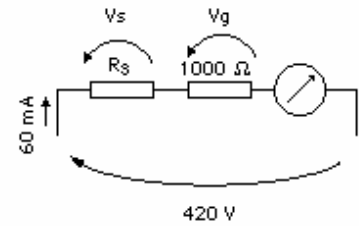
Exemplo de dimensionamento:

- 1) Dado o galvanômetro com as seguintes características:

$$I_g = 60 \text{ mA}$$

$$R_g = 1000 \ \Omega$$

Determine o resistor s\u00e9rie a ser colocado nesse galvan\u00f4metro a fim de funcionar como um volt\u00edmetro e ler tens\u00f5es de at\u00e9 420 V



Da lei de Ohm: $V_g = R_g \times I_g = 1000 \times 60 \times 10^{-3} = 60 \text{ V}$.

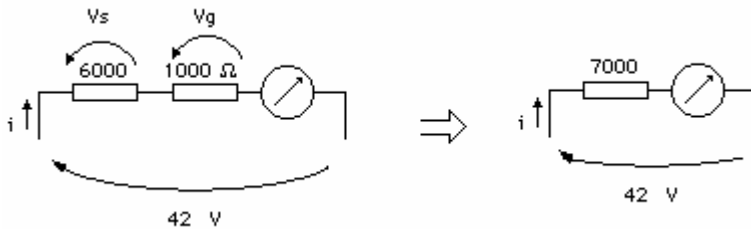
e assim:

$$V_{420} = V_g + V_s \Rightarrow 420 = 60 + V_s \Rightarrow \boxed{V_s = 360 \text{ V}}$$

e como o circuito \u00e9 s\u00e9rie e o fundo de escala \u00e9 dado por I_g , ent\u00e3o:

$$R_s = \frac{V_s}{I_g} = \frac{360}{60 \times 10^{-3}} = 6000 \ \Omega \Rightarrow \boxed{R_s = 6000 \ \Omega}$$

Agora, considere que o volt\u00edmetro j\u00e1 est\u00e1 dimensionado, em porcentagem. Qual a posi\u00e7\u00e3o do ponteiro se a tens\u00e3o medida for 42 Volt ?



Da lei de Ohm:

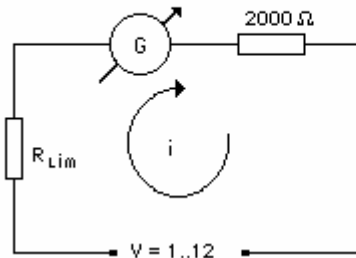
$$i = \frac{42}{7000} = 6 \text{ mA}$$

e podemos montar uma regra de 3 simples:

$$\left. \begin{array}{l} 60 \text{ mA} \longrightarrow 100\% \\ 6 \text{ mA} \longrightarrow ? \end{array} \right\} \quad ? = \frac{6 \text{ mA} \times 100\%}{60 \text{ mA}} = 10\%$$

ou seja podemos afirmar que o sistema agora constitu\u00eddo \u00e9 linear uma vez que 60 mA no sistema acarreta 100% no deslocamento do ponteiro na escala e 6 mA acarreta 10% de deslocamento.

Exemplo: $V_{max} = 12 \text{ V}$
 $I_{max} = 50 \ \mu\text{A}$
 $R_{int} = 2000 \ \Omega$



$$i = \frac{V}{2000 + R}$$

$$R = \frac{V}{i} - 2000$$

$$\boxed{R = 240 \text{ K} \ \Omega}$$

Transformadores de potência

Para fazer medida de alta tensão, o homem de campo fica sujeito ao perigo por ter de se aproximar da alta tensão. O uso de transformadores de corrente permite fazer leituras a distância sem necessitar se expor, utilizando instrumentos isolados e evidentemente com instrumentos de baixa corrente. Normalmente, as correntes que passam por um disjuntor são elevadas. Se assim desejarmos é possível medir diretamente essa corrente com uso de instrumentos especiais que além do risco ainda são de custo elevado. Então fazemos uso do TP para evitar a proximidade. Além de alimentarem circuitos de medição são também utilizados para alimentar circuitos de relé.

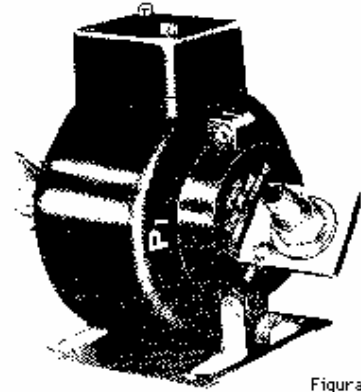
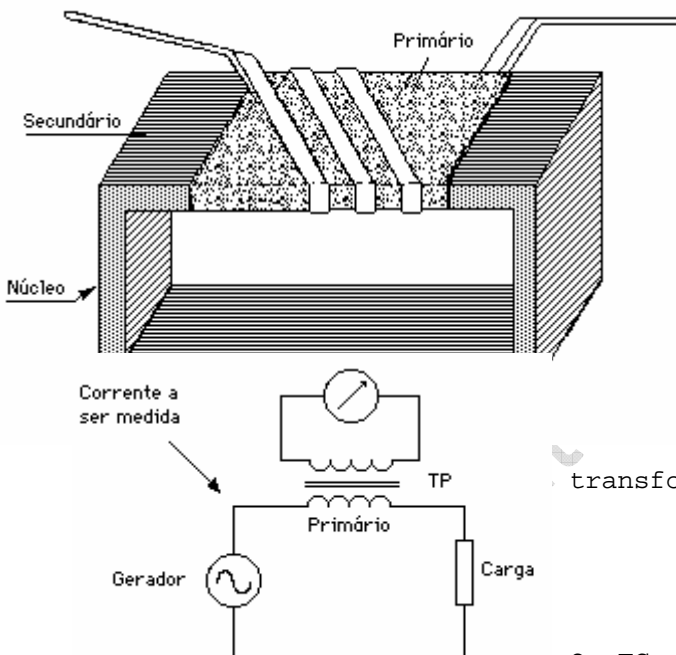


Figura 1



O TC é ligado de maneira diferente dos demais transformadores. O primário dos transformadores de força são ligados em paralelo com a fonte de energia. No caso do TC o primário vai ligado em série com o circuito a ser medido. O secundário do TC da figura 2 é constituído por um número bem maior de espiras e com bitola mais fina.

Normalmente os TC's que você vai encontrar são projetados para que passe, no máximo 5 A no secundário. A relação de transformação é dada por:

$$K = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{ou} \quad K = \frac{I_2}{I_1}$$

Leia Secundário/Primário.

Os TCs ainda podem ser classificados em :

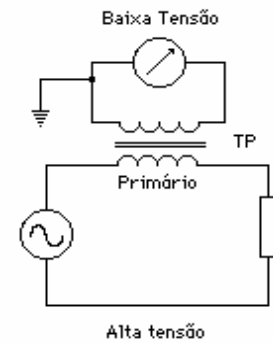
- Sêcos;
- Preenchidos com óleo;
- Preenchidos com "compound";

"compound" é uma substância preta, isolante semelhante ao piche. Quando aquecido torna-se líquido e em baixas temperaturas, sólido. Normalmente para tensões inferiores a 22kV encontramos TCs secos ou preenchidos com "compound". Acima disto normalmente são preenchidos com óleo isolante.

CUIDADOS :

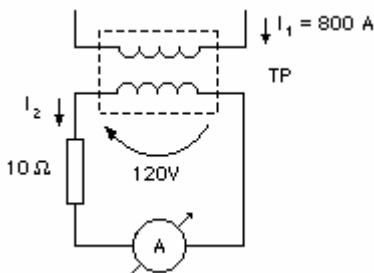
- Não devemos abrir o secundário se tiver corrente no primário pois isto causará sobretensão no secundário o que levará a destruição da isolação ou choque em quem o estiver usando.
- Para proceder a retirada de um aparelho do secundário devemos antes disto curto-circuitar o secundário;
- O mesmo procedimento deve ser adotado quando inserimos um aparelho no secundário.

Alguns TPs possuem uma chave nos terminais do secundário. Esta chave é para curto-circuitar o enrolamento do secundário quando for preciso retirá-lo do circuito. Os TCs devem ter o seu secundário aterrado. A razão deste aterramento é para evitar os efeitos da alta tensão induzida no enrolamento do secundário.



exemplo:

Dado o circuito abaixo, onde circula uma corrente de 800A, com auxílio de um TP com $K=100$, determine o valor da resistência interna do amperímetro.



Instrumentos eletrodinâmicos

Estes instrumentos baseiam-se na ação mútua entre dois condutores percorridos por corrente elétrica. Quando as correntes forem de mesmo sentido haverá uma força de atração entre eles e quando forem de sentidos opostos os dois condutores sofrerão uma ação de repulsão entre si. Estas forças ocorrem devido ao efeito eletromagnético que é a aparição de uma força magnética causada pela circulação de corrente elétrica em um condutor. A figura 1 abaixo mostra-nos um instrumento eletrodinâmico.

Este instrumento é composto de duas bobinas, uma fixa e outra móvel. Ao circular corrente por estas bobinas, surgem dois campos magnéticos e conseqüentemente forças que tenderão a alinhar-se ficando com mesma direção e sentido. Esta tendência de alinhamento causa o surgimento de um momento que atuará sobre a bobina móvel (observe que o ponteiro está preso á bobina móvel). Este par motor que atua sobre a bobina móvel pode ser expresso por:

$$M_M = C I_F I_M$$

onde:

C = coeficiente que depende do número de espiras, das dimensões e formas e posição mútua das mesmas;

I_F = Corrente elétrica que circula na bobina fixa;

I_M = Corrente elétrica que circula na bobina móvel.

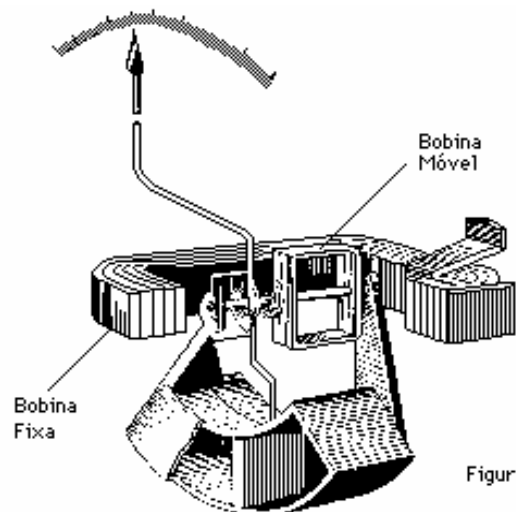


Figura 1

O par contrário (reação) criado pela mola é expresso por $M_{ANT} = \alpha \omega$. Enquanto não houver igualdade entre os pares antagônicos (contrários) a bobina móvel girará. No momento que houver esta igualdade a bobina deixará de se mover, ou seja:

$$M_M = M_{ANT} \Rightarrow C I_F I_M = \alpha \omega \Rightarrow \alpha = \frac{C I_F I_M}{\omega}$$

E portanto, como podemos ver, o ângulo de deflexão da bobina móvel depende do produto das correntes que circulam pelas bobinas fixa e móvel, além disso o número de espiras da bobina fixa é muito inferior ao da bobina móvel. Podemos encontrar bobina móvel girando tanto dentro como fora da bobina fixa. O ponteiro indicador se encontra preso sempre a bobina móvel assim como o sistema de amortecimento do ponteiro que neste instrumento ainda é tipo pneumático. E devido a seus aspectos construtivos podemos ler tanto sinais alternados como contínuos. Evitamos o uso de ferro como matéria do núcleo para evitar os efeitos indesejáveis de histerese e perdas Foulcault.

Amperímetro eletrodinâmico

Como já é de nosso conhecimento, os instrumentos eletrodinâmicos possuem duas bobinas, uma fixa e outra móvel, assim, para medirmos grandezas elétricas é necessários que façamos as ligações de ambas para podermos efetuar alguma medição. A maneira correta de ligarmos é a seguinte:

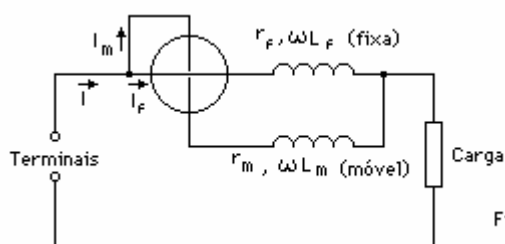


Figura 2

Como podemos ver no esquema, a bobina fixa é ligada em paralelo e a bobina móvel em série e ambas em série com o circuito de onde se deseja efetuar uma medida de corrente elétrica. Podemos concluir com isto, evidentemente que existem duas indutâncias em série com as bobinas fixa e móvel. Estas indutâncias são necessárias para possibilitarem a coincidência entre as fases das duas bobinas. Como já foi visto anteriormente, as duas bobinas possuem além de resistência própria diferentes entre elas, ainda possuem um número de espiras diferentes, o que faz com que a indutância entre ambas seja diferente. E esta diferença de indutância provoca um atraso de fase da corrente de uma bobina em relação a outra. Como já sabemos, para que um instrumento funcione corretamente necessitamos que a inversão de polarização da corrente (caso de C.A.), ocorra ao mesmo tempo em ambas, e isto somente é possível de ocorrer se construirmos o aparelho tal como na figura 2, respeitando a relação de ωL_F e ωL_M . Na situação citada, como $I = I_M + I_F$ então $I_F = K_F I$ e $I_M = K_M I$ e ainda:

$$\alpha = \frac{C I_F I_M}{\omega}$$

de onde obtemos:

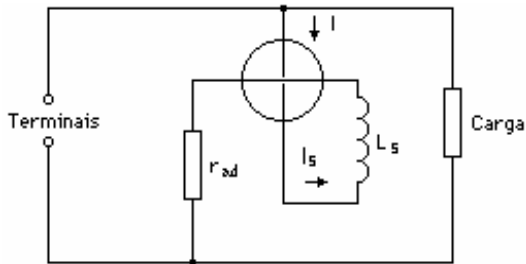
$$\alpha = \frac{C K_F K_M I^2}{\omega}$$

o que nos leva a concluir que a escala de um amperímetro eletrodinâmico é **quadrática**.

Considerações finais: Dois conjuntos de amperímetros eletrodinâmicos são fabricados: para medidas de até 500 mA onde as bobinas fixa e móvel são conectadas em série e acima disto de acordo com a figura 2.

Voltímetro eletrodinâmico

Temos a seguir o esquema básico de um voltímetro eletrodinâmico:



Neste caso, as bobinas fixa e móvel estão ligadas em série e o resultante em paralelo com a rede. Para melhorar o comportamento em corrente alternada não é usual o emprego de resistência SHUNT, ao invés disto é comum o emprego de um resistor adicional r_{ad} , que, além de aumentar a corrente suportada pelo aparelho, ainda melhora a resposta em faixas críticas como o início e fim da

escala de medida, pelo fato deste aparelho ter escala quadrática conforme veremos a seguir, além de conseguir melhor estabilidade em condições desfavoráveis de temperatura. E a corrente que circula pelas bobinas pode ser determinada por:

$$I_s = \frac{U}{r_M + r_F + r_{ad}}$$

e como $\alpha = \frac{C K_F K_M I^2}{\omega}$ então :

$$\alpha = \frac{C K_F K_M}{\omega} \cdot \left[\frac{U^2}{(r_m + r_F + r_{AD})^2} \right]$$

onde K é um fator de proporcionalidade.

Nestes aparelhos, a resistência do aparelho é composta por fios de cobre das bobinas fixa e móvel e pela resistência adicional r_{ad} de Constanta (liga metálica de 60% Cobre e 40% Níquel) ou Manganina (liga de 4% Níquel, 12% Manganês e 84% Cobre). Esta resistência serve para aumentar a capacidade de leitura do instrumento e deve ser de 4 a 5 vezes maior que a resistência dos enrolamentos para obtermos resultados satisfatórios em situações de altas temperaturas, que tenderiam a deformar as leituras efetuadas.

Wattímetro eletrodinâmico

Conforme podemos ver no esquema abaixo, Figura 4, a bobina fixa esta ligada em série com o circuito de carga e a bobina móvel em paralelo com a carga. A razão para isto se deve ao fato de que a bobina fixa é constituída por um fio de bitola maior, o que faz com que este elemento suporte mais corrente elétrica do que a bobina móvel.

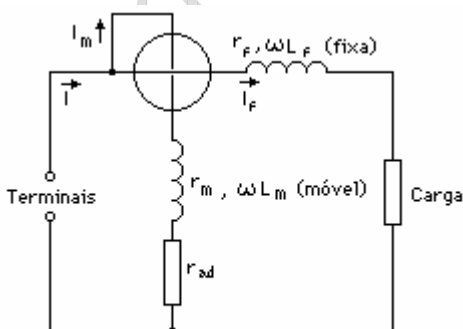


Figura 4

Realizando uma análise semelhante aquela utilizada anteriormente podemos deduzir facilmente que:

$$\alpha = \frac{C}{\omega} I_f I_m \quad \text{e} \quad I_m = \frac{U}{r_m + r_{sd}}$$

então:

$$\alpha = \frac{C}{\omega} I_f \frac{U}{r_m + r_{sd}}$$

e portanto:

$$\alpha = \frac{C}{\omega (r_m + r_{sd})} I_f U \Rightarrow \alpha = S_w I_f U \Rightarrow \boxed{\alpha = S_w P}$$

onde S_w é definida como a sensibilidade do wattímetro.

Conclusões:

1. ângulo de deflexão do ponteiro é proporcional á potência CC;
2. Neste caso a escala é linear

Para o caso de CA $\alpha = S_w I_f \cos \varphi$ ou $\alpha = S_w P$

Instrumento Ferrodinâmico

Uma variação do instrumento eletrodinâmico é o instrumento ferrodinâmico. Este instrumento, utiliza, para intensificar seus campos magnéticos, chapas de aço especial na bobina fixa e um núcleo fixo ao redor do qual se encontra a bobina móvel. Uma carcaça de aço, cilíndrica ou elíptica envolve todo o sistema. Além disso, entre a carcaça e a bobina móvel existe um entreferro, e estes itens dão uma homogeneidade radial ao campo proporcionando um momento muito mais intenso, além de tornar o instrumento mais robusto e resistente. Este aparelho é pouco sensível a campos magnéticos externos e possui um elevado par motor, e devido a esta última peculiaridade, é muito utilizado em instrumentos registradores. As maiores desvantagens deste tipo de instrumento reside no fato da presença de ferro e conseqüentemente seus efeitos negativos já mencionados antes, com isto uma perda da precisão e além disso devido ao uso de correntes maiores o que exige mais gastos e um custo maior. Para ambos os instrumentos, a margem de erro nas leituras CC e CA esta na ordem de 0,1% a 0,2%.

Tipos

a) Atração do ferro para dentro da bobina.

Um núcleo de ferro é atraído para dentro de uma bobina percorrida por uma corrente elétrica.

b) Repulsão de dois ferros colocados dentro da bobina.

Dois núcleos são colocados no interior da bobina. Um deles, fixo, é acoplado à bobina e atua sobre outro móvel, este por sua vez é acoplado ao eixo do ponteiro, o campo produzido pela bobina atua sobre o núcleo fixo que exerce sobre o núcleo móvel uma força que tende a colocá-lo na posição de maior densidade magnética. Pela alteração instantânea do sentido dos fluxos este instrumento possibilita a leitura tanto de correntes contínuas como de correntes alternadas. Este tipo de instrumento também pode ser dividido em:

1. Radial
2. Concêntrico
3. Combinado
4. Este mecanismo é uma combinação dos outros dois tipos já estudados. Permite leituras em equipamentos com desvio de escala de até 270°.

Amortecimento

Este instrumento utiliza dois tipos diferentes de amortecimento:

a) mecânico: Em uma caixa hermeticamente fechada é instalada uma palheta de alumínio. Esta palheta é fixa ao eixo do ponteiro. O movimento da palheta dentro da caixa faz com que o ar se desloque de um lado para outro através de

furos, este deslocamento do ar faz com que ocorra uma diminuição da velocidade de deslocamento do ponteiro.

- b) **magnético**: Um disco de alumínio ou cobre é inserido no campo magnético de ímãs permanentes, no disco aparecem correntes cujos campos opõem ao movimento do disco (princípio de Foucault).

Escalas

O instrumento de ferro móvel tem um momento eletromagnético que aumenta com o quadrado da corrente, além disto depende de sua posição angular, devido a variação da indução da bobina, assim podemos dizer que dependendo apenas das condições acima sua escala é quadrática. Entretanto podemos modificar esta situação se forem tomadas certas precauções com relação a forma das peças de ferro do sistema, variação da posição entre as duas peças de ferro em relação ao seu ângulo de giro, qualidade do material das peças de ferro, ligações do circuito (resistores adicionais).

Derivadores shunt

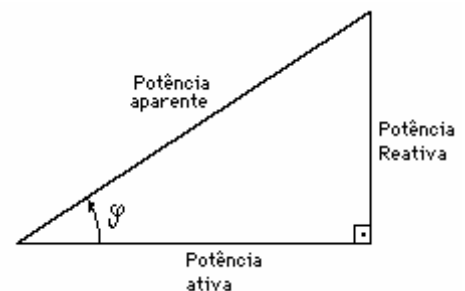
Inúmeras vezes podemos precisar de um instrumento de medição em que a corrente máxima do instrumento é inferior a corrente que necessitamos medir. Este fato inviabilizaria a leitura. Para podermos efetuar a leitura, utilizamos um artifício: a colocação de um resistor em paralelo (SHUNT) com o instrumento. Quando colocamos esse resistor em paralelo, parte da corrente a ser medida segue pelo instrumento e parte segue pelo derivador. I_1 passará pelo derivador e a I_2 passará pelo aparelho. Por se tratar de um circuito em paralelo a queda de tensão é igual em ambos os elementos.

Aspectos construtivos

O material mais comumente empregado na fabricação de derivadores é a manganina. Estes derivadores são constituídos de fios enrolados em um suporte isolante. Porém, se a corrente que circulará pelo derivador for muito alta é comum o uso de barras de manganina soldadas com prata em suportes especiais. Vale também dizer que para correntes altas são empregados transformadores de corrente.

Medição de Fator de Potência

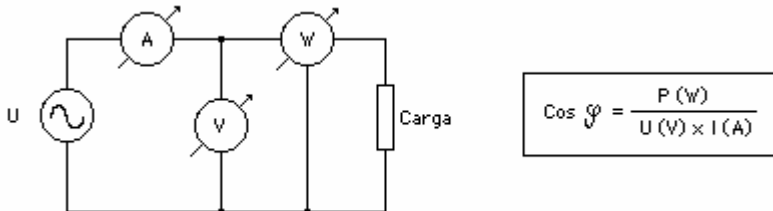
Em um circuito de corrente alternada existe uma grandeza elétrica chamada Fator de Potência. Esta grandeza mede a defasagem entre a potência ativa e a potência aparente. E, esta é uma defasagem que aparece sempre que colocamos cargas indutivas e/ou capacitivas no circuito AC. Para medirmos esta grandeza podemos utilizar um instrumento específico para este fim: Fasímetro. Entretanto, antes de estudarmos este aparelho, vamos estudar outra forma, indireta de efetuarmos esta mesma leitura. Isto porquê poderemos inúmeras vezes estar diante de situações práticas onde não possamos contar com um fasímetro. Além do que este é um instrumento muito caro e ainda mais, podemos estar tratando de um sistema trifásico onde seria necessário o uso de um fasímetro trifásico, o que é um instrumento ainda mais específico. Tudo isto nos leva a considerar a melhor hipótese o uso de instrumentos AC convencionais para a leitura indireta do fator de potência. Nos meios técnicos, o fator de potência é tratado como F.P. ou ainda de $\cos \phi$. De certa forma, o $\cos \phi$ é uma grandeza indireta, ou seja, depende de outras grandezas para ser medida (tensão, corrente e potência), e assim podemos obter esta grandeza utilizando apenas voltímetros, amperímetros e wattímetros. O $\cos \phi$ é o cosseno do ângulo que representa a defasagem entre a potência ativa e a potência aparente, conforme já dissemos



anteriormente. Do triângulo de potência obtido, e, aplicando trigonometria obtemos:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Cateto adjacente (Potencia ativa)}}{\text{Hipotenusa (Potencia aparente)}}$$

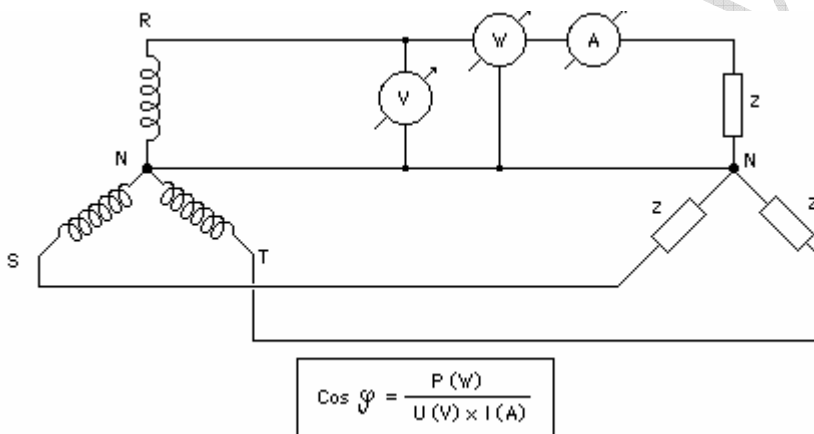
Devido a fatores construtivos sabemos que o wattímetro mede potência ativa e, da mesma forma, pelos fatores construtivos, consegue-se a potência aparente pelo produto da leitura do voltímetro pela leitura do amperímetro. Dessa forma, com esses três aparelhos conseguimos medir, indiretamente o fator de potência. Veja a seguir no esquema abaixo:



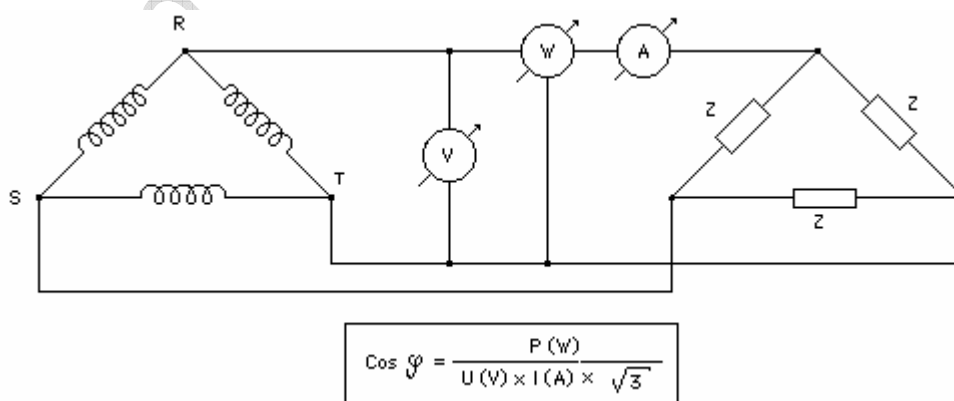
cosφ em circuitos trifásicos

Vamos considerar o seguinte esquema onde vamos medir o fator de potência em uma das fases.

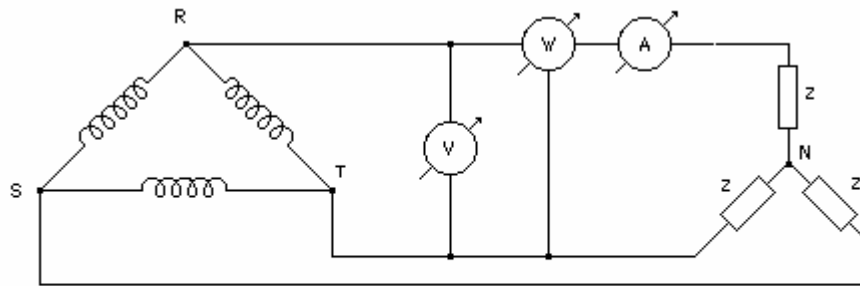
• **Estrela equilibrada com neutro:**



• **Triângulo equilibrado:**

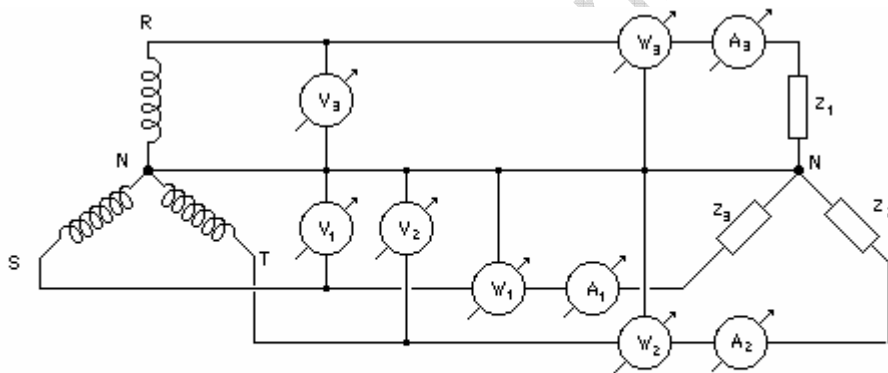


- **Estrela equilibrada sem neutro:**



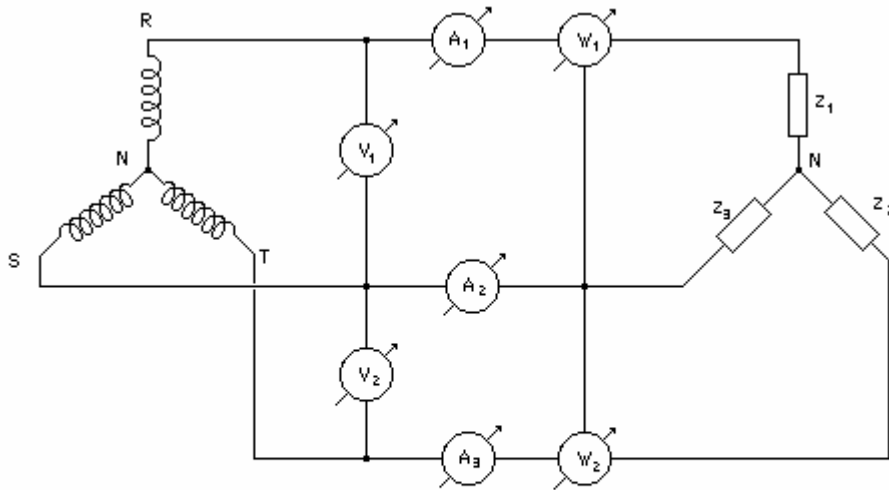
$$\cos \varphi = \frac{P(W)}{U(V) \times I(A) \times \sqrt{3}}$$

- **Estrela desequilibrada com neutro:**



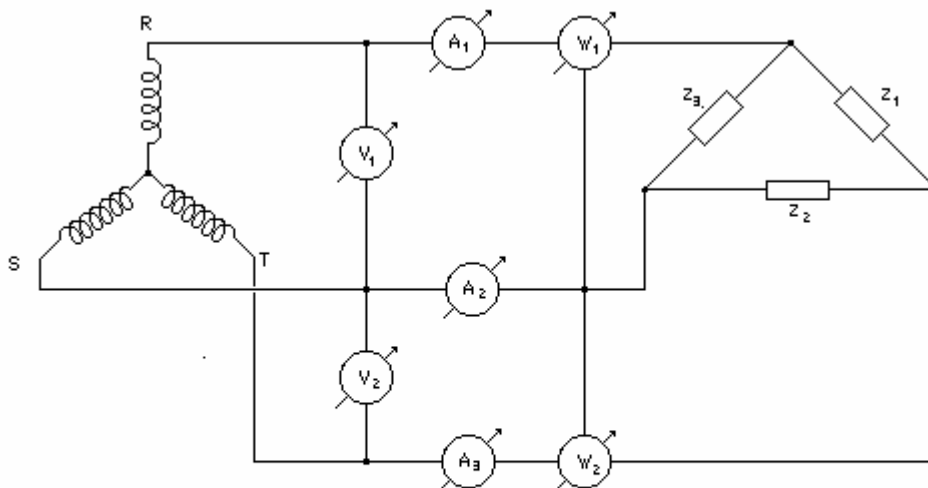
$$\cos \varphi = \frac{P(W_1) + P(W_2) + P(W_3)}{V_1 A_1 + V_2 A_2 + V_3 A_3}$$

• **Estrela desequilibrada sem neutro:**



$$\cos \varphi = \frac{P(W_1) + P(W_2)}{\left[\frac{V_1 + V_2}{2} \right] \times \frac{(A_1 + A_2 + A_3) \times \sqrt{3}}{3}}$$

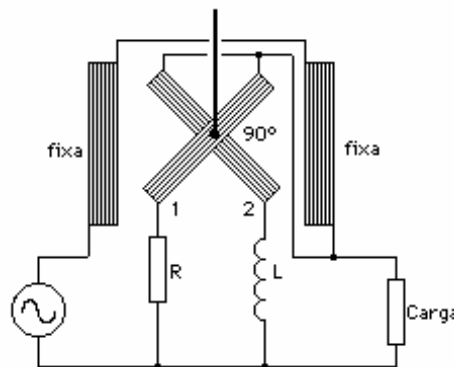
• **Triângulo desequilibrado sem neutro:**



$$\cos \varphi = \frac{P(W_1) + P(W_2)}{\left[\frac{V_1 + V_2}{2} \right] \times \frac{(A_1 + A_2 + A_3) \times \sqrt{3}}{3}}$$

Fasímetro monofásico:

O fasímetro monofásico consiste de um jogo de bobinas fixas e um sistema móvel constituído por duas bobinas cruzadas, cujos eixos geométricos tem um ângulo de 90° e que podem girar livremente ao redor de seu eixo transversal, possuindo um ponteiro como indicador. A bobina fixa, como em todos os instrumentos eletrodinâmicos é a bobina de corrente ou amperométrica, sendo conectada em série com a carga. Entretanto, as bobinas móveis, voltimétricas, estão conectadas uma em série com um resistor R, não indutivo e a outra em série com um indutor. A corrente chega ao jogo de bobinas móveis por meio de três espirais muito débeis que não devem exercer nenhum torque sobre o sistema, de tal forma que quando não circula corrente o ponteiro fique detido em qualquer ponto da escala. Teoricamente a corrente que circula pela bobina 1 está em fase com a tensão de linha, estando, a que circula pela bobina 2 defasada de 90° em relação a tensão devido a conexão de L. Quando a corrente de linha que circula através das bobinas fixas estiver em fase com a tensão, as corrente de 1 e da bobina fixa encontram-se em fase e o par motor que surge entre elas tende a alinhar os eixos, indicando com o ponteiro um fator de potência igual a 1. Por norma, fasímetros são construídos de forma que o lado direito indica atraso pois são referentes a cargas indutivas e o esquerdo indica adiantado pois se referem a cargas capacitivas.



Frequencímetro:

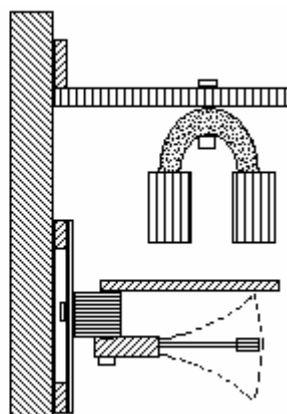
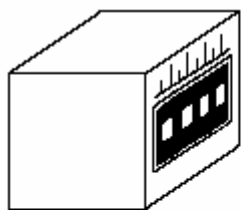
Medida por comparação (Ressonância)

Física: Os corpos possuem vibração própria, assim, quando uma frequência externa se iguala a frequência do corpo, este entra em vibração máxima, e esta frequência é dita **RESSONÂNCIA**.

Os aparelhos podem utilizar dois métodos:

Comparação: comparando a frequência a ser medida com outra conhecida. São de difícil obtenção e mais utilizados em laboratório.

Ressonância: na são aqueles cujas medidas são obtidas diretamente. São mais empregados em indústrias.



- *Frequencímetros eletrodinâmicos:*

Possuem dois circuitos sintonizados um na mínima frequência a ser medida e o outro em uma frequência pouco acima da máxima admissível pelo aparelho. Este

aparelho tem seu funcionamento baseado no fato de que a corrente que circula através de uma reatância diminui ao aumentar a frequência e aumenta ao circular uma reatância capacitiva.

- *Frequencímetros de indução:*

Este é constituído de dois ímãs de núcleo de ferro laminado. Em suas pernas polares existem espiras que funcionam como enrolamentos de partida de um motor de indução. Os campos alternados das correntes atravessam as bobinas em curto circuito e o disco. Cada campo tende a arrastar o disco em um sentido. A bobina 1 está conectada a tensão e a uma resistência, a bobina 2 também se encontra conectada a tensão através de um circuito ressonante LC. Pela localização excêntrica do eixo, ao girar a área que sofre ação das correntes de Foucault varia, isto modifica os momentos de desvio. Um dos momentos se reduz aumentando o oposto. Quando os momentos são iguais o ponteiro permanece estacionado. A intensidade que atravessa 1 é proporcional a tensão e a que circula por 2 é proporcional a tensão e a frequência assim a indicação do instrumento corresponde apenas a frequência.

- *Frequencímetros de lingüeta vibratória:*

Quando cessa a diferença entre os períodos dos momentos vibratórios de um determinado corpo e a frequência a que ele está exposto, a qual chamamos de movimento de vibração forçada, dizemos que esta ocorrendo um fenômeno físico chamado ressonância. Assim se criarmos uma frequência vibratória em uma lâmina de aço e esta frequência for igual a frequência própria da lamina esta resultará em máxima amplitude de vibração. É este o princípio de funcionamento do instrumento de lingüeta vibratória.

Estas lingüetas são construídas em aço e possuem de 2 a 5 mm de largura, de 0,1 a 0,4 mm de espessura e de 20 a 60 mm de comprimento. São dispostas uma ao lado da outra e ajustadas mecanicamente de modo a que possuam diferentes frequências de oscilação própria. Suas extremidades são dobradas e pintadas de branco. Um campo magnético alternado as excita sendo que a máxima intensidade ocorre quando a frequência própria de uma das laminas for coincidente a frequência da corrente excitante. É claro que as lingüetas vizinhas também irão vibrar porém com menor intensidade ficando a leitura com a lingüeta de maior intensidade.

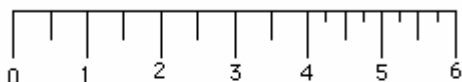
Estes instrumentos podem possuir uma ou duas fileiras de lâminas e o eletroímã, que propicia o movimento oscilatório, esta disposto em todo o comprimento das fileiras.

Escalas:

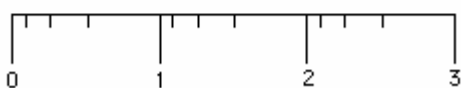
Os tipos de escala utilizados poderão variar, esta variação poderá provocar diferentes tipos de escala:

1. uniforme
2. quadrática
3. logarítmica

Escala Linear



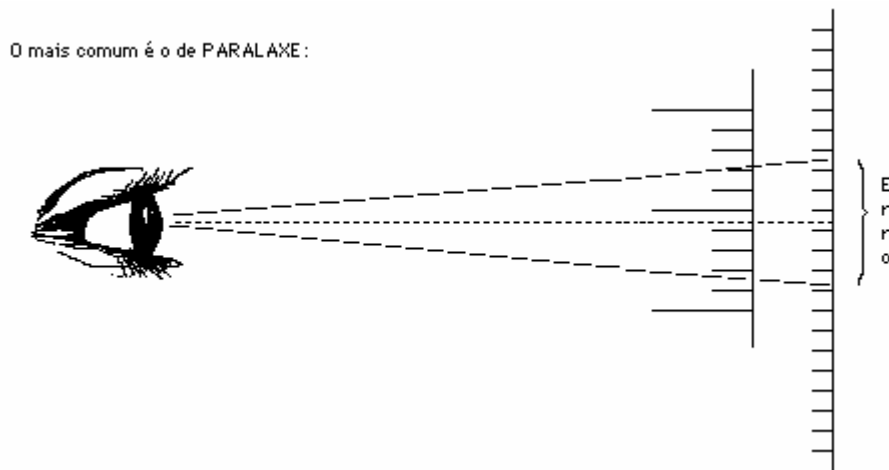
Escala Exponencial



Erros:

- *Classificação dos erros:*

1. Humanos: Causados pela observação defeituosa por parte das pessoas ao ser feita a leitura de um instrumento. O mais comum é o erro de Paralaxe. Este erro é parcial ou totalmente eliminado com a utilização de espelhos no fundo da escala;
2. Instalação: Quando o instrumento não é corretamente instalado, isto acaba provocando erros de indicação;
3. Fabricação: Estes são erros decorrentes da construção do instrumento. Estes erros podem ser inerentes ou ocasionais. Os inerentes são aqueles que todo instrumento tem mas que estão dentro de tolerâncias permitidas pelas normas. Os ocasionais são devido à utilização de materiais inadequados à fabricação. Estes erros provêm de fatores mecânicos, de influência e de aferição.

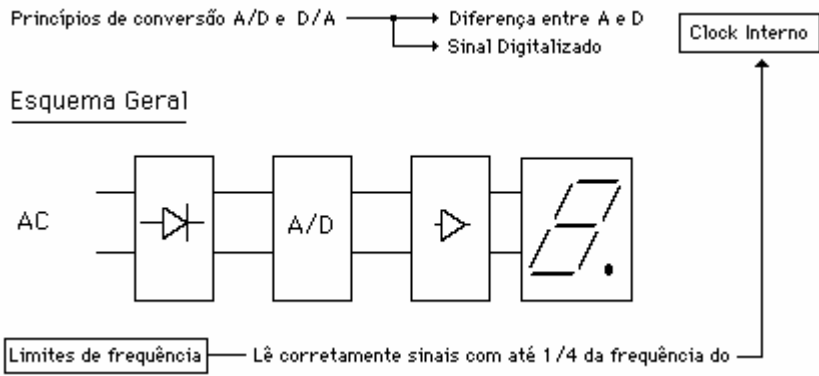


- *classe de exatidão:*

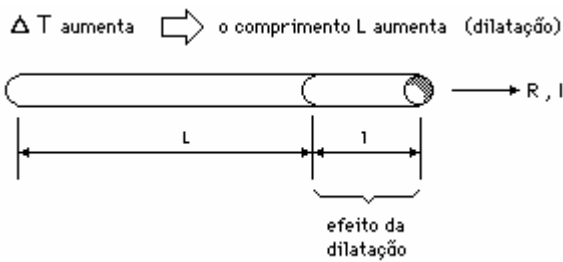
- a) Erro Absoluto: Diferença algébrica entre o valor mostrado no instrumento e o seu valor verdadeiro.
- b) Erro Relativo: É o quociente do erro absoluto pelo valor verdadeiro da grandeza que esta sendo medida.
- c) Erro Percentual: E expresso como uma porcentagem do valor verdadeiro.
- d) Variação na Indicação: Diferença entre valores medidos da mesma grandeza, quando uma grandeza de influência apresenta sucessivamente dois diferentes valores especificados.
- e) Exatidão e Classe de Exatidão: Definida pelos limites de erros e limites da variação na indicação. É utilizada para determinar a exatidão do instrumento, este número é chamado de índice de classe.

Índices de classe	limites de erro (%)
0,05	0,05
0,1	0,1
0,2	0,2
0,5	0,5

Instrumentos digitais:



Instrumentos Térmicos:



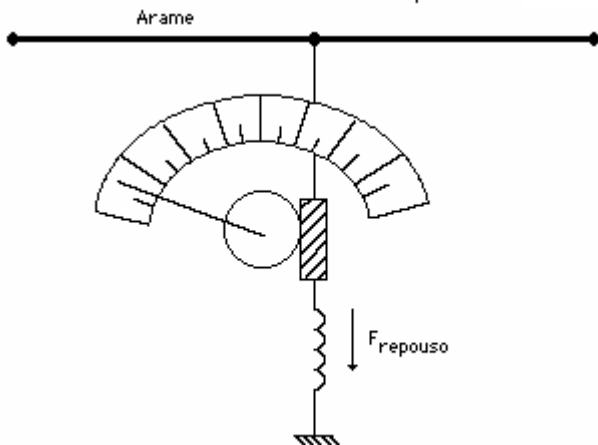
$$P = VI = RI^2 \text{ logo } RI^2 = K_1 (t_1 - t_2)$$

$$L = K_2 (t_1 - t_2)$$

e portanto:

$$\frac{R \cdot I^2}{L} = \frac{K_1}{K_2} \Rightarrow \boxed{L = \frac{K_1}{K_2} R \cdot I^2}$$

é quadrática



Mede tanto em AC quanto em DC. Se é leitura AC mede com precisão o valor eficaz, independente da frequência até alguns KiloHertz.

<u>ARAME</u> : Irídio/Platina ou Platina/Prata	Resistência específica boa; Boa resistência a tração mecânica Ponto de fusão elevado Resistente a ataque químico (oxidação) Insensível a campo magnético O centro da polia é excêntrico (compensação da não linearidade) Pouco preciso Deve responder a altas temperatura para evitar interferência do meio ambiente
--	---

Restrições:

1. O fio pode ser recozido com o uso requerendo constantes aferições;
2. São fios muito finos e na medida de corrente podem requerer um par de fios para compensar a queda de tensão;
3. A calibração é empírica, ponto a ponto.

Eng.º Luiz Antonio Vargas Pinto