



# MÁQUINAS E COMANDOS ELÉTRICOS

CURSO:	<i>MECATRÔNICA</i>
PROFESSOR:	<i>GERALDO TELES DE SOUZA</i>
PUBLICAÇÃO:	<i>JULHO/2004</i>



## **Apresentação**

O Objetivo deste trabalho foi reunir material sobre os principais componentes empregados hoje na automação industrial para um curso de técnicos em automação ou técnicos em mecatrônica.

Visando um curso prático, mas com um certo grau de aprofundamento, utilizou-se de muitas ilustrações de catalogos de fabricantes consagrados como Allen-Bradley, Siemens , Weg, que são líderes de mercado em seus segmentos e que fatalmente o aluno encontra em sua vida profissional na empresa.

O material é suficiente para a compreensão dos fenômenos que dão vida aos motores e demais equipamentos eletromagnéticos usados nas principais industrias.

Há também algumas informações sobre instalações elétricas que é uma área correlata à automação industrial. O enfoque foram os dispositivos de proteção mais largamente utilizados.

Este material pressupõe que o leitor domina conhecimentos que devem ter sido adquiridos em outras disciplinas.

A parte de eletroválvulas e cilindros não foi explorada por ser tema de outro curso,.

A parte de acionamento apenas descorre levemente o assunto, dada a complexidade do mesmo e a existência de um curso específico para isso.

De modo geral, espero que este trabalho possa contribuir de alguma forma para o enriquecimento do aluno no que tange ao conhecimento e aplicação dos principais dispositivos utilizados na industria, além é claro de dar uma idéia do estado da arte em que se encontra tal segmento.

Contamos com a colaboração dos mestres e alunos no sentido de apontarem eventuais erros neste material para que em versões futuras possamos corrigi-las e dessa forma concorrer para o melhoramento desta pequena contribuição.

Mogi Mirim, 10 de agosto de 2004.

Prof. Geraldo Teles de Souza

## Índice

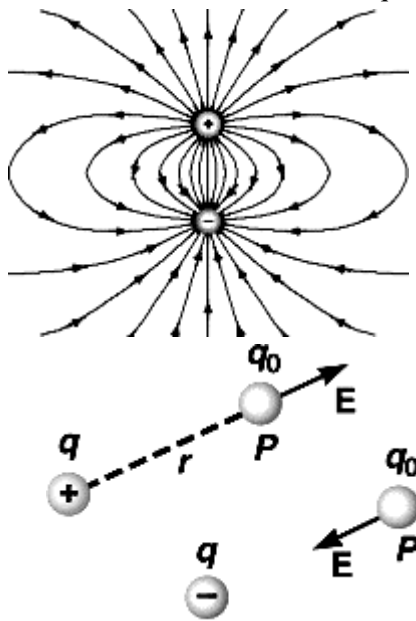
Introdução ao Eletromagnetismo .....	04
Máquinas Elétricas .....	13
Sistemas Elétricos de Potência .....	15
Transformadores .....	32
Motores de CC .....	39
Motores de CA .....	47
Partida de Motores .....	64
Instalações Elétricas .....	68
Aterramento Elétrico .....	79
Choque Elétrico .....	98
Proteção Contra Descargas Atmosféricas .....	109
Comandos Elétricos .....	136
Dispositivos de Manobra e Proteção .....	146
Acionamentos Elétricos .....	207
Referências Bibliográficas .....	218

## 1. Introdução ao Eletromagnetismo

Eletromagnetismo é o ramo da Física que estuda os fenômenos elétricos e magnéticos e suas interações entre si. Como se sabe os fenômenos elétricos e magnéticos manifestam-se através de campos elétricos e magnéticos. Vamos estudar cada um deles.

### Campo Elétrico

A força que se manifesta entre dois corpos eletricamente carregados é uma força que age à distância. Ela se faz sentir sem que haja qualquer conexão material entre os dois corpos que interagem. Provoca certa perplexidade a idéia de que uma força se faça sentir à distância, mesmo através do espaço vazio.

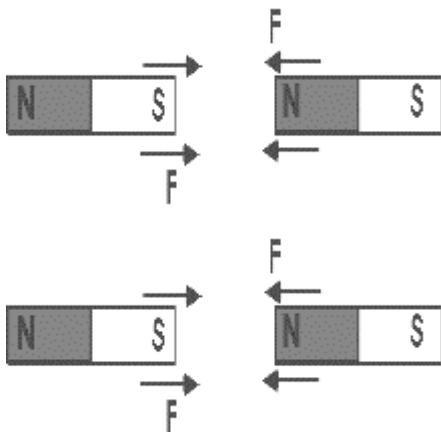


Essa dificuldade pode ser superada pensando-se da seguinte maneira: Vamos dizer que, quando um corpo  $q$  está eletricamente carregado, cria-se em todo o espaço circundante uma situação nova, diferente da que existia quando  $q$  estava descarregado. O fato de eletrizarmos esse corpo modifica as propriedades do espaço que o circunda. Outro corpo eletricamente carregado ( $q_0$ ), colocado em um ponto  $P$  do espaço, começará, num dado instante, a "sentir" uma força elétrica causada por  $q$ . Dizemos que a carga do corpo  $q$  gera no espaço circundante um campo elétrico.

O campo elétrico gerado pela carga  $q$  num ponto  $P$  existe independentemente de haver em  $P$  um corpo carregado. Quando colocamos nesse ponto  $P$  um corpo carregado, a força que passa a agir sobre ele é devida ao campo elétrico que já preexistia ali, e não a uma ação direta, à distância, do corpo  $q$  sobre o segundo corpo.

### Campo Magnético

Há séculos, o homem observou que determinadas pedras têm a propriedade de atrair pedaços de ferro ou interagir entre si. Essas pedras foram chamadas de ímãs e os fenômenos, que de modo espontâneo se manifestam na Natureza, foram denominados fenômenos magnéticos.



Um ímã em forma de barra tem dois pólos: sul e norte, em torno dos quais há um campo magnético. Os ímãs podem ser permanentes ou temporários e os materiais utilizados em cada tipo diferem entre si. Um material ferromagnético pode ser transformado em um ímã quando colocado na parte central de uma bobina elétrica ou solenóide, ao se passar uma corrente de grande intensidade através do enrolamento. De acordo com a composição, o material receberá seu magnetismo depois que a corrente tiver sido cortada. Ímãs permanentes são fabricados a partir de materiais duros tais como aço, níquel e cobalto. Alguns materiais retêm pouco ou nenhum magnetismo após a corrente ter sido cortada.

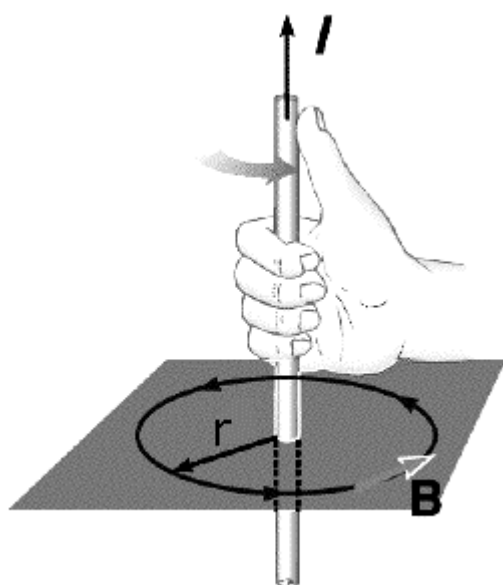
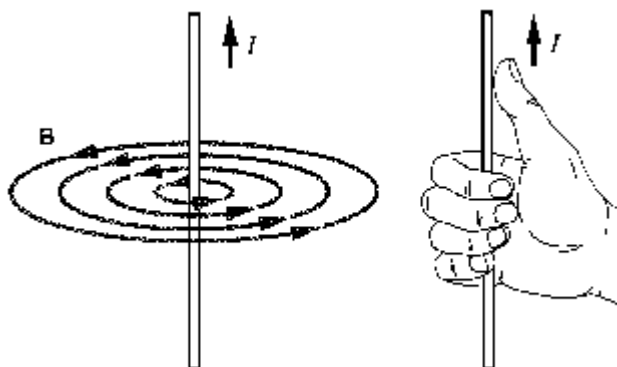
Ao tentarmos aproximar o pólo norte de um ímã do pólo norte de outro ímã, notaremos que haverá uma força magnética de repulsão entre esses pólos. Do mesmo modo, notaremos que há uma força de repulsão entre os pólos sul de dois ímãs, enquanto que entre o pólo sul e norte haverá uma força de atração magnética. Resumindo: Pólos magnéticos de mesmo nome se repelem e pólos magnéticos de nomes diferentes se atraem, veja as figuras ao lado e acima. Os pólos de um ímã são

inseparáveis. Se você quebrar ao meio um ímã em forma de barra, as duas metades obtidas serão ímãs completos. Por mais que você quebre, nunca obterá um ímã com um único pólo.

Campo magnético é toda região ao redor de um ímã ou de um condutor percorrido por corrente elétrica, onde os fenômenos magnéticos se manifestam.

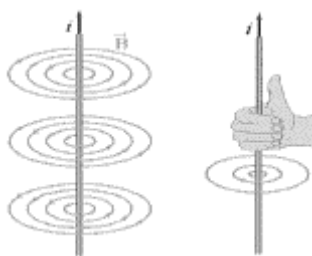
### Campo magnético criado por um condutor retilíneo

As linhas de campo são circulares e concêntricas ao fio por onde passa a corrente elétrica e estão contidas num plano perpendicular ao fio. Vide a figura abaixo:



**Regra da mão direita:** Segure o condutor com a mão direita de modo que o polegar aponte no sentido da corrente. Os demais dedos dobrados fornecem o sentido do vetor campo magnético, no ponto considerado. Vide a figura ao lado.

### Campo magnético criado por um condutor retilíneo

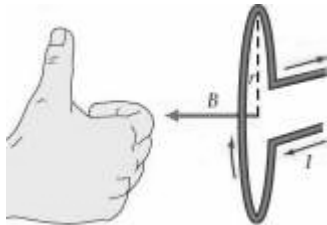


O campo magnético produzido pela corrente elétrica em um fio retilíneo depende basicamente de dois fatores: da intensidade da corrente e da distância ao fio. Quanto maior for o valor da corrente, maior será o campo magnético criado por ela. Por outro lado, quanto maior for a distância ao fio, menor será o valor do campo magnético. As linhas do campo magnético são circulares, centradas no fio.

O sentido das linhas de campo magnético pode ser obtido pela *regra da mão direita*: segure o condutor com a sua mão direita como na figura ao lado,

de maneira que o dedo polegar aponte o sentido da corrente. Os seus dedos apontarão no sentido das linhas de campo.

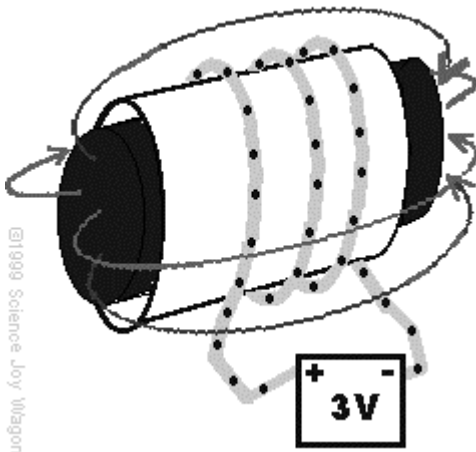
### Campo magnético no centro de uma espira



Se o condutor tiver forma circular, ele se denomina *uma espira*. O campo magnético no centro de uma espira, depende do raio do círculo e da intensidade da corrente elétrica. Quanto maior a corrente, maior o valor do campo. Quanto maior o raio da espira, menor o valor do campo.

Observe que as linhas de indução se concentram no interior do círculo e continua valendo a regra da mão direita para a determinação do seu sentido.

### Campo magnético de um solenóide (bobina, eletroímã)



Uma bobina, ou solenóide, é constituída por um fio enrolado várias vezes, tomando uma forma cilíndrica. Cada uma das voltas do fio da bobina é uma espira, conforme a figura ao lado.

Ligando-se as extremidades da bobina a uma bateria, isto é, estabelecendo-se uma corrente em suas espiras, essa corrente cria um campo magnético no interior do solenóide. Seu valor, ao longo do eixo central, depende da intensidade da corrente elétrica, do número de espiras e do comprimento do solenóide.

Para saber qual das extremidades de um solenóide é o pólo norte, você pode aplicar a regra da mão direita, da mesma maneira que fez com o fio condutor e com a espira.

A intensidade de um eletroímã depende também do facilidade com que o material em seu interior é magnetizado. A

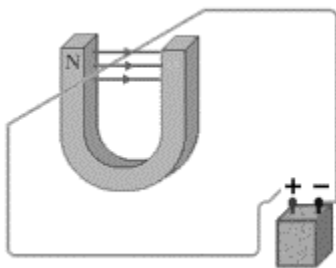
maior parte dos eletroímãs são feitos de ferro puro, que se magnetizam facilmente (baixa relutância).

Os eletroímãs são utilizados nas campainhas elétricas, telégrafos, telefones, amperímetros, voltímetros, etc.

### Interação entre campos elétricos e magnéticos:

O campo magnético é capaz de exercer forças não apenas sobre ímas, mas também sobre condutores percorridos por correntes elétricas.

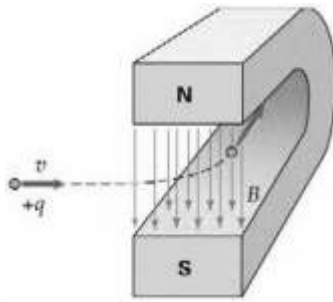
A força gerada é a soma das pequenas forças que o campo magnético exerce sobre cada elétron em movimento. Não é, porém, necessário que os elétrons estejam dentro do fio para que sofram a ação do campo magnético. Isso também ocorre quando eles estão no exterior e se movem livremente.



Em geral, cada partícula carregada e em movimento sofre a ação de uma força exercida pelo campo magnético. Essa força é grande quando a partícula se desloca perpendicularmente às linhas de campo, e é igual a zero quando a partícula se move na mesma direção do campo magnético.

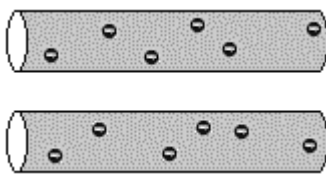
A direção da força é perpendicular tanto à direção do movimento como à do campo magnético.

A força que um campo magnético exerce sobre um condutor percorrido por corrente pode ser utilizada para realizar trabalho. É o que ocorre nos motores elétricos, que

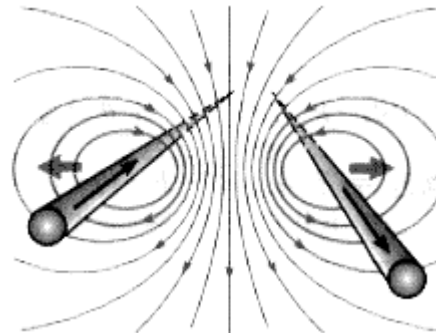
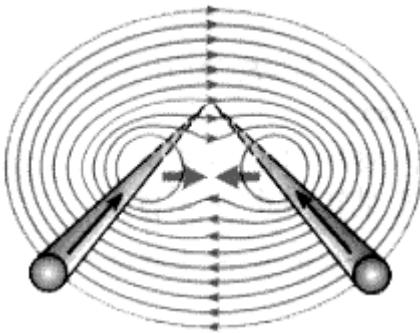


transformam energia elétrica em energia mecânica. Essa força também é usada para fazer funcionar uma grande variedade de aparelhos elétricos de medida, como amperímetros e voltmímetros.

### Forças Produzidas por Correntes Elétricas Paralelas:



O estudo do campo magnético produzido por corrente elétrica iniciou-se com a descoberta de Oersted de que uma corrente elétrica aplica forças num ímã. Em seguida, Ampère mostrou que os ímãs aplicam forças nas correntes elétricas. O passo seguinte foi a comprovação de que duas correntes elétricas, como as da figura ao lado, também interagem.

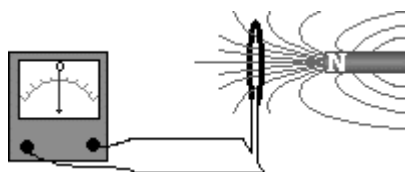


Experimentalmente, observa-se que dois fios paralelos se atraem quando atravessados por correntes com o mesmo sentido, e se repelem quando as correntes têm sentidos contrários. Suponhamos dois condutores retilíneos e paralelos, conduzindo as correntes  $i_1$  e  $i_2$  de mesmo sentido (figura acima). A corrente  $i_1$  gera um campo magnético  $B_1$  (linhas de força circulares), que no ponto onde se encontra o fio que conduz  $i_2$  é perpendicular a ele. A corrente  $i_2$  ficará sujeita a uma força  $F$ , para a esquerda. Analogamente  $i_2$  gera em  $i_1$  o campo  $B_2$ , que dá origem à força  $F$  sobre  $i_1$ , para a direita.

As duas forças  $F$  têm a mesma intensidade. A força por unidade de comprimento é diretamente proporcional ao produto das intensidades das correntes e inversamente proporcional à distância entre as correntes.

A interação entre correntes elétricas tem importantes aplicações práticas, como em alguns tipos de motores elétricos, que funcionam a partir da interação entre uma bobina fixa e uma bobina giratória.

### Indução Eletromagnética:



zero.

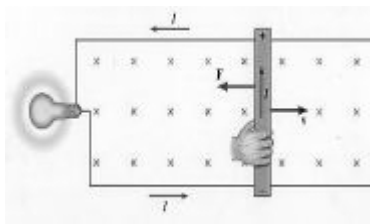
Para gerar uma corrente elétrica, não precisamos dispor de uma pilha ou de uma bateria. Podemos fazê-lo utilizando um ímã.

Para demonstrar isso, vamos inicialmente ligar os extremos de uma bobina a um amperímetro de grande sensibilidade. Uma vez que inexistente gerador de tensão nesse circuito, não há qualquer passagem de corrente, e o ponteiro do instrumento indica intensidade

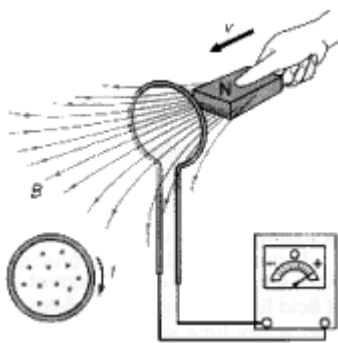
Se, porém, aproximarmos da bobina um dos pólos de um ímã, o ponteiro do amperímetro sofrerá um desvio, revelando que uma corrente percorre o circuito. Quando o ímã pára, o ponteiro retorna a zero, assim permanecendo enquanto o ímã não voltar a se mover. Pudemos, portanto, criar uma corrente nesse circuito sem usar pilhas, baterias ou outros dispositivos semelhantes. As correntes que geramos recebem o nome de correntes induzidas, e esse fenômeno é chamado indução eletromagnética.

### Lei de Lenz:

A relação entre o sentido da corrente elétrica induzida em um circuito fechado e o campo magnético variável que a induziu foi estabelecida pelo físico russo Heinrich Lenz. Ele observou que a corrente elétrica induzida produzia efeitos opostos a suas causas. Mais especificamente, Lenz estabeleceu que o sentido da corrente elétrica induzida é tal que o campo magnético criado por ela opõe-se à variação do campo magnético que a produziu. Em outras palavras, para gerar uma corrente induzida, é necessário gastar energia.



Vamos considerar um circuito fechado na forma de uma espira retangular, como a figura ao lado. Imagine que esse circuito esteja imerso num campo magnético uniforme. Se deslocarmos a espira para a direita, o fluxo magnético que ela intercepta aumentará, pois a própria área da espira aumentará e essa variação gerará uma corrente induzida nessa espira.



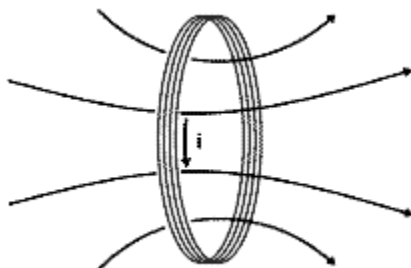
O sentido da corrente induzida na espira é tal que o campo magnético criado por ela tende a deter a aproximação da espira, ou seja, sentido anti-horário.

Afastando-se a espira, obtém-se o efeito inverso: diminui-se o número de linhas de campo que atravessam a espira. Nessa situação também será induzida uma corrente elétrica na espira, com um sentido tal que o campo magnético criado por ela procura "impedir" o afastamento da espira, ou seja, sentido horário.

O sentido da corrente elétrica induzida, previsto pela lei de Lenz, indica que, para obtermos corrente elétrica na espira, temos que vencer uma certa resistência, ou seja, temos que realizar um trabalho. Na espira temos a transformação de energia mecânica (movimento do ímã), como o da figura ao lado, em energia elétrica (corrente na espira).

### Auto-Indução:

Seja uma bobina de  $N$  espiras circunscrita por uma corrente  $i$  conforme Fig 6. As formulações da lei



de Ampère na página anterior permitem concluir que, em cada ponto, o campo magnético produzido é proporcional à corrente  $i$ . Portanto, o fluxo também será. E pode-se escrever:  $F_i = k i$ . Onde  $k$  é o fator de proporcionalidade e  $F_i$  é o fluxo produzido pela corrente  $i$ . Se a corrente  $i$  varia, o fluxo magnético produzido  $F_i$  também varia e, conforme lei de Faraday, uma força eletromotriz será induzida na bobina. Isto se chama **auto-indução** e a fem correspondente é dita **força eletromotriz auto-induzida**, simbolizada por  $V_L$ .

E, para a bobina de  $N$  espiras da figura, pode-se calcular:  $V_L = -N \frac{dF_i}{dt} = -(kN) \frac{di}{dt}$ . Fazendo  $kN = L$ ,  $V_L = -L \frac{di}{dt}$ . O fator  $L$  é denominado **indutância** da bobina e a unidade adotada é o

**Henry (H)**, correspondendo a  $1 \text{ V s} / \text{A}$  (homenagem a Joseph Henry). **Indutor** é o nome genérico para o componente que apresenta indutância.

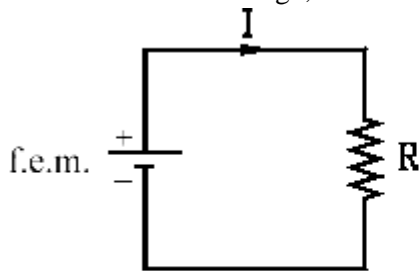
Notar o sinal negativo na fórmula da indutância. Isto significa que a força eletromotriz auto-induzida produz uma corrente que se opõe à **variação** da corrente aplicada.

### Analogia entre Circuitos Magnéticos e Elétricos

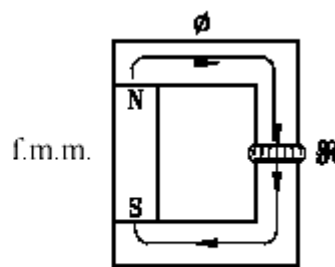
Um circuito elétrico de **resistência (R)**, ilustrado na figura a), é percorrido por uma **corrente (I)** de cargas elétricas movidas por uma **força eletromotriz (f.e.m.)**, segundo a lei de Ohm:

$$V = f.e.m. = R.I$$

De modo análogo, um circuito magnético de **relutância (R)**, ilustrado na figura b), é submetido a



a) Circuito Elétrico



b) Circuito Magnético

um **fluxo (φ)**, resultante da orientação dos dipolos magnéticos do material por ação de uma **força magnetomotriz**.

Enquanto cargas elétricas de fato percorrem o circuito elétrico, os dipolos magnéticos apenas modificam a sua orientação, sendo o fluxo magnético uma abstração para

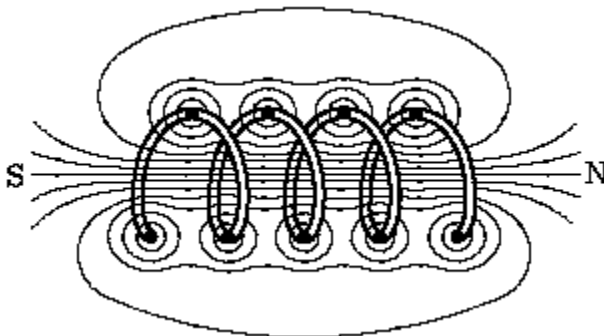
explicar como o efeito magnético se propaga através dos materiais.

A noção de **campo elétrico (E)** e **campo magnético (H)** é necessária para explicar a ação remota dos fenômenos eletromagnéticos, mesmo através do vácuo, onde não existem nem cargas nem A f.e.m. cria um campo elétrico devido à separação das cargas de polaridade diferente (Positiva e Negativa), resultando a corrente elétrica  $I$  no circuito condutor. A f.m.m., por sua vez, cria um campo magnético através da orientação dos dipolos magnéticos (Norte-Sul). Esse campo estabelece um fluxo magnético  $\phi$  porém não resulta em uma “corrente magnética”, daí a analogia entre circuito elétrico e circuito magnético não ser perfeita e a “lei de Ohm magnética” requerer devida interpretação.

Com o alinhamento dos dipolos, resultam as linhas de campo magnético através do meio, produzindo os enlaces que chamamos de fluxo magnético, responsável pela ação à distância sobre outros campos magnéticos.

O grande vínculo que acontece entre campos elétricos e magnéticos, decorre do fato de uma corrente de cargas elétricas em um circuito elétrico produzir um campo magnético associado, observação que foi feita pela primeira vez em 1820 por Oersted, durante uma aula de Física. Em 1831, Faraday verificou que, reversamente, um campo magnético variável era capaz de produzir uma força eletromotriz em um circuito elétrico submetido ao campo magnético. Da observação de Oersted conclui-se que podemos produzir campos magnéticos usando correntes elétricas. A força magnetomotriz resultante em uma bobina é proporcional à corrente e ao número (N) de espiras enlaçadas:

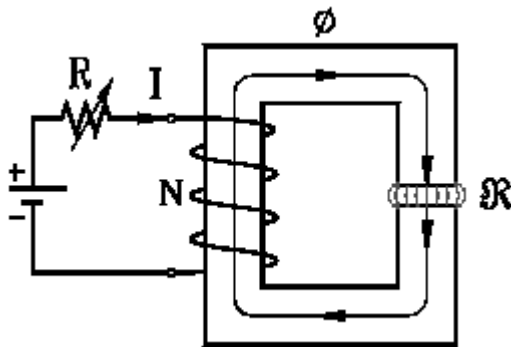
$$fmm = N.I = R.\phi$$



Uma f.m.m. apreciável pode ser produzida pela corrente elétrica percorrendo um solenóide com

muitas espiras, que concentra o campo magnético em seu interior, conforme mostrado na figura ao lado.

Com essa propriedade, podemos substituir o ímã da figura b por um eletroímã como fonte magnética, resultando o circuito eletromagnético seguinte:



no qual podemos controlar o fluxo magnético através da variação da corrente elétrica:

$d\phi / dt$  . f.e.m.

fecha-se o laço básico da conversão eletromagnética, representado pela figura 5.

**f.e.m. f.m.m.**

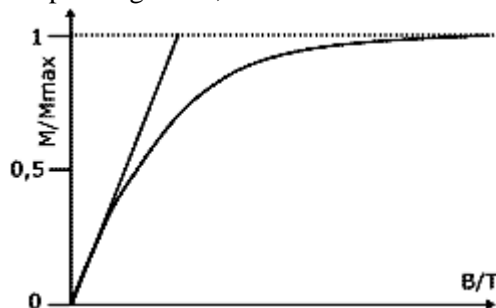
Todas as grandezas envolvidas (elétricas e magnéticas) são orientadas, o que significa que tanto o sentido da corrente como o sentido do fluxo são prefixados pela orientação das forças eletro ou magnetomotrizes. Verifica-se que o laço se fechou através de uma relação diferencial entre fluxo e f.e.m., expressando taxa de variação no tempo.

### Tipos de materiais magnéticos:

Átomos podem ser considerados ímãs. Os elétrons têm um movimento de rotação próprio (spin) e giram em torno do núcleo, formando pequenos dipolos magnéticos. Diferentes materiais podem apresentar comportamentos magnéticos diferentes devido ao modo de interação desses dipolos elementares com o campo magnético e com os dipolos vizinhos.

### Paramagnetismo:

Nos materiais **paramagnéticos** os dipolos elementares são permanentes e, na presença de um campo magnético, tendem a se alinhar com o mesmo, mas o alinhamento perfeito é impedido pelo



movimento térmico. Até certo ponto, a magnetização  $M$  do material varia linearmente com o campo magnético aplicado  $M$  e a temperatura  $T$  segundo a lei de Curie:  $M = C B / T$ . Onde  $C$  é uma constante.

Na Figura ao lado, a reta representa a lei de Curie e a curva a variação real. Tende portanto a um valor de saturação.

Desde que os dipolos tendem a se alinhar, a suscetibilidade magnética é positiva, mas de valor bastante baixo. Em geral,  $1 \cdot 10^{-5} < X_m < 1 \cdot 10^{-3}$ . Sob ação de um campo magnético forte, um material paramagnético se torna um ímã, mas a magnetização desaparece com a remoção do campo.

**Diamagnetismo:**

Nos materiais **diamagnéticos** os dipolos elementares não são permanentes. Se um campo magnético é aplicado, os elétrons formam dipolos de acordo com a lei de Lenz, isto é, eles se opõem ao campo atuante. Assim, o material sofre uma repulsão. Mas é um efeito muito fraco.

Na realidade, todas as substâncias apresentam algum diamagnetismo, mas o fenômeno é tão fraco que é mascarado pela ação dos dipolos permanentes naqueles que os têm (paramagnéticos e ferromagnéticos).

Por sofrerem repulsão, a suscetibilidade magnética desses materiais é negativa, com valores bastante baixos ( $-1 \cdot 10^{-5} < X_m < -1 \cdot 10^{-4}$ ).

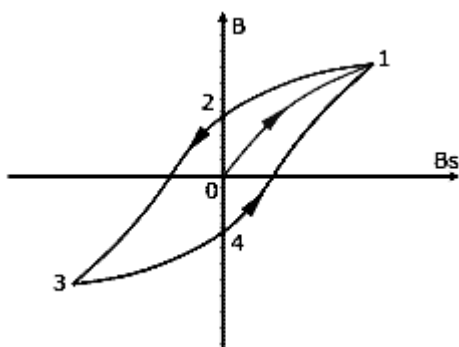
**Ferromagnetismo:**

Nos materiais **ferromagnéticos** os dipolos elementares são permanentes e, aparentemente, se alinham na direção de um campo magnético aplicado, resultando elevados níveis de magnetização. A suscetibilidade magnética pode ser chegar a valores na faixa de 100000.

A explicação do fenômeno envolve conceitos quânticos que não são do escopo desta página. De maneira resumida, pode-se dizer que os dipolos formam regiões distintas chamadas domínios. Em cada domínio, os dipolos têm o mesmo alinhamento. Entretanto, os alinhamentos dos domínios podem estar distribuídos aleatoriamente, resultando magnetização nula. Sob ação de um campo magnético, os domínios de alinhamentos próximos aos do campo tendem a aumentar, com o sacrifício dos de alinhamentos distantes. Nestes últimos ocorre também a tendência de mudança dos alinhamentos para direções mais próximas da do campo aplicado. Tudo isso produz uma considerável magnetização.

Quando o campo é removido, os domínios alterados tendem a se fixar, produzindo **ímãs permanentes**.

A magnetização cessa acima de certa temperatura, chamada **temperatura de Curie**. Nos materiais ferromagnéticos, a relação entre a indução magnética B e a intensidade de campo magnético H não é linear, diferente da consideração do tópico anterior.



A variação positiva do campo aplicado produz curva de magnetização diferente da variação negativa. Isto é chamado **histerese**.

No gráfico da Fig 12,  $B_s$  é o campo aplicado, produzido por um solenóide pelo qual passa uma corrente variável. E B é o campo no material. Considera-se que o material, inicialmente, não está magnetizado. A corrente aplicada varia de zero até o valor correspondente ao ponto 1, resultando a curva verde. Reduzindo a corrente a zero, a variação segue a curva 1-2. Invertendo o sentido da corrente até um valor oposto ao do ponto 1, a curva é 2-3. E a curva 3-4-1 é o retorno à condição

do ponto 1. Notar que nos pontos 2 e 4 a corrente é nula mas a magnetização não. Isso significa que foram formados ímãs permanentes.

O ferromagnetismo ocorre nos elementos ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e em ligas desses e de outros elementos.

**Propriedades magnéticas dos materiais**

Existem algumas restrições importantes que devem ser observadas na analogia entre circuitos elétricos e magnéticos:

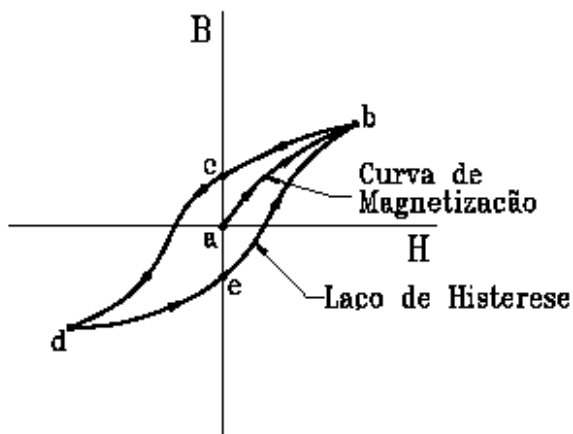
\* a **condutividade elétrica** do meio pode variar desde quase zero (materiais dielétricos) até quase infinito (materiais supercondutores).

\* a **permeabilidade magnética** relativa do meio varia muito menos (de 1, para o vácuo, até da ordem de 10.000, para materiais ferromagnéticos).

Isto significa que se pode confinar a corrente elétrica ao circuito condutor, usando materiais isolantes, porém não se consegue evitar que uma parte do fluxo magnético escape do circuito magnético, pois não se conhece isolantes magnéticos. Essa fuga de fluxo do circuito principal é chamada **dispersão magnética** que, em geral, causa efeitos indesejáveis devido ao acoplamento e interferência com circuitos próximos. Essa é uma razão para se definir o vetor **densidade de fluxo B**, que pode variar de ponto para ponto em meios não homogêneos.

Uma outra característica, que ocorre justamente nos melhores condutores magnéticos (materiais ferromagnéticos), é a **saturação magnética** que faz com que seja necessário utilizar circuitos magnéticos (núcleos) superdimensionados, ao contrário dos circuitos elétricos, onde se pode utilizar condutores finos que admitem elevadas densidades de correntes e requerem pequenas seções transversais. A saturação do caminho magnético, por sua vez, aumenta a dispersão, piorando as características magnéticas globais e gerando não-linearidade nas relações magnéticas.

Além da saturação e da dispersão, a característica de magnetização dos materiais ferromagnéticos apresenta o fenômeno da **histerese**, o que significa que a reversão do processo (magnetização contrária) requer energia para a desmagnetização. Isto representa perdas magnéticas em circuito de corrente alternada. Sob fluxos variáveis, o núcleo ferromagnético pode apresentar também perdas devido às correntes parasitas ou de Foucault, que são induzidas no núcleo.



$\phi$  - fluxo magnético [Wb]

H - intensidade do campo [A/m]

$B = \mu H$  - densidade do fluxo [T] ( $\text{Wb/m}^2$ )

$\mu = \mu_r \mu_0$  - permeabilidade do meio [H/m]

$\mu_0$  - permeabilidade do vácuo [H/m]

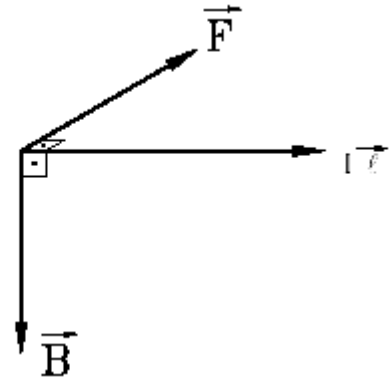
### Produção de Força Eletromagnética

Uma vez que Faraday mostrou que a variação de fluxo magnético consegue separar cargas elétricas em um circuito elétrico enlaçado por esse fluxo, é de se esperar que haja transferência de energia para esse circuito, já que a f.e.m. induzida provoca corrente elétrica no circuito fechado e o produto tensão x corrente dá potência elétrica. Mais ainda, sabendo-se que a potência elétrica pode ser convertida em calor e/ou trabalho, e, assumindo que as perdas no circuito considerado sejam desprezíveis, a energia transferida deve aparecer como trabalho correspondente. Como é que se dá esse processo ?

A análise desse problema foi feita originalmente por Ampère, que determinou a força (F) que atua sobre um condutor de comprimento (l), percorrido por uma corrente (I) e submetido a um campo magnético com densidade (B), chegando ao produto vetorial que relaciona a intensidade e a direção das variáveis envolvidas:

$$\vec{F} = I(\vec{\ell} \times \vec{B})$$

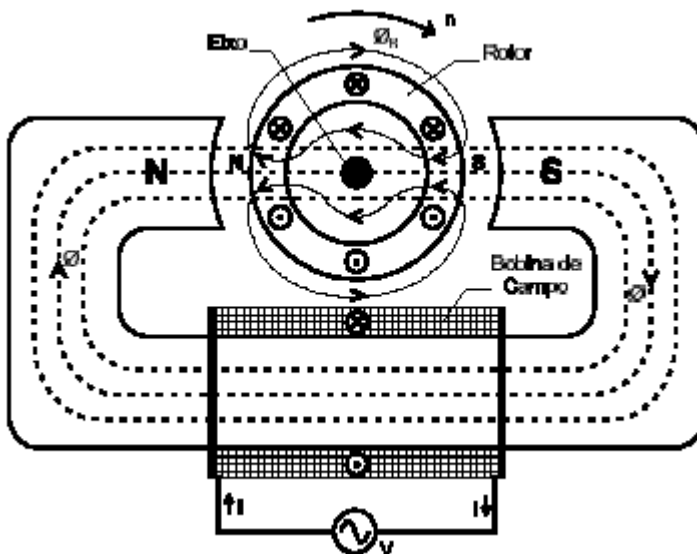
onde  $\vec{\ell}$  (comprimento do condutor) está orientado no sentido da corrente.



onde

$l$  (comprimento do condutor) está orientado no sentido da corrente.

Força magnetomotriz	$\mathfrak{F} = \text{f.m.m.} = N.I$	[A] (A.esp)
Fluxo magnético	$\phi = B.A$	[Wb]
Densidade de fluxo magnético	$B = \mu.H$	[T] (Wb/m <sup>2</sup> )
Intensidade de campo magnético	$H = N.I / \ell$	[A/m]



### Fluxo magnético em um motor

O campo magnético variável no estator, conforme a figura ao lado, induz correntes senoidais nos condutores da gaiola do rotor. Estas correntes induzidas, por sua vez, criam um campo magnético no rotor que se opõe ao campo indutor do estator (Lei de Lenz). Como os pólos se mesmo nome se repelem, então há uma força no sentido de giro no rotor. O rotor gira com uma velocidade nominal. As forças que atuam nas barras curto-circuitadas se opõem uma à outra, impedindo o giro de início. Assim este tipo de motor necessita de um artifício para a partida o que é feito pelo uso de

um segundo enrolamento usado somente para este fim, chamado enrolamento de partida. Observe que entre o ferro do estator e o ferro do rotor há um espaço que é chamado de entreferro. Como a Relutância do entreferro é muito maior que a do ferro, praticamente o entreferro define a magnitude do fluxo, para uma da força magnetomotriz.

Todos os motores têm entreferro, pois sempre deve haver um espaço entre o estator e o rotor.

## 2. Conversão Eletromecânica de Energia Elétrica

Na natureza a energia se encontra distribuída sob diversas formas, tanto energia mecânica, térmica, luminosa e outras formas; no entanto a energia mecânica é a mais conhecida forma de energia e na qual o

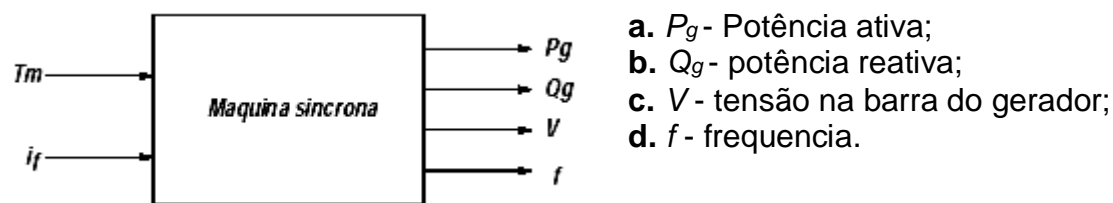
homem tem mais domínio. A energia mecânica, tal como ela está disponível na natureza é de difícil utilização prática, além de ser uma energia variável no tempo. Então, converte-se a energia mecânica em Energia Elétrica através das Máquinas Elétricas conhecidas como **geradores**. A energia elétrica possui as vantagens de ser uma energia limpa, de fácil transporte e de fácil manuseio, podendo ser reconvertida em energia térmica, luminosa, eletromagnética, e também em energia mecânica. Quem efetua esta última transformação são as Máquinas Elétricas conhecidas como **motores**.

Então, o **motor** é um elemento de trabalho que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação. Já o **gerador** é uma máquina que converte energia mecânica de rotação em energia elétrica.

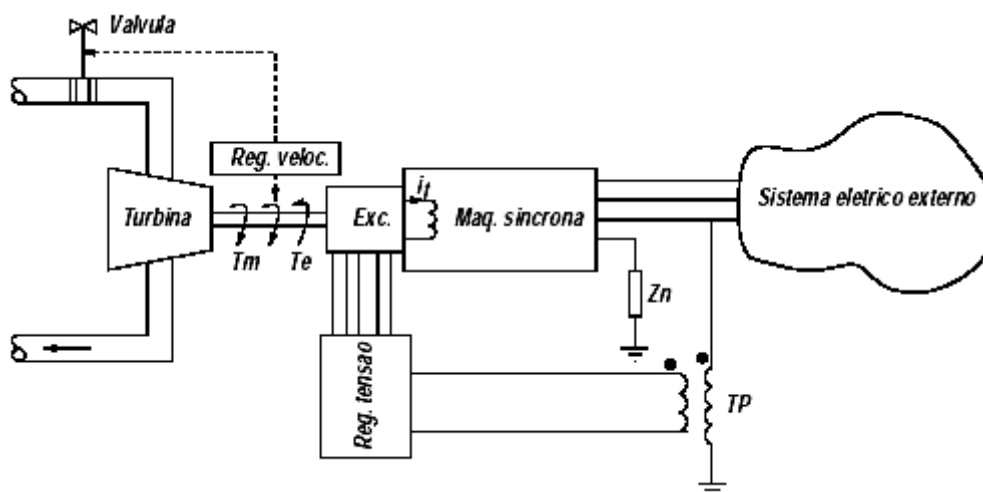
Há ainda um terceiro conjunto de máquinas elétricas que são os transformadores que não convertem energia, mas sim níveis de tensão em corrente num valor e outro.

### Geradores:

Geradores de CA destinam-se basicamente ao suprimento de potência num sistema elétrico. No Brasil boa parte da energia elétrica consumida provém usinas hidrelétricas instaladas em quedas d'água. Elas são basicamente máquinas síncronas, como a da figura abaixo:



Observe que a máquina síncrona envolve várias grandezas como frequência, potência ativa e reativa, tensão na barra, corrente de campo  $i_f$ , Torque mecânico  $T_M$ , o que exige um controle complexo. Assim sendo, uma usina envolve além do gerador um complexo conjunto de equipamentos mecânicos, elétricos e eletrônicos para seu funcionamento. Uma unidade básica de geração está ilustrada na figura abaixo:

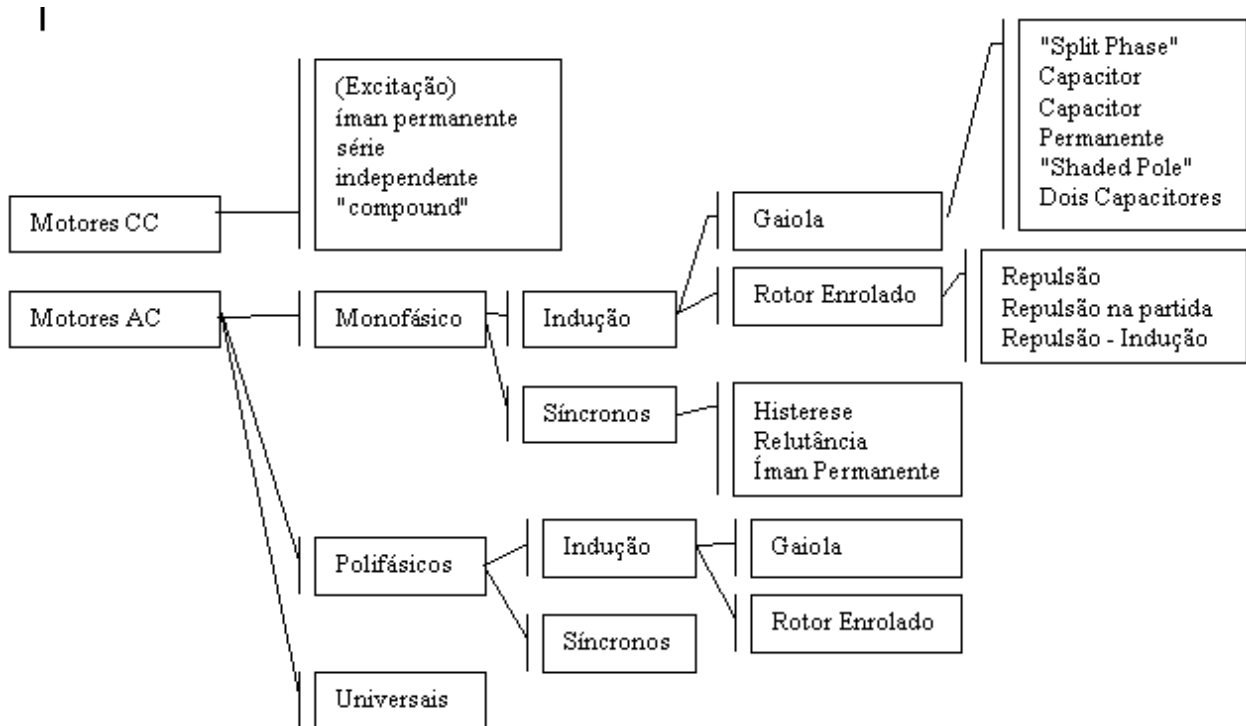


É possível gerar energia através de outros meios como as termelétricas que aquecem a água e trabalham com vapor a alta pressão, ou term nuclear.

Hoje em dia utiliza-se os geradores acionados por motor à diesel em unidades industriais para a geração de emergência. Geradores CC eram utilizados para a geração de CC para motores CC e excitatrizes de geradores CA. Com o avanço da eletrônica de potência, ficaram em segundo plano.

**Motores:**

Para a Mecatrônica, o interesse maior está nos motores alimentados em CC ou CA, em virtude das aplicações dos mesmos nas máquinas industriais. Podemos classificar os motores conforme o quadro abaixo:

**3. Sistemas Elétricos de Potência:**

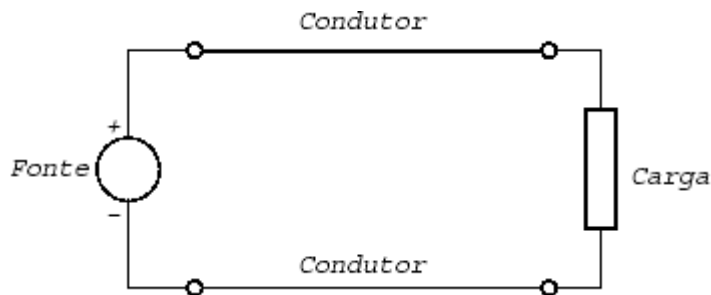
**Circuito elétrico:** um conjunto de corpos ou de meios no qual pode haver a passagem da corrente elétrica.

**Sistema elétrico:** é um circuito ou conjunto de circuitos elétricos inter-relacionados, constituídos para atingir um determinado objetivo.

**Instalação elétrica:** é o conjunto de componentes elétricos associados e coordenados entre si, constituindo para uma determinada finalidade.

Pelas definições, conclui-se que um **sistema elétrico** se constituído essencialmente por componentes elétricos que conduzem (ou podem conduzir) correntes, enquanto que uma **instalação elétrica** inclui também componentes elétricos que não conduzem correntes, porém são essenciais ao seu funcionamento, tais como condutos, caixas, estrutura de suporte, painéis, etc.

Um sistema elétrico pode ser representado por esquemas como a Figura 1, que ilustra um esquema de um sistema elétrico elementar.



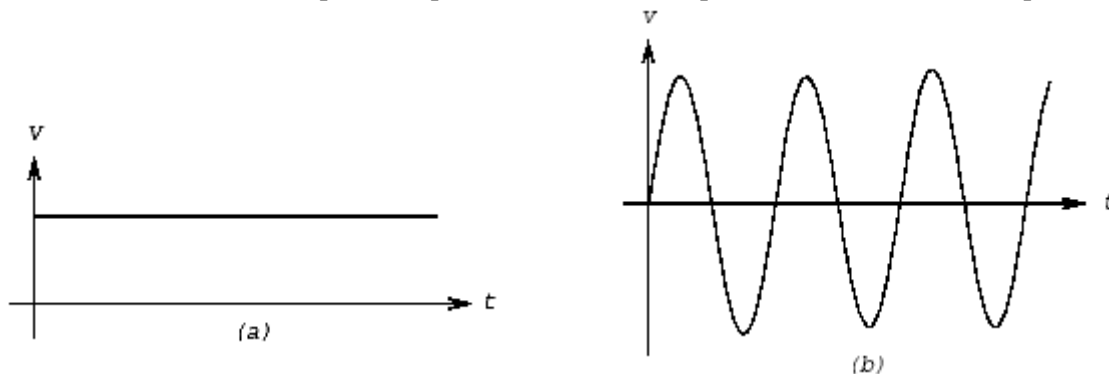
Pela Figura acima, vemos que um sistema elétrico possui três elementos básicos: **a fonte, o condutor e a carga**. A fonte pode ser de corrente contínua ou de corrente alternada. O condutor é o componente feito de material bom condutor de eletricidade (normalmente de cobre) que tem a finalidade de transportar a energia elétrica da fonte até a carga. A carga é todo o componente que necessita da eletricidade para desempenhar uma determinada função. A lâmpada, o chuveiro, o computador, o motor, etc., são tipos de cargas.

### Corrente Contínua e Corrente Alternada

Basicamente temos dois tipos de fontes: a corrente contínua e a corrente alternada. As Figuras (a) e (b) mostram graficamente os dois tipos.

Como mostra a Figura (a) a corrente contínua praticamente se mantém constante com o tempo.

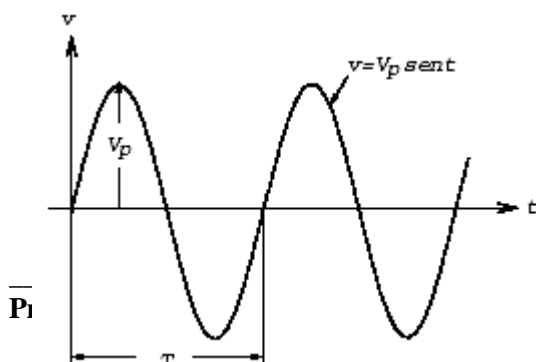
A fonte de corrente contínua mais comum é a pilha, que tem pequena capacidade (por exemplo, para serem utilizadas em rádios, gravadores, toca-fitas, relógios, brinquedos, etc.). Quando se necessita de capacidade maior utiliza-se a bateria (que na verdade é formado por um conjunto de pilhas). As motos, os automóveis, os caminhões, por exemplo, utilizam a bateria para o seu funcionamento (partida, iluminação,



sinalização). Existem outras maneiras de se obter a corrente contínua, utilizando-se o retificador ou gerador de corrente contínua.

A corrente alternada tem uma utilização muito mais intensa. Nas residências, nos prédios, nas indústrias, nas fazendas etc., todos os sistemas de iluminação e de força motriz dependem da corrente alternada. Assim sendo, daqui para frente vamos falar mais da corrente alternada (CA).

A corrente alternada, conforme mostra a Figura (b), varia ciclicamente de intensidade, atingindo valores máximos e mínimos alternadamente, obedecendo uma função senoidal. Vamos definir algumas grandezas de corrente alternada, baseando-se na Figura abaixo.

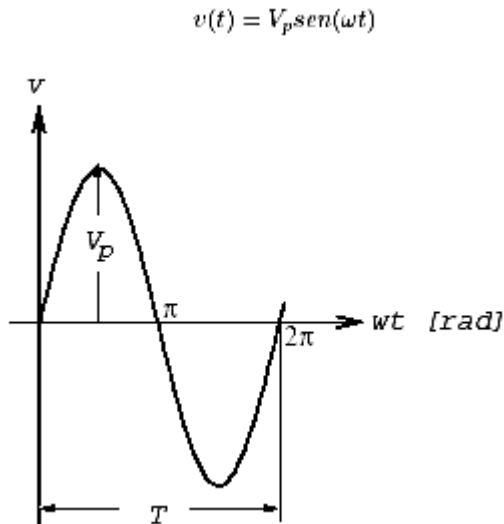


- **Ciclo:** é o conjunto completo de valores positivos e negativos que se repetem em intervalos de tempos iguais.
  - **Período:** é o intervalo de tempo ( $T$ ) em que ocorre um ciclo.
  - **Frequência:** é o número de ciclos por segundo.
- A equação acima relaciona o período a frequência.

$$T = \frac{1}{f}$$

- **Valor de pico:** é o valor instantâneo máximo que a forma de onda atinge no ciclo.

**Velocidade angular ou frequência angular:** a Figura abaixo mostra a forma de onda da tensão senoidal variando em função do ângulo:



Um ciclo completo ocorre entre  $t = 0$  e  $t = 2\pi$  radianos. Assim, se  $T$  é o período da tensão  $v(t)$ , tem-se:

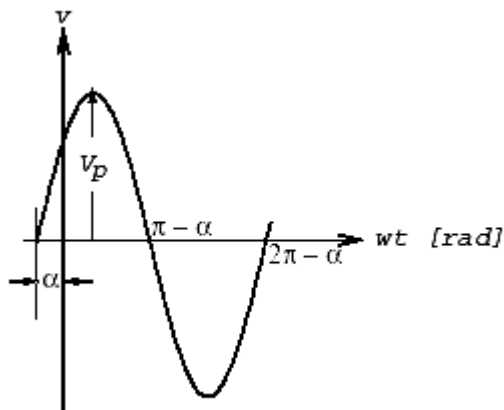
$$\omega T = 2\pi$$

ou

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

que é a velocidade angular ou frequência angular da tensão  $v(t)$ .

- **Fase:** é um ângulo arbitrário definido para a forma de onda de modo a estabelecer um referencial de tempo para ela. A forma de onda de tensão representada por:



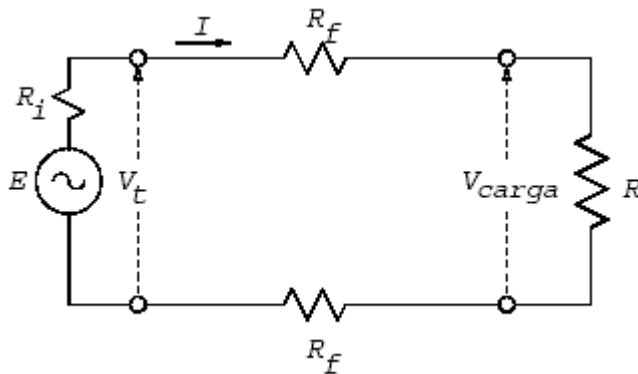
$$v(t) = V_p \text{sen}(\omega t + \alpha)$$

No instante  $t = 0$  o valor instantâneo da tensão é:

$$v(0) = V_p \text{sen}(\alpha)$$

**Valor eficaz:** seja corrente alternada de um certo valor de pico  $V_p$ , o valor eficaz corresponde à um valor contínuo equivalente em potência. No caso de senóides, temos que:

Seja um sistema elétrico como o da figura abaixo:



Temos que a tensão terminal  $V_T$  e a tensão sobre a carga  $V_{carga}$  são respectivamente:

$$V_T = E - IR_i$$

$$V_{carga} = E - IR_i - 2IR_f$$

Cada grandeza elétrica possui a sua unidade e o seu respectivo símbolo, dados na Tabela abaixo:

Grandeza	Unidade	Símbolo
Tensão	Volt	V
Corrente	Ampere	A
Resistência	Ohm	$\Omega$
Potência	Watt	W
Frequência	Hertz	Hz

### Componentes Elétricos:

Já vimos que a *resistência* é a propriedade de um circuito elétrico se opor ao fluxo de corrente elétrica e está associada à dissipação de energia.

Neste tópico vamos discutir outras duas propriedades de um circuito elétrico: a *capacitância* e a *indutância*, sendo que ambas estão associadas ao armazenamento de energia.

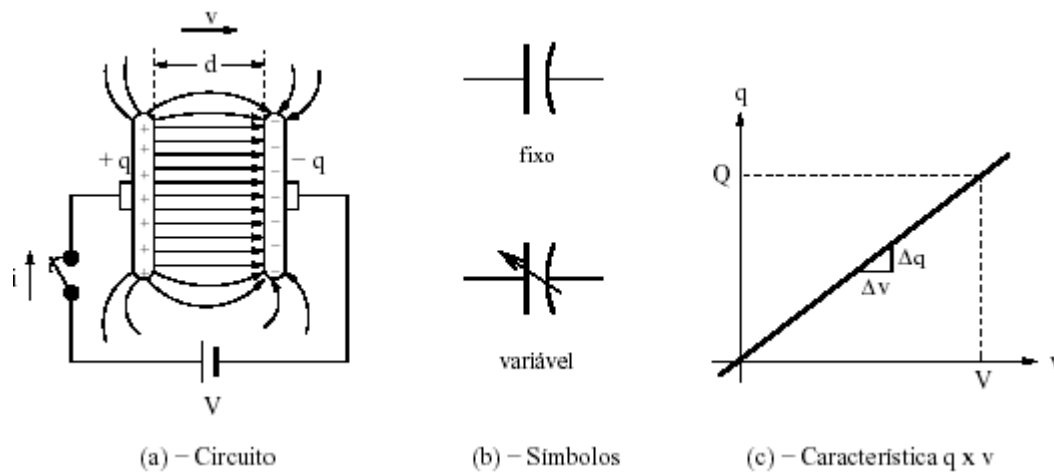
A *capacitância* é a propriedade de um circuito elétrico se opor a qualquer variação de tensão no circuito, enquanto que a *indutância* é a propriedade de um circuito elétrico se opor a qualquer variação da corrente no circuito.

Num circuito elétrico estes dois parâmetros podem existir naturalmente. Para citar um exemplo, uma linha de transmissão de alta tensão possui como características intrínsecas tanto a capacitância como a indutância (além da resistência, é claro).

Entretanto, existem componentes especificamente projetados e fabricados para possuírem tais propriedades: o *capacitor* e o *indutor*.

Considere as placas carregadas da Figura (a) abaixo, separadas por um material isolante, por exemplo o ar, e que a tensão  $E$  seja baixa o suficiente para não provocar a ruptura do isolante. Como indicada na Figura, a placa da esquerda se torna positivamente carregada, uma vez que o terminal positivo da fonte de tensão remove elétrons suficientes para equalizar a carga nesta parte do circuito. Da mesma forma, a placa da direita se torna negativamente carregada, uma vez que o terminal negativo da bateria fornece elétrons para ela. Assim entre as placas existe um campo elétrico, cujo caminho é representado pelas *linhas de força elétrica*. Estas linhas, por conveniência, possuem as seguintes características:

- possuem origem em uma carga positiva e terminam em uma carga negativa, e
- entram e saem perpendicularmente à superfície da carga.



Existe uma relação entre a tensão aplicada e a carga que aparece nas placas. Considere o capacitor inicialmente descarregado, isto é,  $q = 0$  e  $v = 0$ . Ao fechar a chave, as cargas vindas da fonte se distribuem nas placas, isto é, ocorre circulação de uma corrente. Inicialmente esta corrente  $i$  é alta, mas quanto mais cargas vão se acumulando, e portanto mais tensão desenvolvida entre as placas, estas cargas acumuladas tendem a se opor ao fluxo de novas cargas, até que se chega a  $v = V$ . Nesta situação cessa o fluxo de corrente.

Na Figura (a) a corrente, a carga e a tensão, representadas por letras minúsculas são valores instantâneos.

Se for traçado um gráfico de cargas acumuladas em função da tensão desenvolvidas entre as placas, será obtida uma relação linear, como mostrado na Figura (c). A constante de proporcionalidade que relaciona a carga e a tensão, isto é, a inclinação da reta, é definida como *capacitância* (C):

$$C = \frac{Q}{V}$$

A unidade de capacitância é coulomb por volt, que é definida como um *farad* (F). O farad é uma unidade muito grande para circuitos práticos; portanto, são utilizados valores de capacitâncias expressos em microfarads ( $10^{-6}$  farad,  $\mu F$ ) ou picofarads ( $10^{-12}$  farad, pF).

A capacitância pode ser expressa em função dos fatores geométricos e do dielétrico. Seja o exemplo de um capacitor com placas paralelas. Vamos definir duas grandezas: a *intensidade de campo elétrico* e a *densidade de fluxo elétrico* representadas respectivamente pelas Equações acima.

$$E = \frac{V}{d}$$

$$D = \frac{Q}{A}$$

A relação entre a *densidade de fluxo elétrico* e a *intensidade de campo elétrico* define a *permissividade absoluta* de um dielétrico, isto é:

$$\varepsilon = \frac{D}{E}$$

Assim, temos que a Capacitância é dada por:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

A Figura (b) mostra os símbolos de capacitores. A linha curva representa a placa que é ligada ao ponto de menor potencial da fonte. Capacitores comercialmente disponíveis são especificados pelo dielétrico utilizado e pela forma como ele é construído (fixo ou variável). Na prática quando o capacitor é submetido a um campo elétrico circula uma pequena corrente pelo dielétrico, conhecido como *corrente de fuga*. Esta corrente é geralmente muito pequena, que pode ser considerada desprezível. No modelo, deste efeito pode ser representado por um resistor de valor muito elevado (cerca de 10 M) em paralelo com o capacitor.

O *capacitor de cerâmica* consiste de um tubo ou disco de cerâmica de constante dielétrica na faixa de 10 a 10.000. Uma fina camada de prata é aplicada a cada lado do dielétrico. Este tipo de capacitor é caracterizado por baixas perdas, pequeno tamanho e uma conhecida característica de variação de capacitância com a temperatura.

O *capacitor de papel* consiste de folhas de alumínio e papel *kraft* (normalmente impregnado com graxa ou resina) enroladas e moldadas formando uma compacta. Os capacitores de papel são disponíveis na faixa de 0,0005  $\mu F$  a aproximadamente 2  $\mu F$ .

O *capacitor de filme plástico* é bastante similar ao capacitor de papel, na sua forma construtiva. Dielétricos de filme plástico, com poliéster ou polietileno, separam folhas metálicas usadas como placas.

O capacitor é enrolado e encapsulado em plástico ou metal.

O *capacitor de mica* consiste de um conjunto de placas dielétricas de mica alternadas por folhas metálicas condutoras. O conjunto é então encapsulado em um molde de resina fenólica.

O *capacitor de vidro* é caracterizado por camadas alternadas de folhas de alumínio e tiras de vidros, agrupadas até que seja obtida a estrutura do capacitor desejado. A construção é então fundida em um bloco monolítico com a mesma composição do vidro usado como dielétrico.

O *capacitor eletrolítico* consiste de duas placas separadas por um eletrólito e um dielétrico. Este tipo de capacitor possui altos valores de capacitância, na faixa de aproximadamente 1  $\mu F$  até milhares de  $\mu F$ . As correntes de fuga são geralmente maiores do que aos demais tipos de capacitores.

### Aplicações de Capacitores:

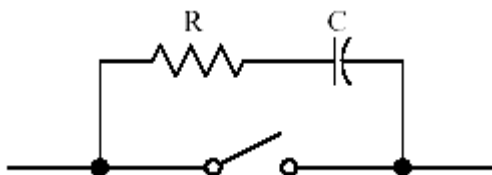
Capacitores são utilizados em circuitos de potência de CA para a correção de fator de potência e como defasadores para circuitos de partida em motores de indução monofásicos.

Em circuitos de CC, são utilizados em fontes de alimentação para a filtragem e em circuitos osciladores ou temporizadores. Também encontram aplicações em circuitos digitais.

Existem ainda aplicações especiais que exploram as propriedades da capacitância.

Por exemplo, a característica de armazenar energia faz do capacitor um dispositivo muito útil para a geração de uma corrente elevada num intervalo de tempo extremamente curto.

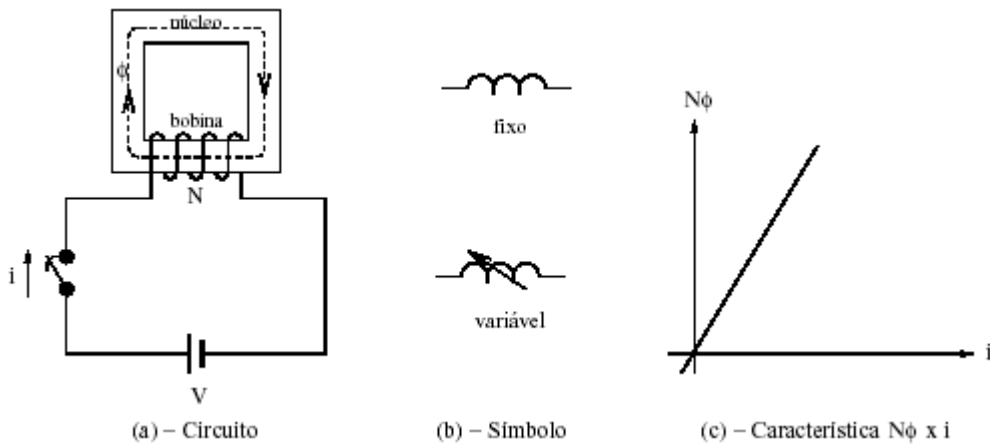
A capacidade de um capacitor se opor a qualquer variação de tensão o torna muito útil como supressores de arcos ou ruídos. Normalmente, quando uma chave é aberta, existe uma formação de arco nos contatos das chaves. Um capacitor conectado em paralelo com o contato, como na Figura ao lado, absorve a energia que causa o arco. O resistor R é necessário para evitar a soldagem dos contatos quando a chave for fechada e a descarga do capacitor.



### Indutor:

Considere a bobina da Figura (a) abaixo. Quando a chave é fechada, a corrente tende a crescer, causando o

aumento do fluxo. O crescimento da corrente não é instantâneo. Em outras palavras, uma *força-contratromotriz, fctem,* é induzida de forma a se opor ao crescimento da corrente.



Considerando-se o núcleo de ar, ou outros materiais não-magnéticos, a característica  $N \times i$  é linear.

O produto de  $N$  por  $\phi$  é denominado *fluxo concatenado* (representado por  $\lambda$ ). A constante de proporcionalidade que relaciona o fluxo concatenado e a corrente, isto é, a inclinação da reta, é definida como *indutância (L)*:

$$L = \frac{N\phi}{i}$$

A unidade de indutância é weber por ampere, que é definida como um *henry*.

Para o núcleo de material magnético a característica  $N \times i$  deixa de ser linear e na prática esta curva é representada em função da densidade de fluxo ( $B$ ) e intensidade de campo ( $H$ ).

As grandezas  $N$  e  $i$  se relacionam respectivamente com as grandezas  $B$  e  $H$ , conforme as Equações abaixo:

$$B = \frac{\phi}{A}$$

$$H = i \left( \frac{N}{l} \right)$$

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Sendo que:

$B$  = densidade de fluxo em tesla (T)

$\phi$  = fluxo em weber (Wb)

$A$  = área da seção reta do núcleo em  $m^2$

$H$  = intensidade de campo em *ampere-espira por metro*

$i$  = corrente em ampere

$N$  = número de espiras

$l$  = comprimento médio do núcleo em  $m$

Assim sendo, temos finalmente que:

$$L = \mu \left( \frac{AN^2}{l} \right)$$

### Aplicações de indutores:

São várias, mas podemos destacar bobinas de válvulas solenóides, contadores, relés, reatores de lâmpada, enrolamento de motores e geradores, transformadores, etc..

Praticamente tudo o que envolve campo magnético, envolve de alguma forma indutores.

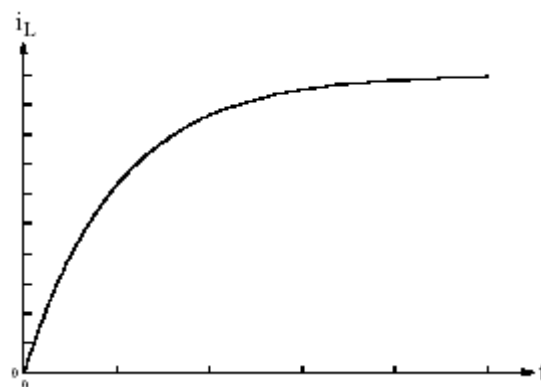
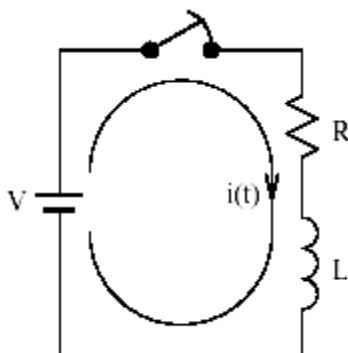
O chaveamento de indutores é o responsável pelo aparecimento dos arcos elétricos que danificam os contatos dos contadores e dos relés.

### Transitórios

Quando energizamos um circuito contendo indutores ou capacitores, durante os primeiros instantes de tempo a corrente e a tensão podem variar significativamente, buscando uma condição de equilíbrio. O tempo necessário para que esta condição de equilíbrio é chamado de **Transitório**. Encerrada a fase do transitório temos a fase do regime permanente, ou seja, a fase onde o circuito exibe o comportamento esperado do ponto de vista de tensão e corrente.

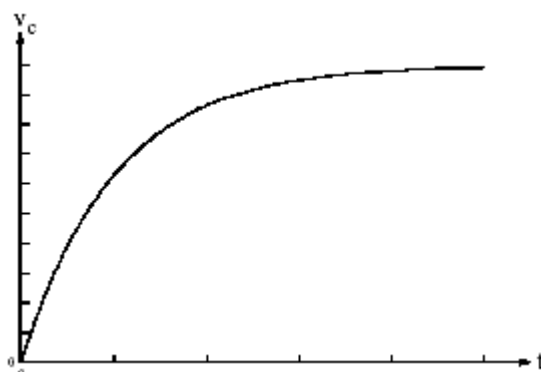
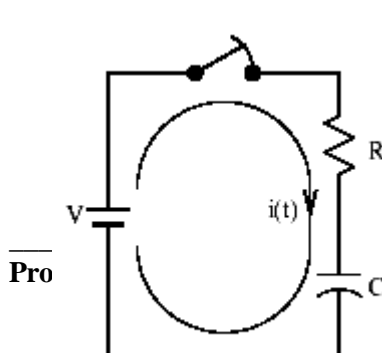
### Circuitos RL(Resistor e Indutor) em CC:

Num circuito RL como abaixo, temos que a corrente não pode subir instantaneamente ao ligar a chave do circuito. Isto ocorre porque a indutância se opõe a variações bruscas de corrente, gerando uma tensão nos terminais da bobina que se opõe a tensão da fonte, limitando a corrente. Esta tensão é a força-contratromotriz, e que na corrente contínua somente ocorre no transitório. Na fase de regime o indutor exibe apenas a resistência dos fios da bobina. Abaixo e à direita temos a evolução da corrente ao longo do tempo.



### Circuitos RC(Resistor e Capacitor) em CC:

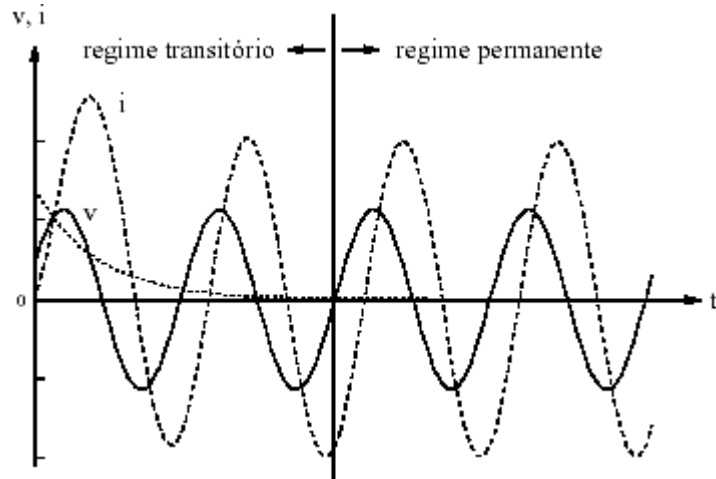
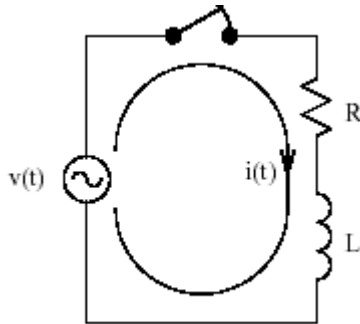
Num circuito RC como o da figura abaixo, a tensão sobre o capacitor não pode subir abruptamente quando a chave do circuito é fechada. Isto ocorre porque a capacitância se opõe a variações abruptas de tensão. Assim sendo, a tensão deve subir de forma gradual, até atingir a tensão da fonte, que é quando termina o transitório. Neste caso a corrente é impulsiva, isto é, elevada no início mas com decaimento gradual. Encerrado o transitório, a corrente será nula. Abaixo e à direita, temos a evolução da tensão sobre



o capacitor ao longo do tempo.

### Circuitos RL em CA:

Num circuito como abaixo, temos que no instante inicial da energização do circuito, surge uma corrente senoidal com um valor de pico um pouco mais elevada que a normal, e que retoma o valor correto após o transitório inicial.



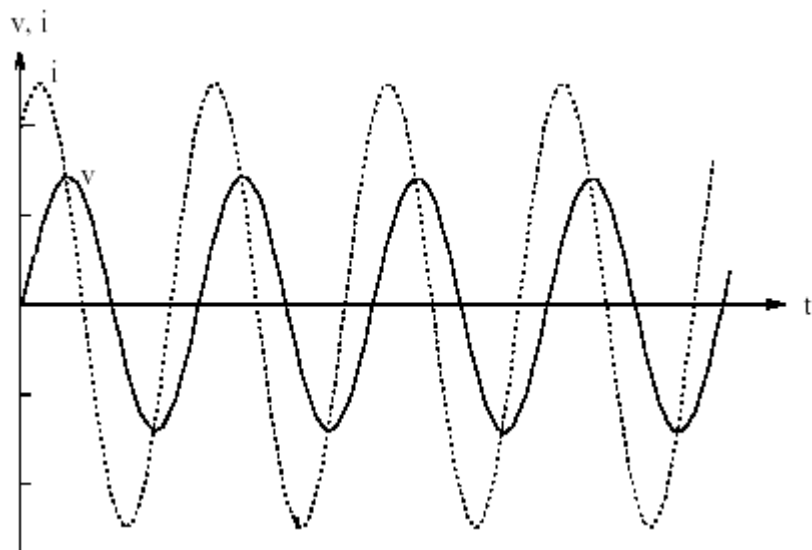
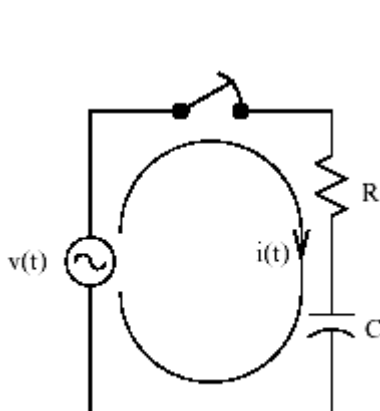
Encerrada o período do transitório, percebemos que se estabelece uma corrente senoidal com amplitude menor que a da tensão e com uma certa defasagem entre elas, sendo que a corrente está atrasada em relação à tensão. O valor da corrente e a defasagem dependem de R e de L. Assim, temos que a o valor corrente e a defasagem são dadas por:

$$i = \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

### Circuitos RC em CA:

Num circuito como abaixo, temos que no instante inicial da energização do circuito, surge uma corrente senoidal com um valor de pico um pouco mais elevada que a normal, e que retoma o valor correto após o transitório inicial.



Encerrada o período do transitório, percebemos que se estabelece uma corrente senoidal com amplitude menor que a da tensão e com uma certa defasagem entre elas, sendo que a corrente está adiantada em relação à tensão. O valor da corrente e a defasagem dependem de R e de C. Assim, temos que a o valor corrente e a defasagem são dadas por:

$$i = \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad \varphi = \arctan\left(\frac{-1}{\omega RC}\right)$$

### Impedância:

Em CC, tínhamos que a Lei de Ohm relacionava a tensão e a corrente pelo valor da resistência do circuito, sendo que o capacitor e o indutor tinham participações especiais apenas nas fases de transitório.

Entretanto em CA, temos que a Lei de Ohm somente relaciona a tensão e a corrente pelo valor da resistência quando o circuito é puramente resistivo, ou seja, quando não há indutâncias e nem capacitâncias. Quando se trata de um circuito RL ou RC, temos que as correntes devem ser calculadas pelas fórmulas apresentadas. Podemos verificar que as tensões e as correntes se relacionam segundo constantes que envolvem os valores da resistência, da indutância e da capacitância. A constante que relaciona a tensão e a corrente em CA é chamada de **impedância**, simbolizada pela letra **Z** e medida em Ohms:

$$\hat{Z} = \frac{\hat{V}}{\hat{I}}$$

No nosso caso, temos para o circuito RL e RC as seguintes impedâncias:

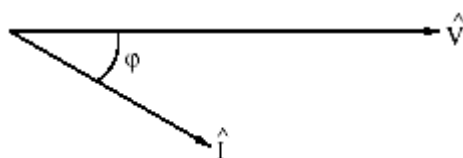
$$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \text{ e } \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Note que a impedância compõem-se da soma da resistência ao quadrado mais um outro termo que depende da frequência e depende de L e de C respectivamente. Estes termos são chamados de **reatância indutiva**  $X_L$  e **reatância capacitiva**  $X_C$  respectivamente, sendo que ambas são medidas em Ohms e definidas pelas fórmulas abaixo:

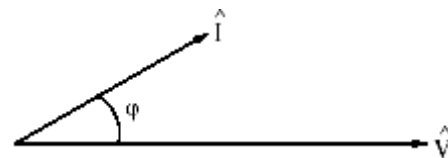
$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

Pela fórmula, percebe-se que a reatância indutiva aumenta com a frequência enquanto que a reatância capacitiva diminui com a frequência.

Do ponto de vista fasorial, pode-se verificar que a capacitância adianta a corrente enquanto que a indutância atrasa a corrente, como verifica-se no gráfico abaixo:



Circuito RL



Circuito RC

Observe ainda, que caso a indutância L e a capacitância C fossem nulas, ou seja, o circuito fosse puramente resistivo, a impedância seria igual a resistência, ou seja,  $Z=R$ . Assim sendo, temos que a impedância é um conceito mais geral que o de resistência.

**Ressonância:**

Vimos que um circuito RL e RC tem comportamentos antagônicos no que tange a defasagem (o capacitor adianta a corrente e o indutor atrasa) e a frequência (a reatância capacitiva diminui com a frequência, a indutiva aumenta com aquela). Assim sendo, se tivermos indutores e capacitores num mesmo circuito formando assim um circuito RLC, teremos um comportamento tal que a reatância capacitiva tenderá cancelar a reatância indutiva.

No caso, uma das duas reatâncias irá predominar, e será exatamente a que tiver maior módulo. Portanto, embora o circuito seja RLC, o circuito se “comportará” como um circuito RL ou RC, dependendo da resistência predominante. Entretanto, o valor da reatância em questão, será a resultante da diferença entre as duas reatâncias.

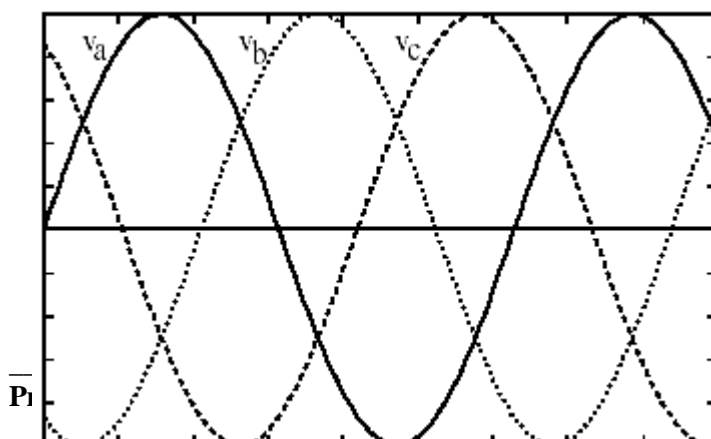
Ocorre que pode ocorrer uma situação em que a reatância indutiva é igual, em módulo, a reatância capacitiva, desta forma não temos uma reatância predominante, e o circuito se comporta como puramente resistivo. É o fenômeno da ressonância. A frequência em que o fenômeno da ressonância ocorre é chamada de frequência de ressonância.

Na ressonância de circuitos RLC série, temos que a corrente será máxima e limitada apenas pelo valor da resistência. Assim sendo, as tensões desenvolvidas sobre o capacitor e o indutor serão máxima e de polaridade oposta. Ocorre que dependendo do valor da resistência, a tensão sobre o capacitor ou indutor poderá ser bem maior que a própria tensão da fonte, ou seja, poderá haver uma sobretensão nos componentes do sistema, quando em ressonância. Assim sendo, a ressonância em sistemas de potência, corresponde a uma situação que deve ser evitada a todo custo, dado o risco a integridade dos componentes do sistema.

**Sistema trifásico**

As chamadas **ligações monofásicas e bifásicas** são utilizadas em grande escala na iluminação, pequenos motores e eletrodomésticos. Nos níveis da geração, transmissão e utilização da energia elétrica para as industriais utiliza-se quase que exclusivamente as **ligações trifásicas**. Os geradores síncronos são trifásicos e são projetados de tal forma que as tensões geradas sejam senoidais e simétricas, isto é, tensões de módulos iguais e defasadas entre si de  $2\pi$  radianos.

As **tensões de fase** são referidas a um ponto comum chamado neutro (n), que pode estar aterrado (potencial zero) ou não. Assim, as tensões de fase podem ser formalizados pelas equações que se seguem:



$$v_{an} = V_p \text{sen}(\omega t)$$

$$v_{bn} = V_p \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

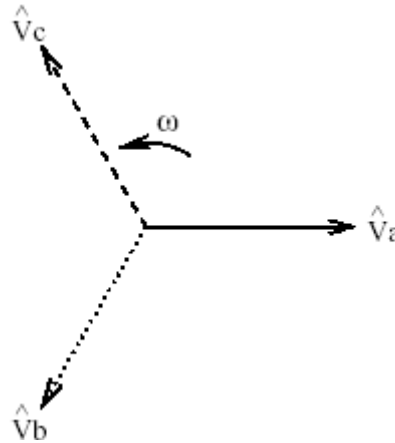
$$v_{cn} = V_p \text{sen}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

**Representação Fasorial:**

$$\hat{V}_{an} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} e^{-j0} = V_{ef} \angle 0^\circ$$

$$\hat{V}_{bn} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = V_{ef} \angle -120^\circ$$

$$\hat{V}_{cn} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{4\pi}{3}} = V_{ef} \angle -240^\circ$$



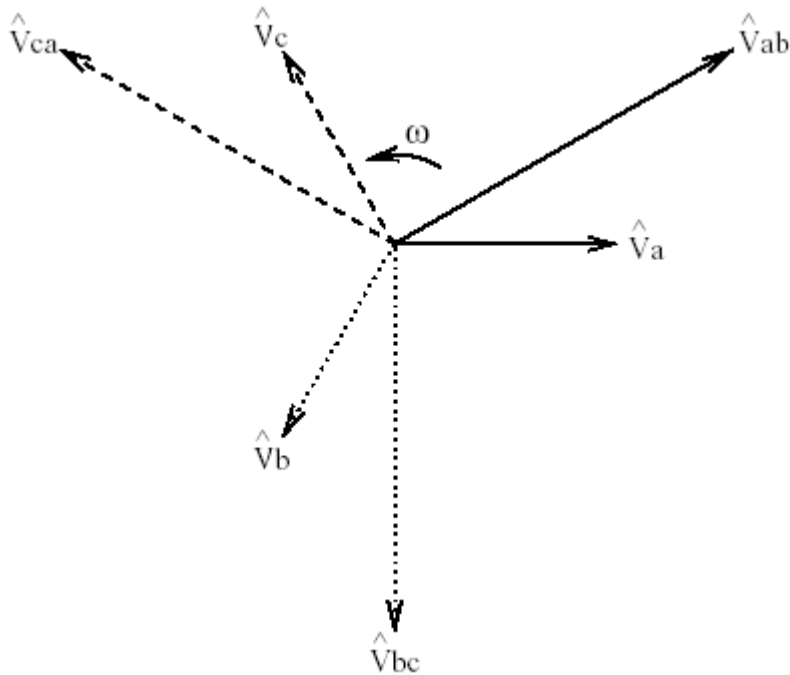
As **tensões de linha** são definidas pelas equações:

$$\hat{V}_{ab} = \hat{V}_{an} - \hat{V}_{bn} = (V_{ef} \angle 0^\circ - V_{ef} \angle -120^\circ) = \sqrt{3} V_{ef} \angle 30^\circ$$

$$\hat{V}_{bc} = \hat{V}_{bn} - \hat{V}_{cn} = (V_{ef} \angle -120^\circ - V_{ef} \angle -240^\circ) = \sqrt{3} V_{ef} \angle -90^\circ$$

$$\hat{V}_{ca} = \hat{V}_{cn} - \hat{V}_{an} = (V_{ef} \angle -240^\circ - V_{ef} \angle 0^\circ) = \sqrt{3} V_{ef} \angle -210^\circ$$

**Representação Fasorial das Tensões de linha e Fase:**

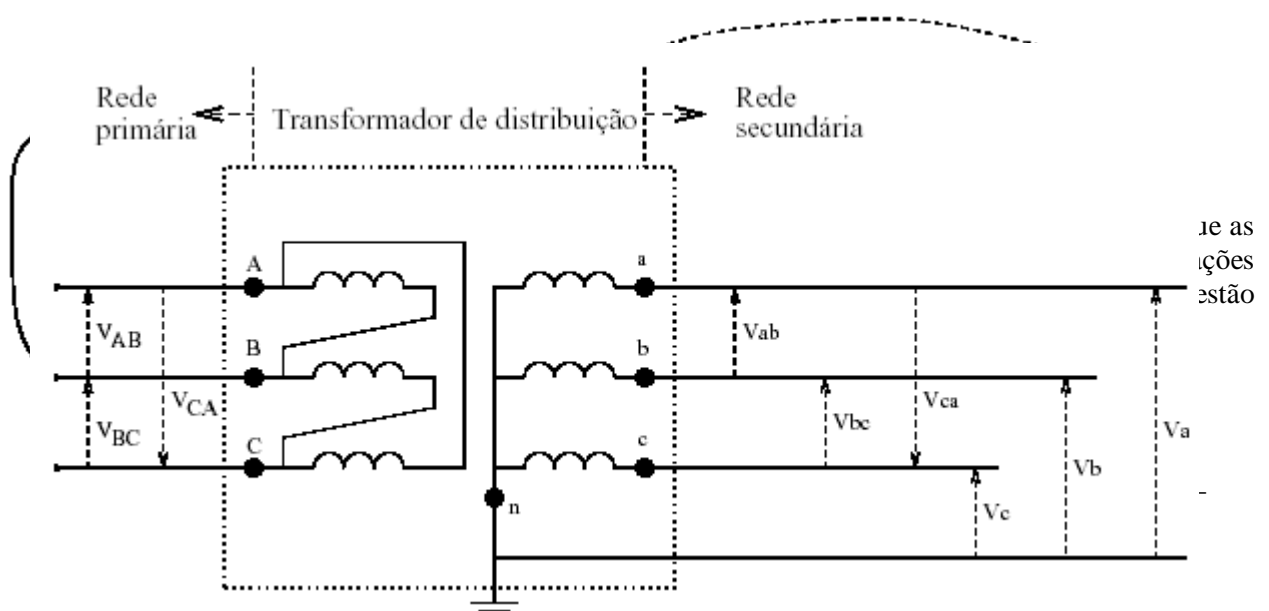


### Sistemas de Fornecimento:

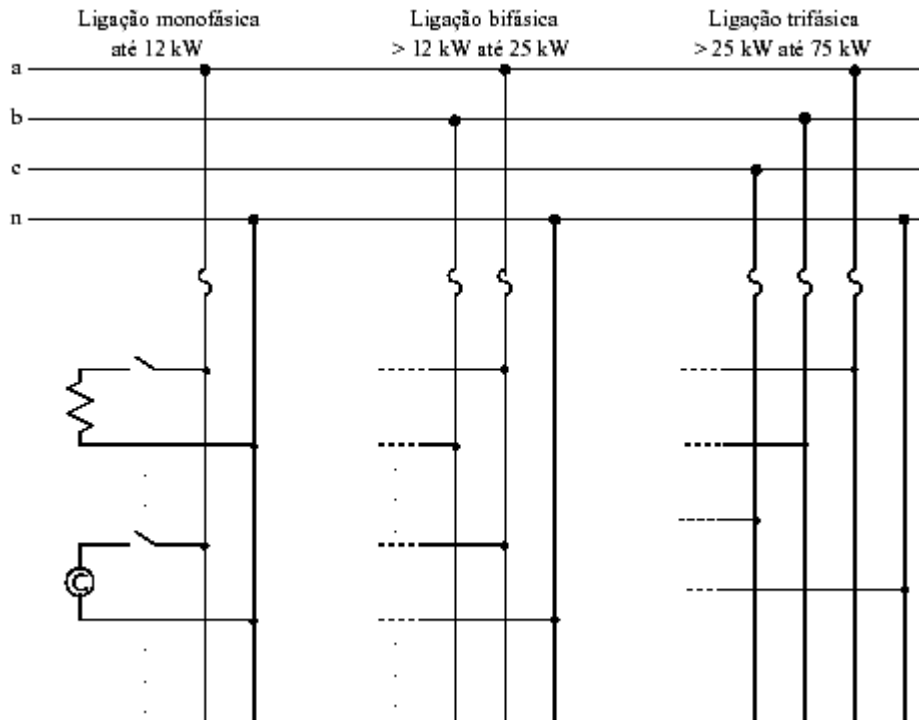
As cargas trifásicas (ex.: motores elétricos) são equilibradas. As cargas monofásicas e bifásicas (ex.: iluminação, aparelhos eletrodomésticos, motores monofásicos, etc.) devem ser equitativamente distribuídas entre as fases de modo que o sistema não fique desequilibrado.

Vamos focalizar um sistema de distribuição de baixa tensão (rede secundária) a partir de um sistema de potência, conforme mostra as Figuras abaixo.

Resumidamente podemos dizer que até se chegar ao consumidor o sistema de energia elétrica passa por várias transformações, desde sistemas de geração, passando pelos sistemas de transmissão e de distribuição.



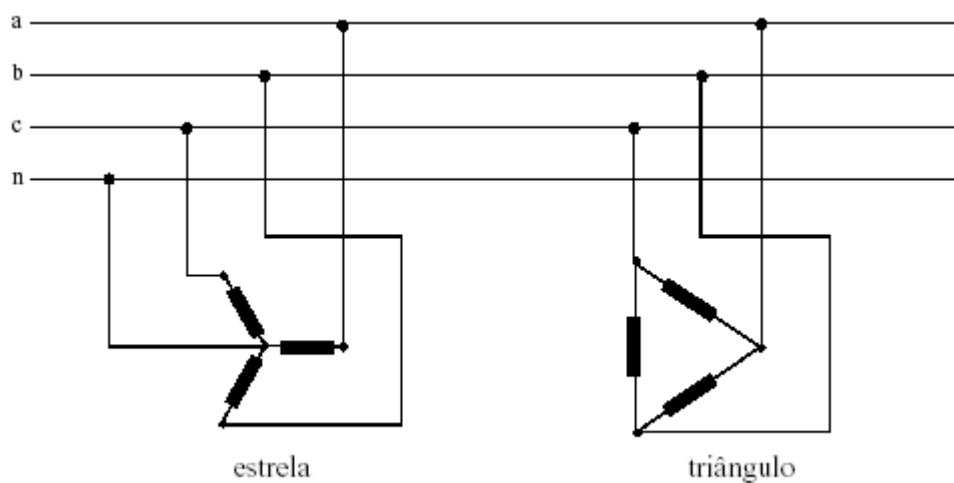
Observando a rede secundária podemos notar que algumas cargas são alimentadas por tensão de



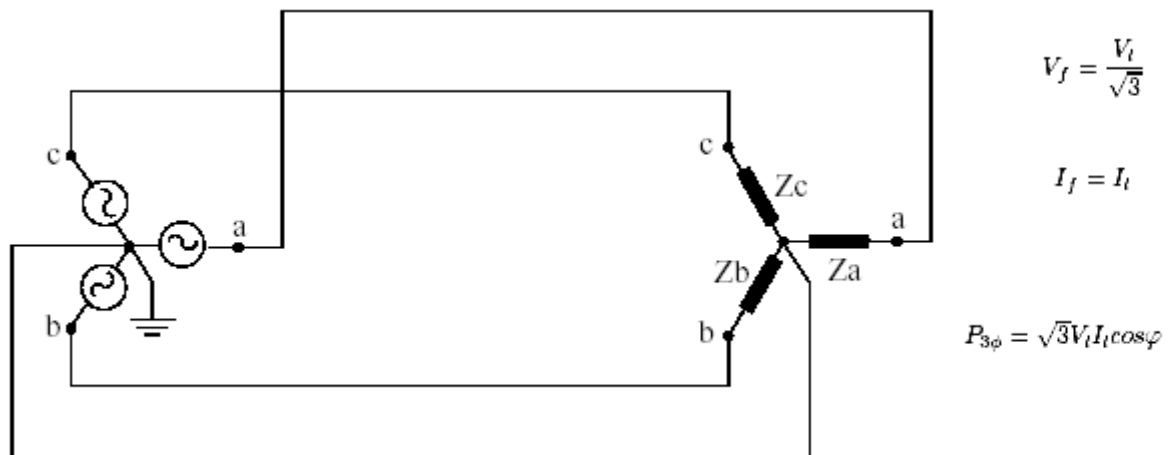
fase e outras por tensão de linha. Assim sendo, conforme o nº de fases envolvidas na alimentação, as cargas podem ser classificadas como monofásicas, bifásicas e trifásicas, conforme abaixo:

#### Ligação Estrela-Triângulo para cargas trifásicas:

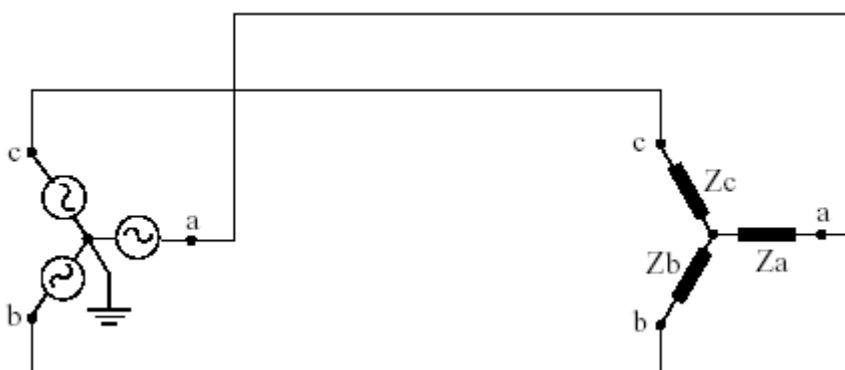
O nome está fortemente relacionado com a forma física adquirida pela carga., como pode ser visto nas figuras abaixo:



Cargas Ligadas em Estrela:

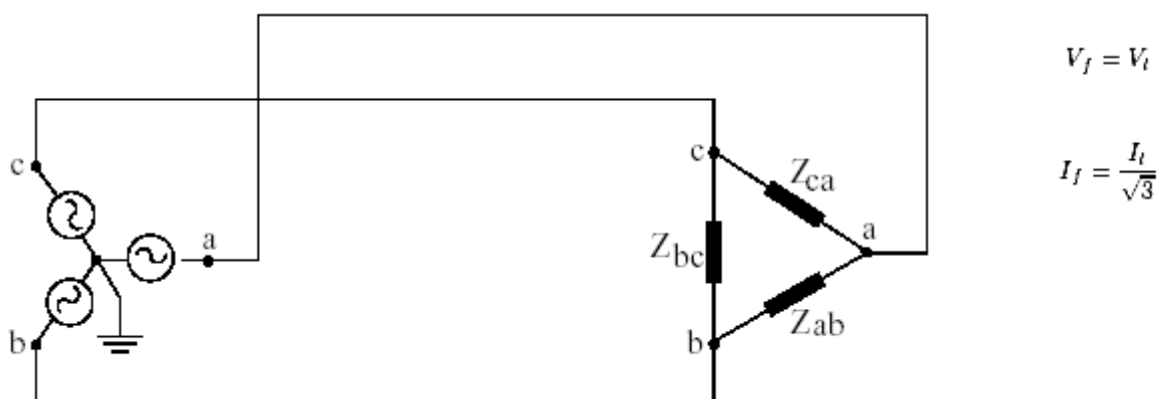


Cargas em Estrela sem neutro(somente para sistemas perfeitamente equilibrados)



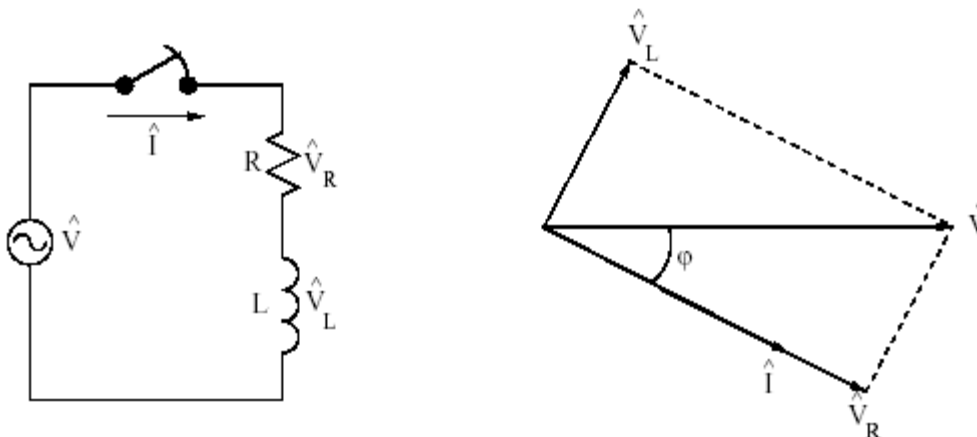
As equações são as mesmas do caso anterior, entretanto, se não houver perfeito equilíbrio poderá ocasionar a queima

Cargas em Triângulo



**Potência Elétrica:**

Como sabemos a energia elétrica serve apenas como meio de transporte, mas não como energia diretamente utilizável. Assim sendo, devemos converter a energia elétrica em outra forma de energia que efetivamente estamos precisando, podendo ser do tipo térmica, luminosa, mecânica, etc.. A taxa de conversão da energia elétrica, por unidade de tempo em outra forma de energia é chamada de potência elétrica. Seja o caso da energia elétrica convertida em energia térmica sobre um resistor R, inserido num circuito como abaixo:



Como sabemos a potência elétrica deste circuito é dada pela expressão abaixo:

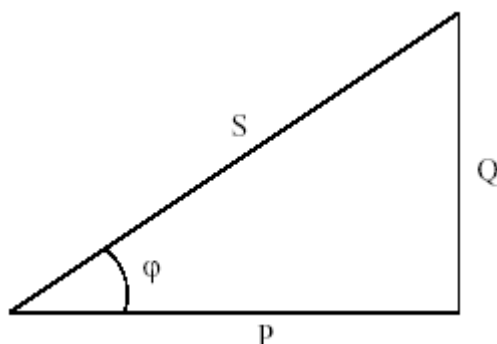
$$P = I^2 R$$

Entretanto, como podemos verificar, o circuito não é exclusivamente resistivo, e sim um circuito RL. Portanto, não podemos determinar a potência pela fórmula  $P=VI$ , como fazíamos com os circuitos puramente resistivos.

Isto ocorre, porque sendo o circuito RL, apenas uma parte da energia total enviada pela fonte, transforma-se em calor, sendo a parte restante utilizada para o estabelecimento do campo magnético do indutor. A energia armazenada pelo indutor no seu campo magnético durante um quarto de ciclo é devolvida no quarto de ciclo seguinte. Ou seja, não se trata de uma conversão de energia efetiva, mas sim de um “empréstimo de energia”, que é “pago” ao sistema. A taxa de energia que é “emprestada” pelo indutor chamamos de **Potência Reativa**, cujo símbolo é **Q**. Já a parcela efetivamente convertida em outra forma de energia e que gera trabalho chamamos de **Potência Ativa**.

A soma em quadratura das Potências Ativa e Reativa, dá-se o nome de Potência Aparente, que é determinada pelo produto da tensão pela corrente, ou seja,  $S=VI$ , sendo **S** o símbolo de Potência Aparente.

Abaixo, vemos uma representação gráfica das potências ativa, reativa e aparente.



**S** = potência aparente (VA)

**P** = potência ativa (W)

**Q** = potência reativa (VAR)

## Fator de Potência

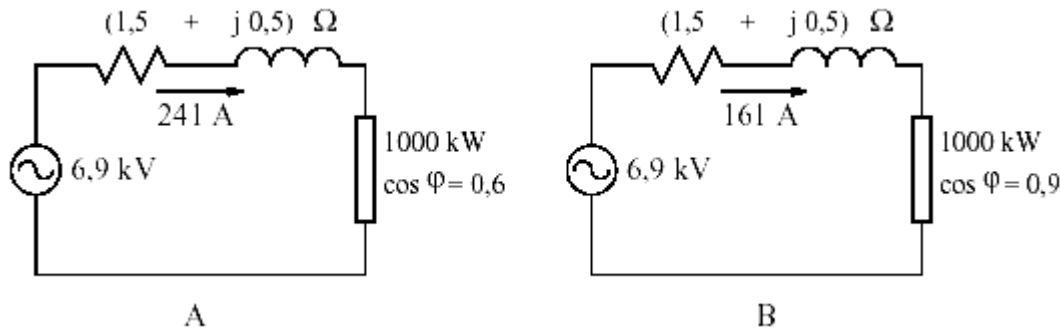
Em circuitos resistivos puros, temos que a potência aparente é igual a potência ativa, ou seja, a corrente consumida pela carga destina-se exclusivamente a gerar trabalho útil. Entretanto, em circuitos tipo RL, isto não é verdade. Assim, utilizamos parte da corrente para gerar campo magnético nos indutores e dessa forma precisamos aumentar a corrente total para podermos transmitir a mesma quantidade de potência que um circuito puramente resistivo.

Para que possamos calcular a parcela de energia ativa enviada por uma fonte criou-se o conceito do **fator de potência**, definido como abaixo:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

sendo que este corresponde a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Como podemos verificar, o fator de potência pode variar de 0 (totalmente indutivo) à 1 (totalmente resistivo).

Assim dado dois circuitos, com mesma potência ativa, o que tiver maior fator de potência terá corrente menor. E isto pode ser verificado pelas figuras e tabela abaixo:



Grandezas	Fórmulas	Sistema A	Sistema B	Diferença %
Corrente	$I = \frac{P}{V \cos\varphi}$	241 A	161 A	49,7
Capacidade da "fonte"	$S = V I$	1.666 kVA	1.111 kVA	50,0
Perdas na linha	$\Delta P \simeq I^2 R$	88 kW	39 kW	125,6
Queda de tensão	$\Delta V \simeq Z I$	382 V	255 V	49,8

### Consequências:

Observando a Tabela concluímos que um baixo fator de potência traz algumas consequências negativas, tais como:

- Solicitação de uma corrente maior portanto, capacidade maior da "fonte" para alimentar uma carga com a mesma potência ativa;
- Maior perda por efeito *Joule*;
- Maior queda de tensão.

### O que se deve fazer?

Corrigir o fator de potência. Deve-se ter em mente que o fator de potência é uma característica intrínseca da carga, portanto para a sua correção será necessário utilizar um artifício no qual a fonte enxergará um fator de potência melhor.

### Como se faz?

Instalar capacitor em paralelo com a carga (o mais próximo possível), conforme mostra a Figura abaixo

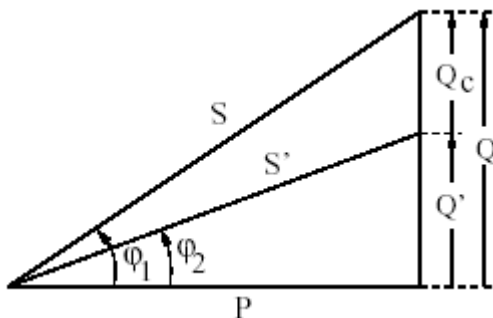
Analisando o diagrama fasorial da Figura anterior, observamos que a corrente que flui da fonte para a carga ( $I$ ), após a instalação do capacitor, é a soma fasorial da corrente de carga ( $I$ ) e a corrente do capacitor ( $I_C$ ). Isso nos permite observar que:

- a corrente de carga ( $I$ ) praticamente não se altera;
  - a corrente que flui pela linha de transmissão, que \_e a mesma solicitada da fonte, ( $I_T$ ) diminui;
  - a defasagem entre a tensão aplicada e a corrente que flui pela linha de transmissão diminui.
- Estes fatos permitem-nos afirmar que:

- a potência ativa consumida pela carga praticamente não se altera;
- a perda por efeito Joule na linha de transmissão diminui;
- a queda de tensão na linha de transmissão diminui;
- fator de potência visto pela fonte melhora.

### Como dimensionar o capacitor?

Constatada a necessidade de melhorar o fator de potência, precisamos agora saber qual o capacitor mais adequado. Vamos dimensioná-lo baseando-se nos triângulos de potências, mostrados na Figura abaixo.



O ângulo  $\phi_1$  e os lados do triângulo maior correspondem respectivamente às potências aparente ( $S$ ), reativa ( $Q$ ) e ativa ( $P$ ) antes da correção do fator de potência. Após a correção (que implica em ligar o capacitor em paralelo com a carga) teremos o ângulo  $\phi_2$  e os lados do triângulo menor, constituídos por  $S'$ ,  $Q_0$  e  $P$ . Os catetos opostos dos dois triângulos, que correspondem às potências reativas, tem a seguinte igualdade:

$$Q_0 = Q - Q_c \quad (15)$$

sendo  $Q_c$  a potência reativa fornecida localmente pelo capacitor.

## 4. Transformadores

### Definições Gerais:

1. **Transformador** - Equipamento elétrico que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos, com a mesma frequência e, geralmente, com valores diferentes de tensão e corrente.
2. **Transformador de potência** - Transformador cuja finalidade é transformar energia elétrica entre partes de um sistema de potência.

3. **Autotransformador** - Transformador no qual os enrolamentos primário e secundário têm certo número de espiras comuns.
  4. **Banco de transformadores** - Conjunto de transformadores monofásicos interligados, de modo a formar o equivalente a um transformador trifásico.
  5. **Comutador de derivações** - Dispositivo que permite alterar a relação de espiras de um transformador, pela modificação da ligação das derivações de um mesmo enrolamento.
  6. **Terminal** - Parte condutora de um transformador destinada a sua ligação elétrica a um circuito externo.
  7. **Terminal de linha** - Terminal destinado a ser ligado a uma fase do circuito externo
  8. **Terminal de neutro** - Terminal destinado a ser ligado ao neutro do circuito externo.
  9. **Terminais correspondentes** - Terminais de enrolamentos diferentes de um transformador, marcados com o mesmo índice numérico e letras diferentes. Por exemplo, num transformador trifásico ligado em (alta tensão) - **Y** (baixa tensão) os terminais marcados são: **H1, H2 e H3 - X1, X2, X3 e Xo**.
  10. **Ponto neutro** - Ponto de referência, real ou ideal, para todas as tensões de fase de um sistema trifásico.
    - a) Num sistema simétrico de tensões, o ponto neutro está, normalmente, no potencial zero.
    - b) Num sistema trifásico ligado em estrela, o ponto neutro e o ponto comum.
  11. **Derivação** - Ligação feita em qualquer ponto de um enrolamento, de modo a permitir a mudanças das relações de tensões e de correntes através da mudanças da relação de espiras.
  12. **Enrolamento** - Conjunto de espiras que constituem um circuito elétrico de um transformador.
  13. **Enrolamento primário** - Enrolamento que recebe energia.
  14. **Enrolamento secundário** - Enrolamento que fornece energia.
  15. **Carga** - Conjunto dos valores das grandezas elétricas que caracterizam as solicitações impostas em cada instante ao transformador pelo sistema elétrico a ele ligado.
  16. **Perda em vazio** - Potência absorvida por um transformador, quando alimentado em tensão e frequência nominais por um de seus enrolamentos, com todos os outros enrolamentos em aberto.
  17. **Corrente de excitação** - Corrente que percorre o terminal de linha de um enrolamento, sob a tensão e frequência nominais, estando o(s) outro(s) enrolamento(s) em circuito aberto.
    - a) A corrente de excitação de um enrolamento é frequentemente expresso em percentagem da corrente nominal desse enrolamento. Em transformadores de vários enrolamentos, essa percentagem é referida ao enrolamento de potência nominal mais elevada.
    - b) Em transformadores trifásicos, as correntes de excitação nos três terminais de linha podem ser diferentes. Se neste caso, os valores das diferentes correntes de excitação não forem indicados separadamente, será admitido que a corrente de excitação é a média aritmética destas correntes.
  18. **Perda em carga** - Potência ativa absorvida na frequência nominal, quando os terminais de linha de um dos enrolamentos forem percorridos pela corrente nominal, estando os terminais dos outros enrolamentos curto-circuitados.
  19. **Perdas totais** - Soma das perdas em vazio e em carga.
  20. **Rendimento** - Relação, geralmente expressa em percentagem, entre a potência ativa fornecida e a potência ativa recebida pelo transformador.
  21. **Regulação** - Diferença aritmética entre a tensão em vazio e a tensão em carga nos terminais do mesmo enrolamento, com uma carga especificada, sendo a tensão aplicada ao outro ou a um dos outros enrolamentos, igual a:
    - a) a sua tensão nominal, se estiver ligado na derivação principal;
    - b) tensão de derivação, se estiver ligado em outra derivação. Essa diferença é, geralmente, expressa em percentagem da tensão em vazio do primeiro enrolamento.
- Nota.:** Para transformadores com mais de dois enrolamentos, a regulação depende não somente da carga do enrolamento considerado, mas também da carga nos outros enrolamentos.
22. **Característica nominal** - Conjunto de valores nominais atribuídos às grandezas que definem o funcionamento de um transformador, nas condições especificadas na Norma correspondente, e que servem de base às garantias do fabricante e aos ensaios.
    - a) A característica nominal refere-se a derivação principal.
    - b) As tensões e correntes são dadas em valores eficazes.

23. **Ensaio de rotina** - Ensaio realizado para verificar se o item ensaiado está em condições adequadas de funcionamento ou de utilização, de acordo com a respectiva especificação **Nota:** Este ensaio pode ser realizado em cada uma das unidades fabricadas, ou em uma amostra de cada lote de unidades fabricadas, conforme prescrito na norma pertinente.

24. **Ensaio de tipo** - Ensaio realizado em uma ou mais unidades fabricadas segundo um certo projeto, para demonstrar que esse projeto satisfaz certas condições especificadas.

25. **Ensaio especial** - Ensaio que a norma pertinente não considera de tipo ou de rotina, e realizado mediante acordo prévio entre fabricante e cliente.

26. **Impedância de curto-circuito** - Impedância equivalente, expressa em ohms por fase, medida entre os terminais de um enrolamento, com outro enrolamento curto-circuitado, quando circula, sob frequência nominal, no primeiro enrolamento, uma corrente nominal. A impedância de curto-circuito é, geralmente, expressa em percentagem, tendo como valores de base a tensão e a potência nominais do enrolamento.

27. **Tensão de curto-circuito** - A tensão aplicada entre os terminais de um enrolamento, com outro enrolamento curto-circuitado, quando circula, sob frequência nominal, no primeiro enrolamento, uma corrente nominal. **Nota:** Quando expressas em percentagem, a impedância de curto-circuito e a tensão de curto-circuito são numericamente iguais.

28. **Resistência de curto-circuito** - Componente resistiva da impedância de curto-circuito.

29. **Reatância de curto-circuito** - Componente reativa da impedância de curto-circuito.

30. **Derivação principal** - Derivação a qual é referida a característica nominal do enrolamento.

31. **Fator de derivação** - É definida por:

$$100(U_d/U_n) \quad (1)$$

Sendo:

(a)  $U_d$  : tensão induzida em vazio nos terminais do enrolamento ligado na derivação considerada, quando se aplica a tensão nominal no outro enrolamento.

(b)  $U_n$  : tensão nominal do enrolamento.

32. **Derivação superior** - Derivação cujo fator de derivação é maior do que 1.

33. **Derivação inferior** - Derivação cujo fator de derivação é menor do que 1.

34. **Degrau de derivação** - Diferença entre os fatores de derivação, expressos em percentagem, de duas derivações adjacentes.

35. **Faixa de derivação** - Faixa de variação do fator de derivação, expresso em percentagem e referido ao valor 100. **Nota:** Se esse fator varia de  $(100 + a)\%$  a  $(100 - b)\%$ , a faixa de derivação é  $(+a\%, -b\%)$  ou  $a\%$ , quando  $a = b$ .

36. **Polaridade dos terminais** - De um transformador: Designação dos sentidos relativos instantâneos das correntes nos terminais do transformador.

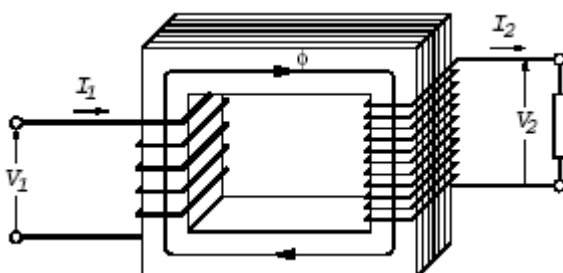
37. **Polaridade subtrativa** - Polaridade dos terminais de um transformador monofásico, tal que, ligando-se um terminal primário a um terminal secundário correspondente e aplicando-se a tensão a um dos enrolamentos, a tensão entre os terminais não ligados é igual à diferença das tensões nos enrolamentos.

38. **Polaridade aditiva** - Polaridade dos terminais de um transformador monofásico, tal que, ligando-se um terminal primário a um terminal secundário não correspondente e aplicando-se a tensão a um dos enrolamentos, a tensão entre os terminais não ligados é igual à soma das tensões nos enrolamentos.

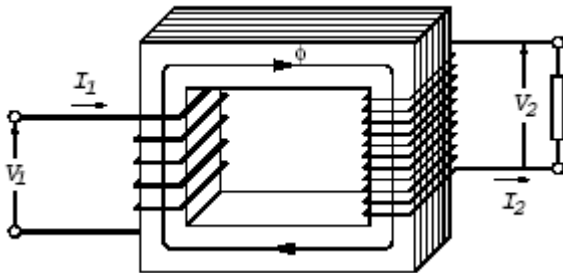
39. **Marca da polaridade** - Cada um dos símbolos utilizados para identificar as polaridades dos terminais de um transformador.

Num transformador, a intensidade da corrente secundária e a sua relação de fase com a tensão

secundária dependem da natureza da carga, entretanto, a cada instante o sentido dessa corrente deve ser tal que se oponha a qualquer variação no valor do fluxo magnético  $\Phi$ . Esta condição está de acordo com a lei de Lenz: **o sentido da corrente induzida sempre contrária a causa que lhe deu a origem.**



A Figura abaixo mostra um transformador monofásico com enrolamento do primário no sentido anti-horário e o do secundário no sentido horário. Considerando a corrente instantânea  $I_1$  crescente entrando no terminal superior do enrolamento primário, criará um fluxo magnético  $\Phi$  crescente, que circulará no núcleo no sentido horário (regra da mão direita). Para que a lei de Lenz seja satisfeita, a corrente secundária  $I_2$  deverá sair do terminal superior do enrolamento secundário.



que se utiliza o conceito de polaridade.

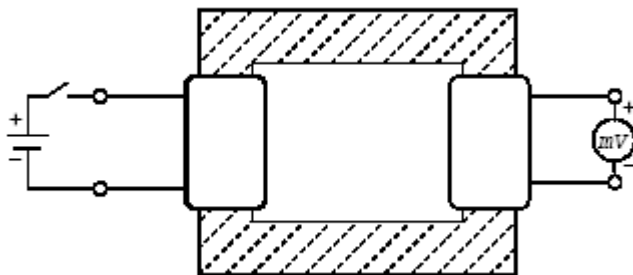
A Figura abaixo, mostra também um transformador monofásico, com uma única diferença em relação à Figura anterior: o enrolamento do secundário está no sentido antihorário. Para este caso, a corrente secundária  $I_2$  deverá sair do terminal inferior do enrolamento secundário.

É óbvio que, o sentido da corrente instantânea no secundária depende exclusivamente do sentido relativo dos enrolamentos.

Para indicar os sentidos dos enrolamentos é

### Teste de polaridade

#### Teste com corrente alternada

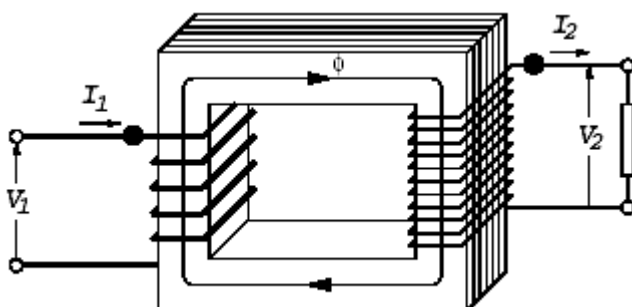


Outro método para determinar a polaridade de um transformador é através da tensão de corrente contínua (bateria de 6 a 10 V), uma chave faca e um galvanômetro com zero central, ligados conforme o esquema da Figura ao lado.

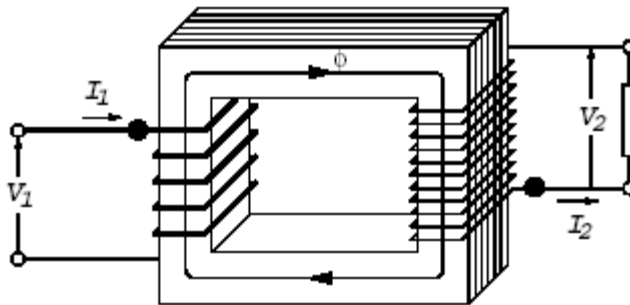
O procedimento deste método é o seguinte: fecha-se a chave e observa-se o sentido da deflexão do ponteiro do galvanômetro. Se a deflexão for no sentido positivo a polaridade será subtrativa; caso contrário será aditiva. Na abertura da chave o ponteiro do galvanômetro defletirá no sentido oposto ao do fechamento. **Nota:** tensão perigosa poderá ser gerada durante a abertura. Portanto, se não for usada uma chave faca, recomenda-se usar uma luva de borracha durante o teste.

### Marca da polaridade

As Figuras abaixo mostram respectivamente as marcas das polaridades subtrativa e aditiva.



**Polaridade Subtrativa:** os fluxos dos enrolamentos se subtraem.



**Polaridade Aditiva:** os fluxos dos enrolamentos se somam.

### Transformadores Ideais:

Um transformador ideal seria aquele em que não houvessem perdas e não exigisse nenhuma corrente de magnetização.

Como os transformadores práticos não possuem entreferro e o núcleo tem baixíssima relutância, o transformador é um equipamento com altíssimo rendimento (da ordem 98% e 99%), normalmente a fmm exigida para estabelecer o fluxo no núcleo acaba sendo desprezível frente a corrente carga. Assim sendo, a corrente de magnetização pode ser desprezada, o que nos permite concluir que os transformadores práticos são muito próximos dos ideais. Isto nos permite afirmar que:

$V_p / V_s = RT$ , onde  $RT$  é a relação de transformação, válida para transformadores ideais.

Sabemos que  $k = N_p / N_s$ , onde  $k$  é a relação de espiras do primário para o secundário.

No transformadores monofásicos, como é o nosso caso, vale também que:

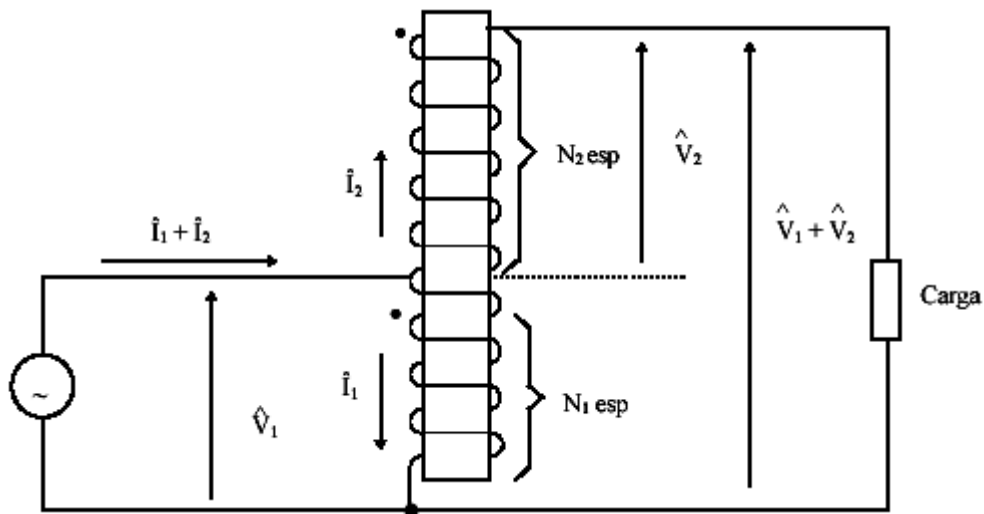
$V_p / V_s = N_p / N_s = k = RT$ , ou seja, a relação de transformação é igual a relação de espira.

Outra relação muito importante é que:

$I_s / I_p = RT$ , ou seja, a relação inversa das corrente é igual a relação de transformação.

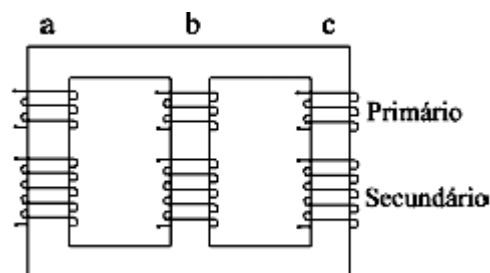
### Autotransformador

A figura abaixo, ilustra um autotransformador, que é um tipo particular de transformador, onde o enrolamento primário ou secundário é uma derivação do outro. Neste tipo de transformador, não há isolamento elétrico entre primário e secundário. Parte da potência transferida do primário para o secundário, dá-se por condução e não por acoplamento magnético. Normalmente é utilizado quando a relação de transformação do transformador é pequena, próxima de 1:1, pois apresenta vantagens como relação custo benefício e perdas menores.

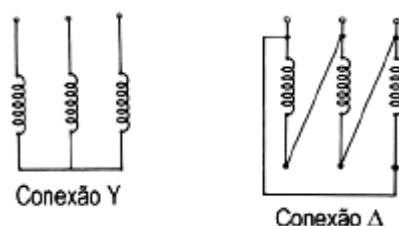


### Transformadores Trifásicos:

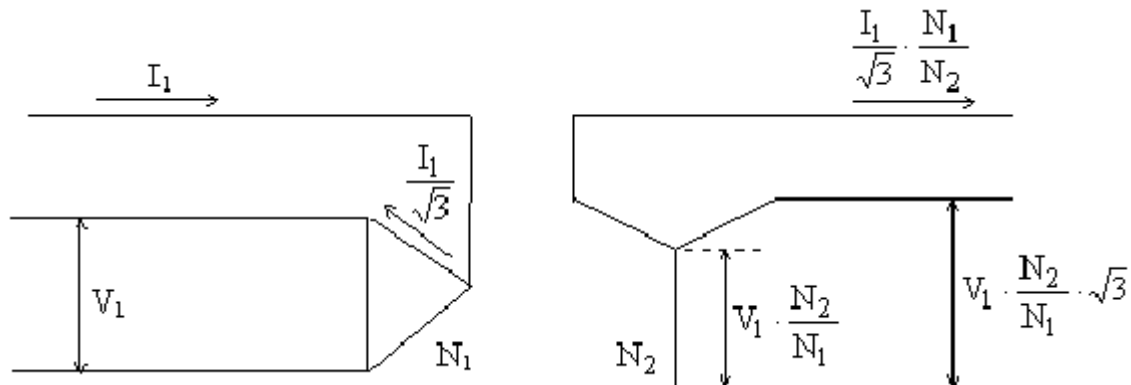
Uma das principais aplicações dos transformadores está nos sistemas de potência, elevando ou abaixando o nível de tensão para a transmissão ou distribuição da energia elétrica. Em geral esses sistemas são trifásicos e equilibrados. Pode-se construir transformadores com núcleo trifásico ou associar transformadores com núcleos monofásicos. Nos dois casos, os enrolamentos podem ser associados em *estrela* (Y) ou em *delta* ( $\Delta$ ). Se houver três enrolamentos por fase pode-se ainda obter uma associação *zig-zag* (Z), que é uma versão estrela (Y) composta. A escolha da associação adequada depende de diversos fatores como: acesso a neutro, bitola dos condutores por fase, sistema de aterramento, nível de isolamento, defasagem angular requerida, etc. O transformador com núcleo trifásico leva vantagem sobre a associação ou banco de transformadores monofásicos, devido à economia de ferro no núcleo: como os fluxos das três fases somam zero a todo instante, pode-se eliminar o caminho de retorno do fluxo, o que leva a uma estrutura magnética plana com uma perna do núcleo para cada fase (figura abaixo).



A ligação em Y ou  $\Delta$  dos enrolamentos é estabelecida através da conexão dos seus terminais



Para fazer corretamente essa conexão, é fundamental conhecer a polaridade relativa dos enrolamentos. Qualquer inversão irá colocar duas fases em curto-circuito ou desequilibrar o circuito magnético com as correntes e tensões secundárias. Lembrar que em uma ligação Y a tensão de linha é igual a 3 vezes a tensão de fase e em uma ligação  $\Delta$  a corrente de linha é igual a 3 vezes a corrente de fase.



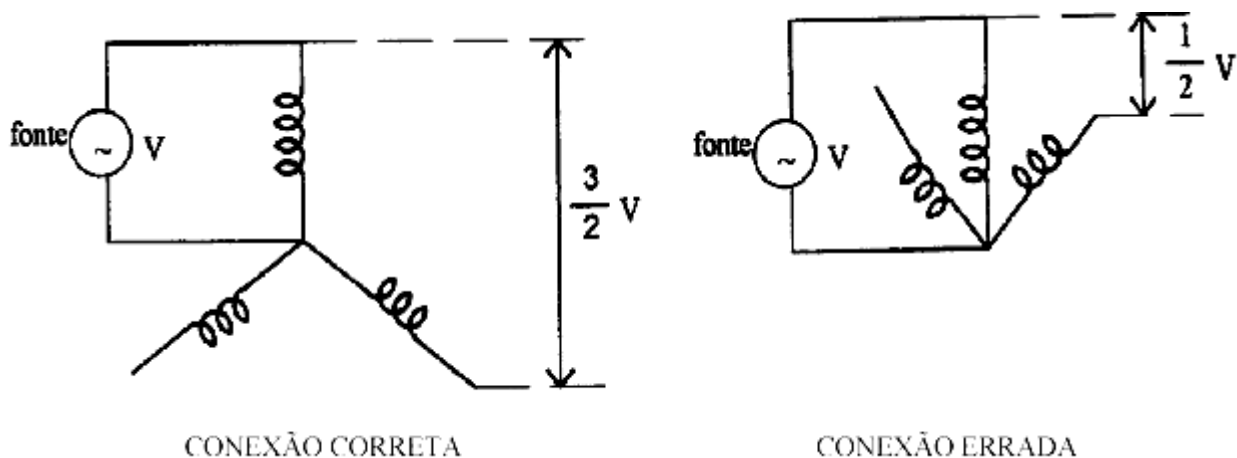
Uma característica da associação Y- $\Delta$  é o deslocamento angular de  $\pm 30^\circ$  que resulta entre as tensões terminais correspondentes do primário e do secundário. O sentido da defasagem depende da sequência das fases. Esse deslocamento pode ser percebido através de um diagrama fasorial.

A tensão de linha AB V do secundário está atrasada de  $30^\circ$  em relação à tensão correspondente  $V_{ab}$  do primário. Se trocarmos a sequência das fases, a defasagem muda de sinal. Portanto, é necessário tomar cuidado com as defasagens quando, p.ex., deseja-se conectar dois transformadores trifásicos em paralelo.

### CONEXÃO EM Y

Para o caso de *associação trifásica de transformadores monofásicos*, pode-se testar a polaridade de cada transformador separadamente, conforme visto anteriormente.

Para o caso de *núcleo trifásico*, é preciso testar a polaridade relativa dos três enrolamentos do primário e do secundário entre si. Para o teste do primário, liga-se as bobinas em Y e aplica-se uma tensão de teste V na fase da perna central do núcleo (Figura 18).



### **Transformadores Especiais**

**VARIAC** - é um autotransformador com relação de espiras variável, usado em aplicações onde se necessita regular a tensão utilizando apenas uma pequena parte da potência para conversão eletromagnética. Portanto, é um transformador com conexão elétrica entre o primário e o secundário.

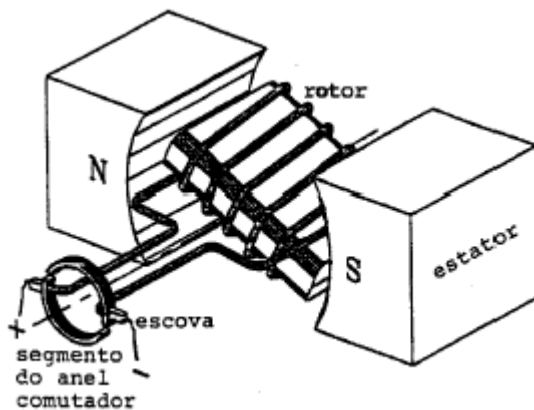
**TRANSFORMADOR DE PULSO** - é usado em circuitos chaveados eletronicamente. Sua função é fazer o isolamento elétrico do circuito gerador de pulsos do circuito de gatilho do tiristor.

**TRANSFORMADORES PARA MEDIÇÃO DE POTENCIAL (TP) OU DE CORRENTE (TC)** – são transformadores úteis para a medição de tensões e correntes em instalações elétricas em alta tensão como em subestações. Os TC's tem sua relação de transformação indicada em amperes, por exemplo: 1000:5 amperes, ou 200:5 amperes. A corrente do secundário é sempre fixa em 5 amperes ou 1 ampere. Isto ocorre devido ao fato de que o TC normalmente se liga a equipamentos de medição ou proteção. Além disso, os TC's são construídos de forma tal que o secundário pode ser curto-circuitado sem que isto implique em qualquer risco ao TC.

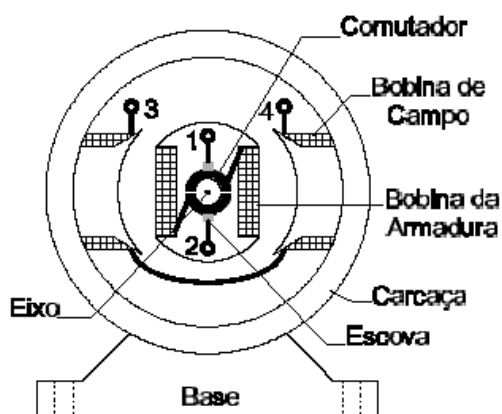
## **5. Máquinas de CC**

Dentre as máquinas de corrente contínua, podemos destacar os geradores e motores de CC. A figura abaixo ilustra a montagem básica tanto do gerador como do motor, lembrando que no caso do gerador devemos aplicar energia mecânica ao eixo e retirar energia elétrica dos terminais, ao passo que no caso do motor devemos aplicar energia elétrica o rotor e retirar energia mecânica do mesmo.

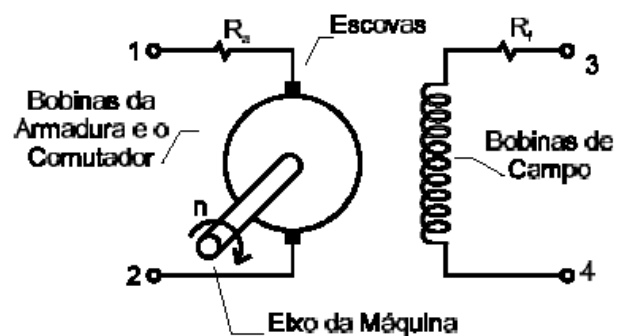
Pela figura abaixo, verificamos que o rotor tem uma bobina enrolada ao mesmo e que a mesma é cortada por um fluxo fixo, que na prática correspondente ao fluxo dos pólos do motor fixados no estator.



Nas figuras abaixo nos mostra a sua configuração física e a sua representação básica de um motor CC. Pela figura (a), verificamos a presença da bobina de campo presa a peça polar e a bobina da armadura presa ao rotor. A bobina da armadura é ligada ao comutador, que por sua vez está em contato com as escovas. É graças a escova e ao comutador que é possível alimentar o enrolamento da armadura (bobina do rotor).



(a) Partes Internas

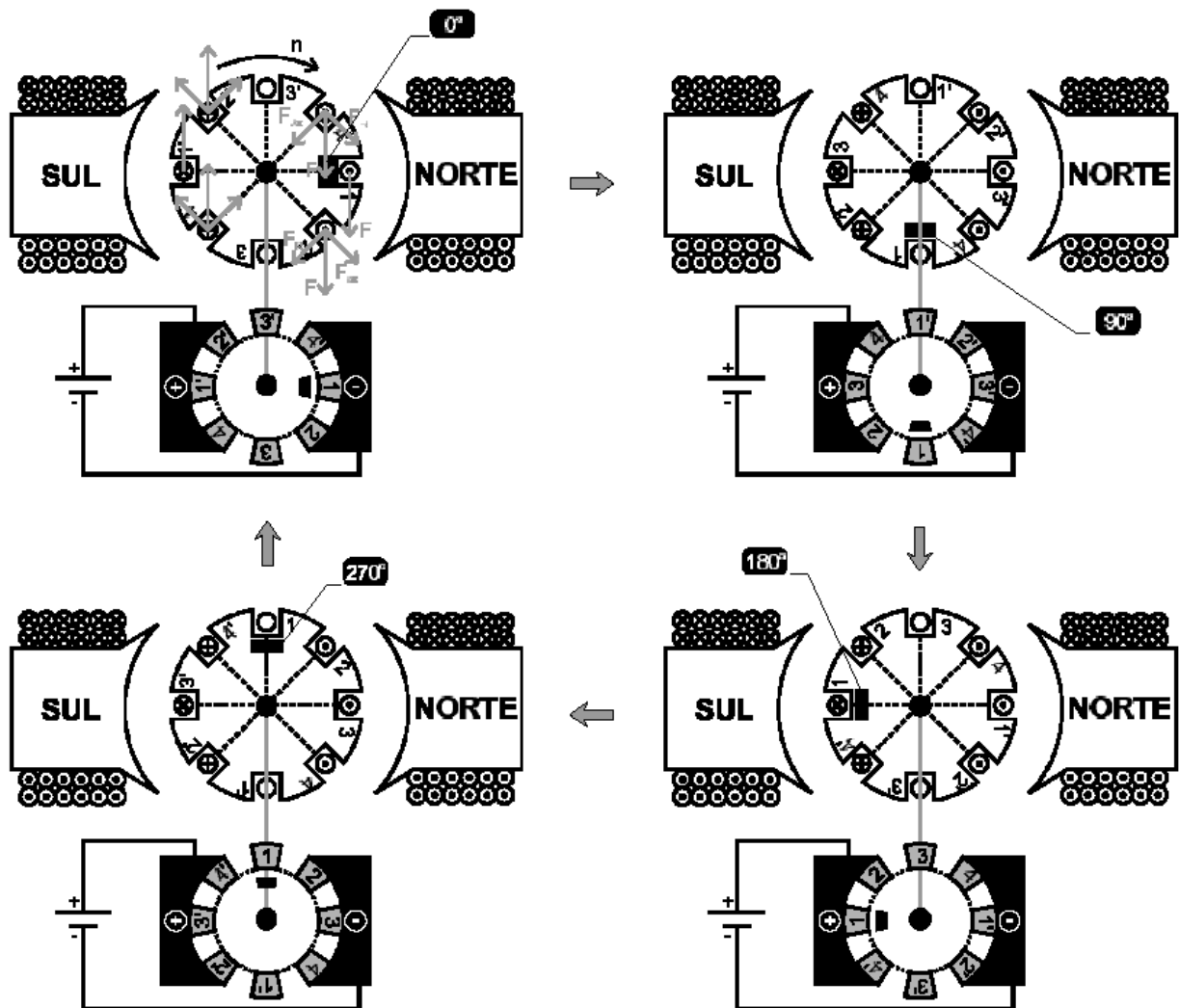


(b) Representação

O motor de corrente contínua apresenta quatro terminais acessíveis, dois para as bobinas de campo ( terminais 3 e 4 ) e dois para as bobinas de armadura ( terminais 1 e 2 ). Em alguns motores de baixa potência, as bobinas de campo são substituídas por ímãs permanentes. Neste caso, o motor apresenta apenas dois terminais de acesso ( terminais 1 e 2 ).

O princípio de funcionamento elementar de um motor de corrente contínua está baseado na Força mecânica que atua sobre um condutor imerso num campo magnético, quando sobre ele circula uma corrente elétrica. Observe a figura 8.2 . Na bobina 1, as forças são iguais e opostas, não produzindo nenhuma força de rotação ( torque ou par binário), mas as bobinas 2,3 e 4 tem sobre elas um torque  $F_x$  tal que impulsiona o rotor para girar, levando consigo a bobina 1, que então entra na região ( da bobina 2) onde estava a bobina 2, e então passa a exercer uma força de giro também.

Observe que para este esquema funcionar, é necessário inverter o sentido da corrente da armadura a cada  $180^\circ$  . O elemento que faz a comutação do sentido da corrente é o comutador.



Sabemos que, quando um condutor está imerso num campo magnético, se deslocando com uma certa velocidade “v” dentro deste campo, sobre ele é induzida uma corrente elétrica. Observe que o sentido desta corrente elétrica é contrário ao sentido mostrado na figura 8.2. Por isso essa força eletromotriz induzida é chamada de Força-contra-eletromotriz induzida -  $f_{cem}$  - simbolizada pelas letras  $E_c$ .

A equação fundamental do torque nos motores é dado por:

$$T = K_1 \cdot \phi \cdot I_a \text{ (N.m)}$$

Onde:

$\phi$  = Fluxo magnético produzido pelos pólos;

$I_a$  = corrente que circula pelas bobinas da armadura;

$K_1$  = constante construtiva do rotor das máquinas elétricas.

A fcm gerada pelo movimento do motor é dado por:

$$E_c = K_2 \cdot \phi \cdot n \quad (\text{Volts})$$

Onde:

$n$  = número de rotações por minuto;

$K_2$  = constante construtiva do campo magnético;

O fluxo magnético, por sua vez, depende da corrente de campo  $I_f$ , pela seguinte expressão:

$$\phi = K_3 \cdot I_f$$

Tanto as bobinas de campo como as bobinas de armadura apresentam uma resistência elétrica à passagem da corrente, e chamamos aqui de  $R_f$  e  $R_a$  respectivamente.

Analisando o circuito do rotor, podemos concluir que:

$$\begin{aligned} V_a &= I_a R_a + E_c \\ E_c &= V_a - I_a R_a \end{aligned}$$

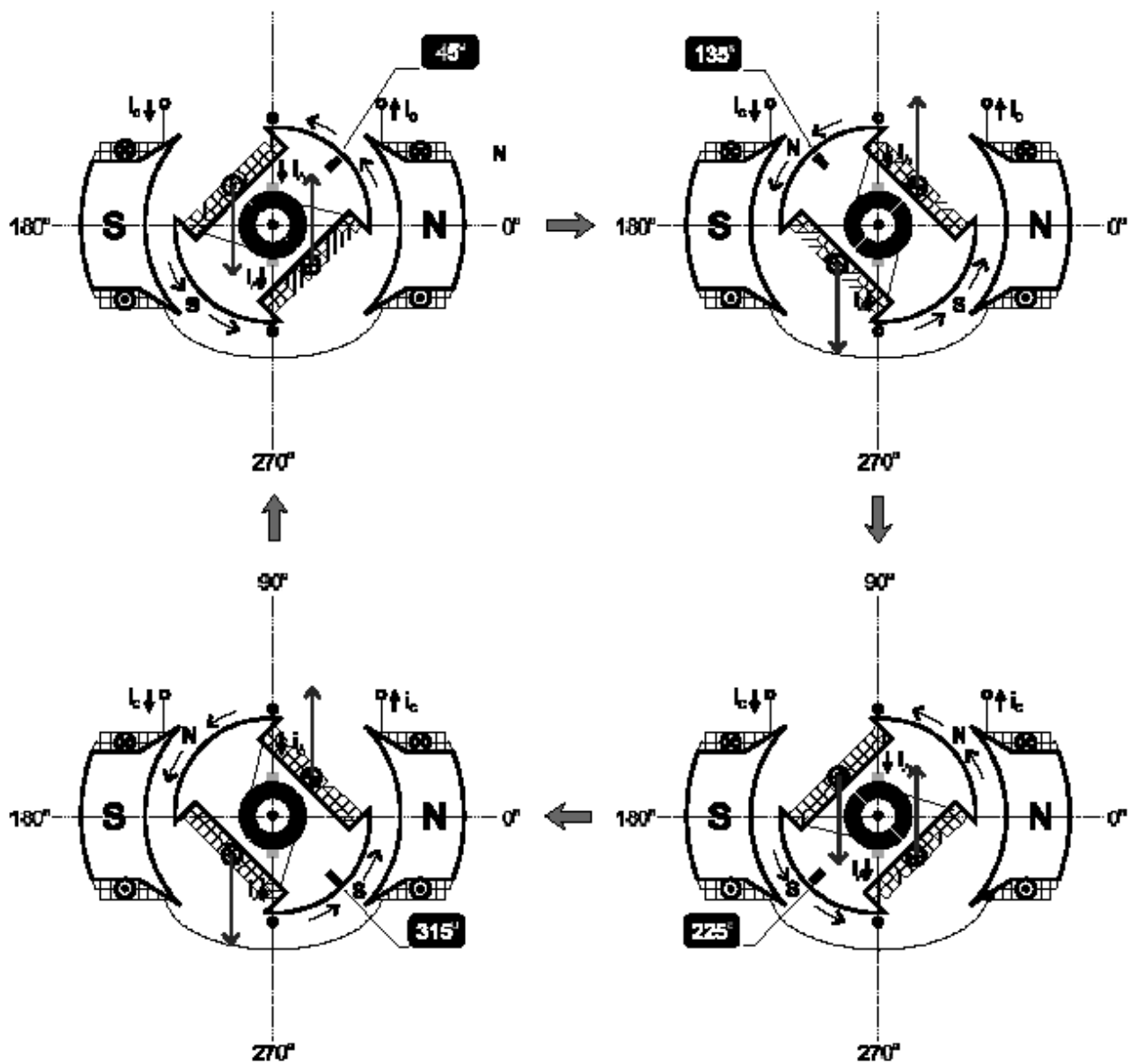
Como  $E_c$  varia com a velocidade e o fluxo, podemos substituir  $E_c$  na equação anterior e isolar a velocidade  $n$  ( em rpm ). Então:

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_2 \cdot \phi}$$

Esta equação é fundamental, pois nos diz que a velocidade do motor depende da tensão aplicada na armadura, da corrente na bobina e do valor do fluxo magnético. Note que a velocidade do motor tende ao infinito quando o fluxo tende a zero. Conseqüentemente, não devemos tirar, sob hipótese alguma, a corrente de campo, pois o motor “dispara”.

O princípio de funcionamento do motor de corrente contínua também pode ser baseado na ação de forças magnéticas sobre o rotor, geradas pela interação do campo magnético criado pelas bobinas de campo com o campo magnético criado pelas bobinas da armadura, conforme mostra a figura abaixo.

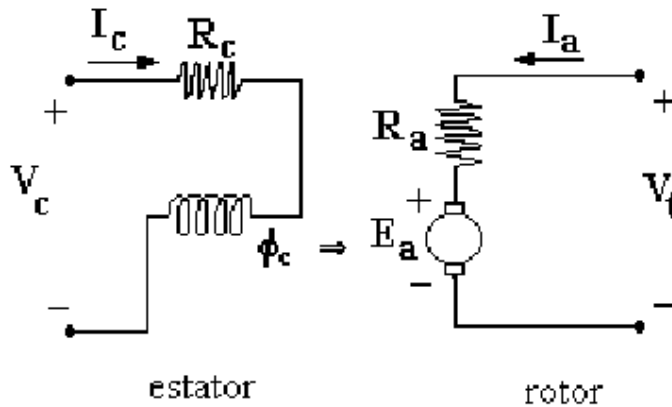
Observa-se que o comutador possui a função de inverter o sentido da corrente na bobina da armadura em  $90^\circ$  e  $270^\circ$  dando continuidade ao movimento rotativo do motor.



### Modelo matemático do motor de CC

Para fins de computo das correntes de armadura e de campo utiliza-se um modelo clássico de máquinas de CC, que serve a geradores e a motores de CC.

Embora simplificado é bastante adequado para a fins de uso prático.



$K_a$  - cte. de projeto da máquina

$R_c$  - resistência ôhmica do enrolamento do estator

$R_a$  - resistência ôhmica do enrolamento do rotor

$\phi_c$  - fluxo de excitação

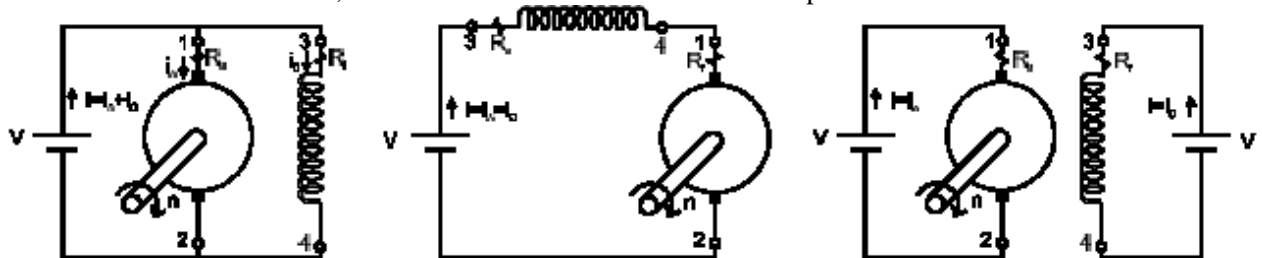
$E_a$  - tensão gerada no enrolamento do rotor devido a  $\phi_c$

$$V_t = E_a + R_a \cdot I_a$$

$$E_a = K_a \cdot \phi_c \cdot \omega$$

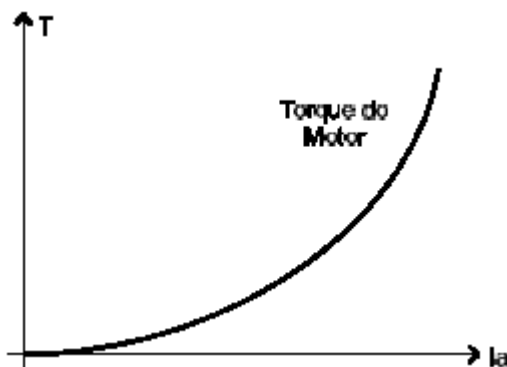
### Tipos de Motores de Corrente Contínua

Os motores CC são divididos de acordo com o tipo de conexão entre as bobinas do rotor e do estator. Se forem conectados em série, são chamados de Motor Série. Se for em paralelo, são chamados de Motor Paralelo. Se for misto, são chamados de Motor Misto ou Composto.

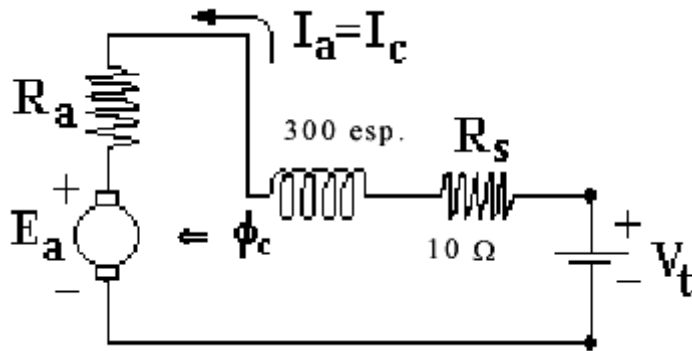


### Motor CC Série

Neste tipo de motor a corrente que circula pelo campo é o mesmo que circula pela armadura. Como o torque é proporcional ao fluxo magnético, que por sua vez é proporcional à corrente de campo, concluímos que neste motor o torque é dado por:

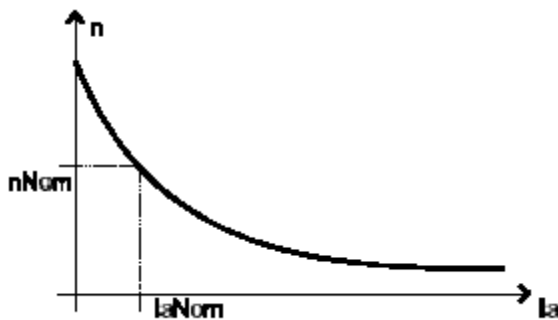


$$T = K \cdot I_a^2$$



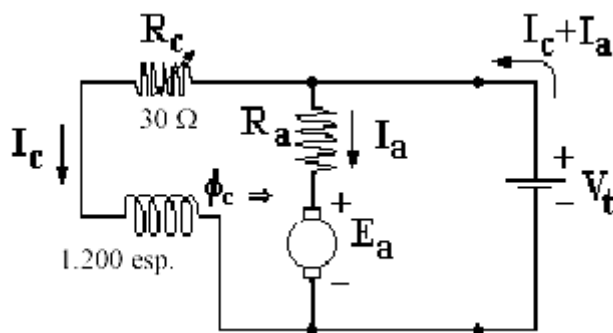
viável economicamente para pequenos motores de fração de CV. A velocidade do motor série é dado por:

$$n = \frac{V_a - I_a(R_a + R_f)}{K \cdot I_a}$$



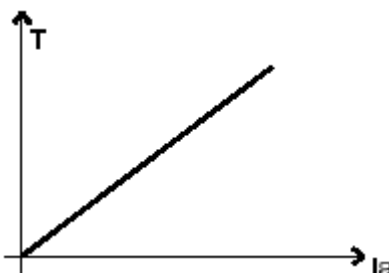
Então, no motor série a vazio, com baixa corrente de armadura, a sua velocidade tende a ser alta, o que é indesejável. Assim, este tipo de motor deve partir com uma carga mecânica acoplada no seu eixo. Também se percebe que este motor nunca vai disparar a sua velocidade, pois não depende da corrente de campo e se a corrente de armadura for a zero, não há torque e sua velocidade cai a zero também.

### Motor Paralelo ou Shunt

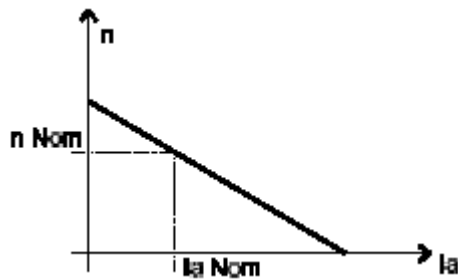


No caso do motor Shunt a corrente de armadura somada a corrente de campo nos dá a corrente da fonte de alimentação do motor. Nesse caso, a tensão aplicada na armadura é a mesma que é aplicada no campo. Dessa forma o fluxo magnético produzido pelo campo é praticamente constante, já que  $I_F$  permanece praticamente constante. Então, o torque do motor é função apenas da corrente de armadura.

$$T = K \cdot I_a$$



Para a inversão do sentido de rotação nos motores de corrente contínua, basta inverter as conexões das bobinas de campo ou inverter as conexões da bobina da armadura. Caso o motor seja de ímã permanente, basta inverter os terminais da armadura.



Neste tipo de motor, o torque de partida não é tão alto quanto no motor série, portanto não deve ser usado em cargas que exigem alto torque de partida. A velocidade do motor paralelo depende de  $I_a$ , já que o fluxo é constante, pela seguinte equação:

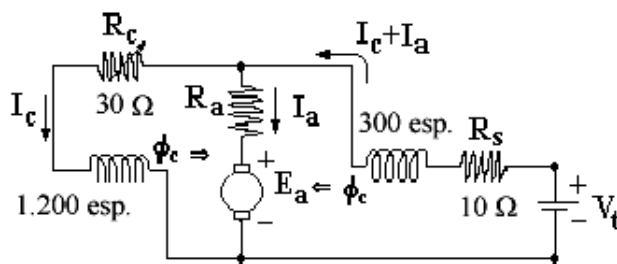
$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K \cdot \phi}$$

Então, se a corrente de armadura for grande (na partida), a velocidade do motor é pequena e cresce a medida em que aumenta a  $E_c$  (que por sua vez diminui  $I_a$ ) até alcançar o seu valor nominal. Este motor não tem problemas de excesso de velocidade na partida sem carga.

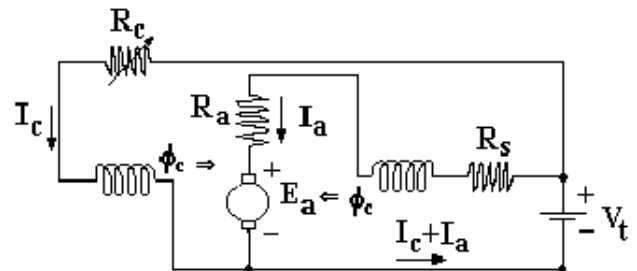
A curva ao lado, mostra a velocidade em função da corrente de armadura.

### Composto Curto e Longo

Neste caso também existe apenas uma fonte c.c. que alimenta tanto a excitação paralela como a série. A conexão entre os enrolamentos resulta na excitação composta curta ou longa, com características similares (figura abaixo).



Composto curto



Composto longo

### Inversão no Sentido de Rotação e Controle de Velocidade

Para inverter o sentido de rotação de qualquer motor CC é necessário inverter a corrente de armadura em relação a corrente de campo. Deve-se inverter somente um deles, e a inversão em ambos os circuitos manterá o mesmo sentido de rotação.

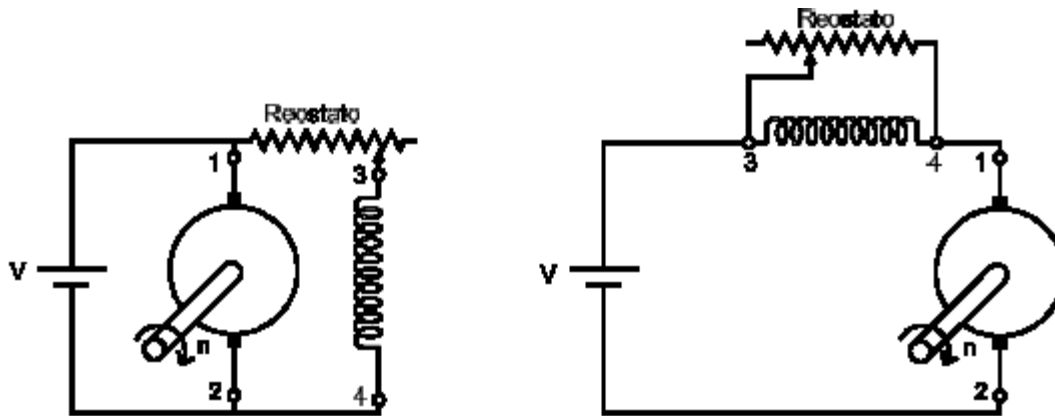
No momento da inversão, o motor que está girando num sentido, entra num processo de frenagem (freio) até alcançar a velocidade zero e depois começa a girar no sentido contrário.

Essa etapa de frenagem é muito importante para trens, elevadores, guindastes que necessitam de Força de Frenagem.

A principal aplicação dos motores de corrente contínua é o acionamento de máquinas com controle preciso de velocidade. Os métodos mais utilizados para este fim são:

- Ajuste da tensão aplicada na armadura do motor;
- Ajuste da corrente nas bobinas de campo, ou seja, controle do fluxo magnético do motor;
- Combinação dos anteriores.

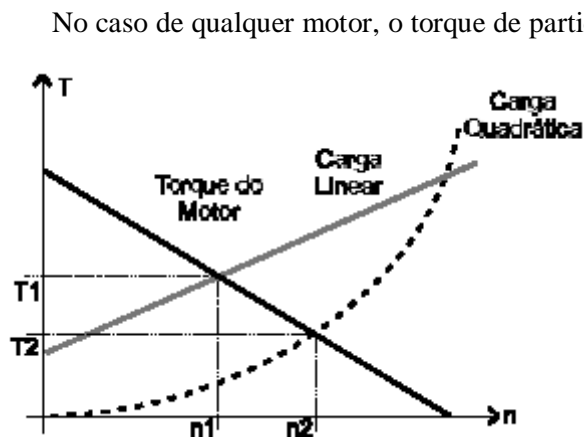
O controle de velocidade pode ser realizado através de um conversor estático CC ou por meio de um reostato como mostra a figura 8.5. Neste caso estamos controlando a velocidade através do ajuste da corrente das bobinas de campo.



### Torque do Motor e Resistente

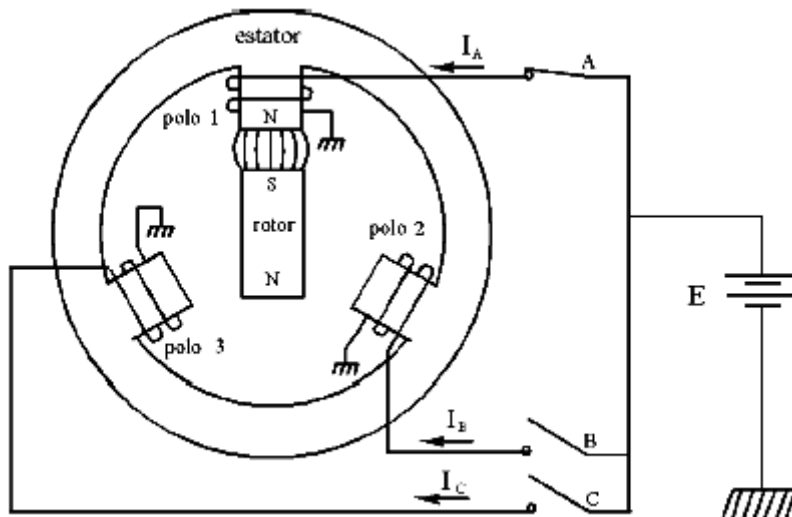
O torque do motor é a medida do esforço necessário para fazer girar um eixo, e é dado pela seguinte equação básica:

$$T = F \cdot \text{raio} (\text{N.m})$$



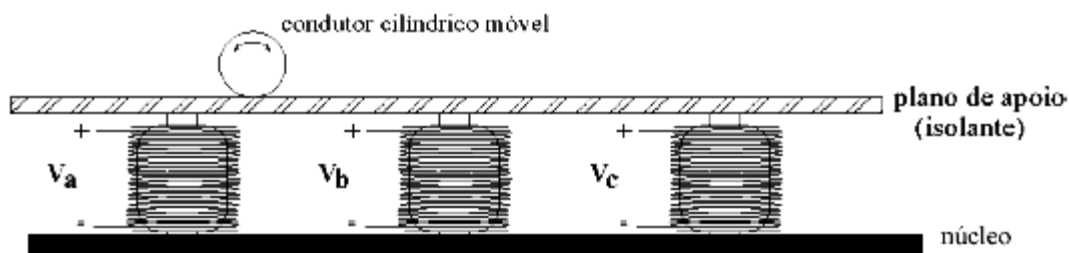
### Introdução ao Motor de Passo:

Um motor constituído como na figura abaixo é um motor de passo. Ele é diferente de todos os outros tipos de motores pois trabalha com sinais digitais ao invés de analógicos. Seu princípio de funcionamento está baseado no acionamento sequencial das bobinas do estator. O rotor de ímã permanente tende a acompanhar a sequência. O sentido do giro é controlado pelo sentido da sequência e a velocidade pela velocidade de comutação de uma bobina para outra.



### MOTOR LINEAR

Já vimos como pode ser produzido um campo magnético girante trifásico. Se as bobinas forem dispostas em linha, o campo passa a ser deslizante, o que pode ser comprovado colocando um cilindro de alumínio sobre um plano isolante, conforme ilustrado na figura abaixo.



### 6. Motores de CA

Neste tipo de motor, o fluxo magnético do estator é gerado nas bobinas de campo pela corrente alternada da fonte de alimentação monofásica ou trifásica, portanto trata-se de um campo magnético cuja a intensidade varia continuamente e cuja polaridade é invertida periodicamente. Quanto à velocidade do rotor do motor, há dois casos a considerar:

- **Motores Síncronos**
- **Motores Assíncronos**

No motor síncrono, o rotor é constituído por um ímã permanente ou bobinas alimentadas em corrente contínua mediante anéis coletores. Neste caso, o rotor gira com uma velocidade diretamente proporcional a frequência da corrente no estator e inversamente proporcional ao número de pólos

magnéticos do motor. São motores de velocidade constante e constitui-se a sua principal aplicação. São utilizados somente para grandes potências devido ao seu alto custo de fabricação.

A seguinte equação define a velocidade síncrona  $n_s$  deste tipo de motor:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

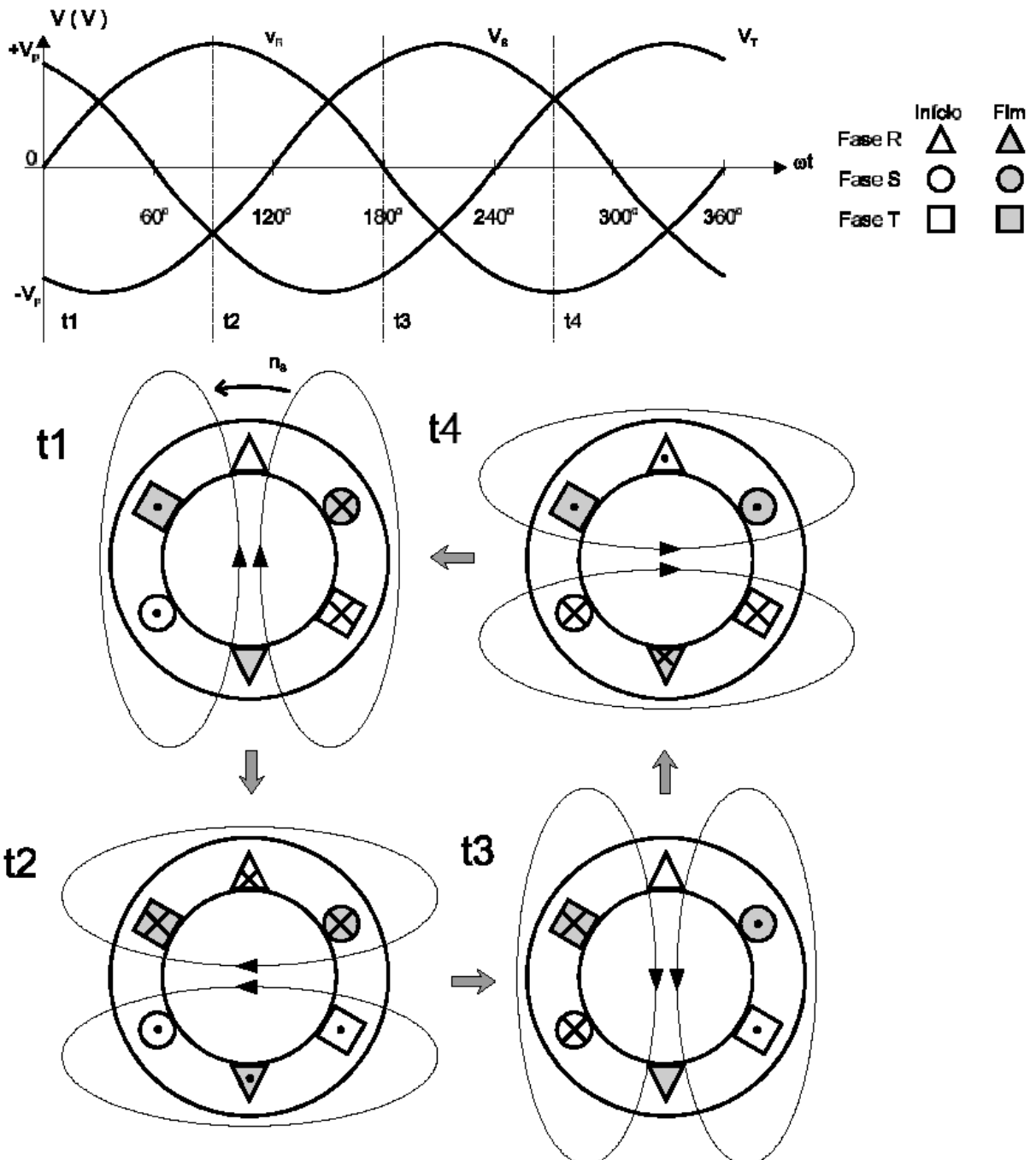
Onde:

- ♦  $n_s$ : velocidade síncrona ( rpm )
- ♦  $f$ : frequência da corrente do rotor ( Hz )
- ♦  $p$ : número de pólos magnéticos do motor

Os motores assíncronos são aqueles cujo rotor ou é feito por barras metálicas interligadas formando uma estrutura conhecida como “rotor gaiola de esquilo” ou é feito por bobinas de forma similar ao estator. É um tipo de motor que trabalha sempre abaixo da velocidade síncrona, daí o nome assíncrono.

### Campo Magnético Girante:

O princípio de funcionamento do motor CA Trifásico é o campo magnético girante do estator. Ele está fortemente relacionado ao defasamento angular de  $120^\circ$  das correntes nas três fases e na disposição



geométrica das bobinas no rotor, como podemos observar na figura abaixo:

Como podemos observar pelo instante de tempo T1, o sentido das correntes nas três fases gera campos magnéticos nas bobinas fora de fase. A direção e o sentido do campo magnético do estator é portanto a resultante da direção e sentido do campo magnético de cada uma das bobinas, conforme indicado na figura acima. Observe que ao passarmos do instante T1 para T2, temos uma mudança na direção do campo magnético, mas não na sua magnitude. E por fim ao passarmos para os instantes T3 e T4, temos que o vetor da direção resultante do campo magnético dá uma volta completa em torno do eixo do estator, ou seja, o campo magnético resultante da composição dos campos gerados pelas bobinas do estator é de forma tal que sua direção muda a cada instante, descrevendo uma circunferência em torno do eixo do estator, ou seja, o campo magnético do estator gira em torno do eixo, daí o nome **campo magnético girante** ou simplesmente CMG.

A velocidade do giro do CMG depende da frequência da tensão alternada e do n° de pólos magnéticos do motor. A seguinte equação define a velocidade síncrona  $n_s$  deste tipo de motor:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

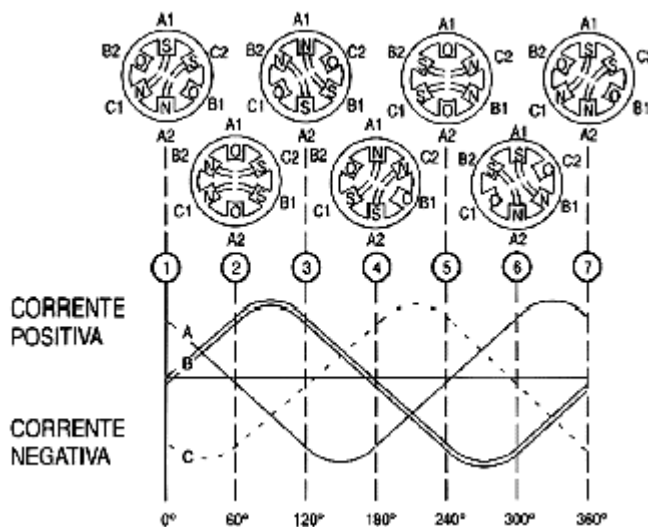
Onde:

- ♦  $n_s$ : velocidade síncrona ( rpm )
- ♦  $f$ : frequência da corrente do rotor ( Hz )
- ♦  $p$ : número de pólos magnéticos do motor

Outra característica importante do CMG é o sentido de rotação que está associados a sequência em que as fases atingem seus pontos de máximo, que é simplesmente chamada de **sequência de fase**. Basta alterar inverter a sequência de fase para que o CMG gire ao contrário. Uma forma de inverter a sequência de fase é trocar duas fases de alimentação do motor.

### Pólos Magnéticos em Motores CA:

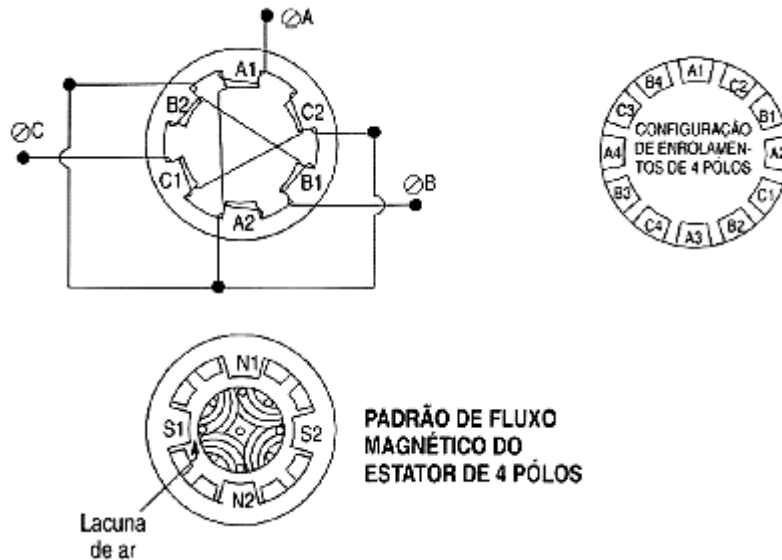
O CMG, estabelece no rotor sempre um n° par de pólos magnéticos (Norte e Sul), devido ao fato de não haver na natureza um único polo isolado. A polaridade é estabelecida pelo arranjo das bobinas e pelo sentido que a corrente percorre cada enrolamento. As vezes, um polo do motor pode ser produzido pela interação do campo magnético de duas ou mais bobinas gerando assim um polo. Os pólos estão associados aos pontos de concentração de campo magnético, assim sendo, não necessariamente um pólo fica localizado sobre uma bobina.



No caso da analisado acima, temos um motor de dois pólos, isto é, apenas uma região de Norte e Sul. Entretanto, há casos em que há mais de dois pólos magnéticos. São muito comuns os motores de dois e quatro pólos.

Abaixo, temos uma figura que ilustra um motor de dois pólos magnéticos, usando a mesma distribuição de bobinas que o utilizado no estudo do CMG. Verifique que tanto o Norte como o Sul não estão sobre as bobinas, mas entre elas. Isto ocorre porque a resultante está no meio das bobinas nos instantes de tempo analisados.

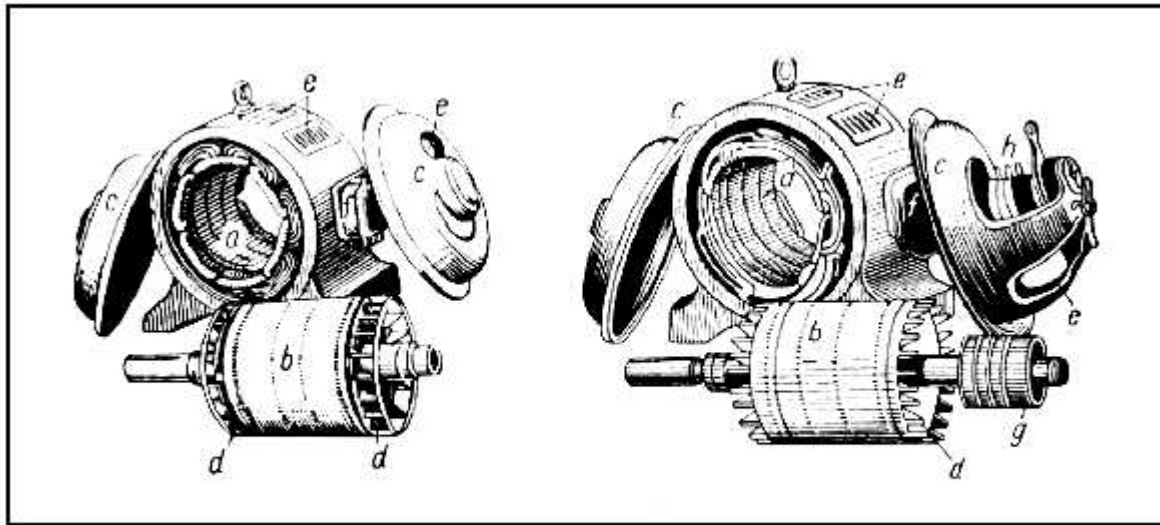
A figura abaixo, ilustra a distribuição física de um motor de quatro pólos magnéticos.



### Motor de Indução:

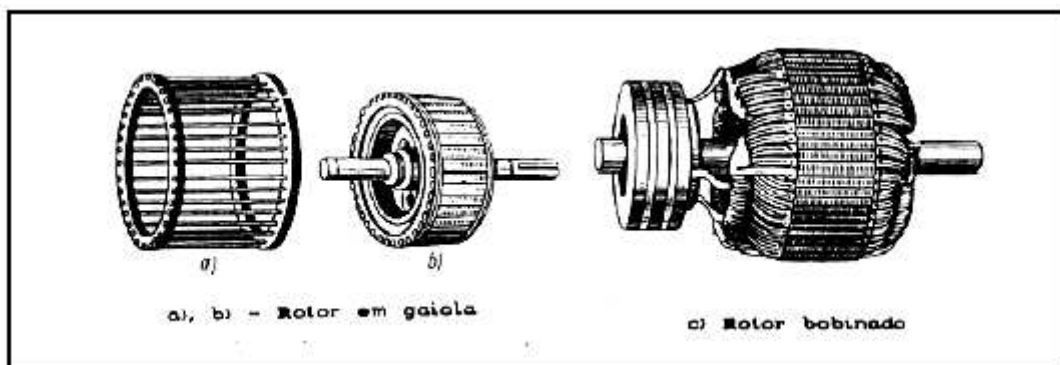
A máquina de indução é a mais simples das máquinas elétricas rotativas, seja sob o ponto de vista de sua construção, seja sob o ponto de vista de sua operação. O seu principal campo de aplicação é o acionamento, isto é, ela opera sempre como motor. Apesar de eletricamente ser possível a máquina de indução funcionar como gerador, são raros os exemplos neste campo de aplicação. Nas fábricas e plantas industriais os motores de indução são encontrados às centenas. Assim, ao longo deste capítulo, a menos que se afirme o contrário, a máquina de indução será sempre considerada motor. Será visto posteriormente, seu papel como gerador e como freio.

Como toda máquina elétrica rotativa, o motor de indução possui uma parte fixa, *o estator ou armadura*, e uma parte que gira, *o rotor*. Não há, praticamente, nenhuma diferença entre o estator de um motor ou gerador síncrono e o estator de um motor de indução de mesma potência, mesmo número de pólos, etc. *O rotor é que é diferente*. Enquanto nas máquinas síncronas o rotor de polos salientes é uma montagem comum, nos motores de indução ela não existe: todos os rotores de motores de indução são de polos lisos. Como toda máquina rotativa, os núcleos do rotor e do estator são montados com chapas de aço silício, de granulometria orientada, para reduzir a relutância do circuito magnético e as perdas magnéticas devidas ao fenômeno das correntes parasitas. Os pacotes de chapas de aço são perfurados em diversas formas (circular, retangular, etc) criando *as ranhuras*. Enquanto o estator é fixado em bases metálicas ou de concreto, o rotor é montado sobre um eixo de aço que se acopla, mecanicamente, ao eixo da máquina a ser acionada.



a: Estator; b: Rotor; c: Tampas laterais; d: Ventilador; e: Grade de ventilação  
f: Caixa de terminais; g: Anéis deslizantes; h: escovas e porta escovas

Os motores de indução podem ser monofásicos ou polifásicos (trifásicos). Os motores de indução monofásicos podem ser estudados como um caso particular dos motores trifásicos. Enquanto os motores de indução trifásicos são os acionadores mais comuns utilizados na indústria, praticamente em qualquer nível de potência, o principal campo de aplicação dos motores monofásicos é o acionamento de pequenas cargas, destacando-se as de uso doméstico (bombas d'água, geladeiras, ventiladores e outros). Como tais cargas são de pequena potência, menor do que 1 kW, eles recebem, algumas vezes, o nome de *motores fracionários*. Os motores monofásicos de potência maior do que 1 kW são usados no acionamento de cargas de uso rural e comercial, onde a tensão disponível é quase sempre monofásica. O estudo que será feito se inicia com os motores trifásicos. Isto se justifica pelo fato de a operação e mesmo a construção de um motor trifásico ser mais simples do que a de um monofásico.



Nas ranhuras do estator está montado um enrolamento trifásico, conforme caracterizado no capítulo anterior, que será percorrido por uma corrente trifásica equilibrada quando o motor for ligado à rede elétrica. Será criada a FMM girante do estator, conforme definido no capítulo I, que vai girar a uma velocidade definida pela frequência da rede e número de polos do motor. As ranhuras do rotor também

recebem um segundo enrolamento trifásico que é uma reprodução do enrolamento do estator, quando o rotor for do tipo *rotor bobinado*. Um outro tipo de rotor é o chamado *rotor em gaiola de esquilo* ou, simplesmente, *rotor em gaiola* que é o tipo mais usado. O enrolamento do rotor bobinado é, em geral, ligado em estrela e os terminais de cada uma

das fases são soldados a três anéis de cobre montados sobre o eixo (fig.c), isolados entre si e do eixo, que lhe dão o seu outro nome: *rotor em anéis*. Sobre eles deslizam escovas de carvão que irão ligar os terminais do enrolamento a um reostato trifásico que terá um papel importante na partida do motor, como se verá mais adiante.

O rotor em gaiola não apresenta a forma convencional de um enrolamento, isto é, ele não é feito de fios enrolados formando bobinas, como o rotor bobinado. O seu “enrolamento” é feito de barras de cobre ou de alumínio que se acham curto-circuitadas nas suas extremidades por dois anéis chamados anéis de curto-circuito que lhe dão o outro nome: *rotor em curto-circuito*. A forma do conjunto lembra uma gaiola de esquilo. Como se percebe, trata-se de um enrolamento muito mais simples do que o de rotor bobinado e que tem uma propriedade que o rotor bobinado não tem: ele reproduz o número de polos do enrolamento do estator. Se o estator é um enrolamento de 2 polos, o rotor formará, por indução, dois polos; se o enrolamento do estator é de 4 polos, serão formados 4 polos no rotor. Isto não ocorre com o rotor bobinado cujo enrolamento deve ser igual ao do estator em número de polos e de fases.

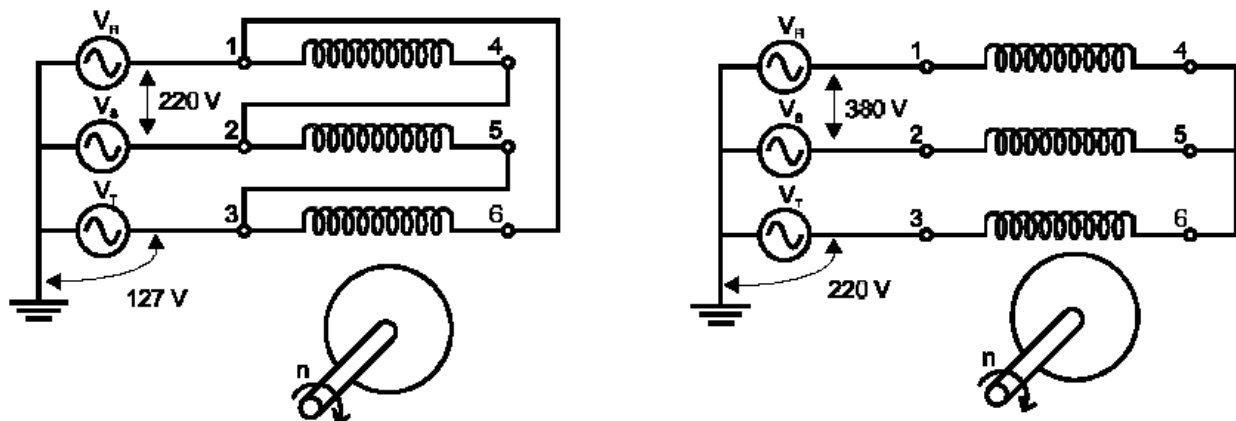
### Escorregamento:

Conforme foi visto no capítulo I, o sentido de atuação do conjugado eletromagnético de uma máquina elétrica rotativa que opera como motor é no mesmo sentido da rotação. O rotor tende a acompanhar o campo girante do estator, com a sua FMM atrasada do ângulo de carga à em relação à FMM do estator. Enquanto a FMM girante do estator é produzida por correntes trifásicas equilibradas resultantes da tensão aplicada nas três fases do enrolamento, a FMM do rotor tem sua origem em *correntes trifásicas induzidas no seu enrolamento* pelo fluxo girante do estator. Assim sendo, só será possível haver correntes induzidas no rotor se, de acordo com a lei de Lenz-Faraday, houver uma variação de fluxo através das bobinas que compõem o enrolamento. Ou, dito de outra forma, se os condutores das bobinas “cortarem” as linhas de força do fluxo girante do estator. Para que as linhas de força do fluxo girante do estator sejam “cortadas” é necessário que o rotor gire a uma velocidade diferente da velocidade desse fluxo, isto é, entre a *velocidade síncrona* do fluxo girante do estator e a *velocidade mecânica* do rotor deve haver uma velocidade relativa.

Quando a máquina de indução é motor, a rotação do rotor é menor do que a velocidade síncrona do campo girante do estator. Se ela funciona como gerador, o rotor deve ser acionado a uma velocidade maior do que a velocidade síncrona. O conjugado eletromagnético resultante atua em sentido oposto ao da rotação. Esta diferença entre as duas velocidades é chamada *escorregamento* e ela é sempre tomada em valores percentuais ou em p.u. da velocidade síncrona. Chamando de  $n_1$  a velocidade síncrona do campo girante do estator e  $n$  a velocidade do rotor, o escorregamento será definido pela equação abaixo:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

O motor de indução trifásico comumente usado no Brasil apresenta seis terminais acessíveis, dois para cada enrolamento de trabalho  $E_t$  e, a tensão de alimentação destas bobinas é projetada para 220V. Para o sistema de alimentação 220/127V-60Hz este motor deve ser ligado em delta e para o sistema 380/220V-60Hz o motor deve ser ligado em estrela conforme mostra a figura abaixo:



Para a inversão no sentido de rotação nos motores de indução trifásicos basta inverter duas das conexões do motor com as fontes de alimentação.

### Perdas No Motor

As perdas que ocorrem num motor dividem-se em quatro diferentes tipos:

- Perdas eléctricas
- Perdas magnéticas
- Perdas mecânicas
- Perdas parasitas

- As perdas eléctricas são do tipo  $\{ RI^2 \}$ , aumentam acentuadamente com a carga aplicada ao motor. Estas perdas, por efeito de Joule podem ser reduzidas, aumentando a secção do estator e dos condutores do rotor.

- As perdas magnéticas ocorrem nas lâminas de ferro do estator e do rotor. Ocorrem devido ao efeito de histerese e às correntes induzidas (neste caso, correntes de Foucault), e variam com a densidade do fluxo e a frequência. Podem ser reduzidas através do aumento da secção do ferro no estator e rotor, através do uso de lâminas delgadas e do melhoramento dos materiais magnéticos.

- As perdas mecânicas são devido à fricção dos procedimentos, ventilação e perdas devido à oposição do ar. Podem ser reduzidas, usando procedimentos com baixa fricção e com o aperfeiçoamento do sistema de ventilação.

- As perdas parasitas (stray losses) ou perdas extraviadas são devidas a fugas do fluxo, distribuição de corrente não uniforme, imperfeições mecânicas nas aberturas para escoamento do ar, e irregularidades na densidade do fluxo do ar ao ser escoado pelas aberturas. Podem ser reduzidas através da optimização do projecto do motor e ainda de uma produção ou fabrico cuidadoso.

Apresentámos seguidamente a distribuição das perdas no motor, as perdas parasitas não são representadas por terem um valor insignificante.

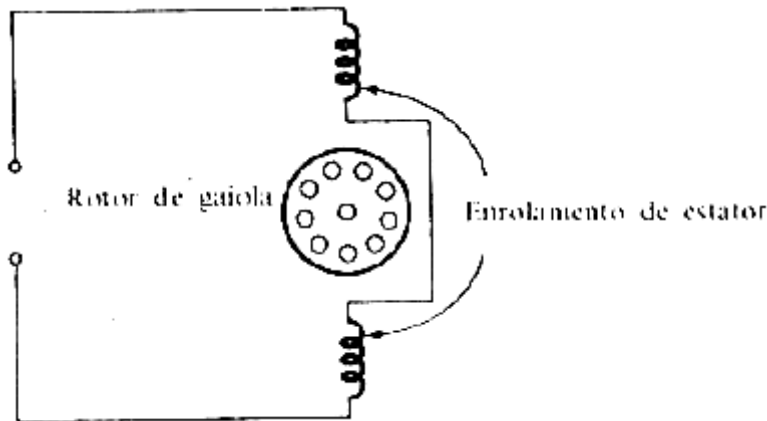
## MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

### A) CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A possibilidade de se obter um campo magnético girante com facilidade é uma das principais vantagens da corrente trifásica em relação à monofásica. Todavia, motores de indução monofásicos são fabricados apesar de, tecnicamente, serem inferiores aos motores trifásicos. Eles são utilizados principalmente no acionamento de pequenas cargas tais como ventiladores domésticos, geladeiras, pequenas bombas d'água, etc.

O estator do motor monofásico é construído para receber dois enrolamentos: um, chamado *enrolamento principal*, e um outro, chamado *enrolamento auxiliar*, que é essencial para se dar a partida do

motor, como se verá mais abaixo. O rotor é sempre em gaiola. O campo magnético criado pelo enrolamento principal ao ser percorrido por uma corrente alternada senoidal é um campo pulsativo cujo eixo magnético é fixo no espaço, mas cujo sentido varia de acordo com a corrente. O fluxo deste campo induz tensões e correntes nas barras do rotor, da mesma forma que o fluxo magnetizante criado pelo enrolamento primário de um transformador induz tensões e correntes no enrolamento secundário.



A figura acima mostra o esquema simplificado de um motor de indução monofásico. Não está indicado o enrolamento auxiliar mas apenas as duas metades do enrolamento principal. A corrente alternada que alimenta o enrolamento do estator cria uma FMM pulsativa cujo eixo é fixo no espaço, variando sua polaridade, no tempo, de acordo com a frequência da corrente. Nas barras do rotor as correntes induzidas têm um sentido tal que produzem uma FMM contrária à FMM do estator. O eixo da FMM do rotor coincide com o eixo da FMM do estator sendo, portanto, o ângulo de carga igual a zero. Não há, como consequência, conjugado que possa atuar sobre o rotor e fazê-lo partir. Nesta condição, o motor é simplesmente um transformador estático com o secundário (rotor) curto-circuitado. Esta ausência de conjugado de partida no motor monofásico pode também ser explicada da seguinte maneira: as correntes induzidas no rotor criam campos magnéticos ao redor dos condutores que interagem com o campo pulsativo do rotor dando origem a forças que atuam sobre esses condutores. No caso da figura 1, considerando o eixo magnético da FMM do estator como uma vertical, as correntes induzidas nos condutores do rotor à esquerda da vertical terão o sentido contrário ao das correntes induzidas nos condutores da direita. Portanto, as forças que atuam sobre eles são iguais e de sentidos opostos sendo sua resultante nula. A ausência de um conjugado de partida é uma característica dos motores de indução monofásicos. Quando ligado diretamente à rede, o motor não parte, a menos que lhe seja dado um impulso inicial por uma força externa que o fará girar no sentido da força aplicada.

Além das explicações acima, a ausência de conjugado de partida no motor monofásico pode ser entendida à luz da teoria dos *dois campos magnéticos girantes* presentes na operação do motor monofásico de indução. Essa teoria é extremamente útil para explicar não só a ausência do conjugado de partida como também servir de base para a elaborar o circuito equivalente do motor. Por esta teoria, a FMM pulsativa criada no estator pela corrente alternada  $i = I_m \sin \omega t$  é composta de duas FMMs, iguais em módulo, que giram, no espaço, em sincronismo com a frequência da rede, porém em sentidos opostos.

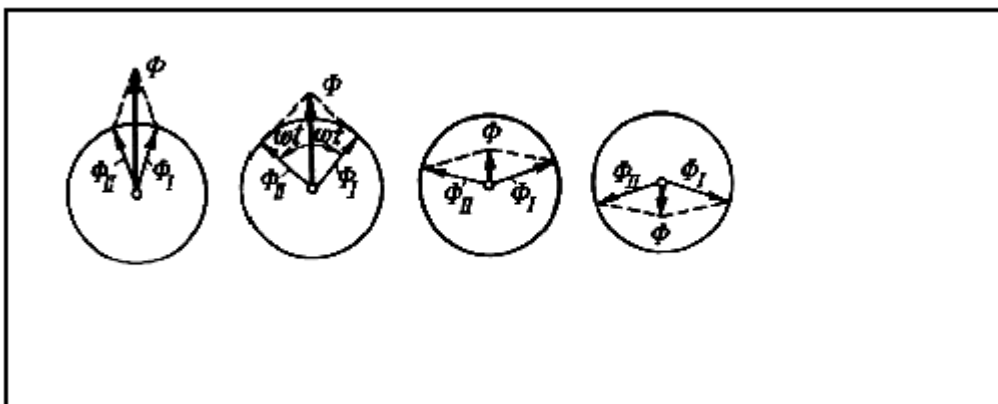
Como foi visto ao se estudar o campo girante do motor de indução trifásico, a expressão da FMM de um campo magnético pulsativo, criado por uma corrente alternada senoidal, é dada por:

$$F_1 = \frac{F_{1\max}}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_{1\max}}{2} \cos(\theta + \omega t)$$

As parcelas do segundo membro da equação acima são as expressões das FMMs de dois campos magnéticos girantes cujas amplitudes são iguais à metade da amplitude da FMM do campo magnético pulsativo e cujos sentidos de rotação são opostos. A figura abaixo mostra a soma fasorial, em quatro instantes diferentes, dos fluxos dos dois campos girantes que formam o fluxo pulsativo.

Cada um dos fluxos a metade do fluxo pulsativo  $\varphi$

Esta soma é verdadeira somente para o rotor parado. Com o rotor parado, ambos os fluxos girantes induzirão nas barras correntes iguais, porém de sentidos contrários que, interagindo com o campo pulsativo, vão produzir conjugados iguais de sentidos opostos que não permitem o rotor partir. Se uma força externa atua no seu eixo, no sentido horário ou anti-horário, o rotor continuará a girar no sentido da força aplicada, por si mesmo, até atingir uma velocidade próxima do sincronismo. Este fluxo que gira no mesmo sentido do rotor é chamado *fluxo girante direto* e o outro que gira no sentido oposto, *fluxo girante reverso*.



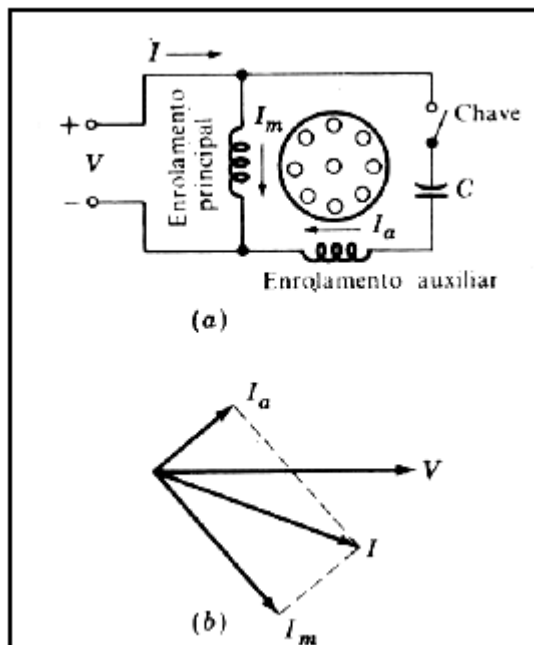
À medida que o rotor gira, o fluxo reverso será fortemente desmagnetizado e o fluxo resultante será praticamente o fluxo girante direto, para velocidades próximas do sincronismo. A desmagnetização do fluxo reverso é explicada da seguinte maneira: o escorregamento do rotor, girando à velocidade  $n$  no mesmo sentido do fluxo direto, com relação à velocidade síncrona  $n_1$  do fluxo reverso, é igual a:

$$s' = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1-s)}{n_1} = 2 - s$$

Portanto, a frequência de escorregamento produzida pelo fluxo reverso é muito maior do que a produzida pelo fluxo direto. Por exemplo, para uma frequência da rede de 60 Hz e um escorregamento de 0,05 produzido pelo fluxo direto, a frequência de escorregamento relativa ao fluxo direto seria  $0,05 \times 60 = 3$  Hz, enquanto a relativa ao fluxo reverso seria  $(2-0,05)60 = 117$  Hz, ou seja, vezes maior do que a do fluxo direto. A essa frequência a reatância do rotor é muito maior do que a sua resistência e, como consequência, as correntes devidas a este campo serão praticamente reativas, exercendo um forte efeito desmagnetizante no fluxo reverso. Assim, para pequenos valores de escorregamento, o conjugado de um motor de indução monofásico é produzido, praticamente, pelo fluxo direto. Existe ainda um pequeno fluxo reverso que produz um efeito frenante, pois o conjugado que ele produz se opõe ao conjugado produzido pelo fluxo direto. A figura abaixo mostra em linhas tracejadas as curvas características dos conjugados produzidos pelos fluxos direto e reverso (para frente e para trás, na figura) e em linha contínua a característica resultante.

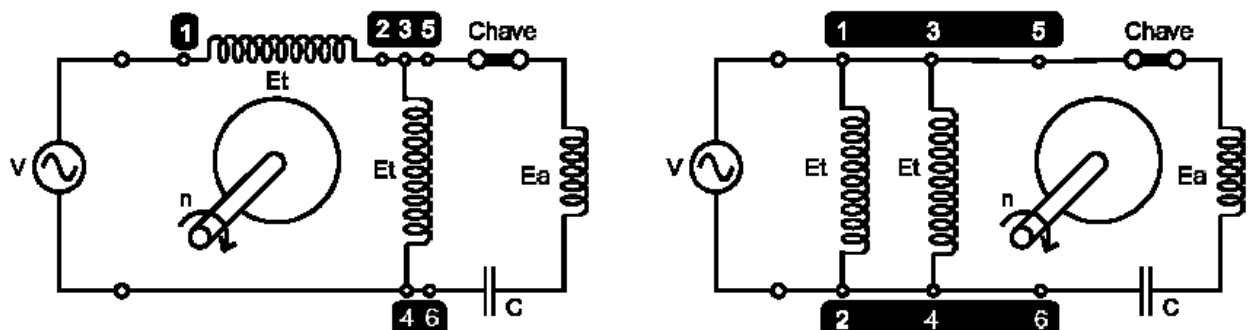
Como se pode observar, à velocidade síncrona ( $n=n_1$ ), diferentemente do que ocorre no motor trifásico, há um conjugado frenante devido ao conjugado reverso atuando no rotor do motor monofásico. A corrente que circula no rotor é formada pela superposição de duas correntes de frequências muito diferentes. A perda

jólica do rotor é a soma das correntes induzidas pelos dois campos separadamente. Por esta razão, a perda jólica no rotor de um motor monofásico é bem maior do que a que ocorre num motor trifásico, o que o torna um motor de menor rendimento do que o trifásico correspondente



A figura b mostra o diagrama fasorial na partida do motor onde se vê a corrente de partida do motor  $I$  composta das correntes  $I_a$  do enrolamento auxiliar, adiantada da tensão  $V$ , e  $I_m$  do enrolamento principal, atrasada da tensão  $V$ . Alguns motores têm capacitor permanente no seu circuito auxiliar. Nesse caso, o circuito auxiliar não é interrompido após a partida, permanecendo ligado durante a operação normal do motor. Quando se deseja inverter o sentido de rotação do motor monofásico basta inverter entre si os terminais do enrolamento auxiliar ligados aos terminais do enrolamento principal.

Devido ao seu baixo rendimento por causa das elevadas perdas jólicas do rotor, os motores monofásicos não devem ser usados no acionamento de cargas acima de 1 kW, mas sim no acionamento de cargas pequenas, ditas fracionárias, (frações de 1 kW), tais como pequenos compressores de ar, máquinas rurais, bombas d'água etc. É possível operar um motor trifásico ligado a uma rede monofásica. Esta possibilidade pode ocorrer, por exemplo, nas redes rurais que alimentam as fazendas e chácaras por redes monofásicas e se dispõe de um motor trifásico.



O resultado da ação das correntes nos enrolamentos de trabalho e auxiliar é um campo magnético girante no estator, que faz o motor partir. Após a partida enrolamento auxiliar é desligado através de uma chave centrífuga que opera a cerca de 75% da velocidade síncrona.

O conjugado de partida, neste caso, é moderado. Para aumentar o conjugado de partida é usado um capacitor, ligado em série com o enrolamento auxiliar e a chave centrífuga. Esta técnica é utilizada para cargas de partida difícil, tais como: compressores, bombas, equipamentos de refrigeração, etc.

O motor de indução monofásico comumente usados no Brasil apresenta seis terminais acessíveis, sendo quatro para os dois enrolamentos de trabalho Et (1,2,3 e 4), bobinas projetadas para tensão de 127 V, e dois para o circuito auxiliar de partida ( 5 e 6 ), também projetado para a tensão de 127 V. A figura acima mostra o esquema de ligação do motor de indução monofásico para as tensões de alimentação de 127 e 220 V fase-neutro.

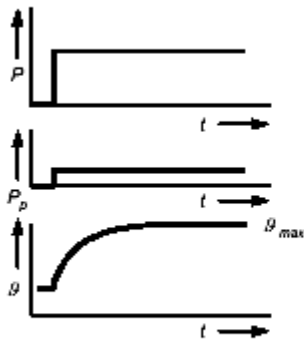
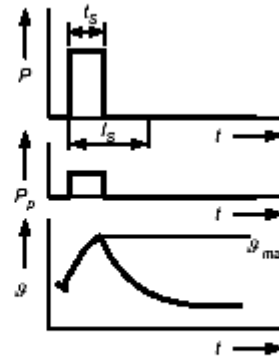
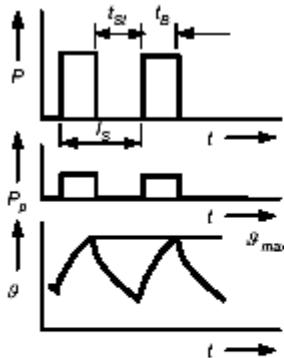
### **Regime de Serviço**

Um motor elétrico não vai, necessariamente, ficar ligado o tempo todo, de modo que, como esse fato vai influir sobre o dimensionamento da potência necessária para acionar uma carga, a norma de motores definiu 8 regimes diferentes, representados no que segue. Nessas curvas, a primeira indica a grandeza e o tempo de circulação da carga ligada ( P , em watts ), a segunda, as perdas ( joule e magnéticas ) que aparecem durante a fase de funcionamento, e a terceira, a elevação de temperatura que ocorre devido as perdas citadas.

Observe-se que, a temperatura máxima que o motor vai poder ter ( soma da temperatura ambiente + o aquecimento devido as perdas ) é um valor que depende dos materiais ( sobretudo isolantes ) com que o motor é fabricado. Nesse sentido, podemos fazer referência a norma NBR 7034, cuja **classificação geral** está integralmente reproduzida mais adiante, e mais um **detalhamento de uma dessas classes**, para demonstrar o detalhe dado pela norma.

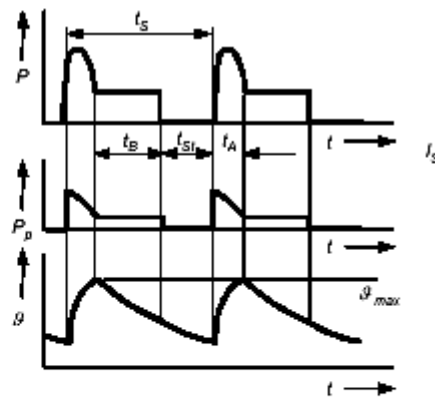
Portanto: a temperatura a que o componente / equipamento pode chegar , **NÃO É UM VALOR ÚNICO !**  
**Depende da classe de temperatura que os materiais suportam.**

## Regimes de serviço

S<sub>1</sub>: Serviço contínuoS<sub>2</sub>: Serviço de breve duraçãoS<sub>3</sub>: Serviço intermitente sem influência da partida

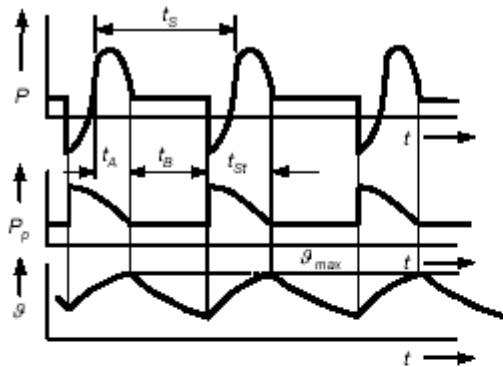
Fator de duração  
do ciclo:

$$l_r = \frac{l_B}{l_B + l_{St}}$$

S<sub>4</sub>: Serviço intermitente com influência da partida

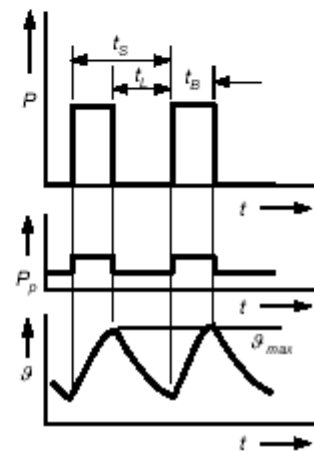
Fator de duração  
do ciclo:

$$l_r = \frac{l_A + l_B}{l_A + l_B + l_{St}}$$



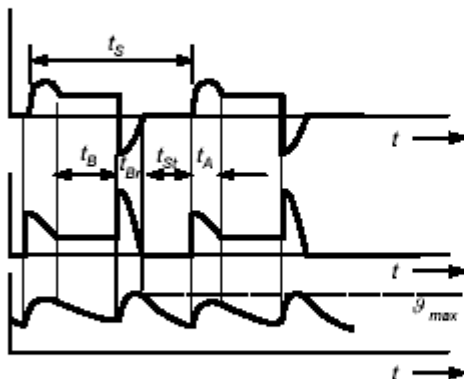
S<sub>7</sub>: Serviço ininterrupto com partida e frenagem elétrica

Fator de duração  
do ciclo:  $t_r = 1$



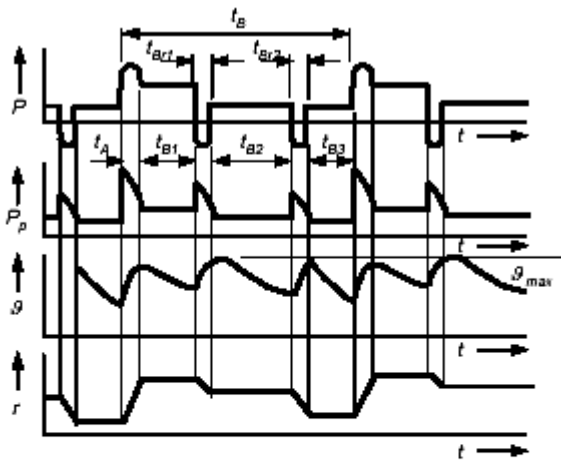
S<sub>6</sub>: Serviço contínuo com carga intermitente

Fator de duração  
do ciclo:  $t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L}$



S<sub>5</sub>: Serviço intermitente com influência da frenagem elétrica

Fator de duração  
do ciclo:  $t_r = \frac{t_A + t_B + t_{Br}}{t_A + t_B + t_{Br} + t_{St}}$



S<sub>8</sub>: Serviço ininterrupto com variações periódicas de velocidade

Fatores de duração do ciclo:

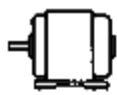
$$t_{r1} = \frac{t_A + t_{B1}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}}$$

$$t_{r2} = \frac{t_{Br1} + t_{Br2}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}}$$

### FORMAS CONSTRUTIVAS.

Na construção do motor, um dos aspectos a serem considerados é a sua **fixação**, que pode ser feita de diversas maneiras, dependendo basicamente do **projeto da máquina mecânica acionada**. A norma brasileira, baseada na IEC, define as seguintes formas, identificadas pelas letras **IM** ( de International Mounting System ), seguido de uma letra e um ou dois números característicos.

Formas construtivas NBR 5031 / DIN IEC 34 Parte 7



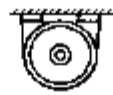
IM B3



IM B6



IM B7



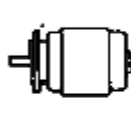
IM B8



IM V5



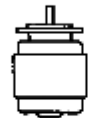
IM V6



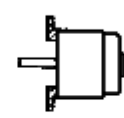
IM B5



IM V1



IM V3



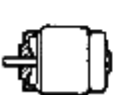
IM B9



IM V8



IM V9



IM B14



IM V18



IM V19



IM B35



IM B34

**CLASSIFICAÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS ISOLANTES.**

Baseado na norma NBR 7034, os motores podem pertencer a uma das seguintes Classes de Temperatura:

Classe	Temperatura Máxima ( °C )	Temperatura de Serviço ( °C )
Y	90	80
A	105	95
E	120	110
B	130	120
F	155	145
H	180	170
C	Acima de 180	Depende do material

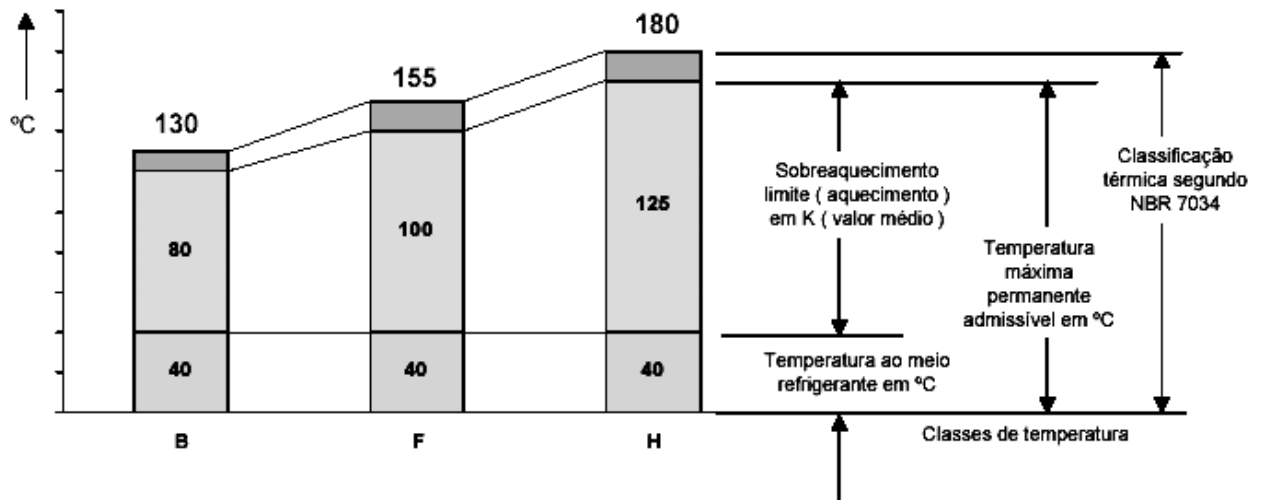
Cada uma dessas classes é formada de materiais, particularmente isolantes, que são os termicamente mais sensíveis, suportando menores temperaturas do que os metais utilizados. Os materiais que suportam as temperaturas mencionadas **estão indicados em cada Classe da norma**, do mesmo modo como o exemplificado na tabela que segue:

Isso, representado graficamente, leva a figura que segue, onde se destaca:

- A temperatura ambiente de referência é de 40°C, conforme Norma. **Temperaturas diferentes dessa, precisam de um fator de correção da potência disponível no motor**
- A temperatura total atuante sobre o material é a soma da temperatura ambiente, mais a elevação de temperatura dada pelas perdas, e deduzido um valor de segurança, de 10-15°C
- Quanto **maior a temperatura** que o material isolante suporta, ou quanto **maior a troca de calor das perdas, maior a potência disponível no motor.**

Classe	Materiais Isolantes	De aglutinação impregnação ou revestimentos	De impregnação para tratamento do conjunto
F / 155°C	Fibra de vidro Amianto	Nenhum	-
Temperatura máxima de serviço = 145°C	Tecido envernizado de fibra de vidro. Mica aglutinada	Resinas alquídicas, poliéster de cadeia cruzada e poliuretanos com estabilidade térmica elevada. Resinas silicone-alquídicas	Resinas alquídicas, epoxi, poliéster de cadeias e poliuretanos com estabilidade térmica elevada. Resinas silicone-alquídicas e silicone fenólicas e outras de elevada classe de temperatura.

## Classe de isolamento VDE 0530

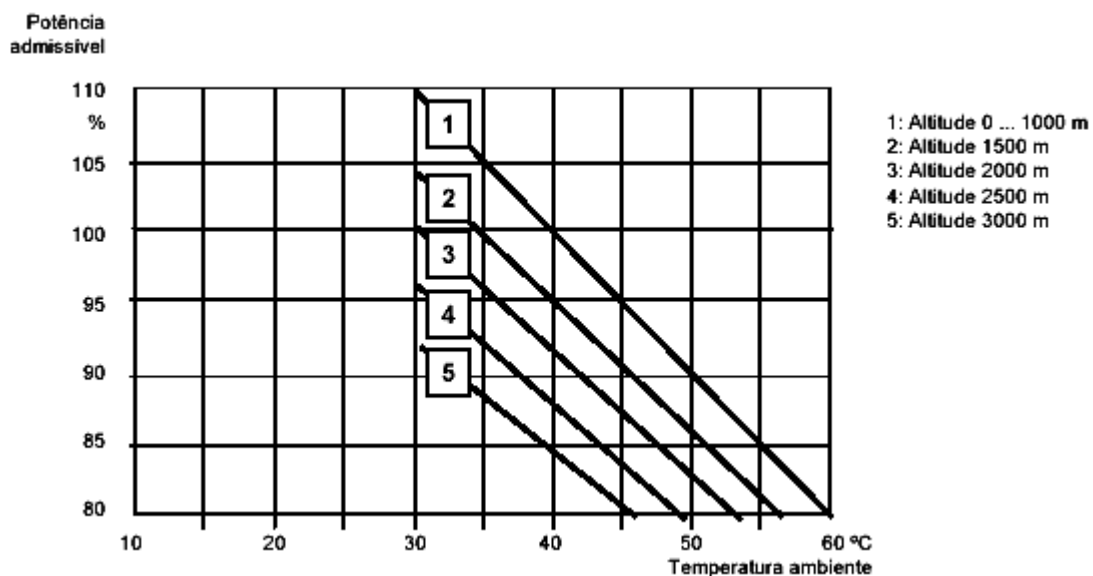
**ALTITUDE.**

Quanto **maior a altitude da instalação** onde vai o motor, **menor é a densidade do ar** e menor a **troca de calor**, pois são as moléculas do ar que absorvem esse calor. Porém, quanto menor a troca de calor, **maior o aquecimento interno da máquina**, e maior a necessidade de **reduzir as perdas**, reduzindo a corrente, com conseqüente **menor potência disponível**.

Portanto: **quanto maior a altitude, menor a potência disponível.**

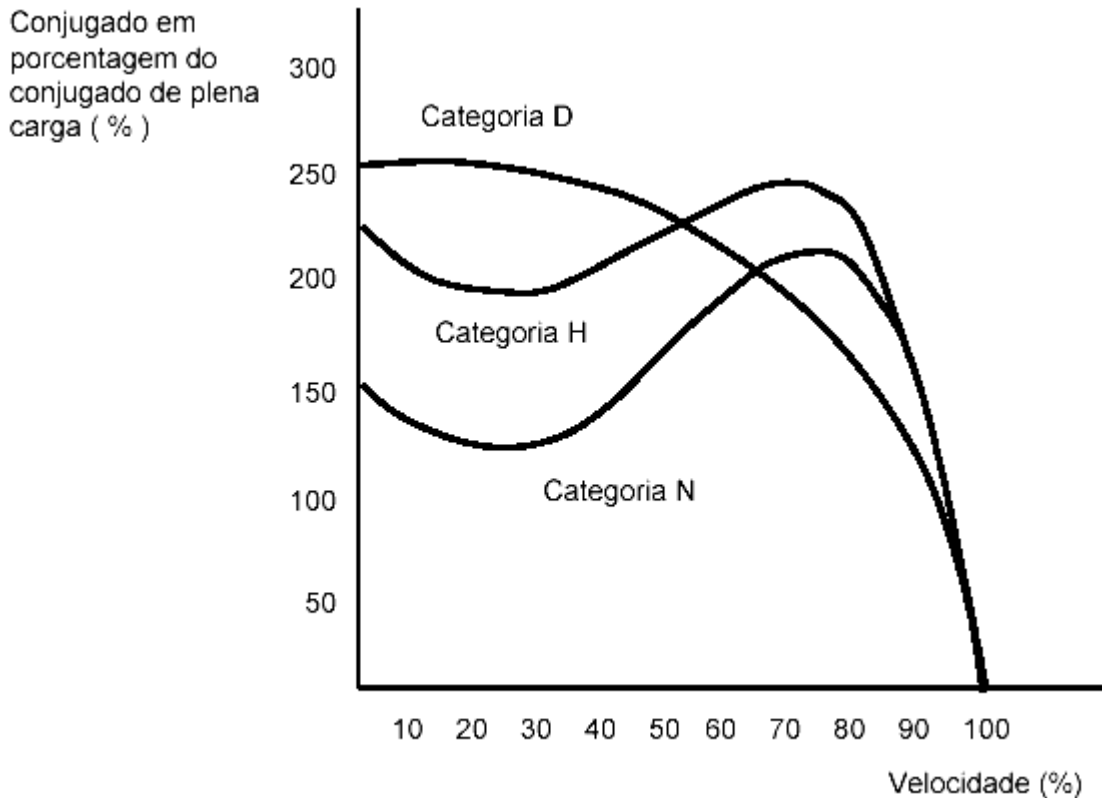
É bem verdade que, quanto maior a altitude, menor costuma ser a temperatura ambiente e, sob esse aspecto, maior a troca de calor. Conseqüentemente, pode até haver uma compensação entre uma redução de troca de calor devido a altitude e uma maior troca, devido a menor temperatura ambiente. De qualquer maneira, temos que aplicar os respectivos fatores de correção, que podem tanto ser indicados em tabelas quanto em gráficos.

As curvas do gráfico que segue nos dão uma idéia de um caso particular, onde esses dois fatores já estão combinados, demonstrando como se comporta a variação de potência em função dos mesmos.



**CATEGORIAS DE CONJUGADO.**

Variando a construção das ranhuras, o formato dos condutores dentro dessas ranhuras e o metal utilizado nessa construção, variam os conjugados, notadamente os de partida.



Tais conjugados tem as seguintes aplicações principais:

**Categoria N:** Conjugado e corrente de partida normais, baixo escorregamento. Se destinam a cargas normais tais como bombas, máquinas operatrizes e ventiladores.

**Categoria H:** Alto conjugado de partida, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Recomendado para esteiras transportadoras, peneiras, britadores e trituradores;

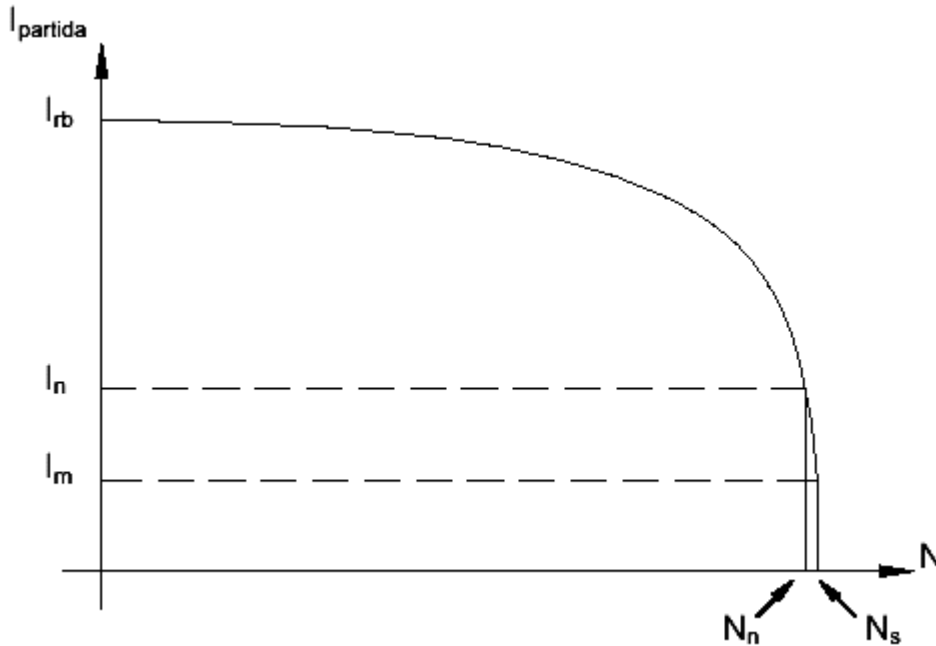
**Categoria D:** Alto conjugado de partida, corrente de partida normal, alto escorregamento.

Usado em prensas excêntricas, elevadores e acionamento de cargas com picos periódicos.

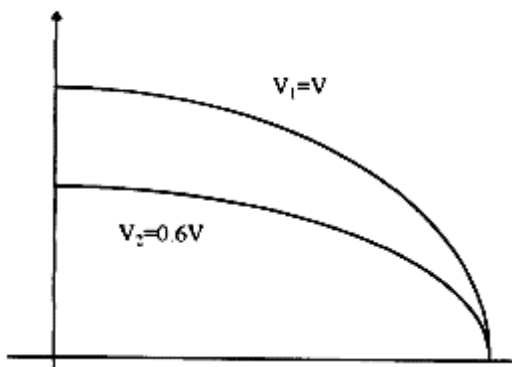
**7. Partida de Motores**

Durante a partida, os motores Elétricos absorvem uma corrente bem acima da nominal, principalmente os motores do tipo rotor gaiola de esquilo. Esta corrente costuma girar na faixa de 6 à 8 vezes a corrente nominal do motor. Após a partida a corrente tende a retornar ao seu valor normal, mas o problema é que o pico de corrente pode causar uma queda de tensão relativamente excessiva capaz de prejudicar o funcionamento das outras cargas da instalação elétrica durante o momento da partida. Por isso estas corrente normalmente precisam ser limitadas a fim de evitar tal transtorno.

Abaixo, temos uma curva representativa da corrente do motor em função da velocidade angular:



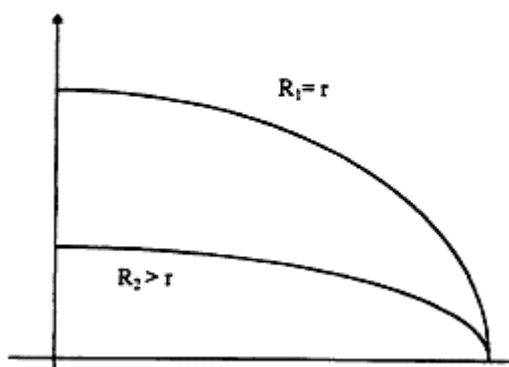
$I (x I_{nom})$



Como podemos ver, na partida, quando a velocidade do motor é praticamente zero, a corrente é máxima e se mantém elevada até próximo da velocidade de trabalho do motor, ou seja, a velocidade angular nominal.

A corrente consumida por um motor é função da tensão de alimentação como vemos no gráfico abaixo, por isso as chaves de partida são também conhecidas como chaves redutoras de tensão, pois o princípio é exatamente reduzir a tensão do motor durante a partida e depois aplicar a tensão nominal com o motor já em regime.

$I (x I_{nom})$



Quando o motor é do tipo rotor bobinado, o fechamento das bobinas do rotor pode ser feito por meio de resistências que reduzem a corrente de partida, conforme observamos no gráfico ao lado:

### Curvas Características Conjugado/Velocidade das Cargas Mecânicas

No universo das cargas mecânicas a serem acionadas, podemos destacar tipos básicos que obedecem a seguinte equação geral :

$$T_r = T_0 + (T_m - T_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^a$$

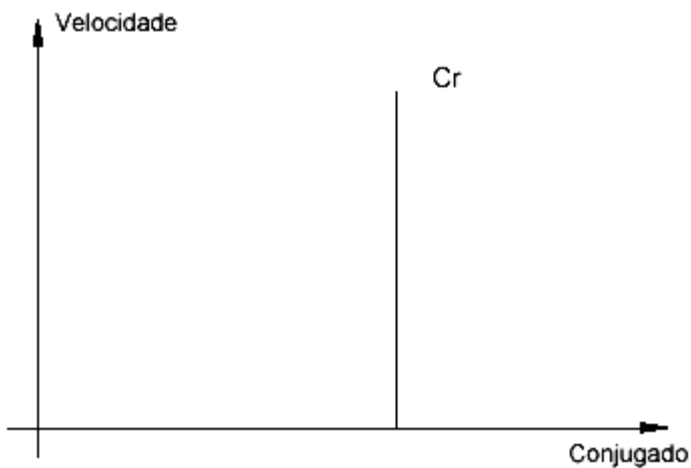
onde

$T_0$  = torque resistente para  $\omega$  igual a zero

$T_m$  = torque resistente nominal

$\omega_n$  = velocidade nominal

#### Cargas de conjugado resistente constante ( $a=0$ )



São cargas que mantêm inalterado seu conjugado para qualquer valor da velocidade do acionamento, sendo sua equação característica dada por:

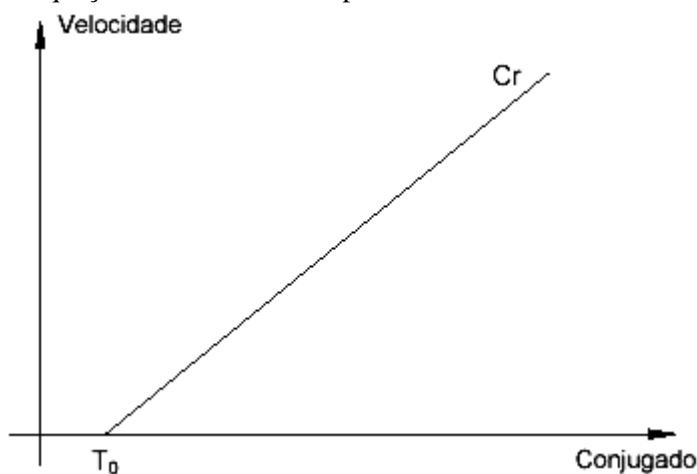
$$T_r = T_m$$

O gráfico da velocidade em função do torque é representado ao lado.

Fazem parte destas cargas: esteiras transportadoras, transportadores (pontes rolantes, guinchos e pórticos), cadeira do laminador de chapas, compressores de válvula presa, máquinas de atrito seco.

#### Cargas de conjugado resistente linear com a velocidade ( $a=1$ )

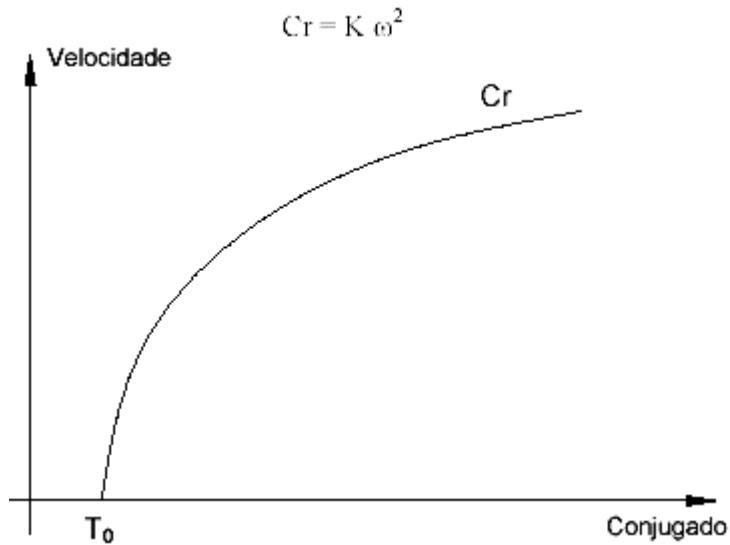
São cargas que possuem seu conjugado variando linearmente em função da velocidade através da equação de uma reta dada por:



Assim, o gráfico da velocidade em

função do torque é dado pelo gráfico ao lado. Fazem parte dessas cargas:

- sistemas de acoplamento hidráulico ou eletromagnético
- geradores acionados e alimentando carga de alto fator de potência (resistiva)
- transmissão de torque por atrito viscoso

**Cargas de Conjugado Resistente Crescente com o Quadrado da Velocidade (a = 2)**

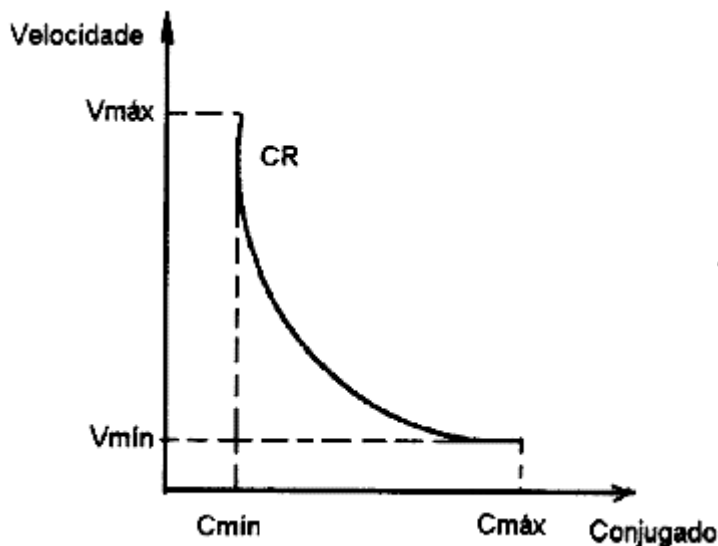
São cargas na qual o conjugado varia em relação à velocidade de acordo com uma parábola, dada pela equação abaixo:

$$T_r = T_0 + (T_m - T_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

Assim, a representação gráfica da velocidade em função do torque fica representada pelo gráfico abaixo:

Fazem parte dessas cargas:

- bombas centrífugas
- ventiladores

**Cargas de Conjugado Resistente Inversamente Proporcional com a Velocidade (a = -1)**

São cargas na qual o conjugado varia em relação à velocidade de acordo com um hipérbole, dada pela equação abaixo:

$$T_r = T_0 + (T_m - T_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1}$$

Assim sendo, o gráfico da velocidade em função do torque fica representado pelo gráfico ao lado.

Fazem parte dessas cargas:

- brocas de máquinas ferramentas
- bobinador, desbobinador
- máquinas de sonda e perfuração de petróleo
- máquinas de tração

**Cargas com predominante efeito inercial**

Para os regimes transitórios de aceleração e desaceleração os momentos de inércia de todas as partes girantes deverão ser utilizados para o cálculo do conjugado motor que deverá ser dado por:

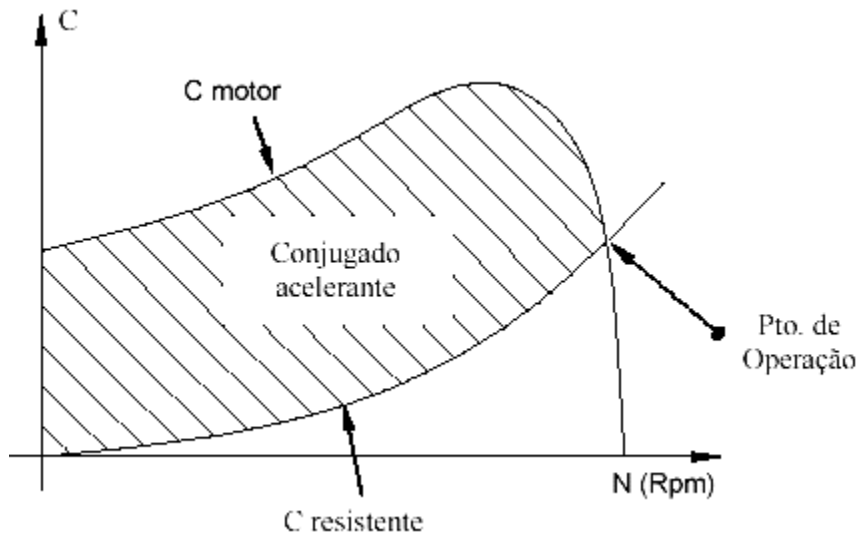
- uma parcela para vencer a resistência da carga e
- uma parcela para aceleração ou desaceleração.

Para os diferentes conjugados fornecidos pelo motor durante as fases de um movimento, temos:

- Regime Permanente;
- Regime Transitório de aceleração;
- Regime Transitório de desaceleração.

### Curvas dos Conjugados Motor e Resistente da Carga

Conforme seja a natureza de carga mecânica, haverá uma curva de conjugado resistente associada. Em cargas de ventilação, o conjugado resistente é proporcional ao quadrado da velocidade enquanto que em guindastes, talhas e pontes rolantes, o conjugado resistente é praticamente constante, havendo apenas um pequeno sobretorque na região próxima do repouso.



Conforme verificamos pela figura acima, o ponto de operação ocorre onde a curva de conjugado  $C_{motor}$  encontra a curva do  $C_{resistente}$ , ou seja, a partir daí a velocidade não varia mais, e se a carga for a carga nominal do motor, esta será a velocidade nominal, podendo definir-se o escorregamento nominal do motor.

O conjugado acelerante é o responsável pela aceleração do motor na fase da partida e ele é igual a diferença entre o  $C_{motor}$  e o  $C_{resistente}$ . No ponto de operação, o conjugado acelerante é nulo, porque  $C_{motor}$  e  $C_{resistente}$  são iguais. Por isso o motor não varia.

Quando a tensão do motor é menor que a tensão aplicada, como por exemplo quando usamos uma chave de partida estrela-triângulo ou chave compensadora, etc.. a curva do  $C_{motor}$  desce o eixo do torque e corremos o risco da curva interceptar a curva  $C_{resistente}$  precocemente o que definiria o ponto de operação do motor em um ponto de velocidade bem menor do que a esperada. O resultado disto, é que quando for aplicada a tensão nominal do motor, haverá uma nova reaceleração do motor até o ponto de partida nominal. Nestas condições a chave não está adequada a partida do motor.

Ademais, com a redução do  $C_{motor}$ , a aceleração também reduz-se o que implica em maior tempo de partida que deve ser levado em consideração na escolha de uma chave de partida.

## 8. Instalações Elétricas

Até agora falamos sobre geração e transmissão de energia elétrica e sobre as máquinas responsáveis pelo processo de conversão de energia elétrica de uma forma em outra. Entretanto, não mencionamos nada a respeito de como a energia elétrica é distribuída dentro da indústria, ou até mesmo em nossas casas, desde o ponto de entrega até os pontos de utilização.

A parte responsável pela distribuição da energia elétrica desde o ponto de entrega pela concessionária de energia local até os pontos de uso (tomadas, motores, etc..) é chamado de **instalação elétrica**.

#### **Conceitos Fundamentais:**

Para analisar instalações elétricas, deve-se conhecer alguns parâmetros fundamentais, dentre eles:

- **Carga Instalada:** É a soma das potências ativas de cada equipamento conectado à instalação ou que possa vir a ser conectado. No caso de tomada de uso geral, pode-se especificar uma potência máxima por tomada para fins de levantamento da carga instalada.
- **Potência Demandada:** Potência máxima registrada por uma instalação ao longo de período de tempo que pode ser um dia, um mês, ou um ano. Para fins de cálculo, faz-se uma atualização da potência demandada a cada 15 minutos, normalmente.
- **Fator de demanda:** É a razão entre a potência máxima registrada por uma instalação e a carga instalada. É sempre menor ou igual a 1.
- **Potência reativa:** É a potência reativa drenada por uma instalação. Normalmente é levantada para fins de correção de fator de potência.
- **Fator de Potência:** Razão entre a potência ativa e a Potência aparente de uma instalação. Pode estar entre 0 e 1.
- **Consumo:** Energia ativa total “consumida” por uma instalação ao longo de um período de tempo, normalmente um mês.

#### **Elementos da Instalação**

A instalação elétrica pode ser separada em blocos para fins de análise, de acordo com a função que exerce. Assim sendo temos:

- **Entrada de Força;**
- **Alimentador Geral;**
- **Quadro Geral de Distribuição;**
- **Subalimentadores;**
- **Quadro Terminal;**
- **Circuitos Terminais;**

#### **Entrada de Força:**

Seção destinada a receber a energia elétrica da concessionária, ou seja, é o ponto de entrega de energia. Também é o ponto onde é feita a medição do consumo de energia elétrica para fins de faturamento.

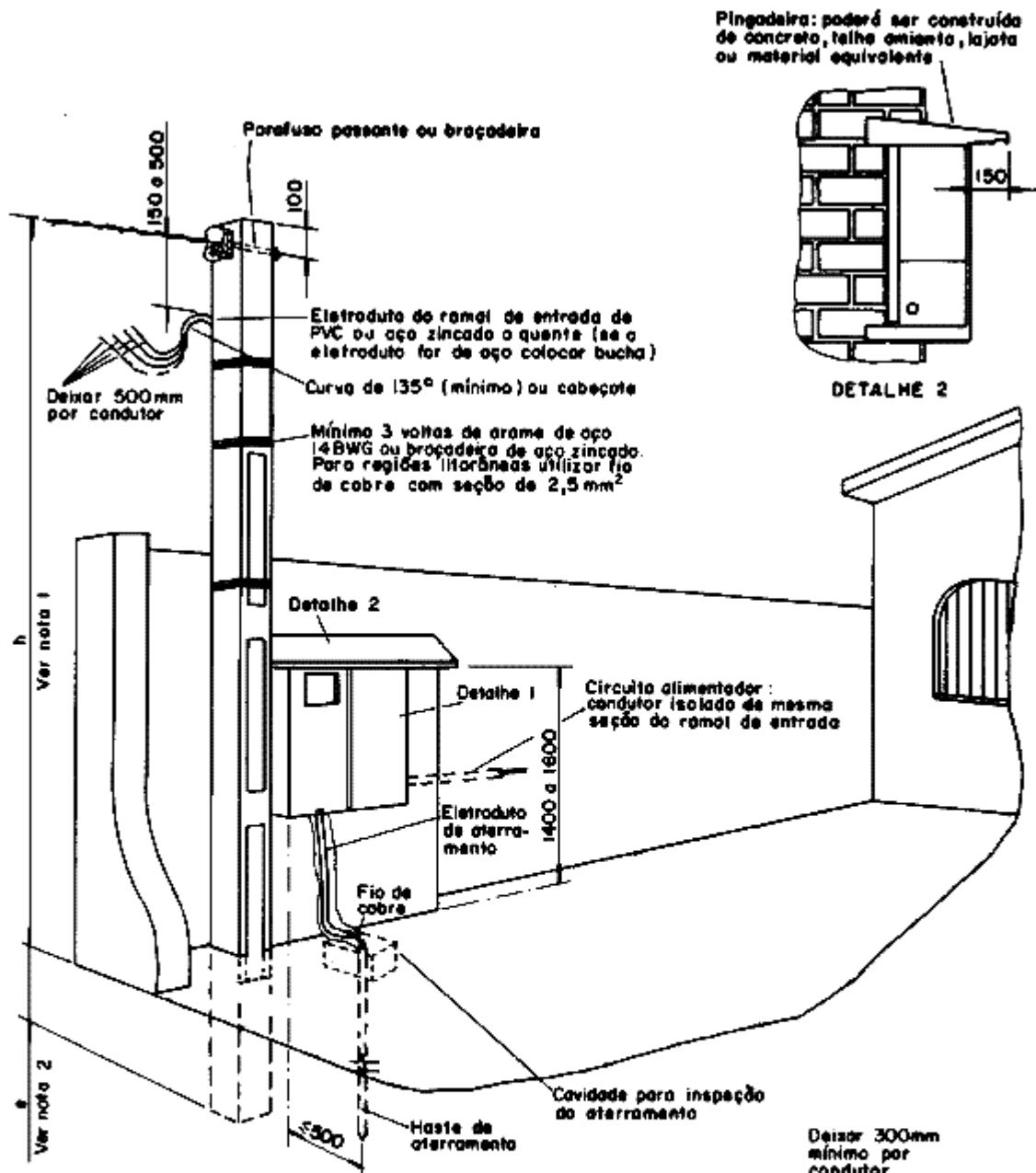
A entrega de energia pode ser feita em duas categoria de tensão, ditas:

- **Tensão Secundária;**
- **Tensão Primária**

A entrada em tensão secundária, são tensões de baixo valor, ou seja, na faixa da tensão dos equipamentos de uso, isto é, aquelas em que a tensão de fornecimento de fase e de linha são respectivamente iguais à 127V/220V ou 220V/380V. Dependendo da região pode-se ainda ter tensão de 115V/230V ou 110V/220V ou ainda apenas 220V. o fornecimento pode ainda ser monofásico, bifásico ou trifásico conforme a faixa de potência a ser atendida. Normalmente as residências e o comércio recebem monofásico e bifásico, enquanto que no setor industrial praticamente só recebe em trifásico devido a potência ser muito maior.

Nos sistemas trifásicos até 100 amperes por fase, a medição é do tipo direta, onde a corrente de toda a instalação passa pelo medidor. Para correntes acima disto, a medição é do tipo indireta, ou seja, a medição é feita através do uso de transformadores de corrente ou TC's.

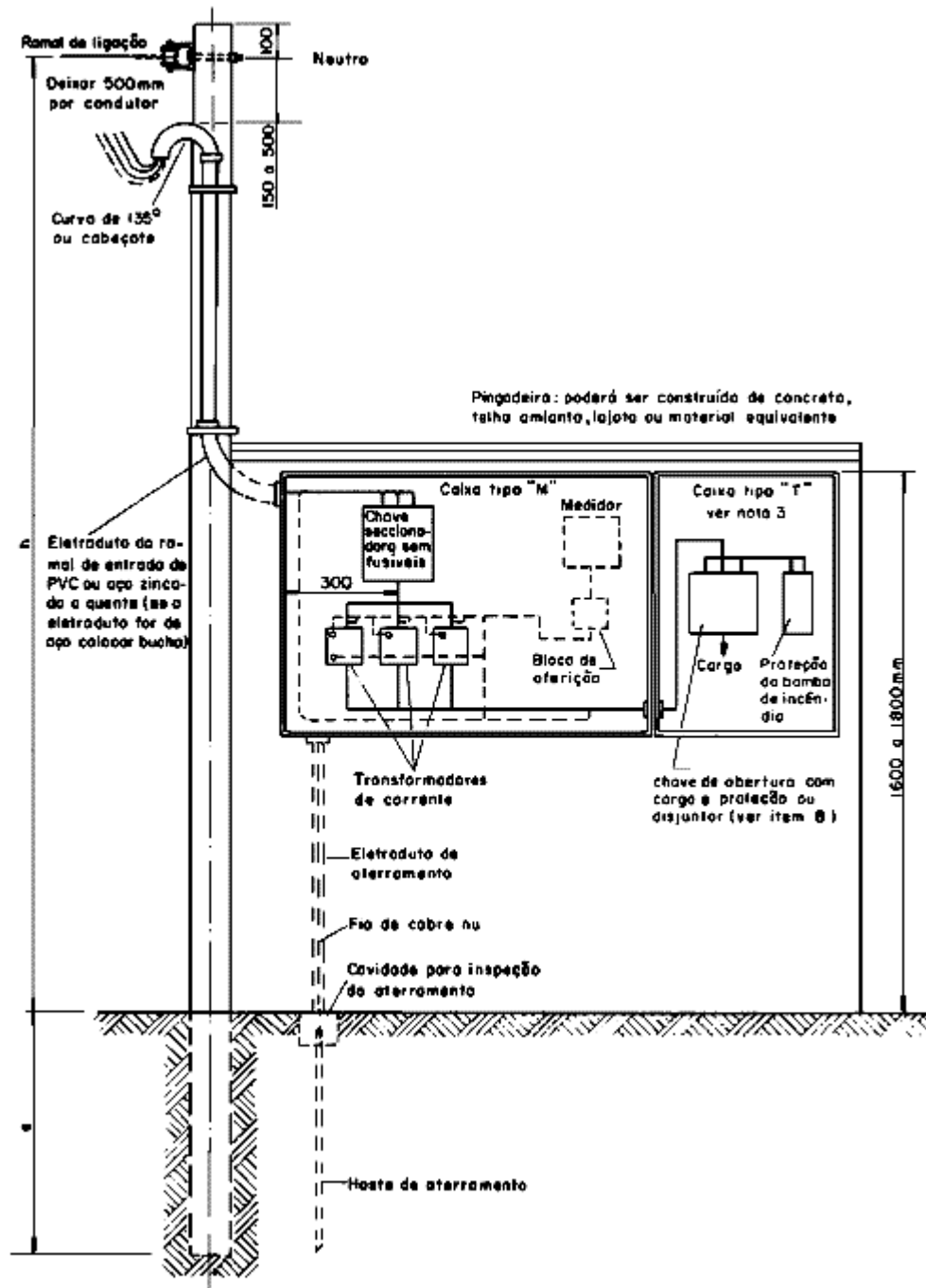
O fornecimento em tensão secundária é até 75kW, via de regra, e neste caso utiliza-se o transformador de distribuição da companhia e que está na rua onde se localiza a empresa. Assim sendo,



#### NOTAS:

1. A altura "h" mínima deve ser igual a:
  - 4,0m passagem de pedestres não cruzando garagens;
  - 5,0m cruzando garagens residenciais ou local não acessível a veículos pesados;
  - 6,0m cruzando garagens de veículos pesados ou cruzando ruas e avenidas.
2. Engastamento do poste: e = 1,35m para poste de 7,5m.
3. Este padrão é aplicável a todos os tipos de atendimento.

Abaixo, temos um exemplo de entrada em tensão secundária, medição indireta, muito usada em indústrias:



Veja a presença dos TC's dentro da caixa. São três, sendo um para cada fase. Perceba também que toda entrada deste tipo é requerida um ponto de aterramento elétrico.

Quando a potência instalada excede a 75kW e até 2500kW, solicita-se que o atendimento seja feito em tensão primária. Isto quer dizer que a empresa deve comprar seu próprio transformador(trafo) e a concessionária fornecerá em tensão de distribuição ou tensão primária. Valores típicos de tensão primária são 11900V ou 13800V de linha.

A forma como a entrada será feita depende da classe de potência, mas do ponto de vista de medição, existem basicamente existem duas classificações:

- **Até 225 kVa**                      Onde a medição é feita na baixa tensão com TC's
- **Acima de 225 kVa**              Onde a medição é feita na alta tensão com TC's e TP's

Do ponto de vista de construção, as entradas de força primária classificam-se em:

- **Poste singelo:**                      Onde o transfo é fixado em um poste simplesmente. Até 150kVa.
- **Plataforma:**                      Onde o trafo é fixado em uma cruzeta presa a dois postes. Até 225kVa. Também é conhecida como estaleiro.
- **Cabina:**                              Casa de alvenaria e cimento própria p/ o trafo. Até 2500kVa.
- **Subestação de Solo:**              Local cercado por alambrado e ao tempo, destinado ao trafo. Até 2500kVa
- **Cubículo Blindado:**              Compartimento metálico destinado abrigar o trafo. É uma forma compacta. Até 2500kVa.

Com a relação ao tipo de entrada, este pode ser de dois tipos:

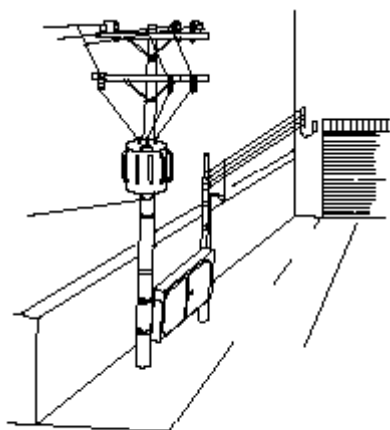
- **Ramal Aéreo:**                      Feita por cabos de alumínio nús;
- **Ramal Subterrâneo:**              Feita por cabos isolados para tensões elevadas.

Com relação à proteção de alta tensão, podemos encontrar os seguintes componentes:

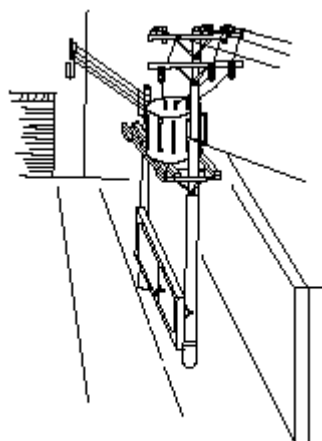
- **Elo Fusível:**                      Elemento do tipo fusível que é utilizado na proteção de transformadores. Seu princípio de funcionamento é o de fusão de um elemento metálico quando a corrente de um transformador excede certo valor. É montado ao tempo, junto de chaves adequadas para este tipo de função. Por ser barata, é a proteção mais usada em redes distribuição e trafos pequenos de até 150kVa.
- **Fusíveis Primários:**              Similares ao elo fusíveis, só que devem ser usadas em instalações abrigadas e em bases apropriadas. Não são utilizadas junto com chaves. Normalmente são restritas à cabinas.
- **Disjuntores:**                      São caros e portanto utilizados em unidades de grande porte. São obrigatórios em trafos de potência maior que 225kVa. São utilizados em conjuntos com relés que detectam as correntes excessivas e comandam o desligamento do disjuntor. São usados tanto para manobra quanto para proteção de transformadores.

Grandes indústrias, podem Ter vários transformadores instalados próximos de centros de consumo dentro da própria planta da industria. Normalmente nestes casos utiliza-se cabinas.

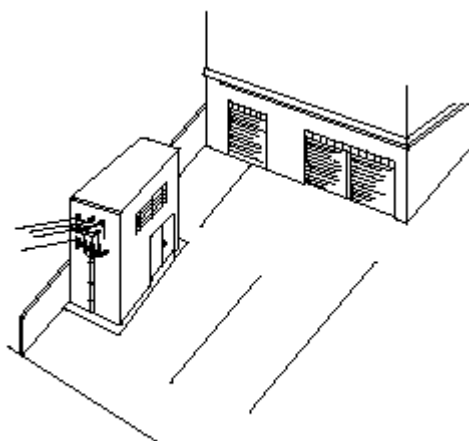
Abaixo, temos a ilustração de alguns tipos de entrada primária muito usados nas indústrias.



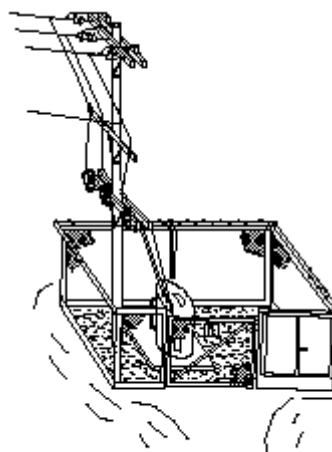
EM POSTE SINGELO



EM PLATAFORMA



EM CABINA

NO SOLO  
(MEDIDA NA BAIXA TENSÃO)

### **Cabos Alimentadores:**

São normalmente de cobre isolado e destinam-se a interligar à entrada de força até o quadro geral de distribuição. Os cabos alimentadores podem ser classificados conforme a sua tensão:

- Os de alta tensão: quando existem unidades transformadoras dentro da própria planta da indústria, que é o caso de grandes indústrias;
- Os de baixa tensão: quando alimentam quadros de baixa tensão;

Outro aspecto importante a ser levado em conta, é a máxima queda de tensão admissível. Isto porque do ponto de entrega até o ponto de utilização da carga tem-se uma queda de tensão máxima admissível. Portanto, se perdermos muita tensão sobre o alimentador corremos o risco de não atender a este requisito ao longo de toda a instalação.

De qualquer forma, os alimentadores são responsáveis pela distribuição principal de uma indústria.

### Quadros de Distribuição Geral:

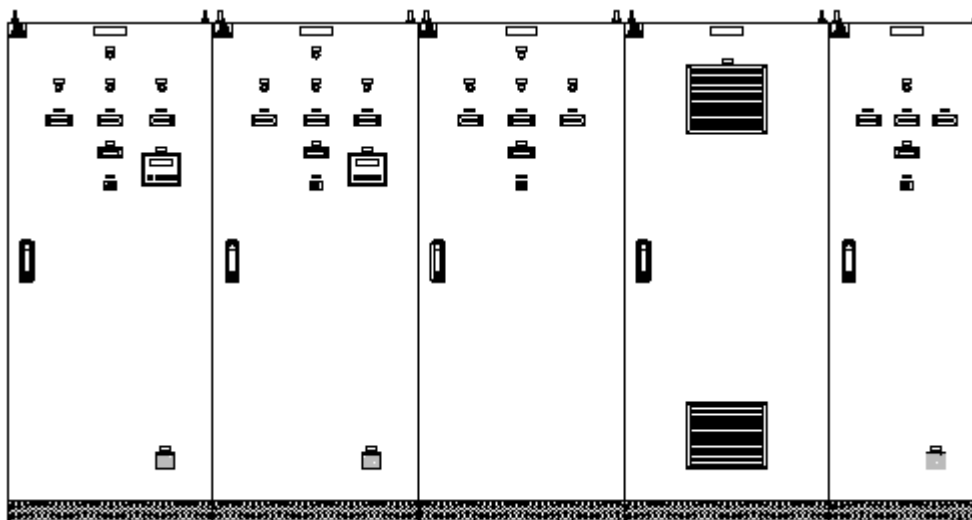
É uma caixa metálica onde chega o alimentador e de onde partem os subalimentadores para outros quadros menores, próximos a carga e ditos quadros terminais. Às vezes, dependendo do porte das cargas, o quadro de Distribuição Geral também é o Quadro Terminal, ou seja, ele mesmo alimenta as cargas da indústria.

O objetivo primordial do quadro de distribuição geral é abrigar os dispositivos de proteção dos subalimentadores, tais como fusíveis e disjuntores.

Abaixo temos uma ilustração de um painel de distribuição usado em indústrias de porte.



Abaixo, temos uma ilustração frontal de um painel de distribuição de potência



**Subalimentadores:**

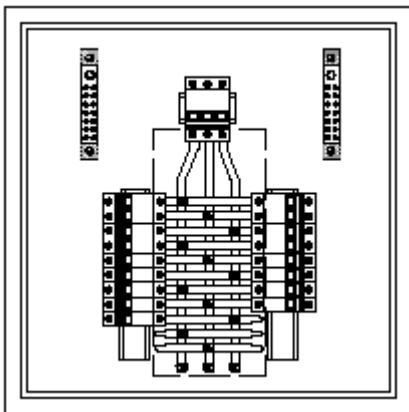
Similarmente ao alimentador, destina-se a interligar o Quadro Geral de Distribuição aos quadros terminais ou outro Quadro de distribuição intermediário.

**Quadro Terminal:**

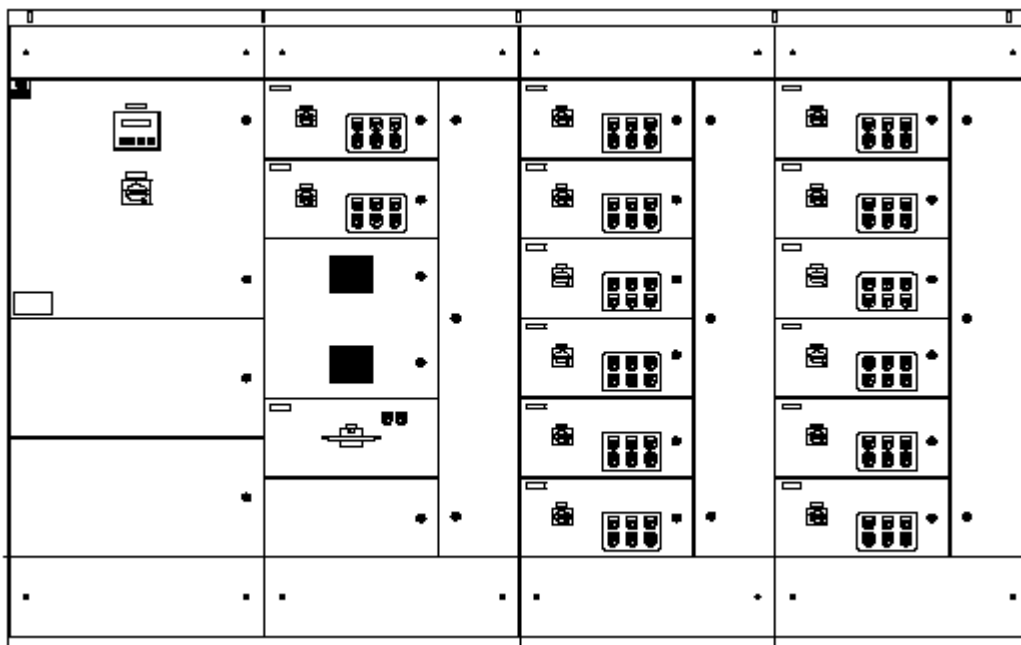
È o ultimo Quadro entre uma instalação elétrica e seu ponto de utilização. A função básica é abrigar os dispositivos de proteção da instalação. Quando um quadro terminal destina-se a abrigar dispositivos de proteção e manobra de motores ele é chamado de Centro de Controle de Motores ou CCM.

Quando o quadro abriga apenas elementos de comando e proteção de máquinas ele é chamado de quadro de comando.

Abaixo, temos um exemplo de quadro terminal de pequena potência.



Abaixo, temos um exemplo de CCM. Observe os compartimentos similares a gavetas de armário. Cada compartimento contém os elementos de um dado motor.



**Circuitos Terminais:**

Finalmente os circuitos terminais destinam-se a levar a energia elétrica dos quadros terminais até os pontos de utilização. Normalmente são cabos de baixa tensão. Podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos conforme a carga que estes alimentam.

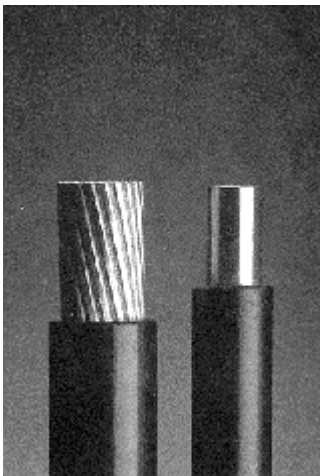
**Elementos de uma Instalação:**

São os elementos ou componentes que se fazem presentes em uma instalação elétrica. Podemos classificar os componentes basicamente como:

- **Condutores;**
- **Linhas Elétricas;**
- **Dispositivos de Manobra;**
- **Dispositivos de Proteção.**

**Condutores:**

Como o próprio nome diz, são os elementos responsáveis pela condução da corrente elétrica, levando da fonte até o ponto de uso. Eles são os elementos básicos de qualquer instalação, dado que são os responsáveis pelo transporte da energia até os pontos de uso. Como vimos, conforme sua função os condutores recebem a denominação de alimentadores, subalimentadores ou circuitos terminais. Sua constituição básica pode ser observada abaixo:



Nesta figura verificamos dois tipos de condutores:

- **O fio:** Cujas partes de metal são maciças (condutor mais à direita);
- **O cabo:** Cujas partes de metal são compostas por vários fios dispostos de forma levemente torcida, como vemos na figura (condutor mais à esquerda).

Ambos o cabo e o fio, têm em comum, além do metal, uma parte isolante de material polimérico. Sua função básica é promover o isolamento do condutor. O material deve ser resistente para suportar os esforços de enfiamento, puxamento e abrasão. Já a parte metálica, deve ser de material bom condutor, uma vez que a corrente passa por ela e dessa forma se sua resistência for alta, haverá muito aquecimento e perda de energia. Normalmente usa-se o cobre, por ser um bom compromisso entre custo e condutividade. Há cabos de alumínio, mas seu uso é maior em redes aéreas externas de cabos nus (sem isolamento), porque o alumínio é bem mais leve

que o cobre, o que permite economizar nas estruturas de suporte.

Já o isolante pode ser feito de pelo menos três tipos de materiais básicos:

- **PVC:** É o mais utilizado, tem boas propriedades mecânicas e químicas e resistência ao fogo. Sua temperatura de trabalho é de 70°C, que é a menor de todos os materiais isolantes usados em cabos.
- **EPR:** Material excelente, possui boas propriedades mecânicas e químicas e sua temperatura de trabalho é de 90°C, o que permite trabalhar com correntes mais elevadas. Sua resistência ao fogo é o seu ponto fraco.
- **XLPE:** Bom material, temperatura de trabalho de 90°C e excelente resistência química. Boa resistência ao fogo também, seu ponto fraco é a grossura de sua isolação e a rigidez que tornam o cabo pouco flexível. Pode ser mantido ao sol o que é uma vantagem em ligações externas.

A composição do isolamento analisada é para baixas tensões apenas. Para altas tensões o isolamento é bem mais grosso e composto por várias camadas.

Condutores são caracterizados pela área de sua seção transversal ou bitola, assim existem os fios de 1.5mm<sup>2</sup>, 2.5mm<sup>2</sup>, etc.. que serve para identificar o fio.

Evidentemente, que quanto maior a seção transversal de um condutor, maior é sua capacidade de conduzir corrente, entretanto, como vimos, o valor máximo de corrente que um fio pode suportar é dependente do tipo do material do isolamento. Mas isto é apenas um parâmetro. A capacidade de um condutor depende ainda de sua situação de instalação. Por exemplo, um cabo dentro de um tubo tem muito mais dificuldade para trocar calor com o ambiente do que um cabo ao ar livre. Assim sendo, um cabo instalado ao ar livre suporta muito mais corrente do que um cabo de mesma bitola dentro de um tubo.

Outros parâmetros importantes são a quantidade de fios em um tubo, ou seja, a capacidade individual de um fio reduz se no mesmo tubo a fios de outros circuitos.

Existem na norma tabela de capacidade de condução para várias seções padronizadas em função da condição de instalação e do material do isolamento. E existem fatores de correção que devem ser aplicadas para a obtenção do valor correto da corrente máxima que um fio pode suportar.

### **Linhas Elétricas**

Linhas são os meios por onde os condutores devem ser instalados. Sua função básica é a proteção e sustentação dos condutores elétricos. Existem vários tipos sendo, os mais utilizados:

- **Eletrodutos:** São tubos específicos para condutores. Podem ser metálicos ou de polímeros.
- **Canaletas:** São condutos de seção transversal retangular, normalmente instalados nas paredes.
- **Bandeja:** Perfil metálico em forma de U, destinado a ser instalado na parede ou suspenso por meio de tirante a estrutura do telhado. Muito utilizado em indústrias;
- **Escada:** Similar a bandeja, só que em vez do perfil em U, temos uma estrutura similar à uma escada.

Quanto a forma da instalação podemos classificá-las em:

- **Aparente:** Quando a linha elétrica fica aparente, ou seja, pode ser vista. Exemplo: tubos presos numa parede.
- **Embutida:** Quando a linha fica embutida no piso ou parede.
- **Aérea:** quando os condutores ficam suspensos ao ar livre. Exemplo: Fios num poste.
- **Subterrânea:** Quando a linha é embutida no solo.

O tipo de linha e sua maneira de instalação influem decisivamente na capacidade de corrente de um condutor.

### **Dispositivo de Manobra:**

São dispositivos destinados a interromper ou fechar um circuito permitindo dessa forma ligar ou desligar uma carga elétrica que esteja sendo alimentada por este circuito. São compostos basicamente por chaves elétricas.

O tipo mais comum de dispositivo de manobra é o interruptor que permite ligar ou desligar uma lâmpada elétrica. Outros dispositivos muito usados são as chaves de potência, contadores e outros, que serão vistos mais adiante.

### **Dispositivos de Proteção de Baixa Tensão:**

São dispositivos destinados à proteção da instalação elétrica contra correntes de sobre carga e curto circuito. Podemos definir as correntes que caracterizam um dispositivo de proteção da seguinte forma:

- **Corrente Nominal:** Corrente máxima que um dispositivos consegue fornecer por tempo indeterminado. É usada para dar nome ao dispositivo.
- **Corrente de Sobrecarga:** Corrente acima de um certo valor especificado e que se mantida poderá comprometer a integridade física dos elementos da instalação, principalmente os condutores.
- **Corrente de Curto-Circuito:** corrente bem acima da corrente nominal e que representa um risco iminente aos componentes de uma instalação elétrica. Seu desligamento deve ser imediato.

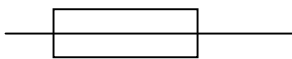
Os dispositivos de proteção são basicamente de dois tipos:

Existem basicamente dois dispositivos utilizados para a proteção de circuitos de comando:

- Fusível
- Disjuntor

### **Fusível:**

São bastante utilizados, pois são baratos e excelentes na proteção contra curto circuito. Ele consiste de um fio metálico bem fino, instalado em um invólucro de porcelana normalmente. Quando a corrente é muito intensa, o fio derrete e o circuito é interrompido. Uma vez queimado o fusível ele deve ser substituído. Abaixo temos uma representação clássica de um fusível.



### **Disjuntor:**

São dispositivos mais modernos que os fusíveis, sendo compostos por contatos de potência acionados manualmente por uma alavanca, que permite fechar e abrir o circuito, dando ao disjuntor a característica de dispositivo de manobra além de proteção. Também são instalados em série com o circuito à proteger, sendo que o disjuntor possui internamente possui disparadores que quando são sensibilizados por uma corrente acima de um certo valor, acionam mecanicamente uma trava que abre os contatos de potencia do disjuntor, interrompendo o circuito de comando.

A principal vantagem do disjuntor é que após a sua atuação, basta acionar sua alavanca manual e fechar novamente o circuito, ou seja, não precisa substituir o dispositivo. Além disso, o disjuntor pode ter contatos para mais de uma fase, permitindo uma atuação monopolar, bipolar ou tripolar. Além disso possuem melhor resposta com pequenas correntes, mas que podem ser perigosas.

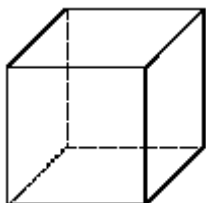
Abaixo temos sua representação:



Estes dispositivos serão mais bem estudados na parte de dispositivos de manobra.

## 9. Aterramento Elétrico:

### Resistividade:



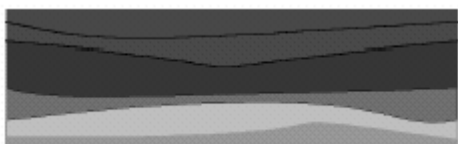
É numericamente igual à resistência entre duas faces opostas de um cubo construído com o material e com aresta unitária (*NBR . 7117:1981*). São usadas as unidades:  $\rho\text{m}$  ou  $\rho\text{cm}$ .

Se o material for um metal é fácil construir um cubo desse material. Se o material for líquido, é construída uma cuba, de material isolante, onde são instalados dois eletrodos iguais montados a uma distância fixa.

Conhecida a área dos eletrodos e a distância entre eles, é calculada a resistividade (em alguns casos a condutividade, que é o seu inverso).

Existem dispositivos para medir a resistividade/condutividade de um líquido em movimento, quando essa propriedade é importante para um processo industrial. No caso do solo que é composto de materiais diferentes, com graus de compactação e teor de umidade também diferentes é possível determinar a resistividade média a partir de uma amostra do solo.

### Solo não estratificado



Essa amostra deve ser de tamanho razoável e tratada com muito cuidado para poder representar o solo local.

Um método usado em laboratório consiste em construir um cubo de madeira com aresta de 1m e com duas faces apostas cobertas por chapas metálicas.

O material retirado do solo, do qual foi medida a compactação e o teor de umidade é misturado e colocado na caixa cubica em camadas. Após a deposição de cada camada o material é socado para reproduzir a mesma compactação do solo original. Se o material chegou a secar, por evaporação, deve ser juntada água para reproduzir a umidade do solo original.

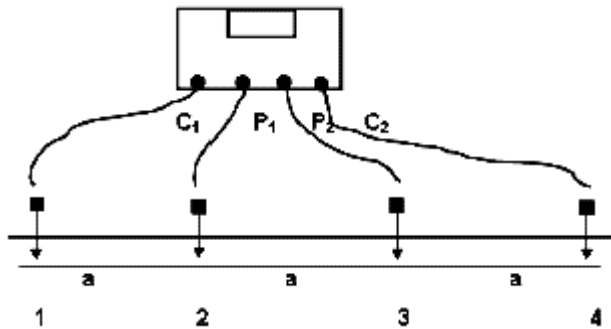
Completadas todas as camadas, deve ser feita a medição da resistência entre as faces metálicas opostas. O resultado da medição em ohms é a resistividade do solo em ohm.m. Por essa descrição simplificada do método pode-se ver que o resultado obtido poderá apresentar grandes variações de acordo com os procedimentos e cuidados seguidos. Além disso deveríamos tirar muitas amostras em um terreno para ter uma resistividade média, não só ao longo da área, mas também a diferentes profundidades.

Existem métodos para medir a resistividade do solo em uma área e estratificar as resistividades de modo a substituir o solo original por um solo de várias camadas de resistividade constante.

O método padronizado pela ABNT para medir a resistividade do solo (*NBR-7117:1981*) é o método de Wenner que descrevemos a seguir.

Devem ser cravadas no solo 4 hastas verticais, alinhadas e separadas por uma mesma distância. A parte cravada no solo não deve ser maior de 1/20 da distância entre as hastas. Um terrômetro de quatro terminais tem seus dois terminais de corrente ligados às hastas externas e os terminais de potencial correspondentes, ligados as hastas internas, como indicado no croquis abaixo.

### Resistividade do solo- Medição Método de Wenner



O aparelho fornece uma corrente entre os terminais C2 e C1 que vai circular pelo solo e produzir uma queda de tensão entre as hastas 2 e 3 que será detectada pelos terminais P1 e P2.

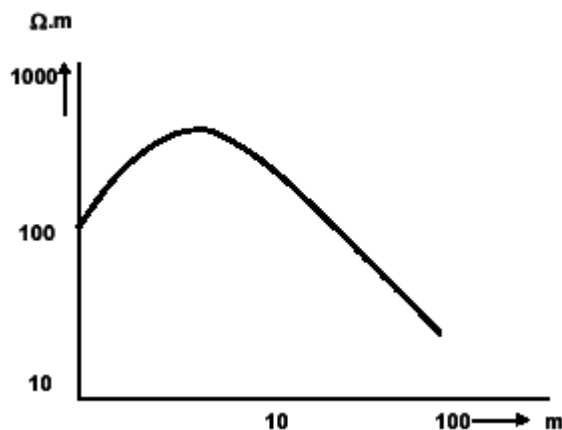
O terrômetro dispõe de um circuito em ponte que dividirá o valor da tensão pelo valor da corrente fornecida e dará a resistência através da leitura no visor.

A resistividade será calculada por  $\rho = 2\pi Ra$ , onde:

- R leitura em  $\Omega$  do terrômetro;
- $\rho$  calculada em  $\Omega \cdot m$ ;
- a distância entre as hastas em metros.

Variando-se a distância **a** e os pontos de medição obteremos um conjunto de valores da resistividade a cada

profundidade **a**. Calculando a média dos valores obtidos para cada distância ou seja para cada profundidade e traçando um gráfico ( $\rho_m, a$ ) da resistividades médias em função das profundidades teremos uma curva das resistividades medias.

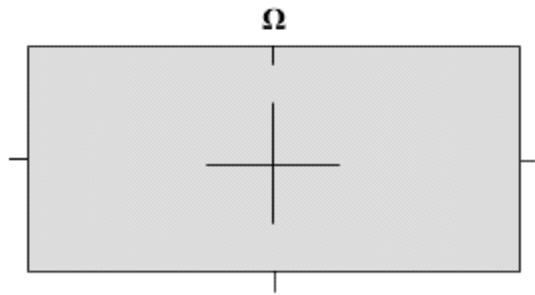


Os pontos de referência são onde deve ficar o aparelho e a partir desse ponto vão sendo cravadas as estacas com as distâncias **a**, em cada uma das seis direções. Os valores de **a** recomendados, mas não obrigatórios, são: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... metros, de acordo com o tamanho do terreno.

Essa seqüência de razão 2 é conveniente mas, como dito acima não precisa ser seguida. Quanto maior o número de medições feitas, mais precisa será a medida.

Entrando com os dados correspondentes a cada ponto em um programa, como TecAT-4, obtemos inicialmente o gráfico das resistividades médias e a seguir a estratificação em 2, 3 ou 4 camadas, de acordo com o tipo do solo. O programa fornece a profundidade e a resistividade de cada camada.

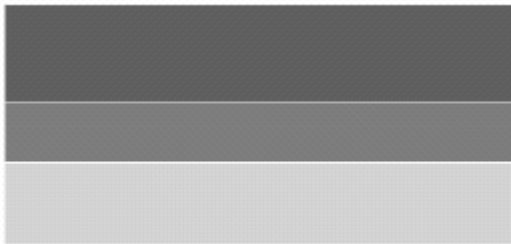
**Curva resistividade em  $\Omega \cdot m = f(d)$  distância em metros**



A partir daí existem métodos gráficos e métodos computacionais para calcular a estratificação. Por ter muitas restrições na aplicação e por sua imprecisão, os métodos gráficos foram substituídos por programas computacionais muito mais rápidos e precisos.

A norma citada acima recomenda a medição segundo os lados de um quadrilátero traçado no terreno e em duas direções a partir do centro.

### Estratificação das resistividades



### A resistência de aterramento

É a relação entre a corrente que circula entre a malha e um ponto distante e a tensão aplicada entre esses

dois pontos. A resistência de aterramento de um eletrodo é a soma de três parcelas:

- Resistência do eletrodo,
- Resistência de contato entre o eletrodo e o solo
- Resistência do solo em torno do eletrodo.

A primeira parcela é muito baixa, tanto pelas dimensões como pela resistividade do material, que é muito baixa. A segunda parcela, se o eletrodo for vertical e cravado sob pressão no solo, também é muito baixa; se o eletrodo for introduzido solto no solo, é provável que a resistência de contato seja elevada.

A Terceira parcela é que determina o valor da resistência de aterramento, salvo no caso do eletrodo ter um mau contato com o solo.

### A resistência de aterramento

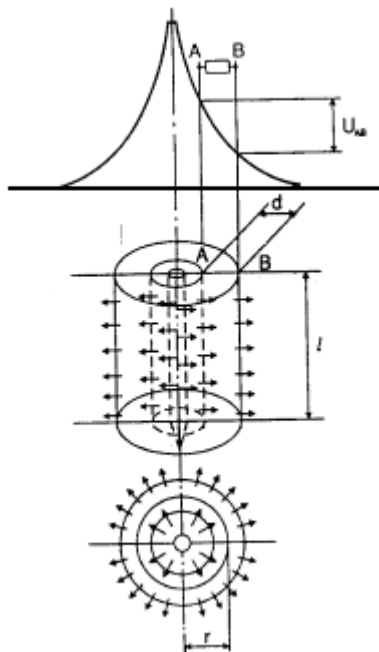
A terra não é um sorvedouro de correntes, capaz de absorver qualquer quantidade de energia, mas deve ser considerada como um condutor que faz parte de um circuito por onde passa corrente. No caso das descargas atmosféricas, a terra faz parte do circuito delas: a corrente do raio sobe da terra para a nuvem em um canal (o raio) com uma densidade muito alta de corrente e com uma temperatura também muito alta e constitui a parte visível da descarga e desce lateralmente em redor da nuvem com uma densidade muito baixa. A segunda parte, não visível mas é constatada pela alta densidade de cargas elétricas (elétrons e íons) na atmosfera durante as tempestades. Em um curto-circuito fase-terra a corrente que entra na terra no ponto decurso, retorna à fonte (transformador ou gerador) circulando pela terra. Em ambos os casos a presença da corrente é constatada pelas tensões (denominadas de passo) que aparecem na superfície do

solo. A terra deve ser considerada um condutor especial mas que como todo condutor apresenta uma resistência.

Para efeito de modelagem, pode-se simplificar através de algumas hipóteses:

- eletrodo é uma haste vertical cravada em solo de resistividade homogênea.
- A corrente sai perpendicularmente do eletrodo e penetra no solo.

Em torno do eletrodo formam-se superfícies cilíndricas equipotenciais



A contribuição do solo para a resistência pode ser imaginada como a soma de vários cilindros com espessuras pequenas, feitos com o material do solo e com diâmetros crescentes a partir da superfície do eletrodo. Cada uma dessas cascas terá uma resistência que vai diminuindo a partir da primeira junto ao eletrodo, pois a sua superfície vai aumentando. Uma casca entre as superfícies .A. e .B. apresentará uma resistência:

$$R = \rho l/S \quad \text{ou} \quad \tilde{R} = d/2 \pi r l, \text{ onde:}$$

$\rho$  resistividade

$S$  superfície

$l$  comprimento de um condutor

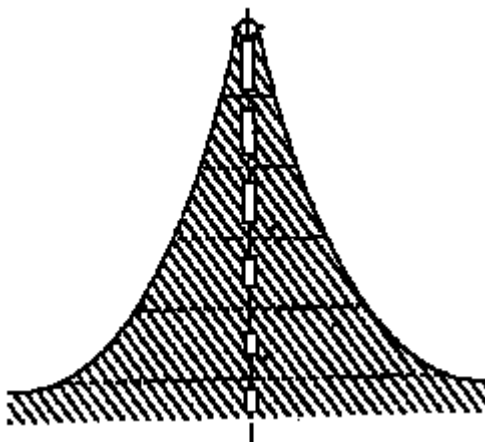
$d$  espessura da casca entre A e B

$r$  raio médio da casca

$l$  altura da casca (comprimento do eletrodo)

A resistência do solo nesse modelo é igual à soma das resistências das diversas cascas do terreno. O fim da influência do eletrodo será o terra de referência onde a resistência  $R$  será nula.

Por esse modelo o solo pode ser representado por um condutor de seção variável com seções crescentes a partir da seção inicial. No trecho final a resistência será nula e a seção será infinita.



do

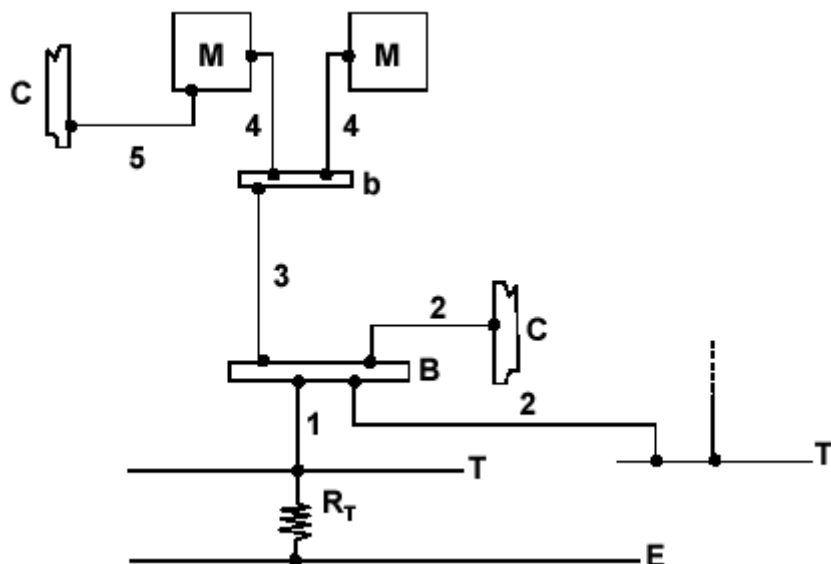
Com modelo análogo mas considerando o efeito da ponta do eletrodo resultando então em cascas cilíndricas completadas por hemisférios na parte inferior, chega-se à conclusão de que a resistência total de aterramento está concentrada nos primeiros 30 cm em torno do eletrodo (cerca de 70 %) (*IEEE Std 142. 1991*). Daí a razão de se obter uma melhoria da resistência de aterramento, umedecendo o solo em torno do eletrodo, ou tratando com sal ou outro material de baixa resistividade.

### Componentes do aterramento de uma instalação

Além do eletrodo (T) ou malha de aterramento que estão em contato com a terra, diretamente ou através

concreto da fundação são necessários outros componentes para aterrar todos as partes dos equipamentos e do sistema elétrico que deverão ser aterradas. Os componentes adicionais são:

- **Terra de referência (E):** eletrodo ou eletrodos afastados da instalação que serve(m) de referência para medição.
- **TAP ou LEP (B) - terminal de aterramento principal ou ligação equipotencial principal:** é uma barra de impedância baixa e de tamanho suficiente para receber todas as conexões necessárias. É instalada isolada da parede ou de um quadro por isoladores de baixa tensão. Uma barra de cobre de 50mmx6mm e comprimento de 50cm a 1 metro ou mais em geral é satisfatória. O comprimento a ser adotado depende do número de conexões que deverão ser feitas.
- **Elemento condutor ou massa condutora estranha (C):** parte condutora exposta que não faz parte da instalação elétrica mas que poderá introduzir um potencial, geralmente o da terra.
- **Terminal de aterramento ou terminal de aterramento secundário ou suplementar (TAS):** é uma barra similar ao TAP instalada de maneira similar para aterrar os equipamentos de uma sala ou de um andar
- **Massa (M):** é a estrutura metálica de um equipamento.
- **Condutor de aterramento (1):** é o condutor de cobre que vai interligar o TAP ao eletrodo de aterramento. Sua dimensão, se não for entrar em contato com a terra será de 35 mm<sup>2</sup>, e se for ficar enterrado, 50mm<sup>2</sup>.
- **Condutor de equipotencialidade principal (2):** é o condutor de cobre de 16 mm<sup>2</sup> que interliga o TAP a um condutor ou massa estranha, como uma estrutura metálica ou a ferragem de reforço do concreto armado.
- **Condutor de proteção principal (3):** condutor de cobre que interliga os TAS ao TAP.
- **Condutor de proteção (4):** é o condutor PE que interliga as massas dos equipamentos aos TAS ou ao TAP da instalação. O dimensionamento é dado pela NBR-5410 em função da bitola dos condutores do sistema de força. Para  $S \leq 16$  mm<sup>2</sup> usa-se  $S$ ; para condutores entre 16mm<sup>2</sup> e 35 mm<sup>2</sup> usa-se 16 mm<sup>2</sup>, para  $s > 35$  mm<sup>2</sup>, usa-se a metade da seção usada nas fases.
- **Condutor de equipotencialidade suplementar (5):** é o condutor que interliga a massa de um equipamento à estrutura metálica ou à ferragem do concreto armado de uma estrutura.



A resistência de aterramento de um eletrodo pode ser medida ou calculada; o cálculo dificilmente pode ser feito através das fórmulas teóricas encontradas nos manuais, por que essas fórmulas só se aplicam a solos de resistividade uniforme, o que raramente se encontra na prática. O método de cálculo mais

moderno e mais preciso é usar um programa de computador que depois de fazer a estratificação como indicado acima, calcula a resistência de aterramento do eletrodo.

Quando se vai utilizar um só eletrodo, ou quando a área é pequena pode-se fazer uma aproximação: mede-se a resistência de aterramento do eletrodo e calcula-se a resistividade média ou equivalente do solo entrando-se na fórmula com o valor medido da resistência e calculando-se o da resistividade.

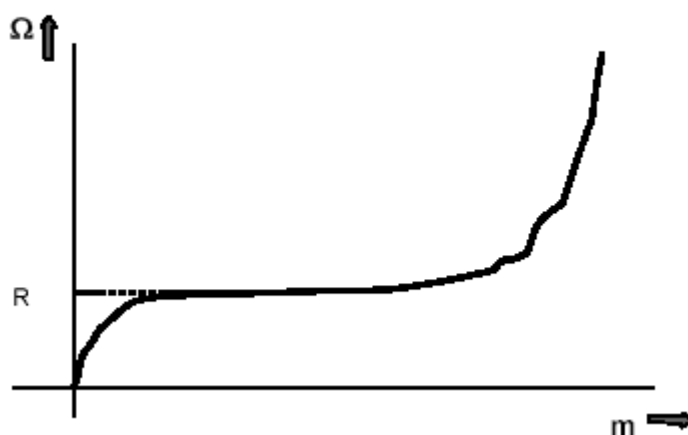
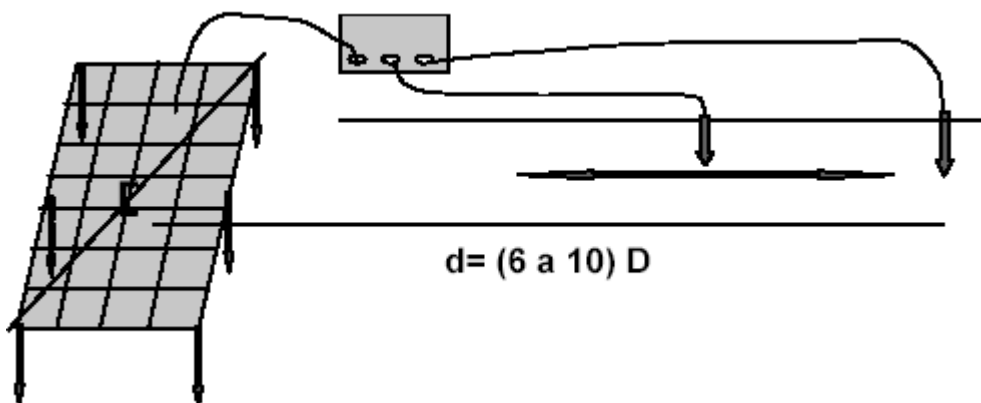
Assim, se tivermos um eletrodo de comprimento  $L$  e raio  $a$ , para o qual a medição da resistência de aterramento foi  $R$ , utilizando a fórmula abaixo, pode-se calcular o valor de  $\rho$ :

Fora esse caso, o cálculo deve ser feito com indicado a seguir:

$$R = \rho (\ln 4L/a - 1) / 2\pi L \text{ ou seja } \rho = R \cdot 2\pi L / (\ln 4L/a - 1)$$

Obtida a estratificação, entra-se com o desenho da malha de aterramento e o programa TecAt calcula a resistência da malha, e se a malha for de uma subestação, o programa fornece as tensões de toque e de passo que ocorrerão nessa malha quando nela for injetada uma dada corrente de falta à terra. A resistência de aterramento vai variar durante o ano de acordo com o índice pluviométrico: na estação das chuvas o valor será o mínimo e na estação das secas o valor será o máximo. Para não cometer erros de avaliação, a medição da resistência deve ser feita com o terreno normal, não encharcado por chuvas recentes. Uma prática aconselhada é a medição ser feita após 10 a 15 dias sem chuvas. A distância entre o ponto distante e a malha varia com a resistividade do solo e está entre 6 e 10 vezes a maior dimensão da malha (se a malha for retangular a maior dimensão será a sua diagonal).

#### Resistência de aterramento de uma malha . medição



Para se ter certeza que a medição foi feita a uma distância correta, faz-se a medição com várias distâncias e traça-se o gráfico em papel dilogarítmico de  $R$  em função de  $d$ . O valor da resistência será o patamar da curva ou o seu ponto de inflexão.

#### Valor da resistência de Aterramento

O valor da resistência de aterramento é importante para a proteção das pessoas porque ela dará o valor do potencial a que elas poderão ser submetidas quando for injetada na malha uma certa corrente de

curto à terra. Para a proteção dos Equipamentos da Tecnologia da Informação (ETI) anteriormente designados Equipamentos Eletrônicos Sensíveis (EES) esse valor não é obrigatoriamente baixo. É **irreal** exigir uma malha de terra de resistência de aterramento de valor inferior a 5  $\Omega$  e **muito errado** exigir uma malha de terra isolada. É irreal porque o valor depende do solo e este pode ter uma resistividade tão alta que será impossível obter o valor baixo exigido. É muito errado tentar obter uma malha isolada porque quando passar pelo solo a corrente de um raio que caia nas proximidades (dezenas ou centenas de metros) essa malha isolada ficará a um potencial diferente da malha geral, podendo-se ter dois riscos:

- **peçoal** porque quem estiver trabalhando com o ETI ligado a essa malha ficará a um potencial diferente do edifício (que está ligado à malha geral) e portanto sujeito a um choque de conseqüências que podem ser funestas
- **material** porque surgirá entre o ETI e a fonte de alimentação ou entre 2 ETIs uma tensão que poderá causar a queima de componentes ou a sua completa destruição.

### **O que Prescrevem as normas NBR5410 e NBR5419**

As normas NBR-5410 e 5419 prescrevem os seguintes tipos de aterramento:

- **Tipo A** ou pontual em que a cada descida do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)

corresponde um aterramento (haste vertical ou condutores horizontais)

- **Tipo B** em anel em que todas as descidas são ligadas a um condutor horizontal em forma de anel em torno do prédio. É costume em cada descida instalar uma haste vertical.
- **Pela fundação** em que é usada como aterramento a ferragem de uma fundação em concreto armado ou a ferragem de uma estrutura que serve de fundação a um edifício em estrutura metálica. Este tipo, em geral, é uma variação do tipo em anel.

A fundação é constituída por uma viga baldrame e/ou pelas bases das colunas. Se não houver certeza da manutenção da continuidade da ferragem estrutural das vigas baldrame e das fundações dos pilares deve-se instalar durante a construção um condutor (sob a forma de um cabo de aço galvanizado ou de barras soldadas ou fortemente conectadas) com saídas do concreto para interligação às barras ou terminais principais de aterramento (TAP). Esta última solução (aterramento de fundação) é indicada como preferencial pelas normas brasileiras citadas acima.

Se não for possível ou desejável fazer o aterramento pela fundação, podem, ser usados os eletrodos não naturais ou convencionais, indicados a seguir:

**Eletrodos de Aterramento Convencionais**

<b>Tipo de eletrodo</b>	<b>Dimensões mínimas</b>	<b>Observações</b>
<b>Tubo de aço zincado</b>	2,40m de comprimento e diâmetro nominal de 25mm	Enterramento totalmente vertical
<b>Perfil de aço zincado</b>	Cantoneira de (20mm x 20mm x 3mm) com 2,40m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
<b>Haste de aço zincado</b>	Diâmetro de 15mm com 2,00 ou 2,40m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
<b>Haste de aço revestida de cobre</b>	Diâmetro de 15mm com 2,00 ou 2,40m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
<b>Haste de cobre</b>	Diâmetro de 15mm com 2,00 ou 2,40m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
<b>Fita de cobre</b>	25mm <sup>2</sup> de seção, 2mm de espessura e 10m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60m Largura na posição vertical
<b>Fita de aço galvanizado</b>	100mm <sup>2</sup> de seção, 3mm de espessura e 10m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60m Largura na posição vertical
<b>Cabo de cobre</b>	25mm <sup>2</sup> de seção e 10m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60m Posição horizontal
<b>Cabo de aço zincado</b>	95mm <sup>2</sup> de seção e 10m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60m Posição horizontal
<b>Cabo de aço cobreado</b>	50mm <sup>2</sup> de seção e 10m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60m Posição horizontal

**Solos bons e maus condutores**

Os solos são constituídos por materiais isolantes (silicatos, óxidos) sais minerais ionizáveis, água e carbono. A condução se dá por ionização.

A classificação dos solos é feita de acordo com a resistividade, que é uma função da composição, da temperatura e da umidade. A resistividade é considerada muito baixa quando é menor ou igual a 30 Ω.m: é considerada baixa quando é menor ou igual a 100 Ω.m. Em correspondência um solo é considerado bom condutor quando a resistividade está entre 50 e 100 Ω.m.

Como exemplo desses solos temos os solos pantanosos, com resíduos vegetais em fundos de vales ou nas margens dos rios.

Os solos maus condutores têm resistividade bem mais alta e são exemplos: os arenosos e os rochosos, em locais altos sem vegetação.

**Tensões notáveis**

Algumas tensões características que aparecem quando da ocorrência de falhas de isolamento ou de faltas são conhecidas como tensões notáveis e são as seguintes:

- **Tensão de falta (U<sub>f</sub>)** - tensão entre massa sob falta e o terra de referencia
- **Tensão de contato (U<sub>c</sub>)** . tensão entre duas partes simultaneamente acessíveis
- **Tensão de contato presumida (U<sub>i</sub>)** . maior tensão possível da tensão de contato com falta direta
- **Tensão de contato segura (U<sub>L</sub>)** . valor da tensão de contato suportável pelas pessoas nas condições e situações previstas pela NBR-5410.

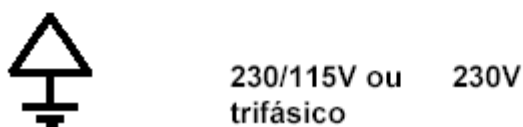
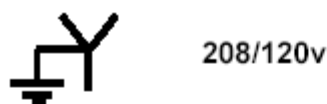
### Os esquemas de Aterramento

Designamos por esquema de aterramento de um circuito o esquema que indica o modo pelo qual um ponto da fonte de alimentação da instalação e as massas dos equipamentos são ligadas à terra. A fonte das instalações pode ser um transformador próprio (fazendo parte da subestação ou posto da transformação da empresa) ou a rede da concessionária que fornece energia em baixa tensão, ou um gerador próprio.

O ponto da fonte que é ligado à terra é geralmente o neutro de uma alimentação em estrela; quando a alimentação é um triângulo, pode-se aterrar uma das pontas do triângulo ou o ponto central de uma das fases.

A padronização brasileira indica para as redes públicas de distribuição em baixa tensão fornecimento pelas concessionárias em (380 / 220 V) ou em (220 / 127 V) e nesses casos é sempre o Neutro que é aterrado. Outros tipos de distribuição como em  $\tilde{}$  (230/115 V) com o centro de uma das fases ligado à terra, ou em 220 V sem terra, estão sendo substituídos para atender à nova legislação.

### Esquemas não padronizados / Industriais



Quando a instalação em BT for própria, derivada de uma Subestação alimentada em AT (69kV ou 138kV) o projetista poderá escolher a melhor alternativa. Nesses caso são usadas outras tensões, como 440 V, 460 V e 480 V (são as mais encontradas nas instalações industriais).

### Indicação dos esquemas de aterramento

O esquema de aterramento é indicado por duas letras básicas que em alguns casos são acompanhadas de outras letras.

As letras básicas são **T**, **N** e **I**, e os esquemas básicos são: **TT**, **TN** e **IT**. As letras complementares são **C** e **S**.

A primeira letra indica como o neutro da fonte está em relação à terra. Assim, quando a **primeira** letra for:

- **T** . o neutro da fonte é diretamente ligado a terra
- **I** . o neutro da fonte é isolado da terra ou aterrado por uma impedância elevada:

1500Ω à 500Ω

**Nota:** Em algumas instalações industriais o neutro é aterrado com uma resistência de valor mais baixo para reduzir a corrente de curto para terra a alguns ampères e que é detectada por um sensor (ground sensor) instalado no neutro. Nesses casos é preciso verificar a **tensão de toque** para a maior corrente de curto circuito e o tempo de atuação da proteção. Se essa tensão for maior que a **tensão segura** (50V para locais secos, 25V para locais úmidos) será necessário diminuir o tempo de desligamento ou melhorar a resistência de aterramento.

As **massas** dos equipamentos são suas estruturas ou carcaças condutoras que estão separadas das partes vivas pela isolação básica do equipamento. Quando esta isolação é perfurada ou se torna muito baixa a massa fica energizada.

A **Segunda letra** indica como as massas estão ligadas a terra:

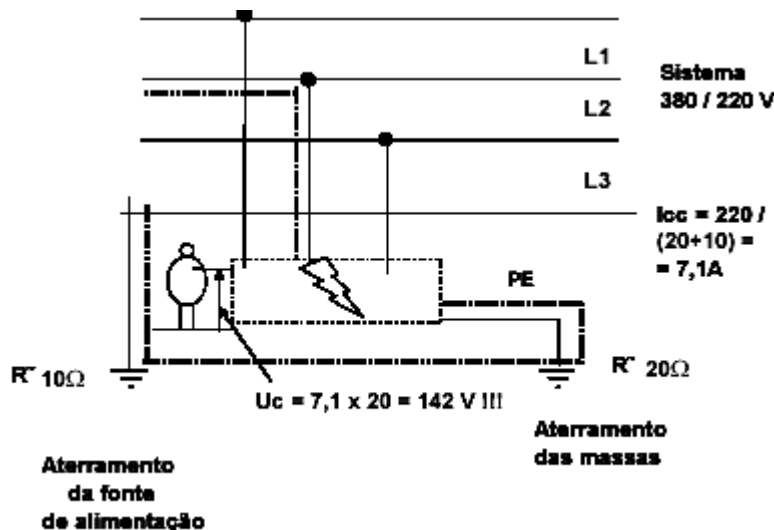
**T** . as massas são ligadas diretamente ao eletrodo de terra ou à malha de terra, que é separado (a) do eletrodo (ou malha) de aterramento do neutro da fonte. Este aterramento é usado nos esquemas TT e IT.

**N** . as massas estão ligadas a um condutor que é aterrado na origem da instalação Este aterramento é usado nos esquemas TN.

### O Esquema TT

Com o Neutro da fonte aterrado em um eletrodo e as massas ligadas a um eletrodo separado a corrente de curto circuito Fase-Terra será pequena, da ordem de dezenas de ampères pois será o resultado da divisão da tensão fase-terra (127V ou 220V) pela soma das resistências de aterramento dos dois eletrodos.

Para a maior tensão fase-terra (220V) e a menor soma das duas resistências(10Ω) a corrente será de **22 A** e para o outro caso extremo, teremos tensão de **127V** e soma das resistências de **40Ω**, a corrente será de **3,2 A** (vide figura abaixo).Este sistema é compatível com as necessidades dos Equipamentos da Tecnologia da Informação (ETI).



Com as correntes de curto-circuito de valores tão baixos os dispositivos de proteção contra sobrecorrentes (DPCC) não atuam e será necessário o uso de dispositivos de corrente diferencial residual DR, com prescreve a norma NBR-5410:

### Esquema TT

*Devem ser obedecidas as prescrições descritas a seguir:*

a) todas as massas protegidas por um mesmo dispositivo de proteção devem ser ligadas por condutor de proteção a um mesmo eletrodo de aterramento. Se forem utilizados vários dispositivos em série, esta prescrição é aplicável a cada grupo de massas protegidas pelo mesmo dispositivo;

b) no esquema TT, a proteção contra contatos indiretos por seccionamento automático da alimentação deve ser assegurada por dispositivos a corrente diferencial-residual (dispositivos DR);

c) a seguinte condição deve ser atendida:

$$RA \cdot \tilde{I}_n = UL$$

Onde:

RA é a soma das resistências do eletrodo de aterramento e dos condutores de proteção das massas;

$\tilde{I}_n$  é a corrente diferencial-residual nominal;

UL é a tensão de contato limite.

NOTA - Quando, numa mesma instalação, algumas massas se encontrarem na situação 1 e outras na situação 2, e ambas ligadas ao mesmo eletrodo de aterramento, ou a eletrodos de aterramento aparentemente separados mas eletricamente confundidos, deve ser adotado o menor valor de UL.

d) quando a condição c) acima não puder ser respeitada, deve-se realizar uma ligação equipotencial suplementar, conforme indicado em 5.1.3.1.7;

e) visando seletividade, dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo S conforme IEC 1008-1 e IEC 1009-1 podem ser utilizados em série com dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo geral. E para assegurar seletividade com os dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo S admite-se um tempo de atuação não superior a 1 s em circuitos de distribuição.

### O esquema TN:

T . tem o mesmo significado que para o esquema TT

N . as massas são ligadas ao condutor neutro que também interliga as massas (**PEN**) ou a um condutor separado (**PE**) de interligação das massas que é aterrado juntamente com o neutro da fonte.

Quando o condutor usado para interligação das massas é o neutro, este passa a ser denominado condutor PEN, de PE+N. Esta denominação vem do fato desse condutor ter 2 funções:

- condutor da corrente de desequilíbrio entre as fases de um circuito polifásico ou da corrente de retorno de um circuito monofásico (função neutro - **N**)
- condutor da corrente de fuga à terra (dezenas de  $\mu$ A) das isolações dos equipamentos e da corrente de curto-circuito Fase-Terra quando falhar uma das isolações (função de proteção . **PE**).

A NBR-5410 estabelece o valor mínimo da seção a ser empregada. Se a seção S dos condutores das fases for menor que 16 mm<sup>2</sup>, usar para o condutor PE a seção S; se a seção S estiver entre 16 e 35 mm<sup>2</sup>, usar 16mm<sup>2</sup>; se a seção S for maior que 35mm<sup>2</sup>, usar S/2.

Os sistemas TN são divididos em:

- **TN-C**, quando há o condutor PEN
- **TN-S**, quando há os condutores PE e N separados.
- **TN-C-S**, quando até um dado ponto do circuito existe o condutor PEN e dali em diante o PEN é aberto. e passam a existir dois condutores separados PE e N.

Quanto ao uso dos DRs no esquema TN a NBR-5410 especifica:

.6.3.3.2.3 No esquema TN, se para certos equipamentos ou para certas partes da instalação uma ou mais das condições enunciadas em 5.1.3.1.4. não puderem ser respeitadas, essas partes podem ser protegidas por dispositivo DR. Neste caso, as massas não precisam ser ligadas ao condutor de proteção do esquema TN, desde que sejam ligadas a um eletrodo de aterramento com resistência compatível com a corrente de atuação do dispositivo DR; o circuito assim protegido deve, então, ser tratado como sendo um esquema TT, sendo a ele aplicáveis as condições de 5.1.3.1.5. Todavia, se não existir nenhum eletrodo de aterramento eletricamente distinto, a ligação das massas ao condutor de proteção do esquema TN deve ser efetuada a montante do dispositivo DR..

#### 5.1.3.1.4 Esquema TN

Devem ser obedecidas as prescrições descritas a seguir:

a) todas as massas devem ser ligadas por condutores de proteção ao ponto da alimentação aterrado (neutro);

b) o condutor de proteção deve ser aterrado na proximidade de cada transformador de potência ou de cada gerador da instalação. Se existirem outras possibilidades efetivas, recomenda-se o aterramento do condutor de proteção em tantos pontos quanto possível. O aterramento múltiplo do condutor de proteção, em pontos regularmente distribuídos, pode ser necessário para garantir que, em caso de falta para massas ou para a terra, o potencial do condutor de proteção e das massas que lhe são ligadas permaneça tão próximo quanto possível do potencial local. Em construções de porte, tais como edifícios de grande altura, ligações equipotenciais entre condutor de proteção e elementos condutores estruturais locais, são indispensáveis para assegurar o desempenho da função do condutor de proteção.

NOTA - Pela mesma razão, especifica-se ligar o condutor de proteção à terra no ponto de entrada de cada edificação ou propriedade.

c) nas instalações fixas, pode-se utilizar um mesmo e único condutor para as funções de condutor de proteção e de condutor neutro (condutor PEN), observadas as prescrições de 6.4.6.2.

d) as características dos dispositivos de proteção e as impedâncias dos circuitos devem ser tais que, ocorrendo em qualquer ponto uma falta de impedância desprezível entre um condutor de fase e o condutor de proteção ou uma massa, o seccionamento automático se efetue em um tempo no máximo igual ao especificado. Esta

prescrição será atendida se a seguinte condição for satisfeita:

$$Z_s \cdot I_a = U_o$$

Onde:

$Z_s$  é a impedância do percurso da corrente de falta;

$I_a$  é a corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção num tempo no máximo igual ao especificado na tabela 20 ou a 5 s nos casos previstos na Nota de 5.1.3.1.3; e  $U_o$  é a tensão nominal entre fase e terra.

NOTA - Numa instalação dada, o valor de  $Z_s$  pode ser determinado por cálculo ou por medições.

Tabela 20 – Tempos de seccionamento máximos no esquema TN

$U_o$ (V)	Tempo de seccionamento (s)	
	Situação 1	Situação 2
115, 120, 127	0,8	0,35
220	0,4	0,20
277	0,4	0,20
400	0,2	0,05
> 400	0,1	0,02

$U_o$  = tensão nominal entre fase e terra, valor eficaz em corrente alternada

e) se as condições prescritas na alínea d) acima não puderem ser satisfeitas com dispositivos a sobrecorrente, deve-se realizar uma ligação equipotencial suplementar conforme 5.1.3.1.7 ou então assegurar a proteção por meio de dispositivos a corrente diferencial-residual.

f) nos casos excepcionais em que possa ocorrer uma falta direta entre um condutor de fase e a terra, por

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L}$$

exemplo em linhas aéreas, a condição seguinte deve ser atendida a fim de que o condutor de proteção e as massas que lhe são ligadas não atinjam um potencial em relação à terra superior à tensão de contato limite  $U_L$ :

Onde:

$R_B$  é a resistência de aterramento global;

$R_E$  é a resistência mínima presumida de contato com a terra dos elementos condutores não ligados ao condutor de proteção, através dos quais se possa produzir uma falta entre fase e terra;

$U_0$  é a tensão nominal entre fase e terra; e

$U_L$  é a tensão de contato limite.

NOTA - Essa prescrição não é aplicável quando a proteção é assegurada por dispositivo a corrente diferencial-residual e nem cobre as redes de distribuição públicas.

g) no esquema TN podem ser usados os seguintes dispositivos na proteção contra contatos indiretos:

. dispositivos de proteção a sobrecorrente;

. dispositivos de proteção a corrente diferencial-residual (dispositivos DR).

NOTAS

1 No esquema TN-C não é possível utilizar dispositivos DR.

2 No caso da utilização de dispositivos DR, as massas podem não ser ligadas ao condutor de proteção do esquema TN, desde que sejam ligadas a um eletrodo de aterramento cuja resistência seja compatível com a corrente de atuação do dispositivo diferencial-residual. O circuito assim protegido deve ser então considerado de acordo com o esquema TT, aplicando-se as prescrições de 5.1.3.1.5.

### O Sistema TN-C

Este sistema é mais econômico porque são passados menos condutores (4 no sistema trifásico e 2 no sistema monofásico); os plugues e tomadas são correspondentemente menores. Este esquema não é utilizado nas instalações com ETIs, porque as correntes de retorno passam pelas massas dos equipamentos e estas ficam a potenciais diferentes, fazendo com que circulem correntes pelas linhas de dados o que introduz ruídos e às vezes destruição de alguns componentes.

Diz-se por isso que o **esquema não é compatível** com a compatibilidade eletromagnética.

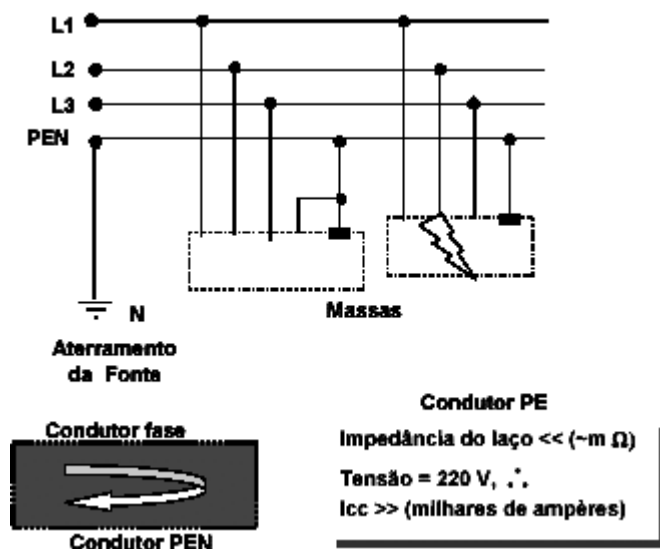
Além dessa aplicação o TN-C não deve ser empregado em locais com risco de incêndio e explosão (áreas classificadas) como os postos de gasolina, por exemplo.

Neste esquema as correntes de curto-circuito são da ordem de milhares de ampères e, como todo esquema TN, não pode ser estendido à vontade porque isso aumenta o laço de curto-circuito e, portanto,

sua impedância o que reduz a corrente de curto-circuito. Esta redução pode fazer com que os DPCC não atuem ou atuem em tempo muito longo, o que pode ser causa de acidentes.

A ligação da massa ao condutor PEN deve ser feita por um condutor PE e não pelo N.

### O Esquema TN-S



Neste esquema os condutores Neutro (N) e Proteção (PE) são interligados na origem da instalação e daí em diante seguem separados.

Como o condutor N conduz a corrente de retorno ou a corrente de desequilíbrio (no sistema trifásico) haverá sempre uma diferença de potencial entre ele e o condutor PE. O dimensionamento do Neutro deve ser suficiente para que essa diferença seja da ordem de 500 mV (norma americana). É costume no Brasil admitir até 2 ou 3 Volts. As fontes de potência não interrompidas (UPS ou No-break) são muitas vezes ajustadas para não permitir tensões superiores a esses valores indicados.

Às vezes alguns instaladores acham que o problema é .do terra. e reduzem a resistência de aterramento ou, pior ainda, fazem uma malha de terra .independente., .isolada., .silenciosa. com resistência inferior a  $5\Omega$  e o problema não é resolvido, ou é resolvido até a queda de um raio nas redondezas (centenas de metros).

Isto se entende facilmente pela figura abaixo que mostra as linhas de corrente que passam pelo solo a partir do ponto de impacto de um raio e os potenciais que surgem no solo (P1, P2 e P3). Se um equipamento, como uma central telefônica por ex., é alimentado por uma linha de força e uma linha de dados e cada uma é aterrada através do respectivo DPS em um ponto diferente do solo, surgirão dentro do equipamento diferenças de potencial que causarão danos ou destruição de componentes principalmente dos cartões de circuito impresso. Além desses pontos de aterramento, a massa da central será aterrada no terra geral do prédio e ficará a outro potencial. Surgirão assim as diferenças de potencial:

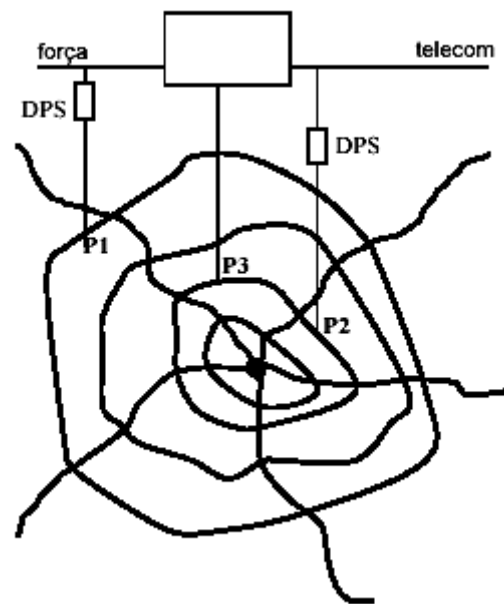
P1-P2 entre as entradas de força e Telecomunicações

P1-P3 entre a entrada de força e a terra

P2-P3 entre as entrada de Telecomunicações e a terra

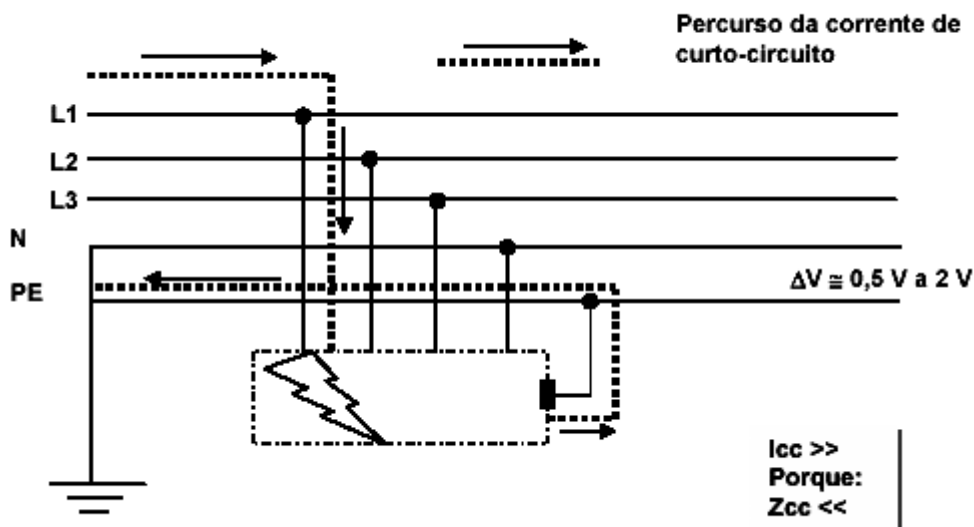
Os **DPS** são os protetores contra sobretensões das linhas de força e de dados (telefonia).

Os DPS deverão ser interligados e aterrados através do TAP em um único ponto, que será o terra geral do edifício.



### As correntes de curto-circuito no esquema TN-S

#### As correntes de curto-circuito no esquema TN-S



Se pelo condutor N passa uma corrente (de desequilíbrio) e pelo condutor PE não passa corrente, salvo alguns microampères (da corrente de fuga),  $\Delta V$  só pode ser causada pela queda de tensão ao longo do Neutro. Como o N e o PE estão interligados na origem qualquer que seja o valor da  $R_T$  (resistência de aterramento) o valor de  $\Delta V$  será sempre o mesmo.

A queda de tensão no neutro pode ser causada também, por componentes harmônicas de 3a. ordem ou suas múltiplas. Verificando as frequências das harmônicas, pode-se dimensionar filtros adequados para suprimi-las, ou aumentar a seção do condutor neutro.

Uma vez terminada a instalação deve-se fazer uma verificação cuidadosa para constatar se não houve em algum quadro, ou alguma tomada a troca dos condutores N e PE ou um contato entre eles.

Se houver uma interligação, a corrente de neutro começa a passar também, por estruturas metálicas e pode acionar sensores e outros dispositivos de controle que têm ligação com essas estruturas.

Assim como no esquema TN-C, o projetista deve informar ao proprietário o comprimento máximo que pode atingir o circuito, em uma eventual ampliação, para não atrapalhar os ajustes da corrente de disparo do DPCC pela corrente mínima de curto-circuito. Este dado deve constar do diagrama ou do memorial descritivo do projeto.

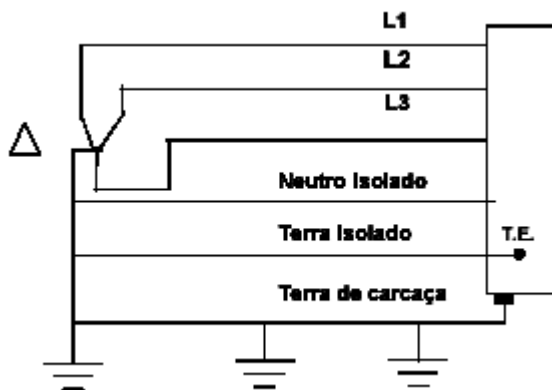
### O esquema TN-C-S

Como o sistema TN-C apesar de suas limitações é mais econômico, é possível usá-lo na alimentação das cargas eletromecânicas e a partir de um dado ponto passar para o sistema TN-S dividindo o condutor PEN em dois condutores separados N e PE. O ponto da separação pode ser um Quadro de Distribuição mas sempre que possível é melhor intercalar um transformador Delta-Estrela

O Neutro será aterrado só na nova origem e o PE pode ser aterrado em outras estruturas metálicas aterradas, nas estruturas dos quadros de distribuição, etc.

Se o ETI alimentado tiver um **terra eletrônico** e um **terra de carcaça**, deve ser instalado um outro PE, denominado **PE (ou terra) isolado** que será um condutor isolado e irá diretamente do terra eletrônico ao terra o transformador onde o Neutro está sendo aterrado. Talvez essa denominação .terra eletrônico. que deve ser ligado a um .condutor terra isolado. é que tenha dado origem à idéia de fazer uma .malha de terra isolada. para ser ligada ao .terra eletrônico. do equipamento.

Em caso de queda de raio nas proximidades (centenas de metros) essa malha de terra isolada ficará, com explicado acima, a um potencial diferente do resto da instalação e do terra do edifício o que levará fatalmente à queima de componentes do ETI.

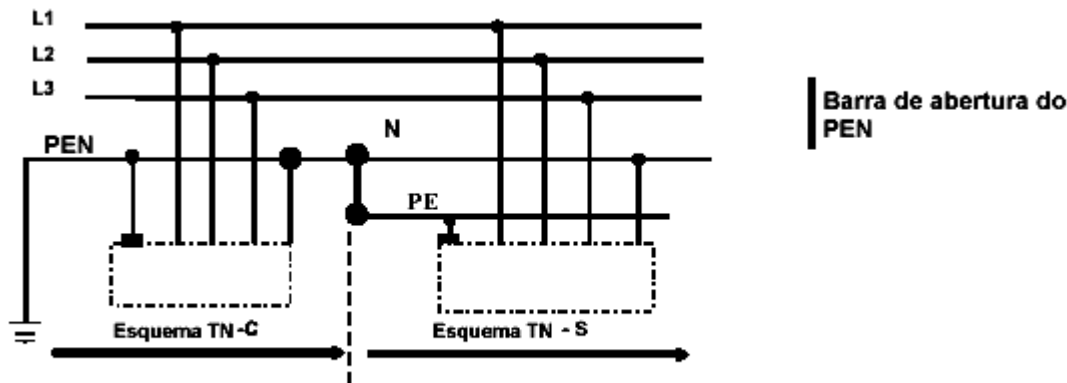


Esquema TN . C . S com transformador de isolamento

Notas:

1. O T.E. é o terra eletrônico que nem sempre é acessível em todos os ITE.
2. O condutor .terra isolado. deve ser um condutor isolado que vai diretamente do T.E. ao terra da nova fonte, sem ter contato com outras massas.
3. O Neutro é isolado em relação ao neutro da fonte do sistema geral, mas deve ser aterrado, junto com os novos terras (de carcaça e eletrônico, se houver este último).
4. O transformador . Õ não é obrigatório, mas é conveniente para separar ruídos de outros circuitos e as harmônicas de terceira ordem existentes no circuito geral.
5. Será vantajoso o uso de transformador com blindagem entre os enrolamentos primário e secundário, para melhorar a supressão de ruídos
6. O .Terra de carcaça. é um condutor nu que vai da carcaça do ETI ao novo terra e é interligado a outras carcaças e estruturas metálicas. Este terra deve ser interligado ao terra geral da instalação.

7. Muitas UPS (No-break) já possuem o transformador especificado acima e fornecem o novo neutro e o terra de carcaça. O **condutor terra isolado**, se for necessário, deverá ser instalado pelo empreiteiro da instalação.



**Esquema TN - C - S sem transformador de isolamento**

### O esquema IT

Neste esquema o que se pretende é que não haja desligamento da fonte quando ocorrer a primeira falta à terra.

6.3.3.2.5 No esquema IT, quando a proteção for assegurada por um dispositivo DR e se o seccionamento à primeira falta não for cogitado, a corrente diferencial-residual de não operação do dispositivo deve ser no mínimo igual à corrente que circula quando de uma primeira falta franca para a terra que afete um condutor fase.

#### 5.1.3.1.5 Esquema TT

Devem ser obedecidas as prescrições descritas a seguir:

a) todas as massas protegidas por um mesmo dispositivo de proteção devem ser ligadas por condutor de proteção a um mesmo eletrodo de aterramento. Se forem utilizados vários dispositivos em série, esta prescrição é aplicável a cada grupo de massas protegidas pelo mesmo dispositivo;

b) no esquema TT, a proteção contra contatos indiretos por seccionamento automático da alimentação deve ser assegurada por dispositivos a corrente diferencial-residual (dispositivos DR);

c) a seguinte condição deve ser atendida:

$$R_A \cdot \tilde{I}_n = U_L$$

Onde:

$R_A$  é a soma das resistências do eletrodo de aterramento e dos condutores de proteção das massas;

$\tilde{I}_n$  é a corrente diferencial-residual nominal;

$U_L$  é a tensão de contato limite.

NOTA - Quando, numa mesma instalação, algumas massas se encontrarem na situação 1 e outras na situação 2, e ambas ligadas ao mesmo eletrodo de aterramento, ou a eletrodos de aterramento aparentemente separados mas eletricamente confundidos, deve ser adotado o menor valor de  $U_L$ .

d) quando a condição c) acima não puder ser respeitada, deve-se realizar uma ligação equipotencial suplementar, conforme indicado em 5.1.3.1.7;

e) visando seletividade, dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo S conforme IEC 1008-1 e IEC 1009-1 podem ser utilizados em série com dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo geral. E para assegurar seletividade com os dispositivos a corrente diferencial-residual do tipo S admite-se um tempo de atuação não superior a 1 s em circuitos de distribuição.

#### 5.1.3.1.6 Esquema IT

Devem ser obedecidas as prescrições descritas a seguir:

a) as instalações conforme o esquema IT são isoladas da terra ou aterradas através de uma impedância de valor suficientemente elevado. Neste caso, o ponto a ser aterrado é o ponto neutro da fonte ou um ponto neutro artificial.

Na hipótese de ponto neutro artificial, pode-se ligá-lo diretamente à terra se sua impedância de sequência zero for alta o suficiente. Quando não existir qualquer ponto neutro, o aterramento através de impedância pode ser aplicado a um condutor de fase;

NOTA - A necessidade de reduzir sobretensões e amortecer as oscilações de tensão pode conduzir a uma instalação IT com aterramento via impedância ou pontos neutros artificiais. As características desse aterramento devem ser compatíveis com as da instalação.

b) numa instalação IT, a corrente de falta, no caso de uma única falta à massa ou à terra, é de pequena intensidade, não sendo imperativo o seccionamento da alimentação, se satisfeita a condição c) adiante.

Entretanto, devem ser tomadas medidas para evitar qualquer perigo no caso da ocorrência de uma segunda falta, envolvendo outra fase, conforme prescrito na alínea e) adiante. Além disso, cabe advertir, tendo em vista as razões que normalmente motivam a adoção do esquema IT, que ela na prática perde sentido se a primeira falta não for localizada e eliminada o quanto antes;

c) as massas devem ser aterradas, seja individualmente, seja por grupos ou em conjunto. A seguinte condição deve ser satisfeita:

$$RA \cdot Id = UL$$

Onde:

RA é a resistência do eletrodo de aterramento das massas;

Id é a corrente de falta no caso de uma primeira falta direta entre um condutor de fase e uma massa. O valor de Id leva em conta as correntes de fuga naturais e a impedância global de aterramento da instalação;

UL é a tensão de contato limite.

f) no esquema IT, os seguintes dispositivos de proteção podem ser utilizados na proteção contra contatos indiretos:

. dispositivos de proteção a sobrecorrente;

. dispositivos de proteção a corrente diferencial-residual (dispositivos DR).

Essa idéia é já bastante antiga, mas o receio de haver uma Segunda falta à terra antes de ser suprimida a primeira falta atrasou a sua aplicação em larga escala.

U (V)	Tempo de seccionamento (s)	
	Situação 1	Situação 2
208, 220, 230	0,8	0,35
380, 400, 480	0,4	0,20
690	0,2	0,05
1000	0,1	0,02

NOTAS

1 U = tensão nominal entre fases, valor eficaz em corrente alternada.

2 Para tensões dentro dos limites de tolerância definidos pela IEC 38, os tempos de seccionamento correspondentes às tensões nominais são aplicáveis.

3 Para valores intermediários de tensão deve ser adotado o valor (da tabela) imediatamente superior.

Só com o uso de sistemas de controle permanente da isolação dos equipamentos e da fiação foi possível o uso do esquema IT nos locais onde a continuidade do serviço é essencial: as instalações hospitalares e alguns tipos de instalações industriais.

Os sistemas de controle da isolação são baseadas em uma fonte de baixa frequência (1 a 3 Hz) ou de corrente contínua. Esta fonte permite monitorar as isolações básicas dos equipamentos com uma correntemuito pequena. Quando falha uma isolação qualquer (ou tem seu valor muito reduzido) acende-se uma lâmpada de um painel indicando que há uma falha à terra. É preciso que a turma de manutenção seja treinada para executar um pronto atendimento. Como o neutro da fonte está isolado da terra, ou aterrado através de uma resistência muito alta, a corrente de curto-circuito é muito baixa (dezenas ou centenas de mA) e não é percebida pelo DPCC da fonte. Se a falha não for suprimida e acontecer uma outra falha à terra haverá um curto-circuito fase-fase e em consequência o desligamento da fonte. A corrente de curto-circuito fase-fase é da ordem de milhares de ampères.

Em uma instalação bem supervisionada, com manutenção constante uma falta à terra tem uma probabilidade muito baixa de ocorrer e uma segunda falta antes da correção da primeira é muito rara.

Não há vantagem em fazer uma instalação geral no esquema IT em todo o hospital ou em toda a indústria.

A boa prática recomenda que o esquema IT seja utilizado em uma parte da instalação, aquela em que a continuidade é primordial. Assim em um hospital o esquema IT deve ser reservado aos Centros Cirúrgicos, Unidades de Terapia Intensiva, Salas de leitos de prematuros. As demais áreas como iluminação geral, tomadas de uso geral, elevadores, lavanderias serão alimentadas pelos esquemas TN - C ou TT.

### A distribuição do Neutro no esquema IT.

Embora permitida pela IEC essa técnica foi proibida pela NBR-5410.1997. Há pedidos de suspensão dessa restrição para a próxima revisão dessa Norma.

A vantagem de se distribuir o Neutro é de se poder dispor de uma tensão mais baixa sem necessidade de instalar transformadores abaixadores.

Assim, no sistema 380/220V, seria disponível a tensão F-N de 220V para pequenos aparelhos e a de 380V para as cargas mais pesadas.

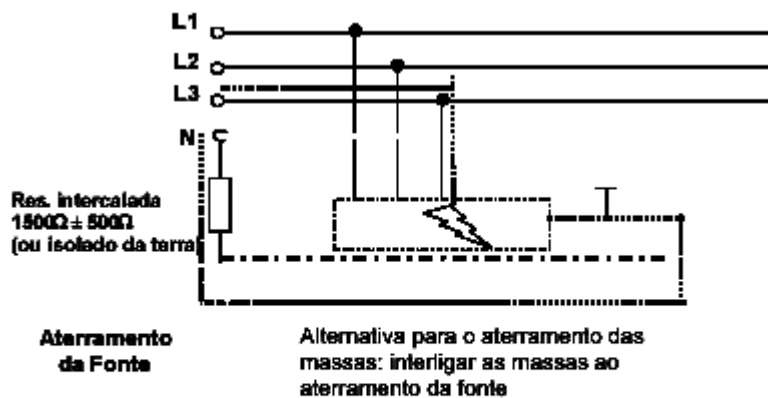
Pela norma brasileira devemos intercalar transformadores abaixadores para obter 220V ou 127V, a razão dessa proibição foi a notícia de alguns acidentes em indústrias nas quais o neutro distribuído foi aterrado inadvertidamente.

### A especificação da isolação dos equipamentos

Em um esquema IT, quando ocorre a primeira falta em uma das fases, a tensão fase-terra das outras fases passa a ser igual à tensão fase-fase. Por esse motivo os equipamentos ligados entre fase e terra (como os dispositivos de proteção contra sobretensões - DPS) devem ter a tensão nominal igual à tensão fase-fase.

As isolações básicas dos equipamentos devem ser dimensionadas para a tensão fase-fase e não para a tensão fase-terra como habitualmente se faz para os demais esquemas (TT e TN).

Nas instalações industriais o esquema IT deve ser reservado para aquelas máquinas cuja parada pode representar grandes prejuízos. Como normalmente as indústrias têm geração de reserva, que proporcionam um religamento em poucos segundos não serão muitas as máquinas que exigirão um esquema IT.



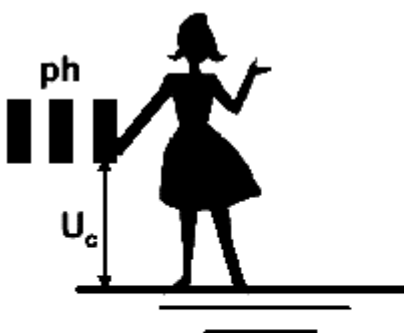
$$I_{cc} = 220 / (1000 + R_t) \approx 200 \text{ mA}$$

$$\text{Tensão de toque} = 0,2A \times 20\Omega \approx 4 \text{ V}$$

..... Percurso da corrente  $I_{cc}$

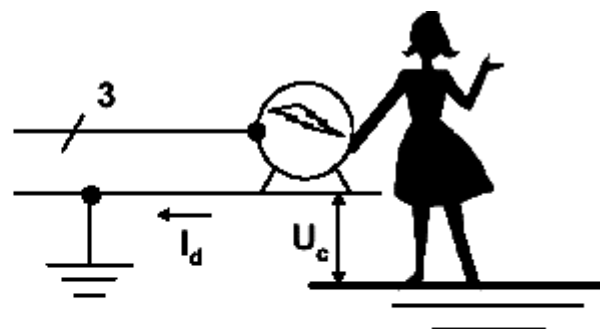
### 10. Choques Elétricos

Quando a instalação for alimentada em baixa tensão pela concessionária, o condutor neutro deve ser sempre aterrado na origem da instalação. O aterramento do neutro provido pelos consumidores alimentados em baixa tensão é essencial para que seja atingido o grau de efetividade mínimo requerido para o



#### Contato direto

Contato com partes vivas







#### Contato indireto

Contato com massa que ficou sob tensão em condição de falta

aterramento do condutor neutro da rede pública, conforme critério de projeto atualmente padronizado pelas concessionárias de energia elétrica. Do ponto de vista da instalação, o aterramento do neutro na origem proporciona uma melhoria na equalização de potenciais essencial à segurança.

No Brasil, as redes de distribuição pública em baixa tensão são multiterradas, isto é, o condutor neutro é aterrado em diversos pontos.

O choque elétrico é o efeito patofisiológico da passagem da corrente elétrica pelo corpo humano. Essa passagem afeta o corpo desde uma sensação de formigamento até disfunções circulatórias e respiratórias podendo ainda causar, queimaduras. O grau de risco para a pessoa é função da intensidade da corrente, das partes do corpo atravessadas, e da duração da passagem da corrente. Para proteger as pessoas contra o choque elétrico é preciso primeiro conhecer qual é o efeito da corrente elétrica no corpo humano. Para isto foi realizado um grande estudo, pela IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), baseado nos estudos de medicina relacionando o choque com efeitos fisiológicos no corpo humano. O resultado deste estudo está no documento IEC 479. Esta norma define regiões, na curva duração do choque elétrico x intensidade, em função dos efeitos causados. Pode-se daí, e assim a NBR 5410 o faz, extrair as condições em que é segura a instalação elétrica, conforme pode ser visto na figura a seguir.

Corrente (mA)		Reações Fisiológicas habituais
500 mA		Parada cardíaca
30 mA		Risco fibrilação cardíaca
10 mA		Sem efeito perigoso até 5 segundos
0,5 mA		Pequena contração muscular
0,1 mA		Leve formigamento



A proteção contra choque que visa impedir o acesso às partes vivas da instalação é chamada de proteção contra choque por contato direto.

A proteção que visa impedir o choque elétrico a partir de parte condutora da instalação que normalmente não esta energizada, mas que se tornou energizada com um potencial perigoso . normalmente devido a um defeito na isolação básica de um componente - é conhecida como proteção contra choque por contato indireto.

A base técnica para as prescrições de proteção contra choque nas normas brasileiras é o relatório IEC 479-1 que trata dos efeitos do choque elétrico no corpo humano. Portanto realizar a proteção contra choques, no âmbito das normas baseadas nesta filosofia, é manter as partes acessíveis das instalações dentro dos limites estabelecidos pela IEC 479-1. A proteção contra choques, portanto, independe do valor da tensão nominal da instalação, dependendo somente da suportabilidade do corpo humano ao choque.

### **Proteção contra choque por contato direto**

A proteção contra choque por contato direto visa impedir um contato involuntário com uma parte condutora destinada a ser submetida a uma tensão não havendo defeito. Esta regra se aplica igualmente ao condutor neutro. A maneira de impedir este acesso constitui as medidas de proteção. Cada uma das medidas tem características específicas. A proteção contra contatos diretos deve ser assegurada por meio de:

- . proteção por isolação das partes vivas,
- . proteção por meio de barreiras ou invólucros,

### **Isolação**

A medida de proteção contra choque por contato direto por isolação é considerada como realizada quando a isolação recobrir o total da parte viva por material isolante capaz de suportar uma matéria durável aos inconvenientes ou condições mecânicas, elétricas ou térmicas às quais ele pode ser submetida, além disto é necessário que esta matéria isolante só possa ser retirada por destruição. No caso dos equipamentos e materiais montados em fábrica, a isolação deve atender às prescrições relativas às normas desses equipamentos e materiais. Quando a isolação for feita durante a execução da instalação, a qualidade desta isolação deve ser verificada através de ensaios análogos aos destinados a verificar a qualidade da isolação de equipamentos similares industrializado. As tintas, vernizes, lacas e produtos análogos não são, geralmente, considerados como constituindo uma isolação suficiente no quadro da proteção contra os contatos diretos.

### **Barreiras ou invólucros**

Quando a isolação das partes vivas for inviável ou não for conveniente para o funcionamento adequado da instalação. Estas partes devem estar protegidas contra o contato por barreiras ou invólucros. Estas barreiras ou invólucros devem satisfazer a NBR 6146, norma que define condições exigíveis aos graus de proteção providos por invólucros de equipamentos elétricos e especifica os ensaios de tipo para verificação das várias classes de invólucros. As partes vivas devem estar no interior de invólucros ou atrás de barreiras que confirmam pelo menos o grau de proteção IP2X.

As superfícies superiores das barreiras ou dos invólucros horizontais que sejam facilmente acessíveis devem atender pelo menos ao grau de proteção IP4X. As barreiras e invólucros devem ser fixados de forma segura e possuir robustez e durabilidade suficientes para manter os graus de proteção e a apropriada separação das partes vivas nas condições normais de serviço, levando-se em conta as condições de influências externas relevantes. A supressão das barreiras, a abertura dos invólucros ou coberturas ou a retirada de partes dos invólucros ou coberturas não deve ser possível a não ser:

- . com a utilização de uma chave ou de uma ferramenta; e
- . após a desenergização das partes vivas protegidas por essas barreiras, invólucros ou coberturas, não

podendo ser restabelecida a tensão enquanto não forem recolocadas as barreiras, invólucros ou coberturas;  
ou

**NOTA:** Esta prescrição é atendida com utilização de intertravamento mecânico e/ou elétrico.

que haja interposta uma segunda barreira ou isolamento que não possa ser retirada sem a desenergização das partes vivas protegidas por essas barreiras, e que impeça qualquer contato com as partes vivas.

### **Proteção contra choque por contato indireto**

As partes condutoras expostas dos componentes da instalação elétrica, acessíveis sem que seja necessário desmontar o componente, e que não fazem parte do circuito elétrico deste componente, é separado das partes vivas pela "isolação básica". Falhas nesta isolação básica tornarão vivas as partes condutoras expostas do componente. Denomina-se contato indireto o toque de uma parte metálica normalmente não energizada de um aparelho elétrico que foi tornada viva por uma falha da isolação. Devem ser adotadas medidas para proteção contra esse risco. A proteção contra choque por contato indireto é o conjunto de prescrição que visa impedir que apareça na instalação uma tensão de contato que possa resultar em risco de efeito fisiológico perigoso para as pessoas (ver IEC 479-1). Esta tensão de contato pode aparecer na massa dos equipamentos ou nos elementos condutores estranhos à instalação, devido a um defeito de isolamento. A figura 1 apresenta a tensão de contato em função do tempo de exposição. O valor máximo da tensão de contato que pode ser mantida indefinidamente, de acordo com a IEC 479-1, em condições especificadas de influências externas, é chamado de Tensão de contato limite convencional (UL). A proteção contra choque por contato indireto é o conjunto de prescrições que visam garantir que nenhuma pessoa ficará sujeito a uma tensão perigosa em caso de falta da isolação em algum componente da instalação. As principais medidas de proteção contra choque elétrico, prescritas pela NBR 5410, são:

- Seccionamento automático da alimentação;
- Emprego de equipamentos da classe II ou por isolação equivalente;
- Separação elétrica.

### **Proteção por seccionamento automático da alimentação**

O seccionamento automático da alimentação destina-se a evitar que uma tensão de contato se mantenha por um tempo que possa resultar em risco de efeito fisiológico perigoso para as pessoas (ver IEC 479-1). Esta medida de proteção requer a coordenação entre o esquema de aterramento adotado e as características dos condutores de proteção e dos dispositivos de proteção.

### **Princípios básicos**

A proteção por seccionamento automático da alimentação baseia-se nos seguintes princípios:

**Aterramento** . as massas devem ser ligadas a condutores de proteção nas condições especificadas, para cada esquema de aterramento. Massas simultaneamente acessíveis devem ser ligadas à mesma rede de aterramento . individualmente, por grupos ou coletivamente.

**Tensão de contato limite** . a tensão de contato limite (UL) não deve ser superior ao valor indicado na tabela 19. Aos limites indicados se aplicam as tolerâncias definidas na IEC 38.

Natureza da corrente	Situação 1 <sup>1)</sup>	Situação 2 <sup>1)</sup>
Alternada, 15 Hz – 1000 Hz	50	25
Contínua sem ondulação <sup>2)</sup>	120	60

1) As situações 1 e 2 estão conceituadas em 5.8.1.3.1;

2) Uma tensão contínua "sem ondulação" é convencionalmente definida como apresentando uma taxa de ondulação não superior a 10% em valor eficaz; o valor de crista máximo não deve ultrapassar 140 V, para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 120 V nominais, ou 70 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 60 V nominais.

**Seccionamento da alimentação** . um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente a alimentação do circuito ou equipamento protegido contra contatos indiretos por este dispositivo sempre que uma falta entre parte viva e massa no circuito ou equipamento considerado der origem a uma tensão de contato superior ao valor apropriado de UL.

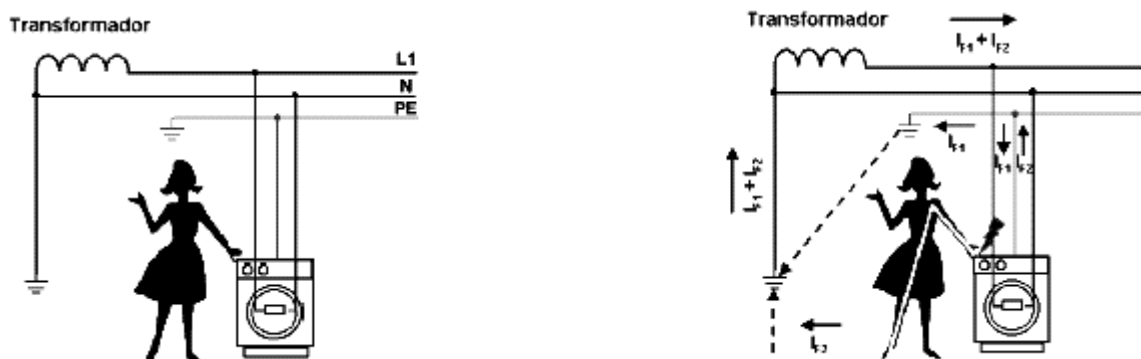
### **Ligações equipotenciais**

**Ligação equipotencial principal** . Em cada edificação deve existir uma ligação equipotencial principal reunindo os seguintes elementos:

- condutor(es) de proteção principal(is);
- condutores de equipotencialidade principais ligados canalizações metálicas de utilidades e serviços (água, gás aquecimento, ar condicionado, etc) e a todos os demais elementos condutores estranhos à instalação existentes, incluindo os elementos metálicos da construção e outras estruturas metálicas;
- condutor(es) de aterramento;
- eletrodo(s) de aterramento de outros sistemas (por exemplo: de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), de antenas, etc.);
- condutores de aterramento funcional, se existente.

### **Seccionamento da alimentação**

Para que fique claro o conceito de seccionamento da alimentação, vamos exemplificar com os desenhos a seguir. Quando um equipamento apresentar um defeito de isolamento provocando uma energização da massa do equipamento uma corrente circulará pelo circuito, uma parte através do condutor de proteção e outra pela pessoa que estiver em contato com a massa. Este circuito deve ser seccionado e a corrente interrompida antes que possa ocorrer efeito fisiológico perigoso para a pessoa.



Para que exista a corrente de falta, é preciso que o aterramento das massas feche o circuito da corrente de falta. A impedância do caminho da corrente de falta é determinada pelas características do condutor de proteção e do esquema de aterramento. O esquema de aterramento vai determinar a magnitude da corrente de falta e conseqüentemente o tipo de dispositivo de proteção a ser usado. Enquanto os disjuntores e os fusíveis são eficazes quando a corrente de falta é muito superior à corrente nominal do circuito (da ordem de dez, cem ou até mil vezes), o DR é eficaz para corrente de falta de valores inferiores a corrente nominal. A escolha do dispositivo deve ser feita baseado no esquema de aterramento da instalação. O fundamental é seguir a prescrição da NBR 5410 de que a alimentação deve ser seccionada automaticamente sempre que uma falta energizar uma massa com níveis de tensão superior ao suportado com segurança pelo ser humano.

É preciso frisar, no entanto, que a norma estabelece que o seccionamento deve ser feito mesmo que nenhuma pessoa esteja tomando choque, ou seja, basta que uma corrente de falta circule pelo condutor de proteção. Porque senão, podemos imaginar que o seccionamento automático da alimentação feito por um DR de alta sensibilidade (corrente inferior a 30 mA) sem o condutor de proteção está em conformidade com a norma e isto, definitivamente, não é verdade, a utilização do DR de 30 mA não dispensa o uso do condutor de proteção.

O emprego do DR de alta sensibilidade é prescrito na norma como proteção complementar, para prevenir perigos de utilização em casos de defeitos, como por exemplo, a quebra do condutor de proteção como pode ser visto na figura a seguir. Portanto a utilização do DR de alta sensibilidade não dispensa as demais proteções estabelecidas na norma, devendo ser entendida como uma proteção de retaguarda.

## Dispositivos DR

### Proteção complementar contra contatos diretos:

- Circuitos que sirvam a pontos situados em locais contendo banheira / chuveiro (exceto circuitos que alimentem pontos de luz com  $h > 2,5\text{m}$ )
- Circuitos que alimentem tomadas de corrente em áreas externas
- Circuitos de tomadas de corrente em áreas internas que possam alimentar equipamentos no exterior
- Circuitos de tomadas de corrente de cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, a todo local interno molhado em uso normal ou sujeito a lavagens (podem ser excluídas as tomadas destinadas a alimentar refrigeradores e congeladores, desde que não diretamente acessíveis)

### Função Dispositivos DR

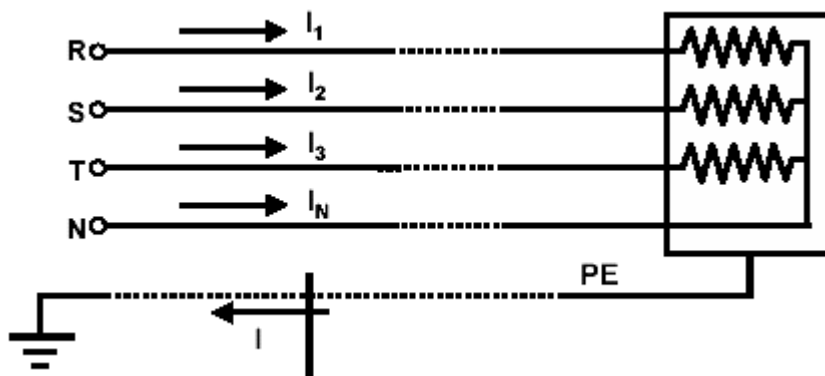
#### 5SM1 / 5SZ (Exemplo de um fabricado pela Siemens)

- Protegem pessoas contra os efeitos nocivos causados por choques elétricos, por detecção da corrente de fuga e desligamento imediato
- Protegem também instalações contra falhas de isolamento, evitando perdas de energia e possíveis focos de incêndio
- Faixas de corrente de 25, 40, 63 e 125A para correntes de fuga de 30 e 500mA em 220/380VCA

- Compatíveis com a exigência da norma NBR 5410/1997
- Fixação rápida por engate sobre trilho
- Acessórios: Contatos auxiliares 1NA + 1NF (5SM1)
- Atendem ao Sistema N - modular standard



Dispositivo DR - Dispositivo que interrompe a corrente de carga quando a corrente diferencial residual atinge um determinado valor. Corrente Diferencial Residual - é a soma algébrica dos valores instantâneos das correntes que percorrem todos os condutores vivos de um circuito em um dado ponto.



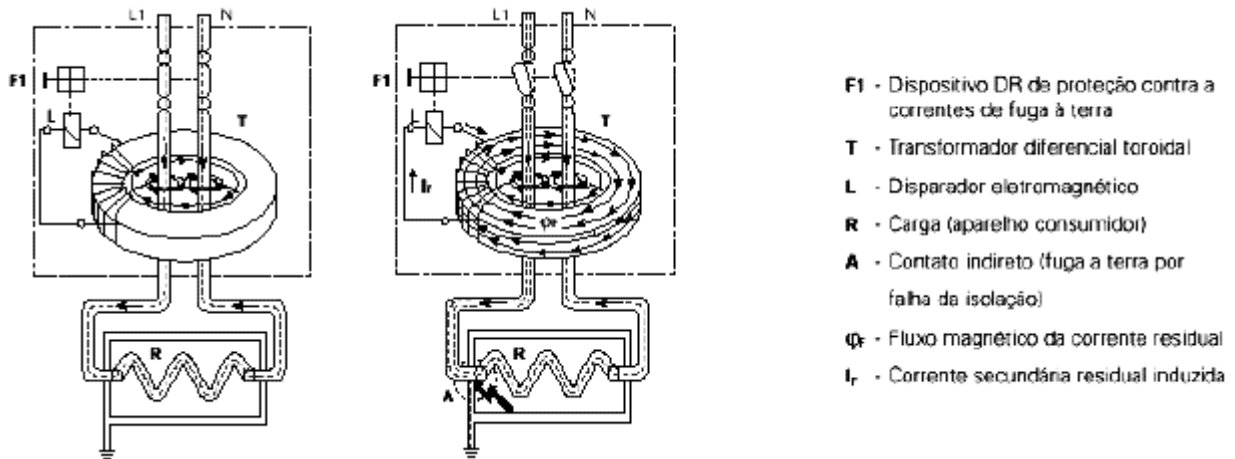
### Princípio de funcionamento

A corrente diferencial residual de um circuito sem defeito de isolamento seja na carga seja nos condutores, é zero. Este valor é ideal, pois por imperfeição dos materiais isolantes de que são usados na fabricação dos condutores e das isolações básicas das cargas existe uma pequena corrente diferencial residual natural.

O dispositivo DR é um componente da instalação que secciona a alimentação da carga ou circuito quando a corrente diferencial residual ultrapassa um determinado valor.

Para que o DR cumpra esta função o dispositivo é construído de tal forma que todos os condutores vivos do circuito passe por dentro de um toroide no interior deste dispositivo. Cada condutor induz um fluxo magnético no toroide com uma intensidade proporcional à intensidade da corrente e sentido proporcional ao sentido da corrente. Pode-se facilmente concluir que o fluxo resultante no toroide é proporcional à corrente diferencial residual do circuito. O dispositivo DR usa este fluxo, através de um sistema de detecção, para comandar um dispositivo de interrupção que secciona a alimentação do circuito.

Como em um circuito sem falta a corrente diferencial residual é muito baixa praticamente nula o dispositivo não atua quando no circuito aparece uma falta, a corrente diferencial assume um valor alto e conseqüentemente o fluxo magnético também aumenta, o sistema de detecção envia um comando para o dispositivo de interrupção que isola a parte com defeito.



O DR pode ser encontrado em duas formas diferentes de implementação. Quando o sistema de detecção, incluindo o toróide, e o sistema de interrupção encontram-se presentes no mesmo equipamento é denominado dispositivo DR. Quando o sistema de detecção, incluindo o toróide, e o sistema de interrupção encontram-se em equipamentos distintos, o sistema de interrupção da corrente usado normalmente é o disjuntor e o DR é um módulo que se acopla a este disjuntor. A primeira opção é usada nas instalações prediais e a segunda nas instalações industriais.

### Tipos de DR.s

- AC Apenas corrente alternada
- A Corrente alternada e pulsante
- B Alternada, pulsante e CC pura

Os Dispositivos DR ou Disjuntores DR de corrente nominal residual ( $\tilde{I}_n$ ) até 30 mA, são destinados a proteção de pessoas, e, acima deste valor, são apropriados a proteção de instalações elétricas.

Dispositivos DR ou Disjuntores DR do tipo AC são aplicados em circuitos de corrente alternada, sendo resistentes à sobretensões transitórias. São normalmente utilizados em instalações elétricas prediais, como também em instalações elétricas industriais de características similares.

Os do tipo A (antigo B) são aplicados em circuitos de corrente alternada e contínua pulsante, sendo fortemente resistentes às acentuadas sobretensões transitórias típicas das grandes instalações elétricas industriais. Dispositivos DR de corrente nominal residual ( $\tilde{I}_n$ ) de 10 mA, são utilizados em circunstâncias especiais, como, por exemplo, para proteção de pessoas que sofreram intervenções cirúrgicas delicadas, como a correção de distúrbios cardíacos.

Para projetos típicos com circuitos de entrada e de distribuição, podem ser utilizados os Dispositivos DR que atuam de forma seletiva, o que permite que seja desligada somente a parte da instalação que apresente falha.

Dispositivo DR seletivo de característica S, tem um retardo de disparo conforme prescrito pela norma IEC 1008. Para uma corrente nominal residual de 30 mA, o Dispositivo DR seletivo de característica K, tem seu disparo retardado em 10 ms acima dos valores normais de atuação, o que permite uma seletividade fina e adequada à proteção de pessoas.

Os Disjuntores DR, além da proteção contra correntes de fuga à terra, protegem as instalações elétricas das correntes de sobrecarga e curto-circuito. São aplicados Dispositivos DR ou Disjuntores DR normalmente nas configurações de rede TN-S (Fase/PE) e TT (Fase/N/PE). Dispositivos DR obedecem a norma IEC 1008 e os Disjuntores DR a IEC 1009.

### **Módulo DR**

O módulo DR é um componente da instalação que detecta a corrente diferencial residual e comanda a interrupção no disjuntor. Esta opção é dada sempre em disjuntores industriais, que seguem a norma NBR 60947-2. A interrupção ocorre no disjuntor, logo a capacidade de interrupção do conjunto é definido pela capacidade de interrupção do disjuntor.

O módulo DR (Diferencial-Residual) foi concebido para ser montado posteriormente no disjuntor pelo cliente. A combinação de disjuntor SENTRON VL e módulo DR pode ser alimentada tanto pelo lado superior como pelo inferior. Todos os disjuntores SENTRON VL com módulo DR podem ser fornecidos com blocos de contatos auxiliares e de alarme, bobina de mínima tensão e bobina de desligamento à distância, sendo sua montagem dependente dos acessórios já existentes no disjuntor.

O módulo DR detecta a presença de correntes diferenciais/residuais dentro dos sistemas de distribuição.

### **Aplicação**

Proteção de pessoas em redes TT, IT e TN (ajuste  $I_n = 30\text{mA}$ , td instantâneo). Proteção de instalações e equipamentos contra sobrecarga ou contra danos causados por faltas à terra (proteção de falta à terra).

O módulo DR se vale de uma soma vetorial de todas as correntes de fase, acionando o trip do disjuntor quando a corrente de falta à terra ultrapassa os valores ajustados de corrente de atuação e de tempo de retardo.

### **Características**

Fácil montagem pelo cliente Kit para montagem lateral de acordo com DIN 50 023 para os disjuntores SENTRON VL160X, sob código de encomenda 3VL9112-5GB30 / 3VL9 112-5GB40.

O Botão de teste do mecanismo de disparo (trip) possibilita o teste funcional do bloco DR montado Botão de reset/trip (por questão de segurança evita que o disjuntor seja religado antes que o botão de reset/trip tenha sido acionado)

O circuito para desligamento remoto do disjuntor não necessita de fonte de tensão externa (para os disjuntores SENTRON VL160 até VL400). O cliente deverá disponibilizar a chave remota e fiação dupla Indicação via LED permite a supervisão visual do módulo DR:

verde -  $\tilde{I} = 25\%$  de  $I_n$

verde + amarelo -  $25\% < I < 50\%$  do valor ajustado de  $I_n$

verde + amarelo + vermelho  $\tilde{I} = 50\%$  do valor ajustado de  $I_n$

Contato de alarme reversível (NAF) para os disjuntores VL160 até VL400, para indicação de disparo por atuação do módulo DR SENTRON VL160 à VL400 disponíveis para uso em até 690V CA "Power disconnect" possibilita o teste dielétrico sem a necessidade de desconexão de cabos As características funcionais do disjuntor não são prejudicadas pela inserção do bloco DR Auto-alimentado, não necessitando de tensão externa.

### **Principais características para selecionar DR**

$I_n$ (A)	$\tilde{I}_n$ (mA ou A)	$U_n$ (V)	$I_{int}$ (A ou kA)	$f$ (Hz)
Nº pólos				

**Dispositivos DR . Tipo AC****5SM1 / 5SM3**

Bipolares - Sensibilidade 30 e 300 mA 25A, 40A, 63A e 80A

Tetrapolares - Sensibilidade 30, 300 mA 25A

Tetrapolares - Sensibilidade 30, 300 e 500 mA 40A, 63A, 80A, 125A e 125A (selet. S)

Acessórios para 5SM1 . Tipo AC/A) Contato auxiliar 1NA + 1NF

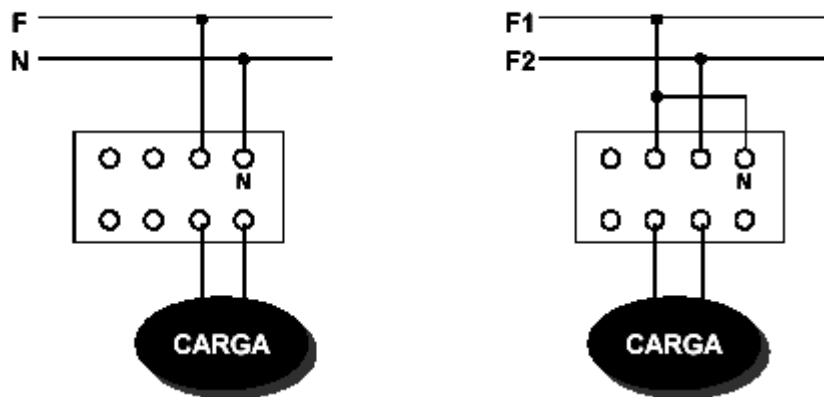
**Dispositivos DR . Tipo A****5SM1 / 5SZ**

Bipolares - Sensibilidade 10 mA 16A

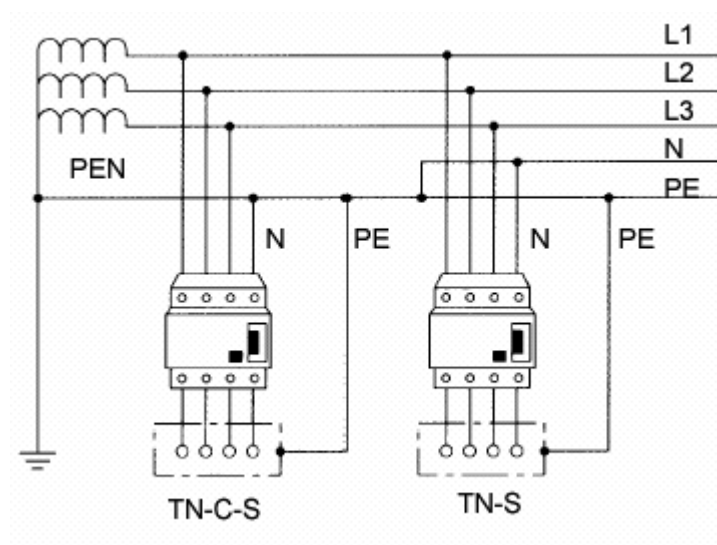
Tetrapolares - Sensibilidade 30 mA 40A (selet. K), 40A, 63A, 80A e 125A

- Sensibilidade 300 mA 63A (selet. S), 160A

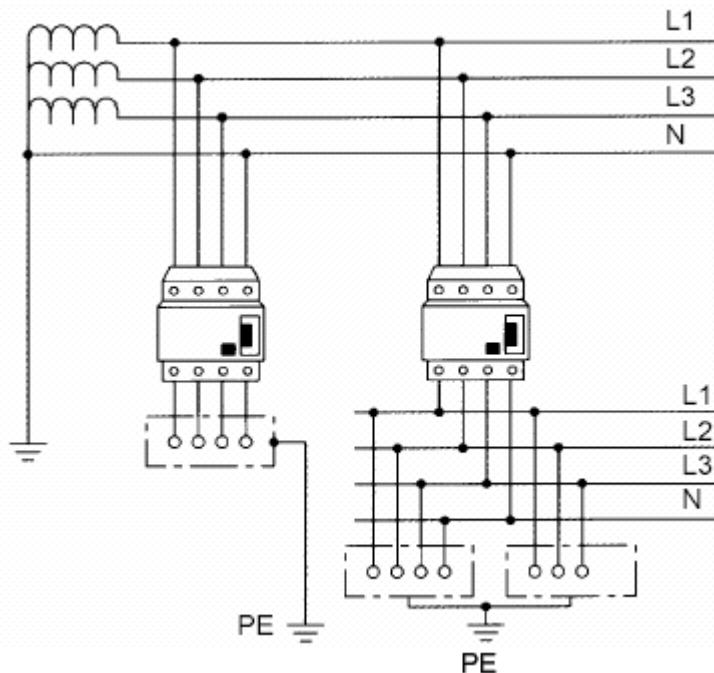
- Sensibilidade 500 mA 63A, 125A, 160A, 224A

**Ligação de DR's tetrapolares em redes a 2 condutores**

O circuito do botão de teste utiliza o último pólo de Fase e o pólo de Neutro

**Como ligar no Esquema TN**

### Como ligar no Esquema TT



### 11. Proteção Contra Descargas Atmosféricas

#### CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- A fim de se evitar falsas expectativas sobre o sistema de proteção, gostaríamos de fazer os seguintes esclarecimentos :

1 - A descarga elétrica atmosférica (raio) é um fenômeno da natureza absolutamente imprevisível e aleatório, tanto em relação às suas características elétricas (intensidade de corrente, tempo de duração, etc), como em relação aos efeitos destruidores decorrentes de sua incidência sobre as edificações.

2 - Nada em termos práticos pode ser feito para se impedir a "queda" de uma descarga em determinada região. Não existe "atração" a longas distâncias, sendo os sistemas prioritariamente receptores. Assim sendo, as soluções internacionalmente aplicadas buscam tão somente minimizar os efeitos destruidores a partir da colocação de pontos preferenciais de captação e condução segura da descarga para a terra.

3 - A implantação e manutenção de sistemas de proteção (pára-raios) é normalizada internacionalmente pela IEC (International Electrotechnical Commission) e em cada país por entidades próprias como a ABNT (Brasil), NFPA (Estados Unidos) e BSI (Inglaterra).

4 - Somente os projetos elaborados com base em disposições destas normas podem assegurar uma instalação dita eficiente e confiável. Entretanto, esta eficiência nunca atingirá os 100 % estando, mesmo estas instalações, sujeitas à falhas de proteção. As mais comuns são a destruição de pequenos trechos do revestimento das fachadas de edifícios ou de quinas da edificação ou ainda de trechos de telhados.

5 - Não é função do sistema de pára-raios proteger equipamentos eletro-eletrônicos (comando de elevadores, interfones, portões eletrônicos, centrais telefônicas, subestações, etc), pois mesmo uma descarga captada e conduzida a terra com segurança, produz forte interferência eletromagnética, capaz de danificar estes equipamentos. Para sua proteção, deverá ser contratado um projeto adicional, específico para instalação de supressores de surto individuais (protetores de linha).

6 - Os sistemas implantados de acordo com a Norma, visam à proteção da estrutura das edificações contra as descargas que a atinjam de forma direta, tendo a NBR-5419 da ABNT como norma básica. 7 - É de fundamental importância que após a instalação haja uma manutenção periódica anual a fim de se garantir a

confiabilidade do sistema. São também recomendadas vistorias preventivas após reformas que possam alterar o sistema e toda vez que a edificação for atingida por descarga direta.

## HISTÓRICO

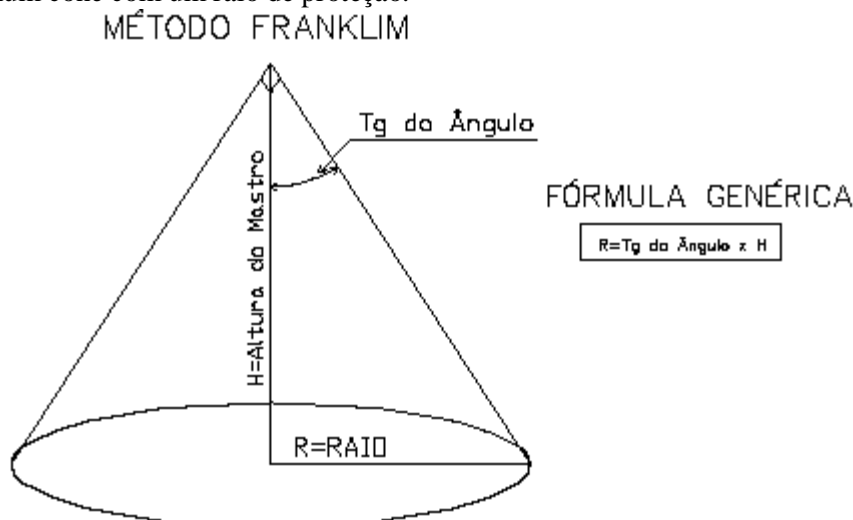
- O Raio é um fenômeno da natureza que desde os primórdios vem intrigando o homem, tanto pelo medo provocado pelo barulho, quanto pelos danos causados.

- Para algumas civilizações primitivas o raio era uma dádiva dos Deuses, pois com ele quase sempre vêm as chuvas e a abundância na lavoura. Para outras civilizações era considerado como um castigo e a pessoa que morria num acidente de raio, provavelmente havia irritado os Deuses e o castigo era merecido. Havia também civilizações que glorificavam o defunto atingido por um raio, pois ele havia sido escolhido entre tantos seres humanos, com direito a funeral com honras especiais.

- Após tantas civilizações o homem acabou descobrindo que o raio é corrente elétrica e por isso deverá ser conduzida o mais rápido possível para o solo, minimizando seus efeitos destrutivos.

- O primeiro cientista a perceber que se tratava de um fenômeno Físico/Elétrico, foi Benjamin Franklin (1752), que na época afirmou que após a colocação de uma ponta metálica em cima de uma casa, esta atrairia os raios para si e a edificação estaria protegida contra raios, caindo estes na ponta metálica.

- Após alguns anos, tomou conhecimento de edificações que tinham sido atingidas e o raio não havia caído na ponta metálica. Assim sendo, reformulou sua teoria e afirmou que a ponta metálica seria o caminho mais seguro para levar o raio até o solo com segurança caso a ponta seja atingida por um raio. A partir daí começou-se a definir a região até onde esta ponta teria influência (séc. XVIII – Gay Lussac) e começou-se a esboçar os primeiros cones de proteção, cuja geratriz era função de um ângulo pré-definido, resultando num cone com um raio de proteção.



Inicialmente era considerado  $\sim 60^\circ$  o que implicaria que  $\text{tg} \sim 1,73$ , donde teríamos que  $R = H \times 1,73$ . Quer isto dizer que para cada metro vertical de H o Raio teria um acréscimo de 73%. Em alguns casos especiais, tais como : inflamáveis, explosivos, etc, o ângulo usado era de  $45^\circ$ , variando de País para País de acordo com suas normas.

-Com o passar do tempo foram sendo definidos novos Ângulos de proteção em função da exposição da edificação, bem como os riscos materiais e humanos, envolvidos.

## A FENOMENOLOGIA DO RAIOS

Este fenômeno de natureza elétrica é produzido pela nuvem do tipo ‘cumulonimbus’ e se forma por um processo interno da nuvem o qual não será abordado por não ter significado prático neste trabalho.

À medida que o mecanismo de autoprodução de cargas elétricas vai aumentando de tal modo que dá origem a uma onda elétrica que partira da base da nuvem em direção ao solo, buscando locais de menor potencial, ficando sujeita a variáveis atmosféricas, tais como pressão, temperatura, etc, definindo assim uma trajetória ramificada e aleatória.

Essa primeira onda caracteriza o choque líder (chamado de condutor por passos) que define sua posição de queda entre 20 a 100 metros do solo. A partir deste primeiro estágio o primeiro choque do raio deixou um canal ionizado entre a nuvem e o solo que dessa forma permitirá a passagem de uma avalanche de cargas com corrente de pico em torno de 20 KA.

Após esse segundo choque violento de cargas passando pelo ar, provocam o aquecimento deste meio, até 30.000 °C , provocando a expansão do ar (trovão).

Neste processo os elétrons retirados das moléculas de ar, retornam, fazendo com que a energia absorvida pelos mesmos na emissão, seja devolvida sob a forma de luz (relâmpago). Na maioria dos casos este mecanismo se repete diversas vezes no mesmo raio.

- Com a nova edição da Norma de Para-Raios NBR5419/93 a eficiência dos Sistemas de Proteção foi substancialmente aumentada não deixando nada a desejar em relação a Normas de outros Países, inclusive pelo fato desta ter tipo a Norma IEC como referência.

-Atualmente existem basicamente três métodos de dimensionamento:

1) Método Franklin, porém com limitações em função da altura e do Nível de proteção (ver tabela).

2) Método Gaiola de Faraday ou Malha

3) Método da Esfera Rolante, Eletrogeométrico ou Esfera Fictícia

- O método Franklin, devido às suas limitações impostas pela Norma passa a ser cada vez menos usado em edifícios sendo ideal para edificações de pequeno porte.

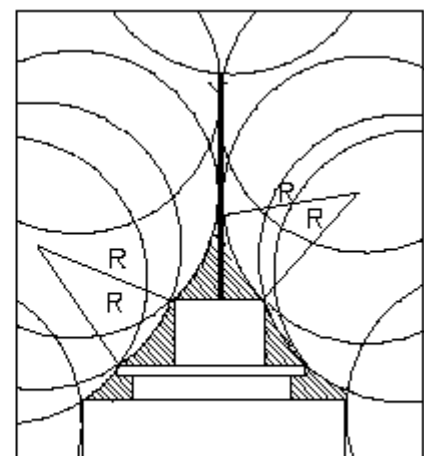
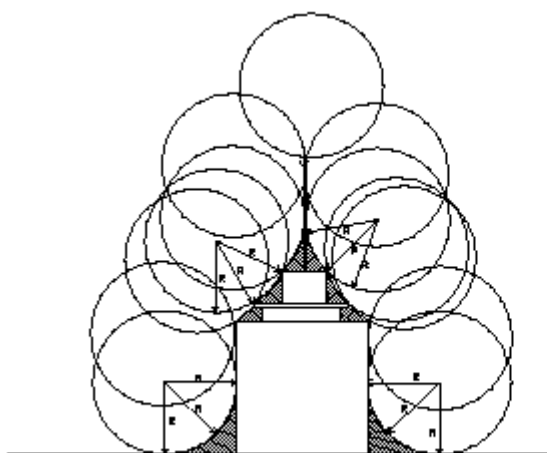
- O método da esfera Rolante é o mais recente dos três acima mencionados e consiste em fazer rolar uma esfera, por toda a edificação . Esta esfera terá um raio definido em função do Nível de Proteção, -Os locais onde a esfera tocar a edificação são os locais mais expostos a descargas. Resumindo poderemos dizer que os locais onde a esfera toca, o raio também pode tocar, devendo estes ser protegidos por elementos metálicos (captosres Franklin ou condutores metálicos).

4)Captosres Milagrosos

- Com o intuito de ganhar dinheiro às custas de pessoas leigas ou desatualizadas, alguns fabricantes divulgam captosres com ângulos majorados (tipo 80° ou mais), dispositivos artificiais e até filosofias patéticas para tentar ganhar o espaço deixada pelos captosres Radioativos, o qual está com sua Fabricação proibida pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

- Nenhum outro método de proteção deverá ser levado a sério que não sejam métodos consagrados pelas Normas Técnicas NBR 5419/93, o qual é o único documento aceito pelo código do consumidor.

#### **EXEMPLO DA PROTEÇÃO DA ESFERA ROLANTE EM EDIFÍCIOS ALTOS**



ZOOM DA CAPTAÇÃO

**ELEMENTOS QUE COMPÕEM UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CAPTAÇÃO**

-Têm como função receber as descargas que incidam sobre o topo da edificação e distribuí-las pelas descidas.

-É composta por elementos metálicos, normalmente mastros ou condutores metálicos devidamente dimensionados.

**DESCIDAS**

- Recebem as correntes distribuídas pela captação encaminhando-as o mais rapidamente para o solo. Para edificações com altura superior a 20 metros têm também a função de receber descargas laterais, assumindo neste caso também a função de captação devendo os condutores ser corretamente dimensionados para tal.

-No nível do solo as descidas deverão ser interligadas com cabo de cobre nu #50 mm<sup>2</sup>.

**ANÉIS DE CINTAMENTO**

- Os anéis de cintamento assumem duas importantes funções.

- A primeira é equalizar os potenciais das descidas minimizando assim o campo elétrico dentro da edificação.

- A segunda é receber descargas laterais e distribuí-las pelas descidas. Neste caso também deverão ser dimensionadas como captação.

-Sua instalação deverá ser executada a cada 20 metros de altura interligando todas as descidas.

**ATERRAMENTO**

- Recebe as correntes elétricas das descidas e as dissipam no solo.

- Tem também a função de equalizar os potenciais das descidas e os potenciais no solo, devendo haver preocupação com locais de freqüência de pessoas, minimizando as tensões de passo nestes locais.

- Para um bom dimensionamento da malha de aterramento é imprescindível a execução de uma prospecção da resistividade de solo previamente.

**EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS INTERNOS**

- Nas descidas, anéis de cintamento e aterramento foram já mencionadas as equalizações de potenciais externos. Vamos agora abordar as equalizações de potenciais internas, ou seja a equalização dos potenciais de todas as estruturas e massas metálicas que poderão provocar acidentes pessoais, faiscamentos ou explosões.

- No nível do solo e dos anéis de cintamento(cada 20 metros de altura), deverão ser equalizados os aterramentos da CEMIG, da TELEMIG, de eletrônicos, de elevadores (inclusive trilhos metálicos), tubulações metálicas de incêndio, gás (inclusive o piso da casa de gás), água fria, água quente, recalque , etc.

-Para tal deverá ser definido uma posição estratégica para instalação de uma caixa de equalização de potenciais que deverá ser interligada á malha de aterramento (ou anel de cintamento) e interligando as diferentes prumadas metálicas já mencionadas.

A ligação da caixa de equalização bem como as tubulações metálicas poderão ser executadas com cabo de cobre # 16mm<sup>2</sup> antes da execução do contra piso dos apartamento localizados nos níveis dos anéis de cintamento. A amarração das diferentes tubulações metálicas poderá ser executada por fita perfurada estanhada (bimetálica) que possibilita a conexão com diferentes tipos de metais e diâmetros variados,

**TABELA PARA SELEÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO**

TIPO DE EDIFICAÇÃO	NÍVEL DE PROTEÇÃO
Edificações de explosivos , Inflamáveis, Industrias Químicas , Nucleares , Laboratórios bioquímicos , Fábricas de munição e fogos de artifício , Estações de telecomunicações usinas Elétricas , Indústrias com risco de incêndio,Refinarias, etc.	NÍVEL I
Edifícios Comerciais, Bancos , Teatros , Museus , Locais arqueológicos , Hospitais , Prisões , Casas de repouso , Escolas , Igrejas , Áreas esportivas	NÍVEL II
Edifícios Residenciais,Industrias,Casas residenciais , Estabelecimentos agropecuários e Fazendas com estrutura em madeira.	NÍVEL III
Galpões com sucata ou de conteúdo desprezível , Fazendas e Estab.Agrop. com estrut. em madeira	NÍVEL IV

diminuindo também a indutância do condutor devido á sua superfície chata.

TABELA DAS BITOLAS DOS CONDUTORES (mm<sup>2</sup>)

Nível de Proteção	MATERIAL	Captação e Anéis Horiz. mm <sup>2</sup>	Descidas mm <sup>2</sup>		Aterramento mm <sup>2</sup>	Equalizações Alta Corrente mm <sup>2</sup>	Equalizações Baixa corrente mm <sup>2</sup>
			h <sub>≤</sub> 20m	h>20m			
I a IV	Cobre	35	16	35	50	16	6
	Alumínio	70	25	70	--	25	10
	Aço	50	50	50	80	50	16

TABELA DE DIMENSIONAMENTO DO MÉTODO DE CAPTAÇÃO

Nível de Proteção	RAIO ESFERA (mts)	Ângulo do Frankli m					Malha da Gaiola (*)	Espaçamento das Descidas	Eficiência do S.P.D.A.
		até 20m α	h 21 a 29m α	h 30 a 44m α	h45 a 59m α	h>60 ---			
I	20	25°	A	A	A	B	5	10	95 a 98%
II	30	35°	25°	A	A	B	10	15	90 a 95%
III	45	45°	35°	25°	A	B	10	20	80 a 90%
IV	60	55°	45°	35°	25°	B	20	25	até 80%
Unidades	Metros	Graus	Graus	Graus	Graus	Graus	Metros	Metros	Porcentagem

### Necessidade de proteção interna das estruturas

Assim como a NBR-5419:2001 estabelece um critério para decidir sobre a necessidade de proteção externa de uma estrutura contra descargas atmosféricas, têm sido propostos vários critérios para fazer o mesmo quando se trata de equipamentos ou aparelhos da tecnologia da informação instalados. Note-se que atualmente quase todas as residências e escritórios têm esse tipo de equipamento.

No Brasil, se uma estrutura necessita de proteção externa, devemos pelo menos proteger as entradas dos circuitos de força e de telefonia, como previsto nas NBR.5419:2001 e NBR -5410:1997. Estas normas pedem a instalação de uma barra de equalização dos potenciais (TAP ou LEP) nas entradas das instalações; estas barras devem receber os fios PE (terra, fio verde, fio verde-amarelo) e a elas devem estar ligados os terminais terra dos protetores dos condutores de força. Dessas barras devem sair conexões ao sub-sistema de aterramento da edificação (anel de aterramento ou aterramento pela fundação). A comissão que está fazendo a revisão da NBR-5410 tem um grupo de trabalho (GT-4) dedicado exclusivamente à proteção e está sendo prevista uma revisão radical em relação à norma atual.

(NBR 5419:1997) 6.4.2.4.1 *Em qualquer instalação deve ser previsto um terminal ou barra de aterramento principal e os seguintes condutores devem ser a ele ligados:*

- a) condutor de aterramento;
- b) condutores de proteção principais;
- c) condutores de equipotencialidade principais;
- d) condutor neutro, se disponível;
- e) barramento de equipotencialidade funcional (ver 6.4.8.5), se necessário;
- f) condutores de equipotencialidade ligados a eletrodos de aterramento de outros sistemas (por exemplo, SPDA).

### NOTAS

- 1 O terminal de aterramento principal realiza a ligação equipotencial principal (ver 5.1.3.1.1).
- 2 Nas instalações alimentadas diretamente por rede de distribuição pública em baixa tensão, que utilizem o esquema TN, o condutor neutro deve ser ligado ao terminal ou barra de aterramento principal diretamente ou através de terminal ou barramento de aterramento local;

3 Nas instalações alimentadas diretamente por rede de distribuição pública em baixa tensão, que utilizem o esquema TT, devem ser previstos dois terminais ou barras de aterramento separados, ligados a eletrodos de aterramento eletricamente independentes, quando possível, um para o aterramento do condutor neutro e o outro constituindo o terminal de aterramento principal propriamente dito.

4 Os condutores de equipotencialidade destinados à ligação de eletrodos de aterramento de SPDA devem ser dimensionados segundo a NBR 5419.

Em alguns países, como a França, a concessionária obriga o consumidor a instalar pelo menos os protetores na entrada da instalação.

Na Alemanha, as companhias de seguro é que exigem essa proteção: se o usuário quiser fazer seguro de seus equipamentos, terá que fazer a proteção.

Nos EUA, a ANSI recomenda um critério baseado em medições e cálculos das correntes e tensões em várias partes (denominadas categorias) e na estimativa (até um certo ponto subjetiva) da exposição da estrutura e das linhas de alimentação de suas instalações, às descargas atmosféricas.

Na IEC foi proposto um projeto que leva em conta uma análise dos riscos, que embora matematicamente correto, é de trabalhosa aplicação.

### **A coordenação da isolação**

São necessárias inicialmente algumas definições:

#### **Coordenação da isolação**

É a classificação das características dos equipamentos elétricos, considerando as condições do micro-ambiente e outros esforços importantes.

#### **Proteção dos circuitos de força em Média Tensão**

Estes circuitos são normalmente protegidos por pára-raios de 12kV ou mais (dependendo da tensão da rede e do tipo de aterramento do neutro), 5kA ou 10 kA dependendo da maior ou menor exposição aos raios, e são do tipo válvula com ou sem centelhador. Os pára-raios de média tensão deixam passar surtos de tensão da ordem de 40 a 50kV (quando são do tipo com centelhador e 30 a 40kV quando são do tipo de ZnO sem centelhador). Esses surtos passam, pela capacitância parasita entre os enrolamentos do transformador, para o secundário atingindo valores da ordem de 4 a 6kV.

Os pára-raios poliméricos são usados nas zonas urbanas para evitar os danos causados pela queda de cacos de porcelana e peças internas dos pára-raios sobre as pessoas ou objetos.

Atualmente só são usados pára-raios sem centelhador, à base de blocos de ZnO, com preferência para os poliméricos. Estes circuitos são normalmente protegidos por pára-raios de 12kV ou mais **Proteção dos circuitos de força em Baixa Tensão**

A proteção dos circuitos de Força em BT deve ser executada num conjunto de eventos:

- Esquema de aterramento adequadamente utilizado (item 4.2.2.2 Esquemas de aterramento, da NBR . 5410:1997)
- Equalização dos Potenciais entre massas metálicas e aterramentos,
- Instalação de DPSs (item 6.3.5, da NBR . 5410:1997)

A designação dos aterramentos dos sistemas é feita sempre por duas letras:

A 1a indica como o neutro da fonte é ligado à terra:

- T (ligação direta a um eletrodo ou malha, ou
  - I (isolado ou através de resistência de alto valor)

A 2a Representa a ligação das massas à terra:

- T (ligação à terra a um eletrodo que não o da fonte)
- N (ligação à terra através do condutor Neutro)

Então os aterramentos são assim denominados: TT, TN (TN-C, TN-S, TN-C-S), IT

- TT - A fonte é aterrada em eletrodo na entrada e as massas são aterradas em outro eletrodo ou malha de terra.
- TN - A fonte é aterrada em eletrodo na entrada e as massa são aterradas em um condutor que é aterrado também na entrada, junto com o Neutro.
- IT - A fonte não é aterrada ou é aterrada através de resistência de alto valor  $150\tilde{\Omega} \pm 50\tilde{\Omega}$ .

**Característica do esquema TT:**

Possuem dois eletrodos (ou malhas) separados, com resistências de aterramento de alguns Ohms (10-20);  
 As correntes de curto circuito são relativamente baixas, da ordem de dezenas de ampères;  
 Existe o risco de produzir tensões de toque elevadas ( $> 50\text{ V}$ , ou  $> 25\text{ V}$ ) que podem levar ao choque fatal.  
 Este sistema obrigatoriamente necessita de proteção através de dispositivo diferencial residual (DR). (NBR 5410:1997, item 5.1.3.1.5, b).

**Características do esquema TN e suas variações:**

- É um esquema que por ter circuitos de corrente de falta com baixa impedância, proporciona correntes de curto-circuito elevadas;
- Pode ter seu desligamento pelo DPCC: disjuntor ou fusível;
- comprimento do laço da corrente de curto-circuito tem limite máximo em função da coordenação da proteção;
- A tensão de toque pode ser alta (corrente de falta x impedância do laço de cc)
  - Deve-se usar o DR nas áreas frias.

**Esquema de aterramento TN-C****O Esquema de Aterramento TN-S:****O Esquema de Aterramento TN-C-S:****O esquema de aterramento IT**

Neste esquema a corrente de curto fase-terra é muito pequena, portanto não há atuação do DPCC;

- Deve haver um controle da impedância para terra com uso de DSI, Dispositivo Supervisor da Isolação.
- A tensão de toque é muito pequena
  - Em caso de falta à terra (F . T), a tensão das fases sãs para terra passa ser a tensão de linha (F-F). por isso os DPSs devem ser dimensionado para a tensão F.F.
- As correntes de curto F-F são muito altas.

**Os pulsos nos sistemas de força**

EMP - pulso eletromagnético

- LEMP - EMPs gerados pelos raios
- SEMP - EMPs gerados pelas manobras nos circuitos
- NEMP - EMPs gerados por explosões nucleares

Pulsos elétricos

- ESD - pulsos gerados por descargas eletrostáticas ou indução eletrostática.

**Tensão disruptiva**

É a máxima tensão atingida antes do DPS começar a conduzir corrente (válida para os DPS que têm gaps).

**Tensão residual**

É a máxima tensão atingida depois do DPS começar a conduzir corrente (válida para qualquer DPS).

**Nível de proteção**

O maior dos dois valores acima.

**Corrente máxima de impulso**

Corrente que o DPS pode descarregar uma vez sem ser deteriorado ou destruído.

**Corrente nominal de impulso**

Corrente que o DPS pode descarregar 15 vezes sem ser deteriorado.

**Corrente subsequente**

Corrente de frequência industrial que passa pelo DPS, em seguida à corrente de impulso. A duração desta corrente é no máximo de  $\frac{1}{2}$  ciclo para os DPS com centelhador e varistor de SiC (Carboneto de Cílcio) de poucos ms para os DPS de ZnO sem centelhador.

**Avalanche térmica**

Um varistor quando submetido a descargas elevadas ou a muitas descargas começa a conduzir uma corrente de fuga elevada o que aumenta sua temperatura e reduz sua resistência. Isto causa um aumento da corrente de fuga e da temperatura chegando esta a valores tão altos que pode causar a explosão ou queima do varistor com risco de incêndio.

**Condicionamento e ciclo de serviço**

Verificação do funcionamento em condições de operação com condições combinadas de tensão e corrente e verificação da extinção da corrente subsequente.

**Origem dos surtos gerados pelos raios****Indução eletrostática**

$$e = p \cdot a \cdot h \cdot E$$

Onde:

E - campo elétrico na altura da linha (kV/m)

h - altura média da linha (m)

a - coeficiente dependente da forma de descarga da nuvem

p - coeficiente dependente da existência de condutor aterrado (neutro ou cabo de guarda)

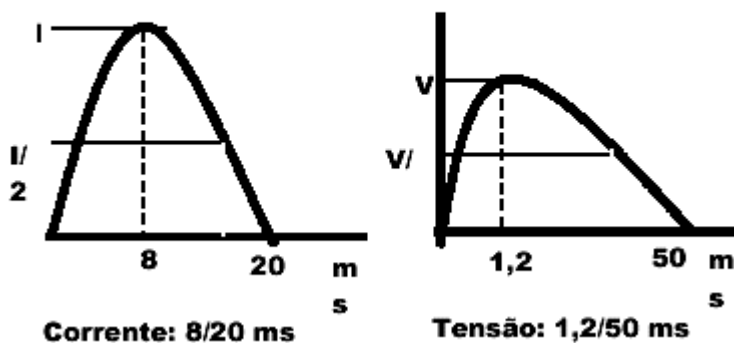
**Ordem de grandeza dos surtos**

Causados por pulsos eletromagnéticos (EMP) temos:

- 65 kV em Média tensão e 14 kV em Baixa Tensão
- Causados por pulsos elétricos (ESD) temos: 15kV em Baixa Tensão

Então através de tabelas diagrama são fornecidos os valores de corrente e tensão esperados nas três categorias, a forma de impulso de tensão e corrente e o Impulso de tensão para. Forma dos pulsos em suas respectivas origens:

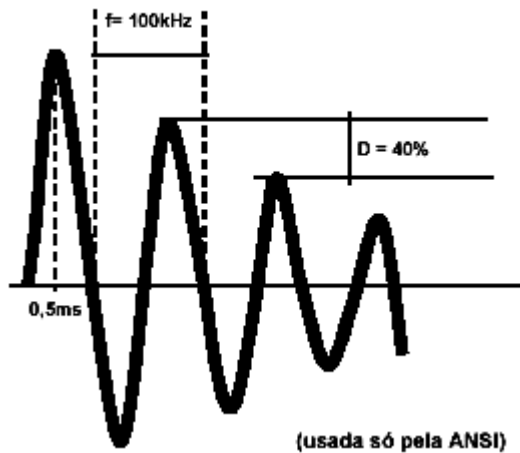
- Atmosférico: 1,2 / 50  $\mu$ s
- Manobra: 250 / 2500  $\mu$ s
- Senoidal amortecido: 0,5  $\mu$ s, 100 kHz, atenuação 40%/ciclo (ring wave)

**Forma dos Impulsos Produzidos por Gerador Combo (Híbrido)****Impulsos de corrente**

Os impulsos de correntes são usados para ensaiar os DPS.

- Atmosférico: 8/20 $\mu$ s, 4/10 $\mu$ s, 10/350 $\mu$ s
- Senoidal amortecido: 0,5  $\mu$ s, 100 kHz

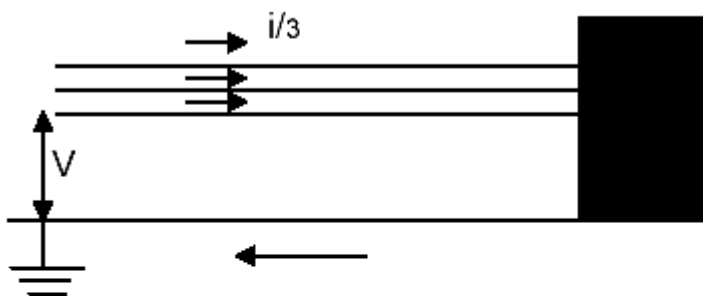
Ring wave - onda senoidal amortecida



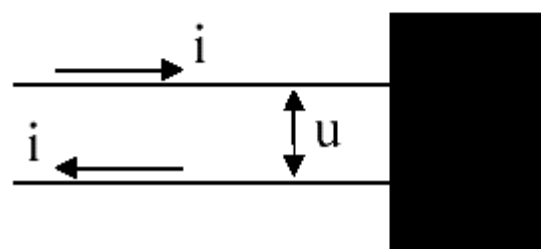
Essa Norma considera que essa onda (ring wave) é consequência do deslocamento da onda unidirecional pelas indutâncias e pelas capacitâncias parasitas dos condutores

### Os modos das sobretensões

#### Modo comum



#### Modo Diferencial



### Constituição dos DPS

Os DPS podem ser constituídos por:

- um centelhador independente
- um varistor independente
- uma associação centelhador em série com varistor
- associação centelhador/varistor em paralelo + fusível

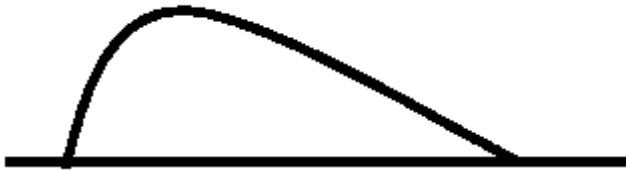
#### Centelhador

Corta um pulso de tensão reduzindo muito rapidamente a tensão



Ao valor do pico que o centelhador deixa passar, é denominado tensão disruptiva.

**Varistor:** reduz a uma onda de tensão de forma contínua:

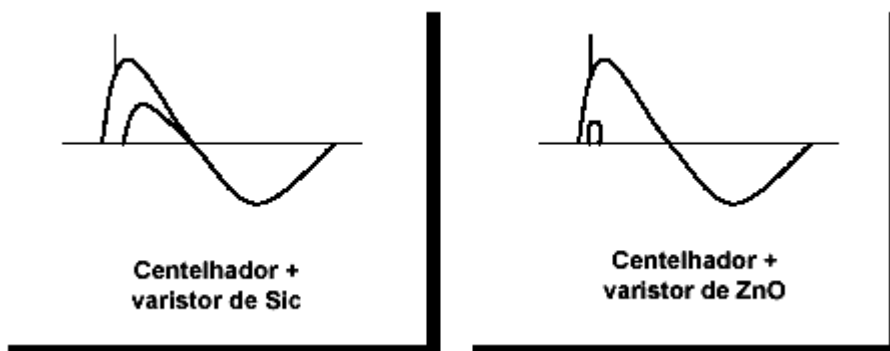


O valor máximo remanescente é denominado tensão residual.

Um DPS composto por **centelhador + varistor** possui as duas características:



Com o DPS energizado surge uma corrente para terra denominada **Corrente Subsequente** que tem os seguintes aspectos:



Portanto, um dispositivo de proteção contra sobretensões deve reduzir a sobretensão em uma linha energizada sem causar interrupção do fluxo de corrente.

Disponemos dos seguintes tipos de componentes para, em associação ou não, construirmos um DPS:

- centelhador a gás
- centelhador a ar
- varistor de ZnO
- varistor de Sic
- pára-raios de expulsão

- pára-raios com centelhador

### Centelhador a gás

Este componente tem como vantagens:

- Capacidade de descarga elevada 5, 10, 20 ou mais kA
- Capacitância muito baixa, pode ser usado em AF

E como desvantagens:

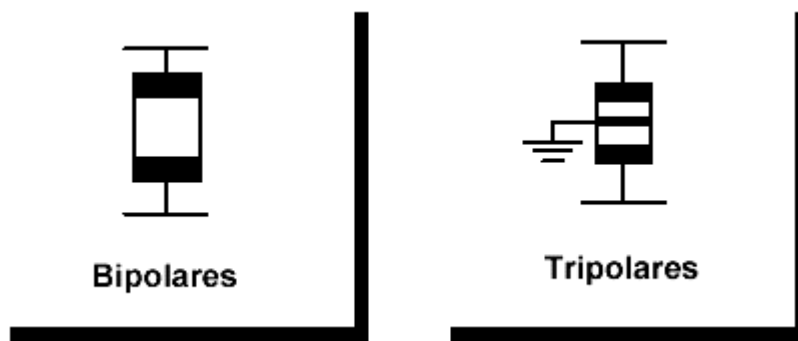
- Não pode ser usado em frequência industrial com  $V > 110V$

Seus valores nominais são:

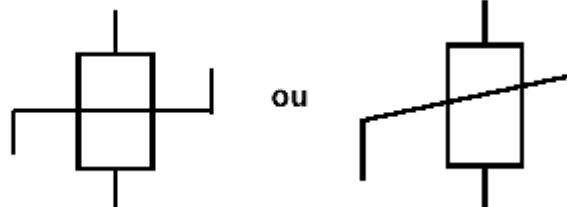
$I_n$  máxima corrente que suporta em 15 atuações

$V_n$  tensão disruptiva em corrente contínua

### Varistor de ZnO



Símbolo



ou

### Tem como vantagens:

- Corrente de fuga baixa
- Interrompe a corrente subsequente em 2ms

Tem como desvantagens :

- Envelhece de acordo com as solicitações recebidas
- Não pode ser usado em Altas Frequências (acima de 1MHz)

Tem como características nominais:

$V_{Máx}$  - Tensão máxima de operação contínua

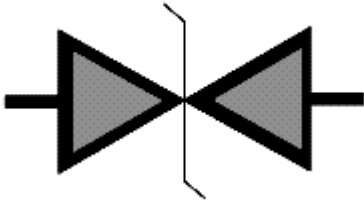
$I_{Máx}$  - Máxima corrente da forma 8/20 $\mu$ s que pode descarregar 1 vez

$I_{nom}$  - Máxima corrente da forma 8/20 $\mu$ s que pode descarregar 15 vezes.

### Diodo para Surto (TAZ ou back to back)

Tem como vantagens:

- Atuação rápida
- Limita a tensão a 10% acima da nominal



- Capacitância muito baixa
  - Pode ser ligado em série e em paralelo
- Tem como desvantagem:
- Baixa capacidade de dissipação de energia (basicamente 1500W)

### Simbologia Elétrica:

O trabalho relaciona as normas nacionais e internacionais dos símbolos de maior uso, comparado a simbologia brasileira (ABNT) com a internacional (IEC), com a alemã (DIN), e com a norte-americana (ANSI) visando facilitar a modificação de diagramas esquemáticos, segundo as normas estrangeiras, para as normas brasileiras, e apresentar ao profissional a simbologia correta em uso no território nacional.

A simbologia tem por objetivo estabelecer símbolos gráficos que devem ser usados para, em desenhos técnicos ou diagramas de circuitos de comandos eletromecânicos, representar componentes e a relação entre estes. A simbologia aplica-se generalizadamente nos campos industrial, didático e outros onde fatos de natureza elétrica precisem ser esquematizados graficamente.

O significado e a simbologia estão de acordo com as abreviaturas das principais normas nacionais e internacionais adotadas na construção e instalação de componentes e órgãos dos sistemas elétricos

#### **ABNT** *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

Atua em todas as áreas técnicas do país. Os textos de normas são adotados pelos órgãos governamentais (federais, estaduais e municipais) e pelas firmas. Compõem-se de Normas (NB), Terminologia (TB), Simbologia (SB), Especificações (EB), Método de ensaio e Padronização. (PB).

#### **ANSI** *American National Standards Institute*

Instituto de Normas dos Estados Unidos, que publica recomendações e normas em praticamente todas as áreas técnicas. Na área dos dispositivos de comando de baixa tensão tem adotado frequentemente especificações da UL e da NEMA.

#### **SIGLA SIGNIFICADO E NATUREZA**

##### **CEE** *International Commission on Rules of the approval of Electrical Equipment*

Especificações internacionais, destinadas sobretudo ao material de instalação.

##### **CEMA** *Canadian Electrical Manufacturers Association*

Associação Canadense dos Fabricantes de Material Elétrico.

##### **CSA** *Canadian Standards Association*

Entidade Canadense de Normas Técnicas, que publica as normas e concede certificado de conformidade.

##### **DEMKO** *Danmarks Elektriske Materielkontrol*

Autoridade Dinamarquesa de Controle dos Materiais Elétricos que publica normas e concede certificados de conformidade.

##### **DIN** *Deutsche Industrie Normen*

Associação de Normas Industriais Alemãs. Suas publicações são devidamente coordenadas com as da VDE.

##### **IEC** *International Electrotechnical Commission*

Esta comissão é formada por representantes de todos os países industrializados. Recomendações da IEC, publicadas por esta Comissão, já são parcialmente adotadas e caminham para uma adoção na íntegra pelos diversos países ou, em outros casos, está se procedendo a uma aproximação ou adaptação das normas nacionais ao texto dessas normas internacionais.

**JEC**                    *Japanese Electrotechnical Committee*

Comissão Japonesa de Eletrotécnica.

**JEM**                    *The Standards of Japan Electrical Manufactures Association*

Normas da Associação de Fabricantes de Material Elétrico do Japão.

**JIS**                    *Japanese Industrial Standards*

Associação de Normas Industriais Japonesas.

**KEMA**                *Kenring van Elektrotechnische Materialen*

Associação Holandesa de ensaio de Materiais Elétricos.

**NEMA**                *National Electrical Manufactures Association*

Associação Nacional dos Fabricantes de Material Elétrico (E.U.A.).

**OVE**                    *Osterreichischer Verband fur Elektrotechnik*

Associação Austríaca de Normas Técnicas, cujas determinações geralmente coincidem com as da IEC e VDE.

**SEN**                    *Svensk Standard*

Associação Sueca de Normas Técnicas.

**UL**                    *Underwriters Laboratories Inc*

Entidade nacional de ensaio da área de proteção contra incêndio, nos Estados Unidos, que, entre outros, realiza os ensaios de equipamentos elétricos e publica as suas prescrições.









**UTE**                    *Union Technique de l'Electricité*

Associação Francesa de Normas Técnicas.

**VDE**                    *Verband Deutscher Elektrotechniker*

Associação de Normas Técnicas alemãs, que publica normas e recomendações da área de eletricidade.

A seguir temos tabelas como os principais símbolos adotados pelas normas internacionais.

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
<b>GRANDEZAS ELÉTRICAS FUNDAMENTAIS</b>					
Corrente Contínua	—	—	DC	—	—
Corrente Alternada			AC		
Corrente Contínua e Alternada					
Exemplo de corrente alternada monofásica, 60Hz	1-60 Hz	1-60Hz	1 Phase 2 Wire-60Hz	1-60Hz	1-60Hz
Exemplo de corrente alternada trifásica, 3 condutores, 60Hz, tensão de 220V	3-60Hz220	3-60Hz220V	3Phase-3Wire 60Cycle-220V	3-60Hz-200V (3 $\phi$ 3W 220V-60Hz)	3-60Hz-220V
Exemplo de corrente alternada trifásica com neutro, 4 condutores, 60Hz tensão de 380V	3N-60Hz 380V	3N-60Hz 380V	3Phase-4Wire 60Cycle-380V	3N-60Hz-380V 3+N-60Hz- 380V-3 $\phi$ 4W 380V 60Hz	3N-60Hz380V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores, tensão de 220V	2 - 220V	2 - 220V	2WireDC, 220V	2 - 220V (2W.220V)	2-220V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores e neutro, tensão de 110V	2N - 110V	2N - 110V	3WireDC,110V	2N - 110V (3W.DC,110V)	2N - 110V

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
SÍMBOLOS DE USO GERAL					
Terra					
Massa					
Polaridade positiva	+	+	+	+	+
Polaridade negativa	-	-	-	-	-
Tensão perigosa					
Ligação delta ou triângulo					
Ligação Y ou estrela					
Ligação estrela com neutro acessível					
Ligação ziguezague					
Ligação em V ou triângulo aberto					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	TEC
COMPONENTES DE CIRCUITO					
Resistor					
Resistor com derivações					
Indutor, enrolamento, bobina					
Indutor com derivações					
Capacitor					
Capacitor com derivações					
Capacitor eletrolítico					
Ímã permanente					
Diodo semiconductor					
Diode zener unidirecional e bidirecional					
Fotorresistor com variação independente da tensão					
Fotorresistor com variação dependente da tensão					
Fotoelemento					
Gerador "hall"					
Centelhador (de pontas)					
Pára - raio					
Acumulador, bateria, pilha					
Mufla terminal ou terminação					
Mufla de junção ou emenda reta					
Mufla ou emenda de derivação simples					
Mufla ou emenda de derivação dupla					
Par termoeletrico					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
-------------	------	-----	------	-----	-----

## DISPOSITIVOS DE SINALIZAÇÃO ÓTICA E ACÚSTICA

Buzina					
Campainha					
Sirene					
Cigarra					
Lâmpada de sinalização					
Indicador					

## INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Indicador, símbolo geral					
Amperímetro indicador					
Voltímetro indicador					
Voltímetro duplo ou diferencial indicador					
Wattímetro indicador					
Frequencímetro indicador					
Indicador de fator de potência					
Registrador, símbolo geral					
Registrador de potência					
Integrador, símbolo geral					
Integrador de energia					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
BOBINAS DE COMANDO E RELES					
Bobina eletromagnética, geral					
Bobina eletromagnética, de enrolamento único					
Bobina eletromagnética, de dois enrolamentos					
Relê de subtensão					
Relê com retardo para voltar ao repouso					
Relê com retardo prolongado para voltar ao repouso					
Relê com retardo para operar					
Relê com retardo para operar e para voltar ao repouso					
Relê polarizado					
Relê com remanência					
Relê com ressonância					
Relê térmico ou bimetálico					
Relê eletromagnético de sobrecarga					
Relê eletromagnético de curto-circuito					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
CONTATOS E PEÇAS DE CONTATO COM COMANDOS DIVERSOS					
Fechador (normalmente aberto)					
Abridor (normalmente fechado)					
Comutador					
Comutador sem interrupção					
Temporizado: no fechamento					
na abertura					
no fechamento					
Fechador de comando manual					
Abridor com comando por excêntrico					
Fechador com comando por bobina					
Fechador com comando por mecanismo					
Abridor com comando por pressão					
Fechador com comando por temperatura					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
ELEMENTOS DE COMANDO					
Comando manual, sem indicação de sentido					
Comando por pē					
Comando por excêntrico					
Comando por meio de êmbolo (ar comprimido, p.ex.)					
Comando por energia mecânica					
Comando por motor					
Sentido de deslocamento do comando para a esquerda, cessada a força externa. Nota: Para a direita, inverter a seta.					
Comando com travamento 1 - Travado 2 - Livre					
Comando engastado					
Dispositivo temporizado com operação à direita					
Comando desacoplado no caso com acionamento manual					
Comando acoplado no caso com acionamento manual					
Fecho mecânico					
Fecho mecânico com disparador auxiliar					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
DISPOSITIVOS DE COMANDO E DE PROTEÇÃO					
Tomada e plugue					
Fusível					
Fusível com indicação do lado ligado à rede após a ruptura					
Seccionador-Fusível tripolar					
Lâmina ou barra de conexão, reversora					
Seccionador tripolar					
Interruptor tripolar (sob carga)					
Disjuntor					
Seccionador-disjuntor					
Contatos com relê térmico contatos auxiliares					
Disjuntor tripolar com reles eletromagnéticos com contatos auxiliares					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
MOTORES E GERADORES					
Motor, símbolo geral					
Gerador, símbolo geral					
Motor de corrente contínua					
Gerador de corrente contínua					
Motor de corrente alternada monofásica					
Motor de corrente alternada trifásica					
Motor de indução trifásico					
Motor de indução trifásico com representação de ambas as extremidades de cada enrolamento do estator					
Gerador síncrono trifásico ligado em estrela					
Gerador síncrono trifásico de ímã permanente					
Gerador síncrono monofásico de ímã permanente					
Gerador de corrente contínua com enrolamentos de compensação e inversão polar					

SIGNIFICADO	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
TRANSFORMADORES					
Transformador com dois enrolamentos					
Transformador com três enrolamentos					
Autotransformador					
Bobina de reatância					
Transformador de corrente					
Transformador de potencial					
Transformador de corrente capacitivo					
Transdutor com três enrolamentos, um de serviço e dois de controle					
Transformador de dois enrolamentos com diversas derivações (taps) em um dos enrolamentos (com variação em escalões)					
Transformador de dois enrolamentos com variação contínua da tensão					
NOTA 1:					
A ABNT recomenda para transformadores de rede o uso do símbolo simplificado, formado de dois círculos que se cortam, especialmente na representação unifilar. Os traços inclinados que cortam a linha vertical, indicam o número de fases.					
NOTA 2:					
Simplificação análoga é normalizada para transformadores de corrente e de potencial.					
					Corrente Potencial

Abaixo, símbolos mais comumente usados em instalações elétricas

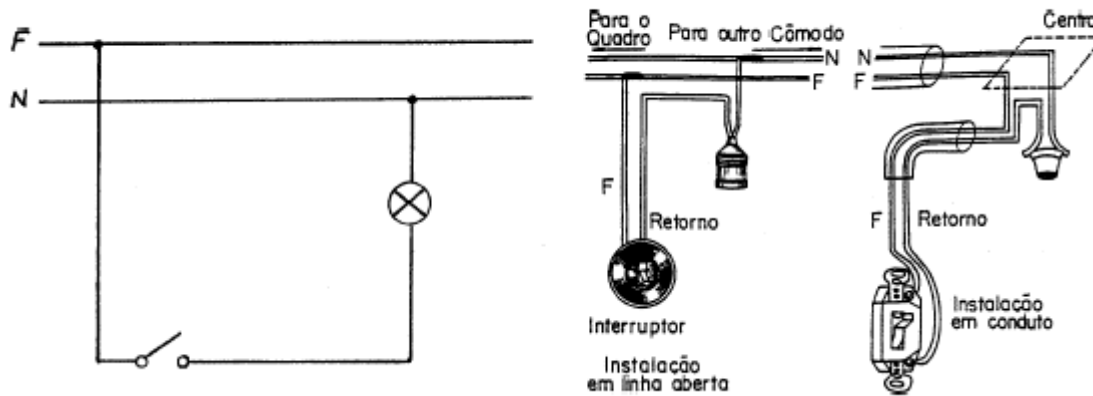
- Lâmpada
- Interruptor
- Tomada



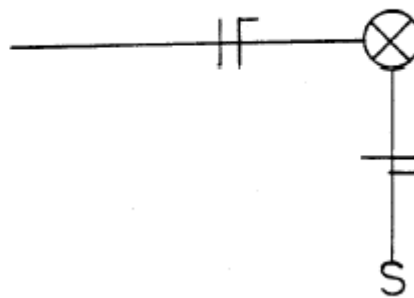
Nas figuras seguintes, comandos elétricos simples encontrados em residências

### Acendimento de uma lâmpada

Esquema Multifilar

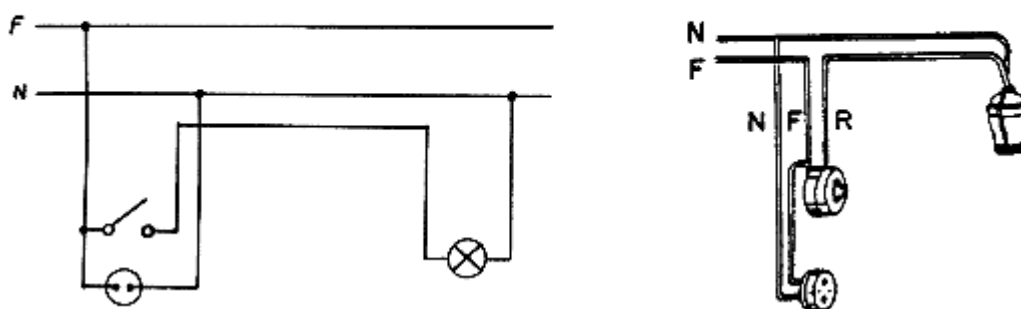


Esquema Unifilar

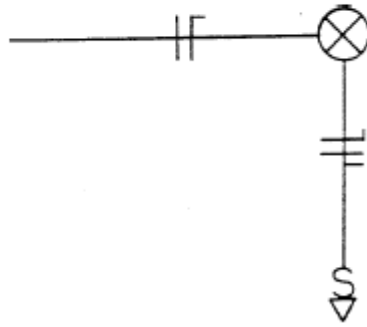


### Lâmpada, Tomada e Interruptor Simples

Esquema Multifilar

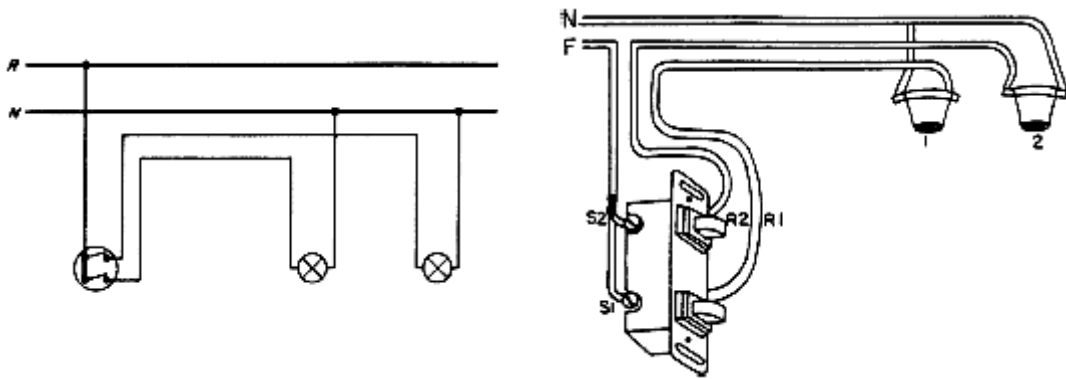


Esquema Unifilar

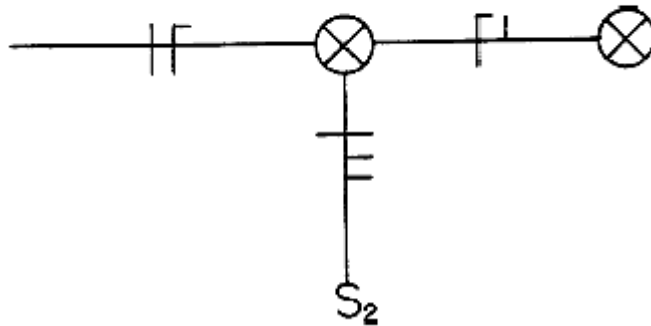


Lâmpada e Interruptor de Duas Seções

Esquema Multifilar

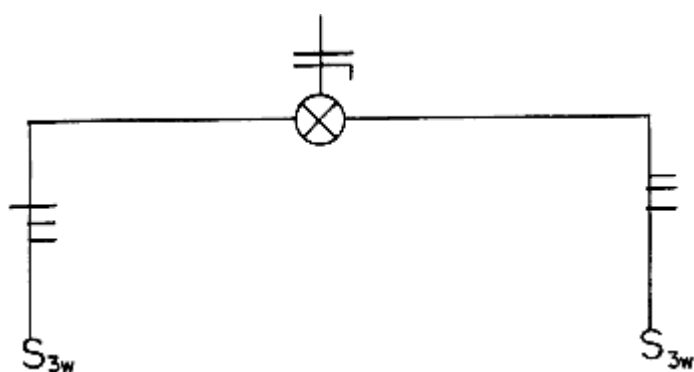
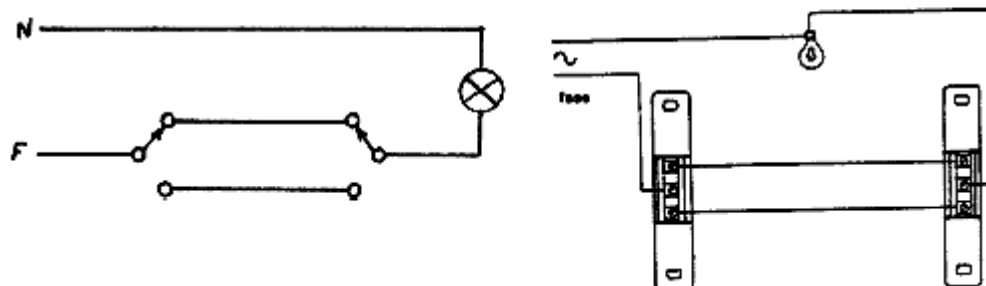


Esquema Unifilar



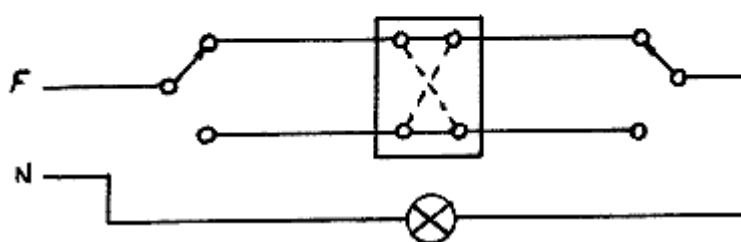
### Lâmpada e Dois Interruptores Paralelos (Three-Way)

Esquema Multifilar

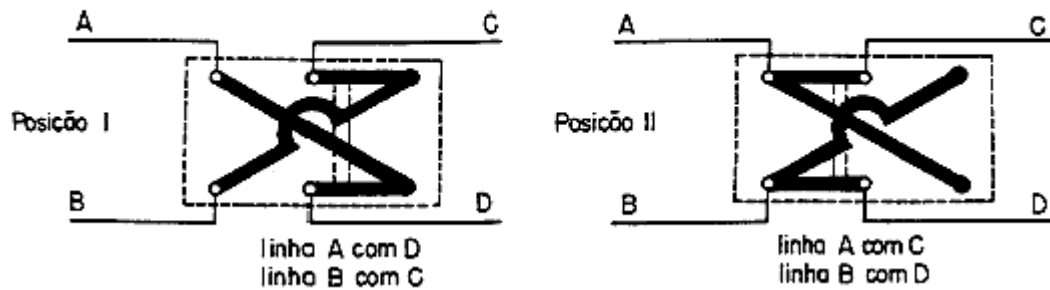


### Lâmpada, Dois Interruptores Paralelos (Three-Way) e um Intermediário (Four-Way)

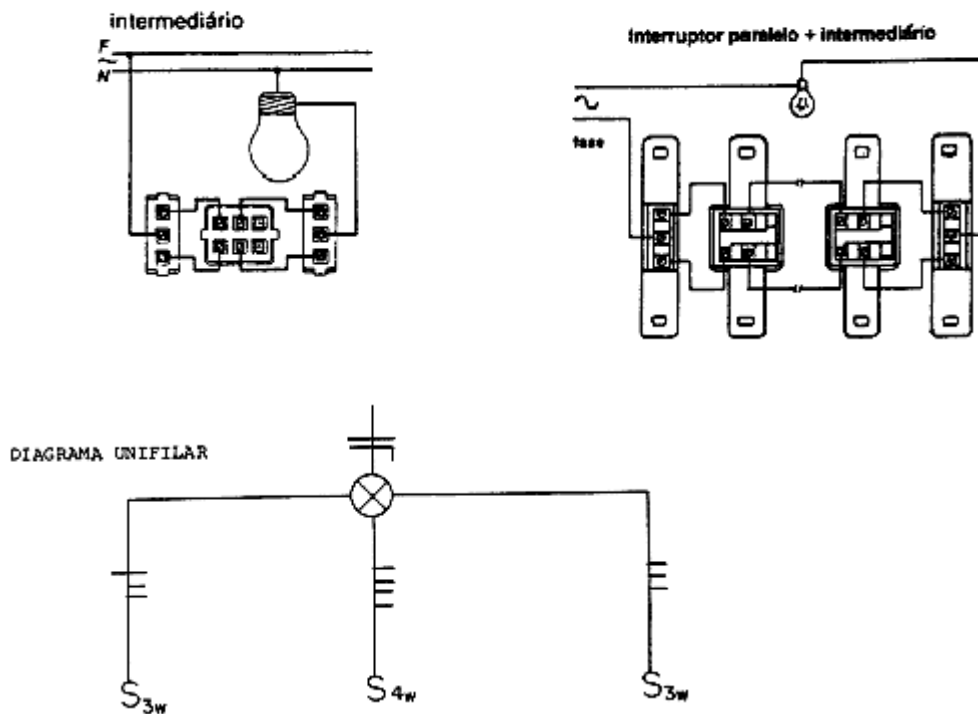
Esquema Multifilar



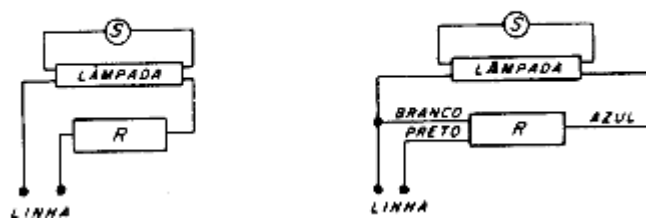
Esquema de Funcionamento



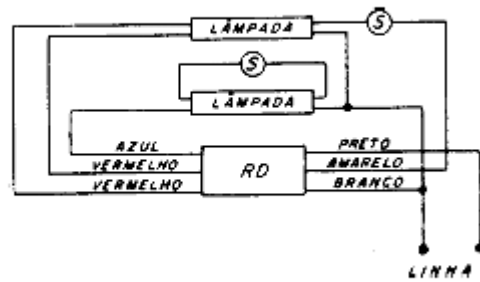
Esquema Unifilar



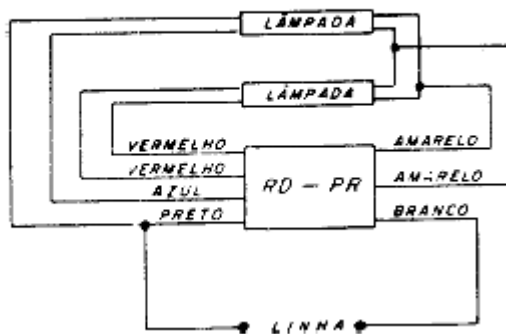
Ligação de reator simples, tipo "convencional".



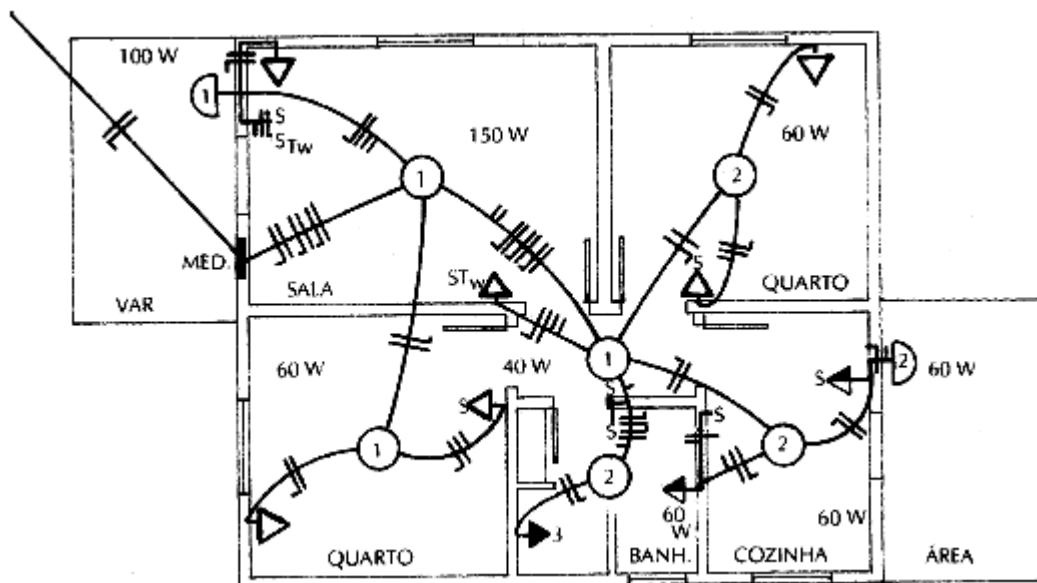
Ligação de reator duplo, tipo "convencional".



Ligação de reator duplo, "partida rápida".



Abaixo, um projeto elétrico residencial, utilizando os comandos simples:



## 12. Comandos Elétricos

### Introdução:

Dispositivos elétricos de potência como motores, resistências, válvulas solenóides, etc. precisam ser comandados, isto é, deve ser possível ligá-los ou desligá-los conforme a necessidade. Para tanto, são utilizados dispositivos específicos para este fim, que são conhecidos como dispositivos de manobra. Os dispositivos de manobra podem ser do tipo manual, como as chaves de potência ou automáticos como os contatores, relés e eletroválvulas. Estes dispositivos de manobra são ativados pelo acionamento de uma bobina, por isso eram conhecidos como chave eletromagnética. Dessa forma, bastava energizar a bobina de um contator para acionar a carga elétrica que este porventura estivesse comandando. E basta desenergizá-la para desligar a carga.

Entretanto, não era suficiente controlar dispositivos por meio do acionamento de uma bobina de um contator era necessário muitas vezes acionar as cargas numa seqüência lógica, ou a intervalos de tempo regulares, ou seja, havia a necessidade de um relacionamento lógico entre os elementos de manobra, uma necessidade que levou a implementação da chamada “lógica de contato”. Além da necessidade de seqüenciar os acionamentos, uma outra necessidade se estabeleceu, que era há de desabilitar manobras que não poderiam ser executadas simultaneamente com outra, sob pena, de dano ou falha iminente. O bloqueio de manobras de forma automática, visando proteger o sistema de falhas e danos denomina-se intertravamento. Surgem também os dispositivos destinados a manobrar não cargas de potência, mas sim outros dispositivos de manobra, ou seja, são dispositivos destinados a trabalhar com pequenas correntes e a auxiliar no estabelecimento de lógica entre os dispositivos de manobra. São portanto chamados de **dispositivos de comando** ou **dispositivos auxiliares**.

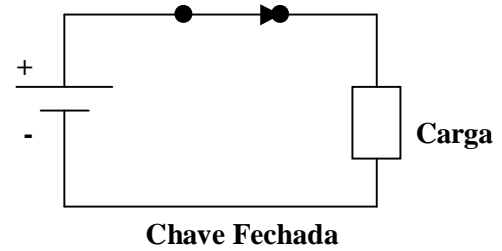
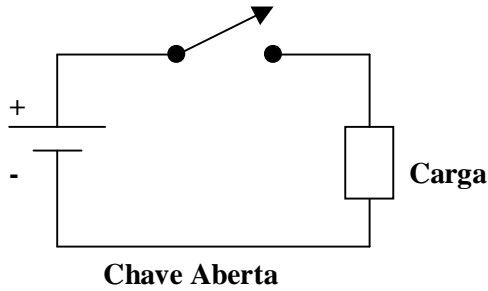
A necessidade de manobras seqüenciais e de intertravamento, implementados através de “lógica de contato” com dispositivos exclusivamente eletromecânicos deram origem ao que se chama de **comandos elétricos**. Atualmente os comandos não são mais puramente elétricos, mas envolvem alguma eletrônica, tais como, relés de tempo e outros. Assim sendo, hoje em dia, comandos elétricos são aqueles implementados por dispositivos de manobra e/ou comando eletromecânicos e dispositivos eletrônicos interligados por fios.

Normalmente estes dispositivos ficam protegidos por meio de caixas metálicas e são conhecidas como **painéis de comando** ou **quadros de comando**.

Dada a natureza discreta da atuação do contator, isto é, pode-se acionar a ele dois estados lógicos possíveis, como ligado ou desligado, temos que a representação binária de um computador ou controlador digitais é mais do que adequada para a implementação da chamada lógica de contato. Essa é a base dos **Controladores Lógicos Programáveis**, ou simplesmente CLP. Assim sendo, os arranjos de contatos para fins de lógica estão sendo substituídos pelos CLP's com vantagens tais como: facilidade de manutenção, reduz de espaço e custo, etc..

### Conceitos Básicos:

Um dispositivo de manobra destina-se a comandar o momento do acionamento de uma carga e o momento de seu desligamento. Isto é feito pela abertura ou fechamento do circuito elétrico ao qual a carga está inserida, ou seja, o dispositivo estabelece ou interrompe a corrente elétrica que alimenta a carga que está sendo manobrada. O dispositivo de manobra mais simples que existe é a chave elétrica, conforme abaixo



Uma chave elétrica é comanda sempre mecanicamente, por meio de um dispositivo do tipo alavanca ou outra forma qualquer. Quando uma chave elétrica é construída com a finalidade de manobrar cargas, isto é, ligar ou desligar cargas a qualquer momento ela é chamada de chave interruptora ou simplesmente interruptor. Quando a chave destina-se apenas a abrir ou fechar um circuito previamente desligado por uma chave interruptora, esta é chamada de chave seccionadora. Para comandos elétricos, apenas as chaves interruptoras são de nosso interesse.

### Contatos Elétricos:

Não passam de chaves elétricas para pequenos valores de corrente, destinados à manobra de pequenas cargas. Normalmente são utilizados para o estabelecimento de funções lógicas e o acionamento de pequenas cargas, tais como bobinas de contadores e lâmpadas sinalizadoras. Normalmente seu acionamento é mecânico e estão associadas a ocorrência de algum evento. Exemplo: acionamento de um contato de um pressostato por um evento de pressão máxima, acionamento de um contato de um relé por ocorrência de uma sobrecarga, etc.

São caracterizados por dois estados possíveis:

- **Repouso:** Sem ocorrência de um evento associado ao contato;
- **Acionado:** Sob a ocorrência de um evento que aciona o contato.

Para fins de classificação, os contatos são designados por seu **estado de repouso**. Como os contatos “normalmente” se encontram nas situações de repouso, os contatos são classificados de duas formas:

- **Normalmente Aberto ( NA ):** quando o contato é aberto na posição de repouso;
- **Normalmente Fechado ( NF ):** quando o contato é fechado na posição de repouso.

Assim como na classificação, na representação gráfica, os contatos são representados na posição de repouso, ou seja, um contato NA será uma chave aberta e um contato NF uma chave fechada conforme podemos ver abaixo:



**Normalmente aberto ( NA )**



**Normalmente Fechado ( NF )**

Abaixo, temos uma tabela com as possíveis posições assumidas por estes tipos de contato.

Tipo	Repouso	Acionado
NA	Aberto	Fechado
NF	Fechado	Aberto

### Lógica de Contato:

A “lógica de contato” é a essência do comando elétrico. Ela é implementada através de arranjos de contatos elétricos que combinados de forma adequada implementam funções lógicas. Para a compreensão das funções lógicas é necessário compreender o conceito de estado lógico. Um contato elétrico tem dois estados lógicos: acionado ou repouso. Assim sendo, podemos associar aos estados lógicos algarismo binários, ou seja, “0” e “1” para facilidade de interpretação.

A associação fica portanto conforme a tabela abaixo:

Estado Lógico	Algarismo Binário
Acionado ou ligado	1
Repouso ou desligado	0

Assim sendo, conforme a tabela se um contato está acionado, este poderá ser representado por um “1”. Caso contrário será “0”.

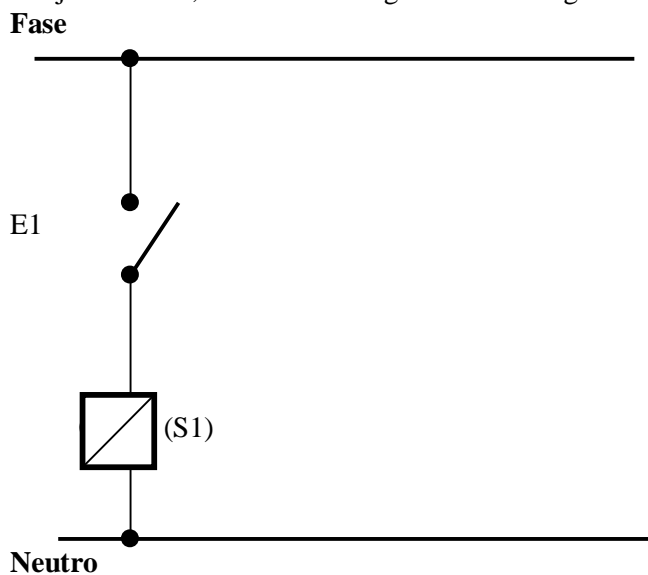
### Funções Lógicas:

As funções lógicas são relacionamentos lógicos envolvendo proposições, sentenças ou eventos. No caso de comando eventos associados a contatos podem ter seus relacionamentos lógicos implementados através de ligações apropriadas de contatos elétricos. Entretanto, uma arranjo lógico funcional pode envolver complexas funções lógicas que pode ser difícil de analisar no todo. Portanto, as relações lógicas são implementadas através de blocos lógicos elementares que implementam funções lógicas bastante simples, mas que formam um conjunto lógico mínimo que permite estabelecer qualquer função lógica mais complexa.

Assim sendo as funções lógicas são representadas na forma de blocos ou sentenças matemáticas, que dada a natureza discreta e binária normalmente é a álgebra de Boole a mais utilizada.

Para fins de projeto e simplificação de circuito, pode-se utilizar o mapa de Karnaugh.

Abaixo, temos um circuito que utiliza contato para estabelecer uma relação lógica muito simples. Perceba que caso o contato E1, que é NA, seja acionado, teremos o acionamento da carga. Caso o contato não esteja acionado, teremos o desligamento da carga.



Uma função lógica sempre relaciona um ou mais parâmetros de entrada com um parâmetro de saída. Assim sendo, temos que o estado lógico do contato C1 corresponde a um parâmetro de “entrada” desta função lógica, e o estado lógico da carga corresponde a saída desta função lógica. Na tabela abaixo, temos a ilustração destes relacionamentos.

Entrada (E1)	Saída (S1)
0 -> Repouso	0 -> Desligada
1 -> Acionado	1 -> Ligada

De uma forma algébrica, podemos associar a saída S1 e a entrada E1, como abaixo:

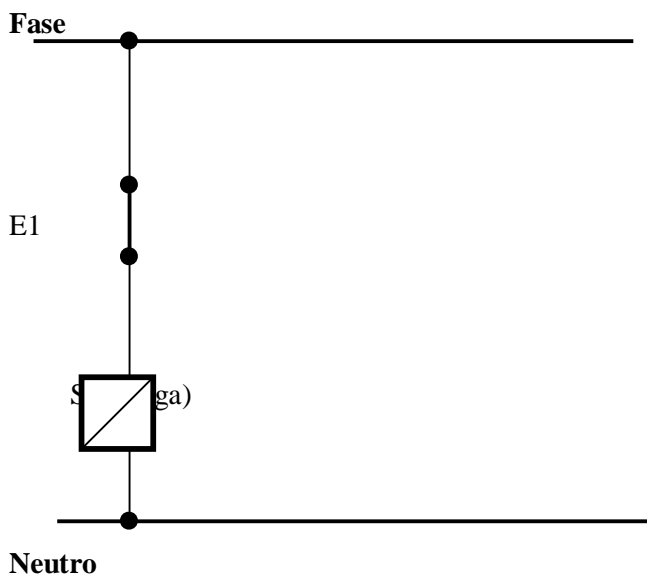
$$S1 = E1$$

Ou seja, temos que a saída S1 acompanha a entrada E1, ou seja, se a entrada, que corresponde ao contato, estiver acionada a carga, que é a saída, estará ligada e vice-versa.

### Função Inversora:

No circuito anterior, o estado lógico da saída S1 acompanhava fielmente o estado lógico da entrada E1. Entretanto, ocorrem situações em que desejamos o contrário, ou seja, quando o contato aciona, a carga desliga e quando o contato está em repouso a carga fica acionada. Do ponto de vista lógico, temos que o circuito realiza uma “inversão” do estado lógico de sua entrada (de “0” para “1” e vice-versa), isto é, se a entrada está em “0” (desligada) a saída estará em “1” (ligado) e vice-versa, portanto o estado lógico da saída é invertido em relação a entrada e dessa forma, quando a entrada está acionada, a saída está desligada e vice-versa, o que caracteriza uma função lógica inversora.

Assim sendo, temos que o circuito abaixo, que substitui um contato NA por NF implementa a função desejada.



Quando o contato E1 está em repouso, estado lógico “0”, a carga está ativada porque o contato é NF e portanto a saída S1 está no estado lógico “1”, portanto a carga está ligada. Quando o contato é acionado E1 é “1” e a carga é desligada, portanto S1 será “0”. Portanto o circuito realiza uma função lógica do tipo inversora.

Do ponto de vista algébrico, podemos representar a relação lógica da entrada e da saída como:

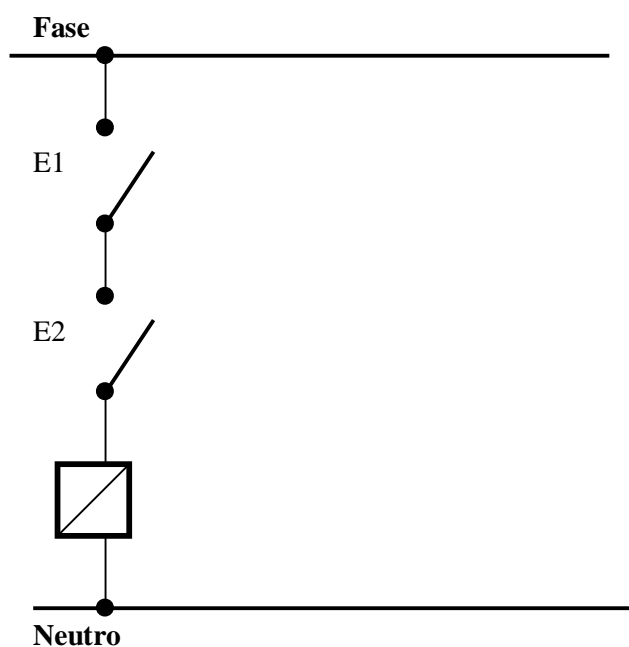
$S1 = nE1$ , onde o “n” representa negação ou inversão de estado lógico. Assim o estado lógico da saída S1 deste sistema, corresponde ao inverso do estado lógico da entrada E1.

Abaixo, temos um quadro sumário envolvendo os contatos NA e NF e suas saídas:

Contato	aberto	fechado	Função
NA	0	0	Não inversora
NF	1	1	Inversora

### Função “E” ou “AND”

Entretanto, as funções lógicas implementadas até agora envolvem apenas uma única entrada, que no caso corresponde à um único contato elétrico. A função lógica “E”, já envolve no mínimo duas entradas. Ela relaciona logicamente duas entradas de forma tal que uma entrada E outra devem ser acionadas simultaneamente para que a saída esteja ativa “1”. Para implementarmos isto em termos de circuito, devemos associar dois contatos em série como no circuito abaixo.



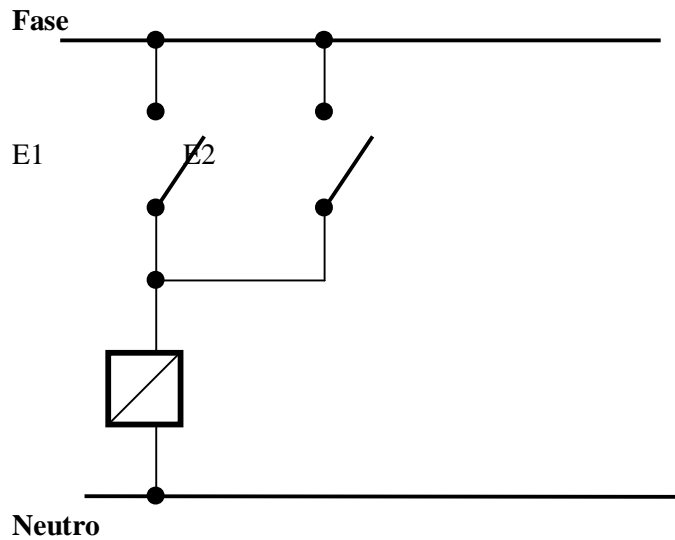
Percebe-se pela figura acima, que para que a carga possa ser ligada, devemos acionar o contato E1 “e” o contato E2, ou seja, E1 “e” E2 devem estar simultaneamente acionados para que S1 esteja ativo. Do contrário, S2 estará inativo ou desligado. Abaixo temos uma tabela com todas as combinações possíveis para a função “E”:

E1	E2	S1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Percebe-se pelo quadro acima que somente teremos a carga ativada, ou seja,  $S1=1$ , quando tivermos  $E1=E2=1$ , ou seja, ambos os contatos ativados.

### Função “OU” ou “OR”

Se utilizarmos o circuito da função anterior, porém colocando os contatos em paralelo invés de série implementamos a função lógica “OU”, que pode ser observada pelo circuito abaixo:

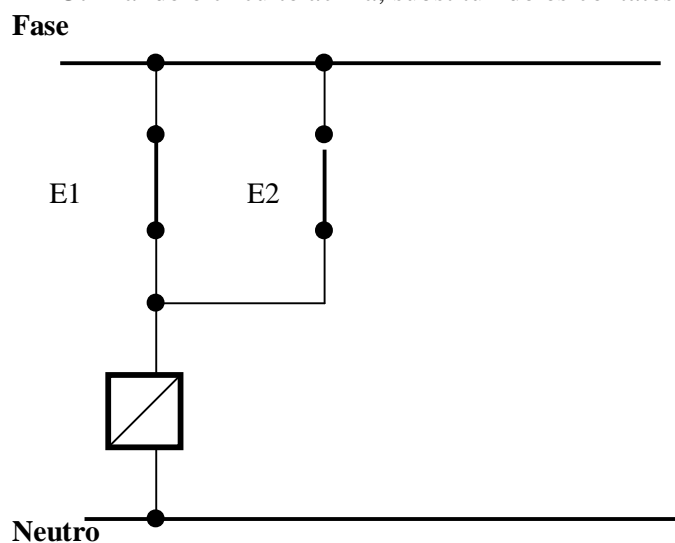


Analisando o circuito acima, percebe-se claramente que para acionar a carga, basta que o contato E1 “ou” o contato E2 sejam acionados. Assim a tabela verdade fica como abaixo:

E1	E2	S1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

#### Função “NE” ou “NAND”

Utilizando o circuito acima, substituindo os contatos NA por NF, temos:

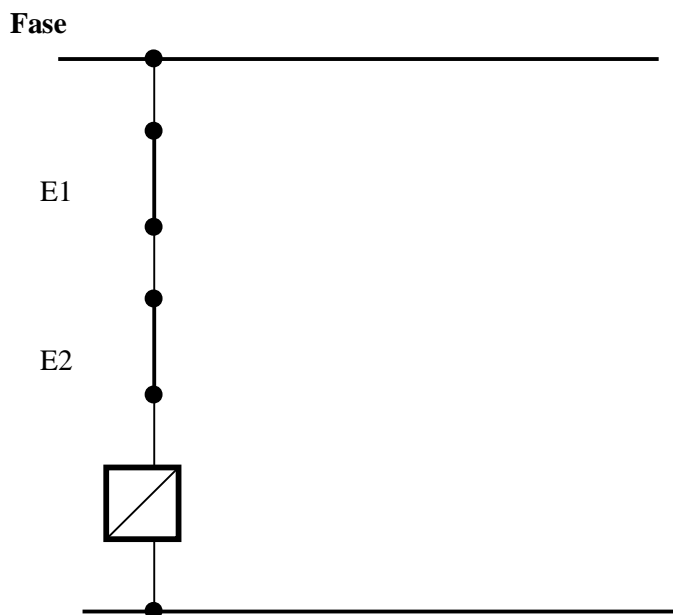


Perceba agora, que a carga permanece acionada com qualquer dos contatos na posição de repouso. Somente acionando os dois contatos simultaneamente teremos o desligamento da carga. Isto caracteriza uma função “E” invertida ou “NE”. Verifique a tabela verdade:

E1	E2	S1
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

### Função “NOU” ou “NOR”

Vamos implementar o circuito da função “E” utilizando contatos NF no lugar do contatos NA:

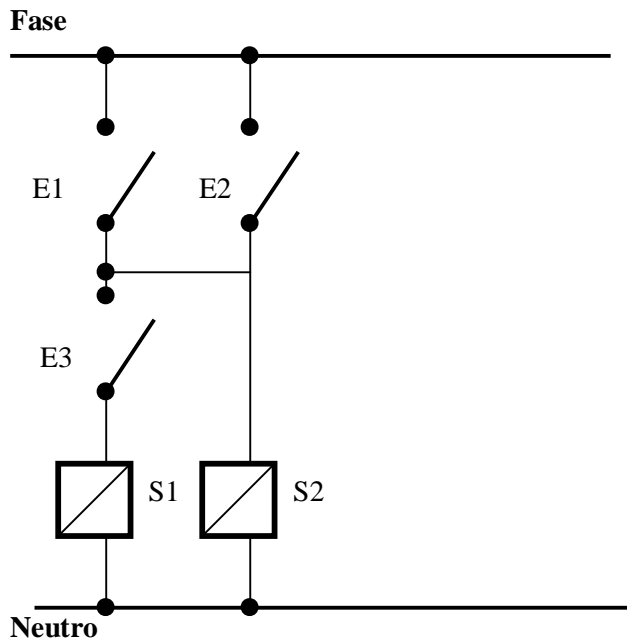


Observe que agora, na situação de repouso, portanto contatos  $E1=E2=0$ , teremos a carga acionada, ou seja,  $S1=1$ . Qualquer contato que seja acionado, desligará a carga, ou seja, levará  $S1=0$ . Isso caracteriza a função “OU” invertida ou função “NOU”. Verifique a tabela verdade:

E1	E2	S1
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Para facilitar a notação, para a função “OU” simbolizamos pelo operador “+”. Para a função “E”, simbolizamos pelo operador “.” (ponto).

Como exemplo será demonstrado abaixo:



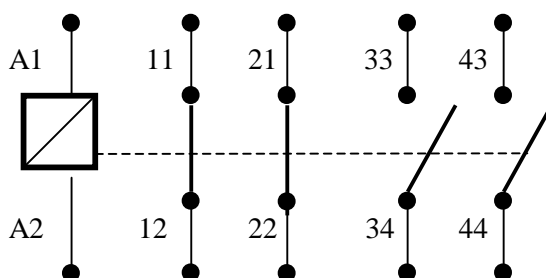
Agora temos duas saídas e três entradas. Para cada saída deverá ser escrita a sua função lógica. Analisando a função S2, que é mais simples, percebe-se que se E1 “ou” E2 forem acionados, teremos o acionamento da saída S2. Trata-se claramente de uma simples função “OU”. Já S1, para ser acionada, além acionarmos E1 “OU” E2, temos que acionar também E3. Em suma, temos que acionar E3 “E” E1 “OU” E2. Algebricamente estas relações ficam:

$$S2 = E1 + E2; \quad S1 = (E1 + E2) \cdot E3$$

Escritas desta forma, estas funções ficam facilmente implementáveis em CLP's, principalmente os microCLP's como o LOGO da Siemens, o CLIC da WEG e o EASY da Klockner-Moeller.

### Contatores Auxiliares:

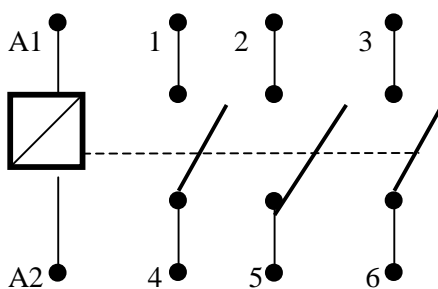
Contatores auxiliares são dispositivos que possuem vários contatos acoplados mecanicamente entre si. Seu acionamento é promovido pela energização de uma bobina, que se imanta e atrai um bloco de ferro, que está mecanicamente acoplado ao acionamento dos contatos. Em suma, ao energizar-se a bobina os contatos acionam, ao desenergizar-se os contatos retomam a posição de repouso. Os contatores podem ter contatos NA, NF ou ambos. Eles são úteis na implementação de funções lógicas complexas. Abaixo temos um esquema pictórico de um contator auxiliar:



Percebe-se que há uma codificação na numeração. Os terminais da bobina são identificados por A1 e A2. Os terminais do contato são compostos por um n de dois dígitos. O primeiro dígito diz respeito ao n do contato. O segundo dígito identifica se é um contato NA ou NF. Contatos NA tem o segundo número iguais a 3 ou 4. Contatos NF tem o o segundo número iguais a 1 ou 2.

### Contatores de Potência:

São similares aos Contatores Auxiliares, mas seus contatos são de potência o que permite que estes sejam usados como dispositivos de manobra. Na verdade os contatos de um contator de potência são chaves interruptoras e cada terminal de cada chave é numerada. O contator de potência normalmente tem 3 chaves interruptoras em virtude das cargas trifásicas no meio industrial serem as mais utilizadas. Abaixo, vemos a representação de um contator de potência:



Muitas vezes, os contatores de potência tem, além dos contatos de potência, contatos auxiliares acionados pela mesma bobina. Na verdade, esta é a configuração mais comum.

### Relés:

Relés são dispositivos que introduzem modificações no circuito de forma súbita. Normalmente estão associados a eventos que requerem sinalização ou proteção como tempo, sobrecarga, sobretemperatura, sobretensão, etc..

Podem ser eletromecânicos, mas muitas vezes são eletrônicos por serem mais versáteis. Sua ação se faz sentir nos comandos elétricos por meio do acionamento de contatos elétricos simples. Por exemplo, um contato NF de um relé de sobrecarga permite alimentação da bobina de um contator de potencia que manobra um motor. Se houver sobrecarga no motor, o relé irá acionar e portanto desligará a bobina do contator de potência, e este desligará o motor protegendo-o de uma queima certa de seus enrolamentos.

### Proteção de circuitos de Comando:

Circuitos de comando, como quaisquer outros circuitos podem sofrer um curto circuito em se não forem protegidos podem danificar toda a fiação de um comando.

Para evitar isto utilizamos dispositivos de proteção ligados em série com o fio fase que alimenta o comando. Quando uma corrente muito elevada, como um curto-circuito percorre um dispositivos de proteção ele desliga o circuito, interrompendo o mesmo.

Existem basicamente dois dispositivos utilizados para a proteção de circuitos de comando:

- Fusível
- Disjuntor

Estes dispositivos serão estudados mais adiante.

**Diagramação de circuitos de Comando**

Do ponto de vista de diagramação, os circuitos destinados a acionamentos de motores elétricos classificam-se em:

- Circuitos de Força ou de Potência;
- Circuitos de comando;

Os circuitos de força são aqueles em que são mostrados os dispositivos de manobra e de proteção e a carga elétrica, que pode ser um motor, comanda. Não envolve lógica de comando.

Os circuitos de comando são aqueles em que são mostrados as bobinas dos contatores e os contatos dos mesmos interligados seguindo a lógica de contato. São sempre circuitos de pequena potência destinados a implementar a lógica do acionamento.

**13. Dispositivos de Manobra e Proteção****EQUAÇÕES BÁSICAS.****Potência ativa .**

$P = U \cdot I \cdot k$  onde  $P$  = potência ativa ( atenção: não use o termo WATTAGEM )

$U$  = tensão elétrica ( atenção: não use o termo VOLTAGEM )

$I$  = corrente elétrica ( atenção: não use o termo AMPERAGEM )

$k$  = fator que depende do tipo de rede, a saber:

$k = 1$ , no caso de corrente contínua

$k$  = fator de potência x rendimento, no caso de corrente alternada monofásica

$k$  = raiz quadrada de três x fator de potência x rendimento, no caso de corrente alternada trifásica.

Unidade de medida: o **watt** (  $W$  ), e, em fase de alteração, o **cavalo-vapor** (  $cv$  ). O cavalo-vapor (  $cv$  ) está sendo eliminado na caracterização da potência de motores, pois não é unidade de medida elétrica e sim mecânica.

Nota: os termos WATTAGEM, VOLTAGEM e AMPERAGEM não devem ser usados, por não constarem da terminologia da ABNT.

**Potência reativa**

Definição : Em regime permanente senoidal, é a parte imaginária da potência complexa  $P_r = U \cdot I$ , onde  $U$  e  $I$  tem o mesmo significado indicado acima Unidade de medida: o **volt-ampére** (  $VA$  )

**Potência aparente.**

Definição: Produto dos valores eficazes, da tensão e da corrente.

Nota : em regime permanente senoidal, é o módulo da potência complexa

Unidade de medida: também o **volt-ampére** (  $VA$  ).

**Potência complexa.**

Definição: Para tensão e corrente senoidais, é o produto do fasor tensão pelo conjugado do fasor corrente.

Unidade de medida: produto vetorial de **volt-ampére** (  $VA$  )

**Perdas.**

Definição: Diferença entre a potência de entrada e a de saída.

Observe-se que existem diversos tipos de perdas, tais como no cobre ( as do condutor, ou perdas joule ), no ferro ( as do núcleo magnético ), dielétricas ( as do material isolante ) ou ainda, as perdas em carga, em vazio e as totais.

Característica comum dessas perdas é a de se apresentarem na forma de uma elevação de temperatura ( aquecimento ), a qual deve ser acrescida à temperatura ambiente, e a soma das duas deve ser perfeitamente **suportada pelos materiais utilizados** na construção do componente ou equipamento por um tempo especificado na norma respectiva.

A correlação entre o nível de temperatura suportável, as perdas, a corrente admissível e a potência disponível, levam a algumas conclusões importantes, a saber:

1. Quanto **maior a temperatura admissível** nos materiais utilizados ( sobretudo nos isolantes, que são mais críticos nesse aspecto ), **maior a potência disponível** no componente ou equipamento.
2. Quanto maior a **temperatura ambiente**, atuando sobre um dado equipamento, **menor é a potência disponível**, e
3. Quanto **mais intensa a refrigeração** ( troca de calor ) que atua sobre o equipamento, **maior é a potência disponível**.

Essas conclusões podem ser muito importantes quando do **dimensionamento e instalação de um equipamento**, e nos levam a necessidade de um levantamento completo das condições ambientais, no local da instalação.

### **Perdas joule.**

São dadas por:

$P_j = I^2 \cdot R$ , onde  $P_j$  = perdas joule, medidas em watts ( W ),

$I$  = corrente passante ( A )

$R$  = resistência do circuito ( . )

Unidade de medida: o **watt** ( W )

### **Resistência elétrica.**

$R$  = resistividade elétrica (  $\rho$  ) x comprimento do condutor (  $l$  ) / seção condutora (  $s$  ).

O valor dessa resistência, e também da resistividade, é dependente da temperatura: quanto maior a temperatura, maior o valor de  $R$ .

Unidades de medida:

- Da resistência elétrica, o **ohm** ( . )
- Da resistividade elétrica, o **ohm x milímetro quadrado / metro** ( . . mm<sup>2</sup> / m )
- Da seção, **em milímetros quadrados** ( mm<sup>2</sup> ) .

### **Aquecimento dos componentes.**

O aquecimento é dado por :

$$Q = I^2 \cdot t,$$

onde  $Q$  é o aquecimento, medido em **joules** ( J ) ou em **calorias** ( cal ). A caloria é uma unidade de medida ainda admitida temporariamente. A unidade oficial é o joule. Lembrar que 1 cal = 4,1868 j.

Essas são algumas das formulas que devem ser lembradas, durante a análise do que segue.

Análise de dispositivos de manobra e de proteção de baixa tensão.

### **NORMALIZAÇÃO TÉCNICA.**

Ao tratarmos de assuntos técnicos, como no presente caso, é de fundamental importância que o futuro profissional seja orientado no sentido de saber que **o atendimento às Normas Técnicas é condição primeira e básica para o correto desempenho de suas atividades**. Em outras palavras, não atender a norma nos seus projetos, construção de componentes, instalação de sistemas e sua manutenção, leva a soluções inadmissíveis no meio técnico e vão prejudicar a confiabilidade da atuação desse profissional.

Conseqüentemente, todo aquele que exerce ou vai exercer uma atividade técnica, deve estar atualizado no que diz respeito às normas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, analisar e aplicar seus conteúdos, ficando o profissional com a liberdade de utilizar soluções comprovadamente melhores do que as definidas nessas normas. **Portanto, as condições citadas nas normas são CONDIÇÕES MÍNIMAS a serem atendidas.**

As normas técnicas brasileiras, de acordo com a regra básica estabelecida dentro da ABNT, devem estar coerentes com as normas internacionais da Comissão Eletrotécnica Internacional – IEC, que engloba todas as normas da área elétrica com exceção das ligadas a transmissão de pulsos, como é o caso das de telecomunicações no seu todo. Isso, para que não hajam conflitos em termos internacionais, seja dos produtos aqui produzidos, seja de tecnologias importadas. Entretanto, em algumas áreas de produtos, como é o caso de transformadores de distribuição, e como consequência da tradição que foi implantada há muito tempo por fabricantes, outras normas poderão excepcionalmente ser a referência.

As normas da ABNT vem caracterizadas por um conjunto de letras ( NBR ) e números que as identificam. As letras NBR significam **Normas Brasileiras de Referência**, sendo que em termos de conteúdo, assim se apresentam:

- As **NORMAS GERAIS**, aplicadas às **metodologias de instalação e de projeto**.

Por exemplo, a norma de **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO – NBR 5410**.

- As **ESPECIFICAÇÕES**, que indicam **as condições técnicas a serem atendidas**.

Por exemplo, as condições técnicas que devem estar presentes num **CABO DE COBRE ISOLADO COM PVC** estão definidas na norma NBR 7288, para um nível de tensão entre 1kV e 6kV.

- Os **MÉTODOS DE ENSAIO**, que, como o próprio nome diz, definem **os procedimentos normalizados a serem seguidos** quando do ensaio de um componente ou equipamento, nos seus mais diversos aspectos: montagem do circuito ou do dispositivo de ensaio, instrumentação quanto a sua exatidão, temperatura de referência, altitude de referência, etc. Nota-se portanto, que:

1. Ao fazer o ensaio de um componente para a determinação de suas características nominais e eventuais, **existe uma regulamentação que vem baseada em fatores necessariamente presentes para que essas características existam**. Serão essas as características a serem gravadas na **PLACA DE CARACTERÍSTICAS**, que identificam o componente ou equipamento. Se, entretanto, fatores como temperatura, altitude, etc. forem diferentes dos normalizados, os valores de placa precisam ser corrigidos.

2. Esta estrutura das normas brasileiras, acompanhando a sistemática da IEC, estão sendo modificada para uma **única** norma por produto, que já engloba todos os aspectos ( especificação, ensaios, representação gráfica e literal, eventual padronização aplicável ao produto ), tornando desnecessária a consulta a diversos textos de norma.

3. As normas técnicas acompanham a evolução das técnicas e de matérias primas.

Conseqüentemente, são feitas periodicamente, revisões e novas publicações, com **conteúdos parcialmente diferentes, o que invalida a edição anterior dessa norma**, na qual se mantém o número e se altera o ano de publicação. Portanto, é necessário cuidado no uso de uma norma, para que se tenha certeza de que o texto que estamos usando **realmente está em vigor !**

- As normas de **SIMBOLOS GRÁFICOS** e de **SIMBOLOS LITERAIS** informam como um componente deve ser identificado no seu esquema de ligação, tanto no desenho do símbolo quanto na letra que o deve caracterizar. Nos anexos 1 e 2 ( páginas 95 a 98 )

vamos encontrar um extrato dos principais símbolos gráficos e a reprodução da tabela de símbolos literais da NBR 5280.

- As normas de **PADRONIZAÇÃO** são necessárias em alguns casos de partes e componentes elétricos, para permitir a intercambialidade. Por exemplo: altura do eixo de motores, por grupo de potências.

- Em todas essas normas, existe o item **DEFINIÇÕES**, que contem a **TERMINOLOGIA TÉCNICA** a ser utilizada. Essa terminologia está intimamente ligada ao **SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES DE MEDIDA – SI**, que contem as grandezas físicas, sua representação e as unidades de medida e suas abreviaturas e modo de redação. Portanto, sem entrarmos nesses enfoques, devemos ter presente a necessidade de conhecer detalhadamente, o **SISTEMA SI**. Para esclarecer dúvidas relativas a Unidades de Medida, consultar o Instituto Nacional de Metrologia, normalização e Qualidade Industrial – **INMETRO**.

### **Normas técnicas dos principais componentes elétricos.**

As normas aplicáveis aos componentes citados no texto que segue, tem a referência IEC.

Vamos entender esse detalhe. No antes exposto, ficou citado que as normas da ABNT seguem basicamente as normas da IEC, salvo algumas exceções. Vimos também que os conteúdos são periodicamente atualizados, de modo que cada vez que a norma IEC é atualizada, segue-se, após algum tempo, a atualização da norma brasileira. Como, por outro lado, os fabricantes devem apresentar aos seus consumidores, sempre produtos de acordo com as últimas condições normativas existentes, a indústria opta, por exemplo, em indicar as normas IEC atualizadas como referência de seus produtos, que sempre antecedem às normas regionais, como as da ABNT. Por essa razão, as normas citada no presente caso são:

- IEC 60947-1 Equipamentos de manobra e de proteção em baixa tensão – Especificações
- IEC 60947-2 Disjuntores
- IEC 60947-3 Seccionadores e seccionadores-fusível
- IEC 60947-4 Contatores de potência, relés de sobrecarga e conjuntos de partida.
- IEC 60947-5 Contatores auxiliares, botões de comando e auxiliares de comando.
- IEC 60947-7 Conectores e equipamentos auxiliares
- IEC 60269-1 Fusíveis para baixa tensão
- IEC 60439-1 Conjuntos de manobra e comando em baixa tensão
- NBR 5410 Instalações Elétricas de Baixa Tensão.
- NBR 5280 Símbolos Literais de Eletricidade
- Símbolos Gráficos ( normas IEC / DIN / NBR )

### **TERMINOLOGIA.**

Para o devido entendimento dos termos técnicos utilizados nesse texto, destacamos os que seguem, extraídos das respectivas normas técnicas.

#### **• Seccionadores.**

Dispositivo de manobra ( mecânico ) que assegura, na posição aberta, uma distância de isolamento que satisfaz requisitos de segurança especificados. Nota: um seccionador deve ser capaz de fechar ou abrir um circuito, ou quando a corrente estabelecida ou interrompida é desprezível, ou quando não se verifica uma variação significativa na tensão entre terminais de cada um dos seus pólos.

Um seccionador deve ser capaz também de conduzir correntes em condições normais de circuito, e também de conduzir por tempo especificado, as correntes em condições anormais do circuito, tais como as de curto-circuito.

#### **• Interruptor.**

Chave seca de baixa tensão, de construção e características elétricas adequadas à manobra de circuitos de iluminação em instalações prediais, de aparelhos eletrodomésticos e luminárias, e aplicações equivalentes.

Nota do autor: essa manobra é entendida como sendo em condições nominais de serviço. Portanto, o interruptor interrompe cargas nominais.

#### **• Contator.**

Dispositivo de manobra ( mecânico ) de operação não manual, que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer ( ligar ), conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, inclusive sobrecargas de funcionamento previstas.

#### **• Disjuntor.**

Dispositivo de manobra ( mecânico ) e de proteção, capaz de estabelecer ( ligar ), conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito.

#### **• Fusível encapsulado.**

Fusível cujo elemento fusível é completamente encerrado num invólucro fechado, o qual é capaz de impedir a formação de arco externo e a emissão de gases, chama ou partículas metálicas para o exterior quando da fusão do elemento fusível, dentro dos limites de sua característica nominal.

#### **• Relé ( elétrico ).**

Dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando certas condições são satisfeitas no circuito de entrada que controlam o dispositivo.

Notas do autor: O relé, seja de que tipo for, não interrompe o circuito principal, mas sim faz atuar o dispositivo de manobra desse circuito principal. Assim, por exemplo, existem relés que atuam em sobrecorrente de sobrecarga ou de curto-circuito, ou de relés que atuam perante uma variação inadmissível de tensão.

Por outro lado, os reles de sobrecorrente perante sobrecarga ( ou simplesmente relés de sobrecarga ), por razões construtivas, podem ser térmicos ( quando atuam em função do efeito Joule da corrente sobre sensores bimetálicos ), ou senão eletrônicos, que atuam em função de sobrecarga e que podem adicionalmente ter outras funções, como supervisão dos termistores ( que são componentes semicondutores), ou da corrente de fuga.

Quanto as **grandezas elétricas** mais utilizadas nesse estudo, destacamos:

- **Corrente nominal.**

Corrente cujo valor é especificado pelo fabricante do dispositivo.

Nota do autor: Essa corrente é obtida quando da realização dos ensaios normalizados, conforme comentário anterior.

- **Corrente de curto-circuito.**

Sobrecorrente que resulta de uma falha, de impedância insignificante entre condutores energizados que apresentam uma diferença de potencial em funcionamento normal.

- **Corrente de partida.**

Valor eficaz da corrente absorvida pelo motor durante a partida, determinado por meio das características corrente-velocidade.

- **Sobrecorrente.**

Corrente cujo valor excede o valor nominal.

- **Sobrecarga.**

A parte da carga existente que excede a plena carga.

Nota: Esse termo não deve ser utilizado como sinônimo de “sobrecorrente”.

Nota do autor: “Sobrecorrente” é um termo que engloba a “sobrecarga” e o “curtocircuito”.

- **Capacidade de Interrupção.**

Um valor de corrente presumida de interrupção que o dispositivo é capaz de interromper, sob uma tensão dada e em condições prescritas de emprego e funcionamento, dadas em normas individuais.

Notas do autor: A “capacidade de interrupção” era antigamente chamada de “capacidade de ruptura”, termo que não deve mais ser usado. O valor da “capacidade de interrupção” é de particular importância na indicação das características de disjuntores, que são, por definição, dispositivos capazes de interromper correntes de curto-circuito, o que os demais dispositivos de manobra não fazem.

- **Resistência de contato.**

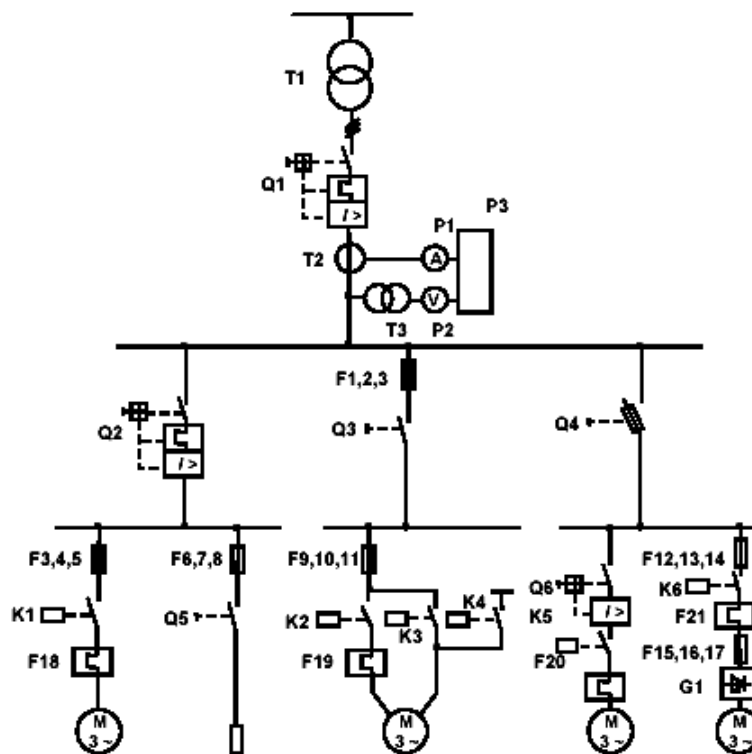
Resistência elétrica entre duas superfícies de contato, unidas em condições especificadas.

Nota do autor: esse valor é de particular interesse entre peças de contato, onde se destaca o uso de metais de baixa resistência de contato, que são normalmente produzidos por metais de baixo índice de oxidação, ou senão ainda, quando duas peças condutoras são colocadas em contato físico, passando a corrente elétrica de uma superfície a outra.

É por exemplo, o que acontece entre o encaixe de fusíveis na base e a peça externa de contato do fusível, que não pode ser fabricada com materiais que possam apresentar elevada resistência de contato.

## **REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E LITERAL DOS COMPONENTES DE UM CIRCUITO.**

Um esquema elétrico, ( e não um diagrama ) é a representação dos componentes que o compõe, de acordo com as normas de Símbolos Gráficos e Símbolos Literais. Vejamos abaixo o esquema com **circuítos de manobra principais** representando uma instalação elétrica industrial.



- T1** – Transformador de alimentação  
**Q1** – Disjuntor de entrada  
**T2** – Transformador de medição para corrente  
**T3** – Transformador de medição para tensão  
**P1** – Amperímetro para medição de corrente  
**P2** – Voltímetro para medição de tensão  
**P3** – Equipamento para múltipla medição  
**Q2** – Disjuntor para distribuição  
**Q3** – Seccionador sob carga de distribuição  
**F1,2,3** – Fusíveis para proteção na distribuição  
**Q4** – Seccionador-fusível para manobra e proteção na distribuição  
**F3,4,8 a F12,13,14** – Fusíveis retardados dos ramais de motores  
**K1 a K5** – Contadores para manobra dos motores  
**F18 a F21** – Relés de sobrecarga para proteção dos motores  
**Q5** – Seccionador para manobra direta da carga  
**Q6** – Disjuntor de entrada para ramal de motor  
**K6** – Contador de entrada para ramal de motor  
**F15,16,17** – Fusíveis ultra-rápidos para proteção dos componentes eletrônicos de potência  
**G1** – Partida suave ( soft-starter )

Análise de dispositivos de manobra e de proteção de baixa tensão

No caso, trata-se de uma representação UNIFILAR, que é bastante esclarecedora quanto aos componentes do circuito, mas perdem-se detalhes do tipo “em que fase estão ligados os componentes”. Para eliminar esse inconveniente, é necessário fazer a representação MULTIFILAR. No presente caso, que é o de uma rede trifásica ( L1,2,3 ) passaria a ser uma representação TRIFILAR. Ou senão, no esquema de comando ( veja página seguinte ), o de uma representação BIFILAR, pois nesse caso temos um circuito alimentado por dois condutores em forma monofásica ou bifásica. Existem algumas condições básicas que devem ser respeitadas, ao reunir os componentes de um circuito, as quais podemos sintetizar do seguinte modo:

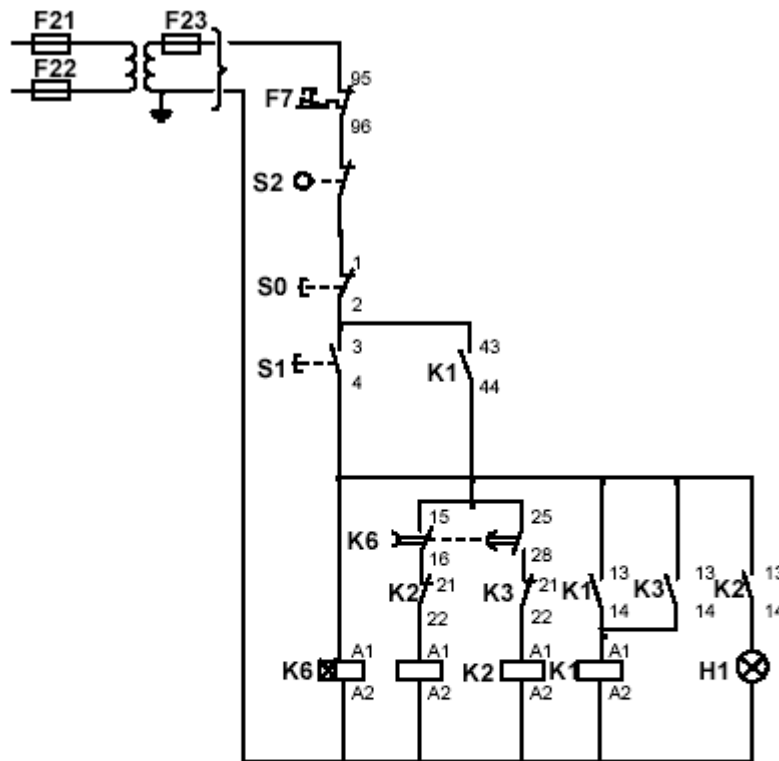
- A entrada do sistema deve possuir a melhor qualidade de operação e proteção para atender com segurança as circunstâncias de PIOR CASO, como por exemplo, proteger os componentes contra a ação térmica e dinâmica da corrente de curto-circuito.
- A estrutura do sistema é basicamente dada pela necessidade da divisão de cargas , assegurando uma elevada praticidade e confiabilidade ao sistema, bem como atender a certas imposições normalizadas, tal como no caso da partida de motores, com a inserção de métodos de partida para potências nas quais as normas o exigem.
- Ao ser feita a montagem de um tal circuito, observar corretos métodos de instalação, bem como, na hora de aplicar carga, atender a orientação da respectiva norma de “aplicação de carga”, para não prejudicar o seu desempenho futuro.
- Semelhantemente ao item anterior, conhecer a metodologia de manutenção citada na norma do produto em questão, para assegurar uma VIDA ÚTIL a mais prolongada possível. Com isso, são minimizados investimentos futuros para manter o sistema funcionando, o que eleva a rentabilidade da instalação industrial alimentada por esse circuito.

Os circuitos de manobra principais tem normalmente associados a eles, os **circuitos de comando**, no qual estão ligados os componentes para manobra manual e automática ,e de proteção.

Um desses circuitos está representado no que segue, e no caso se trata do circuito de comando de uma partida estrela-triângulo. O funcionamento e uso dos mesmos serão objeto de comentários posteriores.

**Circuito de comando**

Exemplo: Partida estrela-triângulo



- F21, F22, F23** – Fusíveis para proteção do circuito de comando  
**T1** – Transformador para alimentação do comando  
**F7** – Contator auxiliar ( NF ) do relé de sobrecarga  
**S2** – Chave fim de curso de proteção do sistema de partida  
**S0 e S1** – Botões de comando de impulso para liga e desliga  
**K6** – Relé de tempo e contatos temporizados  
**K1, K2, K3** – Bobinas dos contatores e contatos auxiliares  
**H1** – Sinalização do regime de operação

**GRANDEZAS QUE CARACTERIZAM UM COMPONENTE / EQUIPAMENTO.**

Cada componente/equipamento tem gravado externamente, através de uma placa de características ou de uma gravação em alto ou baixo relevo, as grandezas principais que o caracterizam. Nos manuais/catálogos técnicos que o acompanham, mais outros dados importantes poderão estar sendo mencionados.

Assim, no caso de componentes elétricos, são básicas as indicações:

- Tensão (elétrica) nominal (  $U_n$  ) e corrente ( elétrica ) nominal (  $I_n$  )
- Freqüência nominal (  $f_n$  )
- Potência presente no circuito a que se destina (  $P_n$  )
- Eventualmente a corrente máxima de curto-circuito, no caso de disjuntores (  $I_{cu} / I_{cs}$  )
- Normas que se aplicam aos componentes, tanto as especificações quanto os métodos de ensaio.

**Observe:** o símbolo da grandeza “tensão elétrica” é o **U** e não o **V**. Esse último é a abreviatura de sua **unidade de medida** ( volt ), e não da grandeza.

Somado a essas indicações, vem também a indicação de como o fabricante caracteriza o seu produto. Assim, os disjuntores de fabricação da Siemens são identificados por 3WN...; um fusível Diazed, por 5SB2 ....., e assim por diante. Mas, ao lado dessas grandezas básicas, outras tão importantes quanto essas, que caracterizam os produtos, passarão a ser analisadas agora:

### **Curvas de carga.**

As cargas, elétricas ( p.ex. lâmpadas incandescentes ) ou eletromecânicas ( p.ex. motores ), alimentadas por um circuito elétrico, apresentam características elétricas diferentes, como pode ser observado anteriormente.

Basicamente, temos três tipos de cargas das quais uma sempre predomina em cada componente/equipamento, sem porém deixar de existir uma parcela de outras formas de carga simultaneamente presente. Assim:

- Cargas indutivas, como a dos motores elétricos. Porém, a presença de um certo efeito resistivo, manifestado pela existência das perdas joule, comprova que, ao lado dessa carga indutiva, encontramos, não sem importância, a carga resistiva.
- Cargas predominantemente resistivas, como as encontradas em fornos elétricos e lâmpadas incandescentes, e
- Cargas predominantemente capacitivas, como as encontradas nos capacitores, sem com isso excluir a presença, em menor intensidade, de cargas indutivas ou resistivas nesse componente.

Vamos fazer uma análise mais detalhada de cada uma das três formas de curvas de carga.

#### **1. Cargas indutivas.**

Se caracterizam por uma corrente de partida, algumas vezes maior que a nominal, corrente essa que vai atenuando sua intensidade com o passar do tempo, ou seja, conforme o motor vai elevando sua velocidade, como pode ser visto no gráfico que tem no eixo dos tempos a unidade de medida o segundo, e no eixo das correntes, o múltiplo da corrente nominal (  $x I_n$  ). Essa corrente maior é conseqüente da necessidade de uma potência maior no início do funcionamento do motor, para vencer as inércias mecânicas ligadas ao seu eixo, que em última análise são as apresentadas pela máquina mecânica que o motor deve movimentar. Uma vez vencida a inércia, o motor reduz a corrente e alcança o seu valor nominal (  $I_n$  ).

Devido a corrente de partida maior que a nominal, surgem **perdas elétricas e flutuações na rede**, que precisam ser controladas. Lembrando que, para uma certa tensão de alimentação, a corrente é diretamente proporcional á potência, os problemas citados são aceitáveis para cargas indutivas de pequeno valor, exigindo, porém, medidas de redução da potência envolvida para cargas de valor mais elevado.

Nesse sentido, na área da baixa tensão, cujos circuitos devem atender a norma NBR 5410, estando em vigor a sua edição de 1997 na época da redação do presente estudo, encontramos no seu **item 6.5.3** a determinação de que somente para potências motoras **até 3,7 kW ( 5 cv )** inclusive, a ligação dessa carga indutiva pode ser feita **diretamente**, sem a redução supramencionada. Acima dessa potência, o primeiro passo é a consulta a Concessionária de Energia **no local da instalação desse motor**, sobre o limite até o qual é permitida a partida direta, a plena tensão pois esse valor depende das condições de carga em que a rede de alimentação se encontra. **É importante não esquecer desse detalhe na hora de definir o circuito de alimentação de uma carga motora, sob pena de fazer um projeto errado.**

#### **2. Cargas resistivas.**

Pela análise da curva de carga, nota-se claramente que a relação tempo x corrente evolui de um modo totalmente diferente.

De um lado, no eixo dos tempos, a escala é de milissegundos, demonstrando que a duração de um pico inicial de corrente é muitíssimo menor, e conseqüentemente menores os efeitos daí resultantes, como é o caso do aquecimento, enquanto que no eixo da corrente, continua ser o múltiplo da corrente nominal (  $x I_n$  ). Por outro lado, é bem maior o pico de corrente, que chega a valores da ordem de 20 vezes o valor nominal. Mas no seu todo, o produto corrente x tempo se apresenta bem menos crítico do que no caso das

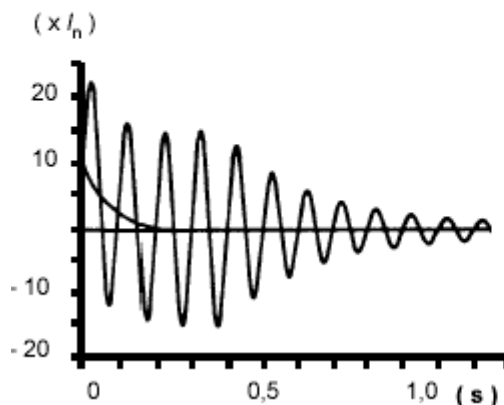
cargas indutivas, o que vai ter uma influencia no valor da grandeza de manobra dos dispositivos. Assim, como podemos observar nas informações relativas a capacidade de manobra de contadores, o valor numérico da corrente  $I_e / AC-1$  de um dado contador é sensivelmente maior do que perante cargas motoras ( $I_e / AC-2$  e  $AC-3$ ), conforme veremos mais adiante.

### 3. Cargas capacitivas.

#### TIPOS DE CARGA

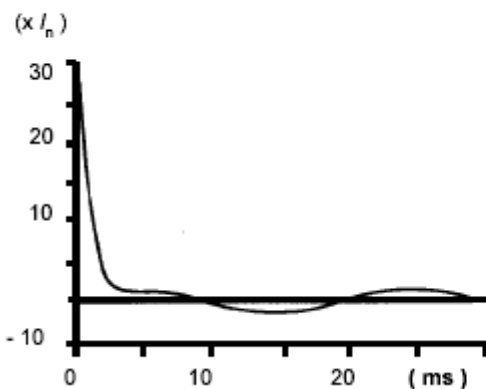
#### Desenvolvimento de partida

#### Carga indutiva



- ♦ Exemplo: Motor trifásico com rotor em curto-circuito
- ♦ Pico de corrente na ligação  
 $8 \cdot I_n$  ( $\cos \varphi = 0,35$ )

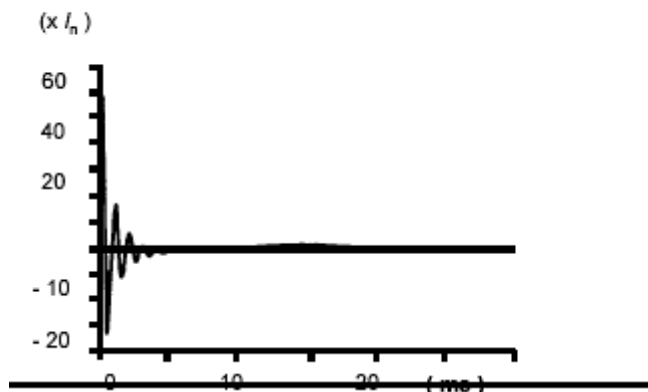
#### Carga resistiva



- ♦ Exemplo: Resistência para aquecimento
- ♦ Pico de corrente na ligação  
 $20 \cdot I_n$  (em poucos milissegundos)

Vejamos a curva de carga nesse caso. Vamos encontrar, sobre eixos de coordenadas referências de tempo e corrente similares ao caso anterior, alguns picos de sobrecorrente mais críticos, porém de curta duração. Portanto, o efeito de aquecimento e o dinâmico sobre os componentes do dispositivo é de importância, com um pico de  $60 \times I_n$ , o que pode comprometer uma manobra nessa etapa de carga. Por essa razão, dispositivos de manobra para capacitores precisam ser de tipo especial ou o usuário deve consultar o fabricante sobre qual o dispositivo de manobra a ser usado.

## Carga capacitiva



- Exemplo: Banco de capacitores
- Pico de corrente na ligação ( muito elevado )  
 $60 \cdot I_n$

(Os contadores básicos devem ser adaptados a manobra de capacitores, diminuindo o efeito de pico através de resistência ou indutâncias ligadas em série).

5. **Presença de corpos sólidos** ( grãos e poeiras ), que podem emperrar o funcionamento dos dispositivos pela penetração no seu interior, ou da entrada de peças e ferramentas no interior dos dispositivos/equipamentos. Esse aspecto é resolvido, mediante a escolha de um dispositivo que já tenha um certo GRAU DE PROTEÇÃO ou que seja instalado dentro de um invólucro com esse GRAU . É freqüente que as empresas tenham na forma avulsa, tais invólucros ( caixas ), com a indicação clara do referido GRAU DE PROTEÇÃO.

A escolha do GRAU DE PROTEÇÃO correto é um aspecto bastante importante, para evitar que agentes prejudiciais atuem no interior dos dispositivos, e com isso alcancem os valores previstos de DURABILIDADE ou VIDA ÚTIL.

6. A **penetração de água no interior dos dispositivos**, sobretudo daqueles instalados ao ar livre. Essa água pode se apresentar de diversas formas: na de **gotas**, de **jatos** ou **submersão**. Também nesse caso, há necessidade de um encapsulamento dos dispositivos, ou seja, a escolha de um GRAU DE PROTEÇÃO adequado, como mencionado no item anterior.

**GRAUS DE PROTEÇÃO.**

Os GRAUS DE PROTEÇÃO tem sua classificação e identificação regulamentados por **norma técnica**, que se apresenta na forma de duas letras e dois números. As letras são **IP**, significando **Proteção Intrínseca** ( **Intrinsic Protection**, em inglês = proteção própria do dispositivo ). Dos dois números, o primeiro informa o grau de proteção perante a penetração de sólidos; o segundo, líquidos.

A tabela que traz esses dados é a seguinte:

1º algarismo Proteção contra a penetração de sólidos	2º algarismo Proteção contra a penetração de líquidos
0 – dispositivo aberto ( sem proteção )	0 – dispositivo aberto ( sem proteção )
1 – evita a penetração de sólidos >50mm	1 – evita a penetração de pingos verticais
2 – idem, de sólidos > 12 mm	2 – idem, de pingos até 15º da vertical
3 – idem, de sólidos > 2,5 mm	3 – idem, de pingos até 60º da vertical
4 – idem, de sólidos > 1 mm	4 – idem, pingos/ respingos de qq. direção
5 – dificultam a penetração de pó	5 – idem, de jatos de água moderados
6 – blindados contra penetração de pó	6 – idem, de jatos de água potentes
	7 – idem, sujeitos a imersão
	8 – idem, sujeitos a submersão

**Exemplos.**

Um equipamento que vai operar num ambiente externo ( portanto sujeito a chuvas ), onde as poeiras ( sólidos ) no ar tem um tamanho de 2 mm, e a proteção necessária é contra pingos e respingos, precisa de um IP dado por: IP 44.

Explicando: na parte sólida, tendo 2 mm, se tivermos um invólucro IP 3, que protege para sólidos > 2,5 mm, a poeira vai penetrar. Logo, será o IP 4.

Na parte líquida, a proteção contra pingos e respingos, também é o IP .4

**Logo, resulta o GRAU DE PROTEÇÃO correto dado por IP 44.**

Outro exemplo:

No ambiente , temos corpos sólidos com um tamanho de 10 mm, mas a instalação é feita em ambiente protegido ( onde não existe líquido ). Qual o IP necessário ?

- Na parte sólida, será o IP 3 ( o 2 deixaria os corpos sólidos entrarem ), e na parte líquida, será o IP .0 ( sem necessidade de proteção ).

- **Logo, a escolha recai sobre o IP 30.**

-

7. Aplicando uma camada de proteção externa, ou seja, uma pintura, com tinta apropriada **às condições de agressividade no local.**

Nota conclusiva desse item:

**Observa-se que, para a escolha correta de um componente / equipamento / dispositivo, além dos fatores elétricos mencionados, é de fundamental importância conhecer as CONDIÇÕES LOCAIS de temperatura, altitude, ambientes agressivos, etc, para que os componentes tenham uma VIDA ÚTIL OTIMIZADA.**

### **ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE USO ANORMAIS ( NÃO NOMINAIS ).**

Apesar de as condições nominais serem a referência na identificação de um componente/equipamento, não é menos verdade que ele pode, e frequentemente, ficar sujeito a operar em condições anormais de serviço. Tais condições são sobretudo as de sobrecorrentes, identificadas como correntes de sobrecarga e de curto-circuito.

Tais condições, apesar de inevitáveis, não podem permanecer por longo tempo, pois aí o componente/equipamento estará sujeito a uma danificação. Por essa razão, as normas relativas ao produto considerado , indicam o tempo máximo que uma condição anormal pode se apresentar, e esse tempo tem que estar intimamente ligado ao tempo de atuação dos dispositivos de proteção ( relés de disjuntores e fusíveis ).

Ou seja: **a atuação dos dispositivos de proteção, perante uma dada corrente anormal, tem que ser MENOR do que o tempo máximo obtido da curva tempo x corrente, estabelecido em norma para sua segurança.**

A situação mais crítica envolve a curva corrente x tempo de atuação perante curto-circuito.

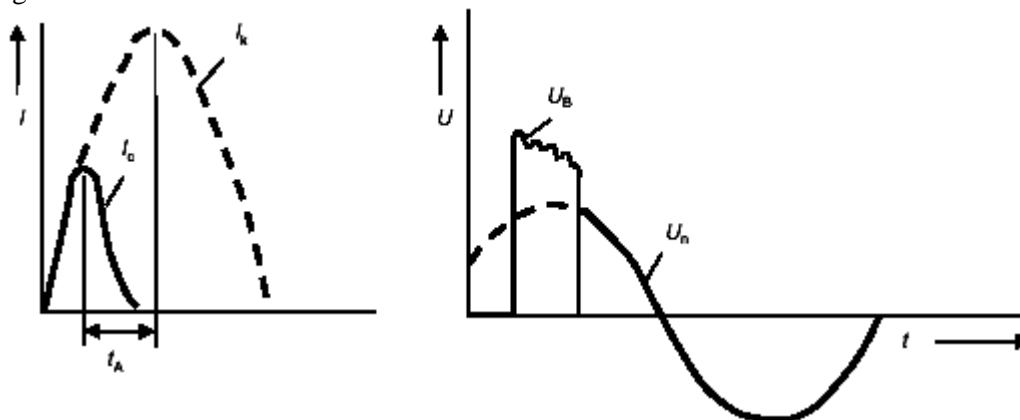
Vamos, portanto, destacar alguns aspectos da mesma:

- A corrente de curto-circuito ( indicada por  $I_{cc}$  ou  $I_k$  ), tem sua grandeza calculada, circuito por circuito, de uma instalação, podendo-se adotar, para a escolha dos dispositivos de proteção, notadamente os disjuntores, o maior dos valores calculados, se tal decisão não levar a uma solução antieconômica. O seu valor é função da impedância ( e como tal da resistência e da reatância ).
- Porém , a presença do seu **valor pleno** calculado é considerado UMA FATALIDADE, e como tal deve-se levar em consideração o seu **valor real**, que é da ordem de 50% do valor pleno calculado, que, na pratica, é maior que 10 a 15 . In, dependendo do tipo de carga do circuito.
- No ato da interrupção, devido a uma corrente de algumas **dezenas de quiloampères ( kA )** no caso industrial, e de **alguns kA** no caso residencial, aparecerá como crítica a ação térmica do arco elétrico ( arco voltaico ), cujo valor de temperatura é algo **acima de 5 000°C**, temperatura essa que nenhum dos materiais utilizados na construção das peças de contato suportaria. Assim, por exemplo, a temperatura de fusão do cobre, que evidentemente não pode ser alcançada, pois já estaria destruindo a peça de contato, é de 1 083°C e a da prata é de 960°C. Portanto, fica claro, que o arco precisa ser rapidamente extinto, para não danificar ou mesmo destruir, o dispositivo de manobra.

• Dependendo do componente/equipamento, é também crítica a ação da corrente de curto-circuito no aspecto dinâmico, fato porém de menor importância nos produtos analisados no presente texto. De qualquer modo, a redução do **tempo de arco** ( tempo que o arco estará presente ) é um dos fatores de dimensionamento e construção das CÂMARAS DE EXTINÇÃO que são encontradas tanto em contatores quanto e sobretudo em disjuntores.

Devido ao exposto, o valor da corrente de curto-circuito é um parâmetro importante, sobretudo na escolha de dispositivos que atuam na presença dessa corrente, como é o caso de disjuntores e de fusíveis. Precisam esses dispositivos, portanto, ter uma construção que garanta uma interrupção segura e rápida dessa corrente, o que é indicado pelo valor de sua CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO.

Devido às condições críticas em que se apresenta a corrente de curto-circuito, os dispositivos que a interrompem, limitam o seu valor, evitando que atinja o valor de pico, como demonstram as curvas que seguem.



$I_c$  Corrente limitada de curto-circuito

$I_k$  Corrente de impulso de curto-circuito

$t_A$  Tempo de interrupção (extinção do arco)

$U_B$  Tensão de impulso (extinção do arco)

$U_n$  Tensão nominal

### ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CARGA NA DEFINIÇÃO DA CAPACIDADE DE MANOBRA .

Quando da análise das curvas de carga, vimos que, cargas de natureza diferentes ( resistivas, indutivas, capacitivas ), levam a capacidades de manobra também diferentes. Assim, justificou-se que, perante cargas indutivas, que se caracterizam por correntes de partida bem mais elevadas que as nominais, os dispositivos de manobra ( usualmente contatores ), apresentam uma capacidade de manobra menor do que a encontrada perante cargas resistivas.

Portanto, a capacidade de manobra, de um contator por exemplo, depende do **tipo de carga** que é ligado.

Além desse aspecto, **cargas permanentemente ligadas** conferem ao dispositivo, uma capacidade de manobra mais elevada do que a disponível se as manobras obedecerem a um **regime de serviço não contínuo ou intermitente**.

São, assim, duas as variáveis que devem ser conhecidas e que definem a capacidade de manobra de um dado contator, por exemplo: **o tipo de carga e o regime de serviço**. Tais fatos são levados em consideração pela norma IEC 60947, ao criar uma caracterização da capacidade de manobra: a **categoria de emprego ou de utilização**.

Essa categoria é definida separadamente para redes de corrente alternada ( AC ) e para corrente contínua (DC), aplicada em contadores de potência, contadores auxiliares e seccionadores. Observe que as abreviaturas vem da língua inglesa, que é a língua técnica internacionalmente utilizada.

Os detalhes dessa classificação são dados nos respectivos capítulos desses dispositivos de manobra.

### **FUSÍVEIS ENCAPSULADOS.**

Os fusíveis são dispositivos de proteção que, pelas suas características, apresentam destaque na proteção contra a ação de correntes de curto-circuito, podendo porém também atuar em circuitos sob condições de sobrecarga, caso não existam nesse circuito, dispositivos de proteção contra tais correntes, que são os relés de sobrecarga.

Sua atuação vem baseada na fusão de um elemento fusível, segundo o aquecimento resultante devido as perdas joule que ocorrem durante a circulação dessa corrente, e se destacam por sua elevadíssima capacidade de interrupção, freqüentemente superior a 100 kA.

São dispositivos de proteção de larga aplicação, com diversos tipos construtivos, e que por isso mesmo deve merecer uma atenção especial na hora de escolher o fusível correto. Para fundamentar essa escolha, nada melhor do que a análise da função de cada componente de um fusível, pois assim, **em caso de ausência de algum desses componentes, já é possível avaliar as conseqüências.**

Vamos tomar como referência nessa análise, a construção de um fusível encapsulado, cujas funções e detalhes são:

#### **1. Base de montagem e encaixe nessa base do contato externo.**

Sugerindo acompanhar essa análise com os desenhos em corte indicados na página seguinte, e sobretudo na representação do fusível com designação de norma como sendo “NH “, nota-se que a corrente circulante entra pela base e passa ao contato externo do fusível através de uma superfície de contato entre os metais do contato da base e do contato externo do fusível.

As superfícies de contato entre o encaixe e o contato externo do fusível não podem oxidar pois se assim estiverem, a corrente que passa por elas levará à uma elevação de temperatura que vai **invalidar a curva de desligamento tempo x corrente** , que obrigatoriamente caracteriza um fusível. Tal oxidação depende sobretudo do tipo de metal ou liga metálica utilizada na construção dos respectivos contatos, de modo que é de fundamental importância o uso de **metais que não oxidem**, ou que oxidem muito lentamente. Uma , mas não a única solução encontrada, é o da **prateação** das peças de contato, pois sabemos que a prata é o melhor condutor elétrico e que sua oxidação é lenta. Soma-se a isso, o fato de o óxido de prata se decompor automaticamente perante as condições normais de uso, de modo que o problema citado não se apresenta nessa solução.

**Mas, como identificar um metal oxidado? A solução é simples: todo metal oxidado perde o seu brilho metálico, ou seja, se torna fosco. E não adiantará remover o óxido, pois com tais metais, o óxido se forma rapidamente de novo.**

Uma exceção a essa regra é o caso do alumínio, o qual, mesmo oxidado, apresenta uma superfície aparentemente brilhante, pois o óxido de alumínio é translúcido. Mas, na verdade, com esse metal, a situação até é mais crítica, pois o óxido de alumínio não é apenas um mau condutor elétrico: **ele é isolante**, o que exclui a possibilidade de seu uso puro para tais componentes.

#### **2. Elemento fusível.**

Esse precisa ser **inviolável**, para evitar a alteração do seu valor nominal, e com isso, a **segurança de sua atuação conforme previsto em projeto**. Para tanto, o fusível como um todo precisa ser inviolável ( como é o caso dos tipos Diazed e NH ), através do envolvimento de todo o fusível com um corpo externo cerâmico ( veja 3 na figura do fusível em corte ), com fechamento metálico nas suas duas extremidades.

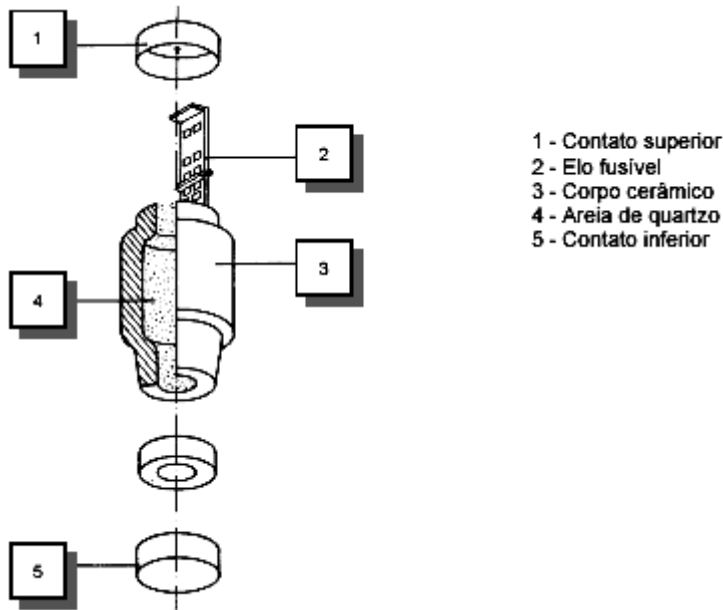
Quando da circulação da corrente  $I_k$ , cujo valor, como vimos, é de 10 a 15 vezes ou mais superior a  $I_n$ , através do elemento fusível, atinge-se uma temperatura de fusão **superior** a do metal utilizado na construção desse componente, ato em que se abre um **arco elétrico** com uma temperatura superior a 5 000°C, que, pelo seu **valor e risco de promover uma acentuada dilatação dos demais componentes e se**

**espalhar no ambiente**, precisa ser rapidamente extinto. Caso contrário, existe o risco de uma explosão do fusível. A extinção é analisada com mais detalhes em outro ponto desse capítulo.

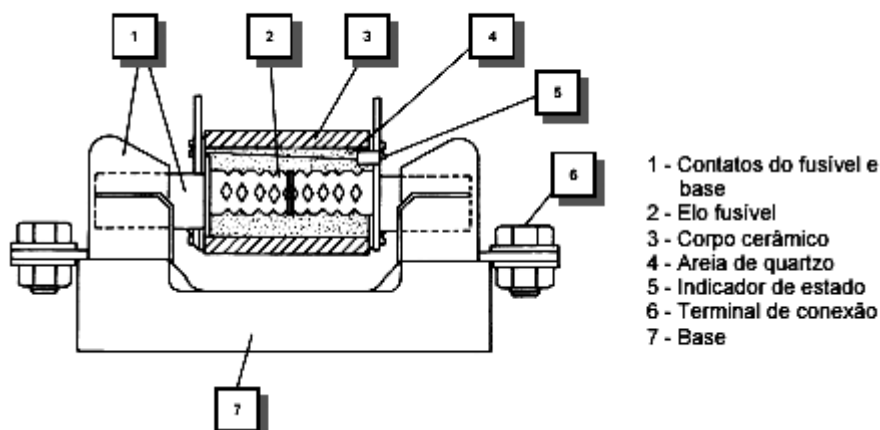
Ainda quanto ao material com que é fabricado o elemento fusível, segue os detalhes:

• **O elemento fusível**, para desempenhar sua ação de interrupção de acordo com uma característica de fusão tempo x corrente perfeitamente definida, como demonstrada nesse item, **deve ser fabricado de um metal que permita a sua calibragem com alta precisão**. Para tanto, o metal deve ser **homogêneo, de elevada pureza e de dureza apropriada** ( materiais moles não permitem essa calibragem). A **melhor solução** encontrada, na área de fusíveis de potência, foi a usando-se **o cobre**.

#### Fusíveis Diazed.



#### Fusíveis NH.



- Tem que ser definido o **ponto** sobre o elemento fusível, no qual o arco elétrico se estabelece. Isso porque, como aparece uma temperatura no arco da ordem de ou até superior a 5 000°C, **esse arco não pode se formar nas extremidades do elemento fusível**, pois nesse caso, estaria também fundido os fechos metálicos do fusível, como o que teríamos um ARCO EXPOSTO AO AMBIENTE, com grande risco de incêndio no local ou a da explosão do fusível. Portanto, o arco precisa se formar **a meia distância do comprimento do elo**, para o que esse elemento fusível precisa ter, nessa posição, UMA REDUÇÃO DE SEÇÃO.

- O elemento fusível precisa vir envolto por um meio extintor ( geralmente areia de quartzo com uma granulometria perfeitamente definida ), que, sendo isolante elétrico, rapidamente extingue o arco formado.

3. **Corpo cerâmico.** O corpo cerâmico envolve todas as partes internas do fusível. Como tal fica sujeito ao aquecimento que ocorre no instante da fusão.

Vale lembrar, nesse particular, que, também devido ao destacado, um corpo envolvente com essa finalidade, precisa ter as seguintes características:

- O material usado deve ser isolante, e **permanecer isolante após a fusão do elemento fusível**. Não cumprindo essa condição, pode-se formar um novo circuito condutor de corrente, após a fusão do elemento fusível, através do corpo envolvente.

- O material deve suportar elevadas temperaturas, sem se alterar. Destaque-se que certos materiais são isolantes à temperatura ambiente mas perdem essa propriedade por carbonização, perante as temperaturas citadas, tornando-se condutoras.

- O material deve suportar bem as pressões de dentro para fora, que aparecem no ato da fusão do elemento fusível. E da dilatação do meio extintor e de gases internos.

Solução para esse caso, é o uso de **cerâmicas isolantes do tipo porcelana ou esteatita**, essas últimas sendo porcelanas modificadas, com melhores características mecânicas.

#### 4. **Meio extintor.**

Conforme já mencionado, esse material também deve ser isolante , interpondo-se automaticamente, por peso próprio, quando da fusão do metal do elemento fusível. A garantia dessa intercalação é acentuadamente função da granulometria da areia usada, normalmente de quartzo.

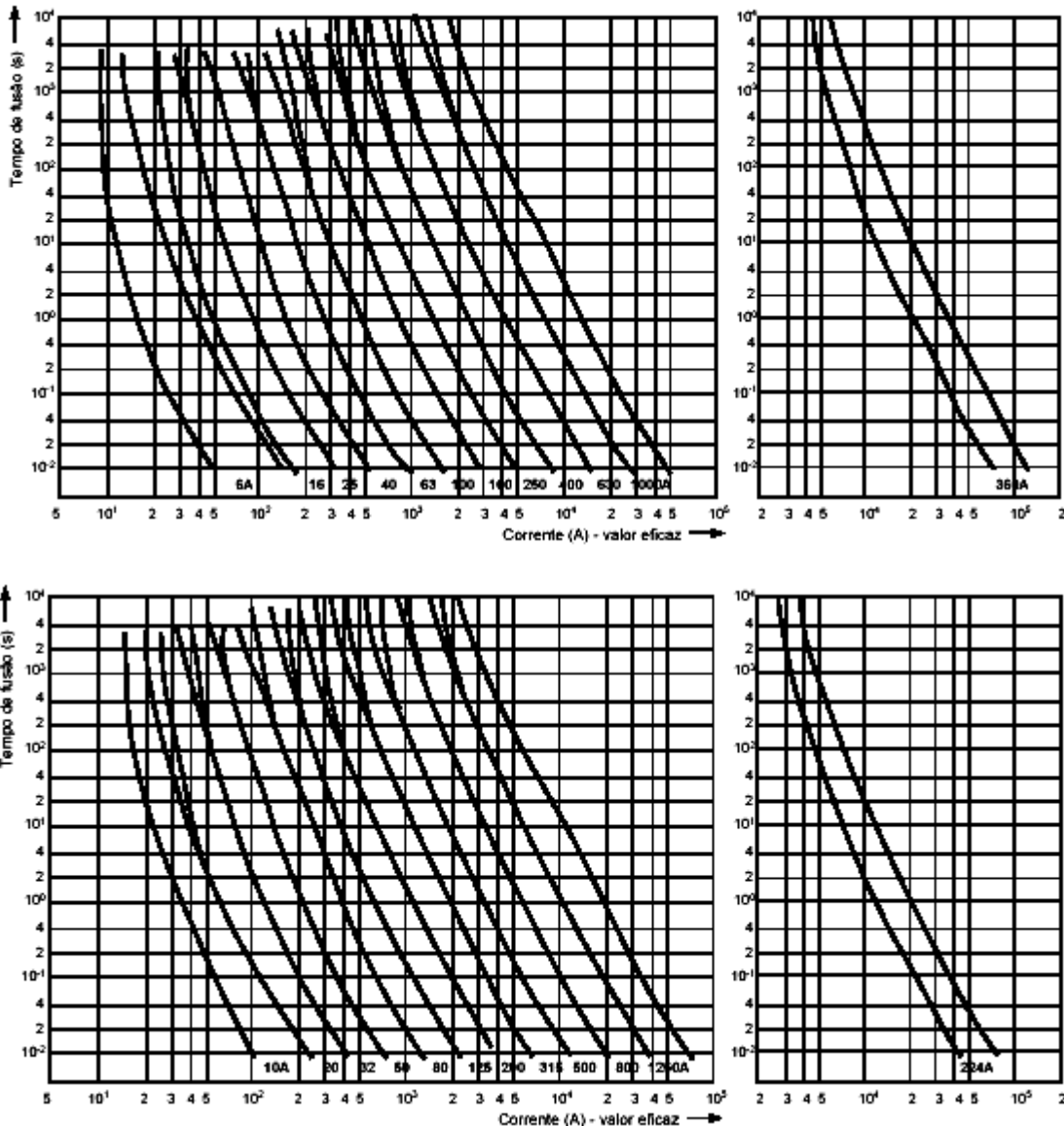
Na página seguinte vem a demonstração de como fica o elemento fusível após a interrupção, notando-se o seu envolvimento e separação entre as partes fundidas por areia de quartzo.

#### 5. **Indicador de estado.**

No fusível encapsulado existe uma aparente dificuldade em se verificar se o mesmo está perfeito ou “queimado”, devido ao invólucro ou encapsulamento. Essa dificuldade é eliminada pela verificação do posicionamento do indicador de fusão, representado no desenho, mostrado na página anterior.

**Quando o indicador de fusão está retraído na sua posição de montagem, o fusível está perfeito: quando está saliente ( no caso do NH ), ou ejetado ( no caso do Diazed ), o fusível está “queimado”, e precisa ser substituído.**

## Zonas tempo-corrente.

**Corrente Assimétrica Máxima de Curto-circuito.**

Valor de crista atingido pela corrente do enrolamento primário ( onde ocorreu o curto-circuito ) no decorrer do primeiro ciclo imediatamente após o enrolamento ter sido subitamente curto-circuitado quando as condições forem tais que o valor inicial do componente aperiódico da corrente, se houver, será máximo.

O exemplo de aplicação dado nessa última página demonstra como usar essas curvas, enquanto que , para as da página 4, podemos fazer as seguintes observações :

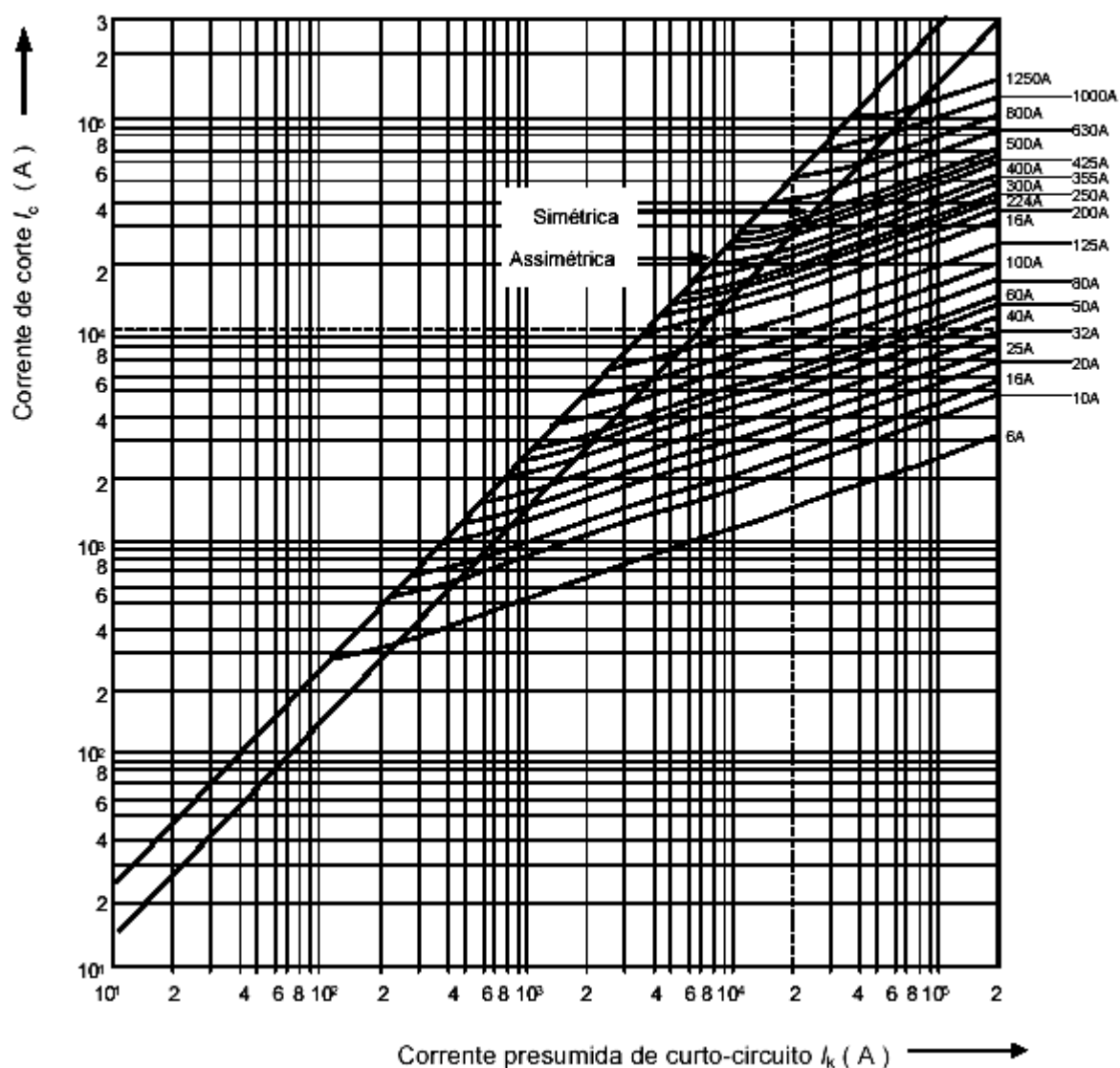
- **A corrente nominal nunca deve ser interrompida pelo fusível;**
- A evolução tempo x corrente dessas curvas depende do **tipo de carga ligada**, pois sabemos que cargas indutivas tem correntes iniciais maiores na partida, **que não devem ser desligadas pelo fusível**. Nesse sentido, **para os mesmos valores nominais**, são fornecidos fusíveis retardados ( para cargas motoras ), rápidos ( para cargas resistivas ) e ultra-rápidos ( para semicondutores ).

Esse fato leva a necessidade de, na escolha do fusível, não se basear apenas na corrente nominal e na tensão nominal, mas também no **tipo de carga a ser protegido**: a escolha errada ou a não consideração desse

último aspecto vai levar a **desligamentos/queimas fora das condições** previstas para a interrupção do circuito.

Finalmente, deve-se ressaltar que fusíveis encapsulados se caracterizam por uma elevadíssima capacidade de interrupção, que freqüentemente ultrapassa os 100 kA, sendo até, nesse aspecto, muitas vezes superior a apresentada pelos disjuntores, que analisaremos mais adiante.

#### Limitação da corrente.



#### RELÉS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA.

As sobrecargas são originadas por uma das seguintes causas:

- Rotor bloqueado;
- Elevada freqüência de manobra;
- Partida difícil (prolongada);
- Sobrecarga em regime de operação;
- Falta de fase;
- Desvio de tensão e de freqüência.

**Conceito de sobrecarga.**

A sobrecarga é uma situação que leva a um sobreaquecimento por perda joule, que os materiais utilizados somente suportam até um determinado valor e por tempo limitado. A determinação de ambas as grandezas é feita em Norma Técnica do referido produto. Assim, por exemplo, para condutores próprios até 6 kV e isolados em PVC, a Especificação Técnica é a norma NBR 7288, que, entre outros define:

- Temperatura permanentemente admissível no isolante: 70°C
- Temperatura admissível perante sobrecarga: 100°C
- Tempo admissível de sobrecarga: 100 horas /ano

Ultrapassados esses valores, a capa isolante de PVC vai se deteriorar, o que significa, perder suas características iniciais, e entre outros, sua rigidez dielétrica, que define a capacidade de isolamento.

**Portanto, a função do relé de sobrecarga é a de atuar antes que esses limites de deterioração sejam atingidos, garantindo uma VIDA ÚTIL apropriada aos componentes do circuito.**

Basicamente são dois os tipos de relés de sobrecarga encontrados: o relé bimetálico e o relé eletrônico, esse último em mais de uma versão. Vejamos detalhes de cada um.

- **O relé de sobrecarga bimetálico.**

Esse relé tem um sensor bimetálico por fase, sobre o qual age o aquecimento resultante da perda joule, presente numa espiral pela qual passa a corrente de carga e que envolve a lâmina bimetálica, que é o sensor. Essa, ao se aquecer, se dilata, resultando daí a atuação de desligamento do acionamento eletromagnético do contator ou o disparo do disjuntor, em ambos os casos abrindo o circuito principal e desligando a carga que, por hipótese, está operando em sobrecarga.

**Portanto, esse relé controla o aquecimento que o componente/equipamento do circuito está sofrendo devido a circulação da corrente elétrica.**

**Sobreaquecimentos de outras origens NÃO SÃO NECESSARIAMENTE registradas por esse relé, e que podem igualmente danificar ou até destruir o componente.**

**Funcionamento.**

- Passando corrente pela espiral envolvente ( ACOMPANHE NA ILUSTRAÇÃO DE PRINCÍPIO CONSTRUTIVO DA PÁGINA SEGUINTE ), o sensor, que é formado por dois metais ( por isso “bimetálico“ ), começa a se dilatar ( veja 6 ).

Na escolha dos dois metais que compõe o sensor, opta-se por metais que tenham diferentes “coeficientes de dilatação linear“ ( por exemplo níquel e ferro ), sendo feita uma solda molecular entre as duas lâminas.

Como, perante o aquecimento da corrente, a **dilatação de cada lâmina** não pode se dar livremente por estarem soldadas, a de maior coeficiente de dilatação se curvará sobre a de menor valor, com o que se desloca o cursor de arraste do relé (veja 5 ) e se desligará o contato (veja 2 ) ou se destravarão as molas de abertura do disjuntor.

Com essa atuação interrompe-se o circuito principal do componente em sobrecarga.

- Observe que, quanto maior a corrente, maior é o sobreaquecimento que acontece, e mais rápido tem que ser o desligamento, para não haver dano dos equipamentos em sobrecarga. **Portanto, a relação dos valores de tempo e corrente sempre precisa ter uma variação inversamente proporcional.**

- Observe também que as sobrecorrentes analisadas na fase de partida /arranque do motor, não devem ser “ entendidas “ pelo relé como sendo “sobrecargas “ que devam levar a um desligamento: **essas, fazem parte do processo normal de partida.**

- Ainda, como existem cargas que apresentam a citada sobrecorrente na fase inicial, e outras cargas não, há necessidade de relés com maior ou menor rapidez de atuação, semelhantemente ao que acontece com os fusíveis. Portanto, na escolha do relé adequado, **também o tipo de carga é um dado essencial a uma correta escolha.**

Se a curva representada não atende às necessidades do circuito, é preciso escolher um outro relé, com curva característica mais adequada à carga que desejamos proteger.

- As curvas características tempo de disparo x múltiplo da corrente de desligamento, da página 161, demonstram claramente algumas das afirmações anteriores. Acrescente-se que como as instalações são

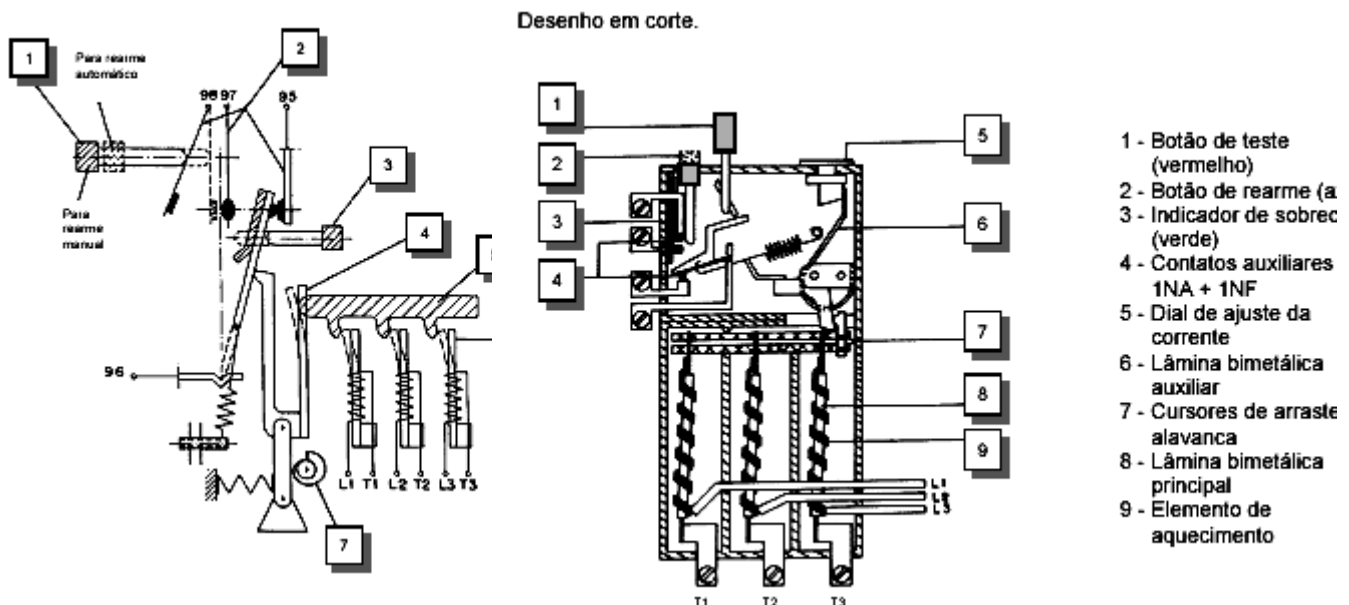
geralmente trifásicas, os relés também o são. A curva 1 se aplica no caso mais comum, que é o de carga trifásica. Porém, esses relés também atuam no caso da falta de uma fase ( operação bifásica ), seguindo nesse caso a curva 2.

• Mais um detalhe deve ser lembrado, comparando-se os tempos de disparo obtidos pelas curvas. Quando o ensaio de determinação das curvas características é feito, segundo as normas, a sua evolução é medida partindo-se do relé em “estado frio”, ou seja, anteriormente desligado.

Essa na verdade **não é a situação normal de uso**.

O relé está inserido em um circuito pelo qual está circulando a corrente nominal, e, num dado instante, ocorre a sobrecarga. Como o relé já sofreu um pré-aquecimento devido a corrente nominal, a qual no entanto não deve levá-lo a atuar ( a corrente nominal não deve levar ao desligamento pelo relé, pois não é uma corrente anormal que deva ser desligada), mas que já deformou de um certo valor o sensor bimetálico, o tempo real de atuação será **necessariamente menor do que o obtido de uma curva cujo ensaio partiu do estado frio**. Essa redução do tempo de atuação, ( que, lembramos, deve ser menor do que o tempo permitido por norma para essa situação ), não pode ser expresso precisamente em porcentagem da corrente lida no gráfico, pois os regimes que antecedem a uma sobrecarga podem ser extremamente variáveis e diferentes.

#### Relé de sobrecarga bimetálico. Princípio construtivo.



Entretanto, o certo é que o tempo real é menor do que o lido no gráfico. Os fabricantes, de modo geral, consideram **muito próximo da realidade, um tempo real de desligamento igual a 25% do tempo lido no gráfico** representado nos catálogos. **Atuação do relé bimetálico perante falta de fase.** A “falta de fase” é uma situação em que uma das três fases na carga trifásica ( um motor trifásico por exemplo ), é interrompida. Nesse caso, como isso eleva a corrente nas fases que permanecem, caracteriza-se uma “situação de sobrecarga”, que o relé é capaz de desligar. As respectivas curvas características estão representadas no gráfico da página anterior. A curva de falta de fase tem atuação mais rápida que a da carga trifásica equilibrada, porque a falta de fase gera uma sobrecarga de grandeza inferior ao aumento da carga nas fases que ficam.

A seqüência de atuação dos contatos do relé é dada na ilustração da página seguinte.

#### O relé de sobrecarga eletrônico.

Conforme visto anteriormente, o relé de sobrecarga bimetálico opera perante os efeitos térmicos da corrente. Existem, porém, situações em que ocorrem sobreaquecimentos que não são consequência de um

excesso de corrente, e que do mesmo modo, podem destruir uma carga. É o que acontece, por exemplo, quando as aberturas dos radiadores de calor de um motor entopem, com o que a troca de calor diminui sensivelmente, e o sobreaquecimento daí resultante não é registrado pelo relé de sobrecarga bimetálico.

Na verdade, o que se precisa não é **controlar corrente**, e sim **temperatura**, seja ela de que origem for. Para atender a essa condição, usa-se um relé de sobrecarga eletrônico que permite adicionalmente sensoriar a temperatura, no ponto mais quente da máquina, através de um semicondutor, chamado de termistor, que por sua vez ativa um relé de sobrecarga, dito **eletrônico**. Esse relé se caracteriza por:

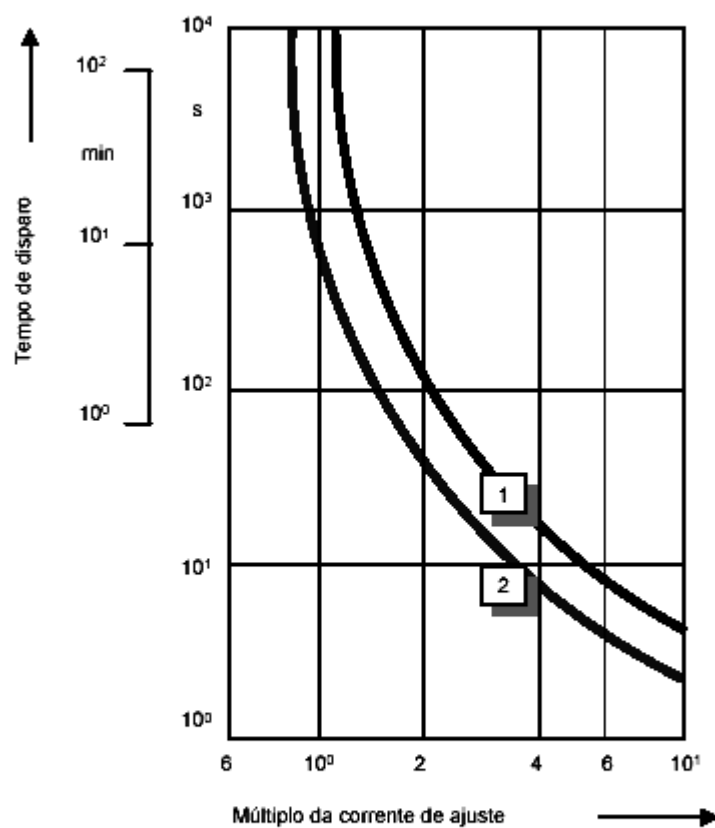
- Uma supervisão da temperatura, mesmo nas condições mais críticas:
- Uma característica de operação que permite ajustar as curvas características tempo de disparo x corrente de desligamento, de acordo com as condições de tempo de partida da carga.
- Perante rotor bloqueado, como a corrente circulante rapidamente se aproxima dos valores críticos para um sobreaquecimento, o controle pela corrente é mais rápido do que pelo termistor.

Na verdade, esse é um dos tipos de **relé de sobrecarga eletrônico**. As funções de proteção dessa família de relés são ampliadas, incluindo supervisão de termistores com interface incorporada e detetor de corrente de fuga.

De um modo geral, porém, devido ao aspecto econômico, os do tipo bimetálico são mais utilizados em baixas potências de carga, enquanto o eletrônico é usado nos demais casos, bem menos freqüentes, conforme podemos observar.

Refletindo a comparação entre os dois tipos, a ilustração da página 37 demonstra bem o que foi justificado tecnicamente acima.

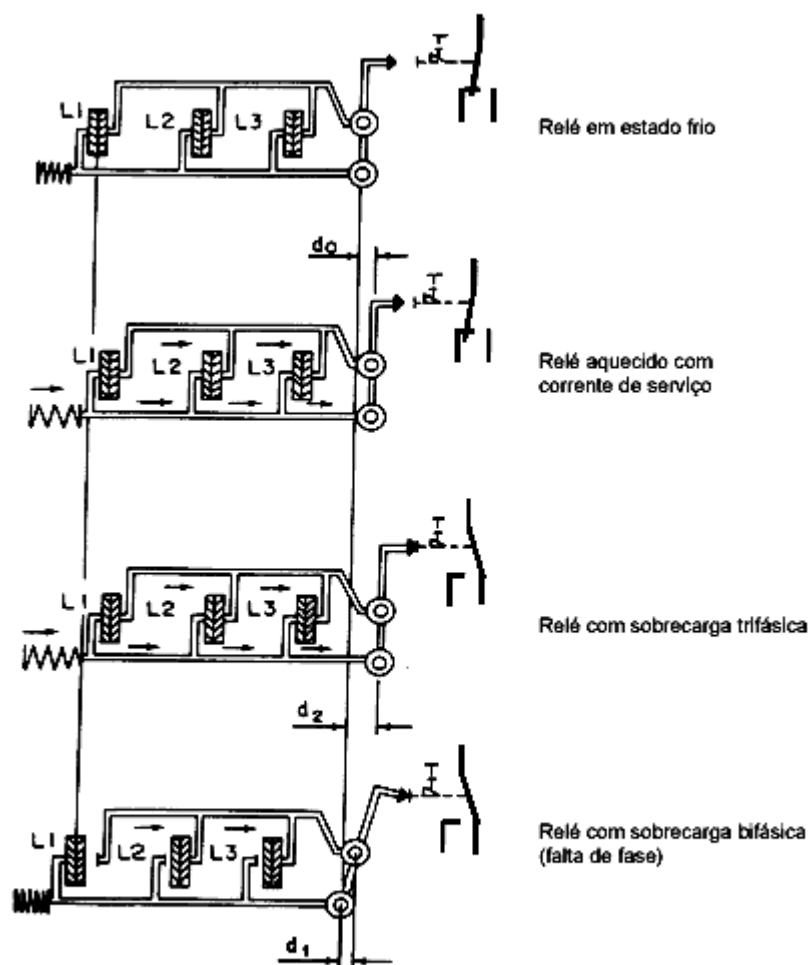
**Relé de sobrecarga bimetalício com sensibilidade à falta de fase.**  
Curvas características típicas de disparo.



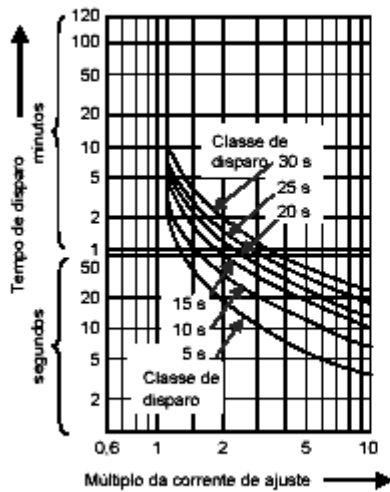
1 - Carga trifásica equilibrada

2 - Carga bifásica ( falta de fase de uma fase )

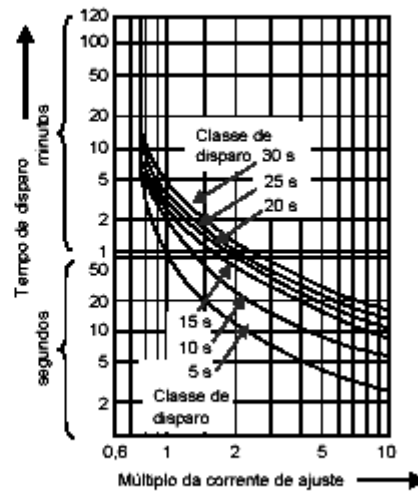
Atuação de um relé de sobrecarga com sensibilidade à falta de fase.



## Curvas características de disparo

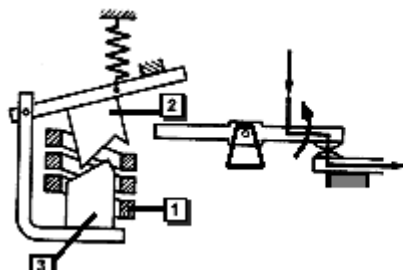


Carga trifásica



Carga bifásica ( falta de uma fase )

## RELÉS DE SOBRECORRENTE CONTRA CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.



Relé de sobrecarga eletrônico 3RB12.

- 1 - Bobina eletromagnética de curto-circuito
- 2 - Núcleo móvel e mecanismo de atuação
- 3 - Base e núcleo fixo

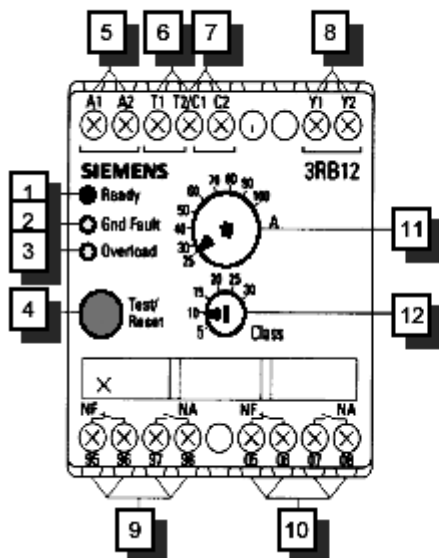
Esses relés são do tipo eletromagnético, com uma atuação instantânea, e se compõem com os relés de sobrecarga para criar a proteção total dos componentes do circuito contra a ação prejudicial das correntes de curto-circuito e de sobrecarga, respectivamente.

A sua construção é relativamente simples em comparação com a dos relés de sobrecarga (bimetálicos ou eletrônicos), podendo ser esquematizado, como segue:

A bobina eletromagnética do relé é ligada em série com os demais componentes do circuito. Sua atuação apenas se dá quando por esse circuito passa a corrente  $I_k$ , permanecendo inativo perante as correntes nominais ( $I_n$ ) e de sobrecarga ( $I_r$ ).

Pelo que se nota, a sua

função é idêntica à do fusível, com a diferença de que o fusível queima ao atuar, e o relé permite um determinado número de manobras.



- 1 - Sinalização pronto para operar (LED verde)
- 2 - Sinalização disparo por corrente de fuga (LED vermelho)
- 3 - Sinalização disparo por sobrecarga ou pelos termistores (LED vermelho)
- 4 - Rearme e teste
- 5 - Ligação para tensão de comando
- 6 - Ligação para os termistores
- 7 - Ligação para corrente de fuga pelo transformador de corrente 3UL22
- 8 - Ligação para rearme à distância ou automático
- 9 - Contatos auxiliares 1NA + 1NF para sobrecarga ou termistores
- 10 - Contatos auxiliares 1NA + 1NF para corrente de fuga
- 11 - Ajuste de corrente
- 12 - Ajuste de classe de disparo

Por outro lado, como o relé atua sobre o mecanismo do disjuntor, abrindo-o perante uma corrente  $I_k$ , a capacidade de interrupção depende do disjuntor, enquanto que, usando fusível em série com o disjuntor, essa capacidade de interrupção depende do fusível.

### DISPOSITIVOS DE MANOBRA.

Preliminarmente vamos destacar que a Terminologia da ABNT aboliu, totalmente o termo “chave” para caracterizar genericamente todos os dispositivos de manobra.

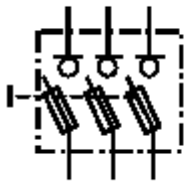
Por definição do Dicionário Brasileiro de Eletricidade ( ABNT ), temos:

**Dispositivo de manobra** - Dispositivo elétrico destinado a estabelecer ou interromper corrente, em um ou mais circuitos elétricos.

### SECCIONADOR-FUSÍVEL SOB CARGA.

O seccionador-fusível é uma combinação de um seccionador, caracterizado pela simplicidade de sua construção, com a dos fusíveis, que se localizam na posição dos contatos moveis do seccionador.

Pela sua construção simples, são capazes de manobrar até carga nominal, é a proteção de correntes de curto-circuito, pela presença dos fusíveis.



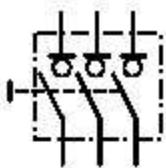
3NP4



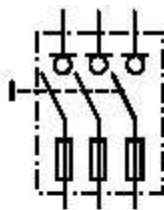
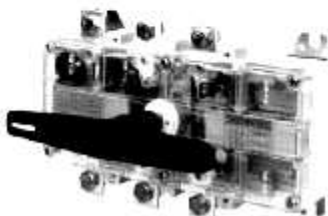
Sua representação gráfica e construtiva :

### SECCIONADOR.

No item Terminologia, vimos que o seccionador é por definição um dispositivo de manobra que tem uma capacidade de interrupção limitada. Tal fato é a consequência de uma construção elementar, que faz com que o dispositivo em análise tenha uma aplicação restrita.



Representação construtiva  
S32



S37



Porém, para pequenas cargas, como é o caso de oficinas e determinadas condições de operação dentro de um sistema elétrico, há por vezes necessidade de um dispositivo que opere EVENTUALMENTE cargas de pequeno valor. Para esses casos, é possível utilizar o seccionador sob carga, que não é mais do que um seccionador convencional, com uma estrutura de contatos e câmaras de extinção, de características também limitadas a tais usos.

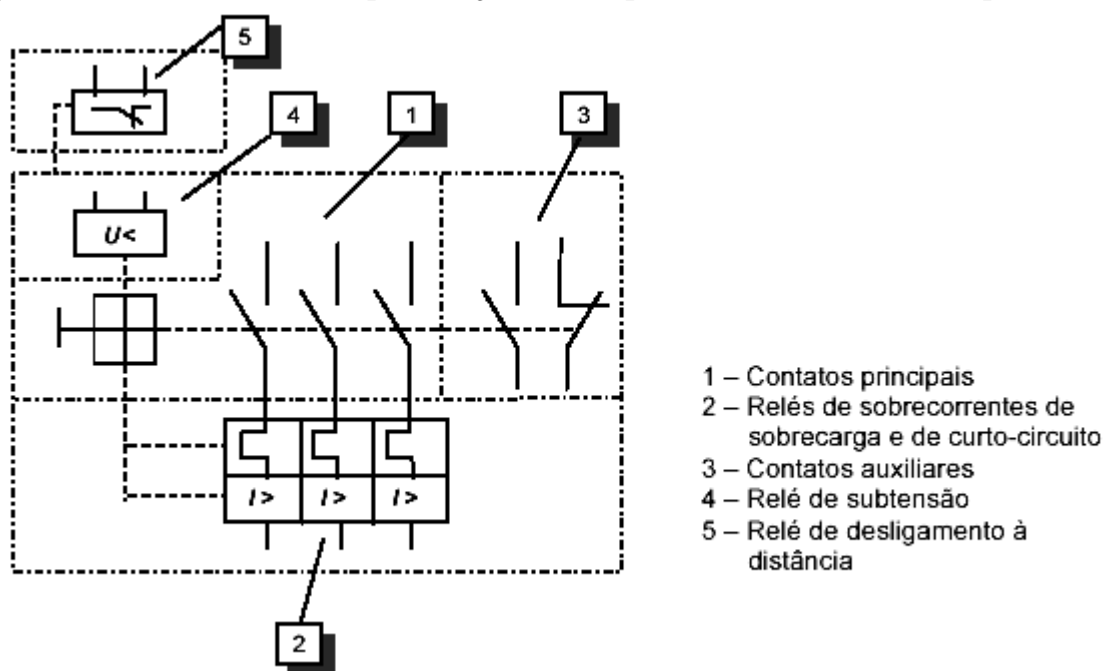
Representação gráfica

**DISJUNTORES.**

Lembrando a definição, o disjuntor é um dispositivo que, entre outros, é capaz de manobrar o circuito nas condições mais críticas de funcionamento, que são as condições de curto-circuito. Ressalte-se que apenas o disjuntor é capaz de manobrar o circuito nessas condições, sendo que, interromper  $I_k$  é ainda atributo dos fusíveis, que porém não permitem uma religação.

A manobra através de um disjuntor é feita **manualmente** ( geralmente por meio de uma alavanca ) ou pela ação de seus relés de sobrecarga ( como bimetálico ) e de curto-circuito ( como eletromagnético ). Observe-se nesse ponto que **os relés não desligam o circuito**: eles apenas induzem ao desligamento, atuando sobre o mecanismo de molas, que aciona os contatos principais. Conforme pode ser visto na representação abaixo, cada fase do disjuntor tem **em série**, as peças de contato e os dois relés.

É válido mencionar que para disjuntor de elevadas correntes nominais, os relés de sobrecorrentes são constituídos por transformadores de corrente e módulo eletrônico que irá realizar a atuação do disjuntor por correntes de sobrecargas, correntes de curto-circuito com disparo temporizado e instantâneo e até disparo por corrente de falha à terra. **Representação dos componentes de um disjuntor tripolar.**



- 1 – Contatos principais
- 2 – Relés de sobrecorrentes de sobrecarga e de curto-circuito
- 3 – Contatos auxiliares
- 4 – Relé de subtensão
- 5 – Relé de desligamento à distância

Para operar nessas condições, o disjuntor precisa ser caracterizado, além dos valores nominais de tensão, corrente e frequência, ainda pela sua capacidade de interrupção, já definida e pelas demais indicações de temperatura e altitude segundo a respectiva norma, e agrupamento de disjuntores, segundo informações do fabricante, e outros, que podem influir no seu dimensionamento.

Nos dados técnicos citados quando da definição da capacidade de interrupção, citam-se como referências:

- $I_{cn}$  ..... Corrente de curto-circuito nominal.
- $I_{cu}$  ..... Corrente limite que pode causar danos e impedir que o disjuntor possa continuar operando. Seu ciclo de operação é O-t-CO.
- $I_{cs}$  ..... Corrente que permitirá religamento do disjuntor e este continuar operando. Seu ciclo é O-t-CO-t-CO.

Entre esses valores estabelece-se a relação :  $I_{cu} / I_{cs} > I_k$  .

Os **valores nominais** do disjuntor são gravados externamente na sua carcaça, seja em alto-relêvo, seja na forma de uma placa. Esses valores são obtidos segundo as normas de ensaio que se aplicam ao dispositivo, na forma individual, ou seja, é ensaiado uma unidade de disjuntor, seja unipolar ou multipolar, perante condições de temperatura e altitude estabelecidas nessa norma.

Observe-se com isso que, se, na instalação, não tivermos as **mesmas condições de temperatura e de altitude**, e se na instalação tivermos um **agrupamento de disjuntores**, um encostado no outro ( como costuma acontecer com os minidisjuntores ), com o que as condições interna de temperatura se tornarão mais críticas, é necessário restabelecer, por meio de um sistema de troca de calor adequado, as condições de referência citadas em norma.

Por outro lado, os disjuntores são normalmente dotados dos relés de sobrecarga e de curto-circuito, cada um tendo a sua curva característica, que devem ser adequadamente coordenadas entre si. Seguem-se alguns exemplos de disjuntores e suas curvas características, observando-se que:

- As curvas características relacionam o tempo de disparo ( s ) x corrente de desligamento ( A ). Nessas curvas ( veja página seguinte ), observa-se que:

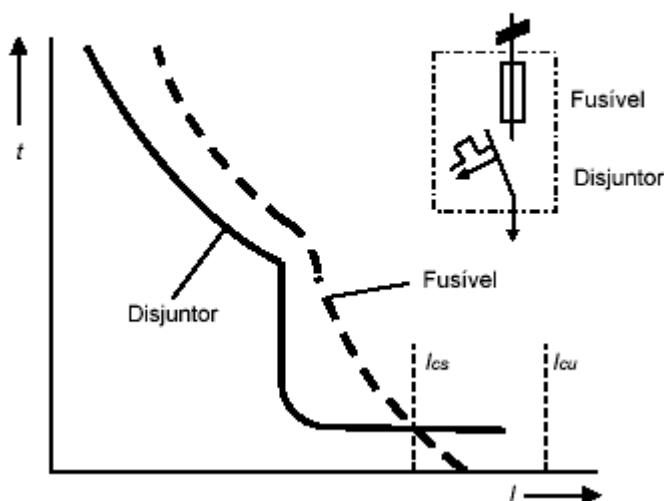
1. A vertical levantada pelo valor da corrente nominal não pode interceptar nenhuma curva característica
2. Partindo do valor nominal (  $I_n$  ) até em torno de  $10 \times I_n$ , temos a faixa de sobrecarga cuja curva é a do relé de sobrecarga utilizado. A partir daí, temos a situação de curto-circuito, e que também está relacionado com a capacidade de interrupção que o disjuntor precisa possuir, e que resulta da curva característica do relé de curto-circuito.

3. Eventualmente, podemos ter o caso em que se **associam** as características de capacidade de interrupção **do disjuntor** com a **do fusível**. Vimos, no item respectivo, que os fusíveis apresentam uma elevadíssima capacidade de interrupção. Assim, para não onerar a instalação com um disjuntor de elevada capacidade de interrupção, tem-se a alternativa de associar em série com o disjuntor básico e um fusível adequado, e então teríamos:

- Os valores normais de corrente de curto-circuito são controlados pelo relé de curto-circuito, que atua sobre o mecanismo de molas do disjuntor, o qual interrompe correntes de média intensidade; para valores mais elevados, quem atuará será o fusível.

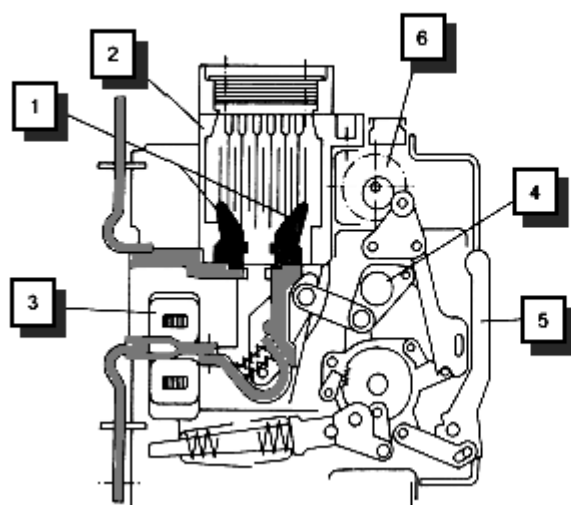
- Para que esse fato ocorra, é necessário que as três curvas de desligamento, ou seja, as duas dos relés do disjuntor e a do fusível, sejam coordenadas adequadamente entre si, como representa a figura que segue.

Curvas características de fusível e disjuntor em série



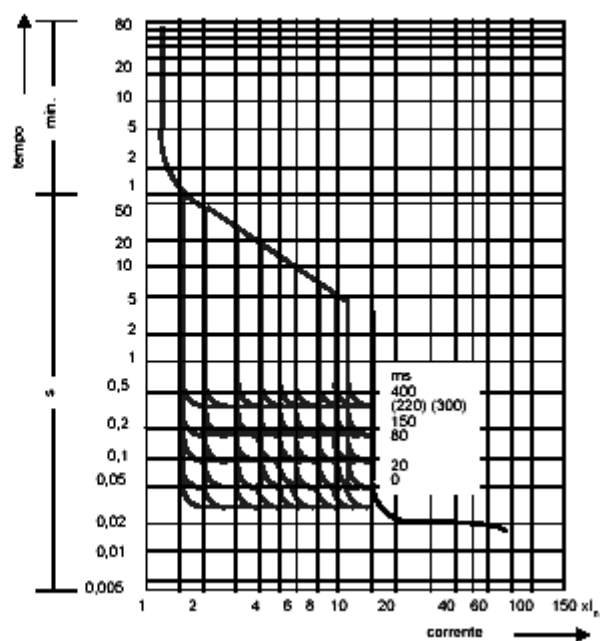
Diversos são os tipos de disjuntores de baixa tensão utilizados. Citaremos alguns tipos, com suas respectivas curvas características.

**Disjuntor para manobra e proteção do sistema 3WN.**  
Construção.



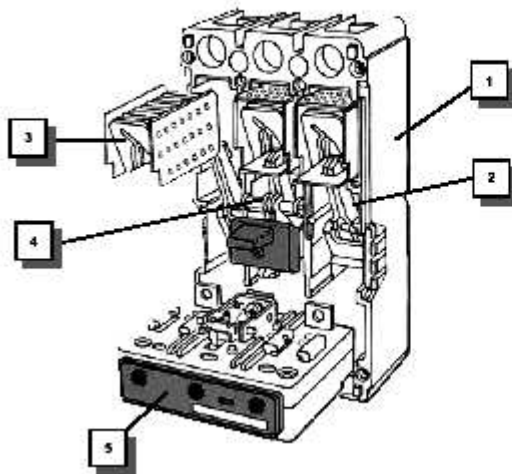
- 1 - Contatos principais
- 2 - Câmara de extinção
- 3 - Transformador de corrente dos disparadores de proteção
- 4 - Mecanismo de acionamento
- 5 - Manopla de acionamento
- 6 - Acionamento motorizado

**Disjuntor para manobra e proteção de sistema 3WN.**  
Curvas características



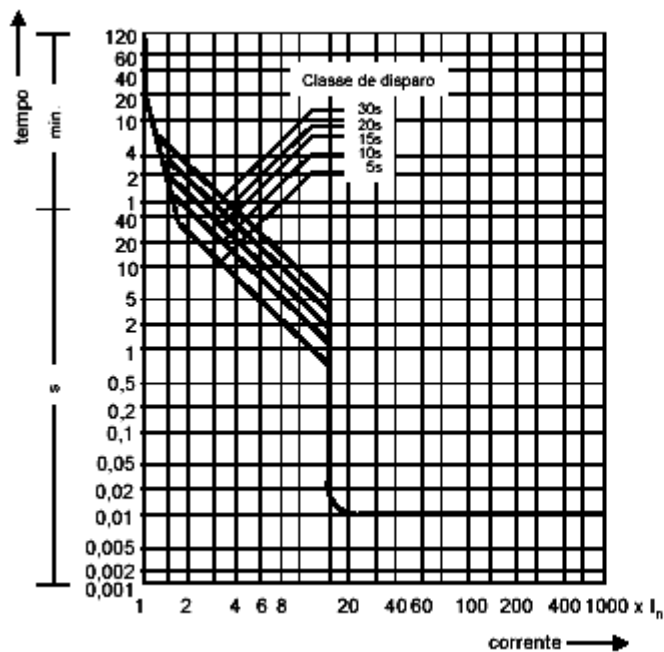
## Disjuntor para manobra e proteção de motores 3VL.

### Construção



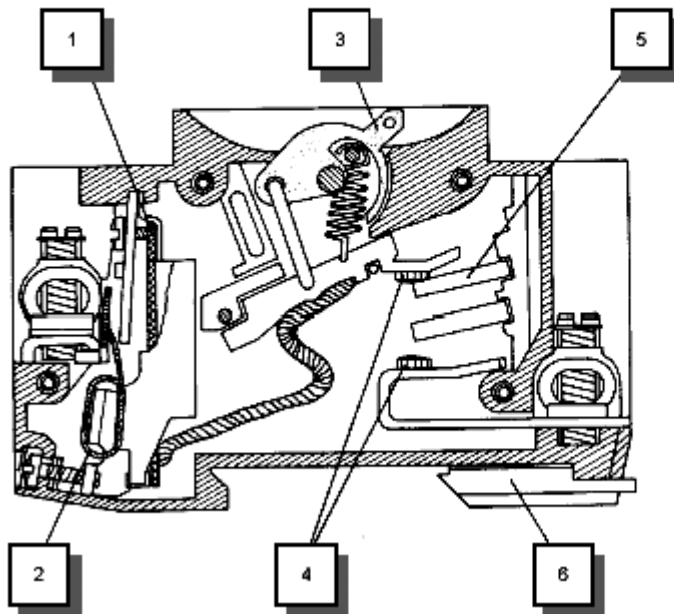
- 1 - Caixa moldada
- 2 - Contatos
- 3 - Câmara de extinção
- 4 - Mecanismo de disparo e manobra
- 5 - Relés / disparadores de proteção para sobrecarga e curto-circuito

### Curvas características.



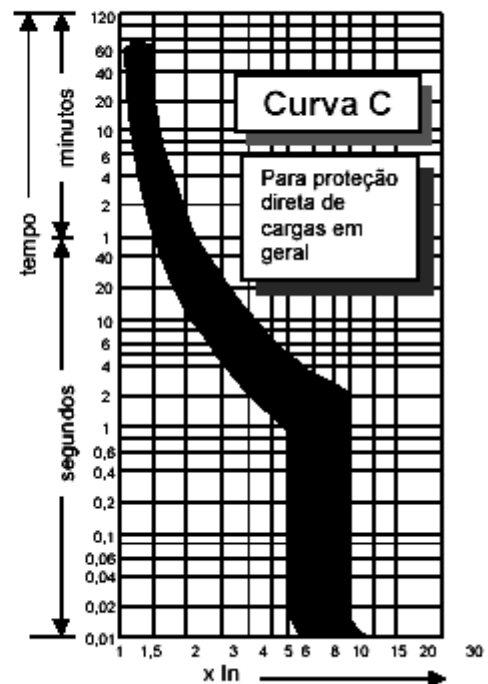
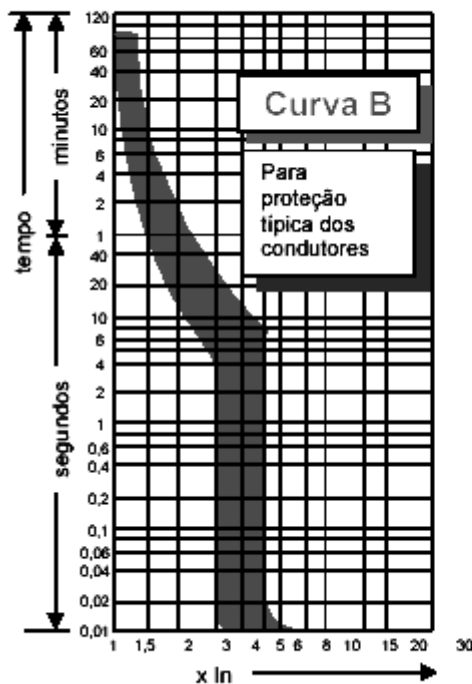
- Atendem as correntes de "inrush" (10-20ms)
- Disparo de curto-circuito em  $15 \cdot I_n$
- Proteção de falta de fase
- Ajuste da classe de disparo na partida
- Memória térmica

### Minidisjuntores para manobra e proteção 5SX. Construção



- 1 - Lâmina bimetálica de sobrecarga
- 2 - Bobina eletromagnética de curto-circuito
- 3 - Manopla de acionamento
- 4 - Contatos
- 5 - Câmara de extinção
- 6 - Fixação rápida por engate sobre trilho

### Curvas características



Obedecem as normas – IEC 60 947-2 e IEC 60 898

**CARACTERÍSTICAS COMPARATIVAS FUSÍVEL-DISJUNTOR.**

Disjuntor e fusível exercem basicamente a mesma função: **ambos tem como maior e mais difícil tarefa, interromper a circulação da corrente de curto-circuito**, mediante a extinção do arco que se forma. Esse arco se estabelece entre as peças de contato do disjuntor ou entre as extremidades internas do elemento fusível. Em ambos os casos, a elevada temperatura que se faz presente leva a uma situação de risco que podemos assim caracterizar:

- A corrente de curto-circuito ( $I_k$ ) é a mais elevada das correntes que pode vir a circular no circuito, e como é bem superior à corrente nominal, só pode ser mantida por um tempo muito curto, sob pena de danificar ou mesmo destruir componentes de um circuito. Portanto, o seu tempo de desligamento deve ser extremamente curto.
- Essa corrente tem influência tanto térmica (perda joule) quanto eletrodinâmica, pelas forças de repulsão que se originam quando essa corrente circula entre condutores dispostos em paralelo, sendo por isso mesmo, fator de dimensionamento da seção condutora de cabos.
- O seu valor é calculado em função das condições de impedância do sistema, e é por isso variável nos diversos pontos de um circuito. De qualquer modo, representa em diversos casos até algumas dezenas de quilo-ampéres que precisam ser manobrados, seja pela atuação de um fusível, seja pelo disparo por um relé de curto-circuito que ativa o mecanismo de abertura dos contatos do disjuntor.
- Entretanto, existem algumas vantagens no uso do fusível, e outras usando disjuntor.

Vejamos a tabela comparativa, perante a corrente de curto-circuito  $I_k$ .

**Características para desempenho no curto-circuito.**

Fusível	Disjuntor
• Dispensa cálculo fino da corrente de curto-circuito	• Necessita de cálculo fino da corrente de curto-circuito
• Alta capacidade de interrupção	• Capacidade de interrupção variadas
• Elevada limitação	• Limitação em alta capacidade de interrupção
• Otimização do tempo de interrupção	• Tempo de interrupção variado
• Disponibilidade fácil	• Disponibilidade com restrições
• Baixo custo	• Custo variado

A confiabilidade de operação do fusível ou disjuntor é assegurada pela conformidade das normas vigentes e referências do fabricante

Também quanto as condições de operação e controle, podemos traçar um paralelo entre disjuntor e fusível, como segue:

## Características de operação e controle

	Fusível	Disjuntor
• Religamento após anomalias - Sobrecarga - Curto-circuito	- Não - Não	- Sim - Sim, com restrições (estado dos contatos)
• Desligamento total da rede por anomalias	Sim, com restrições (com supervisor de fusíveis)	Sim
• Manobra manual segura	Sim, com restrições (com seccionador-fusível)	Sim
• Comando remoto	Não	Sim
• Identificação da condição de uso	Sim, com restrições (evolução da temperatura)	Não, com restrições (registro de eventos, evolução de temperatura)
• Sinalização remota	Sim, com restrições (supervisor de fusíveis)	Sim
• Ocasional parada do trabalho	Sim	Não, com restrições (estado dos contatos)
• Seletividade	Sim, simples	Sim, onerosa
• Intertravamento	Sim, com restrições (com seccionador com porta-fusível)	Sim
• Intercambialidade	Sim, são normalizados	Não
• Requer manutenção	Não, com restrições (acompanhar evolução da temperatura)	Não, com restrições (registro de eventos, evolução da temperatura)

1º Exemplo.

**Coordenação de curvas características de proteção , levando em consideração a curva de destruição de componentes.**

Vimos que cada componente suporta condições anormais por um tempo limitado.

Vimos também que as curvas características dos dispositivos de proteção tem que ser coordenadas para atuarem corretamente nas faixas de sobrecarga e de curto-circuito. Portanto, tem-se condições de representar graficamente esses parâmetros, com a devida coordenação entre as curvas mencionadas.

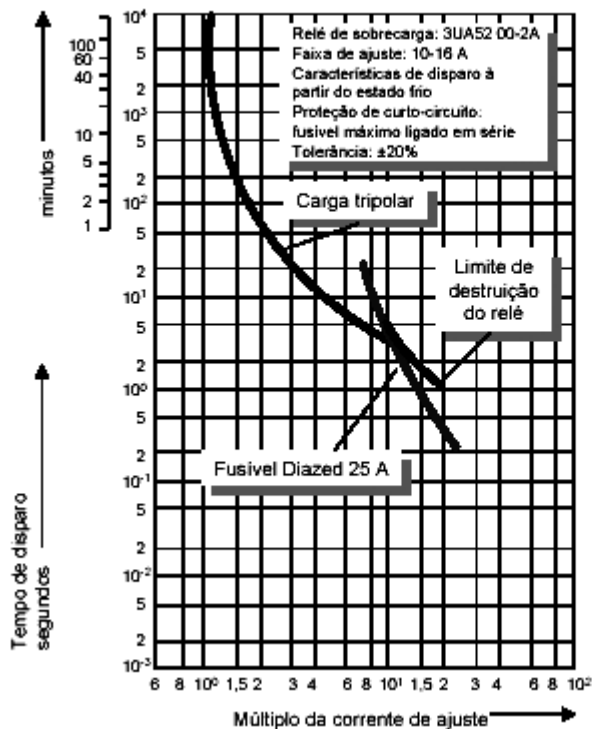
**Como cada componente é definido em norma, tem-se uma série de CURVAS.**

Algumas dessas curvas são mais críticas do que outras, e por isso, o fabricante destaca àquelas mais críticas e as representa, **combinada com a dos dispositivos de proteção que devem evitar sua danificação , como indicado abaixo.**

No caso, vem representada a curva - limite de destruição ( também chamada de curva de dano ) do relé de sobrecarga bimetálico, e a curva do dispositivo de proteção ( no caso fusíveis ) que está em condições de

protege-lo. Destaque-se que a escolha correta leva as curvas QUE NÃO SE CORTAM ( NÃO HÁ INTERSEÇÃO )

**Curva característica de disparo e coordenação de proteção**  
Relés de sobrecarga bimetalício



Lembre-se: a característica de disparo é indicada a partir do ESTADO FRIO. Para o circuito em temperatura de funcionamento o tempo de disparo é da ordem de 25% do valor obtido no gráfico.

2º exemplo.

**Coordenação entre as curvas características dos dispositivos de proteção e a curva da corrente de partida de motores elétricos.**

Já sabemos que, na fase de partida, os motores elétricos, e sobretudo os motores do tipo indução gaiola, **absorvem da rede uma corrente bem mais elevada**, da ordem de 6 a 8 vezes a corrente nominal.

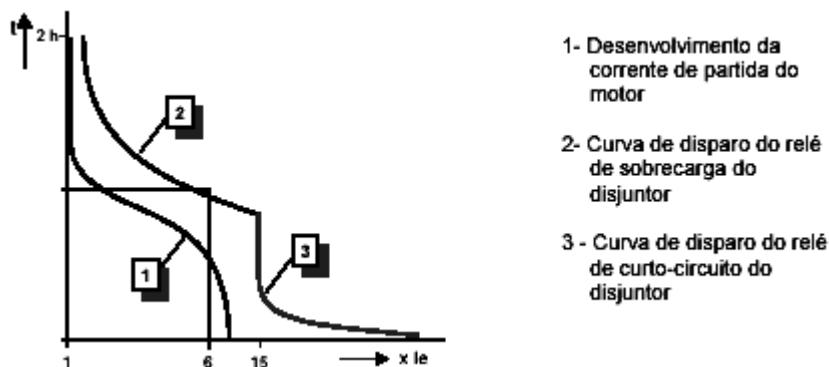
Sabemos também que o dispositivo de proteção contra sobrecarga ( os relés bimetalícos ou os eletrônicos ), normalmente **efetua o desligamento nessa faixa de sobrecorrentes**.

Mas, no presente caso, aliás muito freqüente, apesar de ser uma sobrecorrente, essa corrente faz parte do próprio processo de partida do motor, e **como tal não pode levar a uma interrupção** ( pois o motor nunca iria partir plenamente e nem chegar ao regime nominal ). Então, **é necessário que as curvas dos dispositivos de proteção escolhidos, levem em consideração uma adequada coordenação com a curva de partida do motor.**

E mais: **que as curvas demonstrem um afastamento seguro.**

Na representação que segue, a corrente de partida do motor ( curva 1 ) tem um valor inicial de  $8 \cdot I_n$ , chegando ao valor nominal de  $I_n$  quando a curva coincide com o eixo vertical, enquanto que as curvas de atuação dos relés de proteção do disjuntor ( curvas 2 e 3 ) estão suficientemente afastadas da curva de partida, **garantindo assim uma partida normal do motor.**

Esse fato demonstra que, para se ter a certeza de que estamos escolhendo os **dispositivos de proteção com suas curvas características corretas**, temos que conhecer precisamente, **qual a curva da corrente de partida nas condições de carga em que vamos ligar o nosso motor.**

**Disjuntores para manobra e proteção de motores.**

Curvas características típicas do disjuntor e curva de partida do motor.

**Escolha das curvas características de relés de um disjuntor, perante cargas variáveis.**

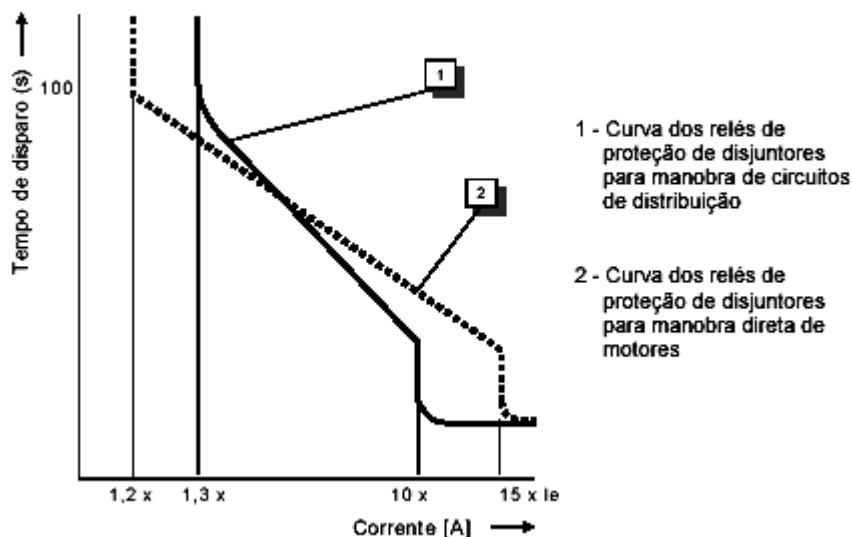
Os disjuntores são, por definição, dispositivos de manobra e de proteção, dotado dos relés de proteção contra sobrecarga e curto-circuito.

Tais relés tem que ter suas curvas coordenadas com as cargas a eles ligadas.

Nesse terceiro exemplo, temos um para cargas motoras ( curva 2 ) e uma outra para, cargas gerais de uma linha de distribuição ( curva 1 ) que também inclui, mas não exclusivamente, cargas motoras.

Nesse caso, a grande diferença está no início da faixa das correntes de curto-circuito  $I_k$ , que no caso de cargas exclusivamente motoras se inicia com  $15 \cdot I_n$ , e no caso de cargas mistas, como o é de uma rede de distribuição,  $I_k$  é superior a  $10 \cdot I_n$ . Esses fatores devem ser levados em consideração na escolha dos disjuntores

dependendo da natureza de sua instalação, ou seja, quando para manobra direta de motores ou manobra de circuitos de distribuição.

**Disjuntores para manobra e proteção de circuitos de distribuição e de motores**  
Curvas características típicas

O contator, que é de acionamento não manual por definição, pode ser do tipo “de potência” e “auxiliar”, e normalmente tripolar, por ser usado em redes industriais que são sobretudo trifásicas.

O seu funcionamento se dá perante condições nominais e de sobrecarga previstas, sem porém ter capacidade de interrupção para desligar a corrente de curto-circuito. O acionamento é feito por uma bobina eletromagnética pertencente ao circuito de comando, bobina essa energizada e desenergizada normalmente através de uma botoeira liga-desliga, estando ainda em série com a bobina do contator um contato pertencente ao relé de proteção contra sobrecargas, do tipo NF ( Normalmente Fechado ).

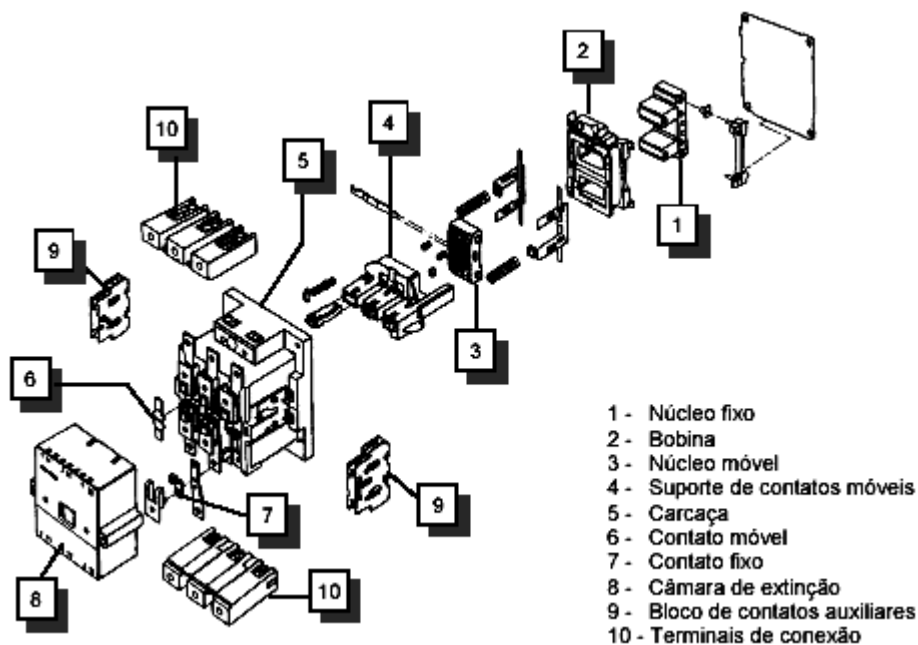
esse contato auxiliar, ao abrir, interrompe da alimentação da bobina eletromagnética, que faz o contator desligar. Fusíveis colocados no circuito de comando fazem a proteção perante sobrecorrentes.

### Construção.

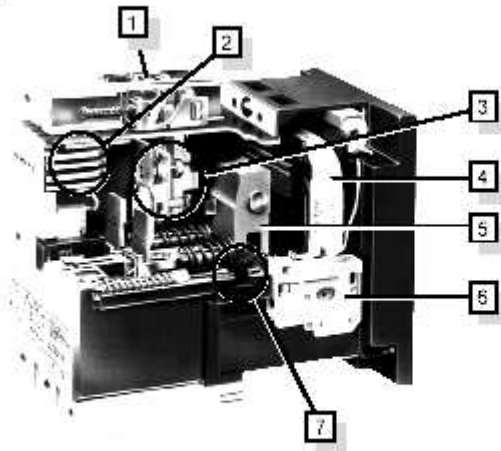
Cada tamanho de contator tem suas particularidades construtivas. Porém, em termos de componentes e quanto ao princípio de funcionamento, são todos similares ao desenho explodido que segue, e cujos componentes estão novamente representados na ilustração com corte na página seguinte.

### Contator de potência.

Desenho explodido

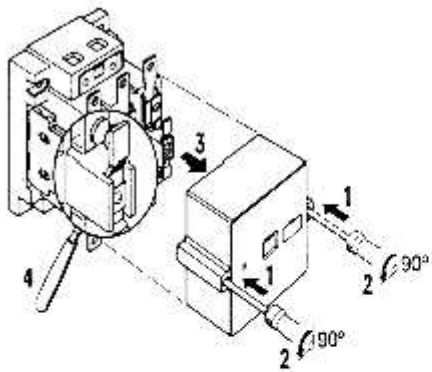


Contator de potência.  
Peça em corte.



- 1 - Terminais de conexão
- 2 - Câmara de extinção de arco
- 3 - Contatos de potência
- 4 - Bobina
- 5 - Sistema magnético ( núcleo móvel )
- 6 - Contatos auxiliares
- 7 - Elemento de bloqueio quando retirada a câmara de extinção de arco

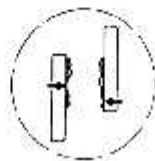
Análise e substituição dos contatos de contadores.



Contato normal de uso



Contato desgastado



### Funcionamento do contator.

Conforme definido e comentado anteriormente, o contator é um dispositivo de manobra não manual e com desligamento remoto e automático, seja perante sobrecarga ( através do relé de sobrecarga ) seja perante curto-circuito ( através de fusíveis ).

Quem liga e desliga o contator é a condição de operação de uma bobina eletromagnética, indicada por ( 2 ) no desenho em corte, abaixo.

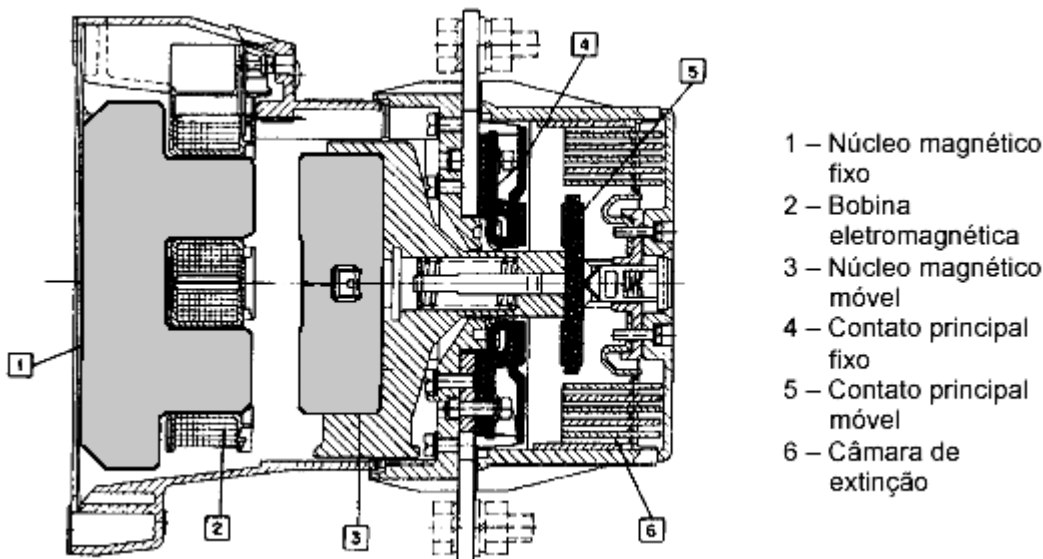
Essa bobina, no estado de desligado do contator, ou seja, contato fixo ( 4 ) e contato móvel ( 5 ) abertos, também está desligada ou desenergizada. Quando, por exemplo através de uma botoeira, a bobina eletromagnética é **energizada**, o campo magnético criado e que envolve o núcleo magnético fixo ( 1 ), atrai o núcleo móvel ( 3 ), com o que se desloca o suporte de contatos com os contatos principais móveis ( 5 ), que assim encontram os contatos principais fixos ( 4 ), fechando o circuito.

Estando o contator ligado ( a bobina alimentada ), e havendo uma condição de sobrecarga prejudicial aos componentes do sistema, o relé de proteção contra sobrecarga ( bimetálico ou eletrônico ) interromperá um contato NF desse relé, que está em série com a bobina do contator, no circuito de comando. Com a abertura do contato é desenergizada a bobina eletromagnética, o contator abre e a carga é desligada.

Para efeito de religação, essa pode ser automática ou de comando remoto, dependendo das condições a serem atendidas pelo processo produtivo ao qual esses componentes pertencem.

Além dos contatos principais, um contator possui contatos auxiliares dos tipos NA e NF, em número variável e informado no respectivo catálogo do fabricante. ( Lembrando: NA significa Normalmente Aberto e NF, Normalmente Fechado ).

As peças de contato tem seus contatos feitos de metal de baixo índice de oxidação e elevada condutividade elétrica, para evitar a criação de focos de elevada temperatura, o que poderia vir a prejudicar o seu funcionamento. Nesse sentido, o mais freqüente é o uso de liga de prata.



Desenho em corte.

### Características dos contatores.

Os contatores se caracterizam sobretudo pelo seu elevado número de manobras perante corrente nominal, número esse variável com o tipo de carga pois, entre outros, é função dos efeitos do arco elétrico sobre as peças de contato no instante da manobra. Com isso, **a sua capacidade de manobrar também passa a ser variável com o tipo de carga, conforme vamos detalhar a seguir.**

Se analisarmos, conseqüentemente, uma lista técnica de um contator, vamos constatar que:

- São dados básicos de escolha, o conhecimento de sua **tensão nominal (  $U_n$  )**, e a **freqüência nominal (  $f_n$  )**, para as quais também a bobina eletromagnética do contator precisa ser adequada..
- É fundamental também saber em que condições de carga **o contator é ligado**, para determinar o número de contatos auxiliares necessários para intertravamento, bloqueio, comandos auxiliares etc, definindo-se assim o número de contatos normalmente abertos ( NA ) e os normalmente fechados ( NF ).
- Como terceiro detalhe, **o tipo de carga** em que vai ser ligado: a constatação se a carga é predominantemente **resistiva** ou **indutiva** ( motores sobretudo ). Isso porque, as respectivas curvas de carga são acentuadamente diferentes. No caso de carga **capacitiva**, as condições bastante críticas na ligação recomendam o uso de contatores específicos para tal carga, ou uma consulta ao fabricante a respeito.
- O quarto aspecto diz respeito ao **regime em que a carga considerada vai ser manobrada: é de ligação contínua ou intermitente**. Isso porque, sendo intermitente, a presença freqüente do arco elétrico e seus efeitos térmicos, bem como as freqüentes correntes de partida, algumas vezes superiores à  $I_n$ , fazem com que tenhamos que reduzir a carga pela redução de corrente, com o que o contator terá menor capacidade de

manobra. As potências indicadas seguem a padronização constante da norma NBR 5432, em sua última edição.

• Mais um aspecto é a definição da sua **categoria de emprego**, segundo norma IEC.

As diversas categorias de emprego estão definidas na próxima página, sendo designadas, em corrente alternada, por AC\_. Classificação semelhante é normalizada para corrente contínua por DC\_. Para cada uma dessas categorias, define-se qual a capacidade de manobra que um dado contator apresenta.

• Nas listas técnicas ainda encontramos informações relativas à:

- **Corrente e tamanho do fusível ou disjuntor-motor** que fará a proteção de cada um dos contadores, lembrando que, sendo carga motora, a característica do fusível é retardada;

- Atendimento às **normas técnicas**, relacionando-as e informando eventualmente se o material já possui a MARCA DE CONFORMIDADE. Essa marca é obtida na obediência da norma do produto e de norma de procedimentos. Sua concessão é feita por autorização do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Garantia de Qualidade.

- Para cada contator ainda vem indicada a **família de relés de sobrecarga** que se aplica, baseado no valor da corrente nominal.

-

### **Contatores**

#### **Categorias de emprego - IEC 947**

**AC - 1** Cargas não indutivas ou de baixa indutividade Resistores

**AC - 2** Motores com rotor bobinado (anéis)

Partida com desligamento na partida e regime nominal

**AC - 3** Motores com rotor em curto-circuito (gaiola)

Partida com desligamento em regime nominal

**AC - 4** Motor com rotor em curto-circuito (gaiola)

Partida com desligamento na partida, partida com inversão de rotação, manobras intermitentes

**AC - 5a** Lâmpadas de descarga em gás (fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio)

**AC - 5b** Lâmpadas incandescentes

**AC - 6a** Transformadores

**AC - 6b** Banco de capacitores

**AC - 7a** Cargas de aparelhos residenciais ou similares de baixa indutividade

**AC - 7b** Motores de aparelhos residenciais

**AC - 8** Motores-compressores para refrigeração com proteção de sobrecarga

**DC - 1** Cargas não indutivas ou de baixa indutividade Resistores

**DC - 3** Motores de derivação ( shunt)

Partidas normais, partidas com inversão de rotação, manobras intermitentes, frenagem

**DC - 5** Motores série

Partidas normais, partidas com inversão de rotação, manobras intermitentes, frenagem

**DC - 6** Lâmpadas incandescentes

### **Contatores auxiliares / Contatos auxiliares**

#### **Categorias de emprego - IEC 947**

#### **Corrente alternada Especificação das cargas**

**AC - 12** Cargas resistivas e eletrônicas

**AC - 13** Cargas eletrônicas com transformador de isolamento

**AC - 14** Cargas eletromagnéticas = 72 VA

**AC - 15** Cargas eletromagnéticas > 72 VA

#### **Corrente contínua Especificação das cargas**

**DC - 12** Cargas resistivas e eletrônicas

**DC - 13** Cargas eletromagnéticas

**DC - 14 Cargas eletromagnéticas com resistores de limitação****Durabilidade ou vida útil.**

A durabilidade é expressa segundo dois aspectos: a mecânica e a elétrica.

A **durabilidade mecânicas é um valor fixo**, definido pelo projeto e pelas características de desgaste dos materiais utilizados. Na prática, o seu valor é de 10 a 15 milhões de manobras, para contatores de pequeno porte. De qualquer modo, o valor correspondente está indicado no catálogo do fabricante.

A **durabilidade elétrica, ao contrário, é um valor variável**, função da **frequência de manobras da carga** a qual o contator está sujeito, ao **número total de manobras que o contator é capaz de fazer**, a sua **categoria de emprego** e aos **efeitos do arco elétrico**, que dependem da tensão e da corrente elétricas. Normalmente, perante condições de desligamento com corrente nominal na categoria de emprego AC-3, esse valor varia de 1 a 1,5 milhão de manobras.

Essas três últimas variáveis estão indicadas no gráfico na página seguinte, observando-se que:

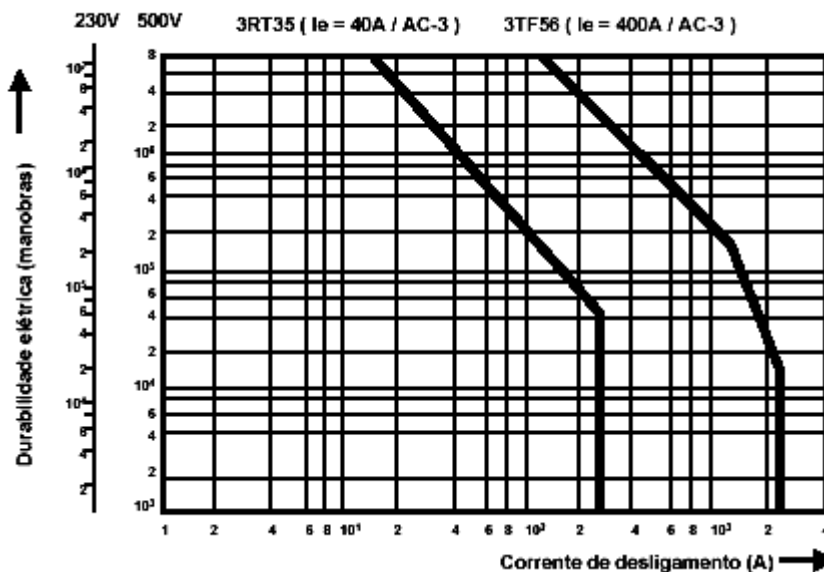
- No eixo horizontal, vem indicada a **corrente de desligamento**, que não é necessariamente a corrente nominal. Portanto, o seu valor deve ser **determinado** ou **medido** em cada carga ligada ao contator.
- No eixo vertical, a indicação de dois dos possíveis eixos de tensão nominal, sendo que, sobre as escalas indicadas ( de acordo com a tensão ligada),obtemos O VALOR TOTAL DAS MANOBRAS QUE O CONTATOR É CAPAZ DE FAZER, em regime AC-3, que é o mais encontrado nas instalações industriais. Ou, em outras palavras, obtemos a DURABILIDADE ELÉTRICA DO CONTATOR.
- O conhecimento dessas durabilidades ( elétrica e mecânica ) são particularmente importantes na constituição do PLANO DE MANUTENÇÃO DE UMA INDÚSTRIA, podendo-se assim planejar adequadamente a aquisição de peças de reposição e o período melhor de sua troca sem interromper o ciclo produtivo.
- A curva de cada contator é estabelecida pelo fabricante.

Do exposto, podemos tirar algumas conclusões :

- Na escolha do contator adequado a uma instalação, e para evitar freqüentes trocas, temos que conhecer, além da tensão, freqüência elétrica e tipo de carga ( como vimos até aqui ), também a freqüência de manobras, ou seja, o número de manobras por unidade de tempo ( p.ex. manobras por hora ) que a carga realiza.
- Na avaliação qual o contator que melhor atende ao usuário, e além do seu custo, temos que saber, entre os contatores para nossa escolha, qual o que apresenta uma durabilidade adequada e relacionar essa durabilidade com o custo-benefício. • Avaliar o que significa para o ciclo de trabalho da indústria, freqüentes substituições de componentes, ou seja, até que ponto essas prejudicam o ciclo produtivo.

Todos os elementos citados seguem na página seguinte, tendo-se ainda anexado um nomograma que por vezes tem sido um auxiliar útil na determinação da durabilidade elétrica.

**Durabilidade elétrica dos contatos.**



Exemplo:

- 1º valor de referência : 1 milhão de manobras elétricas.
- 2º valor de referência: 200 manobras por hora
- Valores obtidos. Unem-se os dois pontos e assim interceptamos um eixo vertical central ( que não tem escala ). A partir do ponto de corte com o eixo vertical central, traçar uma horizontal, que vai ( à direita e à esquerda ) cortar as diversas escalas com horas de serviço diário especificado.

Considerando o corte com a escala “8 horas de serviço diário” nos dará a durabilidade do contator, que nesse caso é de aproximadamente **3 anos**.

Ainda na atividade de manutenção, é importante se **localizar** qualquer defeito que esteja acontecendo durante o **ciclo de trabalho**. Assim, por exemplo, seja pelas condições da rede de alimentação, seja por defeito dos componentes, podem ocorrer certos problemas, cujas **causas mais frequentes** estão exemplificadas no que segue.

#### Utilização dos contadores.

Desvio dos valores nominais de operação

Defeitos	Causas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruído de vibração               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perda acelerada de massa dos contatos</li> <li>- Destruição dos contatos</li> <li>- Destruição da bobina (<math>\approx 1</math>min)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sub-tensão no comando               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformador de comando sub-dimensionado</li> <li>- Tensão de comando derivada da potência</li> <li>- Falha de conexão e condução</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soldagem leve (separável)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área de brilho fosco</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de ligação e condução</li> </ul>
Perda de massa com deformações do contato <ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas fundidas</li> </ul> Soldagem intensa (inseparável)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda acelerada da massa dos contatos</li> </ul> Destruição das partes adjacentes aos contatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de interrupção</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruição das partes adjacentes aos contatos</li> </ul> Soldagem intensa (não separável)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durabilidade elétrica</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soldagem leve (separável)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área de brilho fosco</li> </ul> </li> </ul> Destruição das partes adjacentes aos contatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência de manobras</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda de massa com pingos de derretimento</li> </ul> Destruição das partes adjacentes aos contatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curto-circuito</li> </ul>

#### Garantia de bom desempenho do contator.

Sucintamente, o correto uso e daí o bom desempenho de um contator pode vir baseado em:

- Acompanhar o estado dos contatos através do cálculo da durabilidade, como visto anteriormente e registrar, em especial, desligamentos por anormalidades, que certamente vão reduzir a vida útil.
- Instalar os relés de proteção contra sobrecarga e os fusíveis máximos de acordo com o especificado no catálogo do fabricante.
- Avaliar as conseqüências de um curto-circuito ( o contator não desliga, mas vai conduzir a corrente de curto-circuito por tempo limitado ) presente no circuito;
- Controlar as condições de aquecimento das peças de contato, aquecimento esse sempre proveniente de **condições anormais** de utilização, e que podem Ter danificado as peças de contato;
- O uso de peças de reposição originais do próprio fabricante do contator.

#### SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO DE PROTEÇÃO ( BACK-UP ) ENTRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.

Definição:

Coordenação a sobrecorrentes.

Coordenação das características de operação de dois ou mais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, de modo que, no caso de ocorrerem sobrecorrentes entre limites especificados, somente opere o dispositivo previsto dentro desses limites.

**E essa previsão é a de que opere apenas o dispositivo a montante do defeito que esteja mais próximo desse defeito ( ou, em outras palavras: o imediatamente anterior ao local do defeito ).**

Vimos que:

- A proteção contra condições anormais de sobrecorrente é feita por relés de proteção de disjuntores e fusíveis;
- Cada um desses dispositivos, entre outras grandezas, é caracterizado por curvas características;
- Essas curvas tem sua posição perfeitamente definida nos gráficos tempo de disparo x corrente de desligamento, de sorte que cada um atue na situação correta.

Essa atuação na situação correta deve ser também transferida ao circuito, onde temos freqüentemente, diversos dispositivos de mesma ou diferente função de proteção,

LIGADOS EM SERIE, e onde a evolução das curvas tempo x corrente adquire um significado especial.

Essa é uma análise de SELETIVIDADE de atuação conjunta, e que é o tema que segue.

Reportando-nos às duas páginas seguintes, temos a observar:

• **Seletividade entre fusíveis em série.**

Tem-se nesse caso, a análise feita para dois jogos de fusíveis em série ( veja na página 58 ), tendo o F2 ( fusível a jusante ) a ligação da carga, e antes dele, o fusível F1 ( a montante ), sempre lembrando que, pelas regras de representação gráfica, a alimentação é representada do lado de cima e as cargas, em baixo.

Nesse caso, **entre as curvas médias dos dois fusíveis**, tem que haver uma diferença de tempos de atuação, que é dada, em termos de correntes nominais, por fatores ( 1,25 ou 1,6 ) indicados em função da tensão de alimentação. Esses fatores vão garantir, no final, que as curvas dos fusíveis não se sobreponham, total ou parcialmente.

Sob altas correntes de curto-circuito, porém, o atendimento a essas condições não é suficiente.

**A seletividade só estará assegurada quando o valor da energia ( dado por  $I^2 \cdot t$  ) durante os tempos de fusão e de arco, do fusível menor, for menor do que o respectivo valor, do fusível maior ( a montante ).**

Deve ficar bem claro nesse ponto o seguinte: não basta que as correntes nominais de fusíveis imediatamente em série não sejam iguais, nem que sempre um tamanho maior ao anterior já garanta a seletividade

• **Seletividade entre disjuntores em série.**

Nesse caso, a seletividade é analisada, pela disposição das curvas características dos relés de proteção de sobrecarga e de curto-circuito ( veja na página seguinte ), dos disjuntores ( Q1 e Q2 ). A diferença de tempos que dão uma seletividade confiável deve ser de 70 ms a 150 ms. Observe as demais recomendações indicadas.

• **Seletividade entre relés do disjuntor e fusível.**

Tendo um fusível a jusante e um disjuntor com seus relés a montante ( veja na página 61 ), o tempo de separação tem que ser da ordem de 100 ms.

• **Seletividade entre fusível e relés do disjuntor.**

Situação inversa a anterior, com os relés do disjuntor a jusante e o fusível a montante. O tempo de separação entre as curvas deve ser da ordem de 70 ms.

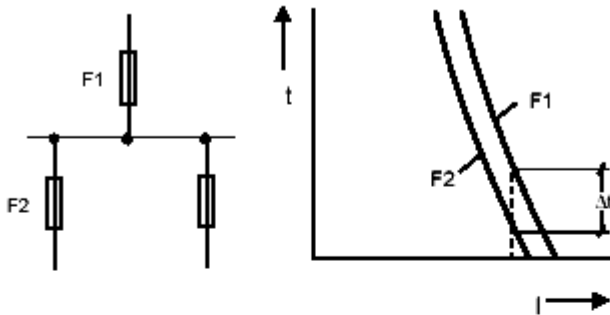
A utilização de valores menores do que os indicados, pode levar a desligamentos contrários a seletividade exigida, devido as tolerâncias com que tais componentes são fabricados.

Normalmente, quando são usados dispositivos de manobra e de proteção de mesma origem, a evolução para que tais curvas sejam coerentes entre si já é levada em consideração pelo fabricante; diferente o caso quando os dispositivos de proteção são de diversas origens, quando então o cuidado deve ser dobrado.

O estudo da seletividade adquire uma importância particular, quando observamos que a atuação dos dispositivos de proteção que não atenda ao que foi exposto, leva certamente ao desligamento de setores do circuito elétrico, que não deveriam ser desligados. Com isso, pensando-se em termos de produção

industrial, a desconsideração dos fundamentos da seletividade iria desligar máquinas sem nenhuma necessidade, com que a produção daquela indústria seria certamente prejudicada. Portanto, muito cuidado com o atendimento das condições expostas.

**Seletividade.  
Fusíveis em série.**

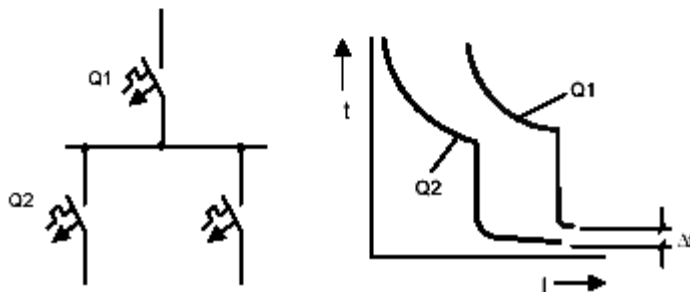


Na prática, a seletividade com fusíveis em série é dada por:

Em 380 V  $\frac{F1}{F2} = 1,25$

Em 500 V  $\frac{F1}{F2} = 1,60$

**Disjuntores em série.**



F2

F1 =

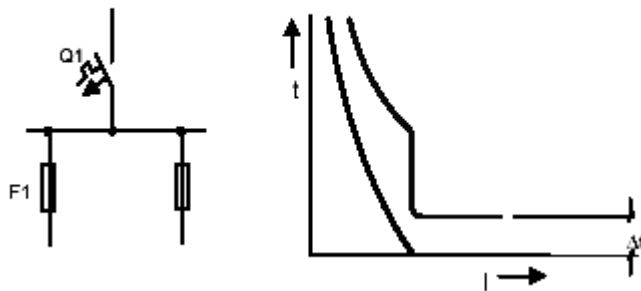
• A seletividade com disjuntores em série é dada por:

- Degraus de corrente

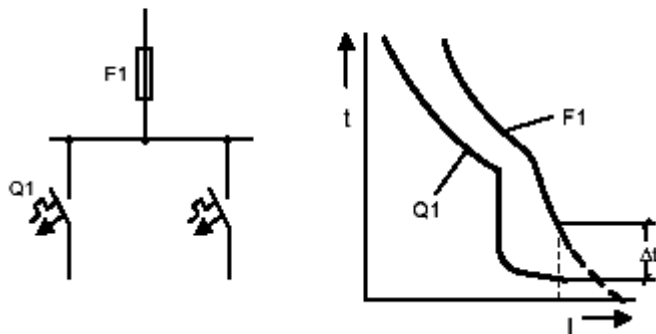
- Disparo temporizado

• Escalonamento de tempo na ordem de 70 a 150 ms

A especificação do disjuntor em série, pode ser otimizada através da análise de proteção de retaguarda ( back-up )

**Seletividade.****Disjuntor a montante de fusíveis.**

- A seletividade de disjuntor a montante de fusível é possível quando a corrente nominal do fusível seja bem abaixo da do disjuntor
- Escalonamento de tempo na ordem de 100 ms

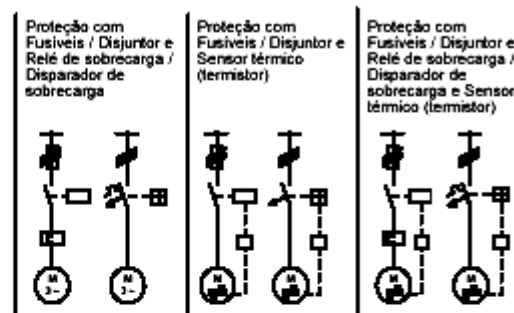
**Fusível a montante de disjuntores.**

- Na prática, a seletividade com fusível a montante de disjuntor é dado com um escalonamento de tempo na ordem de 70 ms
- A especificação do disjuntor em série com o fusível, pode ser otimizada através da análise da proteção de retaguarda ( back-up )

**CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MANOBRA E PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS EM PARTIDA DIRETA.**

Pelo exposto até aqui, a partida direta, com plenos valores de potência e tensão, pode ser feita de diversas maneiras, associando adequadamente entre si, disjuntores e fusíveis com contatores e relés de sobrecarga. Essas hipóteses estão reunidas na tabela que segue, informando até que ponto cada uma delas traz uma proteção plena perante um dado problema, ou não.

Ressalte-se que o uso de uma ou outra combinação de dispositivos é tanto um aspecto técnico quanto econômico. Em outras palavras, soluções melhores são também de maior custo: cabe ao projetista avaliar até que ponto a carga necessita de uma solução mais completa ou não.

**Proteção plena dos motores.****Causas de aquecimento****Proteção dos motores**

Sobrecarga em regime de operação	Total	Total	Total
Falta de fase	Total	Total	Total
Desvios de tensão e frequência	Total	Total	Total
Rotor bloqueado	Total	Parcial	Total
Partida difícil (prolongada)	Sem	Total	Total
Elevada frequência de manobras	Parcial	Total	Total
Temperatura elevada (no motor)	Sem	Total	Total
Obstrução do resfriamento (no motor)	Sem	Total	Total

Com relação a tabela, temos a comentar:

- 90% ou pouco mais de todos os motores elétricos ainda hoje são protegidos de acordo com as soluções indicadas na primeira coluna, usando disjuntores com relés de sobrecarga e curto-circuito, ou fusível, contator e relé de sobrecarga. Recai a solução sobre o contator, quando o número de manobras previstas é elevado, pois o disjuntor tem uma durabilidade menor em número de manobras.
- Para máquinas de grande porte ( tanto motores quanto geradores ), e de elevado custo, é importante fazer um estudo que leve em consideração um eventual uso dos relés eletrônicos de sobrecarga, pois freqüentemente, o custo do equipamento justifica o uso de um sistema mais sofisticado de proteção, onde inclui sensoriamento do aquecimento de motor através de termistores e supervisão da corrente de fuga.
- Em ambientes altamente poluídos, sobretudo com fibras isolantes, a proteção por relé bimetálico ( que controla correntes ) não é eficiente, pois o sobreaquecimento que se apresenta é ocasionado pelo entupimento de canais de circulação do ar refrigerante (e não por excesso de perda Joule que seria proporcional à corrente). Se esse risco existir e não puder ser evitado, recomenda-se o uso de relés de sobrecarga eletrônicos com supervisor de termistores. Note-se porém que o uso deste relé faz parte de um projeto global da máquina, pois os sensores semicondutores de temperatura – os termistores, tem que ser instalados dentro do motor, no seu ponto mais quente.
- A solução convencional ( com relé bimetálico) também não é eficiente perante partidas difíceis, prolongadas, pois pode acontecer que essa se dá com tempos muito longos de correntes não muito elevadas, de modo que a supervisão do relé bimetálico não é eficiente.
- No caso de rotor bloqueado ( que significa o motor ligado e não girando, o que se assemelha a um transformador em curto-circuito ), a proteção apenas por sensoriamento do aquecimento não é plenamente confiável porque nesse caso o impacto de corrente acelera abruptamente o aquecimento no tempo, de modo que pode haver danificação antes da resposta dos termistores. Esse é um dos casos em que uma dupla proteção por relé bimetálico e supervisão por termistores levam à melhor solução.

**PARTIDA DE MOTORES TRIFASICOS .**

Já vimos no item relativo aos tipos de cargas, que motores absorvem da rede uma potência maior na fase de partida. Esse fato pode levar a flutuações inadmissíveis na própria rede e no circuito do motor, que a concessionária de energia limita, para não prejudicar outros consumidores.

Então, reportando-nos a norma NBR 5410 edição de 1997, que está em vigor na época da redação desse texto, e no seu item 6.5.3 – Motores, temos: 6.5.3.1“ *As cargas constituídas por motores elétricos apresentam peculiaridades que as distinguem das demais:*

a) *A corrente absorvida durante a partida é muito maior que a de funcionamento normal em carga:*

b) *A potência absorvida em funcionamento é determinada pela potência mecânica no eixo solicitada pela carga acionada, o que pode resultar em sobrecarga na rede de alimentação, se o motor não for protegido adequadamente.*

*Em razão dessas peculiaridades , a instalação de motores, além das demais prescrições dessa Norma, devem atender também as prescrições seguintes:*

6.5.3.2.Limitação das perturbações devidas a partida de motores.

*Para evitar perturbações inaceitáveis na rede de distribuição, na própria instalação e nas demais cargas ligadas, na instalação de motores deve-se:*

a) *Observar as limitações impostas pela Concessionária local referente a partida de motores:*

*Nota: Para a partida direta de motores com potência acima de 3,7 kW (5cv), [supostamente em U = 220V] em instalações alimentadas por rede de distribuição pública em baixa tensão, deve ser consultada a Concessionária local.*

b) *Limitar a queda de tensão nos demais pontos de utilização, durante a partida do motor, aos valores estipulados em 6.2*

*Para obter conformidade às limitações descritas nas as linhas a) e b) anteriores, poder ser necessário o uso de dispositivos de partida que limitem a corrente absorvida durante a partida.*

Por outro lado, as cargas motoras em corrente alternada, são identificadas como sendo AC-2 e AC-3, a primeira sigla aplicada a motores do tipo trifásico indução bobinado ou anel, e o segundo a motores trifásicos de indução tipo gaiola, que são a grande maioria dos motores encontrados nas indústrias, por serem mais robustos e mais baratos ( não necessariamente melhores ). Outro fator que hoje precisa ser observado ,é o **rendimento do motor**: Devemos dar preferência a motores de alto rendimento, como perdas reduzidas.

Portanto, para potências acima de 5 cv, é necessário verificar se há necessidade de serem usados métodos de partida, que podem ser de várias formas, cada um com recomendações próprias de acordo com a potência dos motores a eles ligada. Aplicando-se a todas eles, a IEC 60 947 faz recomendações de coordenação de proteção, e que assim se definem:

1. Um dispositivo de partida, além de atender a capacidade de carga ( p.ex. motor trifásico, AC-3 ) é orientada por norma a obedecer determinados resultados quando sujeita a anormalidades de pior caso, ou seja, um curto-circuito pleno.
2. Um curto-circuito pleno é dado como uma fatalidade. A experiência tem demonstrado que um curto-circuito de ordem prática é de menos de 50% do pleno ( pior caso ).

Desta forma, a escolha da coordenação de proteção deve considerar as condições práticas de probabilidade do curto-circuito e as exigências de serviço da instalação.

Pela IEC 60 947 a **coordenação de proteção** é dividida em **tipo 1** e **tipo 2**, que assim se definem:

• **Coordenação tipo 1.**

Sem risco para as pessoas e instalações, ou seja, desligamento seguro da corrente de curto-circuito. Porém, **o dispositivo de partida não estará em condições de continuar funcionando após o desligamento**, permitindo danos ao contator e ao relé de sobrecarga.

• **Coordenação tipo 2.**

Sem riscos para as pessoas e instalações, ou seja, desligamento seguro da corrente de curto-circuito. **Não pode haver danos ao relé de sobrecarga ou em outras partes** com exceção de leve fusão dos contatos do contator e estes permitam fácil separação sem deformação significativa.

Tais correntes são como referência prática da ordem plena de  $IK = 50$  kA como corrente presumida de curto-circuito.

Pela própria definição, é bem mais seguro o uso da coordenação tipo 2, conforme visto linhas atrás. A solução porém é de custo mais elevado.

Pela IEC 60 947, são definidos os seguintes valores de corrente de curto-circuito prático, em kA :

**Crêterios de escolha do método de partida.**

Corrente nominal $I_n$ / AC-3 em A		Corrente de curto-circuito prático ( "r" ) $I_{ccr}$ em kA
0	< $I_n$ ≤ 16	1
16	< $I_n$ ≤ 63	3
63	< $I_n$ ≤ 125	5
125	< $I_n$ ≤ 315	10
315	< $I_n$ ≤ 630	18
630	< $I_n$ ≤ 1000	30
1000	< $I_n$ ≤ 1600	42

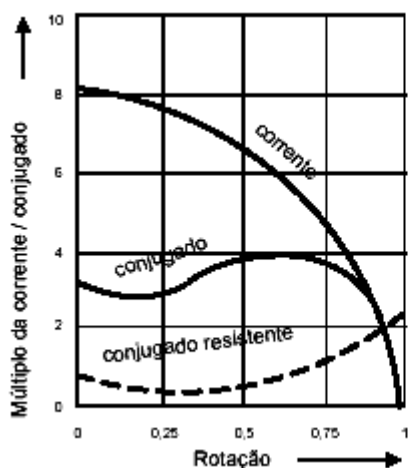
Pelo visto, a escolha por uma partida direta ou não, depende de:

- Característica da máquina a ser acionada;
- Circunstância de disponibilidade da potência de alimentação;
- Confiabilidade de serviço, e
- Distância da fonte de alimentação, devido a condição de queda de tensão ( norma )

No caso de ser permitida a partida direta, a plena tensão, as curvas características do motor a ela ligado assim se apresentam:

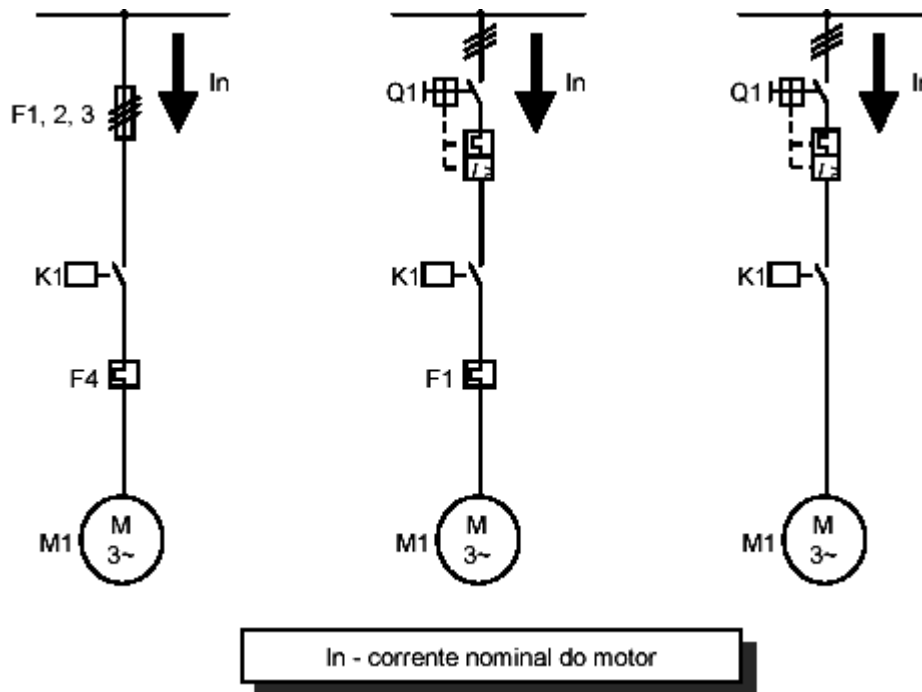
**PARTIDA DIRETA** ( plena tensão ).

Características básicas



- Aplicada em máquinas com qualquer tipo de carga
- Máquinas que permitem normalmente suportar o conjugado (torque) de aceleração
- Fonte com disponibilidade de potência para alimentação
- Confiabilidade de serviço pela composição e comando simples

A composição de uma **partida direta** podem ser das seis formas citadas na tabela que consta da página 62. Porém, dessas, as três mais usadas são as representadas a seguir.



Não sendo possível a partida direta, outros métodos de partida são utilizados:

- Partida estrela-triângulo;
- Partida por auto-transformador ( também chamada de compensadora )
- Partida suave ( soft-starter ), por meio de eletrônica de potência.

Na seqüência indicada, estão também os **custos** do dispositivo de partida: uma estrela-triângulo é mais barata do que uma partida suave ( soft-starter ), para mesma potência de motor. E é necessário associar o **investimento no motor** com o **dispositivo de partida**.

Por essa razão, **máquinas pequenas** ( acima de 5 cv ou eventualmente maiores de acordo com determinações da Concessionária de Energia, pelo que vimos), **usam uma partida estrela-triângulo**; as **máquinas maiores**, passando pelas compensadoras ( com auto-transformador ), usam, no outro extremo das potências, a **partida suave ( soft-starter )**.

Um outro aspecto é a **qualidade** da partida, há casos em que os solavancos resultantes de uma partida em estrela-triângulo não são admissíveis dentro do regime de funcionamento do motor e sobretudo da carga acionada. Faremos uma análise detalhada sobre o assunto mais adiante.

Vamos analisar individualmente cada método de partida no que segue, e acrescentar a essa informação, dados de fabricantes e curvas características daí resultantes.

### **PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO.**

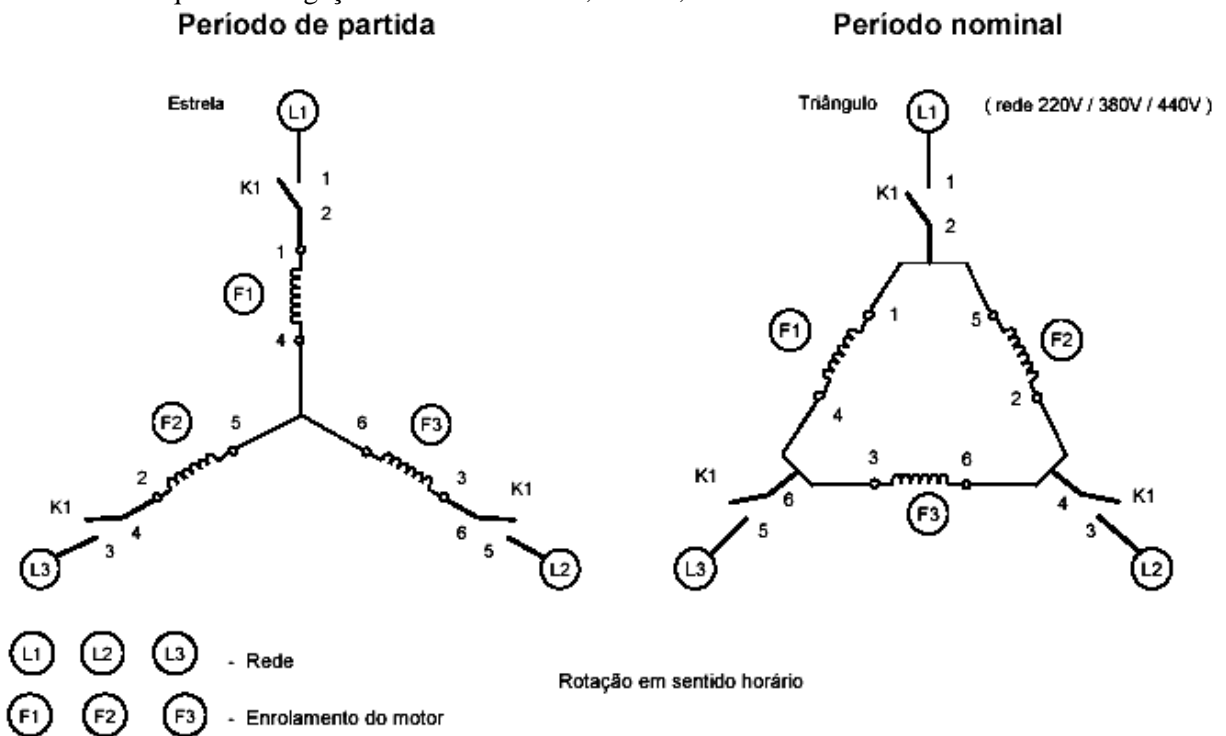
Princípio de funcionamento.

Motores capazes de terem sua partida através de uma partida estrela-triângulo, tem que ser do tipo trifásico, com as 3 entradas e 3 saídas dos rolamentos, acessíveis, para fazer a mudança de uma ligação estrela para triângulo.

Esse princípio de funcionamento se baseia em:

- Designando :
  - $U_n$  ..... tensão nominal
  - $U_f$  ..... tensão de fase
  - $I_n$ ..... corrente nominal de alimentação

- k ..... constante do motor
- $I_p$ ..... corrente de partida por fase
- X ..... reatância por fase
- M ..... momento ou conjugado de partida, proporcional ao quadrado de  $U_f$
- E baseado no esquema de ligação dos enrolamentos, abaixo,



Relacionando entre si a corrente de alimentação e os momentos de partida, resulta que, passando da ligação estrela para a triângulo, temos a relação de 1:3, como segue:

#### Demonstração para fórmulas de cálculos

Na ligação estrela

$$U_{NY} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

$$I_p = \frac{U_{NY}}{X} = \frac{U_n}{X \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{NY} = I_{pY} = \frac{U_n}{X \cdot \sqrt{3}}$$

$$M_Y = k \cdot U_{NY}^2 = k \cdot U_n^2 \cdot \frac{1}{3}$$

$$\frac{I_{NY}}{I_{n\Delta}} = \frac{\frac{U_n}{X} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}}{\frac{U_n}{X} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

Na ligação triângulo

$$U_f = U_n$$

$$I_f = \frac{U_f}{X} = \frac{U_n}{X}$$

$$I_n = I_f \cdot \sqrt{3} = \frac{U_n}{X} \cdot \sqrt{3}$$

$$M = k \cdot U_f^2 = k \cdot U_n^2$$

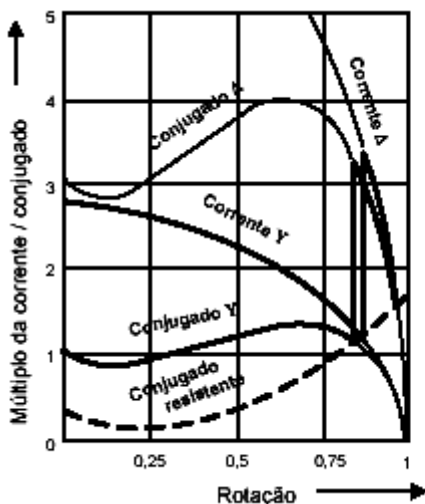
$$\frac{M_Y}{M_\Delta} = \frac{k \cdot U_n^2 \cdot \frac{1}{3}}{k \cdot U_n^2} = \frac{1}{3}$$

Portanto:

1. Na análise das curvas de carga, e particularmente na das cargas indutivas ( ou motoras ), vimos que a corrente de partida plena pode alcançar valores eficazes de  $8 \cdot I_n$ .
2. Se esse valor é excessivo, pelas normas e pelas condições de rede ( dados pela Concessionária ), então, ligando o motor trifásico em estrela na partida, a corrente circulante se situará em torno de  $1/3$  do valor pleno, e assim algo em torno de  $2,66 \cdot I_n$ , que é perfeitamente aceitável, se sua circulação não se der por um tempo excessivamente longo.
3. Se, uma vez passada a fase de partida, ou seja, o motor já tiver alcançado sua rotação nominal e assim a corrente também já for nominal, então podemos comutar os enrolamentos para a ligação de funcionamento normal, que então será ligada em triângulo, como uma corrente igual a corrente nominal ( $I_n$ ).
4. A comutação da ligação estrela para a triângulo, dentro de um regime de carga bem definido, é feito automaticamente, por meio de relé de tempo associado ao comando de contactores.

Ocorre porém que, na comutação da estrela para o triângulo, e com conseqüente aumento instantâneo da corrente em três vezes, manifesta-se um impacto mecânico que, de um lado, não é por vezes admissível dentro do regime de funcionamento da máquina acionada, e do outro, esse mesmo impacto leva a acelerar a fadiga mecânica da máquina e do eixo de acionamento do motor, o que reduz sensivelmente a VIDA ÚTIL das partes mecânicas envolvidas. Esse fato será demonstrado num estudo comparativo citado mais adiante nesse mesmo capítulo.

As curvas características de corrente e de conjugado ou momento apresentam como demonstrado a seguir: Características básicas ( tensão reduzida )



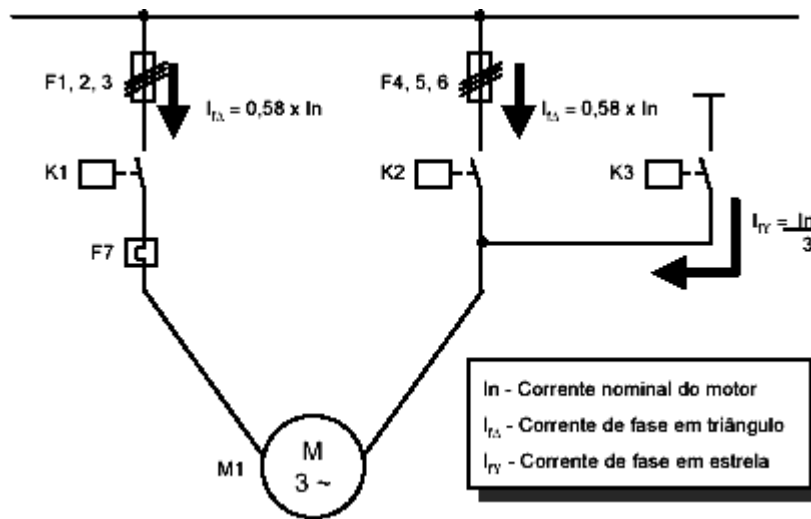
- Aplicada no acionamento de máquinas que partem em vazio ou com conjugado resistente baixo
- Alivia o conjugado ( torque ) de aceleração em base a tensão inicial ( reduzida ), e conseqüente redução da disponibilidade de potência para alimentação
- Deve ser parametrizada em tempo para execução da partida
- Em base a sua composição exige melhor qualidade de supervisão para se obter confiabilidade de serviço
- Aplicável em motores a serem acionados em grande distância, otimizando em especial os condutores.

#### Esquema de ligação.

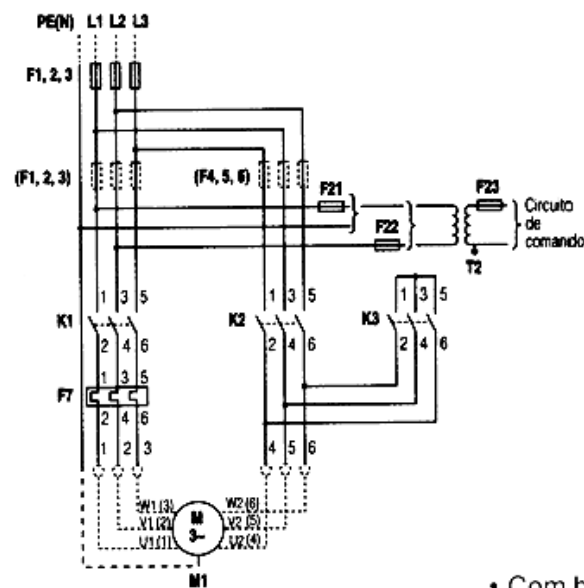
Segue o esquema de ligação respectivo, na forma completa, a saber:

#### Unifilar

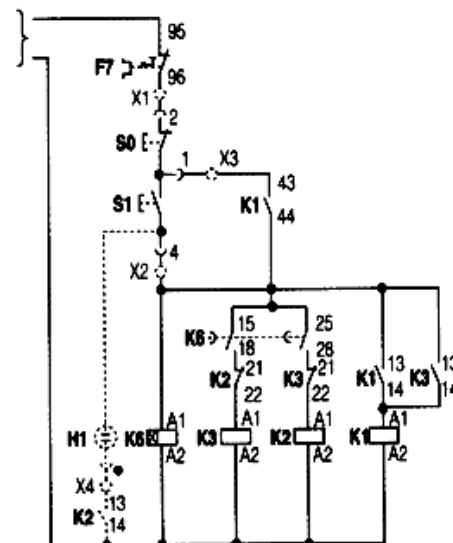
Definição dos valores de corrente para especificação dos componentes

**Trifilar**

Circuito de potência



Circuito de comando



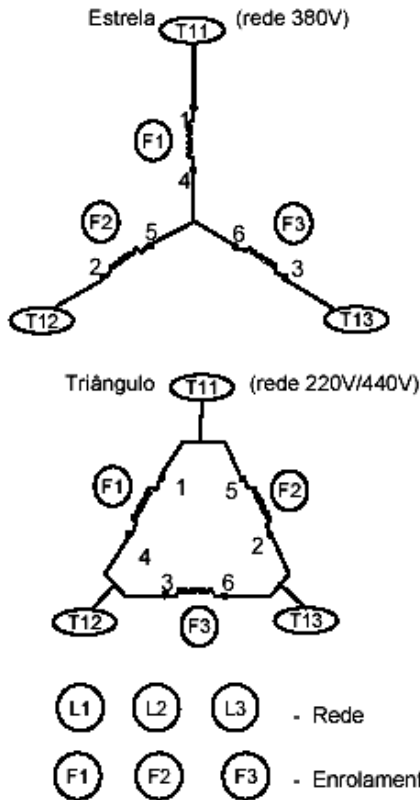
- Com botão de comando duplo liga-desliga 3SA8
- K6 - Relé de tempo Y  $\Delta$
- Contato 15-18 (fecha instantâneo) com retardo na abertura no ajuste de tempo da partida
- Contato 25-28 com retardo no fechamento no ajuste de tempo de partida mais um tempo  $\approx 50$  ms para garantir a transição de Y para  $\Delta$

**PARTIDA POR AUTO-TRANSFORMADOR ( COMPENSADORA ).**

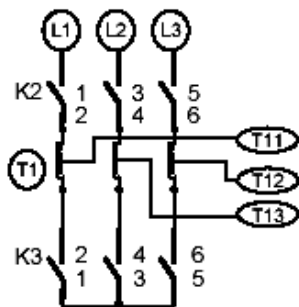
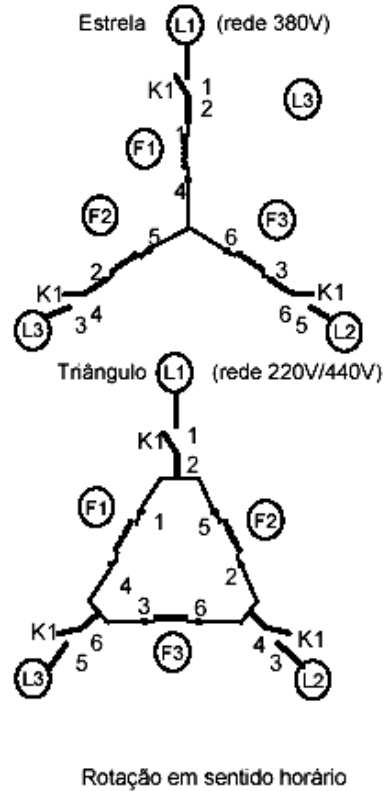
Esse método de partida atende melhor potências de carga superiores àquelas atendidas pela partida estrela-triângulo.

**Esquema de ligação dos enrolamentos.**

Período de partida

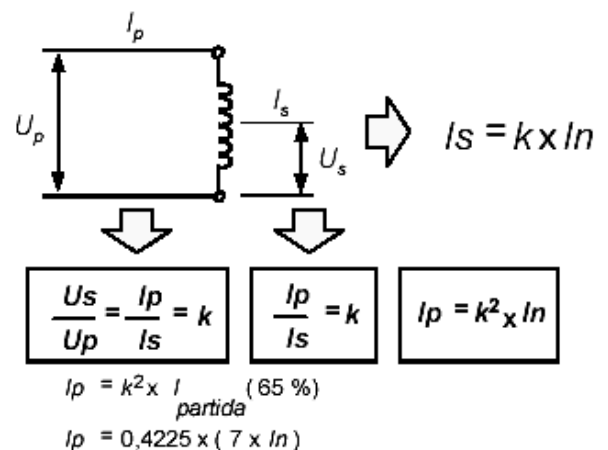


Período nominal



(T1) Auto-transformador

(T11) Tensão reduzida do auto-transformador  
(T12) Tensão reduzida do auto-transformador  
(T13) Tensão reduzida do auto-transformador

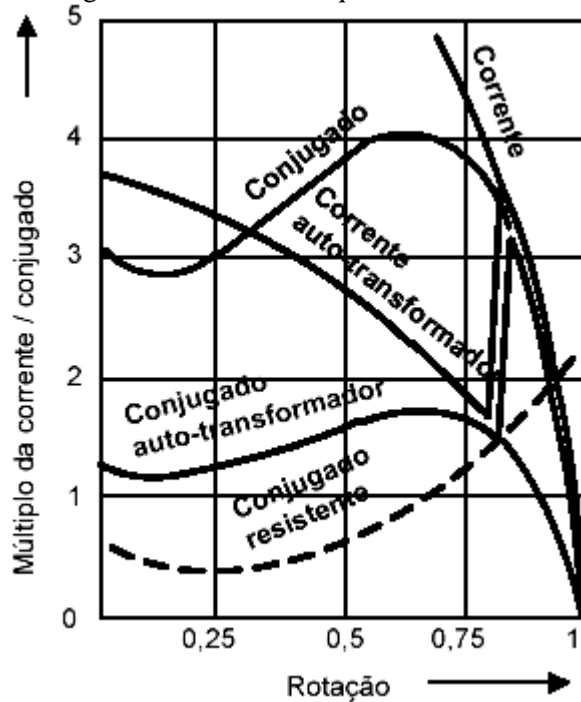
**Demonstração para fórmula de cálculos.**

triângulo.

Nesse caso, o controle da potência ou da corrente é feito, mediante o ajuste de derivações na saída do auto-transformador, em porcentagens normalmente de 65% e 80%; porém, mais outras derivações podem ser previstas, contanto que as condições de utilização o necessitem. Também nesse sentido, quanto maior o

$$I_p = 2,95 \times I_n$$

numero de derivações, menor o desnível de uma derivação à outra quando da comutação e menor o impacto que a carga mecânica sofre, o que virá em benefício da vida útil do equipamento,

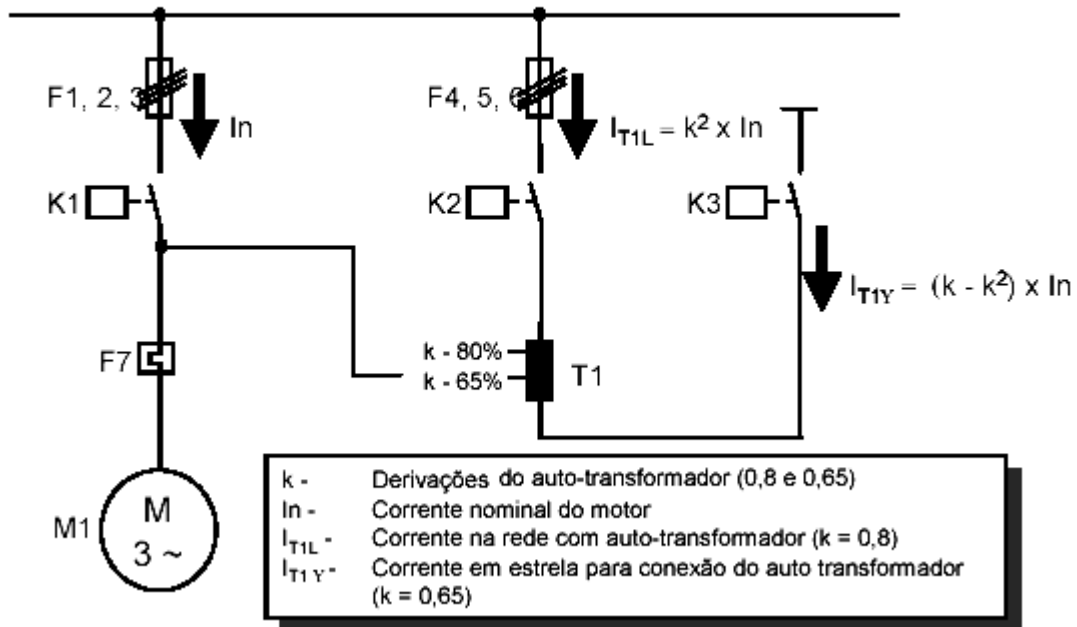


As características de corrente e conjugado ou momento nesse caso são:

- Aplicada no acionamento de máquinas de grande porte que partem com carga parcial
- Alivia o conjugado (torque) de aceleração em base a tensão inicial (reduzida), e conseqüente redução da disponibilidade de potência para alimentação
- Para permitir melhor adequação a partida no acionamento da máquina é parametrizável em tensão inicial (dois níveis a escolher) e em tempo para execução da partida
- Em base a sua composição exige melhor qualidade de supervisão para se obter confiabilidade de serviço
- Aplicável em motores a serem acionados à grande distância, otimizando em especial os condutores.

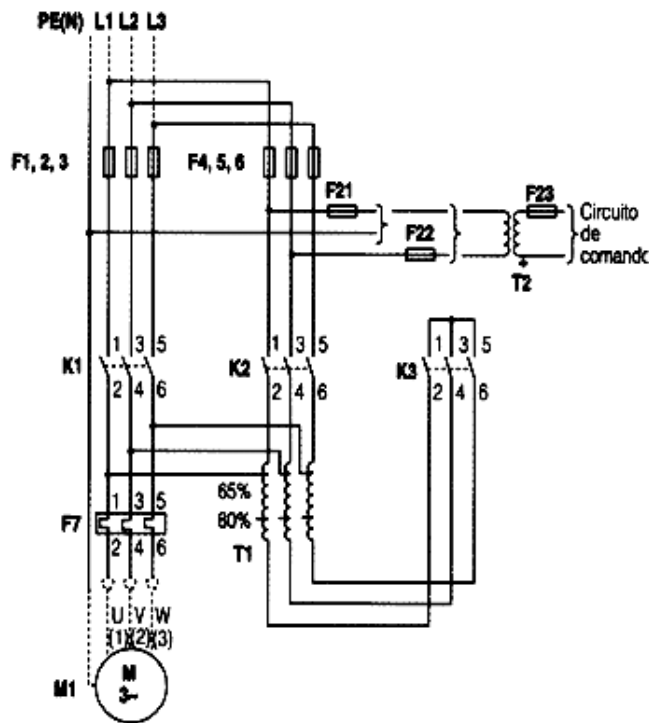
**Unifilar**

Definição dos valores de corrente para especificação dos componentes

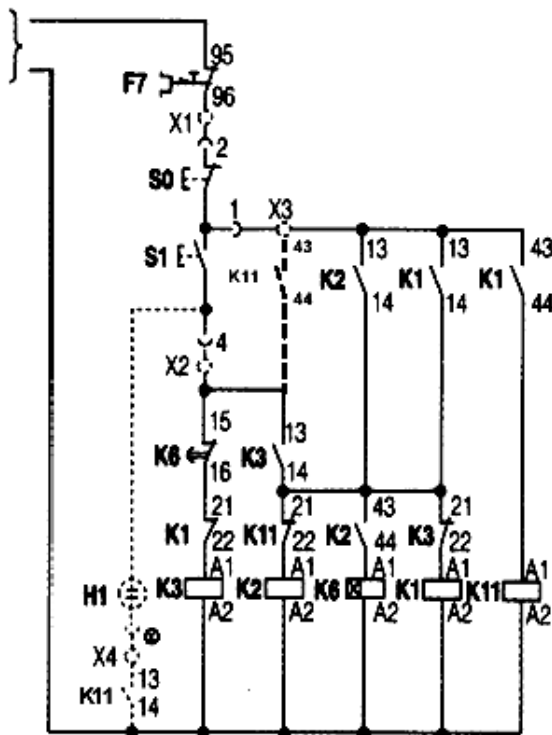


Trifilar

Circuito de potência



Circuito de comando



Com botão de comando duplo liga-desliga 3SA8

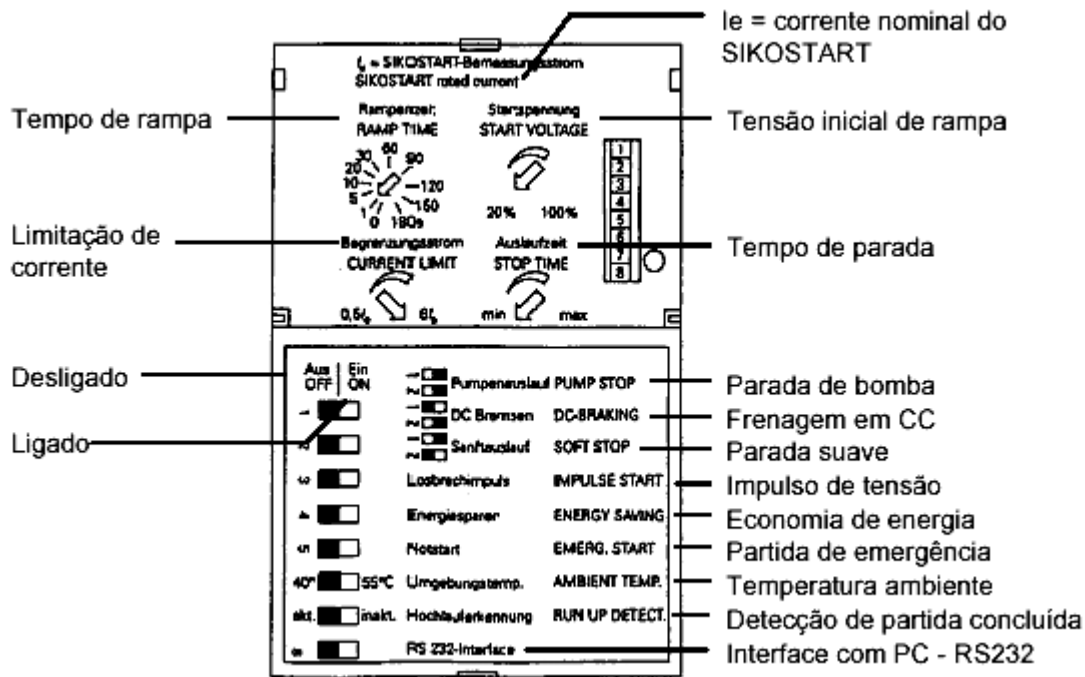
**PARTIDA SUAVE ( SOFT-STARTER ).**

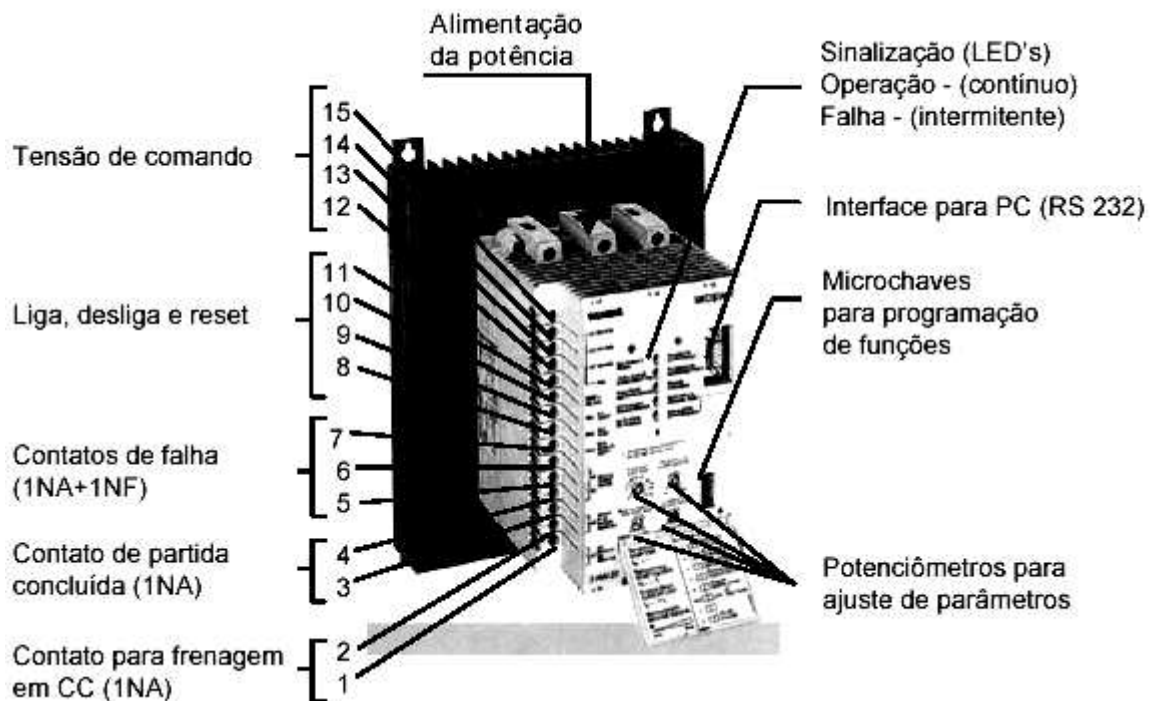
É um dispositivo de manobra ( em base eletrônica ), adequado para partida e parada suave, e frenagem onde não se admitem “trancos” mecânicos. É atualmente mais utilizado em cargas acionadas por motores de potências superiores, operando em categoria de emprego AC-2 e AC-3. Assim, sua aplicação é mais encontrada em ventiladores de grande porte, esteiras transportadoras, bombas, compressores, máquinas com grande momento de inércia de modo geral, e outros semelhantes.

Suas características para especificação são definidas em um programa de simulação em PC e um programa de comunicação para colocação em operação, gerenciamento e manobra em PC.

**Dispositivo de manobra estática para partida e parada suave – SIKOSTART**

Dispositivo e seus componentes.





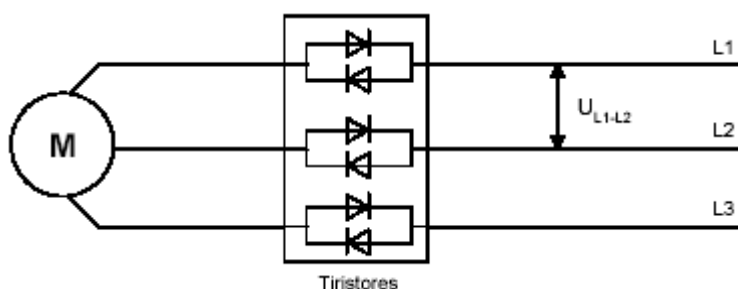
### Princípio de funcionamento.

Neste método de partida, o controle da potência fornecida na fase de partida é feita mediante um escalonamento da fração da tensão de alimentação fornecida a cada instante, em um dado número de semicíclos de tensão, que pode ser ajustado às características desejadas, até o seu valor pleno. Esse programa de escalonamento é executado por meio de um par de tiristores por fase, ligados em anti-paralelo, e que atuam em função de um programa previamente estipulado.

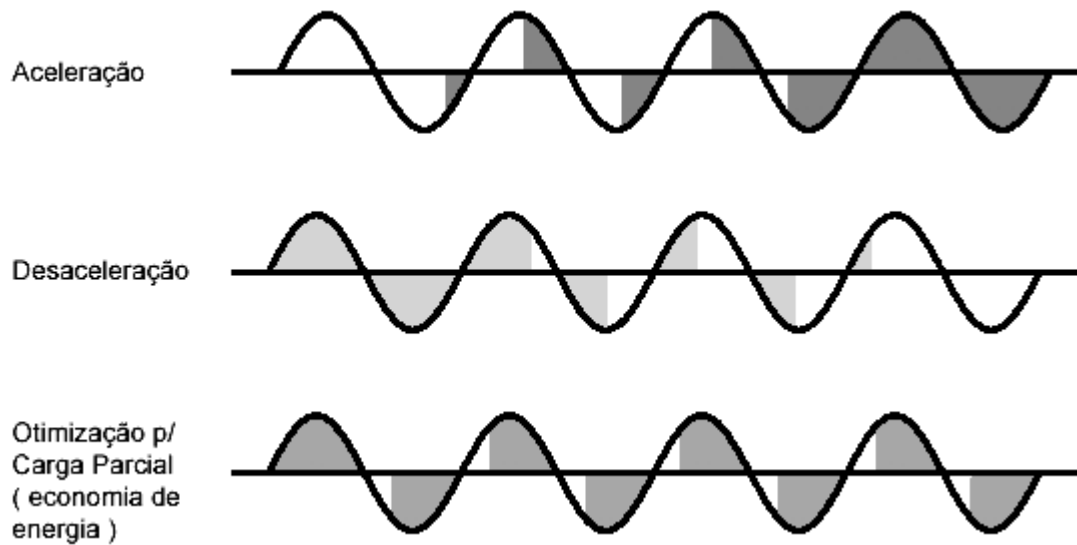
Com esse procedimento, tem-se a possibilidade de partir do estado de repouso e chegar ao de rotação plena, através de uma série de degraus, cuja variação atende plenamente à própria curva de carga.

O que é feito na aceleração, pode ser feito, no sentido inverso, na desaceleração, partindo-se da onda de tensão plena e chegando-se, passo a passo, a interrupção total das ondas de tensão.

As figuras abaixo ilustram esse procedimento.



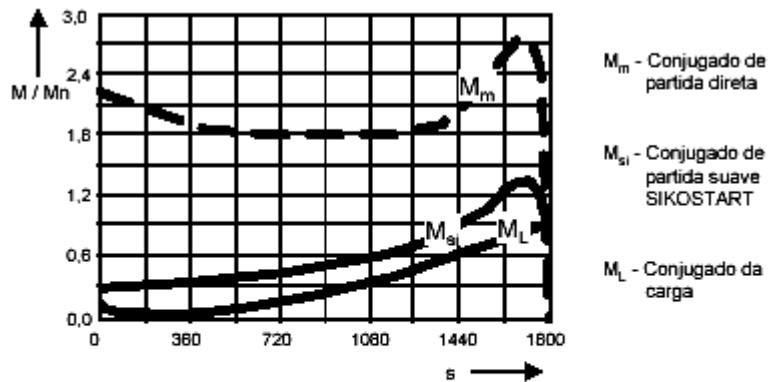
Variação de tensão no motor



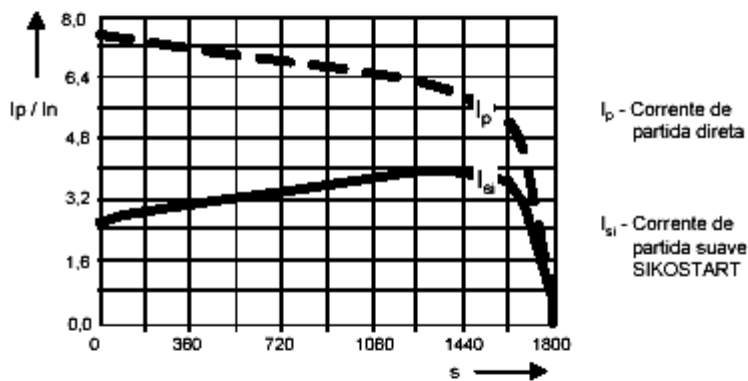
Assim segue seguintes as suas características básicas:

- Aplicada no acionamento de máquinas que partem em vazio e com carga ;
- Permite parametrização de tensão oferecendo uma aceleração progressiva e uniforme da máquina, o que possibilita a redução da potência necessária ;
- A qualidade de supervisão precisa ser de nível mais sofisticado;
- Pela ausência de choques mecânicos ( trancos ), na aceleração da máquina, aumentam consideravelmente os intervalos de manutenção, o que contribui para uma maior VIDA ÚTIL do equipamento, e
- Pelas características básicas, tem substituído a partida por auto-transformador ( compensadora ) com vantagens.

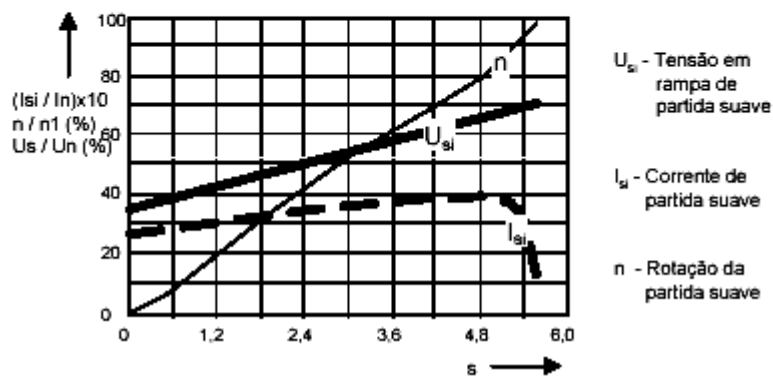
Desenvolvimento do conjugado com a rotação.



Desenvolvimento de corrente com a rotação



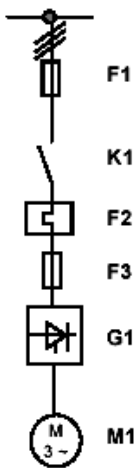
Desenvolvimento de tensão, corrente e rotação no tempo de partida



Assim segue seguintes as suas características básicas:

- Aplicada no acionamento de máquinas que partem em vazio e com carga ;
- Permite parametrização de tensão oferecendo uma aceleração progressiva e uniforme da máquina, o que possibilita a redução da potência necessária ;
- A qualidade de supervisão precisa ser de nível mais sofisticado;
- Pela ausência de choques mecânicos ( trancos ), na aceleração da máquina, aumentam consideravelmente os intervalos de manutenção, o que contribui para uma maior VIDA ÚTIL do equipamento, e

### Coordenação de proteção



F1 - Fusíveis retardados NH para proteção do sistema

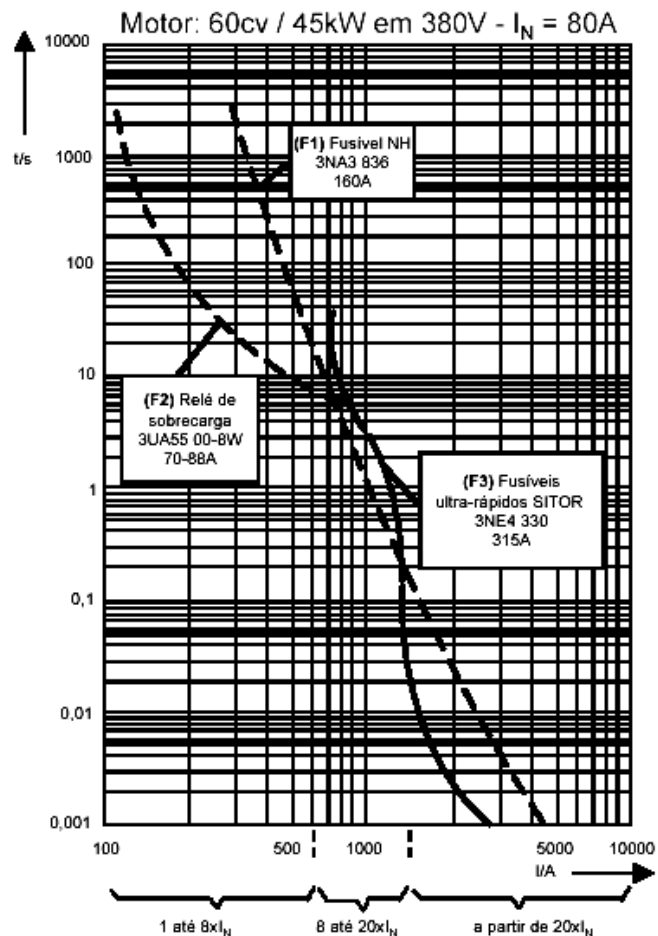
K1 - Contator de alimentação e retaguarda de manobra

F2 - Relé de sobrecarga para proteção do motor

F3 - Fusíveis ultra-rápidos SITOR para proteção de retaguarda da eletrônica de potência

G1 - Dispositivo de manobra estática de partida e parada suave SIKOSTART

M1 - Motor trifásico com rotor em curto-circuito



- Pelas características básicas, tem substituído a partida por auto-transformador ( compensadora ) com vantagens.

**Oscilogramas de corrente e conjugado.**

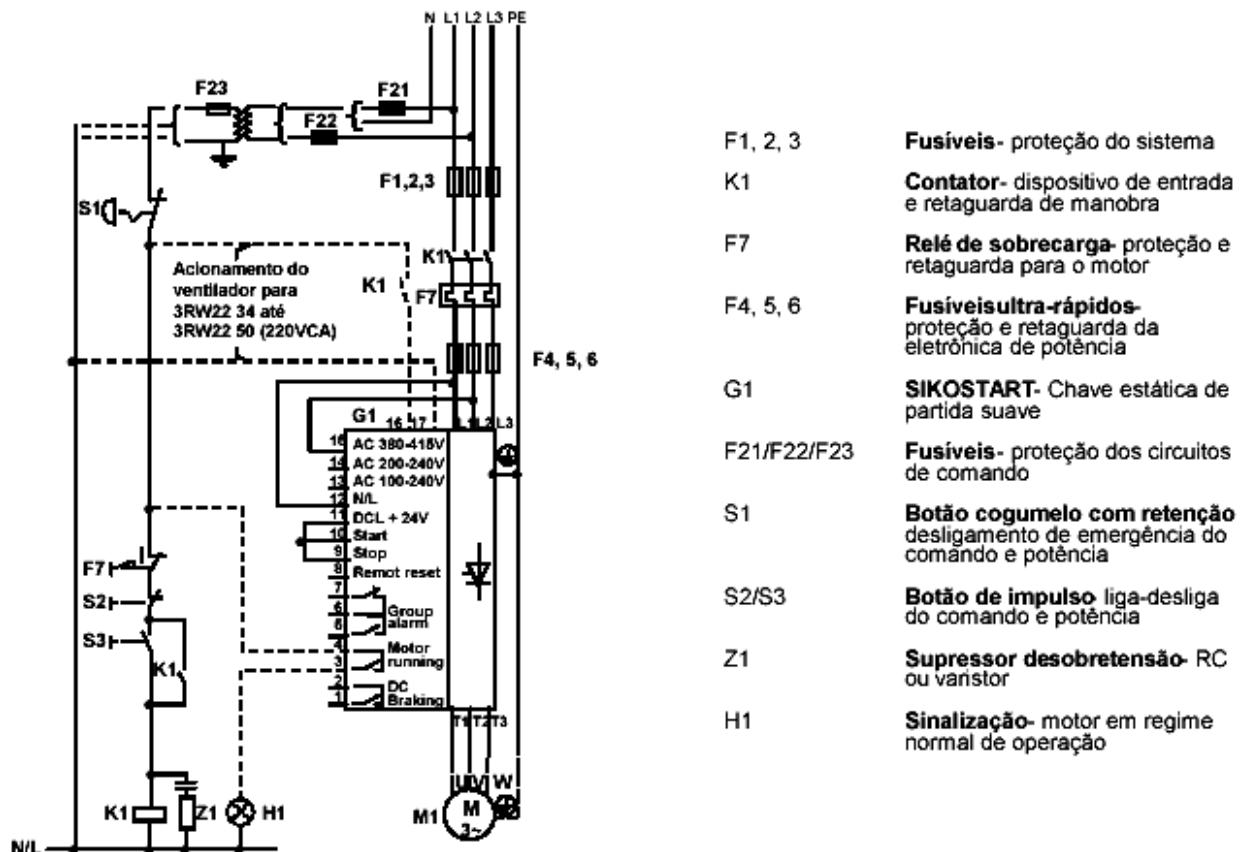
Sempre lembrando a origem da necessidade dos dispositivos de partida, e após sua análise detalhada, vamos ver os resultados obtidos, mediante medições em oscilogramas, conforme representado no que segue.

Observe :

1. Na partida direta, a corrente de partida tem uma intensidade da ordem de até  $8 \cdot I_n$ .
2. No mesmo período da sobrecorrente, tem-se um impacto de conjugado médio que atinge até  $3 \cdot M_n$ , e

**Esquema de ligação.**

Usando contator como dispositivo de entrada



conseqüente rápida fadiga mecânica do material;

3. Já na partida estrela-triângulo, o pico de corrente na ligação estrela ( que é o primeiro ), se reduz a 1/3 do valor anterior, e parcialmente, o conjugado nesse instante. Passada a fase de partida, aparece um pico de corrente quando o dispositivo de partida é comutado para triângulo, mas o correspondente pico de conjugado é de quantidade de energia mecânica bem menor.

3. Usando a partida suave, todo esse processo se distribui ao longo do tempo de partida, evitando as inconveniências anteriores.



- Tanto nos disjuntores quanto nos contatores previstos, já vem a indicação da faixa de ajuste dos relés de sobrecarga. De modo geral, o ajuste se faz no valor da corrente de serviço, e esse valor deve preferencialmente cair do meio para o final ( fundo ) da respectiva faixa de ajuste.
- Os fusíveis máximos indicados são do tipo retardado, que são próprios para motores elétricos. No caso particular da partida suave, a parte de potência é protegida por fusíveis retardados, porém a parte da eletrônica de potência ( tiristores ), por fusíveis ultra-rápidos. Caso contrário, os tiristores não suportarão eventuais sobrecorrentes durante o seu tempo normal de operação.
- A corrente presumida de curto-circuito, indicada, deve ser comparada com o valor existente na instalação a que o dispositivo de partida se destina. No caso de grande divergência, consultar o fabricante dos dispositivos, quanto à necessidade de alguma mudança no critério de escolha do material.

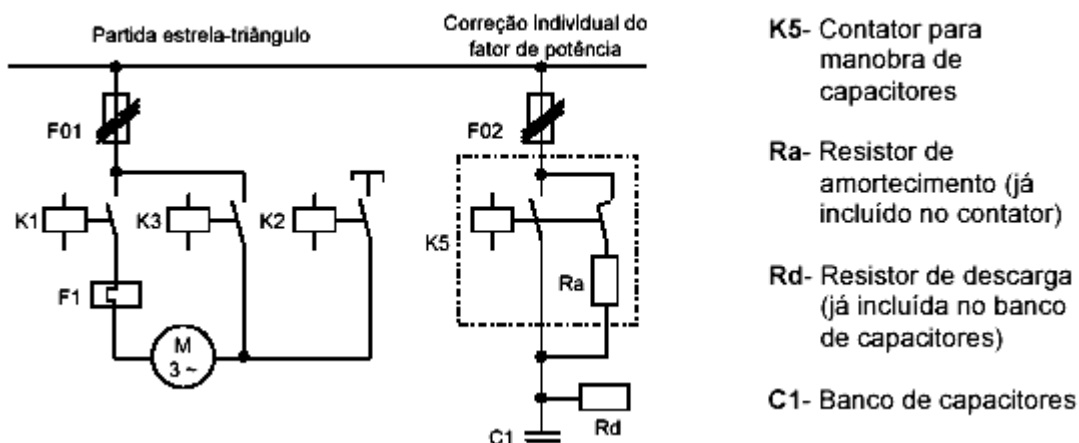
### CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

Pelo formulário básico dado no início desse texto, vimos que o fator de potência é parte da determinação da potência ativa, que se transforma em trabalho útil. Esse fator de potência depende do tipo de carga: são as cargas resistivas que tem seu valor mais elevado ( praticamente igual a unidade ), e cargas indutivas, que tem valores sensivelmente menores ( da ordem de 0,65-0,70 ).

Sabemos que esse fator de potência resulta do defasamento vetorial entre tensão e corrente, e que o defasamento indutivo é contrario ao capacitivo. Portanto, se temos um baixo fator de potência indutivo, podemos compensa-lo sobrepondo à ele um defasamento capacitivo.

Isso, na realidade, se faz, associando motores ( carga indutiva ) com capacitores ( carga capacitiva ). Nesse sentido, para possibilitar uma rápida correção do fator de potência da carga principal ligada, se essa tem baixo fator de potência, podemos utilizar o esquema de ligação de capacitores indicado, para uma compensação individual, que porém não é a única existente. Indicamos ainda uma tabela que possibilita o calculo da potência capacitiva a ser instalada, em função do fator de potência que se quer alcançar. Valores de referência são compreendidos entre 0,95 e 0,98, lembrando que, pela atual legislação da área energética, o valor mínimo é de 0,92.

Esquema de ligação



**Tabela de cálculo da potência capacitiva necessária.**

Fatores de multiplicação para determinar a potência capacitiva ( kvar ) necessária a correção do fator de potência.

Fator de potência na instalação	Valores para cálculo de potência capacitiva ( kvar ) por potência ativa ( kW ) com fator de potência corrigido para						
	0.90	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.70	0.536	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.75	0.398	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.80	0.266	0.421	0.458	0.499	0.547	0.609	0.750
0.85	0.136	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.90	0.000	0.155	0.192	0.233	0.281	0.341	0.484
0.95	0.000	0.000	0.037	0.079	0.126	0.186	0.329
0.96			0.000	0.041	0.089	0.149	0.292
0.97				0.000	0.048	0.108	0.251
0.98					0.000	0.060	0.203

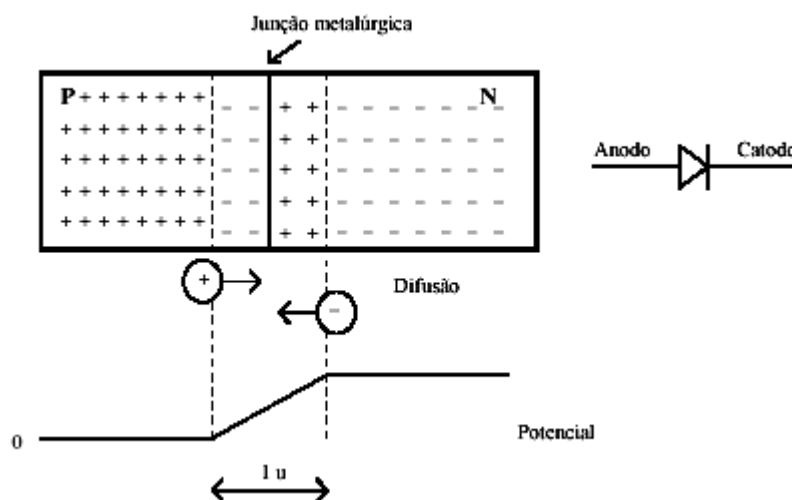
**14. Acionamentos Elétricos:****Eletrônica de Potência:**

A base dos acionamentos elétricos são os dispositivos eletrônicos de Potência. Por isso, vamos analisá-los brevemente:

**Diodos de Potência**

Um diodo semicondutor é uma estrutura P-N que, dentro de seus limites de tensão e decorrente, permite a passagem de corrente em um único sentido. Detalhes de funcionamento, em geral desprezados para diodos de sinal, podem ser significativos para componentes de maior potência, caracterizados por uma maior área (para permitir maiores correntes) e maior comprimento (a fim de suportar tensões mais elevadas). A figura 1.5 mostra, simplificada, a estrutura interna de um diodo.

Aplicando-se uma tensão entre as regiões P e N, a diferença de potencial aparecerá na região de transição, uma vez que a resistência desta parte do semicondutor é muito maior que a do restante do componente (devido à concentração de portadores).



Quando se polariza reversamente um diodo, ou seja, se aplica uma tensão negativa no anodo (região P) e positiva no catodo (região N), mais portadores positivos (lacunas) migram para o lado N, e vice-versa, de modo que a largura da região de transição aumenta, elevando a barreira de potencial.

Por difusão ou efeito térmico, uma certa quantidade de portadores minoritários penetra na região de transição. São, então, acelerados pelo campo elétrico, indo até a

outra região neutra do dispositivo. Esta corrente reversa independe da tensão reversa aplicada, variando, basicamente, com a temperatura.

Se o campo elétrico na região de transição for muito intenso, os portadores em trânsito obterão grande velocidade e, ao se chocarem com átomos da estrutura, produzirão novos portadores, os quais, também acelerados, produzirão um efeito de avalanche. Dado o aumento na corrente, sem redução significativa na tensão na junção, produz-se um pico de potência que destrói o componente.

Uma polarização direta leva ao estreitamento da região de transição e à redução da barreira de potencial. Quando a tensão aplicada superar o valor natural da barreira, cerca de 0,7V para diodos de Si, os portadores negativos do lado N serão atraídos pelo potencial positivo do anodo e vice-versa, levando o componente à condução. Na verdade, a estrutura interna de um diodo de potência é um pouco diferente desta apresentada. Existe uma região N intermediária, com baixa dopagem. O papel desta região é permitir ao componente suportar tensões mais elevadas, pois tornará menor o campo elétrico na região de transição (que será mais larga, para manter o equilíbrio de carga).

Esta região de pequena densidade de dopante dará ao diodo uma significativa característica resistiva quando em condução, a qual se torna mais significativa quanto maior for a tensão suportável pelo componente. As camadas que fazem os contatos externos são altamente dopadas, a fim de fazer com que se obtenha um contato com característica ôhmica e não semi-condutor.

### Diodos Schottky

Quando é feita uma junção entre um terminal metálico e um material semicondutor, o contato tem, tipicamente, um comportamento ôhmico, ou seja, a resistência do contato governa o fluxo da corrente.

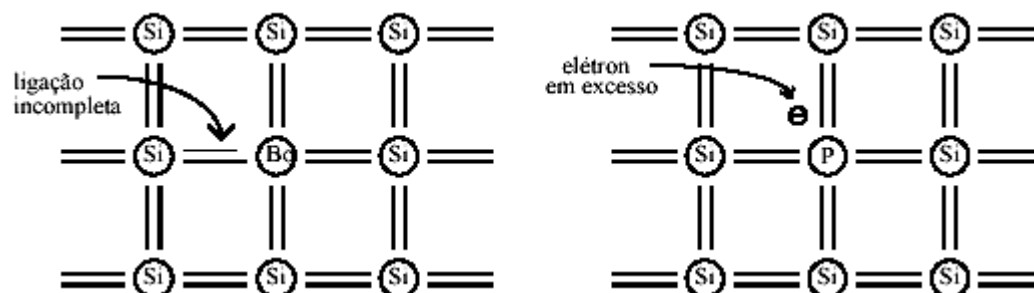
Quando este contato é feito entre um metal e uma região semicondutora com densidade de dopante relativamente baixa, o efeito dominante deixa de ser o resistivo, passando a haver também um efeito retificador. Um diodo Schottky é formado colocando-se um filme metálico em contato direto com um semicondutor, como indicado na figura 1.8. O metal é usualmente depositado sobre um material tipo N, por causa da maior mobilidade dos portadores neste tipo de material. A parte metálica será o anodo e o semicondutor, o catodo.

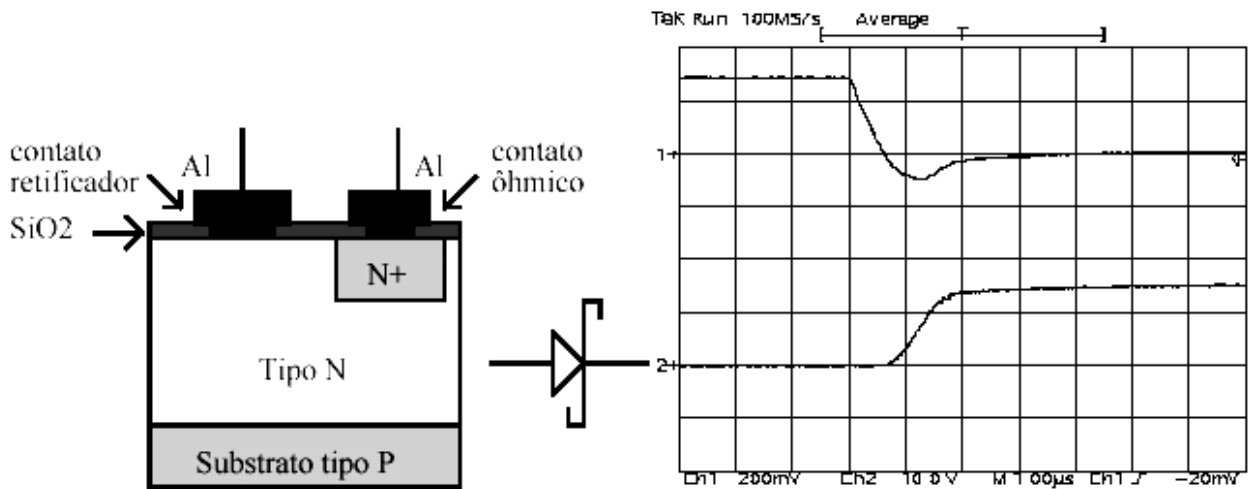
Numa deposição de Al (3 elétrons na última camada), os elétrons do semicondutor tipo N migrarão para o metal, criando uma região de transição na junção.

Note-se que apenas elétrons (portadores majoritários em ambos materiais) estão em trânsito. O seu chaveamento é muito mais rápido do que o dos diodos bipolares, uma vez que não existe carga espacial armazenada no material tipo N, sendo necessário apenas refazer a barreira de potencial (tipicamente de 0,3V). A região N+ tem uma dopagem relativamente alta, a fim de reduzir as perdas de condução, com isso, a máxima tensão suportável por estes diodos é de cerca de 100V. A aplicação deste tipo de diodos ocorre principalmente em fontes de baixa tensão, nas quais as quedas sobre os retificadores são significativas.

Na figura abaixo, tem-se uma forma de onda típica no desligamento do componente.

Note que, diferentemente dos diodos convencionais, assim que a corrente se inverte a tensão começa a crescer, indicando a não existência dos portadores minoritários no dispositivo.





### Tiristor

O nome tiristor engloba uma família de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura de 4 camadas semicondutoras numa sequência p-n-p-n, apresentando um funcionamento biestável.

O tiristor de uso mais difundido é o SCR (Retificador Controlado de Silício), usualmente chamado simplesmente de tiristor. Outros componentes, no entanto, possuem basicamente uma mesma estrutura: LASCR (SCR ativado por luz), também chamado de LTT (Light Triggered Thyristor), TRIAC (tiristor triodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional), GTO (tiristor comutável pela porta), MCT (Tiristor controlado por MOS).

### Princípio de funcionamento

O tiristor é formado por quatro camadas semicondutoras, alternadamente p-n-p-n, possuindo 3 terminais: *anodo* e *catodo*, pelos quais flui a corrente, e a *porta* (ou *gate*) que, a uma injeção de corrente, faz com que se estabeleça a corrente anódica. A figura na página seguinte ilustra uma estrutura simplificada do dispositivo.

Se entre anodo e catodo tivermos uma tensão positiva, as junções J1 e J3 estarão diretamente polarizadas, enquanto a junção J2 estará reversamente polarizada. Não haverá condução de corrente até que a tensão  $V_{ak}$  se eleve a um valor que provoque a ruptura da barreira de potencial em J2.

Se houver uma tensão  $V_{gk}$  positiva, circulará uma corrente através de J3, com portadores negativos indo do catodo para a porta. Por construção, a camada P ligada à porta é suficientemente estreita para que parte destes elétrons que cruzam J3 possuam energia cinética suficiente para vencer a barreira de potencial existente em J2, sendo então atraídos pelo anodo.

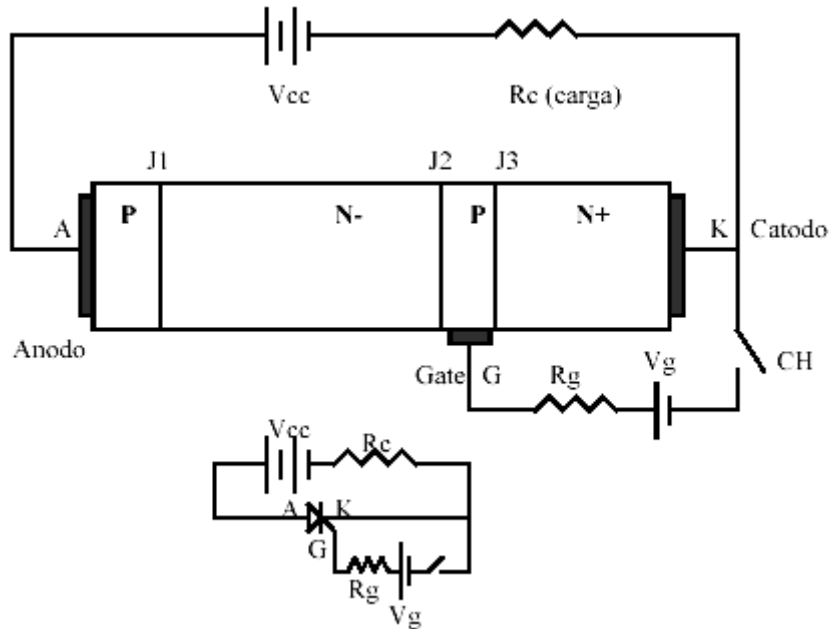
Desta forma, a junção reversamente polarizada tem sua diferença de potencial diminuída e estabelece-se uma corrente entre anodo e catodo, que poderá persistir mesmo na ausência da corrente de porta.

Quando a tensão  $V_{ak}$  for negativa, J1 e J3 estarão reversamente polarizadas, enquanto J2 estará diretamente polarizada. Uma vez que a junção J3 é intermediária a regiões de alta dopagem, ela não é capaz de bloquear tensões elevadas, de modo que cabe à junção J1 manter o estado de bloqueio do componente. É comum fazer-se uma analogia entre o funcionamento do tiristor e o de uma associação de dois transistores.

Quando uma corrente  $I_g$  positiva é aplicada,  $I_{c2}$  e  $I_k$  crescerão. Como  $I_{c2} = I_{b1}$ , T1 conduzirá e teremos  $I_{b2} = I_{c1} + I_g$ , que aumentará  $I_{c2}$  e assim o dispositivo evoluirá até a saturação, mesmo que  $I_g$  seja retirada. Tal efeito cumulativo ocorre se os ganhos dos transistores forem maior que 1. O componente se manterá

em condução desde que, após o processo dinâmico de entrada em condução, a corrente de anodo tenha atingido um valor superior ao limite  $I_L$ , chamado de corrente de "latching".

Para que o tiristor deixe de conduzir é necessário que a corrente por ele caia abaixo do valor mínimo de manutenção ( $I_H$ ), permitindo que se restabeleça a barreira de potencial em J2. Para a comutação do



dispositivo não basta, pois, a aplicação de uma tensão negativa entre anodo e catodo. Tal tensão reversa apressa o processo de desligamento por deslocar nos sentidos adequados os portadores na estrutura cristalina, mas não garante, sozinha, o desligamento. Devido a características construtivas do dispositivo, a aplicação de uma polarização reversa do terminal de gate não permite a comutação do SCR. Este será um comportamento dos GTOs, como se verá adiante.

### **GTO - Gate Turn-Off Thyristor**

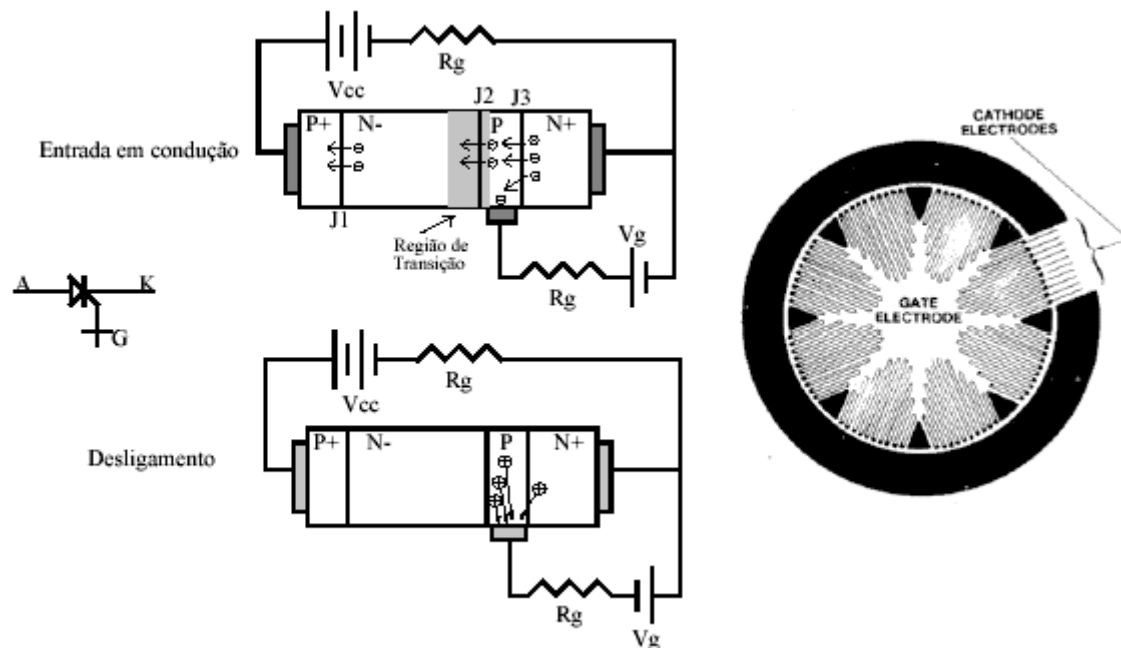
O GTO, embora tenha sido criado no início da década de 60, por problemas de fraco desempenho foi pouco utilizado. Com o avanço da tecnologia de construção de dispositivos semicondutores, novas soluções foram encontradas para aprimorar tais componentes, que hoje ocupam significativa faixa de aplicação, especialmente naquelas de elevada potência, uma vez que estão disponíveis dispositivos para 5000V, 4000A.

#### **Princípio de funcionamento**

O GTO possui uma estrutura de 4 camadas, típica dos componentes da família dos tiristores. Sua característica principal é sua capacidade de entrar em condução e bloquear através de comandos adequados no terminal de gate.

O mecanismo de disparo é semelhante ao do SCR: supondo-o diretamente polarizado, quando a corrente de gate é injetada, circula corrente entre gate e catodo. Grande parte de tais portadores, como a camada de gate é suficientemente fina, desloca-se até a camada N adjacente, atravessando a barreira de potencial e sendo atraídos pelo potencial do anodo, dando início à corrente anódica. Se esta corrente se mantiver acima da corrente de manutenção, o dispositivo não necessita do sinal de gate para manter-se conduzindo. A figura abaixo mostra o símbolo do GTO e uma representação simplificada dos processos de entrada e saída de condução do componente.

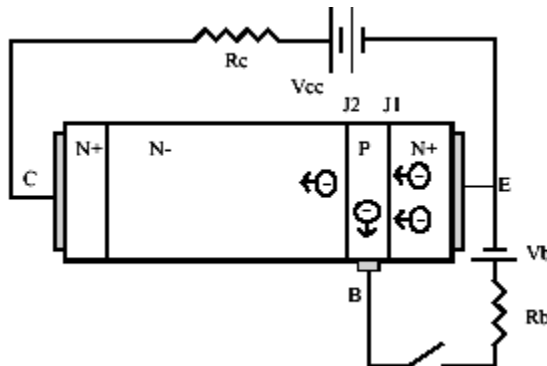
A aplicação de uma polarização reversa na junção gate-catodo pode levar ao desligamento do GTO. Portadores livres (lacunas) presentes nas camadas centrais do dispositivo são atraídos pelo gate, fazendo com que seja possível o restabelecimento da barreira de potencial na junção J2.



### Transistor Bipolar de Potência (TBP)

#### Princípio de funcionamento

A figura abaixo mostra a estrutura básica de um transistor bipolar.



A operação normal de um transistor é feita com a junção J1 (B-E) diretamente polarizada, e com J2 (B-C) reversamente polarizada.

No caso NPN, os elétrons são atraídos do emissor pelo potencial positivo da base. Esta camada central é suficientemente fina para que a maior parte dos portadores tenha energia

cinética suficiente para atravessá-la, chegando à região de transição de J2, sendo, então, atraídos pelo potencial positivo do coletor.

O controle de  $V_{be}$  determina a corrente de base,  $I_b$ , que, por sua vez, se relaciona com  $I_c$  pelo ganho de

corrente do dispositivo.

Na realidade, a estrutura interna dos TBPs é diferente. Para suportar tensões elevadas, existe uma camada intermediária do coletor, com baixa dopagem, a qual define a tensão de bloqueio do componente.

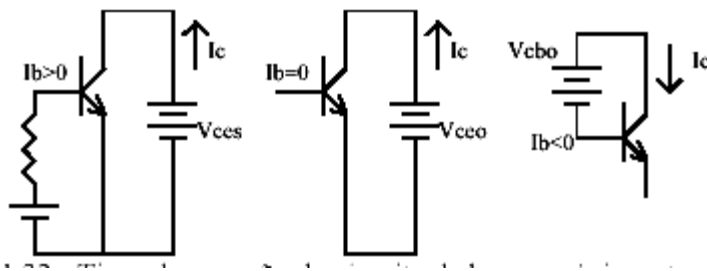
A figura 1.31 mostra uma estrutura típica de um transistor bipolar de potência. As bordas arredondadas da região de emissor permitem uma homogeneização do campo elétrico, necessária à manutenção de ligeiras polarizações reversas entre base e emissor. O TBP não sustenta tensão no sentido oposto porque a alta dopagem do emissor provoca a ruptura de J1 em baixas tensões (5 a 20V).

O uso preferencial de TBP tipo NPN se deve às menores perdas em relação aos PNP, o que ocorre por causa da maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas, reduzindo, principalmente, os tempos de comutação do componente.

### Limites de tensão

A tensão aplicada ao transistor encontra-se praticamente toda sobre a junção J2 a qual, tipicamente, está reversamente polarizada. Existem limites suportáveis por esta junção, os quais dependem principalmente da forma como o comando de base está operando, conforme se vê nas figuras abaixo. Com o transistor conduzindo ( $I_b > 0$ ) e operando na região ativa, o limite de tensão  $V_{ce}$  é  $V_{ces}$  o qual, se atingido, leva o dispositivo a um fenômeno chamado de primeira ruptura.

O processo de primeira ruptura ocorre quando, ao se elevar a tensão  $V_{ce}$ , provoca-se um fenômeno de avalanche em J2. Este acontecimento não danifica, necessariamente, o dispositivo. Se, no entanto, a corrente  $I_c$  se concentrar em pequenas áreas, o sobreaquecimento produzirá ainda mais portadores e destruirá o componente (segunda ruptura).



Com o transistor desligado ( $I_b = 0$ ) a tensão que provoca a ruptura da junção J2 é maior, elevando-se ainda mais quando a corrente de base for negativa. Isto é uma indicação interessante que, para transistores submetidos a valores elevados de tensão, o estado desligado deve ser acompanhado de uma polarização negativa da base.

### MOSFET

Enquanto o TBP foi inventado no final dos anos 40, já em 1925 fora registrada uma patente (concedida em 1930 a Julius Edgard Lilienfeld) que se referia a “um método e um dispositivo para controlar o fluxo de uma corrente elétrica entre dois terminais de um sólido condutor”. Tal patente, que pode ser considerada a precursora dos Transistores de Efeito de Campo, no entanto, não redundou em um componente prático, uma vez que não havia, então, tecnologia que permitisse a construção dos dispositivos. Isto se modificou nos anos 60, quando surgiram os primeiros FETs, mas ainda com limitações importantes em termos de características de chaveamento. Nos anos 80, com a tecnologia MOS, foi possível construir dispositivos capazes de comutar valores significativos de corrente e tensão, em velocidade superior ao que se obtinha com os TBP.

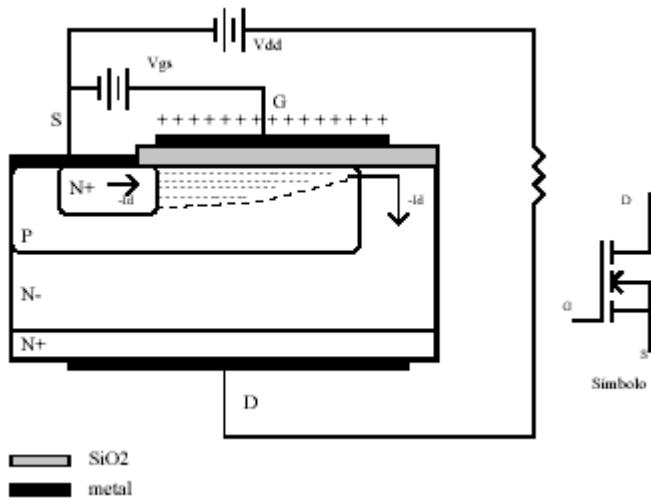
#### Princípio de funcionamento (canal N)

O terminal de gate é isolado do semiconductor por  $\text{SiO}_2$ . A junção PN- define um diodo entre Source e Drain, o qual conduz quando  $V_{ds} < 0$ . A operação como transistor ocorre quando  $V_{ds} > 0$ . A figura 1.49 mostra a estrutura básica do transistor.

Quando uma tensão  $V_{gs} > 0$  é aplicada, o potencial positivo no gate repele as lacunas na região P, deixando uma carga negativa, mas sem portadores livres. Quando esta tensão atinge um certo limiar ( $V_{th}$ ), elétrons livres (gerados principalmente por efeito térmico) presentes na região P são atraídos e formam um canal N dentro da região P, pelo qual torna-se possível a passagem de corrente entre D e S. Elevando  $V_{gs}$ , mais portadores são atraídos, ampliando o canal, reduzindo sua resistência ( $R_{ds}$ ), permitindo o aumento de  $I_d$ . Este comportamento caracteriza a chamada "região resistiva".

A passagem de  $I_d$  pelo canal produz uma queda de tensão que leva ao seu afunilamento, ou seja, o canal é mais largo na fronteira com a região  $N^+$  do que quando se liga à região  $N^-$ . Um aumento de  $I_d$  leva a uma maior queda de tensão no canal e a um maior afunilamento, o que conduziria ao seu colapso e à extinção da corrente! Obviamente o fenômeno tende a um ponto de equilíbrio, no qual a corrente  $I_d$  se mantém constante para qualquer  $V_{ds}$ , caracterizando a região ativa do MOSFET. A figura abaixo mostra a característica estática do MOSFET, Uma pequena corrente de gate é necessária apenas para carregar e descarregar as capacitâncias de entrada do transistor. A resistência de entrada é da ordem de  $10^{12}$  ohms.

Estes transistores, em geral, são de canal N por apresentarem menores perdas e maior velocidade de comutação, devido à maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas.



**IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**

O IGBT alia a facilidade de acionamento dos MOSFET com as pequenas perdas em condução dos TBP. Sua velocidade de chaveamento, em princípio semelhante à dos transistores bipolares, tem crescido nos últimos anos, permitindo operação em dezenas de kHz, nos componentes para correntes na faixa de algumas dezenas de Ampéres.

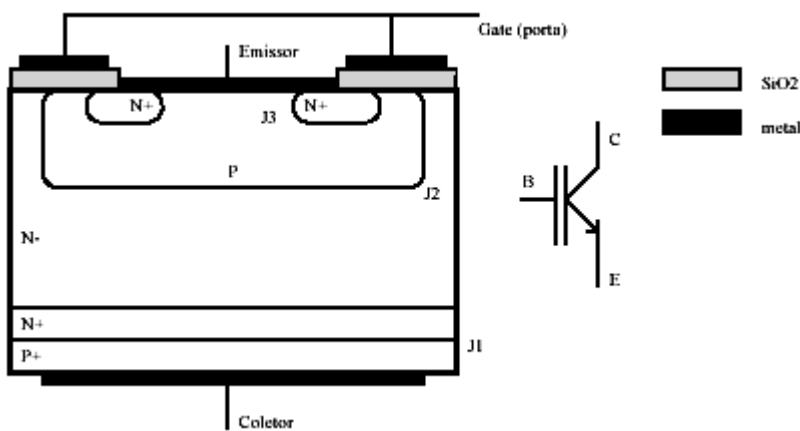
**Princípio de funcionamento**

A estrutura do IGBT é similar à do MOSFET, mas com a inclusão de uma camada P+ que forma o coletor do IGBT, como se vê na figura abaixo. Em termos simplificados pode-se analisar o IGBT como um MOSFET no qual a região N- tem sua condutividade modulada pela injeção de portadores minoritários (lacunas), a partir da região P+, uma vez que J1 está diretamente polarizada. Esta maior condutividade produz uma menor queda de tensão em comparação a um MOSFET similar.

O controle de componente é análogo ao do MOSFET, ou seja, pela aplicação de uma polarização entre gate e emissor. Também para o IGBT o acionamento é feito por tensão. A máxima tensão suportável é determinada pela junção J2 (polarização direta) e por J1 (polarização reversa). Como J1 divide 2 regiões muito dopadas, conclui-se que um IGBT não suporta tensões elevadas quando polarizado reversamente.

Os IGBTs apresentam um tiristor parasita. A construção do dispositivo deve ser tal que evite o acionamento deste tiristor, especialmente devido às capacitâncias associadas à região P, a qual relaciona-se

à região do gate do tiristor parasita. Os modernos componentes não apresentam problemas relativos a este elemento indesejado.



**Características de chaveamento**

A entrada em condução é similar ao MOSFET, sendo um pouco mais lenta a queda da tensão  $V_{ce}$ , uma vez que isto depende da chegada dos portadores vindos da região P+. Para o desligamento, no entanto, tais portadores devem ser retirados. Nos TBPs isto se dá pela drenagem dos portadores via base, o que não é possível nos IGBTs, devido ao acionamento isolado. A solução encontrada foi a inclusão de uma camada N+, na qual a taxa de recombinação é bastante mais elevada do que na região N-. Desta forma, as lacunas presentes em N+ recombinam-se com muita rapidez, fazendo com que, por difusão, as lacunas existentes na região N- refluem, apressando a extinção da carga acumulada na região N-, possibilitando o restabelecimento da barreira de potencial e o bloqueio do componente.

***Alguns critérios de seleção entre transistores***

Um primeiro critério é o dos limites de tensão e de corrente. Os MOSFET possuem uma faixa mais reduzida de valores, ficando, tipicamente entre: 100V/200A e 1000V/20A.

Já os TBP e IGBT atingem potências mais elevadas, indo até 1200V/500A. Tais limites, especialmente para os IGBTs têm se ampliado rapidamente em função do intenso trabalho de desenvolvimento que tem sido realizado.

Como o acionamento do IGBT é muito mais fácil do que o do TBP, seu uso tem sido crescente, em detrimento dos TBP.

Outro importante critério para a seleção refere-se às perdas de potência no componente. Assim, aplicações em alta frequência (acima de 50kHz) devem ser utilizados MOSFETs. Em frequências mais baixas, qualquer dos 3 componentes podem responder satisfatoriamente.

No entanto, as perdas em condução dos TBPs e dos IGBTs são sensivelmente menores que as dos MOSFET.

Como regra básica: em alta frequência: MOSFET em baixa frequência: IGBT

***MCT - Mos-Controlled Thyristor***

MCT (MOS-Controlled Thyristor) é um novo tipo de dispositivo semicondutor de potência que associa as capacidades de densidade de corrente e de bloqueio de tensão típicas dos tiristores, com um controle de entrada e de saída de condução baseado em dispositivos MOS. Isto é, enquanto um GTO tem o gate controlado em corrente, o MCT opera com comandos de tensão.

Os MCTs apresentam uma facilidade de comando muito superior aos GTOs.

Relembre-se o baixo ganho de corrente que um GTO apresenta no desligamento, exigindo um circuito de comando relativamente complexo. No entanto, os MCTs ainda (1995) não atingiram níveis de tensão e de corrente comparáveis aos dos GTOs, estando limitados a valores da ordem de 2000V e 600A.

O fato do MCT ser construído por milhares de pequenas células, muito menores do que as células que formam os GTOs, faz com que, para uma mesma área semicondutora, a capacidade de corrente dos MCTs seja menor do que um GTO equivalente. Mas esta é uma limitação tecnológica atual, associada à capacidade de construir-se maiores quantidades de células com certeza de funcionamento correto.

**Princípio de funcionamento**

Considerando o modelo de 2 transistores para um tiristor, um MCT pode ser representado como mostrado na figura abaixo. Nesta figura também se mostra uma seção transversal de uma célula do dispositivo. Um componente é formado pela associação em paralelo de milhares de tais células construídas numa mesma pastilha.

Em um MCT de canal P (P-MCT) o MOSFET responsável pela entrada em condução do tiristor (on-FET) é também de canal P, sendo levado à condução pela aplicação de uma tensão negativa no terminal de gate. Estando o anodo positivo, a condução do on-FET realiza uma injeção de portadores na base do transistor NPN, levando o componente à condução.

Uma vez que o componente é formado pela associação de dezenas de milhares de células, e como todas elas entram em condução simultaneamente, o MCT possui excelente capacidade de suportar elevada taxa de variação de corrente.

O MCT permanecerá em condução até que a corrente de anodo caia abaixo do valor da corrente de manutenção (como qualquer tiristor), ou então até que seja ativado o off-FET, o que se faz pela aplicação de uma tensão positiva no gate.

A condução do off-FET, ao curto-circuitar a junção base-emissor do transistor PNP (é possível também uma estrutura que curto-circuita as junções base-emissor de ambos os transistores), reduz o ganho de corrente para um valor menor do que 1, levando ao bloqueio do MCT. A queda de tensão deve ser menor que  $V_{be}$ .

O MCT não apresenta o efeito Miller, de modo que não se observa o patamar de tensão sobre o gate, o qual pode ser modelado apenas como uma capacitância. Esta capacidade de desligamento está associada a uma intensa interdigitação entre o off-FET e as junções, permitindo absorver portadores de toda superfície condutora do anodo (e do catodo).

Assim como um GTO assimétrico, o MCT não bloqueia tensão reversa acima de poucas dezenas de volts, uma vez que as camadas n+ ligadas ao anodo curto-circuitam a junção J1, e a junção J3, por estar associada a regiões de dopagem elevada, não tem capacidade de sustentar tensões mais altas. É possível, no entanto, fazê-los com bloqueio simétrico, também sacrificando a velocidade de chaveamento.

O sinal de gate deve ser mantido, tanto no estado ligado quanto no desligado, a fim de evitar comutações (por "latch-down" ou por  $dv/dt$ ) indesejáveis.

### **Aplicações da Eletrônica de Potência:**

Os sistemas de acionamento encontrados na industria vão desde os acionamentos elétricos simples como chaves de partida à contator como:

- Partida direta;
- Partida estrela-triângulo;
- Partida compensadora

Ou os acionamentos podem ser eletrônicos como:

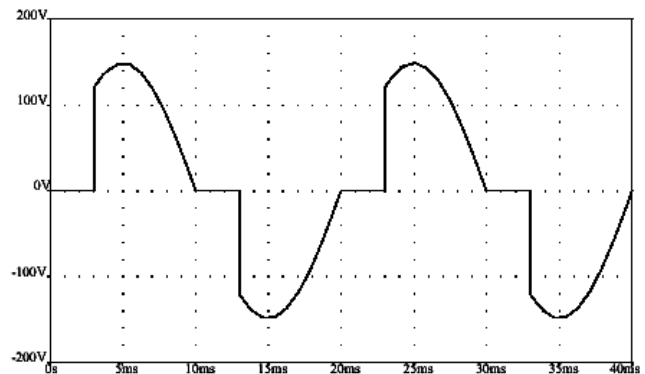
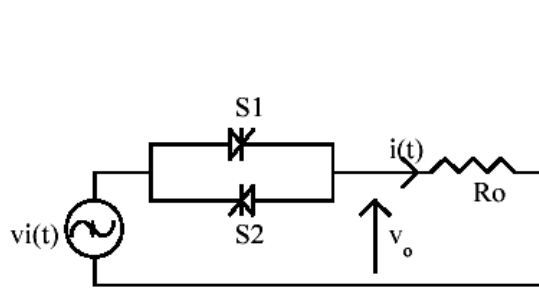
- Soft-Start;
- Inversores de frequência;
- Servoconversores.

### **Soft-Start:**

São chaves eletrônicas que atuam na partida dos motores elétricos. Elas promovem uma aceleração linear do motor evitando os picos de partida e a aceleração brusca dos motores. Alguns modelos também atuam na frenagem, não permitindo a parada brusca dos motores. Por serem eletrônicas, exibem uma série de parâmetros, tais como tempo de aceleração máximo, tensão mínima de partida, além de algumas funções de proteção dos motores. Seu princípio de atuação é o recortamento da senoide que alimenta o motor, através do controle do ângulo de disparo do SCR ou TRIAC. A figura abaixo ilustra o efeito do corte da tensão por um SCR, sob uma carga.

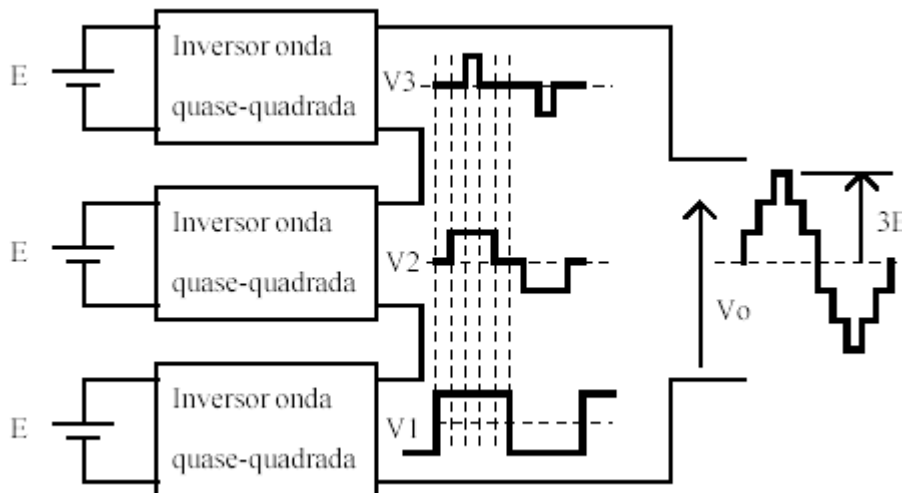
Em regime, a atuação da SoftStart limita-se a controlar o FP do motor, se ela dispuser desta funcionalidade.

Para correta especificação, necessita-se conhecer o tipo de curva de carga que se pretende acelerar ou frear, ou seja, uma carga de conjugado constante, como guindastes, ou conjugado linear como esteiras ou ainda conjugado quadrático como bombas e ventiladores e outras possibilidades.

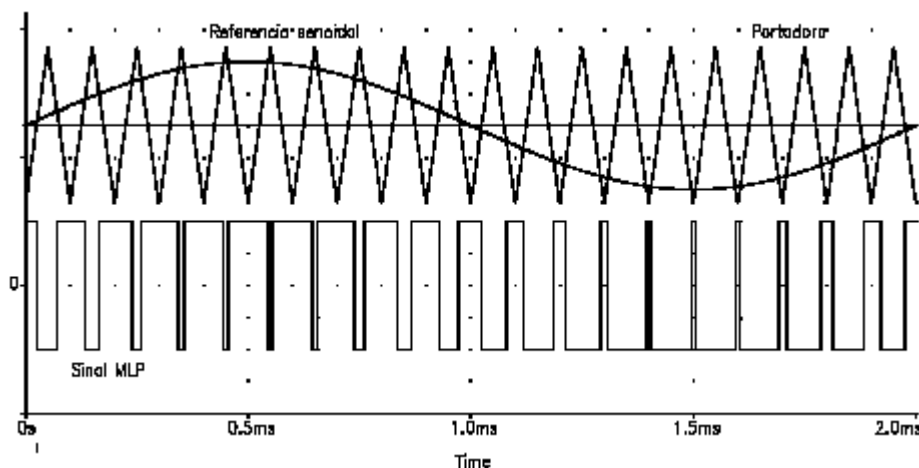


### Inversores de frequência:

São mais sofisticados que os anteriores. O inversor pode atuar tanto na partida quanto em regime. Pode variar a velocidade do motor de uma ampla gama de valores, sendo tudo isso parametrizável.



multinível. A figura abaixo ilustra isto.



Com relação a forma de controle do motor, as técnicas dividem-se em:

- **Controle Escalar;**
- **Controle Vetorial.**

Seu princípio de funcionamento está no fato de que a velocidade síncrona do motor é função da frequência de alimentação. Logo, o inversor de frequência deve controlar a frequência do sinal que alimenta o motor. Para fazer ele retificar a corrente alternada da rede e reconstrói o sinal alternado através de uma técnica chamada de modulação quadrada

Esta técnica produz uma onda quadrada muito distorcida uma outra técnica mais avançada é o PWM, ou modulação por largura de pulso. O resultado é como o da figura ao lado.

Esta técnica gera sinais muito menos distorcidos que a forma anterior por isso é a técnica preferida para acionamento de motores.

**Controle Escalar:**

É o método mais simples, onde a frequência e a tensão são ajustadas de forma a manter a relação V/F constante, ou seja, fluxo aproximadamente constante para manter o torque constante. É um tipo de controle em malha aberta. O seu sucesso depende do tipo de carga que o motor aciona, principalmente da curva de conjugado de carga(constante, linear, quadrático, etc..).

É o tipo de acionamento usado onde não há fortes acelerações e desacelerações envolvidas, ou seja não é controle para servomotores.

**Controle Vetorial:**

É um tipo de controle bem mais caro e complexo. Ele decompõe a corrente em suas componentes Id e Iq (Eixo direto e Quadratura). Dessa forma o motor AC passa a ser visto como um motor de CC e o controle de torque e velocidade pode ser feito de forma mais precisa. Para o usuário, esta operação é totalmente transparente, mas os benefícios são claros como estabilidade no controle, capacidade de enfrentar variações bruscas de velocidade e torque entre outros.

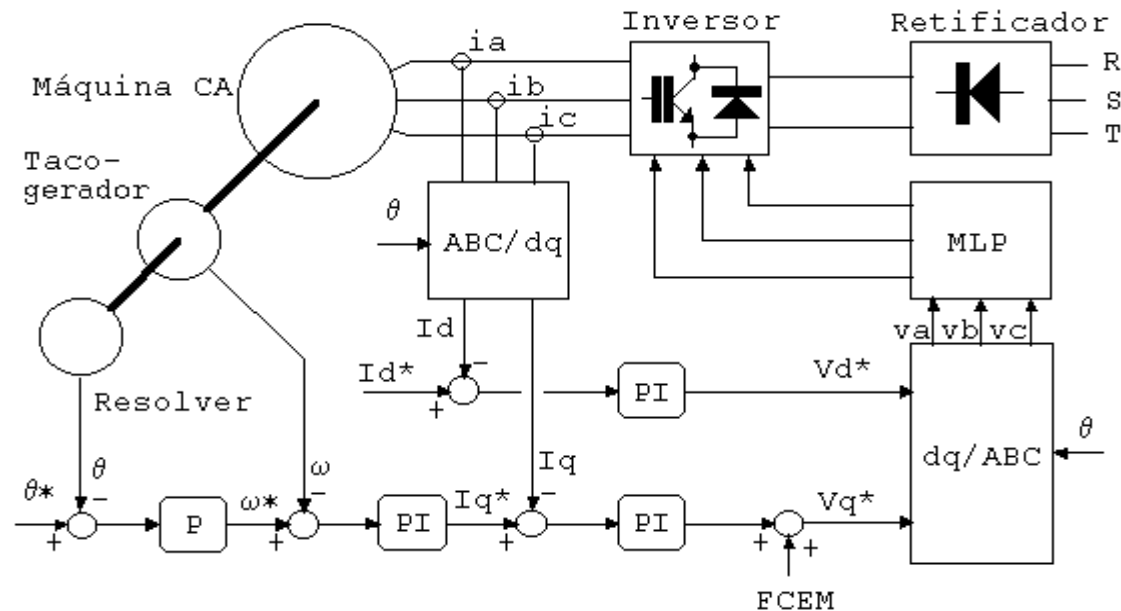
Normalmente são do tipo realimentado, necessitando assim de um encoder ou resolver e as vezes, de um tacogerador para implementar o controle, embora já existam versões de controle vetorial sem realimentação, mas com performance menor.

Com estas sofisticações é razoável que o custo seja bem maior, entretanto, vem se reduzindo ao longo dos anos. A tendência é o crescimento cada vez maior do controle vetorial.

**Servoconversores:**

São inversores de frequência vetoriais otimizados para servomotores CA.

A figura abaixo ilustra o funcionamento de uma máquina CA e um servoconversor.



Perceba que este servoconversor possui uma realimentação de velocidade, proporcionada pelo sinal do tacogerador, além do sinal de posição do Resolver.

**Bibliografia:**

- Cadernos Técnicos da Siemens do Brasil
- Cadernos Técnicos da Allen-Bradley;
- Cadernos Técnicos da WEG do Brasil;
- Apostila de Eletrônica de Potência do Prof. Antenor da Unicamp
- Apostila de Dispositivos Eletromagnéticos do Prof. Castro
- Apostila de Eletrotécnica Básica do Prof. Fujio Sato
- Universidade do Porto- Portugal
- Apostila do Curso de Eletrotécnica da USP