

I. O ARCO ELETRICO EM SOLDAGEM

DEFINICAO: "O arco elétrico é uma descarga elétrica contínua e auto sustentável, de alta amperagem (10/2000 A) e baixa voltagem (10/50 V). Esta descarga elétrica se processa em um meio gasoso (plasma) a alta temperatura (5000/50000 K)".

I.1 ESTRUTURA BASICA E APARENCIA

A estrutura de um arco elétrico (como aquele entre um eletrodo de W e uma chapa metálica) pode ser dividido, para estudo, em 5 (cinco) regiões como apresentado na figura 1.

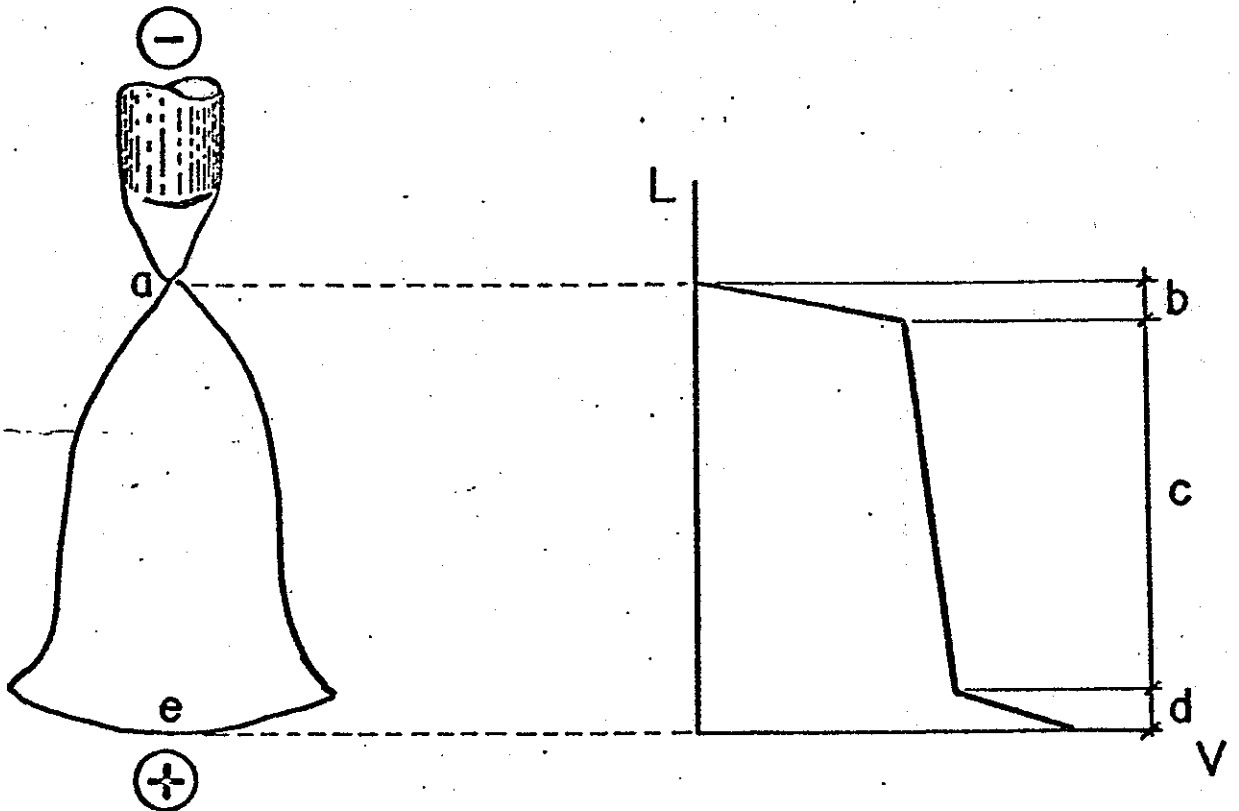


Fig.1 - Representação esquemática do Arco Elétrico em Soldagem.

Onde:

a) MANCHA CATODICA

Diminuta região, incandescente, de emissão de elétrons por efeito termoiônico. A densidade de corrente é em torno de

1000 A/mm². Em superfícies metálicas este ponto se movimenta, deixando um traço visível. Em alumínio, este traço e suas ramificações, rompem os óxidos na sua passagem.

b) REGIAO DE QUEDA CATODICA

Região de intensa atividade com a geração e aceleração dos elétrons do catodo, os quais irão bombardear os átomos dos gases e vapores da coluna do arco, ionizando-os. É estimada ter uma espessura de 10^{-2} a 10^{-3} cm e uma queda de potencial (característica dos materiais envolvidos) na faixa de 5 a 10 v.

c) COLUNA DO ARCO

A corrente na coluna do arco é bipolar. Os elétrons se movimentam em uma direção e os íons positivos na outra. O número de elétrons e de íons positivos, a qualquer instante, é igual (caracterizando a neutralidade da coluna). Entretanto, os elétrons, devido ao seu menor tamanho e massa, apresentam uma maior mobilidade do que os íons positivos. Daí serem os principais responsáveis pelo carregamento da corrente.

O "caminho médio livre" do elétron é da ordem de 10^{-4} cm e eles colidem 10^{11} vezes por segundo com os íons do gás.

A queda de potencial na coluna do arco é relativamente pequena (quando comparadas com as quedas anódica e catódica) e depende fundamentalmente do gás (e vapores) que a constitui. Por exemplo, a queda em uma coluna de argônio é da ordem de 7 V/cm, conquanto em colunas de nitrogênio e hidrogênio os valores são consideravelmente maiores : N₂ => 20 V/cm ; H₂ => 40 V/cm. Isso se justifica, para esses dois últimos, pela necessidade de dissociar as moléculas em átomos, o que absorve energia. As temperaturas, na coluna de um arco, são altíssimas e dependem dos gases, grau de dissociação, material do eletrodos, etc. Exemplos:

- devido a alta concentração de substâncias como sódio e potássio incorporadas aos eletrodos revestidos, a temperatura máxima atingida, pelo arco, é de 6000 K;

Em gases puros a temperatura axial pode ir até 30 000 K (em casos especiais até 50 000 K).

A figura 2 ilustra um arco tungstênio/argônio e suas isotermas. Cumpre notar a acentuada mudança radial nos pontos mais afastados do eletrodo.

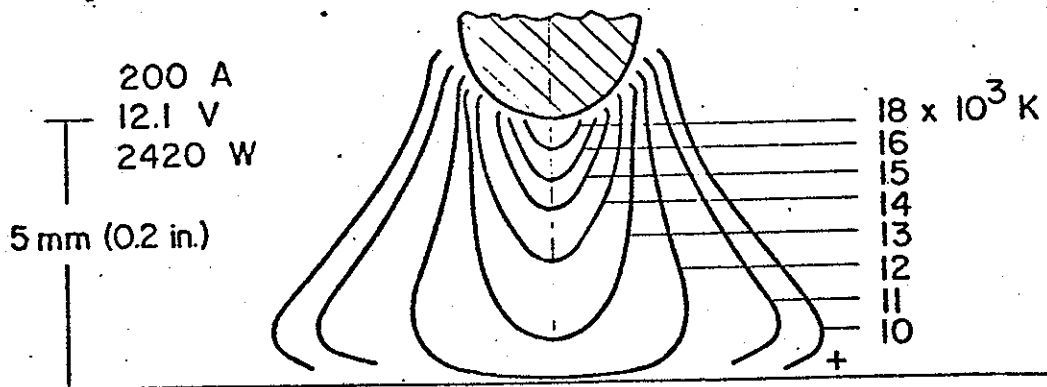


Fig.2 - Mapa isotérmico de um arco argônio-tungstênio.

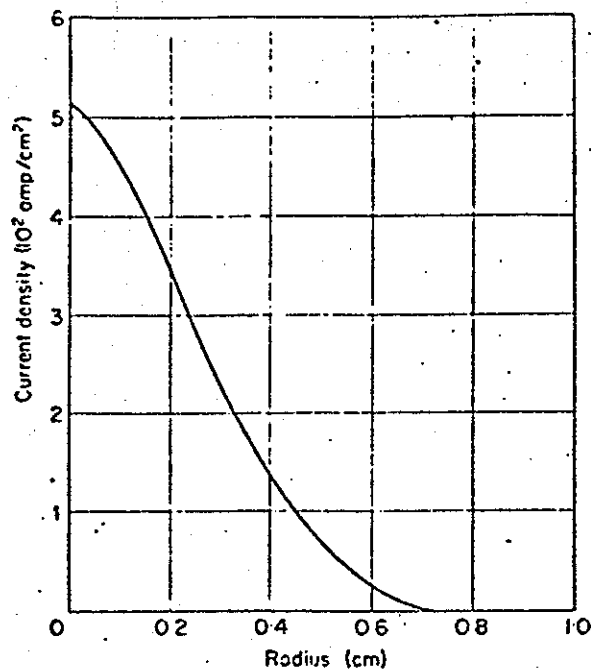
Deve-se acentuar que cessado o potencial do arco esta coluna se extingue na ordem de poucos milisegundos. Daí a dificuldade na reignição dos arcos em soldagem CA.

d) REGIÃO DE QUEDA ANODICA

Zona de condensação dos elétrons liberados. Também de baixa espessura (10^{-3} / 10^{-4} cm) e regular queda de potencial (1 a 5 V).

e) ANODO (REGIÃO DE QUEDA ANODICA)

Aqui a mancha anódica não fica perfeitamente definida, já que a densidade de corrente varia substancialmente com essa área (figura 3).



Current distribution at the anode of a 200 amp tungsten/copper arc in argon. Arc length 6.3 mm. (After O. H. Nestor, *J. Appl. Phys.*, 1962, 33, 1643)

Fig.3 - Variação da densidade de corrente no anodo.

De uma forma geral, devido ao efetivo bombardeamento pelos elétrons (alta energia cinética) temos uma maior temperatura no anodo do que no catodo. Porém, esse fenômeno é inteiramente dependente dos materiais e gases envolvidos. Seja, por exemplo a soldagem com eletrodos revestidos cujos revestimentos contém doses suficientes de Espato Flúor, cuja ação anti-ionizante concorre para a obtenção de maiores penetrações com eletrodo positivo (ao contrário do processo TIG).

I.2 CARACTERISTICAS ELETRICAS DO ARCO

Temos que considerar, pelo anteriormente exposto, que a corrente de um arco elétrico não pode seguir, rigorosamente, um comportamento ôhmico. As diversas influências (tipos de gás, materiais, pressões, quedas de potencial diferenciadas e dependentes das correntes, etc.) acarretam comportamentos característicos tensão x corrente diversificados para cada configuração. A figura 4 mostra alguns exemplos.

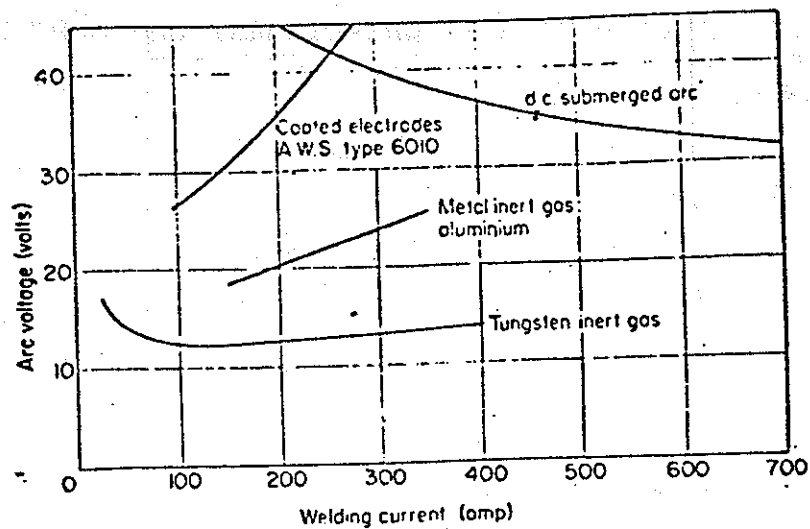


Fig.4 - Características típicas $V \times I$ para vários processos. (O comprimento do arco em todos os casos foi de 6 mm)

Por outro lado a figura 5 mostra exemplos de como há um aumento de tensão quando aumentamos o comprimento do arco.

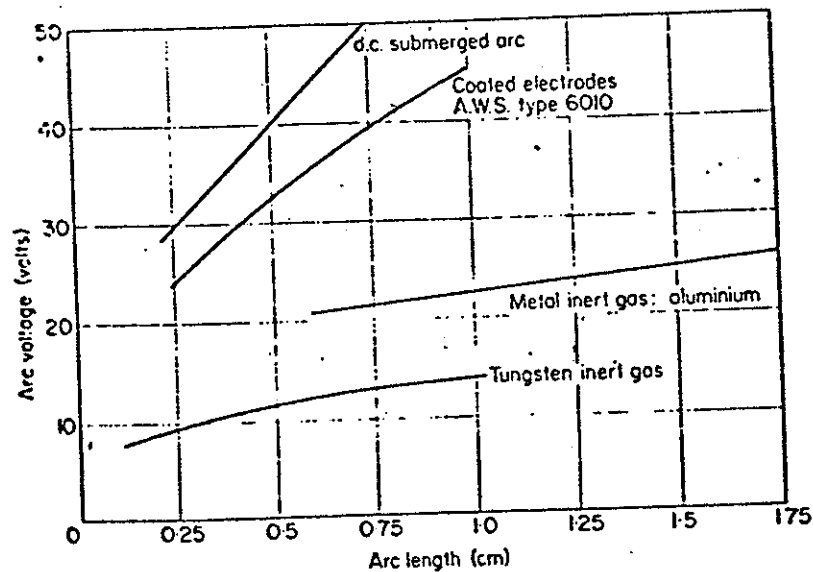


Fig.5 - Características típicas Voltagem x Comprimento do Arco (200A).

Essa acentuada variação de potencial (com conseqüente variação de corrente), com o comprimento do arco, irá caracterizar a necessidade de fontes de energia com características estáticas $V \times A$ apropriadas para cada tipo de soldagem ("CORRENTE CONSTANTE" e "POTENCIAL CONSTANTE").

1.3 FUNÇÃO DE TRABALHO TERMOIÔNICO

A Função de Trabalho Termoiônico é a energia que se deve atribuir a um elétron, próximo ao nível de Fermi de um sólido, a fim de retirá-lo, do mesmo, para uma cavidade. (O nível de Fermi de um sólido é a energia máxima que os elétrons contidos em um corpo sólido podem alcançar, até mesmo em zero absoluto, devido a grande concentração dos mesmos).

A maior ou menor facilidade de se iniciar e manter um arco é uma função do trabalho termoiônico e dos potenciais de ionização dos gases e vapores constituintes da coluna gasosa (tabelas I, II e III) daí, a existência e pesquisas em torno de diversas misturas e composições de materiais na soldagem ao arco elétrico. Exemplos de aplicação:

- adição de ligantes de silicato de potássio em revestimentos de eletrodos para soldagem CA;
- silicato de sódio em eletrodos revestidos para soldagem CC;
- Césio em arames MAG(-);
- Tório e Zircônio em eletrodos de tungstênio para TIG.

Element	eV	Element	eV
Aluminum	5.986	Potassium	4.341
Barium	5.212	Lithium	5.392
Boron	8.298	Magnesium	7.646
Carbon	11.260	Molybdenum	7.099
Calcium	6.113	Nickel	7.635
Cobalt	7.86	Silicon	8.151
Chromium	6.766	Sodium	5.139
Cesium	3.894	Titanium	6.82
Copper	7.726	Tungsten	7.98
Iron	7.870		

Note: Table 2.6 was prepared by the Atomic Energy Levels Data Center, National Bureau of Standards, Washington, DC 20234.

Element or Compound	Symbol	eV
Argon	Ar	15.760 (11.548)
Hydrogen	H ₂	15.43
	H	13.598
Helium	He	24.5876 (20.96430) (19.8198)
Nitrogen	N ₂	15.58
	N	14.534
Oxygen	O ₂	12.07
	O	13.618
Carbon Dioxide	CO ₂	13.77
Carbon Monoxide	CO	14.1

Note: Table 2.7 was prepared by the Atomic Energy Levels Data Center, National Bureau of Standards, Washington, DC 20234.

Tab. I - Potenciais de ionização de vapores.

Tab. II - Potenciais de ionização de gases.

Element	Range, eV	Element	Range, eV
aluminum (Al)	3.8 to 4.3	magnesium (Mg)	3.1 to 3.7
barium (Ba)	4.1 to 4.4	manganese (Mn) (α , β , or γ)	3.8 to 4.4
barium oxide (BaO)	4.9 to 5.2	molybdenum (Mo)	4.0 to 4.8
cerium (Ce)	1.7 to 2.6	neodymium (Nd)	4.1 to 4.5
cesium (Cs)	1.0 to 1.6	nickel (Ni)	2.9 to 3.5
cesium film or W	2.7 to 3.1	palladium (Pd)	4.5 to 5.3
chromium (Cr)	4.4 to 5.1	platinum (Pt)	4.9 to 5.7
cobalt (Co)	3.9 to 4.7	samarium (Sm)	5.2 to 5.9
columbium (Cb)*	1.8 to 2.1	scandium (Sc)	3.3 to 3.7
copper (Cu)	1.1 to 1.7	silver (Ag)	2.4 to 3.0
europium (Eu)	4.4 to 4.7	strontium (Sr)	2.1 to 2.7
gadolinium (Gd)	2.2 to 2.8	titanium (Ti)	3.8 to 4.5
gold (Au)	4.2 to 4.7	vanadium (V)	4.1 to 4.4
hafnium (Hf)	2.9 to 3.3	wolfram (W)	4.3 to 5.3
iron (Fe) (α or γ)	3.5 to 4.0	yttrium (Y)	2.9 to 3.3
lanthanum (La)	3.3 to 3.7	zirconium (Zr)	3.9 to 4.2

*Now renamed niobium (Nb)

Note: Table 2.8 was prepared by the Alloy Data Center, National Bureau of Standards, Washington, DC 20234.

Tab. III - Funções de Trabalho Termoiônico - Faixas prováveis, eV.

II. FORÇAS ATUANTES DURANTE UMA TRANSFERENCIA METALICA PELO ARCO ELETRICO (figura 6)

- Tensão Superficial (f(material e geometria da gota));
- Força Gravitacional (f(material e geometria));
- Força Eletromagnética - "Lorentz", Efeito "Pinch" ($f(i^2)$);
- Força de Evaporação (f(sup. da gota e corrente));
- Forças Hidrodinâmicas (f(fluxo de gás)).

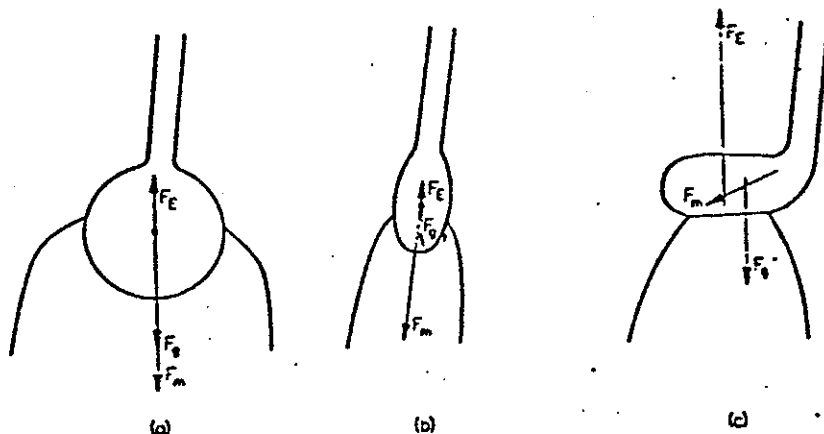


Fig. 2.15. Forces involved in metal transfer

- (a) Predominantly gravitational, e.g. low current welding of aluminium;
- (b) Predominantly electromagnetic, e.g. high current welding of aluminium;
- (c) Predominantly evaporative, e.g. CO₂ welding, low current, free flight transfer.

Fig. 6 - Forças envolvidas em transferência de metal.

FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM ELETRICA

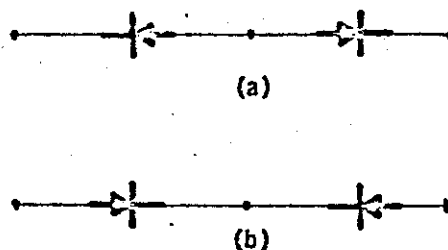
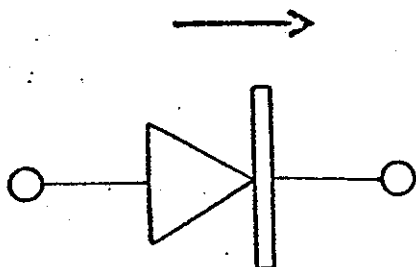
I. CONCEITOS E COMPONENTES BASICOS

I.1 RETIFICADORES

I.1.1 Definição:

"Dispositivos que só permitem a passagem de corrente em um único sentido".

I.1.2 Representação básica:



I.1.3 Tipos mais comuns em soldagem

Retificadores são construídos com diversos tipos de materiais e princípios próprios de condução da corrente em apenas um sentido. O de uso mais freqüente, em soldagem, são os RETIFICADORES DE ESTADO SOLIDO. São constituídos de substâncias tais que, quando polarizadas, apresentam a propriedade de ter uma capacidade de condução de elétrons diferenciada. Isto é, o efeito aparente é de ter altíssima resistência elétrica em um sentido e funcionar como um condutor (baixíssima resistência) no outro sentido.

Um retificador simples de estado sólido é chamado de DIODO. Os materiais mais comuns que os caracterizam são:

- a - OXIDO DE COBRE (20 mA/cm², Vef. 5 V)
- b - SELENIO (40 mA/cm², Vef. 25V)
- c - GERMANIO
- d - SILICIO

Os diodos de óxido de cobre são usados, normalmente, em instrumentação. Os de germânio são mais caros e menos robustos que os de silício. Para a retificação das grandes correntes de soldagem foram empregados, por excelência, os retificadores de selênio. Hoje em dia

estes últimos, em virtude de novas tecnologias de fabricação, estão sendo substituídos por diodos de silício.

Os retificadores de selênio admitem, por unidade, pequenas tensões de trabalho, daí serem montados grandes conjuntos, justapostos, de forma a atender as tensões e correntes de soldagem. Como característica positiva eles suportam melhor eventuais transientes de tensão do que aqueles de silício. Em contrapartida, quando apenas uma das lâminas se danifica, todo o conjunto tem que ser trocado. Já os de silício são compactos, de fácil colocação e reposição (normalmente aparafusados em dissipadores de calor). A figura 1 apresenta o aspecto de dois retificadores típicos.

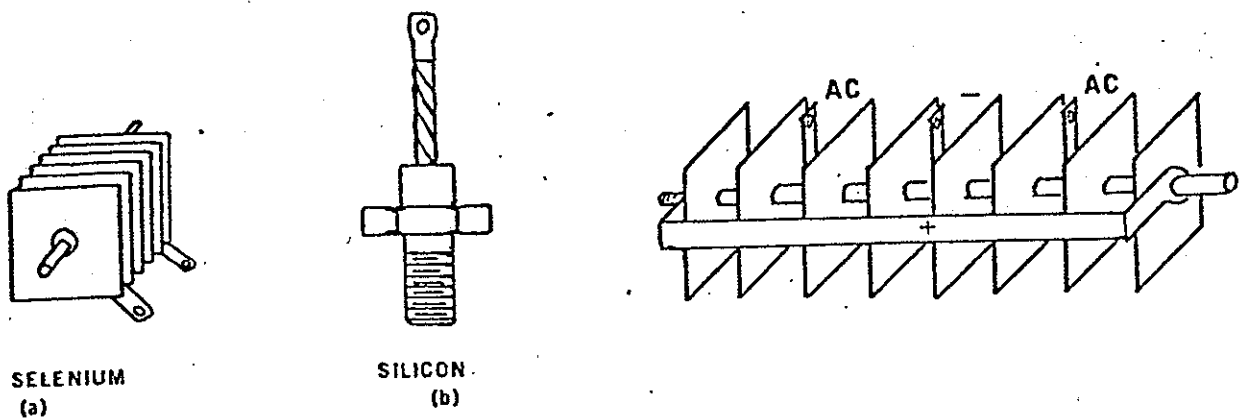
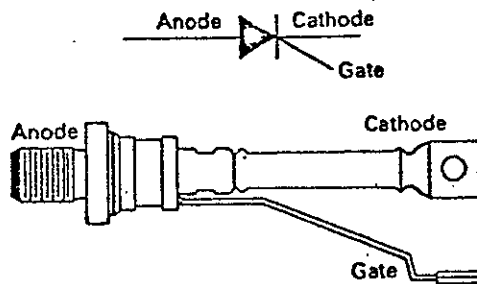


Fig.1 - Diodos de selênio (a) e silício (b).

TIRISTORES ou SCR ("Silicon controlled retifier")



TRIAC



I.2 INDUTORES OU REATORES

I.2.1 Definição:

"Basicamente um indutor é uma bobina em volta de um núcleo. Sua principal função é controlar a taxa de mudança de corrente em um circuito"

Em circuitos CC => INDUTOR

Em circuitos CA => REATOR

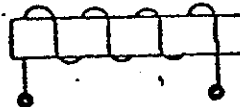
Também "CHOQUE", "ESTABILIZADOR", etc.

I.2.2 Características:

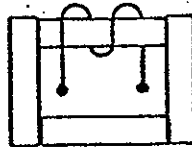
Air Core Coil
needs many turns



Open loop iron core
needs less turns



Closed loop iron core
needs least turns,



I.3 TRANSFORMADORES

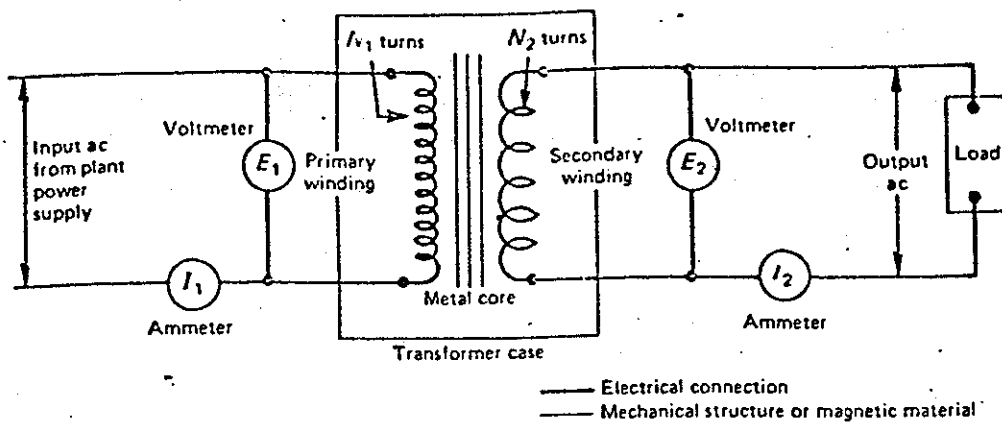
I.3.1 Definição:

"São dispositivos que permitem mudar o nível de tensão e CORRENTE ALTERNADA".

Em soldagem a função do transformador principal é de converter tensão da rede (mono ou trifásica de 110, 220, 380 e 440 V) e de baixas correntes nas baixas tensões e altas correntes para a soldagem. Identificação grosseira:

Enrolamento Primário : muitas espiras de fio fino;
Enrolamento Secundário: poucas espiras de fio grosso.

I.3.2 Características básicas:



Onde:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Fig.2 - Principais elementos de um transformador e relação básica.

I.3.3 Exemplos de sistemas para mudança de voltagem na saída:

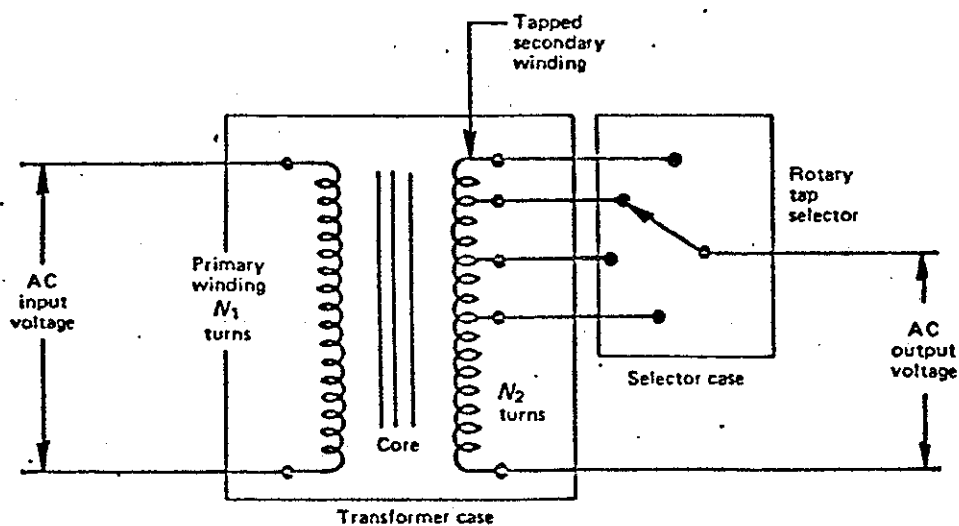


Fig.3 - Sistema de "TAPES".

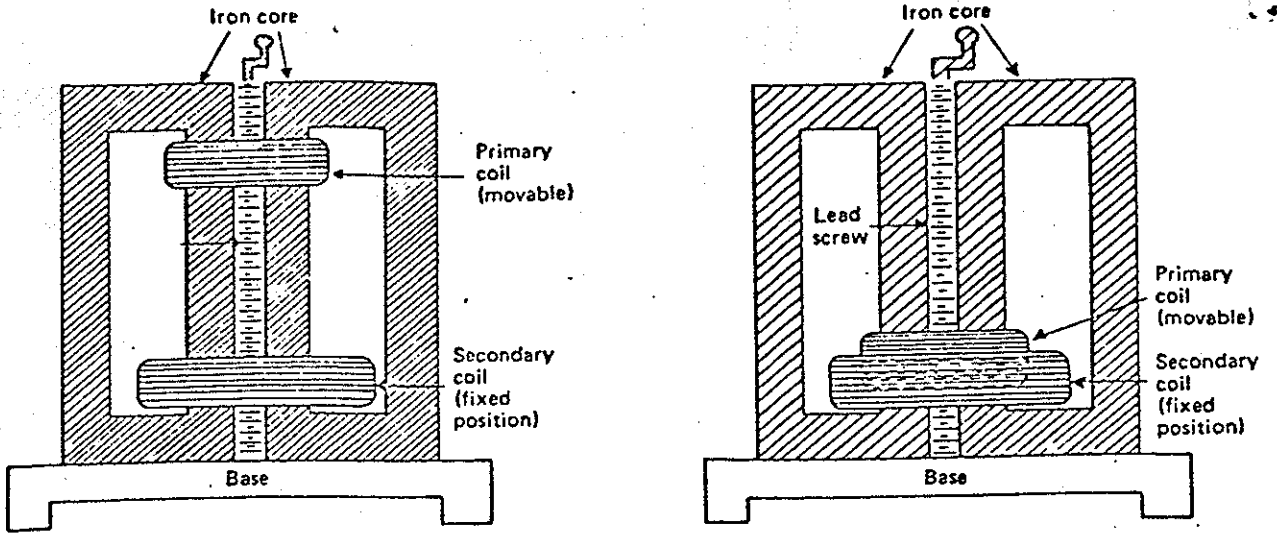


Fig.4 - Transformador de BOBINA MOVEL.

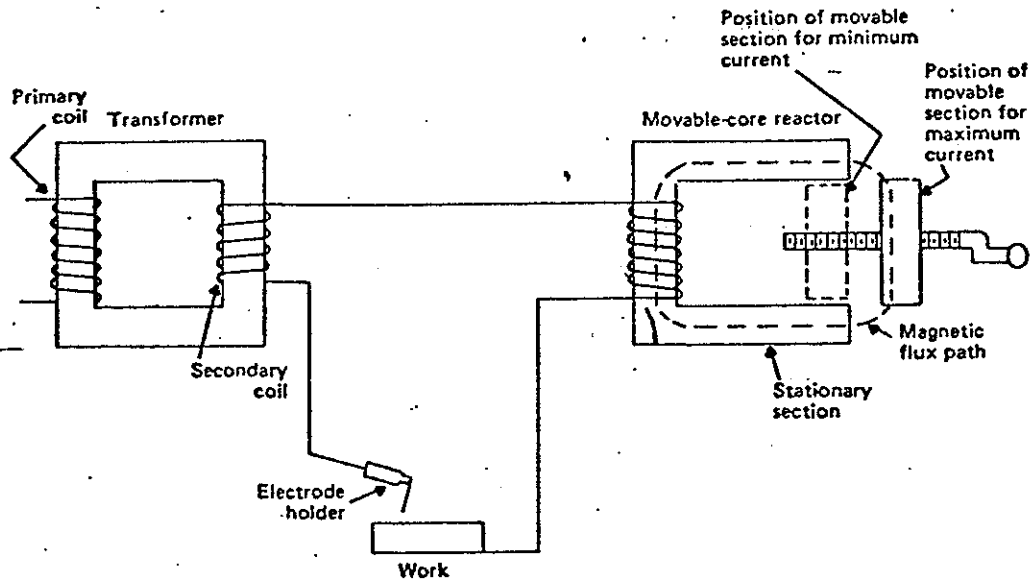


Fig.5 - Transformador com REATOR DE NUCLEO MOVEL.

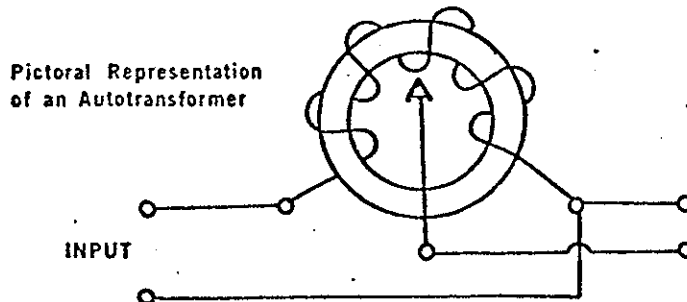


Fig.6 - Auto transformador ("VARIAC", "VOLTPAC", etc.).

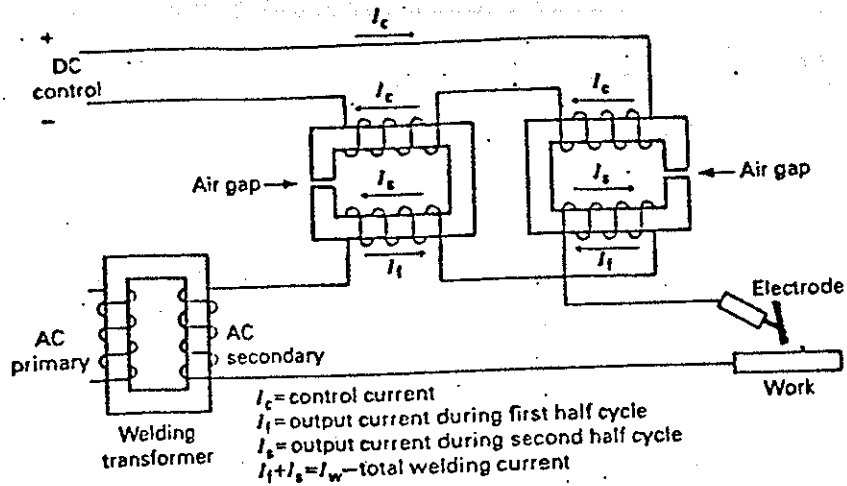


Fig.7 - Transformador com sistema de controle por REATOR SATURAVEL (amplificador magnético).

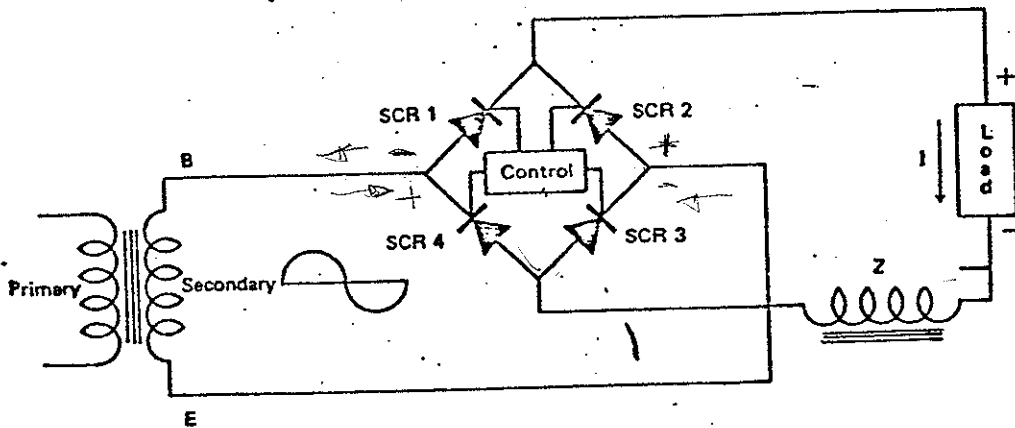
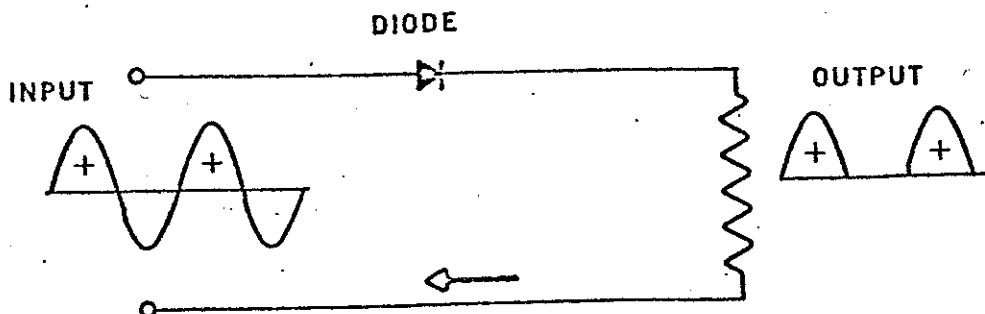


Fig.8 - Sistema de controle por ESTADO SOLIDO (TIRISTORES) - Fonte CC.

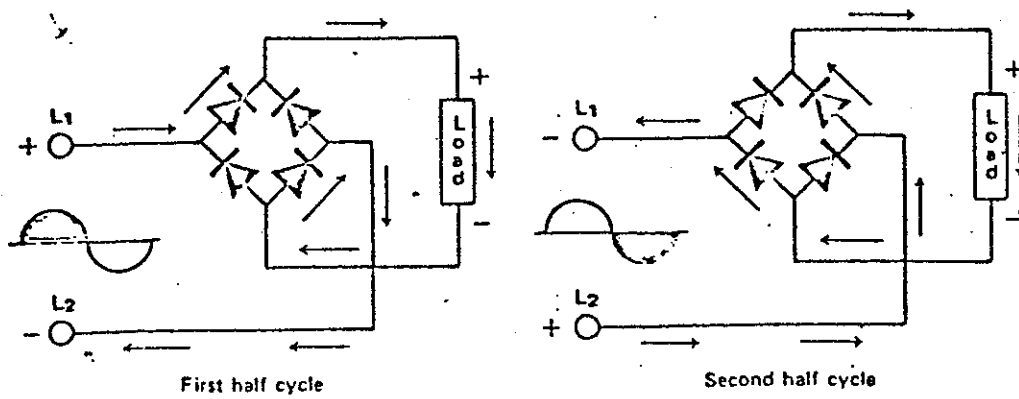
I.4 PONTES RETIFICADORAS

I.4.1 Circuitos retificadores em "meia onda":

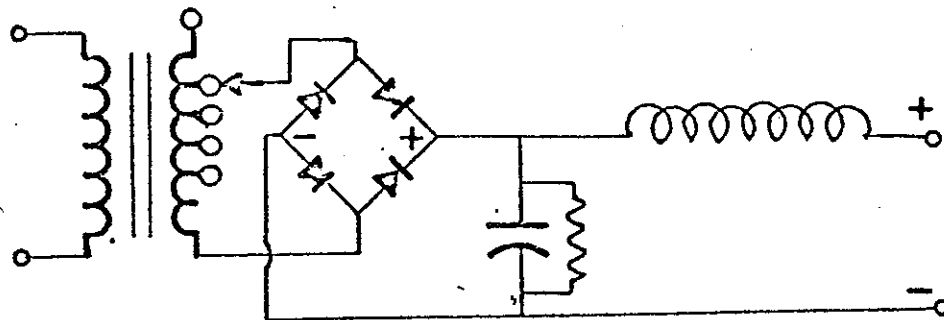


1.4.2 Pontes retificadoras em "onda completa":

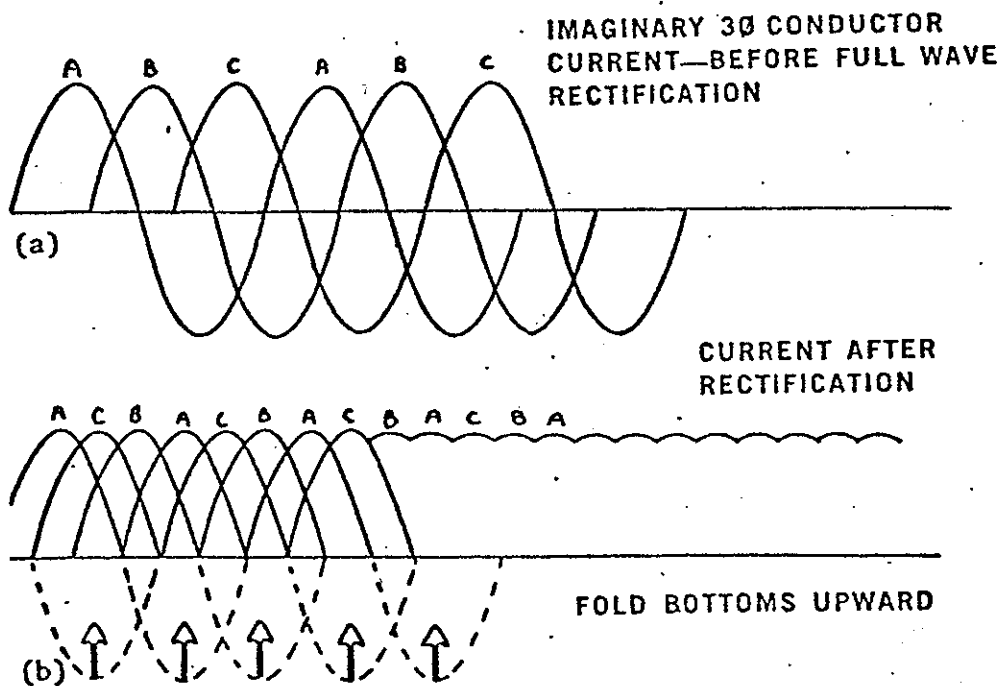
a) Sem filtragem.



b) Com filtragem.



c) Corrente trifásica retificada em onda completa (modelo simulado).

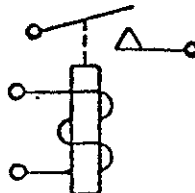


5 CONTACTORES, RELES e INTERRUPTORES

Contactores (chaves) são dispositivos que, providos de um eletro-
ma, abrem ou fecham o circuito principal.

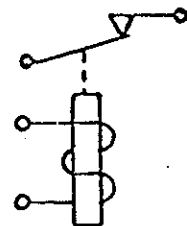
ESQUEMA BASICO:

Relay with
normally open
contacts.
Energize the
coil to close
the contacts.



(a)

Relay with
normally closed
contacts.
Energize the
coil to open the
contacts.



(b)

6 FUSIVEIS, RELES TERMICOS E TERMO INTERRUPTORES

Princípio básico: $Q = R \times I^2$

- Fusíveis: Rolha, cartucho, "Diazed", etc => POR FUSÃO;

- Relés Térmicos: São providos de lâminas bi-metálicas. Servem de
roteção dos circuitos contra excessos de corrente. Podem ser,
normalmente, re-acionados ("disjuntores");

- Termo-interruptores: São inseridos nas bobinas de motores, em
dissipadores de calor, etc. São mini-lâminas bi-metálicas que
interrompem os circuitos das bobinas dos relés dos contactores
principais de acionamento.

7 MEDIDORES: VOLTIMETROS E AMPERIMETROS

7.1 Esquema e Princípio:

Amperímetros e voltímetros são os dois medidores mais comuns em
tecnologia da soldagem. A grande maioria desses equipamentos trabalha
da mesma maneira. Todos eles se utilizam da criação ou modificação de
um campo magnético induzido.

A maioria dos medidores consiste de uma pequena bobina enrolada
em um núcleo móvel, ao qual fixa-se o ponteiro do dispositivo. Este
conjunto é pivotado de forma a ter um movimento livre. Uma pequena
bobina em espiral ("fio de cabelo") o mantém na posição de repouso
("0"). Este conjunto tem como berço o campo de um ímã permanente.
Quando uma pequena corrente (devido a uma ddp) flui na bobina, ela
magnetiza o núcleo, de forma contrária ao campo permanente. Com

resultado o conjunto bobina-ponteiro sofre uma rotação proporcional à tensão aplicada. A tensão que provoca o máximo de deslocamento do ponteiro, caracteriza o medidor. Os valores típicos são de 50 ou 60 mV.

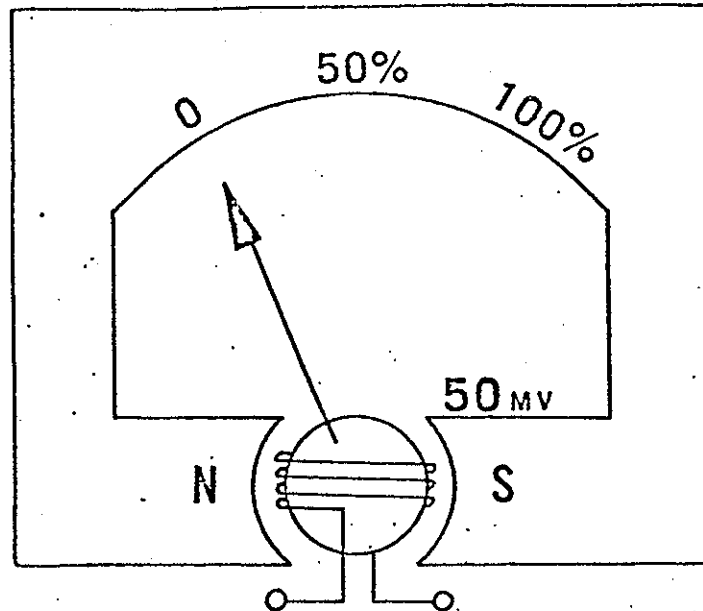
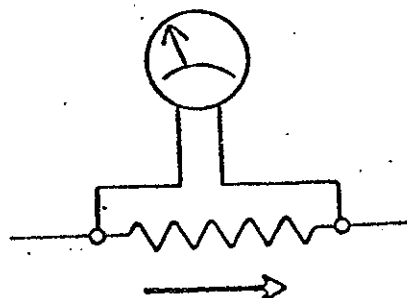


Fig.9 - Exemplo de um medidor padrão de bobina móvel.

I.7.2 Funcionamento como AMPERIMETRO

Resistência inserida no circuito (em PARALELO - "Shunt"- com medidor => R MUITO BAIXA !).

Ex.: Shunt 300 A/60 mV => $R = 0.0002$ Ohms.

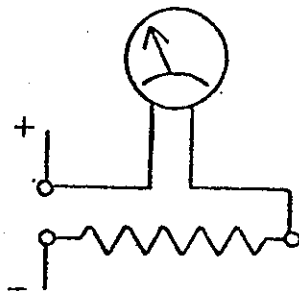


1.7.3 Funcionamento como VOLTÍMETRO

Resistência em **SERIE** com o medidor (R muito alta !) => VOLTÍMETRO

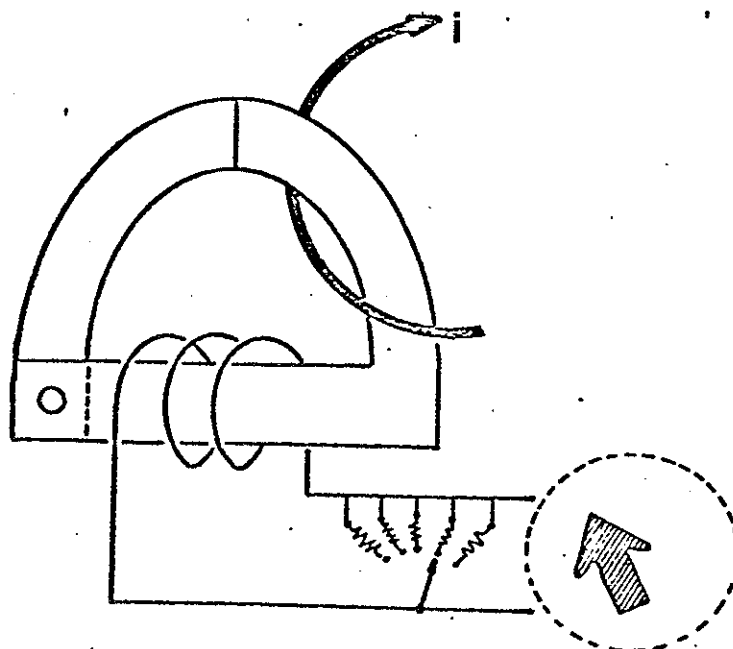
Ex.: Voltímetro analógico: normal 20.000 Ohms/V

Voltímetro digital: impedância de entrada na faixa de 10 Megohms.

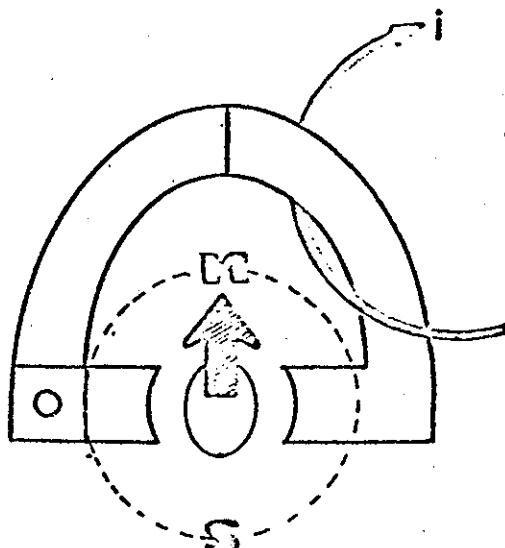


1.7.4 Medidores de alicates:

a) do tipo **BOBINA MOVEL** (só para **CORRENTE ALTERNADA** !)



b) do tipo FERRO MOVEL (CC/AC 1)



I.8 FATOR DE POTENCIA

Frequentemente, fabricantes de fontes de energia para soldagem irão especificar o fator de potência dos seus equipamentos. Isto é importante porque as concessionárias de energia elétrica tem que otimizar a utilização da energia elétrica fornecida aos usuários.

Tantos circuitos com cargas indutivas ou capacitivas em excesso provocam uma queda de potencial, a qual, associada à corrente do circuito drenam uma energia que não será consumida em trabalho (ou calor). Será, simplesmente, armazenada durante o efetivo funcionamento do sistema.

Por outro lado, suponhamos que em um fornecimento de energia trifásica (que é o usual, industrialmente) hajam muitas cargas indutivas colocadas, sistematicamente, em apenas uma das fases da rede. O grande atraso da corrente em relação à tensão, nesta fase, irá provocar o desbalanceamento de todo o sistema trifásico, criando inclusive, problemas de superaquecimento nos transformadores de distribuição, da concessionária, no local.

Um baixo "FP" significa que a potência fornecida não é usada efetivamente como deveria ser. Embora indutância e capacitância não consumam potência real (como calor em uma resistência) elas drenam VOLTAMPERES. Para as companhias concessionárias um excesso desnecessário de corrente circulante irá representar uma obrigatória ampliação nos circuitos de distribuição. Daí, a regulamentação, de um fator de potência mínimo que uma empresa deverá apresentar normalmente, na faixa de 0.8). A figura 10 exemplifica, vetorialmente a definição do Fator de Potência.

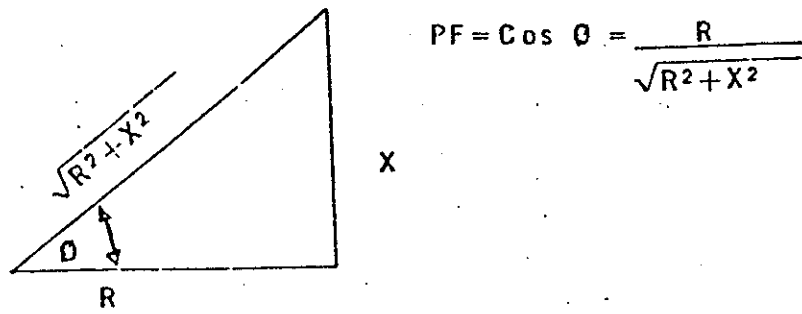


Fig.10 - Definição do Fator de Potência
(R=Reatância ; X=Indutância).

1.8 CICLO DE TRABALHO ("Duty Cycle")

É uma medida percentual, indicada pelo fabricante, da relação tempo de arco x descanso que o equipamento poderá operar em uma determinada amperagem. Por códigos internacionais (por ex. NEMA National Electrical Manufacturers Association) o tempo de estudo é de 10 ou 20 min.

Por exemplo: 60 % a 250 A. >>>> 6 min soldando e 4 min "parado" (troca de eletrodos, limpeza de escória, etc.).

Nota: Para amperagens menores que a nominal, aumenta-se o ciclo de trabalho (CT). Pode-se tirar a relação do novo CT por uma expressão quadrática (considerando que a resistência interna do equipamento é praticamente constante, o efeito de perdas por aquecimento é proporcional a RI^2).

$$\% CTr = CTn \times (I_n^2 / I_r^2)$$

Onde: CT - ciclo de trabalho; I - corrente. (r = real; n = nominal).