

Edgard Gonçalves Cardoso — 2º termo — 05/02/2007 —

Eletrônica de Potência

Curso Técnico em Mecatrônica - Eletrônica de Potência

© SENAI-SP, 2003

Trabalho organizado e atualizado a partir de conteúdos extraídos da Intranet por Meios Educacionais da Gerência de Educação e CFPs 1.01, 1.09, 1.23, 3.01, 4.02, 5.01 e 6.01 da Diretoria Técnica do SENAI-SP.

Equipe responsável

Coordenação	Airton Almeida de Moraes
Seleção de conteúdos e elaboração dos ensaios	André Tritiack de Farias
Capa	José Joaquim Pecegueiro

Material para validação

Críticas e sugestões: meiosedu@sp.senai.br

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial Departamento Regional de São Paulo Av. Paulista, 1313 - Cerqueira César São Paulo - SP CEP 01311-923
Telefone	(0XX11) 3146-7000
Telefax	(0XX11) 3146-7230
SENAI on-line	0800-55-1000
E-mail	senai@sp.senai.br
Home page	http://www.sp.senai.br

Sumário

Sistema trifásico	5
Transformador trifásico	19
Motor de corrente alternada	23
Fusíveis industriais	39
Seccionadora	49
Contator	55
Inversores	71
Sistemas de partida	121
Máquinas de corrente contínua	137
Tiristores retificador controlador de silício SCR	153
Transistor bipolar com porta isolada	171
Tiristor com desligamento pelo gatilho GTO	173
Transistor unijunção	177
Sistemas de disparo usando o UJT	199
Circuito de disparo TCA 785	201
Retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva	219
Retificador totalmente controlado bidirecional com carga resistiva e indutiva	231
Retificador trifásico bidirecional não controlado	249
Retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva	255
Verificar o funcionamento de um SCR	267
Verificar o funcionamento de um SCR com divisor de tensão	269
Verificar o funcionamento do diodo schockey	271
Verificar o funcionamento do triac com fonte CC	273
Verificar o funcionamento do triac em CA	275
Verificar o funcionamento do diac	277
Verificar o funcionamento do UJT	279
Verificar o funcionamento do TCA 785	281
Disparar SRC com UJT	285
Montar circuito para controle de iluminação	287
Montar circuito para controle automático de iluminação	289
Montar um retificador monofásico semi-controlado	291
Montar um retificador monofásico controlado	295
Montar um retificador trifásico controlado em ponte	299
Referências bibliográficas	303

2

Sistema trifásico

Aqui estudaremos o princípio da geração da corrente alternada trifásica, bem como o comportamento da corrente nos sistemas trifásicos. Esse conhecimento é muito importante, porque esse sistema é utilizado na geração de energia elétrica e na sua distribuição.

Para aprender esses conteúdos com mais facilidade é necessário ter conhecimentos prévios sobre corrente alternada, funcionamento do gerador monofásico e defasagem.

Geração de tensão e corrente alternadas trifásicas

A geração de tensão e corrente alternadas é feita pelo gerador. Gerador é uma máquina elétrica que transforma energia mecânica em energia elétrica com a ajuda da força magnética.

O gerador de tensão trifásica é constituído por um ímã indutor que gira no centro de um conjunto de três bobinas colocadas a 120° uma da outra, com as seguintes características:

- mesma frequência angular, ou seja, mesma velocidade angular;
- mesmo valor eficaz;
- fases iniciais defasadas entre si 120° .

Geração de energia elétrica trifásica

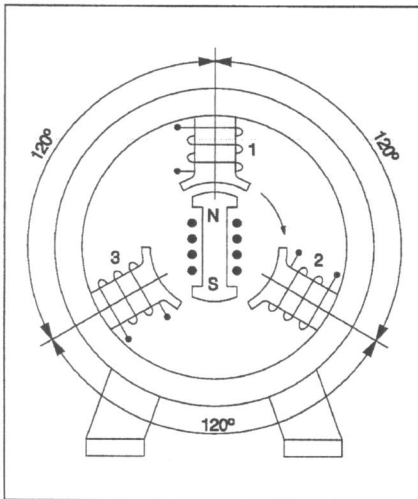
Os geradores de eletricidade podem produzir corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). A corrente contínua é pouco usada devido às dificuldades para aumentar ou diminuir os valores de tensão e corrente.

A corrente alternada, por sua vez, permite aumentar ou diminuir os valores de corrente o que é feito por meio de transformadores.

Além disso, a corrente alternada facilita bastante a transmissão e a distribuição de energia elétrica desde a usina geradora até os consumidores.

No Brasil, a energia elétrica é gerada em corrente alternada no sistema trifásico, na frequência de 60 Hz.

Nesse sistema, utiliza-se um gerador de CA, constituído por um indutor (rotor) que gira no centro de um sistema fixo de três bobinas (estator) colocadas a 120° uma da outra.

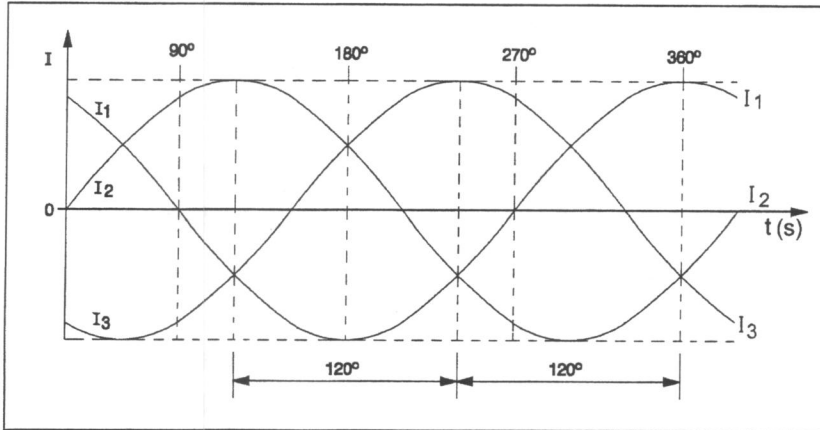


Um ciclo completo de corrente alternada corresponde a 360° , ou seja, uma volta completa do rotor.

Por isso, as três correntes alternadas monofásicas produzidas por um gerador trifásico estão defasadas entre si de 120° elétricos ou $1/3$ do ciclo.

Num gráfico, as correntes das bobinas I, II e III fornecem a seguinte configuração:

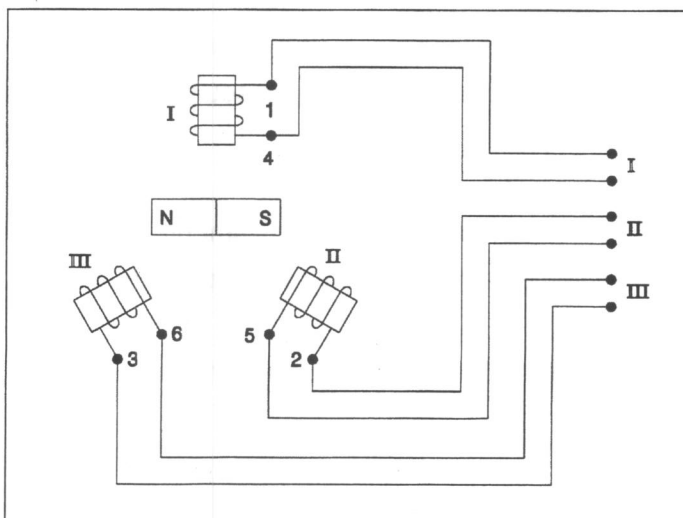
A defasagem de 120° entre as correntes alternadas e as suas variações para valores positivos e negativos ocorre tanto para os valores de tensão (E), quanto para os valores da intensidade da corrente elétrica (I).



Ligações em um sistema trifásico

Como já vimos, a energia elétrica é gerada industrialmente em corrente alternada no sistema trifásico por meio de geradores trifásicos constituídos por três bobinas dispostas de tal forma que as tensões induzidas ficam defasadas 120° . As três fases são independentes entre si e geram formas de onda também defasadas em 120° .

As três bobinas do gerador produzem três CAs monofásicas. Teoricamente, para transportar essas três CAs monofásicas até os consumidores, seriam necessários seis condutores.



Na prática, porém, é possível diminuir esse número de condutores para apenas três ou quatro. Para isso, o gerador pode ser ligado de duas formas diferentes:

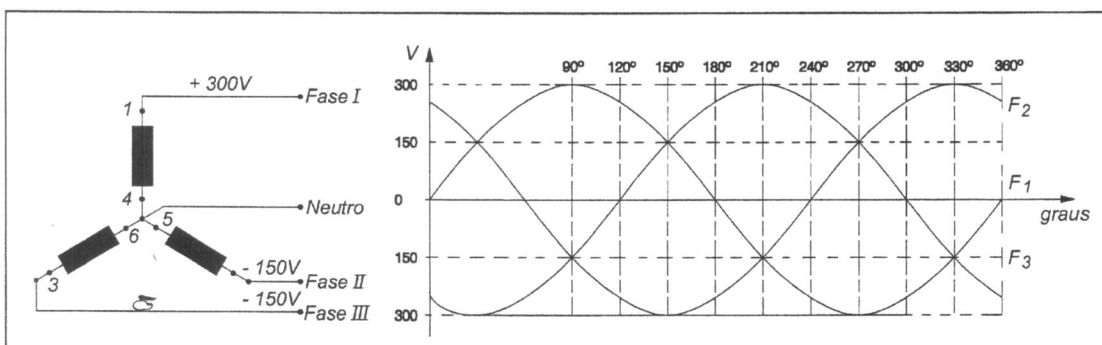
- por meio da ligação em estrela, representada simbolicamente pela letra Y;
- por meio da ligação em triângulo (ou delta), representada pela letra grega Δ (delta).

Ligação em estrela

Tem-se uma ligação em estrela quando as extremidades de cada uma das fases ou bobinas geradoras são ligadas entre si. Essa ligação pode ser feita com condutor neutro (4 fios) ou sem condutor neutro (3 fios).

A ligação em estrela com condutor neutro é chamada também de **sistema a quatro fios**. Nesse tipo de ligação, os três fios por onde retornam as correntes podem ser reunidos para formar um só condutor ou fio neutro. Esse condutor recolhe as três correntes das cargas e as conduz ao centro das fases geradoras.

A figura que segue mostra a representação esquemática desse tipo de ligação, bem como as respectivas curvas de tensões.

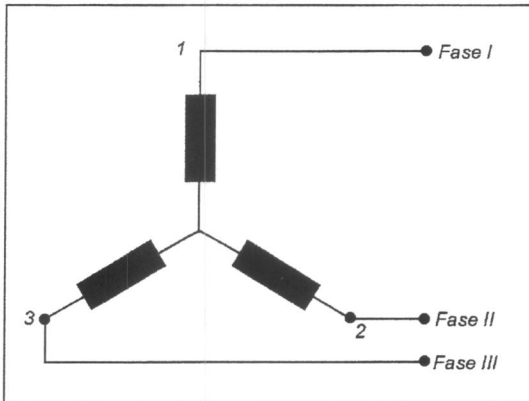


Um dado a ser lembrado é que a soma das três tensões, num mesmo instante, equivale a zero. Isso acontece porque a tensão na fase I assume seu valor máximo positivo.

Enquanto isso, as tensões nas fases II e III apresentam, respectivamente e no mesmo instante, um valor máximo negativo. Matematicamente, esses valores se anulam.

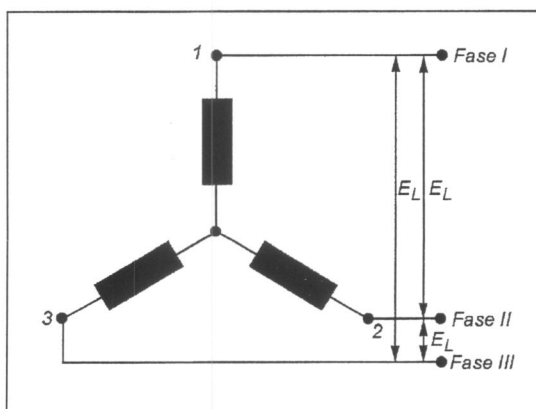
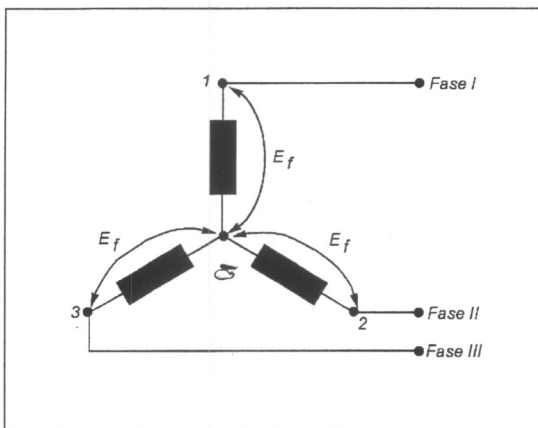
Isso significa que a soma das correntes de cada carga é nula no fio neutro. Por esse motivo, ele pode ser retirado.

Disso resulta a ligação em estrela sem condutor neutro ou **sistema a três fios**. Veja a representação esquemática desse tipo de ligação.



Tensão de fase e tensão de linha na ligação estrela

A tensão entre as duas extremidades de cada bobina é chamada de tensão de fase (E_f). Vemos a localização das tensões de fase na representação esquemática a seguir.



A tensão entre duas fases, seja entre a fase I e a fase II, entre a fase I e a fase III, ou ainda entre a fase II e a fase III, é chamada de tensão de linha (E_L).

Num sistema trifásico, ligado em estrela, a tensão de fase em qualquer instante corresponde à tensão de linha dividida pela raiz de três.

Isso acontece porque os valores instantâneos de tensão em cada fase não são coincidentes, e estão defasados 120° .

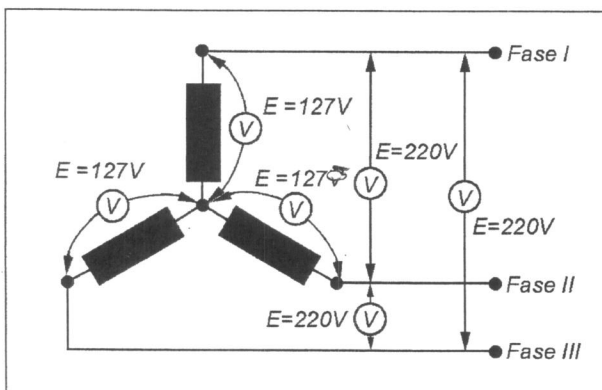
Assim, a tensão de fase (E_f) é calculada com o auxílio da seguinte equação:

$$E_f = \frac{E_L}{\sqrt{3}} \quad \text{ou} \quad E_f = \frac{E_L}{1,73}$$

A tensão de linha deveria ser calculada por meio da soma das tensões E_{f1} e E_{f3} . Todavia, por causa da defasagem de 120° já citada, não é possível fazer a soma aritmética das duas tensões. Portanto, deduzindo a fórmula, temos:

$$E_L = E_f \cdot 1,73$$

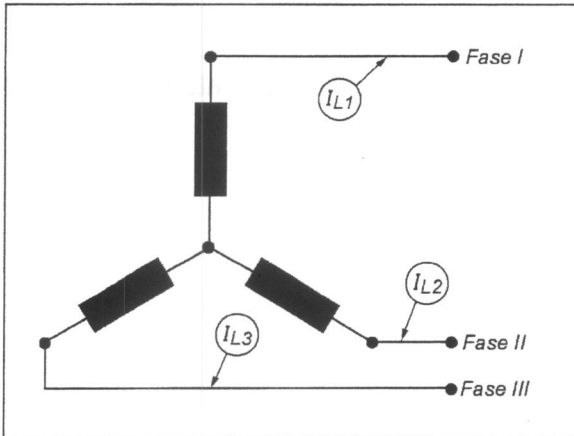
Como exemplo, vamos aplicar essa fórmula na ligação em estrela apresentada a seguir.



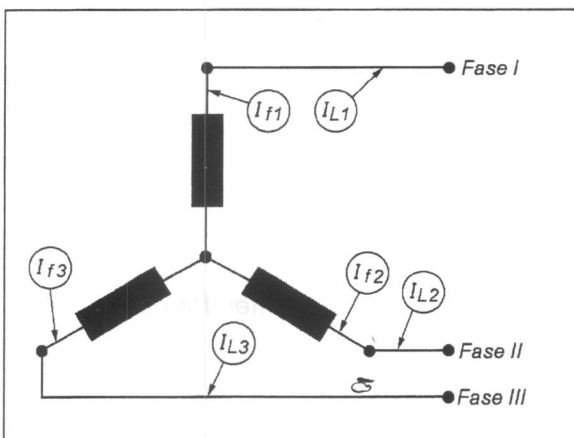
$$E_L = 127 \cdot 1,73 = 219,71 = 220 \text{ V}$$

Corrente de linha e corrente de fase na ligação em estrela

Numa ligação em estrela, chama-se corrente de linha (I_L) a corrente que se encontra em cada uma das linhas.



Na ligação em estrela, a corrente de cada bobina é chamada de corrente de fase (I_f).



Por exemplo, num sistema trifásico ligado em estrela, a corrente de linha é igual à corrente de fase, isto é, $I_L = I_f$. Isso acontece porque a corrente flui em série através da fase e da carga. Como não há ramificação da corrente, a intensidade de I na fase I_f é exatamente igual à corrente de linha (I_L).

Potência na ligação estrela

A potência total fornecida por um sistema trifásico ligado em estrela é igual à soma das potências das correntes alternadas das três fases.

Como as fases estão deslocadas 120° , não é possível fazer uma soma aritmética.

Assim, a potência aparente é calculada através da seguinte equação:

$$S = E_L \cdot I_f \cdot \sqrt{3}$$

Observação

O $\cos \varphi$ é o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente e corresponde ao fator de potência usado para cálculo da potência real.

Como:

$$E_f = \frac{E_L}{\sqrt{3}}, \quad E_L = E_f \cdot \sqrt{3}$$

Temos:

$$S = E_L \cdot I_L \cdot \sqrt{3}$$

Sendo:

$$I_L = I_f \text{ e } I_f = I_L \cdot \sqrt{3}$$

$$S = E_L \cdot I_f \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{3}$$

Logo:

$$S = E_f \cdot I_f \cdot 3$$

Logo, a potência ativa poderá ser calculada por meio das seguintes fórmulas:

$$S = E_L \cdot I_f \cdot \sqrt{3}$$

ou

$$S = E_f \cdot I_f \cdot 3$$

O resultado desse cálculo é multiplicado pelo $\cos \varphi$ (fator de potência), o que dará a potência ativa ou real. Se multiplicado por $\sin \varphi$, dará a potência reativa.

Exemplo

Calcular a potência de um gerador ligado em estrela, com uma tensão de linha de 440 V, uma corrente de 300 A por linha e um fator de potência de 0,8.

Potência aparente

$$S = E_L \cdot I_f \cdot \sqrt{3}$$

$$S = 440 \cdot 300 \cdot 1,73 = 228,36 \text{ kVA}$$

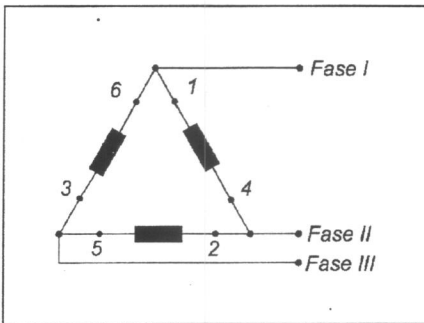
Potência ativa

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$P = 228,36 \cdot 0,8 = 182,69 \text{ kW}$$

Ligação em triângulo

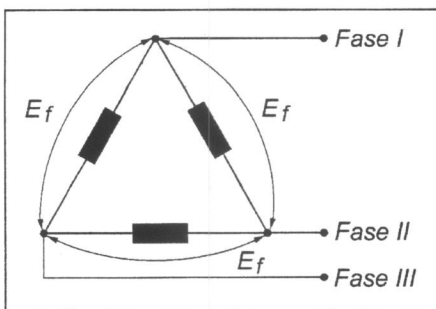
A ligação em triângulo é feita de modo que o início de um enrolamento é ligado ao final do outro, formando graficamente um triângulo equilátero. Os condutores externos são ligados às junções de cada fase.



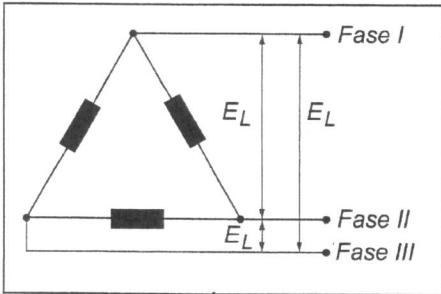
Esse tipo de ligação forma um circuito fechado. Todavia, a corrente não circula por esse circuito, pois a tensão resultante é a soma das tensões geradas em cada fase. Como a tensão de uma fase é igual e oposta à soma das outras duas, elas se anulam.

Tensão de fase e tensão de linha na ligação em triângulo

Como acontece na ligação em estrela, na ligação em triângulo, a tensão entre as duas extremidades de cada bobina é chamada tensão de fase (E_f).



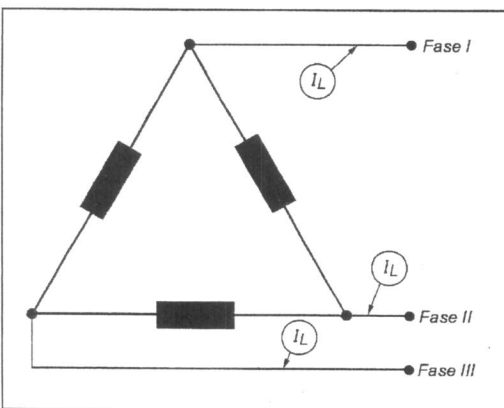
Por sua vez, a tensão entre qualquer um dos pares de fases é chamada de tensão de linha (E_L).



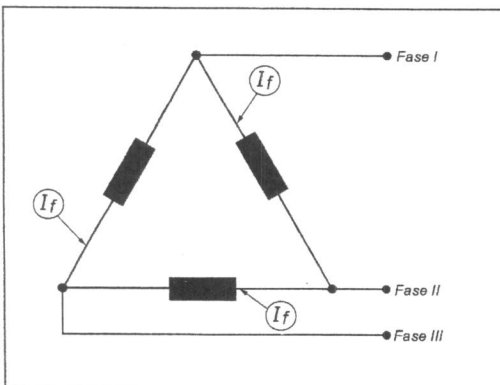
Num sistema trifásico ligado em triângulo, a tensão de linha é igual à tensão de fase. Portanto: $E_L = E_f$

Corrente de linha e corrente de fase na ligação em triângulo

Na ligação em triângulo, a corrente de linha (I_L) é aquela que se encontra em cada uma das linhas.



Na ligação em triângulo, a corrente de fase (I_f) é a corrente de cada bobina.



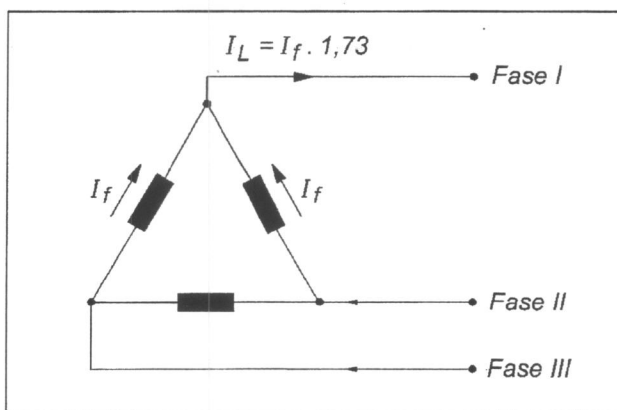
Para estudar o comportamento das correntes de linha e de fase na ligação em triângulo com três cargas monofásicas iguais é preciso lembrar que cada condutor externo é comum a duas fases.

Com os três condutores externos podemos formar três circuitos elétricos. Quando, num instante qualquer, a corrente entra por um dos condutores, esse será o condutor de entrada, e os outros dois, os condutores de retorno.

No instante seguinte, um segundo condutor será o de entrada, enquanto o primeiro e o terceiro serão os condutores de retorno e assim por diante.

Como as correntes estão defasadas 120° , a corrente de linha é igual à corrente de fase multiplicada por 1,73, ou seja:

$$I_L = I_f \cdot 1,73$$



Assim, numa ligação em que a corrente de fase é de 10 A, teremos:

$$I_L = 10 \cdot 1,73 = 17,3 \text{ A}$$

Potência na ligação triângulo

Para calcular a potência de um sistema trifásico ligado em triângulo, procede-se da mesma maneira que para saber a potência de um sistema trifásico ligado em estrela, ou seja:

$$P = 1,73 \cdot E_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

É importante notar que, com o auxílio da equação acima, calcula-se a potência ativa (real) do sistema.

A **potência aparente** é calculada multiplicando-se a constante 1,73 pelos valores de E_L e I_L .

$$S = E_L \cdot I_L \cdot \sqrt{3}$$

Para calcular a potência ativa, basta multiplicar a potência aparente pelo cosseno do ângulo de defasagem ($\cos \varphi$ ou fator de potência).

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

Exemplo

Calculo da potência ativa de um gerador ligado em triângulo, com uma tensão de linha de 380 V, corrente de fase de 15 A e um fator de potência de 0,85:

$$P = 1,73 \cdot E_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$$P = 1,73 \cdot 380 \cdot 15 \cdot 0,85$$

$$P = 8300 \text{ W ou } 8,3 \text{ kW}$$

Exercícios

1. Responda às seguintes perguntas:

a. Qual é a defasagem entre as fases em um sistema trifásico?

120°

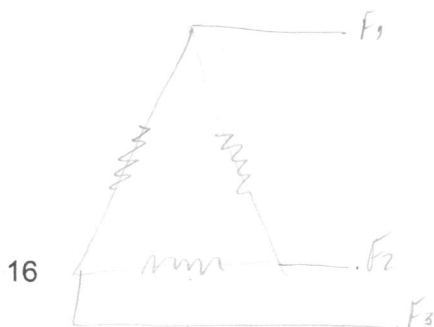
b. Quais são os tipos de ligações que podem ser feitas em um sistema trifásico?

* Triângulo

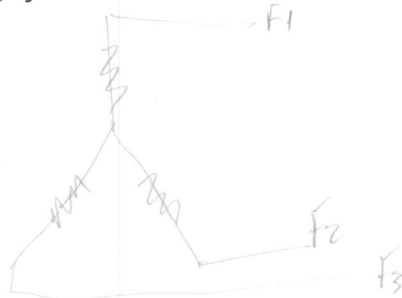
* estrela

2. Faça os esquemas solicitados:

a. Ligação em triângulo:

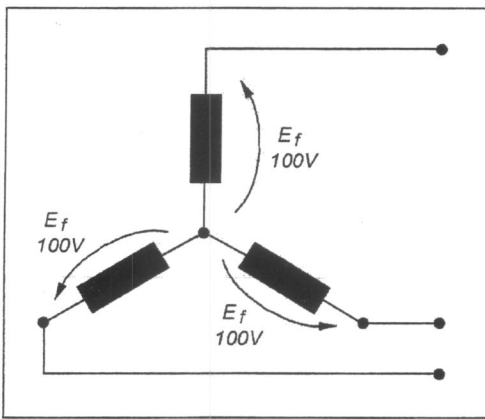


b. Ligação em estrela:



3. Resolva:

a. Calcule a tensão de linha no circuito que segue.

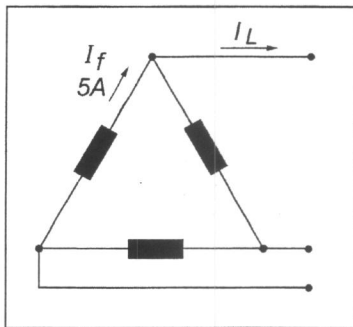


$$E_L = E_f \cdot \sqrt{3}$$

$$E_L = 100 \sqrt{3}$$

$$E_L = 100 \sqrt{3} \text{ V}$$

b. Calcule a corrente de linha no circuito que segue.



$$I_L = I_f \cdot \sqrt{3}$$

$$I_L = 5 \cdot \sqrt{3}$$

$$I_L = 5 \sqrt{3}$$

4. Relacione a segunda coluna com a primeira.

a. Ligação em triângulo

b. Ligação em estrela

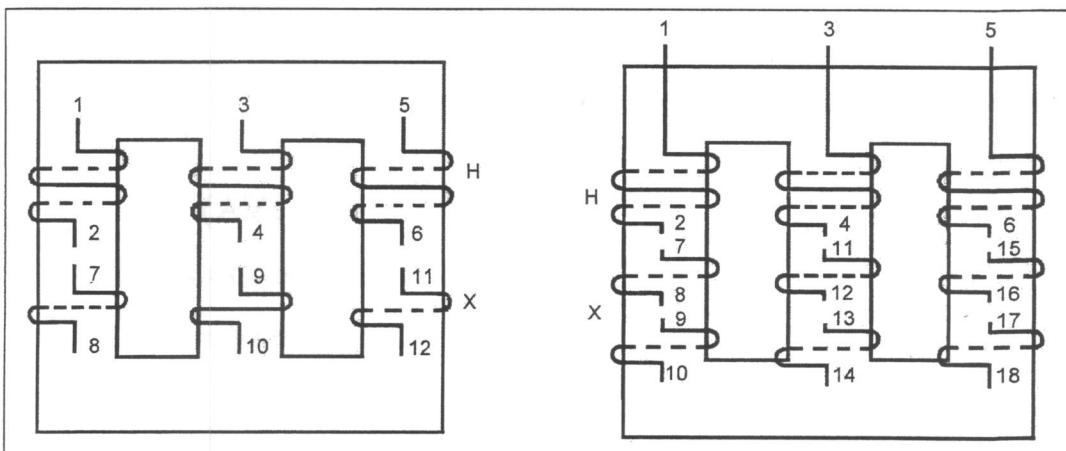
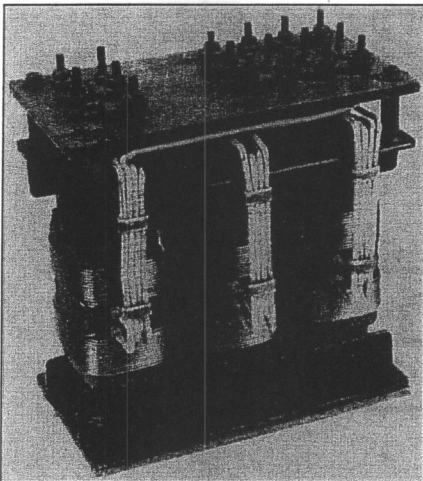
- (A) A tensão de linha é igual a tensão de fase
- (A) A corrente de linha é 1,73 vezes maior que a corrente de fase
- (B) A tensão de linha é 1,73 vezes maior que a tensão de fase
- (B) A corrente de linha é igual à corrente de fase



Transformador trifásico

Agora, abordaremos o funcionamento dos transformadores trifásicos, suas principais ligações, suas características como tensões e correntes de linha e tensões e correntes de fase.

Três transformadores monofásicos podem ser ligados para formar um banco trifásico em qualquer um dos quatro modelos mostrados nas figuras abaixo.

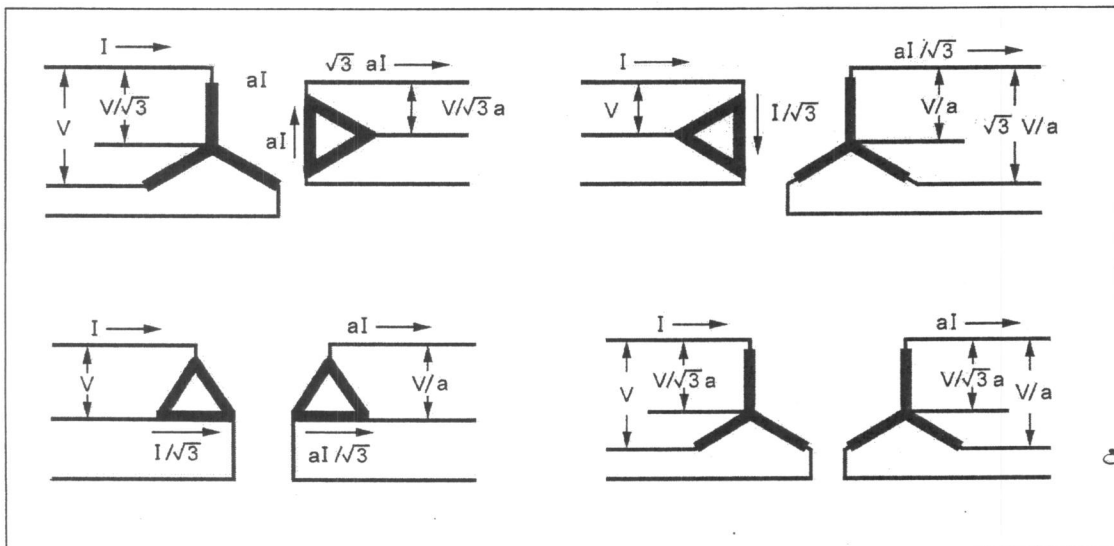


Em todas as quatro partes da figura abaixo, os enrolamentos à esquerda são os primários e os à direita são os secundários.

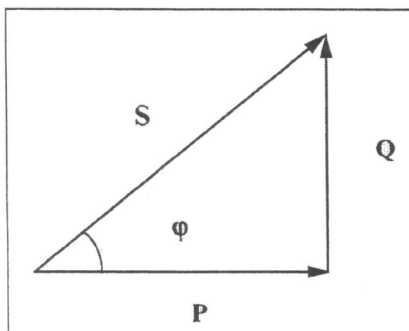
São mostradas as tensões e as correntes resultantes da aplicação ao primário de tensões de linha V e correntes de linha, quando a relação entre espiras de primário e secundário (n_1/n_2) vale 'a', considerando transformadores ideais.

Devemos notar que para tensões de linha e potência aparente fixa, a potência aparente nominal de cada transformador é 1/3 da potência aparente nominal do banco, independentemente das ligações usadas, mas os valores nominais de tensão e corrente dos transformadores individuais dependem das ligações:

Tipos de ligações de transformadores Trifásicos



Cálculo da Potência em Transformadores Trifásicos



$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \Rightarrow (VA)$$

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \varphi \Rightarrow (W)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \text{sen } \varphi \Rightarrow (VAR)$$

$$\varphi = \arctang \frac{Q}{P}$$

Eletrônica de potência

Onde :

$S \rightarrow$ Potência Aparente (Potência Gerada)

$P \rightarrow$ Potência Ativa (Potência Consumida)

$Q \rightarrow$ Potência Reativa (Potência de Perdas gerada por máquinas elétricas)

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de carga

$\cos\varphi \rightarrow$ Fator de Potência

8

9

Motor de corrente alternada



Aqui, abordaremos o funcionamento dos motores elétricos assíncronos. Vamos analisar aspectos como a geração do campo magnético girante, noções de tipos de enrolamento, tipos de ligação, escorregamento, conjugado, inércia da carga e classes de isolamento.

Máquina de Indução elementar

Uma forma de excitar os enrolamentos do estator e do rotor ocorre na máquina de indução, na qual há correntes alternadas nesses dois enrolamentos.

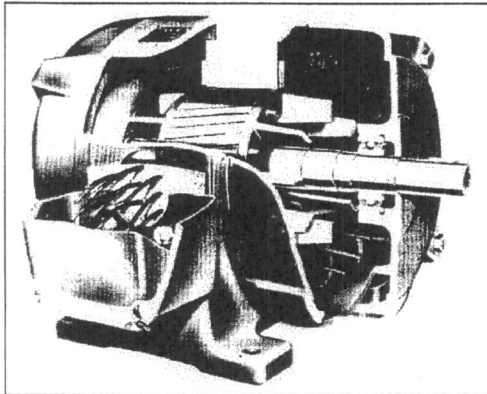
O exemplo mais comum é o motor de indução, no qual a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator e por indução ao rotor (ação do transformador).

A máquina de indução pode ser considerada como um transformador generalizado, no qual ocorre transformação de potência elétrica entre estator e rotor, com mudança de frequência.

No motor de indução, o enrolamento de estator é essencialmente o mesmo do motor síncrono.

No rotor o enrolamento é eletricamente fechado (gaiola de esquilo) e não tem terminais externos, e as correntes são induzidas no rotor pela ação do transformador do enrolamento do estator.

Uma vista em corte do motor de indução é mostrada na figura a baixo:

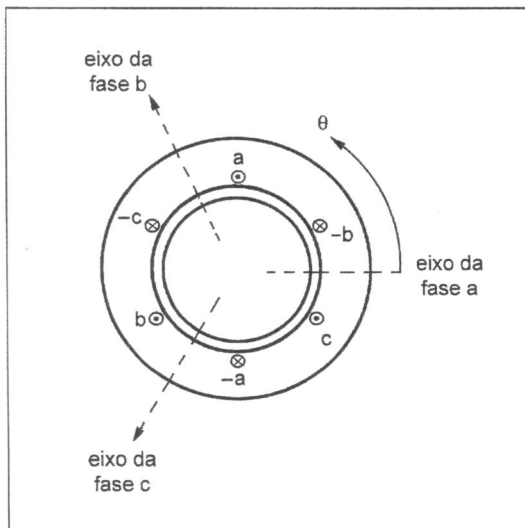


Máquinas elétricas

Campo Magnético Girante

Para compreendermos a teoria de máquinas de corrente alternada polifásicas assíncronas é necessário estudarmos a natureza do **Campo Magnético** produzido por um enrolamento polifásico.

Em uma máquina trifásica, os enrolamentos das fases individuais são deslocados um dos outros em 120° elétricos ao longo da circunferência do entreferro, como mostrado nas bobinas a, -a, b, -b, c, -c da figura que segue



As bobinas concentradas de passo pleno, mostradas aqui, podem ser vistas como representações de enrolamentos distribuídos, produzindo ondas senoidais de Fmm centradas nos eixos magnéticos das respectivas fases.

As ondas senoidais de Fmm de três componentes conseqüentemente deslocadas 120° elétricos estão no espaço. Cada fase é excitada por uma corrente alternada que varia senoidalmente com o tempo. Sob condições trifásicas balanceadas as correntes instantâneas são:

$$I_a = I_m \text{ sen } (\omega t + 0^\circ)$$

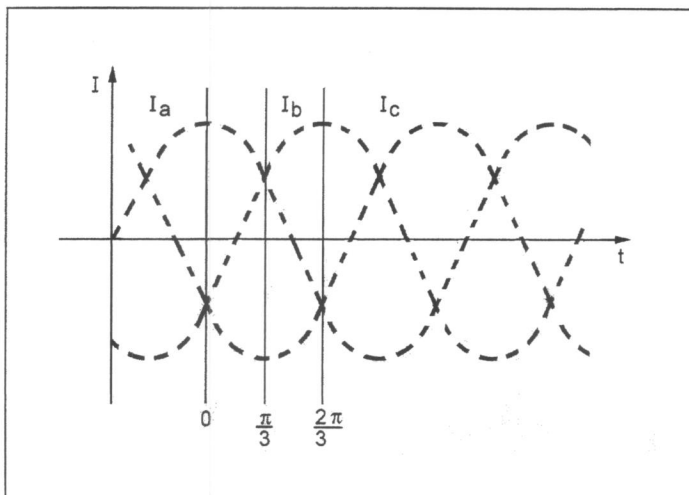
$$I_b = I_m \text{ sen } (\omega t + 120^\circ)$$

$$I_c = I_m \text{ sen } (\omega t + 240^\circ)$$

onde I_m é o valor máximo da corrente e a origem do tempo é tomada arbitrariamente como o instante em que a corrente da fase 'a' atinge o máximo positivo.

A seqüência das fases é tomada como abc, e as correntes instantâneas são mostradas na figura abaixo. Na figura acima, os pontos e cruzes nos lados das bobinas indicam as direções de referência para correntes de fase positiva.

As ondas de Fmm variam senoidalmente com o tempo. Cada componente é uma distribuição senoidal estacionária pulsante de Fmm ao redor do entreferro, com o máximo localizado ao longo do eixo magnético de sua fase e amplitude proporcional à corrente de fase instantânea, à Fmm resultante e à soma das três fases.



Considere, na figura acima, a situação para $t = 0$, que é o momento em que a corrente da fase 'a' está em seu valor máximo I_m . A Fmm da fase 'a' tem então seu valor máximo F_{max} , mostrado pelo vetor $F_a = F_{max}$ desenhado ao longo do eixo magnético da fase 'a'.

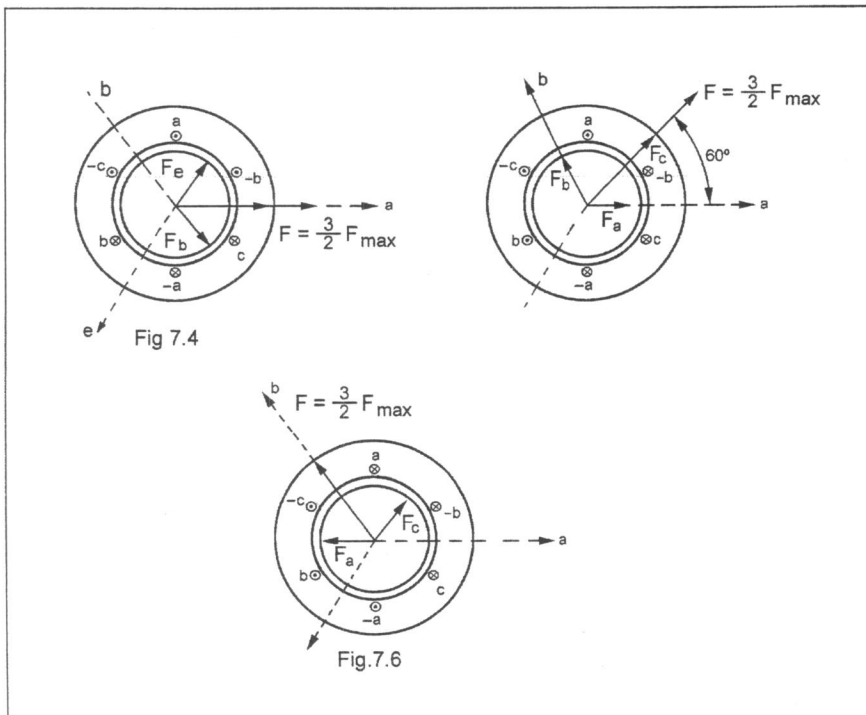
Nesse momento I_b e I_c são ambas $I_m/2$ na direção negativa, como mostrado pelos pontos e cruzes na Figura 7.4. As F_{mm} das fase b e c são mostradas pelos vetores F_b e F_c , ambos iguais a $F_{max}/2$, desenhados na direção negativa ao longo do eixo magnético das fases b e c.

A resultante pela adição das contribuições individuais das três fases é um vetor

$$F = \frac{3}{2} \times F_{max}$$

O vetor F está alinhado com o eixo da fase a.

A mesma análise deve ser realizada para $t = \pi/3$ e $t = 2\pi/3$, conforme ilustram as figuras a seguir.



Enrolamentos distribuídos

Os enrolamentos do estator do motor são distribuídos para melhor uso do ferro e do cobre. Como consequência, melhora-se a forma de onda da força magnetomotriz resultante no entreferro da máquina.

Para enrolamentos distribuídos precisamos considerar o fator de distribuição k_w , pois as F_{ems} induzidas nas bobinas individuais de qualquer grupo monofásico não estão em fase no tempo.

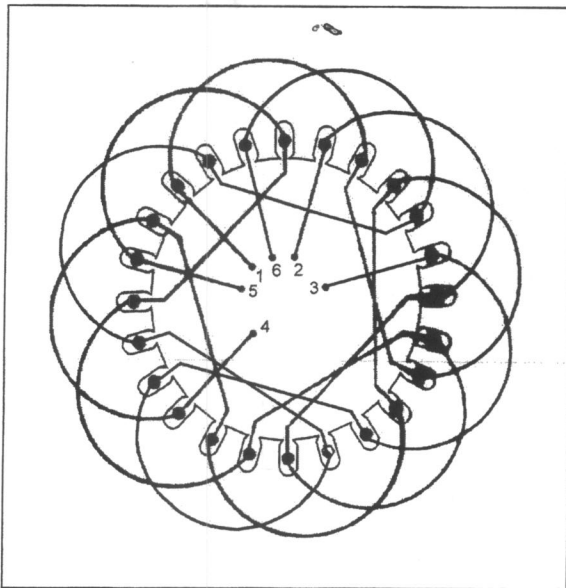
Para a maioria dos enrolamentos trifásicos, kw é cerca de 0,85 a 0,95. Portanto, para enrolamentos distribuídos a expressão da Fem em um enrolamento fica:

$$E_{ef} = 4,44 \times f \times kw \times n_{fs} \times \phi \Rightarrow \frac{\text{volts}}{\text{fase}}$$

$n_{fs} \Rightarrow$ número de espiras em série por fase

Exemplos de enrolamentos distribuídos em motores de corrente alternada:

Motor Trifásico Meio Imbricado ou Meio Diamante – diagrama radial



Motor trifásico enrolamento meio imbricado

Dados do motor

24 canais
4 pólos
Fio 22 AWG
220v / 380v

Potência 1 cv
1750 RPM
60 Hz
3,8 A / 2,2 A

Passo 1 a 6
12 grupos totais de bobinas
1 bobina por grupo
4 grupos de bobinas por fase

90 espiras

Fórmulas

$$N_p = \frac{120 \cdot f}{N}$$

$$\text{Bob / Gr} = \frac{N_b}{N_p \cdot N_f}$$

$$G_b = N_f \cdot N_p$$

$$\text{GER} = \frac{\text{GET}}{N_r}$$

$$Y_b = \frac{N_r}{N_p} \cdot 0,8$$

$$N_b = \frac{N_c}{2}$$

$$G_b / f = \frac{G_b}{N_f}$$

$$\text{GET} = 180 \cdot N_p$$

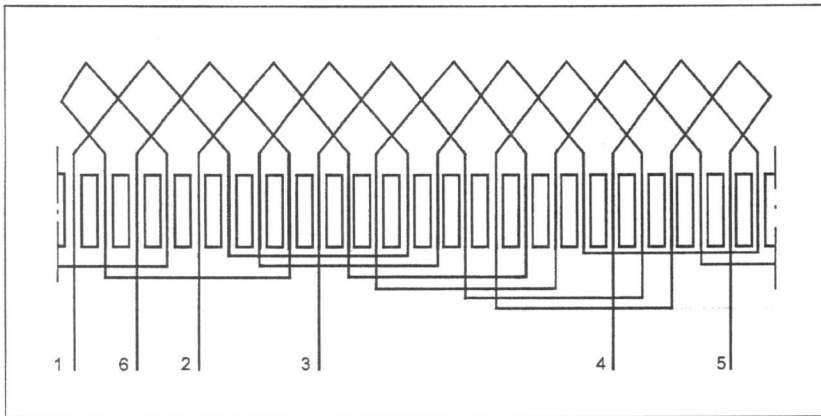
$$Y_f = \frac{120}{\text{GER}}$$

$$N_{b1} = \frac{Y_b}{2} - 1$$

Legenda

- | | |
|-----------------------------------|--|
| N_p – número de pólos | f – frequência |
| N – velocidade síncrona | N_b – número de bobinas |
| N_c – número de canais | GET – graus elétricos totais |
| GER – graus elétricos por ranhura | N_r – número d ranhuras |
| Y_f – passo da fase | N_f – número de fases |
| G_b – grupos totais de bobinas | Y_b – passo da bobina |
| N_{b1} – bobinas levantadas | G_b / f – grupos de bobinas por fase |
| Bob / Gr – bobinas por grupo | |

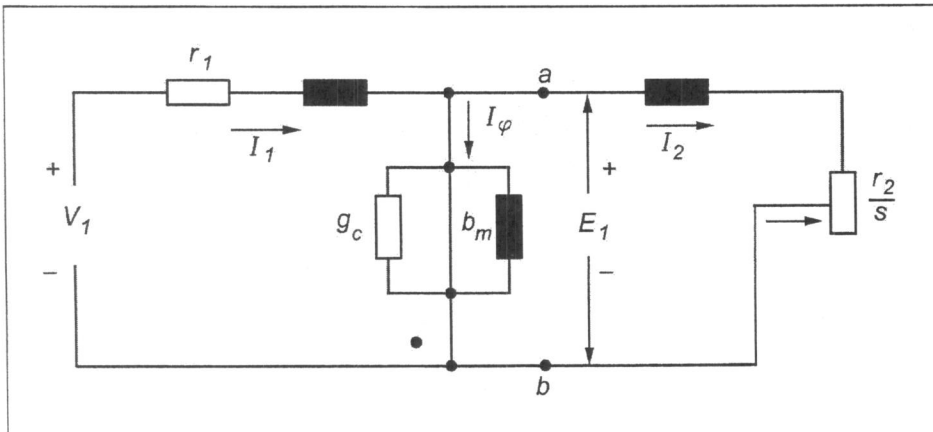
Motor Trifásico Meio Imbricado ou Meio Diamante – diagrama planificado



Análise do Circuito Equivalente do Motor de Indução

Entre os aspectos importantes de desempenho em regime permanente estão as variações de corrente e de velocidade, perdas em função do conjugado de carga, conjugado de partida, e o conjugado máximo.

Todas essas características podem ser determinadas no circuito equivalente, conforme a figura a baixo.



Velocidade Síncrona

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos (n_p) do motor e da frequência (f) da rede, em ciclos por segundo (Hertz).

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de pólos, que se distribuem alternadamente (um norte e um sul) ao longo da periferia do núcleo magnético.

O campo girante percorre um par de pólos a cada ciclo.

Assim, como o enrolamento tem pólos ou pares de pólos, a velocidade do campo será:

$$n_s = \frac{120 \times f}{n_p} \text{ (rpm)}$$

Exemplos:

a. Qual a rotação síncrona de um motor de 2 pólos, 50Hz?

$$n_s = \frac{120 \times 50}{2} \Rightarrow n_s = 3000 \text{ rpm}$$

b. Qual a rotação síncrona de um motor de 2 pólos, 60Hz?

$$n_s = \frac{120 \times 60}{2} \Rightarrow n_s = 3600 \text{ rpm}$$

Note que o número de pólos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de pólos. Para as frequências e polaridades usuais, as velocidades síncronas são:

Nº DE PÓLOS	ROTAÇÃO SÍNCRONA POR MINUTO	
	60 Hz	50 Hz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750
12	600	500

Escorregamento

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnéticas do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão no rotor correntes induzidas.

Quanto maior a carga, maior terá de ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o conjugado, terá de ser maior a diferença de velocidade, para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores.

Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor.

Quando a carga é zero (motor em vazio), o rotor girará praticamente com a rotação síncrona.

A diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (ns) chama-se escorregamento (s), que pode ser expresso em rpm, como fração da velocidade síncrona, ou como porcentagem dessa.

$$S_{(rpm)} = ns - n$$

$$S = \frac{ns - n}{ns}$$

$$S_{(\%)} = \frac{ns - n}{ns} \times 100$$

Exemplo: Qual o escorregamento de um motor de 6 pólos, 60 Hz, se sua velocidade é de 1.100 rpm?

$$ns = \frac{120 \times f}{np} \Rightarrow ns = \frac{120 \times 60}{6} \Rightarrow ns = 1200 \text{rpm}$$

$$S_{(\%)} = \frac{ns - n}{ns} \times 100 \Rightarrow S_{(\%)} = \frac{1200 - 1100}{1200} \times 100 \Rightarrow S_{(\%)} = 8,33\%$$

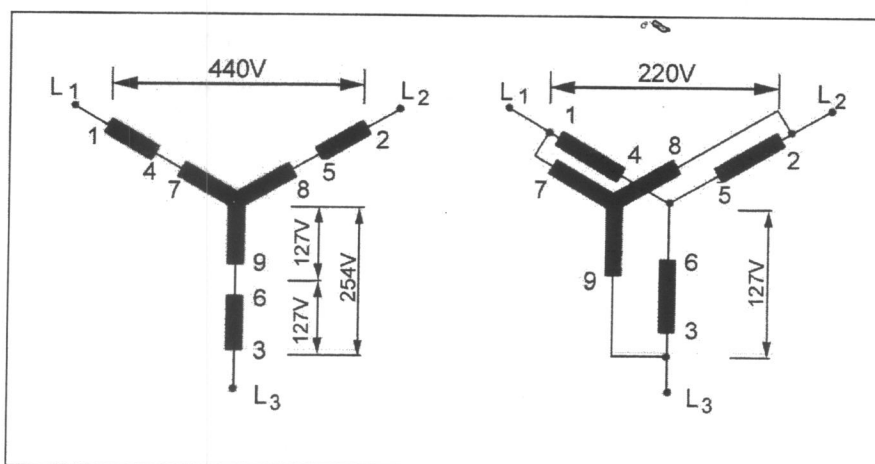
Tipos de Ligação

A grande maioria dos motores é fornecida com terminais dos enrolamentos religáveis, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes.

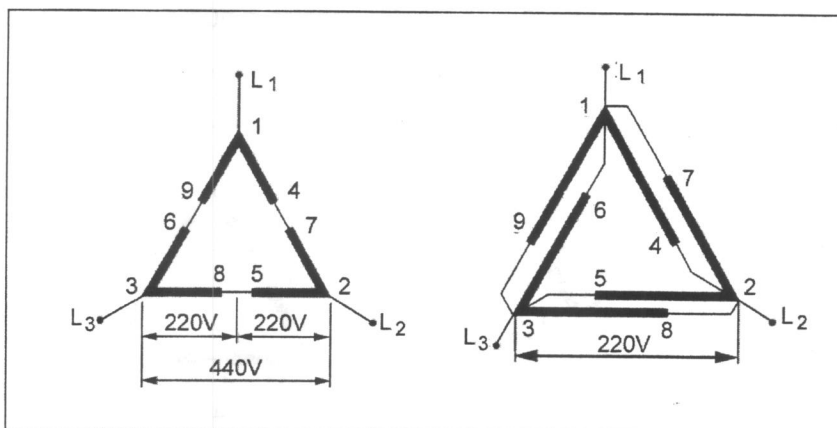
Os principais tipos de ligação de terminais de motores para funcionamento em mais de uma tensão são:

- Ligação Série – Paralela
- Ligação Estrela – Triângulo
- Tripla Tensão Nominal: Duplo triângulo para 220V – Dupla estrela para 380V – Ligação Triângulo para 440v

Ligação Série – Paralela



O tipo de ligação mostrado na figura acima é chamado de **estrela/dupla estrela**, e exige 9 terminais no motor e a tensão nominal (dupla) mais comum é 220/440V ou 380/760V, sendo a ligação em 760V usada apenas para a partida na ligação série.



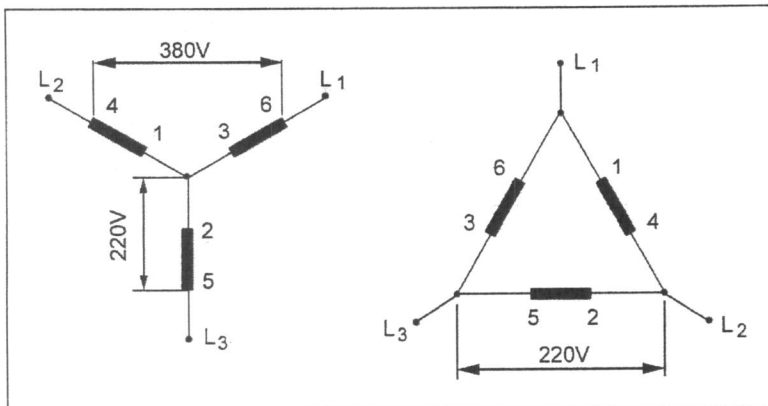
O tipo de ligação mostrado na figura acima é chamado de **triângulo/duplo triângulo**, exige 12 terminais do motor e a tensão nominal dupla mais comum é 220/440V, sendo a ligação em 440V usada apenas na partida em série.

Ligação Estrela – Triângulo

Esse tipo de ligação exige no mínimo seis terminais no motor, e serve para quaisquer tensões nominais duplas, desde que a segunda seja equivalente à primeira multiplicada por $\sqrt{3}$.

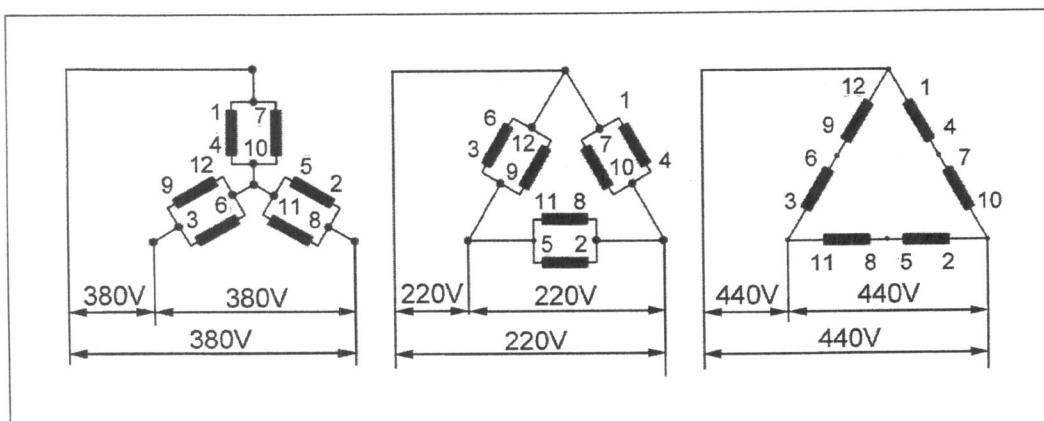
Exemplos: 220/380V; 380/660V; 440/760V

Notamos que uma tensão acima de 600V não é considerada baixa tensão, mas entra na faixa da alta tensão, em que as normas são outras; nos exemplos 380/660 e 440/760V, a tensão maior declarada só serve para indicar que o motor pode ser ligado em estrela-triângulo, pois estas tensões são fora do padrão de nossas indústrias.



Ligação em Tripla Tensão Nominal

Este tipo de ligação exige 12 terminais, e a figura a baixo mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para as três tensões nominais.



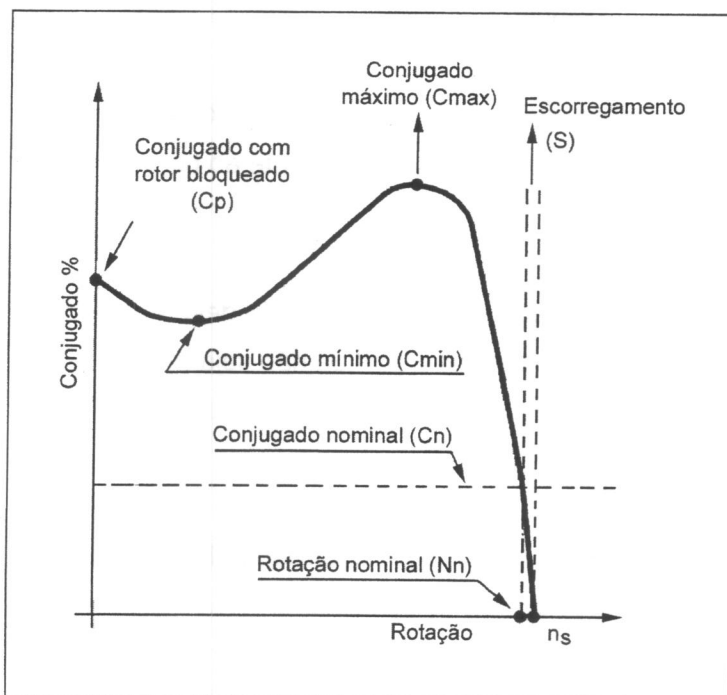
Característica de Aceleração

Curva de Conjugado x Velocidade

O motor de indução tem conjugado igual a zero, em velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando a rotação do motor vai caindo, gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal.

Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor ^{cai} bruscamente, podendo chegar a travar o rotor.

Representando em um gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vamos obter uma curva com o aspecto representado na figura abaixo.



Curva Conjugado x Rotação (Manual de motores – Weg)

$C_o \Rightarrow$ Conjugado Básico – É o conjugado calculado em função da potência e da velocidade síncrona (n_s).

$$C_o_{(Kgfm)} = \frac{716 \times P_{(cv)}}{n_{s(rpm)}} = \frac{794 \times P_{(kW)}}{n_{s(rpm)}}$$

$$C_o_{(Nm)} = \frac{7094 \times P_{(cv)}}{n_{s(rpm)}} = \frac{9555 \times P_{(kW)}}{n_{s(rpm)}}$$

$C_n \Rightarrow$ Conjugado Nominal ou de plena carga aquele desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

$C_p \Rightarrow$ Conjugado de Partida ou Conjugado com Rotor Bloqueado é o mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, em todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais.

Esse conjugado pode ser expresso em Nm ou, mais comumente, em porcentagem do conjugado nominal.

$$C_p (\%) = \frac{C_p(Nm)}{C_n(Nm)} \times 100$$

Na prática, o conjugado de rotor bloqueado deve ser o mais alto possível, para que o rotor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelerá-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

$C_{min} \Rightarrow$ Conjugado mínimo – É o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

Na prática esse valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, superaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

$C_{max} \Rightarrow$ Conjugado Máximo – É o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade.

Na prática o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

- O motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga, como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores etc.
- O motor não deve perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente excessivas.

Categorias – Valores mínimos normalizados

De acordo com as características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Essas categorias são classificadas em norma (NBR 7094).

Categoria N

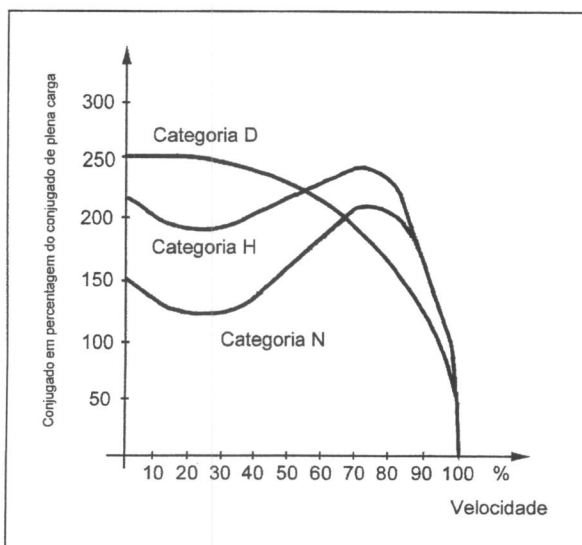
Conjugado de partida normal, corrente de partida normal, e baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado para utilização em acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

Categoria H

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; e baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, e britadores.

Categoria D

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, e alto escorregamento (mais de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas que representam Conjugado x Velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na figura abaixo.



(Manual de motores – Weg)

Inércia da carga

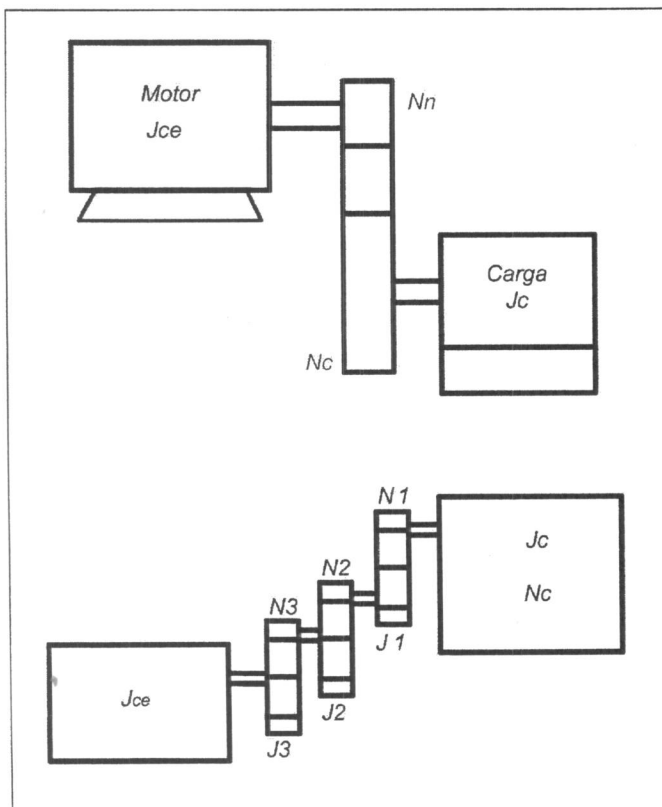
O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante.

Por definição, **MOMENTO DE INÉRCIA** é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída.

A unidade do momento de inércia é **Kgm²**.

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor (**Jt = Jm + Jc**).

No caso de uma máquina que tem uma “rotação diferente daquela do motor” (por exemplo, nos casos de acionamento por polias ou engrenagens), o momento de inércia deverá referir-se à rotação nominal do motor, conforme a figura a baixo.



(Manual de motores – Weg)

Podemos calcular J_{ce} através das seguintes equações:

$$J_{ce} = J_c \times \left(\frac{N_c}{N_m}\right)^2 \Rightarrow \text{Kgm}^2$$

$$J_{ce} = J_c \times \left(\frac{N_c}{N_m}\right)^2 + J_1 \times \left(\frac{N_1}{N_m}\right)^2 + J_2 \times \left(\frac{N_2}{N_m}\right)^2 + J_3 \times \left(\frac{N_3}{N_m}\right)^2 \dots$$

onde:

$J_{ce} \Rightarrow$ Momento de inércia da carga referida ao eixo do motor

$J_c \Rightarrow$ Momento de inércia da carga

$N_c \Rightarrow$ Rotação da carga

$N_n \Rightarrow$ Rotação nominal do motor

Classes de Isolamento

Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento são agrupados em **classes de isolamento**, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura, conforme a NBR 7094, são os seguintes:

- Classe A – 105°C
- Classe E – 120°C
- Classe B – 130°C
- Classe F – 155°C
- Classe H – 180°C

As classes B e F são as utilizadas em motores normais:

Composição da temperatura em função da classe de isolamento

CLASSE DE ISOLAMENTO		A	E	B	F	H
Temperatura Ambiente	°C	40	40	40	40	40
$\Delta t =$ elevação de temperatura	°C	60	75	80	100	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	15	15
Total: temperatura do ponto mais quente	°C	105	120	130	155	180

Cálculo do rendimento do motor:

$$\eta(\%) = \frac{P(\text{eixo}) \times 736}{P(\text{rede})} \times 100$$

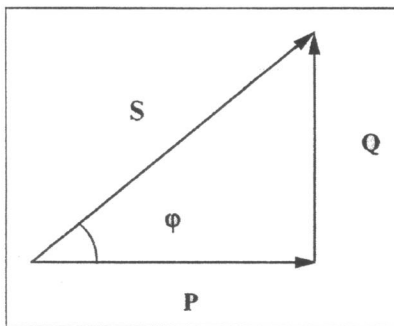
$$P(\text{rede}) = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \cos \varphi$$

$$P(\text{rede}) = \frac{P(\text{eixo}) \times 736}{\eta}$$

$$\sqrt{3} \times VL \times IL \times \cos \varphi = \frac{P(\text{eixo}) \times 736}{\eta}$$

$$IL = \frac{P(\text{eixo}) \times 736}{\sqrt{3} \times VL \times \cos \varphi \times \eta}$$

Cálculo da Potência em Motores Trifásicos de Indução



$$S = \sqrt{3} \times VL \times IL \Rightarrow (\text{VA})$$

$$P = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \cos \varphi \Rightarrow (\text{W})$$

$$Q = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \sin \varphi \Rightarrow (\text{VAR})$$

$$\varphi = \arctang \frac{Q}{P}$$

onde :

S → Potência Aparente (Potência Gerada)

P → Potência Ativa (Potência Consumida)

Q → Potência Reativa (Potência de Perdas gerada por máquinas elétricas)

φ → Ângulo de carga

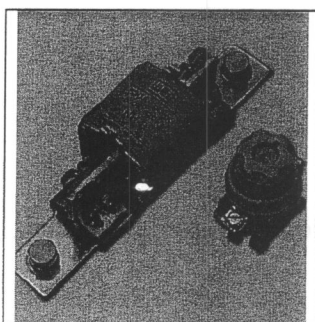
Cosφ → Fator de Potência

Fusíveis industriais

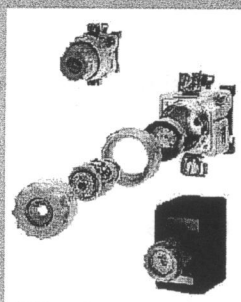
Abordaremos, a seguir, de forma simples, porém objetiva, o funcionamento dos fusíveis industriais de ação retardada (Diazed) e rápida (NH), suas principais características construtivas, curvas de seletividade e curvas de Tempo x Corrente.

Fusível é um dispositivo dotado de um elemento metálico com seção reduzida na sua parte média, normalmente colocado no interior de um corpo de porcelana hermeticamente fechado, contendo areia de quartzo de granulometria adequada.

O elemento metálico é geralmente de cobre, prata ou estanho. O corpo de porcelana é de alta resistência mecânica.



Fusíveis Diazed 5SB



- Utilizados na proteção de curto-circuito em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais; quando corretamente instalados, permitem o seu manuseio sem riscos de toque acidental
- Categoria de utilização gL/gG, em três tamanhos; atendem as correntes nominais de 2 a 100A
- Limitadores de corrente, possuem elevadas capacidades de interrupção
 - até 20A - 100kA
 - 25 a 63A - 70kA
 - 80 a 100A - 50kA em até 500VCA
- Através de parafusos de ajuste impedem a mudança para valores superiores, preservando as especificações do projeto
- Permitem a fixação por engate rápido sobre trilho ou parafusos
- Atendem as normas IEC 269 e NBR 11844

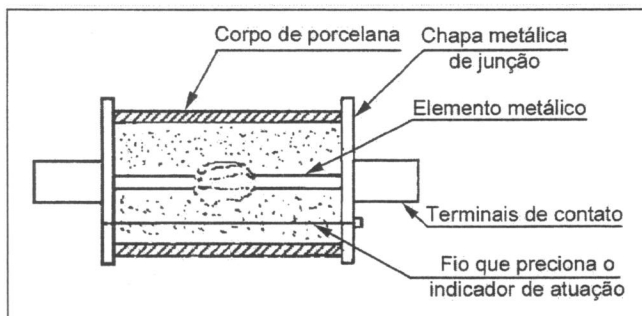
Fusível diazed

Fusíveis de Baixa Tensão

A atuação de um fusível é proporcionada pela fusão do elemento metálico, quando percorrido por uma corrente de valor superior ao estabelecido na sua curva característica tempo x corrente.

Após a fusão do elemento fusível a corrente não é interrompida instantaneamente, pois a indutância do circuito a mantém, ainda que por um curto período, circulando através do arco formado entre as extremidades do elemento metálico sólido.

A areia de quartzo é o elemento extintor do fusível. Ela absorve toda a energia calorífica produzida pelo arco, e o vapor do elemento metálico fundido permanece envolvido por ela, resultando no final num corpo sólido isolante que mantém a extremidade do fusível ligada à carga eletricamente separada da outra extremidade, ligada à fonte, conforme mostra a seguir:



Corrente Nominal

É aquela que pode percorrer o fusível por tempo indefinido sem gerar um aquecimento excessivo.

O valor da corrente de fusão de um fusível é normalmente estabelecido em 60% superior ao valor indicado como corrente nominal.

Tensão Nominal

É aquela que define a tensão máxima de exercício do circuito em que o fusível deve operar regularmente.

Capacidade de Interrupção

É o valor máximo eficaz da corrente simétrica de curto-circuito que o fusível é capaz de interromper dentro das condições de tensão nominal.

Os fusíveis NH e Diazed devem operar satisfatoriamente nas condições de temperatura ambiente para as quais foram projetados. Quanto mais elevada a temperatura a que está submetido, mais rapidamente o elemento fusível alcança a temperatura de fusão.

Os fusíveis do tipo NH apresentam como característica a limitação da corrente de impulso. São eficazes na proteção da isolação dos condutores e equipamentos de comando e manobra, pois a limitação da intensidade da corrente de curto-circuito implica valores reduzidos das solicitações térmicas.

A atuação dos fusíveis NH e Diazed obedece às características de tempo x corrente definidas pelas normas específicas, como por exemplo a curva média de fusão x a corrente, que caracteriza o tempo médio correspondente à fusão do elemento fusível.

Os fusíveis NH e Diazed são providos de indicadores de atuação do elemento fusível. O indicador é constituído de um fio, em geral de aço, ligado em paralelo ao elemento fusível, que quando se funde, provoca a fusão do fio, que sustenta uma mola pressionada, provocando a liberação do dispositivo indicador.

Os fusíveis são fabricados com duas formas distintas de atuação: rápida ou retardada.

O fusível de ação rápida é mais comumente empregado nos circuitos que operam em condições de corrente inferior à corrente nominal, como é o caso dos circuitos que suprem cargas resistivas ou eletrônicas.

5

O fusível de ação retardada é mais adequado aos circuitos sujeitos a sobrecargas periódicas, como no caso de motores e capacitores.

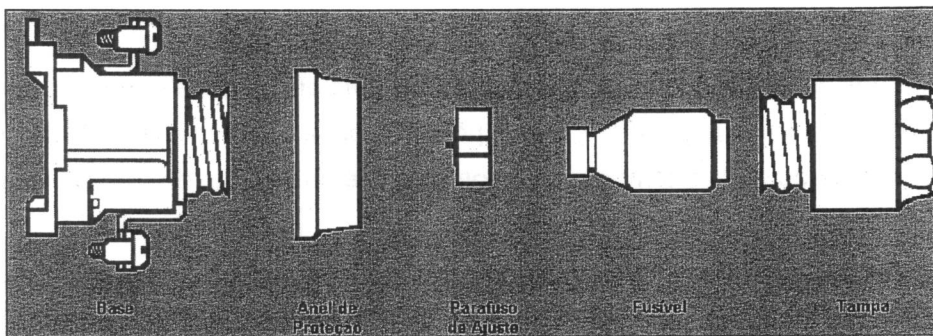
A aplicação do fusível como elemento de proteção dos circuitos elétricos submetidos a correntes que definem uma sobrecarga não é aconselhável, pois as suas características de abertura para correntes com intensidade variável em torno de 1,4 vezes a sua corrente nominal não permitem que se obtenha desse dispositivo uma margem de segurança aceitável para tal finalidade.

Assim, os fusíveis devem ser dimensionados apenas tendo em vista a proteção da rede para correntes de curto-circuito, ou de sobrecarga caracterizada por motor de indução com rotor bloqueado, apesar de nesse caso constituírem uma proteção pouco segura.

Fusível Diazed

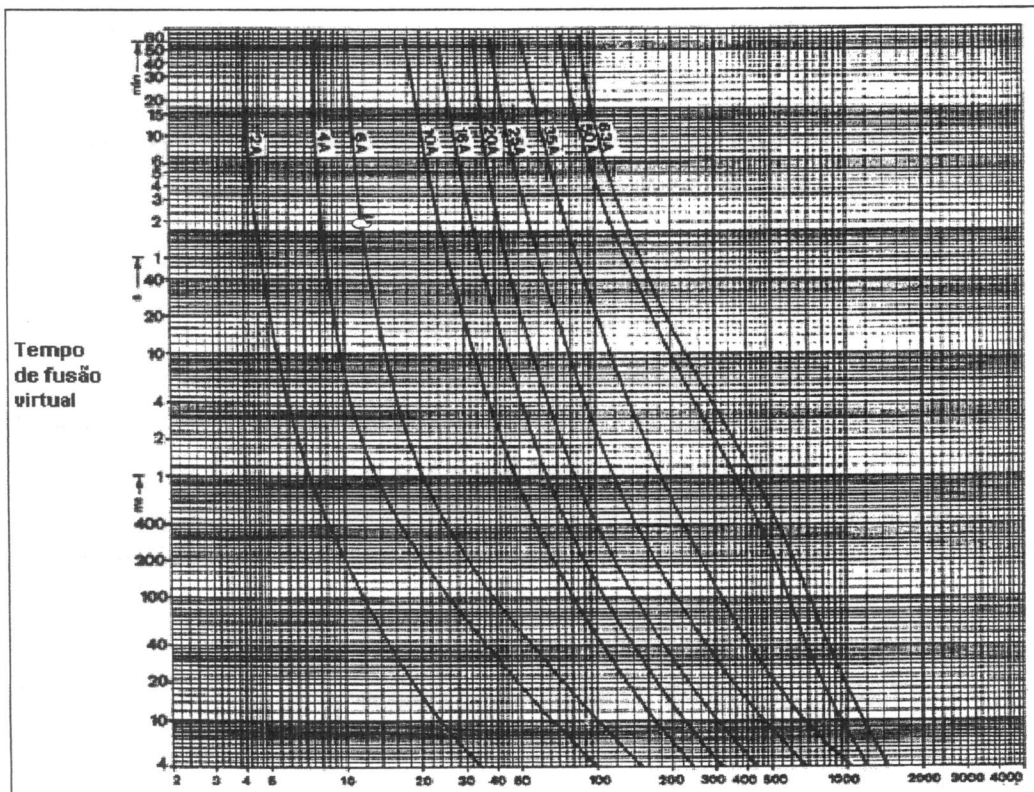
O Fusível diazed é constituído pelas seguintes partes:

- Base
- Anel de proteção
- Parafuso de ajuste
- Fusível
- Tampa



(Catálogo eletrônico – Weg)

Curva Característica

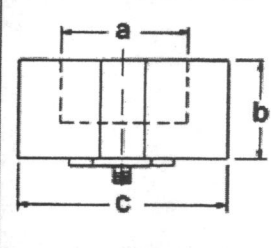


(Catálogo eletrônico – Weg)

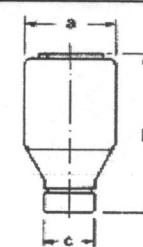
Características Construtivas do Fusível

Diazed

PARAFUSO DE AJUSTE (conforme DIN 49516)									
Tamanho	Corrente Nominal de Trabalho	Tipo	Cor	Embal. (po)	Peso (100 po) (kg)	Dimensões (mm)			
						a	b	c	
DII	2	PAW/2	Rosa	12	1,3	7,0	13	23,5	
	4	PAW/4	Marron						
	6	PAW/6	Verde						
	10	PAW/10	Vermelho			1,2	8,5		10,5
	16	PAW/16	Cinza						
	20	PAW/20	Azul						
DIII	25	PAW/25	Amerelo	12	2,1	17	13	28,5	
	35	PAW/35	Preto						
	50	PAW/50	Branco						
	63	PAW/63	Cobre		1,7	20,5			

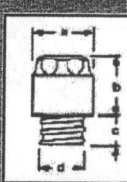


FUSIVEL "D"									
Tamanho	Corrente Nominal de Trabalho	Tipo	Cor	Embal. (po)	Peso (100 po) (kg)	Dimensões (mm)			
						a	b	c	
DII	2	FDW/2	Rosa	36	2,7	21,8	50	6,0	
	4	FDW/4	Marron						
	6	FDW/6	Verde						
	10	FDW/10	Vermelho			3,2	8,8		10
	16	FDW/16	Cinza						
	20	FDW/20	Azul						
DIII	25	FDW/25	Amerelo	36	3,6	27	50	16	
	35	FDW/35	Preto						
	50	FDW/50	Branco						
	63	FDW/63	Cobre		6,2	16			

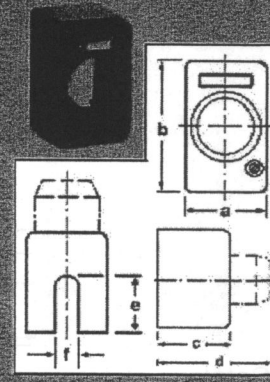


(Catálogo eletrônico – Weg)

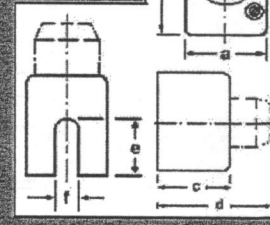
TAMPA (conforme DIN 49514)									
Tamanho	Corrente Nominal de Trabalho	Tipo	Pinos (po)	Embal. (po)	Peso (100 po) (kg)	Dimensões (mm)			
						a	b	c	
DII	2 a 25	TFW 25	E27	12	6,0	32,5	32	11,5	
DIII	35 a 63	TFW 63	E33	12	6,4	42	32	11,5	



CAPA DE PROTEÇÃO									
Tamanho	Corrente Nominal de Trabalho	Tipo	Peso (100 po) (kg)	Dimensões (mm)					
				a	b	c	d	e	f
DII	2 a 25	CPFW 25	3,6	43,6	75	64	77,5	30	13
DIII	35 a 63	CPFW 63	4,5	51	91	64	78,5	30	14



CHAVE PARA PARAFUSO DE AJUSTE			
Tamanho	Corrente Nominal de Trabalho	Tipo	Peso (100 po) (kg)
DII e DIII	2 a 63	CPAW/2-63	1,6



(Catálogo eletrônico – Weg)

Fusível NH

CLASSE gL-gG 500 V
IEC 269 VDE 0636
ABTN 9121

Clique para alternar o TAMANHO

00
1
2 und 3

FUSÍVEL (conforme DIN 43620)

Corrente Nominal de Enchufe (A)	Tipo	Peso (kg)	Enchufe (p)	Dimensões (mm)								
				a	b	c	d	e	f	g	h	
4	F00NH4											
6	F00NH6											
10	F00NH10											
16	F00NH16											
20	F00NH20											
25	F00NH25											
35	F00NH35	0,20	3	78,5	15	35	1,8	27	63,5	48	53	
50	F00NH50											
63	F00NH63											
80	F00NH80											
100	F00NH100											
125	F00NH125											
160	F00NH160											

(Catálogo eletrônico – Weg)

CLASSE gL-gG 500 V
IEC 269 VDE 0636
ABTN 9121

Clique para alternar o TAMANHO

00
1
2 und 3

FUSÍVEL (conforme DIN 43620)

Corrente Nominal de Enchufe (A)	Tipo	Peso (kg)	Enchufe (p)	Dimensões (mm)								
				a	b	c	d	e	f	g	h	
35	F1NH35											
50	F1NH50											
63	F1NH63											
80	F1NH80	0,40										
100	F1NH100		3	135	20	40	2	46	62	55	72	
125	F1NH125											
160	F1NH160											
200	F1NH200	0,45										
224	F1NH224											
250	F1NH250											

(Catálogo eletrônico – Weg)

Clique para
alemar o
TAMANHO

FUSÍVEL NH

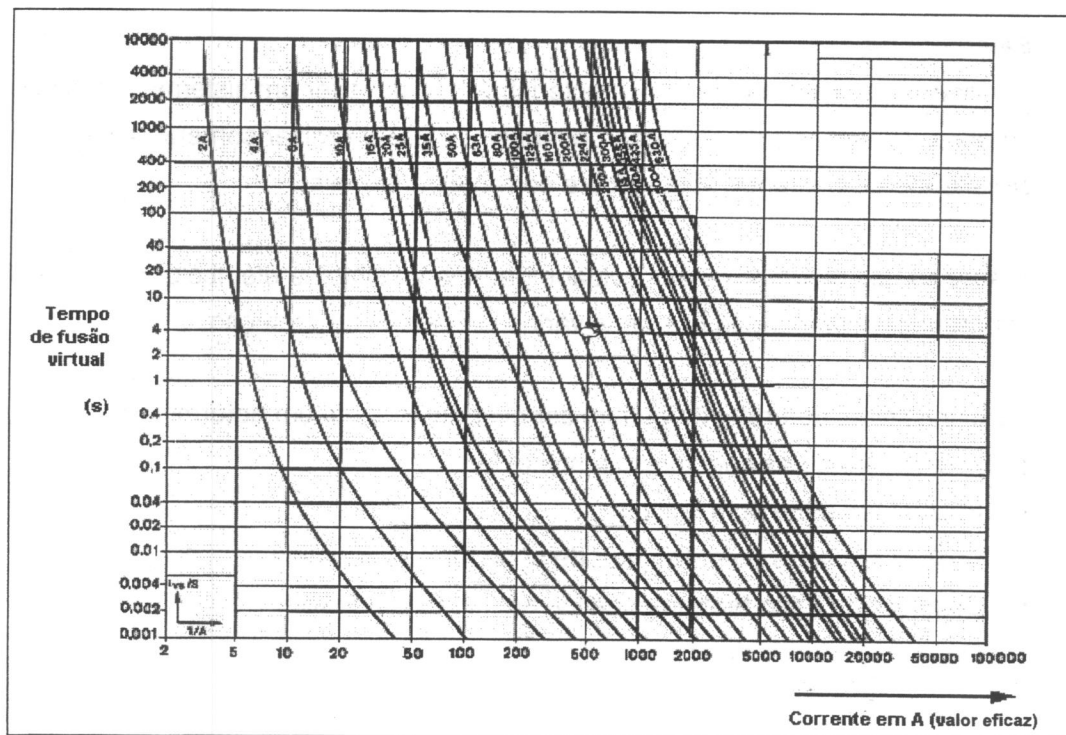
GLASSE gL-gG 500 V
IEC 269 VDE 0636
ABTN 9121

00 FUSÍVEL (conforme DIN 43620)

Corrente Nominal de Fiação (A)	Tipo	Peso (kg)	Fusível (C3)	Dimensões (mm)							
				a	b	c	d	e	f	g	h
2	125 F2NH125	0,50	3	150	26	48	2	46	70	65	72
	160 F2NH160										
	200 F2NH200										
	250 F2NH250	0,60									
	300 F2NH300										
	315 F2NH315										
355 F2NH355	0,65										
400 F2NH400											
315 F3NH315											
3	355 F3NH355	0,80	3	150	32	60	2	64	84	85	72
	400 F3NH400										
	425 F3NH425										
	500 F3NH500	1,04									
	630 F3NH630	1,16									

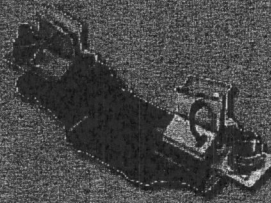
(Catálogo eletrônico – Weg)

Curva Característica



(Catálogo eletrônico – Weg)

Acessórios – Fusível NH

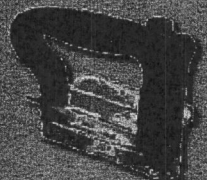


BASE (conforme DIN 43620)

Variedade	Corrente Nominal em Amperes	Tipo	Peso (kg)	Embal. (pc)	Conexão (mm ²)
00	2 a 160	B00NH	0,18	3	70
1	35 a 250	B1NH	0,50	3	150
2	125 a 400	B2NH	0,68	3	240
3	315 a 630	B3NH	1,00	3	2 x 240

ACESSÓRIOS

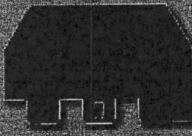
Punho Saca Fusível



Tipo PSFNH

Peso 0,16kg

Placa Divisória



Tipo:
PD00NH
PD1NH
PD2NH
PD2NH

(Catálogo eletrônico – Weg)

Seletividade

Por definição, seletividade é a característica que deve ter um sistema elétrico de fazer atuar os dispositivos de proteção de maneira a desenergizar somente a parte do circuito afetada, quando submetido a correntes anormais,.

A adoção dos recursos de seletividade garante ao sistema elétrico a mais perfeita coordenação na atuação dos seus vários elementos de proteção.

Os dispositivos de proteção podem ser encontrados em um determinado sistema elétrico, formando as seguintes combinações:

- Fusível em série com fusível
- Fusível em série com disjuntor de ação termomagnética
- Disjuntor de ação termomagnética em série com fusível.
- Disjuntores em série entre si

Aqui estudamos apenas a seletividade entre fusíveis, mas, para um aprofundamento maior indicaremos dois livros:

- *Instalações Elétricas Industriais*, de João Mamede Filho, Editora LTC.
- *Instalações Elétricas Industriais*, de Ademaro A. M. Bittencourt Cotrim, Editora McGraw-Hill.

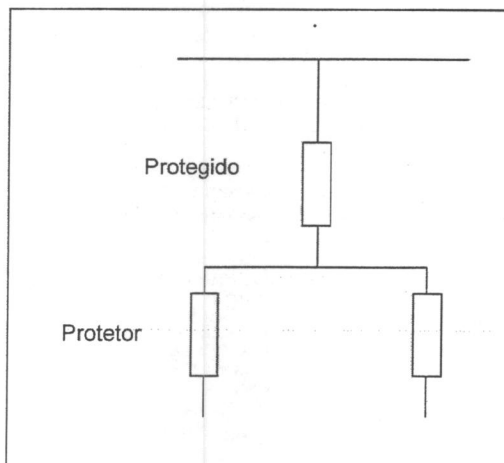
Fusível em série com fusível

Para assegurar a seletividade entre fusíveis é necessário que a corrente nominal do fusível protegido seja igual ou superior a 160% da corrente nominal do fusível protetor.

$$I_{NFA} \geq 1,6 I_{NFP}$$

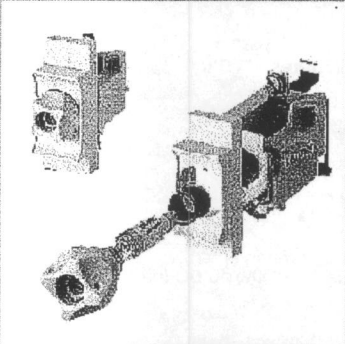
I_{NFA} = Corrente nominal do fusível protegido

I_{NFP} = Corrente nominal do fusível protetor



Fusíveis neozed

Minifusíveis Neozed 5SE



- Em tamanho reduzido, são aplicados na proteção de curto-circuito em instalações típicas residenciais, comerciais e industriais
- Categoria de utilização gL/gG, em dois tamanhos atendem as correntes nominais de 2 a 63A
- Limitadores de corrente, são aplicados para até 50kA em 400VCA
- Sua forma construtiva garante total proteção de toque acidental quando da montagem ou substituição dos fusíveis
- Anéis de ajuste evitam alteração dos fusíveis para valores superiores, mantendo a adequada qualidade de proteção da instalação
- Fixação rápida por engate sobre trilho ou por parafusos
- Atendem a norma IEC 269

(Catálogo eletrônico – Weg)

Fusíveis de Ação Ultra-rápida

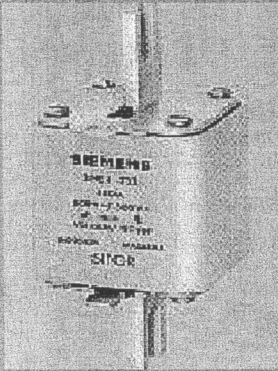
São dispositivos de proteção destinados a proteger cargas resistivas ou cargas eletrônicas compostas por DIODOS, SCR, TRIAC, GTO, TRANSISTORES, POWER MOS ou IGBT.

Fusíveis Silized

Fusíveis Silized 5SD	
	<ul style="list-style-type: none">■ Utilizados na proteção de curto-circuito de semicondutores, estão adaptados às curvas de carga dos tiristores e diodos de potência■ Categoria de utilização gR, ultra-rápidos, em três tamanhos, atendem as correntes nominais de 16 a 100A■ Limitadores de corrente, possuem elevada capacidade de interrupção: 50kA em até 500VCA■ Através de parafusos de ajuste, evitam alterações dos fusíveis, preservando as especificações do projeto■ Permitem a fixação rápida por engate rápido sobre trilho ou parafusos■ Atendem a norma DIN VDE 0636

(Catálogo eletrônico – Weg)

FUSÍVEIS SITOR

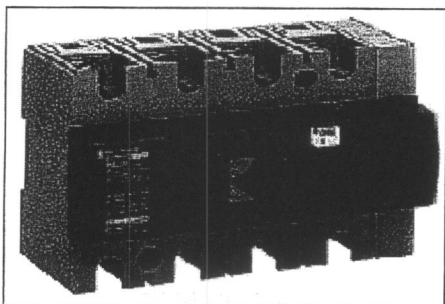
Fusíveis Sitor 3NE4	
	<ul style="list-style-type: none">■ Apropriado em instalações industriais para a proteção de semicondutores, tiristores, GTO's e diodos■ Categoria de utilização gR / aR, atendendo as correntes nominais de 32 a 710 A■ Fusível de ação rápida em dois tamanhos (1e 2), podendo ser usado em AC (de 800 a 1000v) ou DC (de 440 a 600 V).■ Com o uso de punhos, garantem manuseio seguro na montagem ou substituição dos fusíveis■ Atendem as normas IEC 269, DIN. 43 653

(Catálogo eletrônico – Weg)

Seccionadora

Aqui, abordaremos o funcionamento das chaves seccionadoras, suas principais características e aplicações. Veremos as diferenças entre as seccionadoras com abertura sem carga e as seccionadoras com abertura com carga.

Seccionador é um equipamento capaz de permitir a abertura de todos os condutores não aterrados de um circuito, de tal modo que nenhum pólo possa ser operado independentemente.



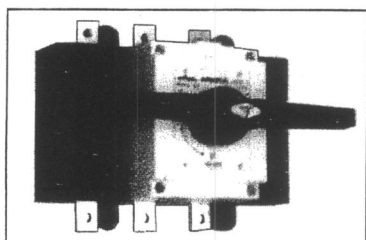
(Target engenharia e consultoria)

As seccionadoras podem ser classificadas em dois tipos:

- Seccionadoras com aberturas sem carga.
- Seccionadoras com abertura com carga.

Seccionadora com abertura sem carga

É aquela que somente deve operar com o circuito desenergizado ou sob tensão. O tempo de abertura depende da velocidade do operador.

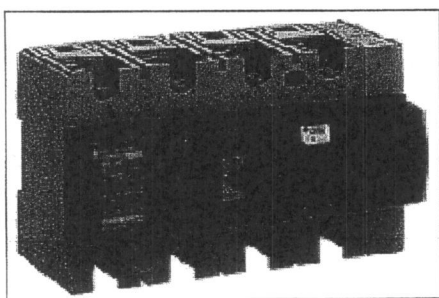


Seccionadora sob carga ou interruptoras

É aquela capaz de operar com o circuito sem carga ou com carga plena.

As seccionadoras de atuação em carga são providas de uma câmara de extinção de arco e de um conjunto de molas capaz de imprimir uma velocidade de operação elevada.

A principal função das seccionadoras é permitir que seja feita manutenção segura numa determinada parte do sistema. Quando as seccionadoras são instaladas em circuitos de motores devem desligar tanto os motores como os dispositivos de controle.



(Target engenharia e consultoria)

Sobre os dispositivos de Seccionamento a norma estabelece:

- Os seccionadores devem ser projetados e ou instalados de forma a impedir qualquer restabelecimento involuntário. Um tal restabelecimento poderia ser causado, por exemplo, por choques ou vibrações.
- Devem ser tomadas medidas para impedir a abertura inadvertida ou desautorizada dos dispositivos de seccionamento apropriados à abertura sem carga.
- Os seccionadores utilizados em circuitos de motores de até 600V devem ser dimensionados pelo menos para 115% da corrente nominal, isto é:

$$I_{sec} = 1,15 * I_{nm}$$

- Quando os seccionadores são instalados em circuitos de capacitores, devem ser dimensionados pelos menos para 135% da corrente nominal do banco de capacitores, ou seja:

$$I_{sec} = 1,35 * I_{nm}$$

As Chaves Seccionadoras devem ser dimensionadas para suportar, durante o tempo de 1s, a corrente de curto-circuito, valor eficaz (corrente térmica), e o valor de crista da mesma corrente (corrente dinâmica).

Tabela de Chaves Seccionadoras Tipo 3kU – Siemens

Tipo	Corrente nominal (A)	Capacidade de ruptura $\cos \varphi = 0,7$		Correntes máximas admissíveis		Correntes de curto-circuito Até 500V Protegidas por fusíveis NH	
		380 V (A)	500 V (A)	Térmica durante 1s (valor eficaz) kA	Dinâmicas (valor de crista) kA	Corrente nominal máxima dos Fusíveis (A)	Valor da corrente presumida (KA)
3kU 1.127	100	8 * In	6 * In	10	20	100	100
3kU 1.227	200	6 * In	4,5 * In	10	20	160	100
3kU 1.327	250	5 * In	4 * In	15	30	250	100
3kU 1.427	400	3,5 * In	3 * In	20	40	355	100
3kU 1.627	630	2,5 * In	2 * In	30	60	500	100
3kU 1.827	1250	1,5 * In	1 * In	50	90	1000	60

Obs: Na compra da chave seccionadora, devem acompanhá-la pelo menos as seguintes informações:

- Tensão nominal
- Corrente nominal
- Corrente térmica
- Corrente Dinâmica
- Tipo de Acionamento (Manual/Rotativo)
- Tipo de Operação (com Carga ou a Vazio)

Chaves Seccionadoras

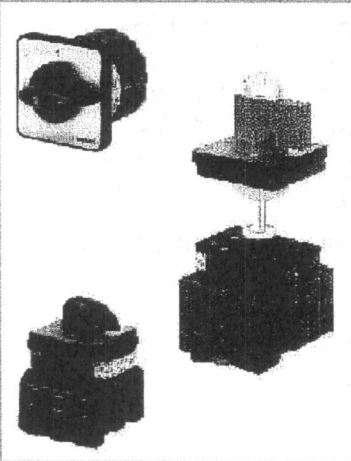
**Seccionadores
5TH/S32/S37/3NP/3NN**



- Manobra de circuitos com diferentes tipos de cargas
- 5TH - seccionadores tetrapolares até 125A
S32 - seccionadores tripolares até 1600A
S37 - seccionadores com porta-fusível até 630A
3NP/3NN - seccionadores-fusíveis tripolares até 630A
- 5TH/S32/S37 - Acionamento rotativo interno ou externo com manobra rápida independente da ação do operador
- Durabilidade mecânica de 1.000 a 30.000 manobras

(Target engenharia e consultoria)

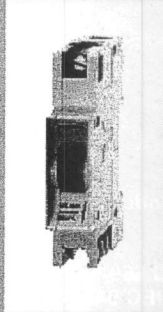
**Seccionadores tripolares
Comutadores para medição
5TW**



- Manobra sob carga de circuitos com diferentes tipos de cargas
- Comutadores para voltímetro e amperímetro
- Correntes nominais de 20 a 160A em até 500V nas categorias de utilização AC-21, AC-23 e AC-3
- Acionamento por acoplamento e travamento que impede a abertura da porta do painel com o seccionador na posição ligado
- Montagem frontal ou pela base simplificada
- Alta resistência para correntes de curto-circuito e terminais abertos, protegidos contra toque acidental
- Com estrutura em melamina oferecem:
 - elevada isolamento
 - dimensões reduzidas
 - qualidade de acabamento
- Atendem a norma IEC 947

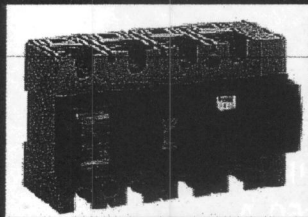
(Target engenharia e consultoria)

Seccionadores 5TE

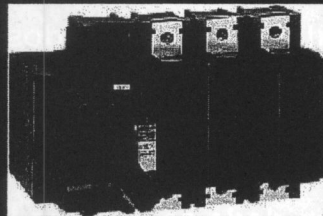


- São aplicados como chave principal e de distribuição em instalações elétricas prediais, residenciais e comerciais
- Correntes nominais:
 - 5TE3 - mono, bi e tripolares - 40 e 80A em 440VCA
 - 5TE0/5TE1 - tripolares - 40, 100, 125 e 160A em 440VCA
- Compactos e modulares permitem fixação rápida por engate sobre trilho
- Os seccionadores 5TE3 atendem ao Sistema N - modular standard

(Target engenharia e consultoria)

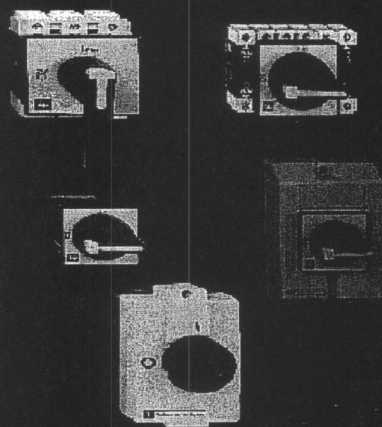


Interruptores de Carga INTERPACT



- Tensão de operação: 690Vca
- Tensão de isolamento: 750Vca
- Corrente Nominal: 40 a 2500 A
- Corrente de curta duração 1s.: 3 a 50kA
- Número de pólos: 3P/4P
- Auxiliares e acessórios disponíveis
- Modularidade até 160A
- Seccionamento plenamente aparente
- Atendem à norma NBR IEC 60947-3

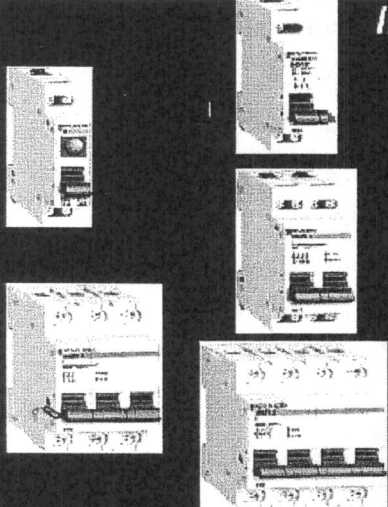
(Target engenharia e consultoria)



Interruptores- Seccionadores Vario

- Calibre :12 a 175 A
- Interruptores para todos os tipos de máquinas específicas, processos
- Funções de automatismos elevadas
- Contatos auxiliares comuns a toda gama
- Concepção modular
- Fixação tanto pela base como pelo topo com a mesma referência do produto
- Travamento na posição aberta por até 3 cadeados
- Conformidade às normas IEC 947

(Target engenharia e consultoria)

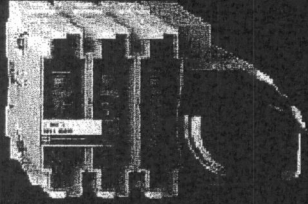


Interruptor de carga I

Abertura e fechamento de circuitos em carga

- Seccionamento plenamente aparente
- Interruptores sem indicador :
 - Uni - bi - tri - tetra
 - 20 - 32 - 63 - 100A
- Interruptores com indicador :
 - Uni - bi
 - 32A
- Auxiliar : contato inversor
- Acessórios : protetor de bornes , comando rotativo, dispositivo de trava com cadeado
 - I 20, 32, 40 e 63 A atendem à norma IEC 669-1
 - I 40, 63, 100 E 125 A atendem à norma IEC 947-3

(Target engenharia e consultoria)



Chave Seccionadora com Porta Fusível GS1

- Chave Seccionadora sob carga tripolares e tetrapolares
- Calibre : 32 a 1250 A
- Possibilidade de cadeados de segurança na manopla
- Aditivos de sinalização
- Função teste
- Conformidade às normas IEC 947

(Target engenharia e consultoria)

Contator

Neste texto abordaremos o funcionamento dos contadores, suas principais características com relação à tensão nominal, à frequência de manobra, à corrente nominal, à numeração dos contatos de potência e comando, e às categorias de acionamento (AC1, AC3, AC4).

Analisaremos os relés de tempo e suas principais aplicações dentro do comando elétrico, assim como, os relés bimetálicos e suas aplicações como elemento de proteção contra sobrecargas.

Vamos, também, traçar um paralelo entre o relé térmico e as sondas de proteção térmica, por meio da análise do funcionamento das sondas de acordo com cada aplicação.

Contadores de Potência

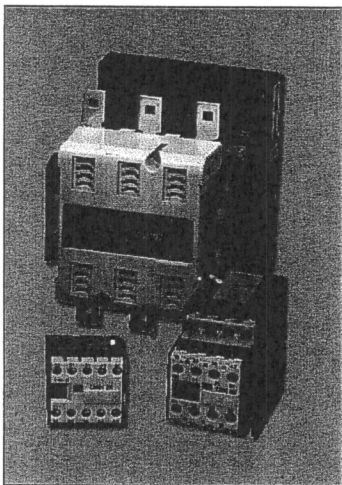
Contator Magnético Tripolar

É um dispositivo de atuação magnética destinado à interrupção de um circuito em carga ou em vazio.

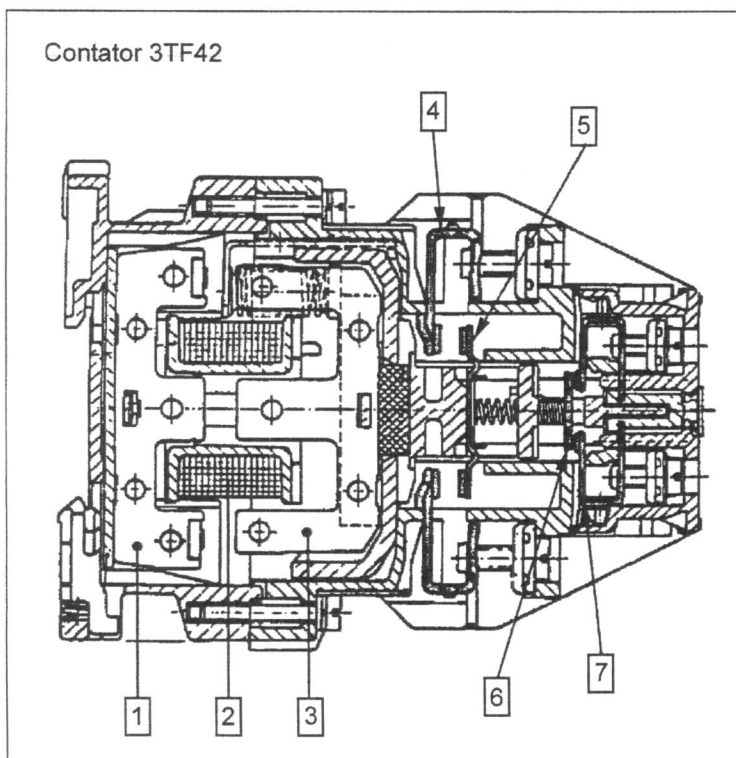
Seu princípio de funcionamento baseia-se na força eletromotriz que tem origem na energização de uma bobina e na força mecânica proveniente do conjunto de molas de que se compõe.

Quando a bobina é energizada, a força eletromecânica desta sobrepõe-se à força mecânica das molas, obrigando os contatos móveis a se fecharem;

Sobre os contatos fixos aos quais estão ligados os terminais do circuito, conforme se pode observar na figura a baixo.



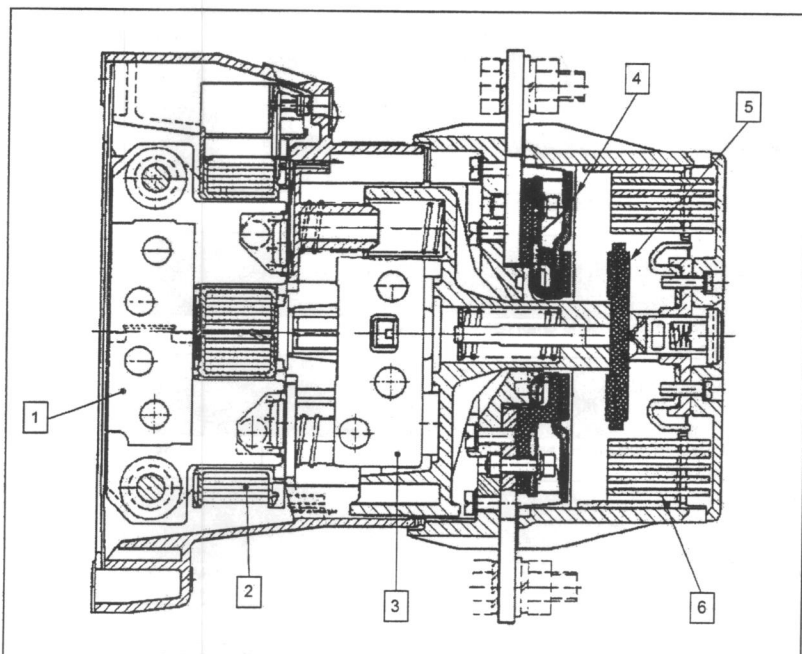
Catálogo eletrônico - Weg



(Catálogo Siemens)

1. Núcleo Fixo
2. Bobina
3. Núcleo Móvel
4. Contato Fixo Principal
5. Contato Móvel Principal
6. Contato Móvel Auxiliar
7. Contato Fixo Auxiliar

Contator 3TF56



(Catálogo Siemens)

1. Núcleo fixo
2. Bobina
3. Núcleo móvel
4. Contato fixo
5. Contato móvel
6. Câmara de extinção

Os contatores são construídos para suportar um elevado número de manobras. São dimensionados em função da corrente nominal do circuito, do número de manobras desejado e da corrente de desligamento no ponto da instalação.

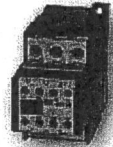
Obs: Na compra de contatores devem ser fornecidas, no mínimo, as seguintes informações:


- Tensão Nominal
- Freqüência Nominal
- Corrente Nominal
- Números de Manobras
- Tensão Nominal da Bobina
- Número de contatos Fixos ou Móveis

Característica dos Contatores de Potência

CONTADORES TRIPOLARES: seleccione para visualizar os dados

CW 07	CW 4	CW 7	CW 17	CW 27	CW 37	CW 47	CW 57	CW 77	CW 107	CW 177	CW 247	CW 297	CW 330	CW 334
-------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------



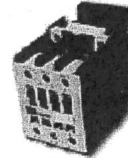
TIPO		CW 37	
AC 3 Manobras de motores com rotor gaiola com desligamento em regime.	Corrente nominal de emprego I _e (até 500 V) (A)	32	
	Potência máxima orientativa (cu)	220 V	10
		380 V	20
		440 V	25
Manobras / hora a plena carga	750		
AC 4 Manobras de motores com rotor gaiola, serviço intermitente, pulsatório e reversão a plena marcha.	Corrente nominal de emprego I _e (até 500 V) (A)	16	
	Potência máxima orientativa (cu)	220 V	5
		380 V	10
		440 V	10
Manobras / hora a plena carga	250		
AC 1 Manobras de cargas resistivas puras ou pouco indutivas.	Corrente nominal de emprego I _{e=Ith} (até 500 V) (A)	50	
	Potência máxima (kW)	220 V	19
		380 V	33
		440 V	38
Manobras / hora a plena carga	50		
Tipos / execução de contatos auxiliares			1NA + 1NF (.11) 2NA + 2NF (.22)
Fusível máximo recomendado (D ou NH)			63
Consumo da bobina "Ligar" / "Ligada"	(Faixa de operação da bobina: 0,8 a 1,1 Un)	Corrente alternada (VA)	81 / 15
		Corrente contínua (W)	-
Dimensões (mm)		Altura (H)	85
		Largura (L)	50
		Profundidade (P)	120
Peso (kg)	0,62		


(Catálogo eletrônico – Weg)

Contatores de Potência

CONTADORES TRIPOLARES: seleccione para visualizar os dados

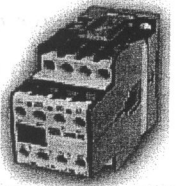
CWM 09	CWM 12	CWM 32	CWM 65	CWM 105	CWME 205	CWME 420
CWM 9	CWM 18	CWM 40	CWM 80	CWME 150	CWME 250	CWME 550
	CWM 25	CWM 50	CWM 95	CWME 185	CWME 309	CWME 700



TIPO		CWM 32	
AC 3 Manobras de motores com rotor gaiola com desligamento em regime.	Corrente nominal de emprego I _e (até 500 V) (A)	32	
	Potência Máxima Orientada (cu)	220 V	12,5
		380 V	20
		440 V	20
Manobras / hora a plena carga	1200		
AC 4 Manobras de motores com rotor gaiola, serviço intermitente, pulsatório e reversão a plena marcha.	Corrente nominal de emprego I _e (até 500 V) (A)	16	
	Potência Máxima Orientada (cu)	220 V	5
		380 V	10
		440 V	12,5
Manobras / hora a plena carga	360		
AC 1 Manobras de cargas resistivas puras ou pouco indutivas.	Corrente nominal de emprego I _{e=Ith} (até 500 V) (A)	60	
	Potência Máxima Orientada (kW)	220 V	22,5
		380 V	39,5
		440 V	45
Manobras / hora a plena carga	1200		
Tipos / execução de contatos auxiliares			.00/.10 (1 HA) .01 (1 NF)
Fusível máximo recomendado (D ou NH)			50
Consumo da bobina "Ligar" / "Ligada"	(Faixa de operação da bobina: 0,8 a 1,1 Un)	Corrente alternada (VA)	88 / 9
		Corrente contínua (W)	7,5 / 7,5
Dimensões (mm)		Altura (H)	87
		Largura (L)	55
		Profundidade (P)	98 / 134
Peso GA / CC (kg)	0,49 / 0,82		


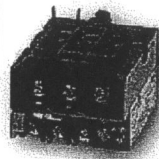
(Catálogo eletrônico – Weg)

Contatores Auxiliares

CONTADORES AUXILIARES: seleccione para visualizar os dados				CAW 04	CAW 8	CAWM 04	
TIPO						CAW 8	
AC 15	Circuito de comando em corrente alternada	Corrente nominal de emprego Ie (A)	220 V			10	
			380 V			6	
			440 V			4	
DC 13	Circuitos de comando em corrente contínua	Corrente nominal de emprego Ie (3 pólos em série) (A)	24 V			16	
			110 V			1,5	
			220 V			0,5	
Tipos / execução de contatos auxiliares (sem blocos de contatos auxiliares)						4NA + 2NF (.42) 4NA + 4NF (.44) 5NA + 3NF (.53) 6NA + 2NF (.62) 7NA + 1NF (.71) 8NA (.80)	
Bobina em corrente alternada (CA)							
Bobina em corrente contínua (CC)							
Manobras / hora a plena carga						1200	
Fusível máximo recomendado Tipo D (gLG) (A)						16	
Consumo da bobina "Ligar" / "Ligada"			Corrente alternada (VA)		66 / 11,5		
			Corrente contínua (W)		-		

(Catálogo eletrônico – Weg)

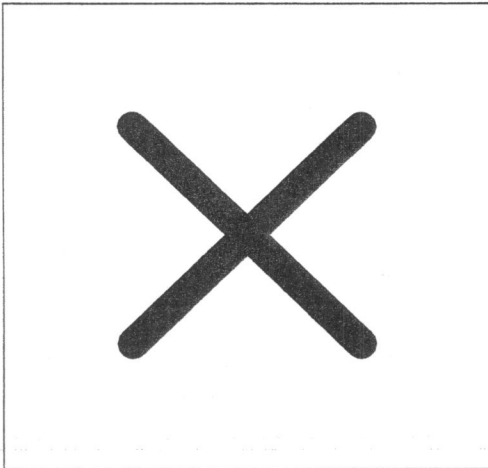
Contatores Acoplados a Relé Térmico

CONTADORES TRIPOLARES: seleccione para visualizar os dados															
CW 07	CW 4	CW 7	CW 17	CW 27	CW 37	CW 47	CW 57	CW 77	CW 107	CW 177	CW 247	CW 297	CW 330	CW 334	
TIPO															CW 37
															
															Relé de Sobrecarga: RW 27.2
Faixas de ajuste / Fusíveis máximos recomendados (D ou NH)															0,28 - 0,4 / 2 0,4 - 0,6 / 2 0,56 - 0,8 / 2 0,8 - 1,2 / 4 1,2 - 1,8 / 6 1,8 - 2,8 / 6 2,8 - 4 / 10 4 - 6 / 16 5,0 - 8 / 20 8 - 12 / 25 11 - 17 / 36 15 - 23 / 50 22 - 32 / 63
Dimensões (mm)															Altura (H) 46 Largura (L) 52 Profundidade (P) 79,5
Peso (kg)															0,15

(Catálogo eletrônico – Weg)

Relé de tempo

Dispositivo eletrônico destinado a realizar contagens de tempo em circuitos de comando de Motores Elétricos ou sistemas de controle que devem trabalhar dentro de uma base de tempo.



(Catálogo eletrônico – Weg)

Este dispositivo poderá ser usado em sistemas de partida do tipo:

- Partida com Chave Estrela Triângulo
- Partida com Chave Compensadora
- Partida Seqüencial de Motores
- Partida com Aceleração Rotórica
- Partida Série/Paralela

Especificação Técnica

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA – WEG						
Linha	Temporizadores		Protetores			
Modelo	RTW. 02 E (retardo na energização)	RTW. 02 VΔ (estrela triângulo)	RFW (falta de fase)	RFW N (falta de fase c/ neutro)	RSW (Seqüência de fase)	RPW PTC (Proteção térmica – PTC)
Tensão de alimentação (+10%/-15%)	220 Vca/ 110 Vca 24 Vcc	220 Vca /110 Vca	440 Vca/ 380 Vca 220 Vca	380 Vca/ 220 Vca	440 Vca/ 380 Vca 220 Vca	220 Vca/ 110 Vca 24 Vcc
Frequência (Hz)	50/60		50/60			
Consumo máximo ca (VA)	12 (220 Vca) / 6 (110 Vca)		3			1
Consumo máximo cc (W)	1	-	-			0,7
Tempo de retorno TR (ms)	25	<150	-			
Precisão de repetibilidade	± 0,8% para 5 x TR		-			
Precisão de fundo de escala	± 5%		-			
Variação do tempo em função da temperatura	± 0,1% / C		-			
Peso (Kg)	0,13		0,21			
Tempo morto na comutação (ms)	-	100	-			
Soma das resistências dos sensores PTC a frio (Ω)	-		-			≤1 K 5
Faixa de atuação (Ω)						2K3 a 3K5
Capacidade máxima dos contatos de saída (A)	5		5			
Capacidade mínima dos contatos de saída (mA)	100		100			
Tensão máxima dos contatos (Vca)	250		250			
Número de contatos de saída (reversor)	1 ou 2	2	1			
Escalas (em segundos)	5/15/30/60	25	-			
Transformador de entrada	NÃO		SIM			
Indicação luminosa (LED)	NÃO		SIM			
Temperatura ambiente (°C)	0 a 50		0 a 50			
Umidade máx. (% sem condensação)	90		90			

Relés de Sobrecarga Térmicos Bimetálicos

Relés de sobrecarga operam com base no princípio de pares termoelétricos (relés térmicos-bimetálicos).

O princípio de operação do relé está fundamentado nas diferentes dilatações que apresentam os metais, quando submetidos a uma variação de temperatura.

Duas lâminas de metais diferentes (Ferro e Níquel) são soldadas sob pressão ou eletroliticamente. Quando aquecidas, elas se dilatam diferentemente.

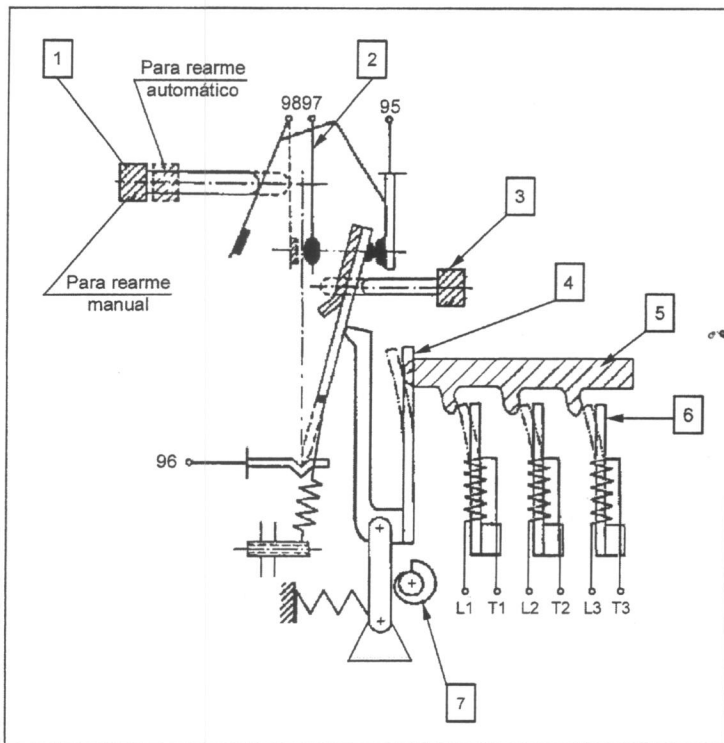
As lâminas se curvam, e essa mudança de posição é usada para a comutação de um contato.

Durante o resfriamento, as lâminas voltam à posição inicial. O relé está, então, novamente pronto para operar, desde que não exista no conjunto um dispositivo mecânico de bloqueio.

O relé permite que seu ponto de atuação, ou seja, a curvatura da lâmina, e o conseqüente desligamento, possam ser ajustados com auxílio de um dial (potenciômetro). Isso possibilita ajustar o valor de corrente que provocará a atuação do relé.

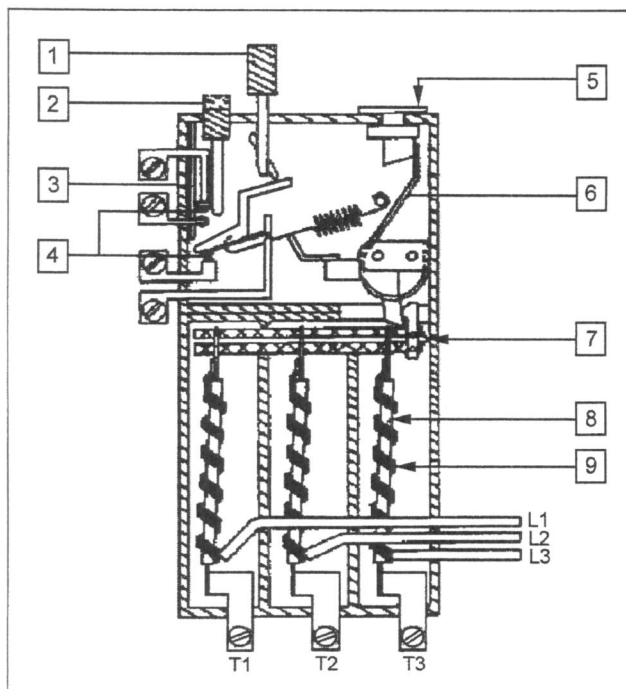
O relé deve ser ajustado para a corrente nominal da carga a ser protegida, por exemplo, um motor.

Princípio construtivo de um relé de sobrecarga bimetalico



- 1 – Botão de Rearme
- 2 – Contatos Auxiliares
- 3 – Botão de Teste
- 4 – Lâmina Bimetálica Auxiliar
- 5 – Cursor de Arraste
- 6 – Lâmina Bimetálica Principal
- 7 – Ajuste de Corrente

Relé de sobrecarga 3UA5



1. Botão de teste (vermelho)
2. Botão de rearme (azul)
3. Indicador de sobrecarga (verde)
4. Contatos auxiliares 1 NA + 1 NF
5. Dial da corrente de ajuste
6. Lâmina bimetálica auxiliar
7. Cursores e alavanca de arraste
8. Lâmina bimetálica principal
9. Elemento de aquecimento

Compensação de temperatura

Os relés de sobrecarga térmicos possuem compensação de temperatura ambiente, que tem seu princípio de operação descrito a seguir.

Com uma temperatura ambiente de 30°C, as lâminas bimetálicas principais se dilatarão (curvarão), deslocando-se através do cursor, uma parte do percurso. Para um determinado valor de corrente, isso resultaria em um tempo de disparo menor.

Para que isso seja evitado, o cursor atua sobre a lâmina bimetálica auxiliar. Esta lâmina, entretanto, não é percorrida pela corrente – ela é aquecida pela temperatura ambiente e se curvará na proporção das lâminas principais. Dessa forma, as lâminas aquecidas pela corrente determinarão um mesmo tempo de disparo para qualquer temperatura ambiente.

Esse tipo de compensação de temperatura é eficaz na faixa de -20°C a $+55^{\circ}\text{C}$.

Ajuste

Os relés de sobrecarga possibilitam uma faixa para escolha de corrente de ajuste. A corrente de ajuste desejada pode ser definida por meio de uma escala e de um parafuso de ajuste. A corrente de ajuste deve corresponder à corrente nominal ou de regime da carga a ser protegida.

Causas de sobrecargas em motores

- Sobrecarga da Máquina
- Tempo de partida prolongado
- Elevada frequência de manobra
- Rotor bloqueado
- Falta de fase
- Desvio excessivo de tensão e frequência

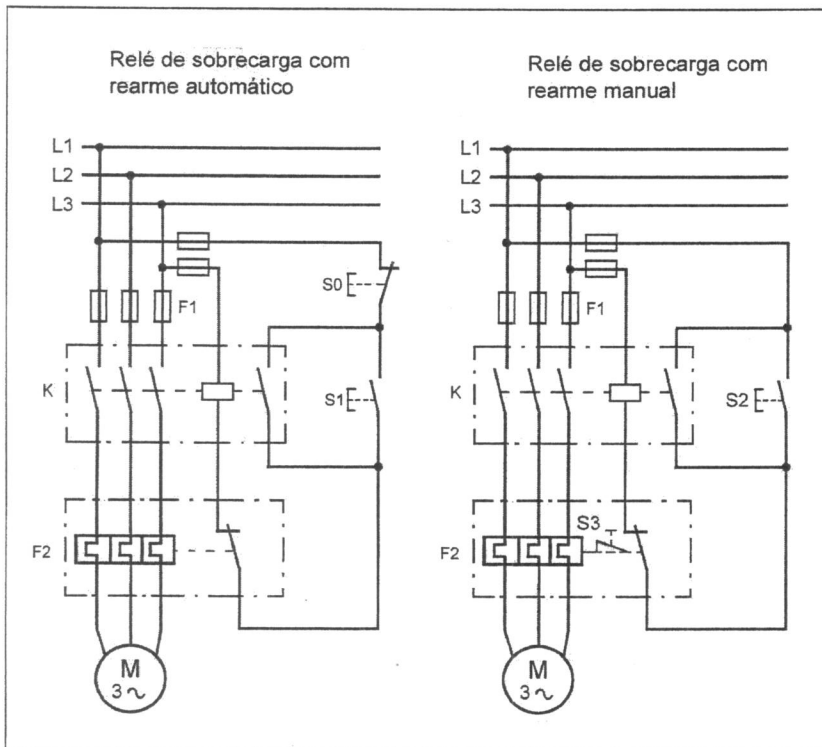
Aplicação do rearme manual e automático

Após um disparo por sobrecarga, as lâminas bimetálicas necessitam resfriar-se e retornar à sua posição inicial até que o relé esteja novamente em condições de serviço. Assim, o intervalo de repouso necessário ao motor fica obrigatoriamente assegurado.

Relés de sobrecarga em regime automático são utilizados com contadores comandados por botão de impulso. Após o tempo de resfriamento, o contato auxiliar do relé retorna à sua posição inicial, não ativando o circuito de comando.

Relés de sobrecarga em rearme manual são utilizados em contadores comandados por chave de posição fixa. O contato auxiliar do relé permanece aberto após o tempo de resfriamento, impedindo que se ative o circuito de comando.

Aplicação do Rearme Manual e Automático



Protetores Térmicos

A proteção térmica é efetuada por meio de termo-resistências (resistência calibrada), termistores, termostatos ou protetores térmicos.

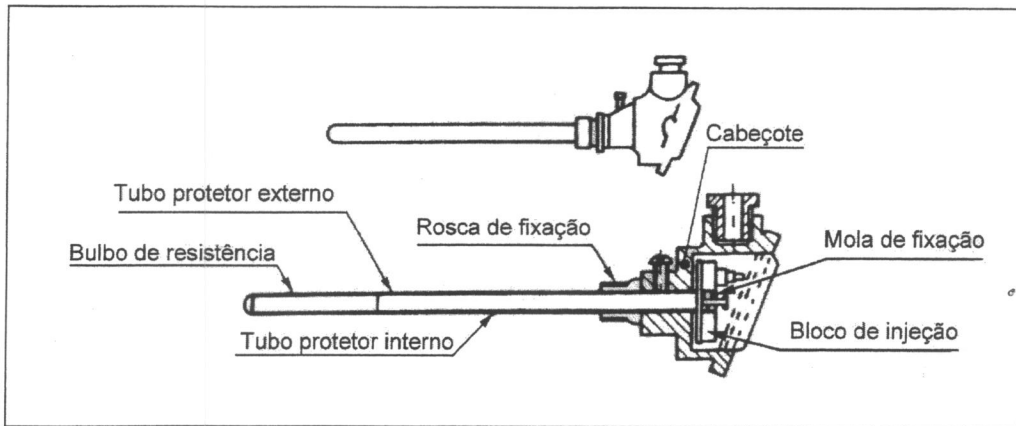
Os tipos de detetores a serem utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento empregado, do tipo de máquina e da exigência do cliente.

Termo-resistências (PT100)

São elementos cuja operação se baseia na característica de variação da resistência com a temperatura, intrínseca a alguns materiais (geralmente platina, níquel ou cobre).

Possuem resistência calibrada, que varia linearmente com a temperatura, possibilitando um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor pelo display do controlador, com alto grau de precisão e sensibilidade de resposta.

Geralmente se aplicam em instalações de grande responsabilidade, como, por exemplo, em regime intermitente muito irregular.



(Manual de motores – Weg)

Termistores (PTC e NTC)

São detetores térmicos compostos de sensores semicondutores que variam sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura.

- PTC – Coeficiente de Temperatura Positivo
- NTC – Coeficiente de Temperatura Negativo

O tipo PTC é um termistor cuja resistência aumenta bruscamente ao atingir-se um valor bem definido de temperatura, especial para cada tipo.

Essa variação brusca na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída, o qual desliga o circuito principal. Pode ser usado em sistemas de alarme.

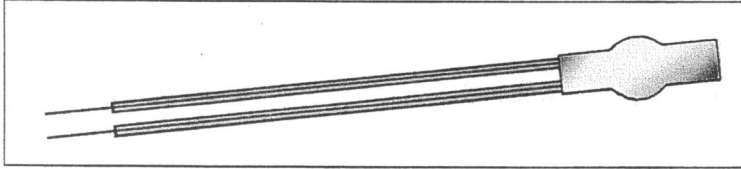
Para o termistor NTC acontece o contrário, mas sua aplicação não é normal em motores elétricos, pois os circuitos eletrônicos de controle disponíveis destinam-se, geralmente, para o PTC.

Os termistores possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e têm uma resposta mais rápida em relação aos outros detetores.

Os termistores, com seus respectivos circuitos eletrônicos de controle, oferecem proteção completa contra sobreaquecimento produzido por falta de fase, sobrecarga, sub ou sobretensões, ou freqüentes operações de reversão ou liga-e-desliga.

Possuem um baixo custo, relativamente aos do tipo PT100, mas necessitam um relé para comando da atuação do alarme ou operação.

- Termistor (PTC ou NTC)



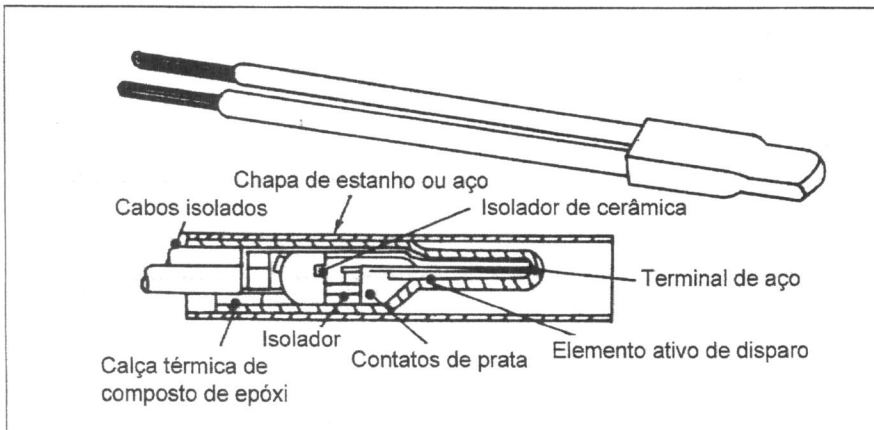
Termostatos

São detetores térmicos do tipo bimetálico, com contatos de **prata** normalmente fechados, que se abrem quando ocorre determinada elevação de temperatura. Quando a temperatura de atuação do bimetálico baixa, ele retorna a sua forma original instantaneamente, permitindo um novo fechamento dos contatos.

Os termostatos podem ser destinados para sistemas de alarme, desligamento ou ambos (alarme e desligamento) de motores trifásicos. São ligados em série com a bobina do contator, utilizando-se geralmente um termostato por fase do motor.

Para operar em alarme e desligamento (dois termostatos devem ser usados por fase), os termostatos de alarme devem ser apropriados para atuação na elevação de temperatura prevista no motor, ao passo que os termostatos de desligamento deverão atuar na temperatura máxima do material isolante.

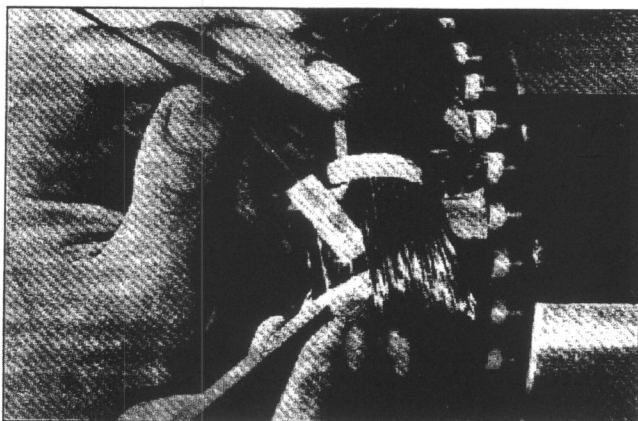
Termostato - Escala Real



(Manual de motores – Weg)

Instalação do Termostato

Os termostatos são instalados nas cabeças de bobinas de fases diferentes, conforme a figura abaixo.



(Manual de motores – Weg)

Comparação entre os sistemas de proteção mais comuns

	TERMORESISTÊNCIA (PT-100)	TERMISTOR (PTC – NTC)	TERMOSTATO
Mecanismo de Proteção	Resistência Calibrada	Resistor de Avalanche	Contatos móveis Bimetálicos
Disposição	Cabeça de Bobina	Cabeça de Bobina	Inserido no circuito Cabeça das bobinas
Forma de Atuação	Comando externo de atuação na proteção	Comando externo de atuação na proteção	Atuação direta Comando externo de atuação da proteção
Limitação de Corrente	Corrente de comando	Corrente de comando	Corrente do motor Corrente do comando
Tipo de Sensibilidade	Temperatura	Temperatura	Corrente e temperatura
Número de unidades por motor	3 ou 6	3 ou 6	3 ou 6 1 ou 3
Tipos de comando	Alarme e/ou desligamento	Alarme e/ou desligamento	Desligamento Alarme e/ou desligamento

Inversores

Aqui, abordaremos o princípio de funcionamento dos inversores de frequência.

Iniciaremos nossa análise fazendo comparações entre os diversos sistemas de variação de velocidade – mecânicos, hidráulicos, eletromagnéticos e eletrônicos.

Para uma maior compreensão, analisaremos o funcionamento do inversor *six step*, procurando detalhar como é montado o sistema trifásico a partir de uma tensão contínua constante.

Comentaremos as técnicas de modulação PWM (as clássicas), assim como as aplicações dos inversores de frequência, curvas características, tipos de conjugados resistentes e noções de dimensionamento.

Motores Assíncronos

Os motores assíncronos ou de indução, por serem robustos e mais baratos, são os mais empregados na indústria. Nesse tipo de motor, o campo girante do estator possui a velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas.

Teoricamente, para um motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria a mesma velocidade síncrona.

Ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na proporção necessária para que a corrente, induzida pela diferença de rotação entre o campo girante síncrono e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético.

Princípio de funcionamento

O funcionamento dos motores assíncronos ou dos inversores está baseado no princípio da interação eletromagnética do campo girante do estator e com as correntes induzidas no enrolamento rotórico, quando os condutores do rotor são cortados pelo campo girante produzido no estator da máquina. [confuso]

No motor assíncrono, temos um conjunto de bobinas no estator alimentadas por uma rede trifásica e que produzem um campo magnético girante.

Dentro desse campo está o rotor, que é constituído por um enrolamento em curto-circuito. O movimento do fluxo magnético induz uma tensão sobre os condutores do enrolamento do rotor.

Como o enrolamento do rotor está fechado haverá um fluxo de corrente.

Essa corrente induzida no rotor está atrasada em relação à tensão, e a interação entre a corrente do rotor e o fluxo do estator resulta em torque na mesma direção do campo girante.

Cálculo da rotação síncrona

$$N_s = (120 \cdot f) / N_p$$

onde:

N_s = rotação síncrona

N_p = número de pólos.

f = frequência

Cálculo da rotação do rotor

$$N_r = [(120 \cdot f) / N_p] \cdot (1 - S)$$

onde:

S = escorregamento da máquina

Cálculo do escorregamento

$$S = [(N_s - N_r) / N_s] \cdot 100\%$$

Cálculo da frequência da corrente induzida no rotor

$$f_2 = S \cdot f_1$$

onde:

f₁ = Frequência da corrente estatórica (Hz).

f₂ = Frequência da corrente rotórica (Hz).

Obs:

A vazio o escorregamento é muito pequeno, a corrente do rotor é reduzida apenas o suficiente para produzir o torque a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, com $\cos\phi < 0,3$, pois a corrente que circula pelo motor é utilizada apenas para a sua magnetização.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, a velocidade diminui. O pequeno decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na sua reatância e na força eletromotriz induzida.

Um aumento da corrente no rotor causa um aumento da corrente no estator (componente que produz potência). Com isso têm-se um melhor fator de potência, tendendo a produzir mais potência mecânica e solicitando mais potência da linha.

↻

A plena carga o motor irá girar a um escorregamento que promove o equilíbrio entre o conjugado do motor e o conjugado resistente da carga. O fator de potência a plena carga varia de 0,8 (em motores pequenos) e 0,95 (em motores grandes).

Força Eletromotriz e Corrente Induzida

Pela teoria, para motor com rotor bloqueado temos que as tensões induzidas no rotor (f.e.m.) e no estator (f.c.e.m) são dadas respectivamente por:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot n_1 \cdot \phi_m \cdot K_{e1}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot n_2 \cdot \phi_m \cdot K_{e2}$$

onde:

E_1 = Força contra-eletromotriz induzida no estator

E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor

k_{e1} e k_{e2} = Fator de enrolamento do estator e do rotor, respectivamente

n_1 e n_2 = Número de espiras do estator e do rotor, respectivamente

ϕ_m = Fluxo de magnetização

f_1 e f_2 = Freqüência do estator e do rotor, respectivamente

Na presença de escorregamento, têm-se:

$$f_2 = S \cdot f_1$$

Portanto, a tensão eletromotriz induzida no rotor, em razão do escorregamento, será:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot S \cdot f_1 \cdot n_2 \cdot \phi_m \cdot K_{e2}$$

Pode-se realizar uma aproximação para a expressão a seguir, onde:

$$E_{2s} = S \cdot E_2$$

Analisando a expressão da força contra-eletromotriz E_1 , têm-se:

$\phi_m = E_1 / (4,44 \cdot f_1 \cdot n_1 \cdot k_{e1})$. Como 4,44, n_1 e k_{e1} são constantes, têm-se:

$\phi_m = E_1 / (f_1 \cdot K)$. Quando se variar a rotação do motor, a constante K não terá seu valor alterado, portanto pode-se considerar a seguinte simplificação:

$$\phi_m = (E_1 / f_1)$$

Quando se aplica o acionamento eletrônico em motores assíncronos, para se manter o conjugado constante deve-se manter a relação volts/hertz constante, conforme a fórmula mostrada acima.

Conjugado Eletromagnético

Da interação entre a corrente do rotor e o fluxo produzido em cada pólo unitário do campo magnético girante que concatena o condutor do rotor resulta o conjugado motor, o qual é dado por:

$$C = K \cdot \phi_m \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2$$

onde:

K = Constante para unidades empregadas

$\cos \phi_{2s}$ = Fator de potência do circuito do rotor

ϕ_m = Fluxo de magnetização

I_{2s} = Corrente rotórica

Para um estudo mais aproximado da máquina, essa equação poderá ser simplificada por:

$$C = \phi_m \cdot I_{2s}$$

Que determina a relação entre o torque desenvolvido (solicitado) pela máquina, o fluxo de magnetização entre o rotor e o estator e a corrente induzida rotórica, que é dada por:

$$I_{2s} = (S \cdot E_2) / Z_{2s}$$

O conjugado desenvolvido é função do escorregamento.

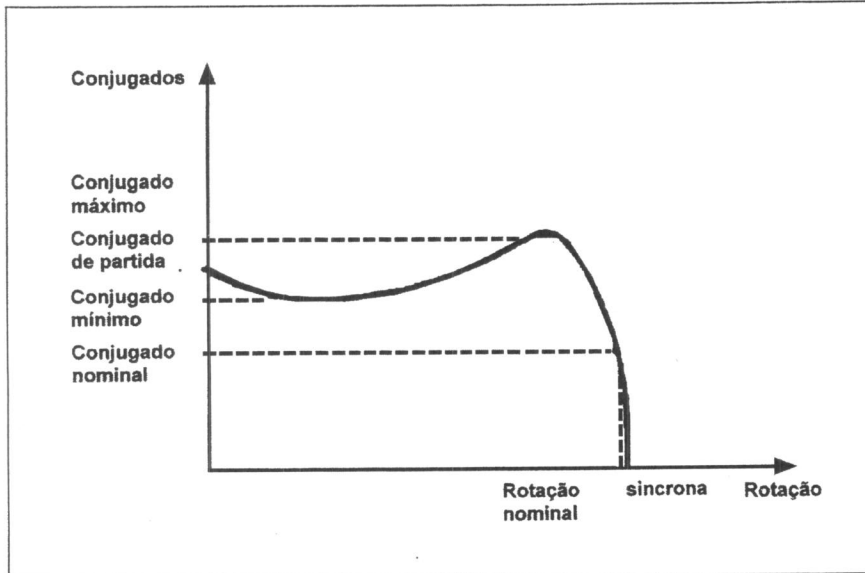
Com o aumento da carga aplicada ao motor, aumenta-se o escorregamento e conseqüentemente o torque desenvolvido pelo motor até um limite em que obtêm-se o conjugado máximo, e a partir do qual, aumentando o escorregamento, aumenta-se a impedância rotórica diminuindo o conjugado

$$\text{onde } Z_{2s} = \sqrt{R_2^2 + Sx_{d2}^2}$$

Característica conjugado x velocidade

Essa característica mostra a dependência entre o conjugado desenvolvido pelo motor e a sua rotação.

Nos motores de indução o conjugado disponível aumenta à medida que a velocidade rotórica diminui em relação à velocidade síncrona, até a velocidade em que ocorre o conjugado máximo.



(Weg automação)

Característica de Partida

Do desenvolvimento do modelo matemático da máquina assíncrona, demonstra-se que o conjugado é descrito por:

$$CP = K \cdot E_1^2 \cdot [R_2 / R_2^2 + X_{d_2}^2]$$

CP = Conjugado de Partida

k = Constante referente às unidades empregadas

R₂ = Resistência Rotórica

X_{d₂} = Reatância Rotórica

Da equação acima podemos fazer as seguintes considerações:

- No instante da partida o conjugado não é afetado pela natureza da carga aplicada.
- Desde que para um dado motor de indução tipo gaiola a resistência efetiva do rotor e a reatância de rotor bloqueado sejam constantes, a expressão pode ser escrita por:

$$CP = K' \cdot E_1^2$$

Podemos observar que o conjugado de partida é apenas função da tensão aplicada no estator.

Ao reduzir-se a tensão nominal, também se reduzirá a corrente secundária e a primária. Esse processo ainda é muito utilizado no acionamento dos motores assíncronos.

Sistemas de Variação de Velocidade

Uma das necessidades que sempre existiram, no passado, foi a variação da velocidade em motores de indução, pois ela é fixa e está relacionada com as características elétricas construtivas do motor e a frequência da rede de alimentação.

Tipos de Sistemas de Variação de Velocidade

1. Variadores Mecânicos
2. Variadores Hidráulicos
3. Variadores Eletromagnéticos
4. Variadores Eletroeletrônicos

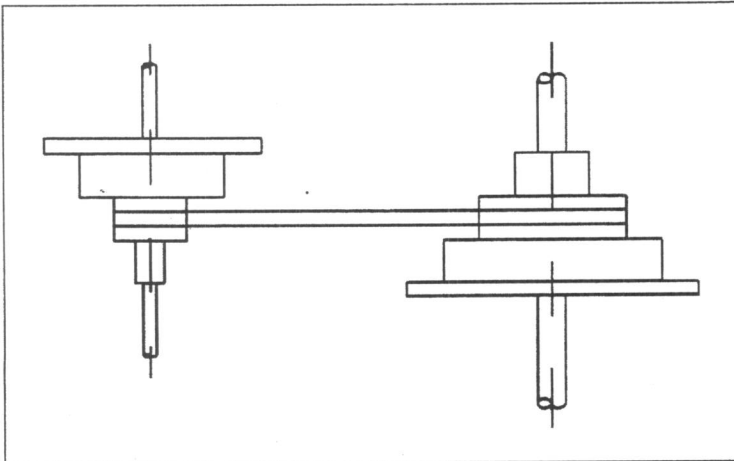
Variadores Mecânicos

Foram os primeiros sistemas utilizados para se obter uma velocidade diferente da velocidade do motor.

Características: simplicidade de construção, baixo custo, pequena variação de velocidade condicionada a limites (mecânicos e elétricos).

Polias Fixas

A variação discreta de velocidade é utilizada quando existe a necessidade de alteração em passos constantes, de forma a não possibilitar variação linear da rotação.

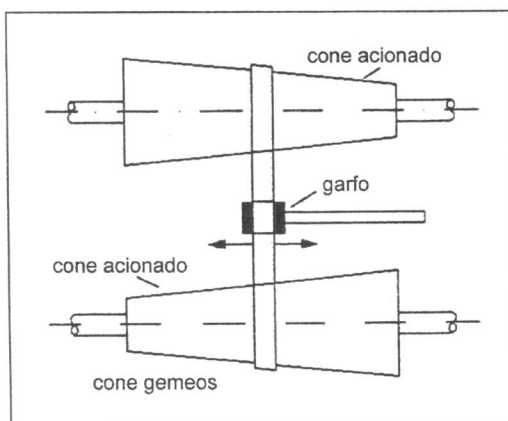


(Weg automação)

Polias Cônicas

Sistema que permite a variação contínua da velocidade por meio de duas polias cônicas contrapostas. A variação da velocidade ocorre através do posicionamento da correia sobre a superfície das polias cônicas.

Esse sistema é utilizado onde não é necessária uma faixa de variação de velocidade muito ampla e não se requerem variações rápidas e precisas. Esse sistema é utilizado com maior frequência para pequenos ajustes de sincronismo mecânico de baixa precisão.

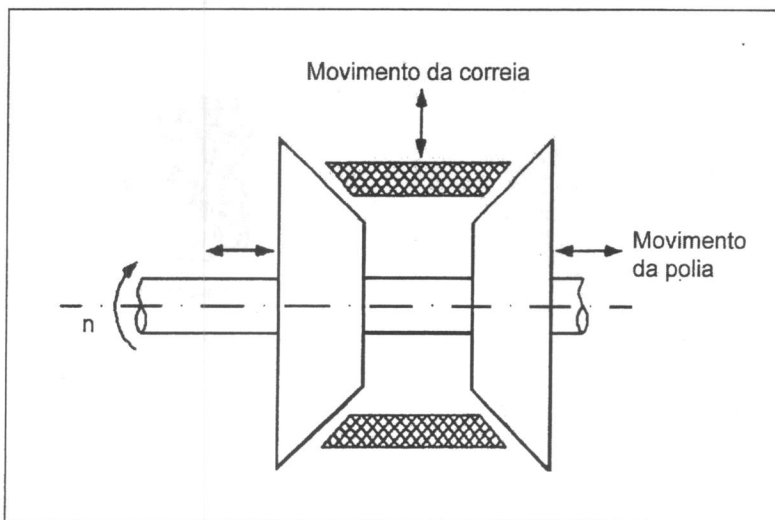


(Weg automação)

Polias Variadoras

Permite variação contínua da velocidade. Utiliza um dispositivo mecânico que consiste de duas flanges cônicas formando uma polia, que pode se movimentar sobre o eixo acionado.

Em seu funcionamento percebe-se que o movimento de aproximação ou afastamento entre as duas flanges força a correia a subir ou descer, mudando o diâmetro relativo da correia e conseqüentemente a velocidade da máquina.



(Weg automação)

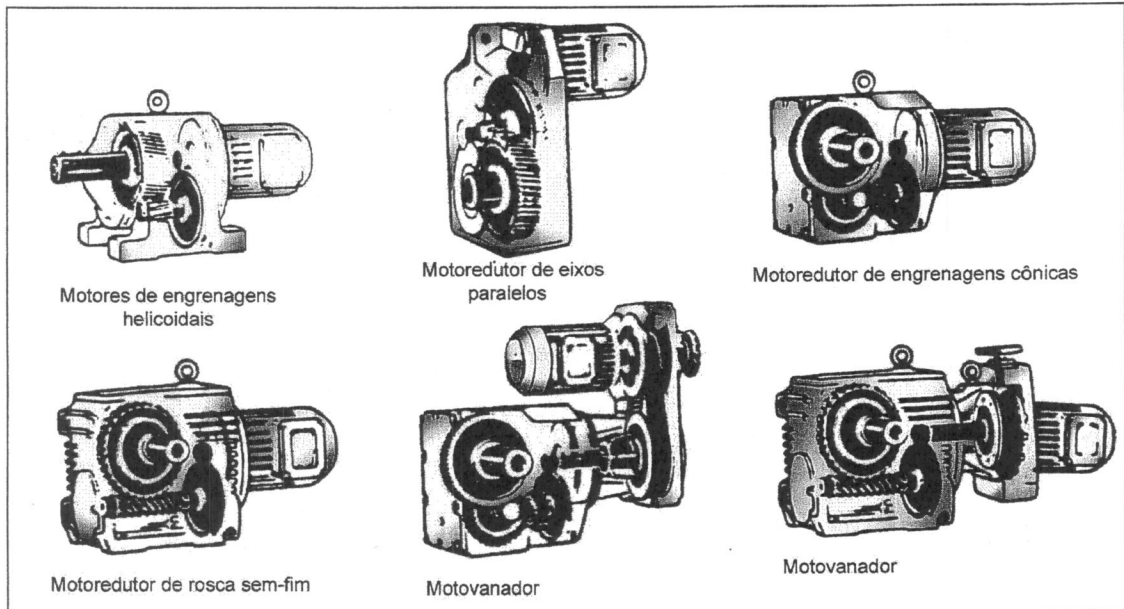
Moto-redutores

Sistema de acoplamento avançado em relação aos anteriores, permite a variação discreta e contínua da velocidade através de um jogo de polias e engrenagens variáveis.

Limitações

- Independente da variação da velocidade na saída, o motor que aciona o moto redutor está funcionando com tensão nominal e frequência nominal, portanto teremos desperdício de energia elétrica.

- b. Esses métodos não permitem controle à distância, têm rendimento muito baixo e são limitados a baixas e médias potências, pois as engrenagens não suportam potências elevadas.



(Weg automação)

Variadores Hidráulicos

Permitem a variação contínua da velocidade e foram projetados para converter a potência hidráulica de um fluido em potência mecânica.

A conversão é feita através de um dispositivo de engrenagens planetárias ou através de acionamento de pistões, com controle efetuado por válvulas direcionais.

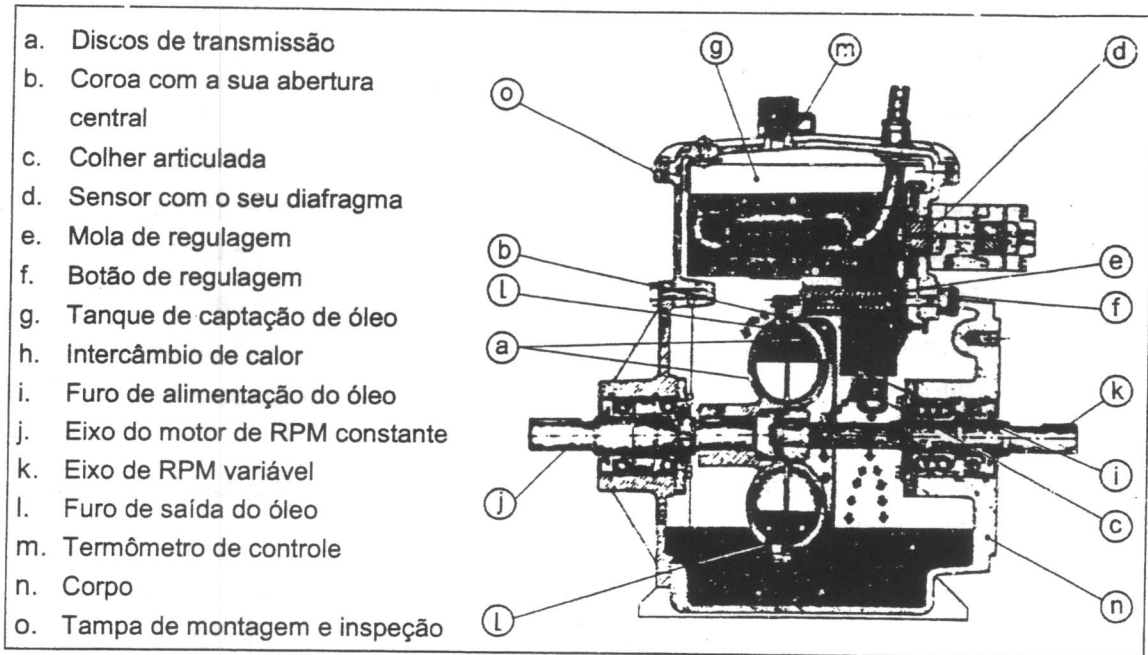
Características

1. Baixa rotação (5 a 500 rpm)
2. Elevado torque
3. Permitem rotação nos dois sentidos
4. Motores de baixa potência
5. Baixo custo

Desvantagens

1. Grandes Instalações (tubulações, motores elétricos, bombas etc.)
2. Rendimento baixo
3. Alto índice de manutenção

4. Perdas elevadas nos circuitos hidráulicos



(Weg automação)

Variadores Eletromagnéticos

Embreagens Eletromagnéticas

Com os variadores eletromagnéticos mudou-se o conceito de variação exclusivamente mecânica para variação eletromecânica.

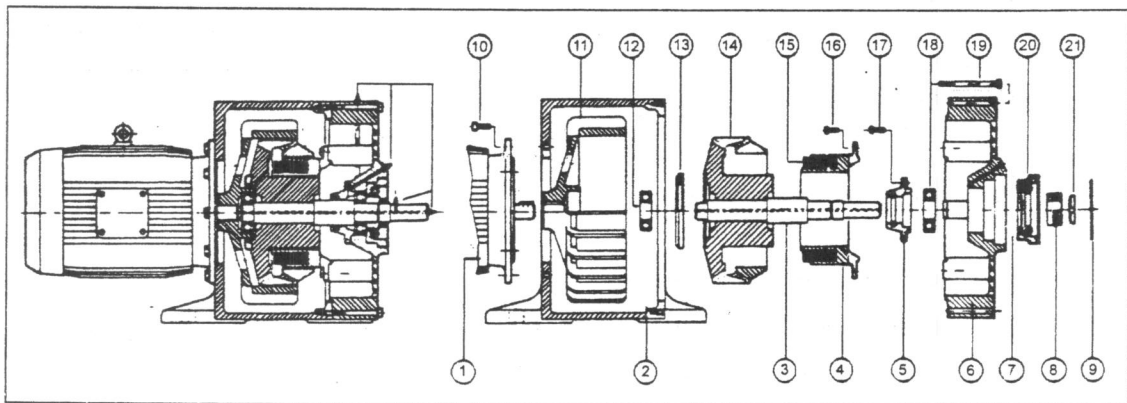
As técnicas envolvidas estão baseadas nos princípios físicos das correntes de Foucault, utilizando um sistema de discos acoplados a bobinas que podem ter seu campo magnético variável, variando-se o torque e a velocidade na saída do variador.

Limitações:

1. A rotação de saída é sempre a nominal do motor.
2. Nesse sistema o motor sempre estará girando na rotação nominal, proporcionando um acoplamento inadequado (desperdício de energia), quando operamos abaixo da rotação nominal.
3. O rendimento é muito baixo e apresenta perdas por aquecimento.
4. As manutenções preventivas são freqüentes porque existem muitas partes girantes, as quais necessitam de ajustes constantes e substituições periódicas.

Componentes:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Motor | 12 - Rolamento central |
| 2 - Carcaça do variador | 13 - Retentor especial |
| 3 - Eixo do variador | 14 - Rotor aranha |
| 4 - Núcleo de bobina | 15 - Bobina de campo |
| 5 - Alçapão | 16 - Parafuso para fixação do núcleo |
| 6 - Tampa | 17 - Parafuso para fixação do alçapão |
| 7 - Gerador | 18 - Rolamento da tampa |
| 8 - Rotor | 19 - Parafuso para fixação da tampa |
| 9 - Tampa | 20 - Carcaça |
| 10 - Parafuso de fixação do motor | 21 - Porca e arruela de segurança |
| 11 - Ventilador | |



(Weg automação)

Variadores Eletroeletrônicos

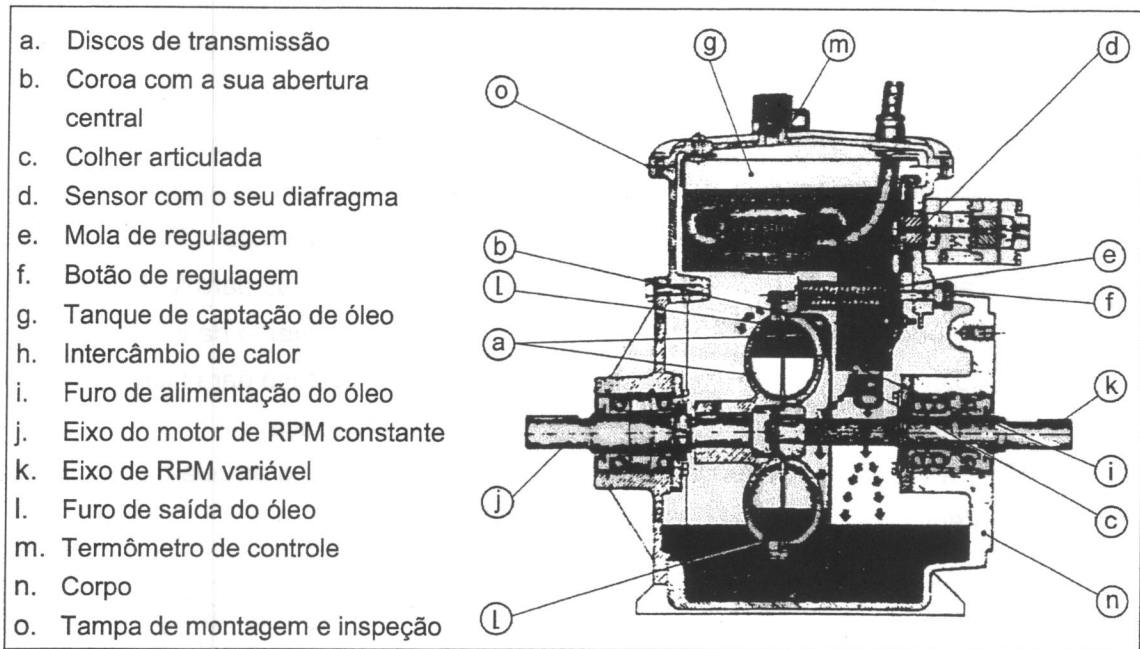
Acionamento de Motor Assíncrono de Rotor Gaiola

A variação da velocidade em Motores Assíncronos pode ser dividida em dois grupos:

1. **Varição Discreta**
2. **Varição Contínua**

- Varição discreta pode ser feita através da variação do número de pólos.
- Varição contínua pode ser feita através da variação da frequência, tensão ou escorregamento.

4. Perdas elevadas nos circuitos hidráulicos



(Weg automação)

Variadores Eletromagnéticos

Embreagens Eletromagnéticas

Com os variadores eletromagnéticos mudou-se o conceito de variação exclusivamente mecânica para variação eletromecânica.

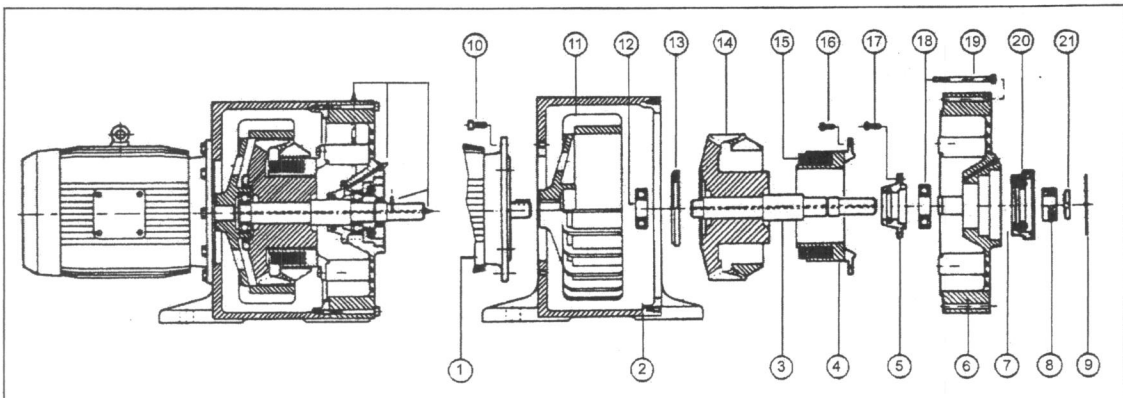
As técnicas envolvidas estão baseadas nos princípios físicos das correntes de Foucault, utilizando um sistema de discos acoplados a bobinas que podem ter seu campo magnético variável, variando-se o torque e a velocidade na saída do variador.

Limitações:

1. A rotação de saída é sempre a nominal do motor.
2. Nesse sistema o motor sempre estará girando na rotação nominal, proporcionando um acoplamento inadequado (desperdício de energia), quando operamos abaixo da rotação nominal.
3. O rendimento é muito baixo e apresenta perdas por aquecimento.
4. As manutenções preventivas são freqüentes porque existem muitas partes girantes, as quais necessitam de ajustes constantes e substituições periódicas.

Componentes:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Motor | 12 - Rolamento central |
| 2 - Carcaça do variador | 13 - Retentor especial |
| 3 - Eixo do variador | 14 - Rotor aranha |
| 4 - Núcleo de bobina | 15 - Bobina de campo |
| 5 - Alçapão | 16 - Parafuso para fixação do núcleo |
| 6 - Tampa | 17 - Parafuso para fixação do alçapão |
| 7 - Gerador | 18 - Rolamento da tampa |
| 8 - Rotor | 19 - Parafuso para fixação da tampa |
| 9 - Tampa | 20 - Carcaça |
| 10 - Parafuso de fixação do motor | 21 - Porca e arruela de segurança |
| 11- Ventilador | |



(Weg automação)

Variadores Eletroeletrônicos

Acionamento de Motor Assíncrono de Rotor Gaiola

A variação da velocidade em Motores Assíncronos pode ser dividida em dois grupos:

1. **Variação Discreta**
2. **Variação Contínua**

- Variação discreta pode ser feita através da variação do número de pólos.
- Variação contínua pode ser feita através da variação da frequência, tensão ou escorregamento.

Para os Motores Assíncronos a relação entre velocidade, frequência, número de pólos e escorregamento é expressa por:

$$N_r = [120.f.(1 - S) / N_p]$$

Analisando a fórmula, podemos ver que para variar a velocidade de um motor assíncrono podemos atuar nos seguintes parâmetros:

N_p = Números de pólos (Variação discreta)

S = Escorregamento (Variação contínua)

f = Frequência da rede de alimentação

Variação do Número de Pólos

Existem três formas de variar o número de pólos de um motor assíncrono:

- 1 - Múltiplos enrolamentos separados no estator
- 2 - Um enrolamento com comutação polar
- 3 - Combinação dos dois anteriores

Motores de duas Velocidades com Enrolamentos Separados

Esse método apresenta a vantagem de combinar enrolamentos com qualquer número de pólos, embora seja limitado pelo dimensionamento eletromagnético do núcleo (Estator/Rotor).

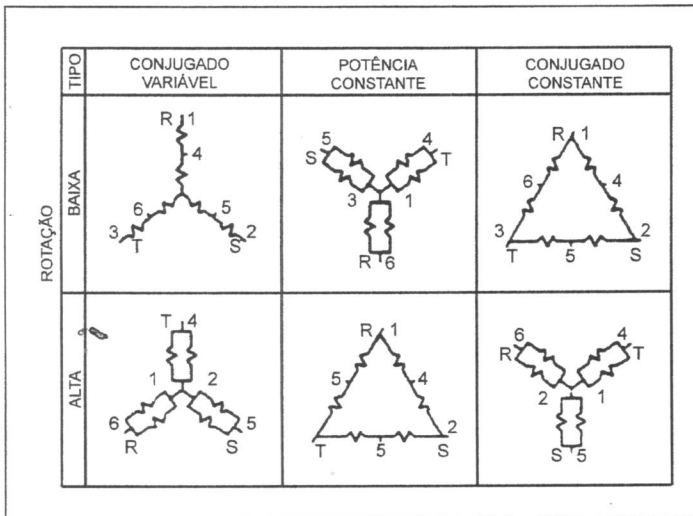
Motores de Duas Velocidades com Enrolamentos por Comutação de Pólos

O sistema mais comum é a Ligação Dahlander, que implica uma Relação de pólos de 1:2, com conseqüente relação de rotação de 1:2.

Podemos obter esse sistema de três formas diferentes:

- Conjugado Constante: o conjugado nas duas rotações é constante e a relação de potência é da ordem de 0,63:1. Nesse caso o motor tem sua ligação de triângulo para dupla estrela.
- Exemplo: Motor de 0,63/1cv IV / II pólos.
- Potência Constante: nesse caso a relação de conjugado é de 1:2 e o motor possui uma ligação de Dupla Estrela para Triângulo.
- Exemplo: Motor de 10/10cv IV / II pólos.
- Conjugado Variável: nesse caso, a relação de potência será de aproximadamente 1:4. É muito aplicado a cargas como bombas e ventiladores, e sua ligação é em estrela para dupla estrela.
Exemplo: Motor de 1/4cv IV / II pólos.

Resumo das Ligações



(Weg automação)

Variação do Escorregamento

A variação do escorregamento de um motor de indução com rotor gaiola é obtida pela variação da tensão estatórica. É um sistema pouco utilizado, pois gera perdas rotóricas e a faixa de variação da velocidade é pequena.

O controle de velocidade em motores de gaiola por meio da variação da tensão aplicada é utilizado nas seguintes aplicações:

Aplicação de curta duração, por exemplo, partida lenta de máquinas, através da chave compensadora ou *soft start*.

Faixa de Potência típica: 1 a 50 Kw

Faixa de regulação de velocidade: 1 - 20

Faixa de variação de velocidade: 500 – 3000 rpm

Inversores Estáticos de Freqüência

O mais eficiente método de variação e controle de velocidade nos motores de indução, com menores perdas consiste na variação da freqüência da fonte alimentadora através dos inversores de freqüência, em que o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica.

Como vimos anteriormente, sabemos que o conjugado é dado por

$$C = \phi_m \cdot I^2$$

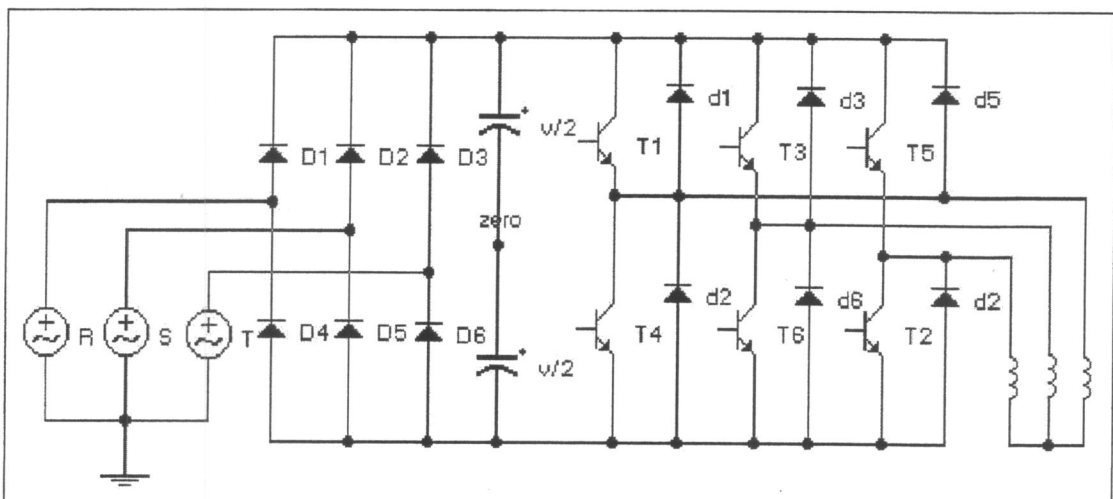
E o fluxo magnético é dado por:

$$\phi_m = (V_1 / f_1)$$

Ou seja, para conservar a intensidade de fluxo magnético constante, a relação volts/hertz deve ser mantida constante.

Como Funciona o Inversor de Freqüência:

Para iniciar a análise iremos considerar o arranjo mais freqüente, que corresponde aos inversores PWM (Pulse Width Modulation).



Para produzir tensões e freqüências variáveis a energia elétrica sofre duas transformações sucessivas: de AC (rede elétrica) para DC e posteriormente de DC para AC (tensão e freqüência ajustáveis).

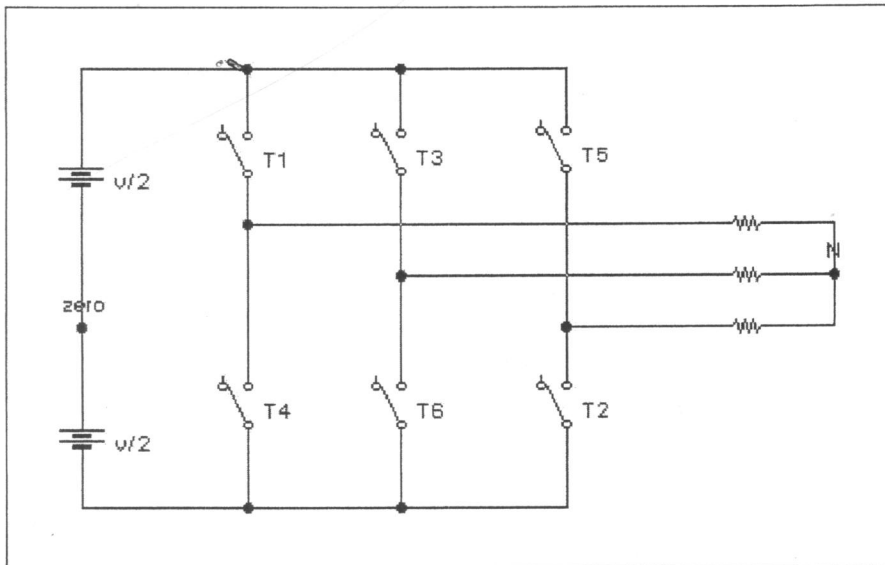
A partir dessa tensão DC (tensão do link DC) é que deverá ser produzida uma tensão trifásica AC de freqüência e tensão variáveis, utilizando a técnica de modulação PWM.

O circuito que efetua essa transformação é chamado de inversor, e é construído a partir de seis chaves eletrônicas.

Será adotado o nome de **chaves eletrônicas**, pois existem diversos tipos de componentes eletrônicos (semicondutores) que podem ser utilizados com essa finalidade.

Os dispositivos mais utilizados são BJT, MOSFET , GTO e IGBT.

Para exemplificar o funcionamento do Inversor é necessário analisar o funcionamento do seguinte circuito:

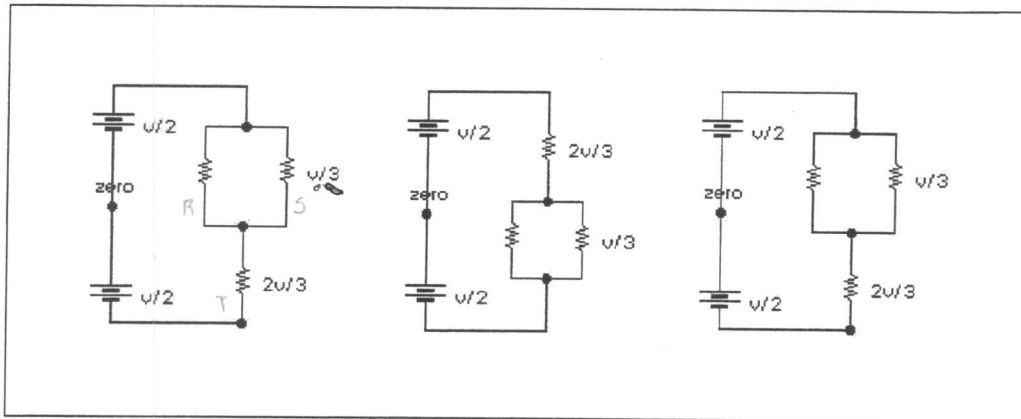


O circuito apresentado na figura acima possui oito configurações possíveis de operação, das quais seis são estados estáveis e os dois restantes são estados neutros, conforme a figura abaixo.

ESTADO 1

ESTADO 2

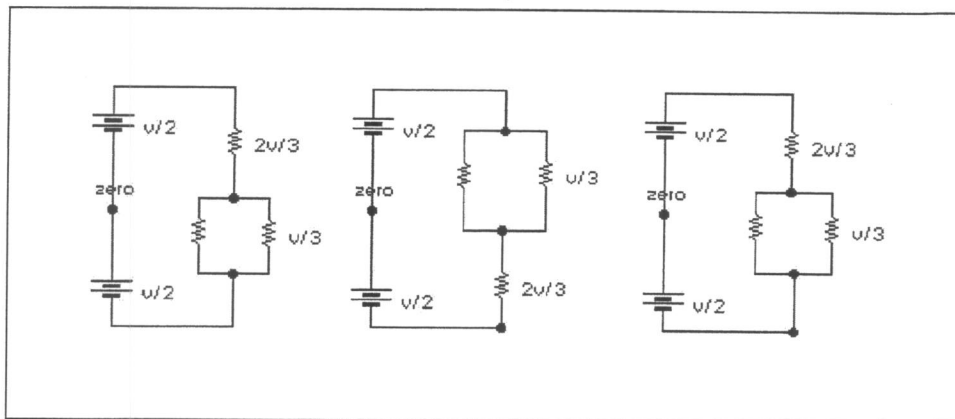
ESTADO 3



Condução T1,T2,T3
ESTADO 4

Condução T2,T3,T4
ESTADO 5

Condução T3,T4,T5
ESTADO 6



Condução T4,T5,T6

Condução T5,T6,T1

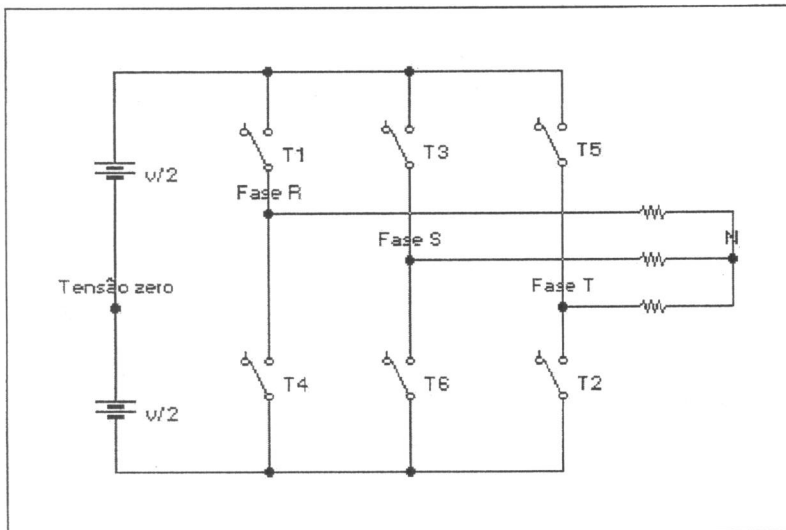
Condução T6,T1,T2

Existem dois estados neutros, por exemplo, as chaves 1,3,5 estão todas ligadas ou as chaves 2,4,6 estão ligadas. Nos dois casos a tensão aplicada no motor será nula.

Analisando o funcionamento do circuito, podemos construir a tabela I de engatilhamento do circuito:

ESTADO	T1 ON/OFF	T2 ON/OFF	T3 ON/OFF	T4 ON/OFF	T5 ON/OFF	T6 ON/OFF
1	1	1	1	0	0	0
2	0	1	1	1	0	0
3	0	0	1	1	1	0
4	0	0	0	1	1	1
5	1	0	0	0	1	1
6	1	1	0	0	0	1
7	1	0	1	0	1	0
8	0	1	0	1	0	1

Com o auxílio do circuito da figura a baixo vamos calcular a tabela das tensões para cada uma das configurações de um inversor PWM:



Estado	VR zero	VS zero	VT zero	VRS	VST	VTR	VRN	VSN	VTN
1	$V/2$	$V/2$	$-V/2$	0	V_0	$-V_0$	$V_0/3$	$V_0/3$	$-2V_0/3$
2	$-V/2$	$V/2$	$-V/2$	$-V_0$	V_0	0	$V_0/3$	$2V_0/3$	$-V_0/3$
3	$-V/2$	$V/2$	$V/2$	$-V_0$	0	V_0	$-2V_0/3$	$V_0/3$	$V_0/3$
4	$-V/2$	$-V/2$	$V/2$						
5	$V/2$	$-V/2$	$V/2$						
6	$V/2$	$-V/2$	$-V/2$						
7	$V/2$	$V/2$	$V/2$						
8	$-V/2$	$-V/2$	$-V/2$						

Geração dos Pulsos de Disparo

Analisando a Tabela nos estados de 1 a 6, podemos construir um **Contador Síncrono** para efetuar os disparos das chaves eletrônicas. Desta forma, estaremos construindo um Inversor chamado de *Six Step* (Seis Passos).

Construção do Contador Síncrono

Tabela do Flip Flop JK

J	K	QF Saída Futura
0	0	QA
0	1	0
1	0	1
1	1	QA Invertida

Construção da Tabela do Flip Flop JK para a Montagem do Contador Síncrono

QA	QF	J	K
0	0	0	X
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	X	0

QA = Estado anterior da saída 1 = Estado ligado X = Condição irrelevante
 QF = Estado futuro da saída 0 = Estado desligado

Tabela do Contador Síncrono

T1	T2	T3	T4	T5	T6												
Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	Q0	J5	K5	J4	K4	J3	K3	J2	K2	J1	K1	J0	K0
1	1	1	0	0	0	X	1	X	0	X	0	1	X	0	X	0	X
0	1	1	1	0	0	0	X	X	1	X	0	X	0	1	X	0	X
0	0	1	1	1	0	0	X	0	X	X	1	X	0	X	0	1	X
0	0	0	1	1	1	1	X	0	X	0	X	X	1	X	0	X	0
1	0	0	0	1	1	X	0	1	X	0	X	0	X	X	1	X	0
1	1	0	0	0	1	X	0	X	0	1	X	0	X	0	X	X	1

Aplicando o Mapa de VEITCH KARNAUGHT

Entrada J5

Q5,Q4,Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1,Q0								
000						X		
001					X			
011								X
010								
110		0						
111	1	X	X	X	X	X	X	X
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100			0					

$J5 = Q2.Q0$

Entrada K5

Q5,Q4,Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1,Q0								
000	X	X	X	X	X	1	X	X
001					0			
011								0
010								
110								
111								
101								
100	X	X	X	X	X	X	X	X

$K5 = \overline{Q1.Q0}$

Entrada J4

Q5,Q4,Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1,Q0								
000	X	X	X	X	X	X	X	X
001	X	X	X	X	X	X	X	X
011	X	X	X	X	X	X	X	1
010	X	X	X	X	X	X	X	X
110		0						
111	0							
101								
100								

$J4 = Q2$

Entrada K4

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000						0		
001					0			
011								
010								
110	X	X	X	X	X	X	X	X
111	X	X	X	X	X	X	X	X
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	1	X	X	X	X	X

$K4 = Q2$

Entrada J3

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000	X	X	X	X	X	X	X	X
001	X	X	X	X	1	X	X	X
011								0
010								
110								
111	0							
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	X	X	X	X	X	X

$\overline{J3} = Q1$

Entrada K3

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000						0		
001								
011	X	X	X	X	X	X	X	X
010	X	X	X	X	X	X	X	X
110	X	1	X	X	X	X	X	X
111	X	X	X	X	X	X	X	X
101								
100			0					

$K3 = Q1$

Entrada J2

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000	X	X	X	X	X	1	X	X
001					0			
011								0
010								
110								
111								
101								
100	X	X	X	X	X	X	X	X

$$\overline{J2} = Q1.Q0$$

Entrada K2

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000								
001								
011								
010								
110		0						
111	1	X	X	X	X	X	X	X
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100			0					

$$K2 = Q2.Q0$$

Entrada J1

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000						0		
001					0			
011								
010								
110	X	X	X	X	X	X	X	X
111	X	X	X	X	X	X	X	X
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	1	X	X	X	X	X

$$J1 = Q2$$

Entrada K1

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000	X	X	X	X	X	X	X	X
001	X	X	X	X	X	X	X	X
011	X	X	X	X	X	X	X	1
010	X	X	X	X	X	X	X	X
110		0						
111	0							
101								
100								

$$\overline{K1} = Q2$$

Entrada J0

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000						0		
001								
011	X	X	X	X	X	X	X	X
010	X	X	X	X	X	X	X	X
110	X	1	X	X	X	X	X	X
111	X	X	X	X	X	X	X	X
101								
100								

$$J0 = Q1$$

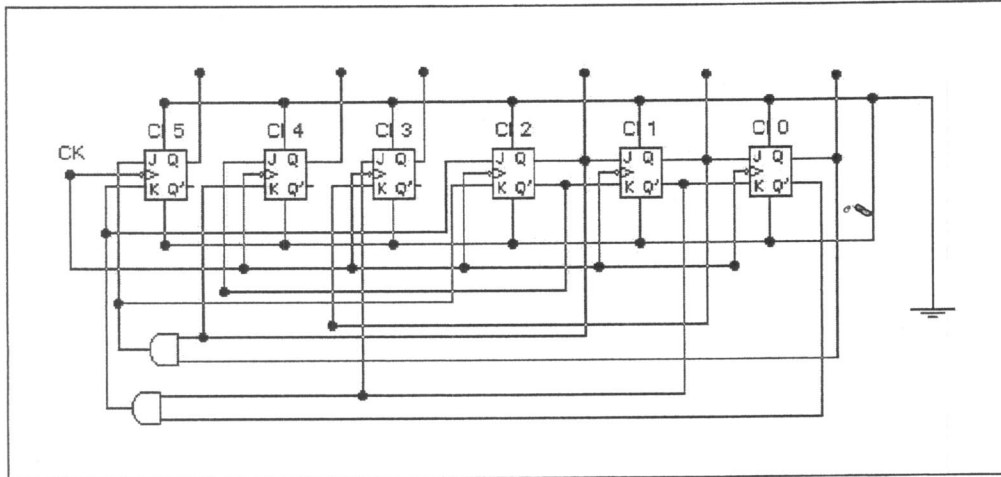
Entrada K0

Q5,Q4, Q3	000	001	011	010	110	111	101	100
Q2,Q1, Q0								
000	X	X	X	X	X	X	X	X
001	X	X	X	X	1	X	X	X
011								0
010								
110								
111	0							
101	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	X	X	X	X	X	X

$$\overline{K0} = Q1$$

Circuito do Contador Síncrono

Com a resolução do Mapa de Veitch Karnaugh podemos obter o Contador Síncrono a partir dos Flip Flops JK, conforme esquema eletrônico da figura abaixo:



Circuitos de Acoplamento e Isolação Galvânica

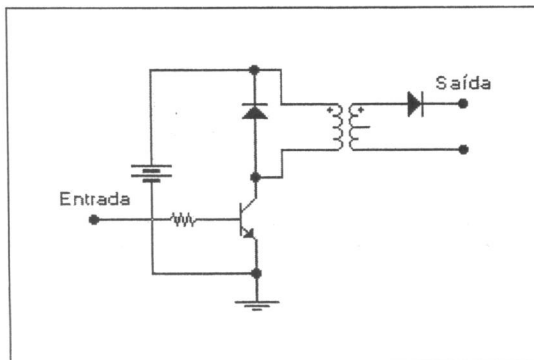
Para garantir um perfeito funcionamento do circuito e sua proteção devemos utilizar os circuitos de acoplamento eletrônico.

A função principal dos circuitos de acoplamento é realizar as conexões dos circuitos de disparo com os circuitos de potência.

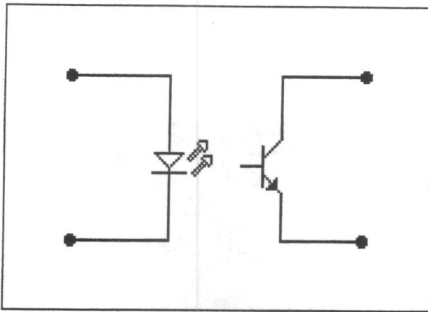
Essa conexão é realizada de forma a obter uma alta isolação (chamada de isolação galvânica), sem a perda da eficiência do sinal de disparo. Os dispositivos mais utilizados são os transformadores de pulso ou os fotoacopladores ópticos (TIL 111).

Exemplos de circuitos de acoplamento

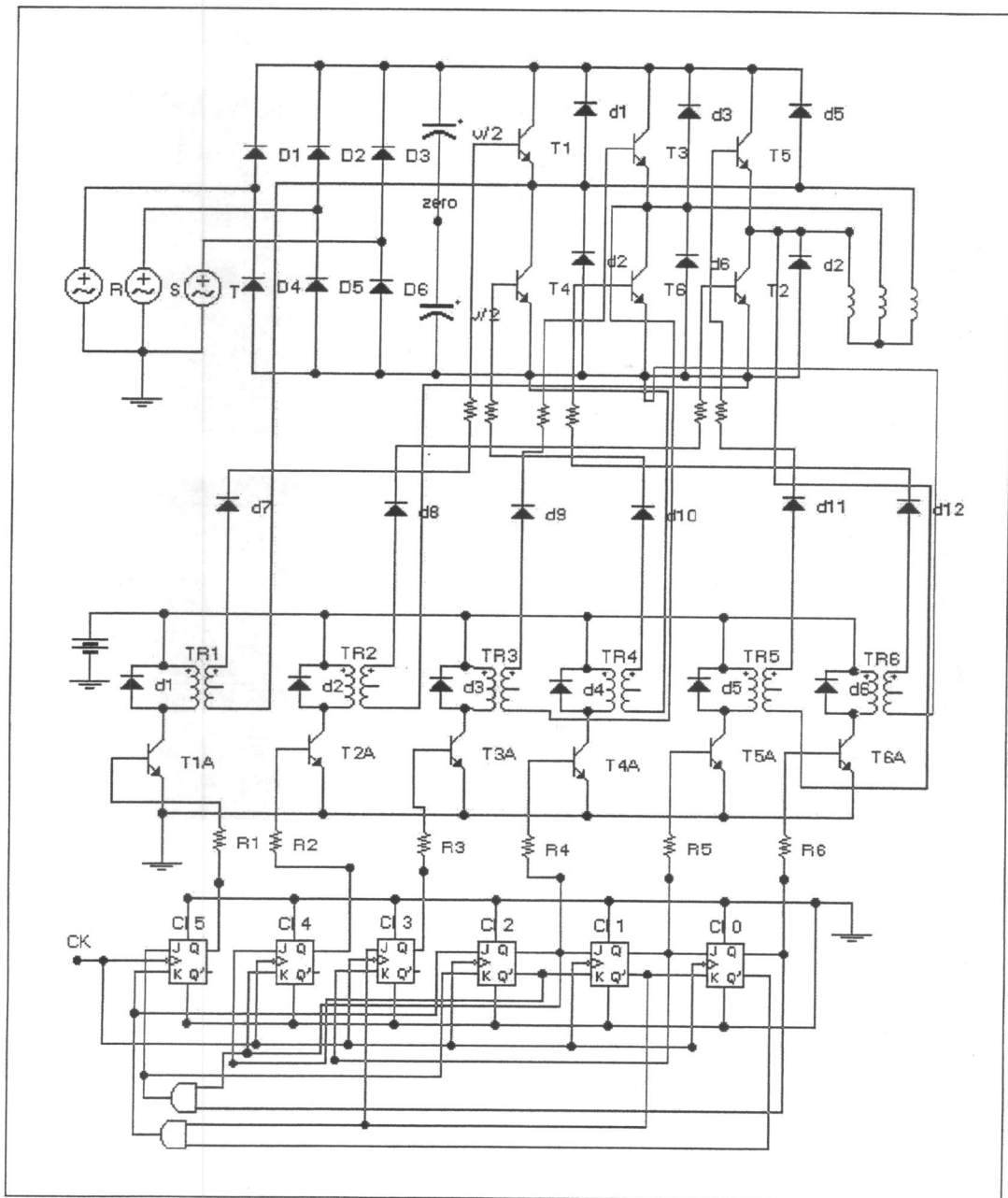
Transformadores de Pulso:



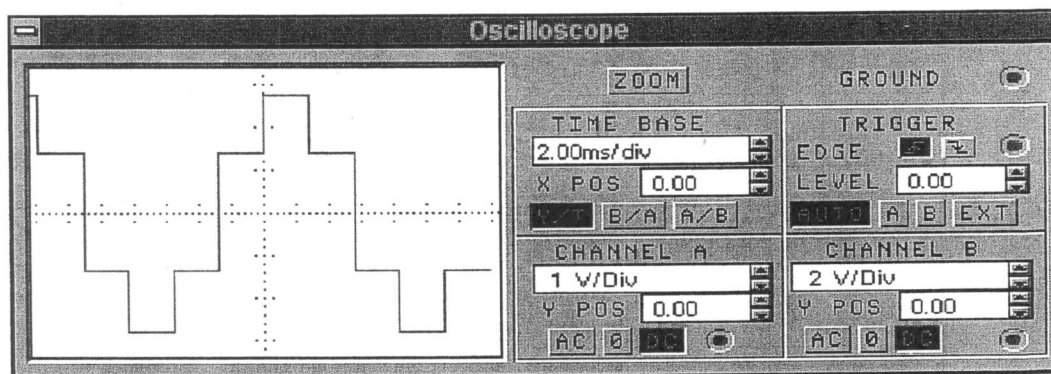
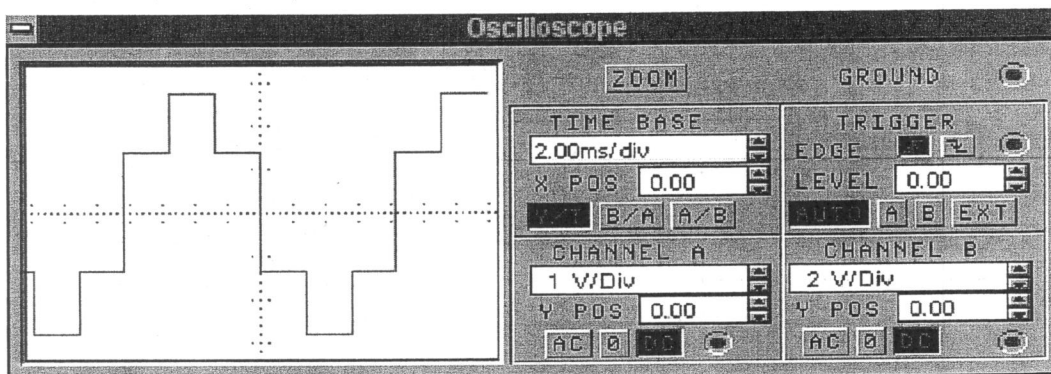
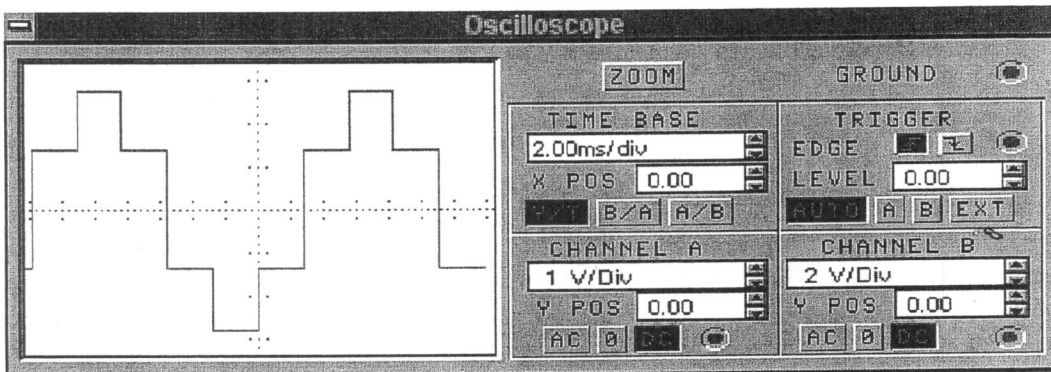
TIL 111



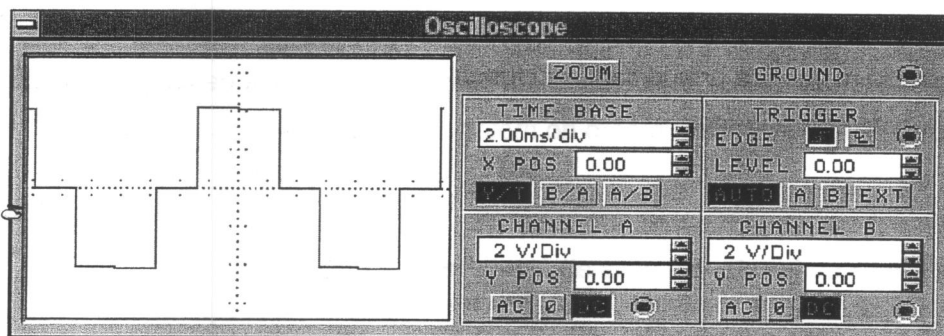
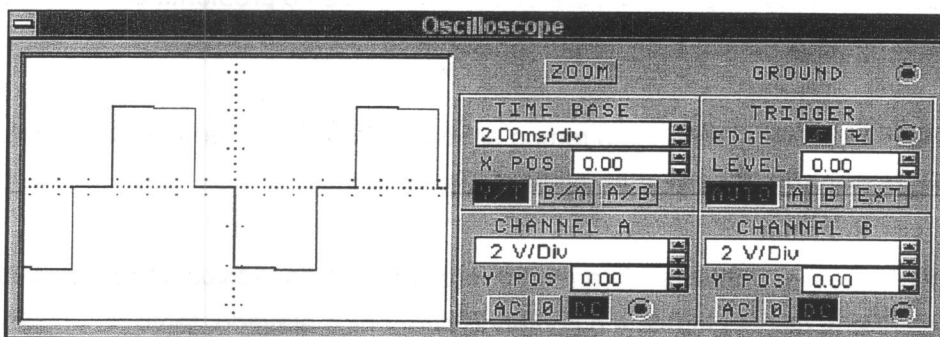
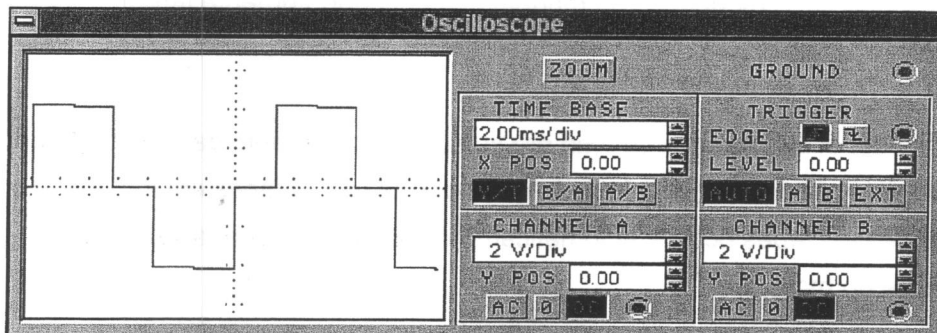
Circuito básico do Inversor Six Step:



- Formas de Onda na Saída do Motor
- Tensões nas Fases do Motor
- Gráfico das Tensões VRn, VS_n, VT_n



- Formas de Onda na Saída do Motor
- Tensões na Linha de Alimentação do Motor
- Gráfico das Tensões VRS, VST, VTR



Análise Global do Inversor Six Step

As tensões produzidas pelo inversor formam um sistema trifásico equilibrado conforme formas de onda cuja frequência pode ser controlada.

Essa técnica de acionamento possui virtudes e defeitos:

Defeitos:

Em nenhum momento foi mencionado que a tensão teria seu valor variado conforme a frequência do acionamento. Nesse circuito isso não ocorre, portanto teremos uma diminuição do fluxo magnético da máquina e conseqüentemente teremos perda de conjugado.

Antigamente, esse tipo de problema era solucionado por meio da colocação de um transformador devidamente calculado que possuía vários *tapes* em sua saída e a seleção desses *tapes* ocorria automaticamente, de acordo com a variação da velocidade do motor.

Outra solução muito empregada para solucionar o mesmo problema era substituir o retificador trifásico não controlado por um controlado à base de SCR.

Nesse tipo de circuito, ao mesmo tempo em que a frequência variava no inversor os ângulos de disparo no retificador também eram variados.

Atualmente, esses problemas foram resolvidos através da técnica de modulação PWM. Outro problema desse circuito é o conteúdo harmônico elevado, tanto na tensão como na corrente.

A operação do motor fica prejudicada em função da presença de conjugados pulsantes e em função do sobreaquecimento do motor.

Virtude:

O valor eficaz da tensão é o mais alto possível.

Técnicas de Modulação

Uma das técnicas primitivas de modulação era acoplar ao *six step* um Duty Cycle, fazendo com que as chaves ficassem desligadas (em um dos estados neutros) durante um determinado tempo.

Com a variação do Duty Cycle controlava-se a tensão aplicada ao motor. Com a técnica do Duty Cycle controlava-se a amplitude da tensão, mas o conteúdo harmônico não sofria alteração comparado com o *six step*.

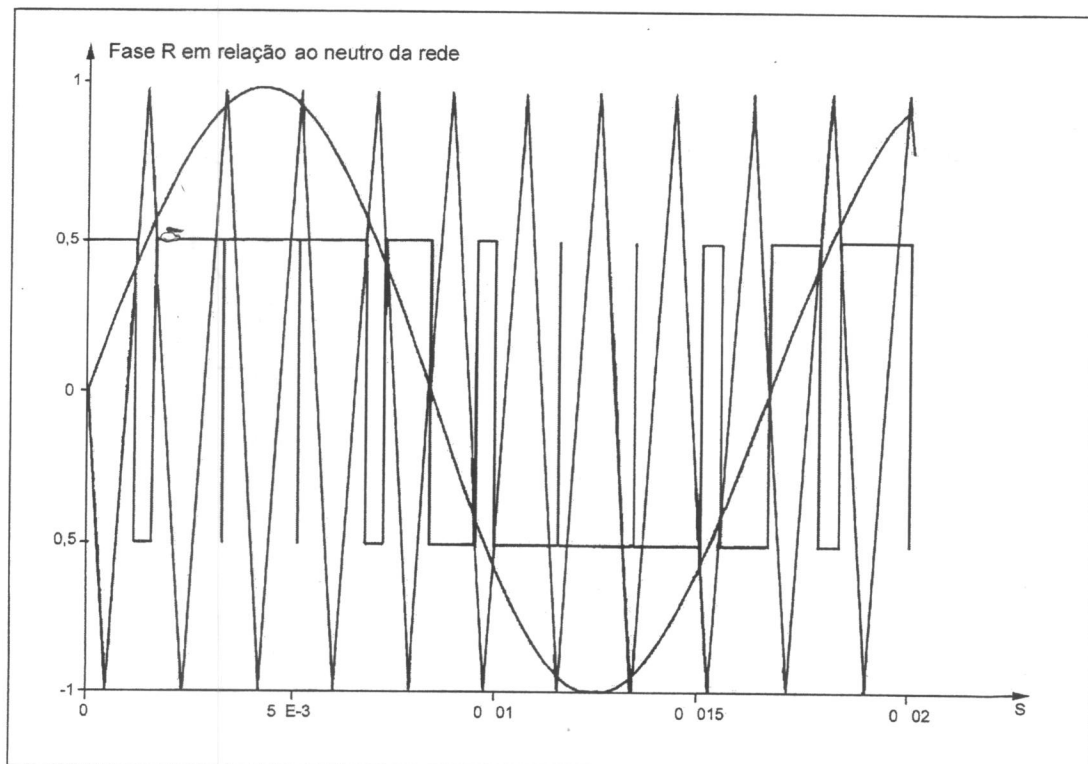
Uma possibilidade que dá origem às técnicas de modulação modernas é que os zeros (períodos de desligamento) não devem ser distribuídos igualmente ao longo do ciclo. Deve-se distribuir os zeros de modo a diminuir o conteúdo harmônico da tensão.

Existem diversas técnicas de modulação PWM, que experimentaram um enorme progresso a partir de 1960.

Tipos de PWM consideradas como principais pela literatura técnica

1. Natural Sampling
2. Regular Sampling
3. Optimal Sampling
4. Current Controlled PWM

Uma das técnicas clássicas é o Natural Sampling, que poderia ser implantado de forma simples através de circuitos analógicos. Nesse tipo de técnica os períodos de desligamento eram definidos pelo cruzamento de uma onda triangular (chamada de portadora) com uma onda senoidal de amplitude m (índice de modulação) variável, conforme a figura abaixo.

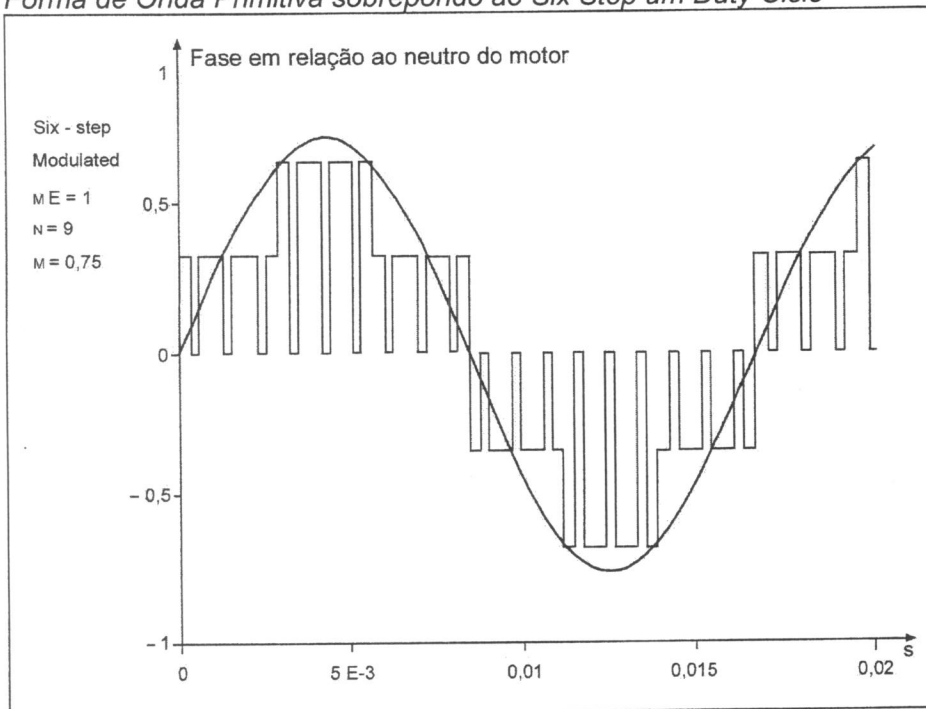


O número de ondas triangulares existentes por período da onda senoidal define o número de pulsos resultantes na saída. A relação:

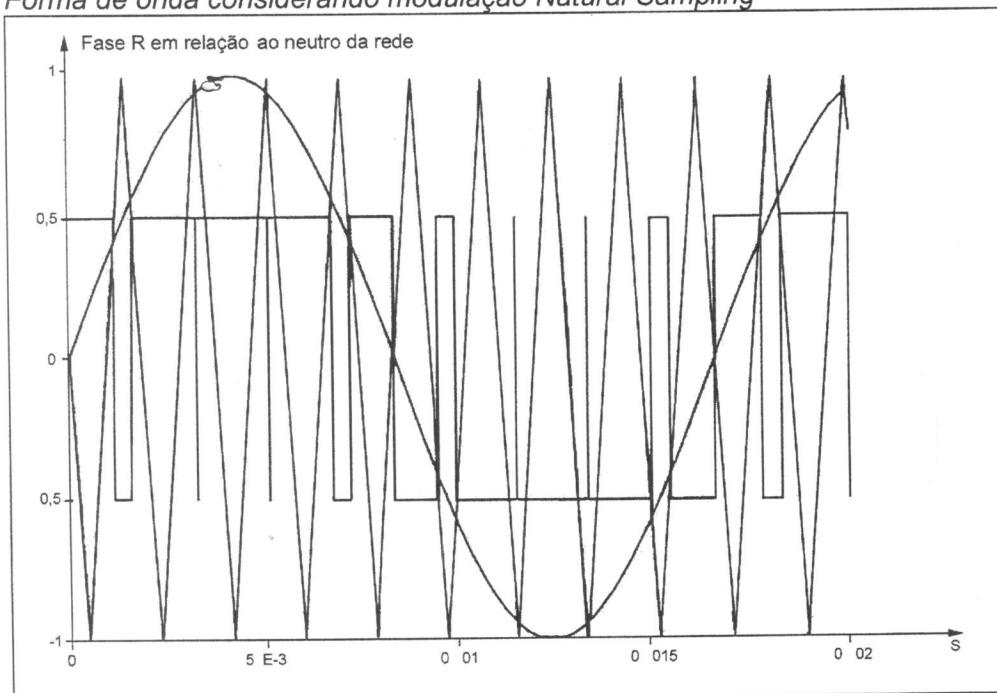
$$n = (\text{número de triângulos da portadora}) / (\text{ciclos da senóide})$$

onde n = índice da portadora

Forma de Onda Primitiva sobrepondo ao Six Step um Duty Cycle



Forma de onda considerando modulação Natural Sampling



Acionamento em corrente alternada

Considerando o exemplo anterior, temos:

número de ondas triangulares = 9

ciclos da senóide = 1

$$n = (9 / 1) = 9$$

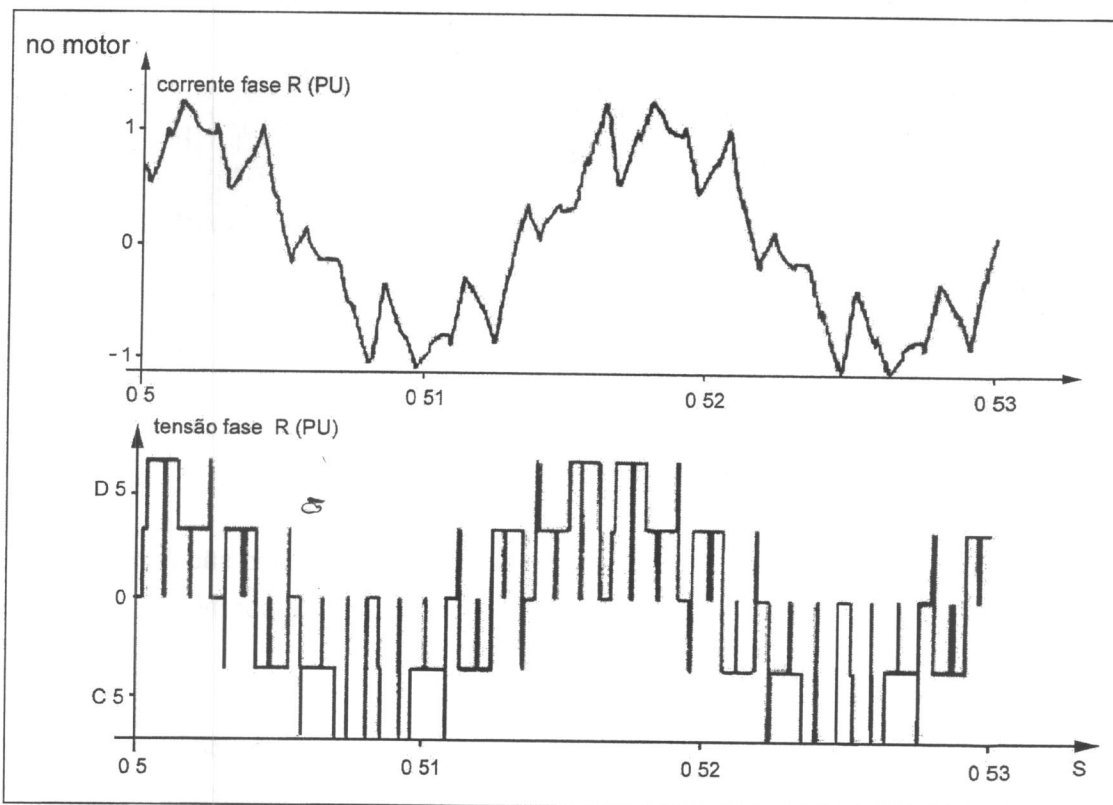
Para calcular a frequência do sinal, devemos aplicar a seguinte relação:

$$F = 2.n.60$$

Portanto a frequência dos pontos de recorte da onda (zeros) será:

$$F = 2 \cdot 9 \cdot 60 \Rightarrow F = 1.080 \text{ Hz}$$

Formas de onda da Tensão Fase Neutro do motor e a corrente típica resultante no motor



Acionamento em corrente alternada

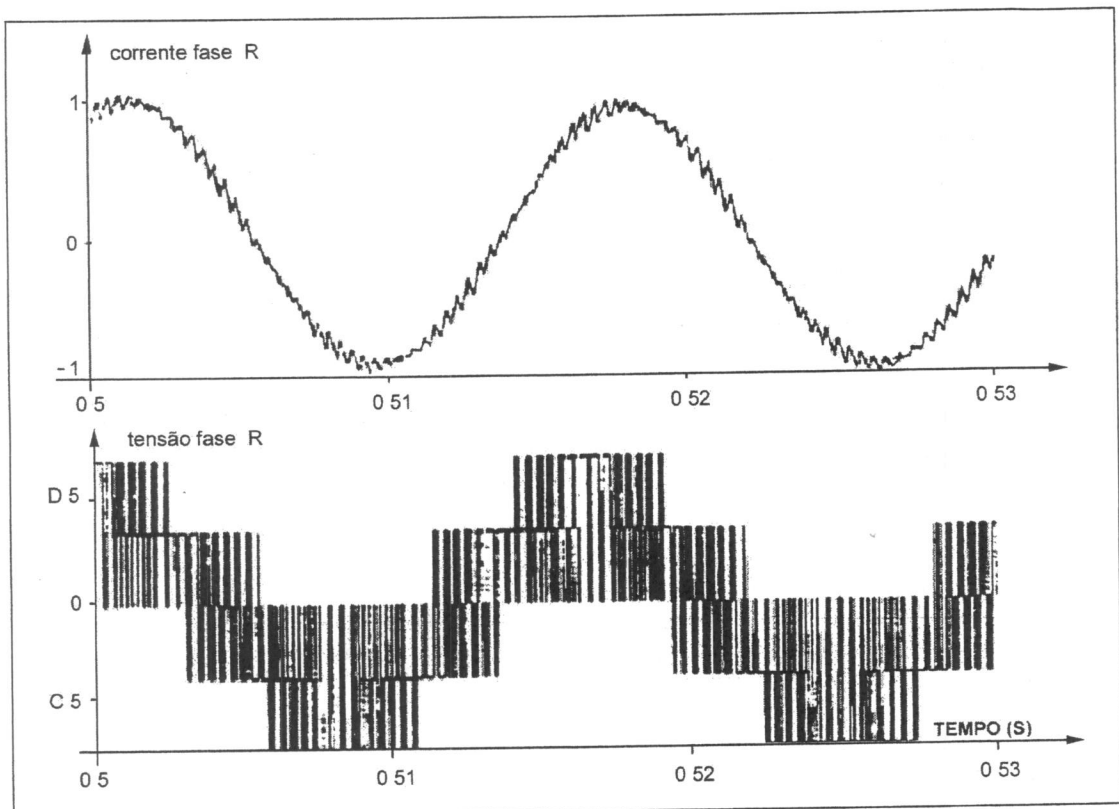
Utilizando mais pulsos por ciclo (frequência maior de chaveamento, que está relacionada com o tipo de chave eletrônica) os resultados são melhores.

Supondo $n = 45$, temos:

$$F = 2.n.60$$

$$F = 2.45.60 \Rightarrow F = 5.400 \text{ Hz}$$

Formas de onda Fase Neutro do Motor de Indução considerando PWM Natural Sampling, com $n = 45$.



Acionamento em corrente alternada

Controle Escalar de Inversores

Muitos dos inversores de frequência encontrados no mercado são controles em malha aberta. Nesse tipo de controle o fluxo é mantido constante por meio do ajuste da curva volts/hertz.

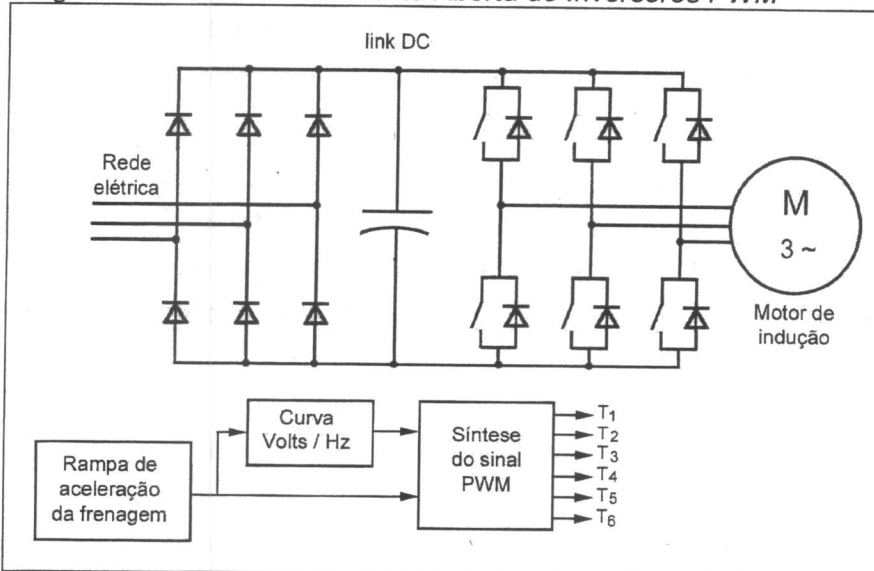
O escorregamento do motor é considerado como grandeza fundamental. Tenta-se fazer com que o motor nunca opere com valores altos de escorregamento, e para tanto se inclui no controle um sistema que define os valores de aceleração e frenagem do motor.

Os valores de f_1 (frequência de referência) e de V_1 (tensão de referência) atuam no controle que realiza a síntese do PWM. Este último gera os sinais de comando que serão enviados aos transistores.

O controle de malha aberta puro não é adotado por nenhum fabricante porque possui vários defeitos, entre os quais podemos citar:

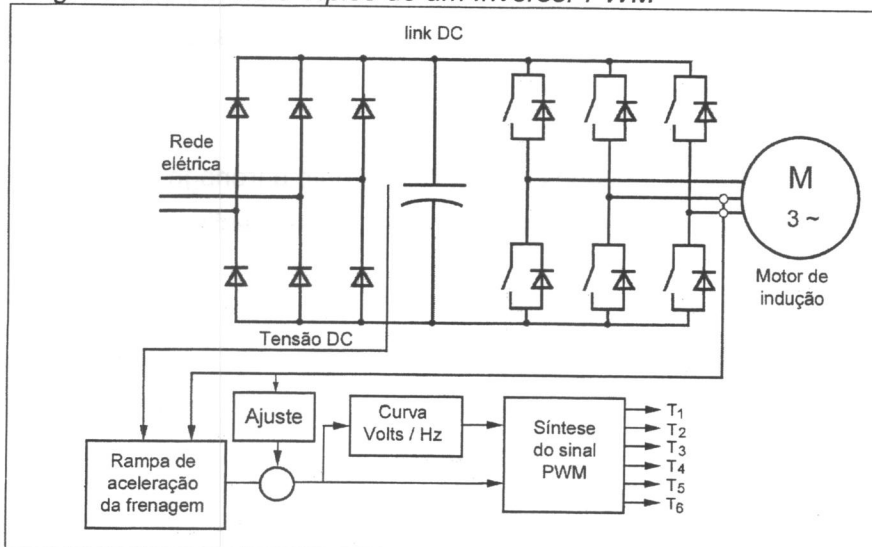
- Como iremos saber se o motor não está operando com elevados níveis de conjugado?
- Caso o motor tente operar com alto escorregamento, como é que o controle fica sabendo?
- Caso ocorra curto-circuito ou sobrecarga no motor, como é feita a proteção da eletrônica de potência?
- Durante a frenagem, quando o motor regenera (envia tensão para o link DC), como se evita sobretensão no link DC?

Diagrama de Controle em Malha Aberta de Inversores PWM



Acionamento em corrente alternada

Diagrama de Controle Típico de um Inversor PWM



Acionamento em corrente alternada

O ajuste do fluxo do motor é feito em malha aberta, através da curva volts/hertz. Consideramos inicialmente que não exista o **ajuste de slip**.

Medindo a corrente do motor é possível extrair, com relativa precisão, o valor do escorregamento do motor. Com isso é possível atuar sobre a rampa de aceleração, fazendo com que o valor de f_1 aumente mais lentamente e evitando níveis elevados de escorregamento.

Ao ajustarmos a taxa de aceleração desta forma, estamos limitando a corrente do motor.

Medindo-se a corrente do motor é possível atuar diretamente sobre a síntese do PWM. Em caso de necessidade, podemos desligar todos os transistores, o que corresponde a uma proteção instantânea.

Quando as taxas de frenagem são muito elevadas a tensão no link DC sobe rapidamente. Como essa tensão está sendo medida, será possível atuar sobre a rampa de frenagem, fazendo com que f_1 (referência de frequência) diminua mais lentamente.

Ao ajustar a taxa de aceleração desta forma limita-se a tensão do link DC.

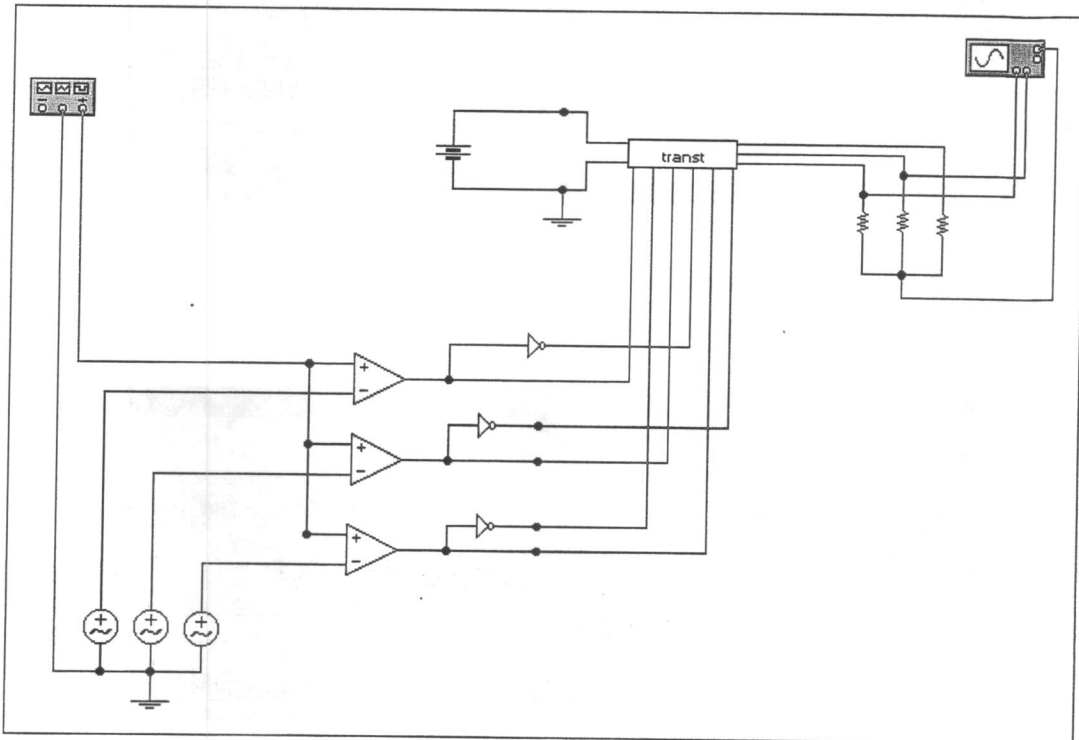
Ao utilizar o bloco ajuste de slip tenta-se corrigir a velocidade do rotor, aumentando ligeiramente a frequência do campo girante. O sinal de corrente do motor atua como Tacômetro Virtual.

Para realizar a inversão do motor basta trocar os sinais de comando dos transistores de duas das fases do inversor.

Para evitar níveis de tensões elevados no link DC durante a frenagem é possível incorporar um resistor de frenagem ao sistema, com seu respectivo controle

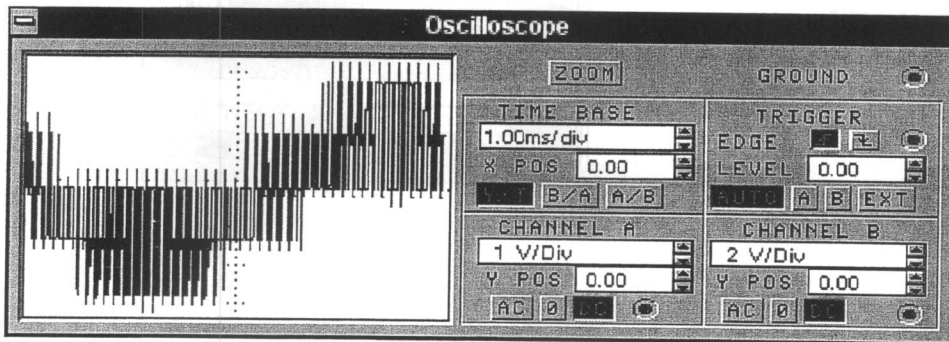
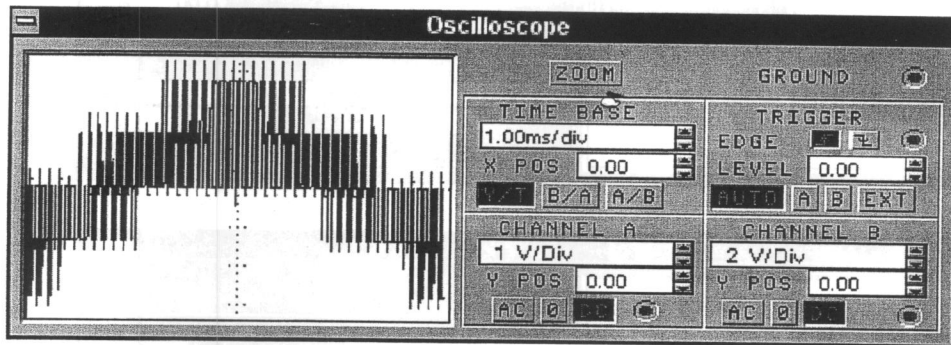
Circuito didático de um inversor com modulação *natural sampling*

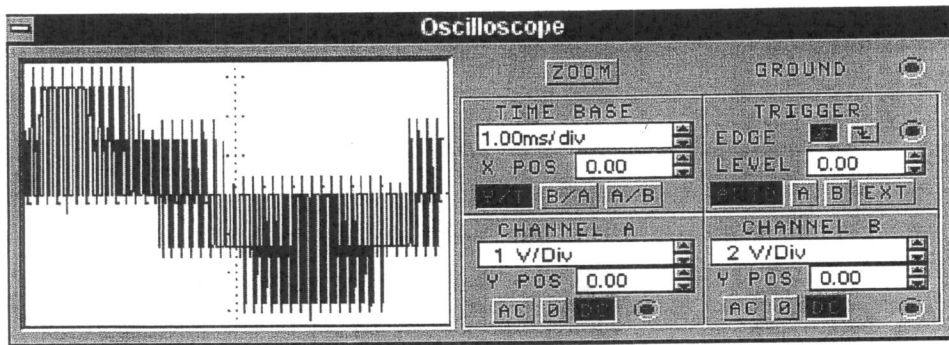
Circuito:



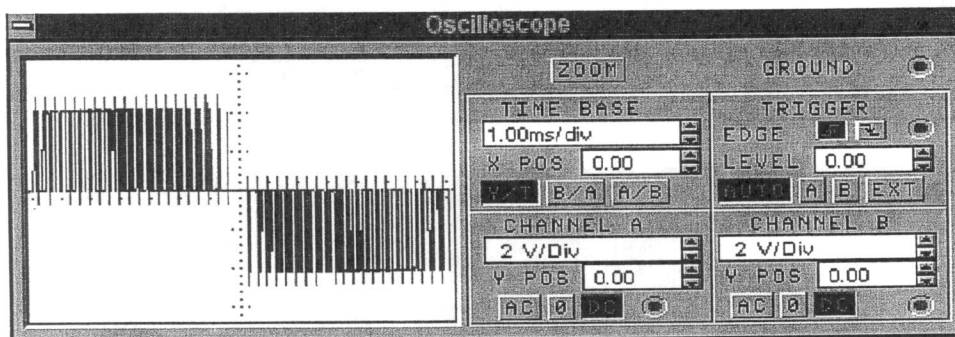
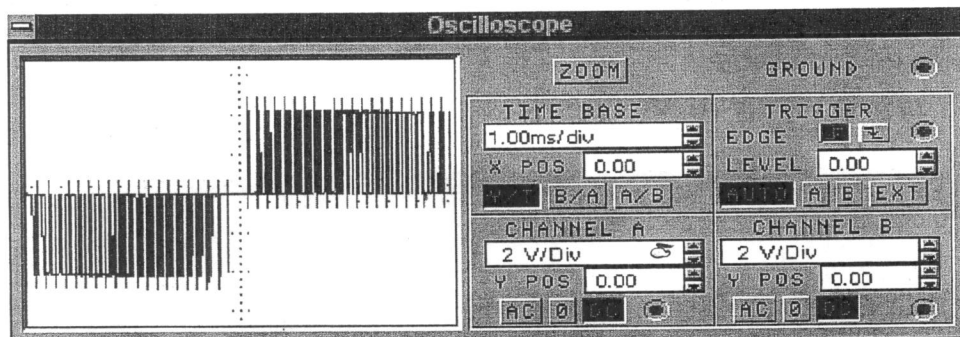
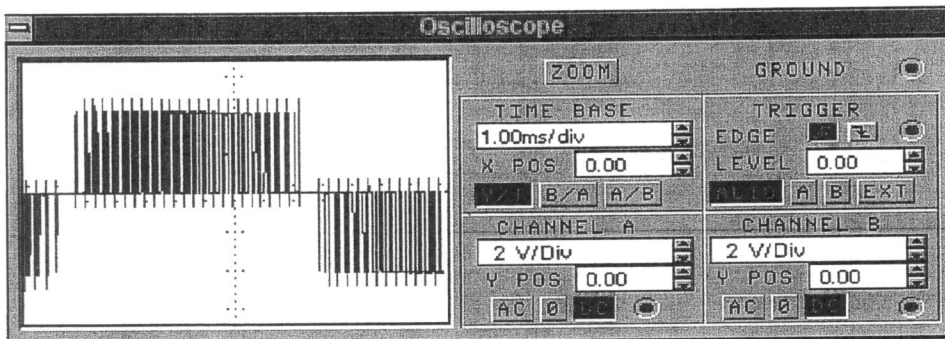
Formas de onda na carga

Tensões de fase VRN, VSN, VTN





Formas de onda na carga
Tensões de linha VRS, VST, VTR

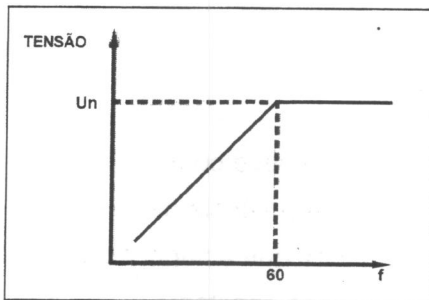


Aplicações dos Inversores de frequência

Limitações:

A variação V/f é feita linearmente até a frequência nominal do motor (50 a 60 Hz). Acima dela, a tensão que é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator.

Curva da Figura 9.36, representativa da variação V/f



(Weg automação)

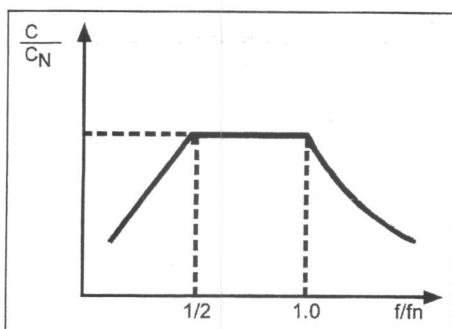
Determinamos uma área acima da frequência nominal, que se chama de região de Enfraquecimento de Campo, ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque da máquina também começa a diminuir.

Para motores autoventilados que operam em frequências abaixo de 30 Hz deve-se adotar um fator de redução referente ao conjugado fornecido pelo motor. Esta medida deve ser tomada para não sobreaquecer o motor.

Para motores que trabalham com ventilação forçada, o conjugado fornecido pelo motor deve ser considerado nominal para frequências de 6 a 60 Hz.

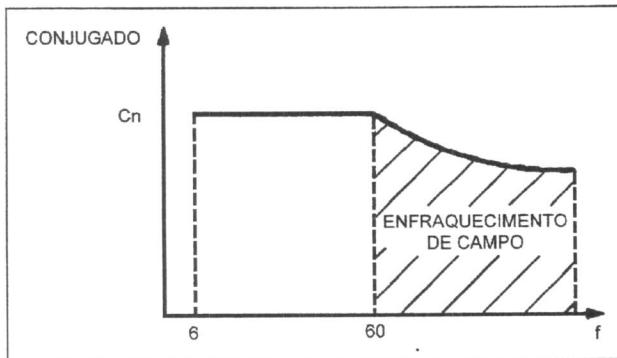
Curva Característica Conjugado x Velocidade

Motores autoventilados



(Weg automação)

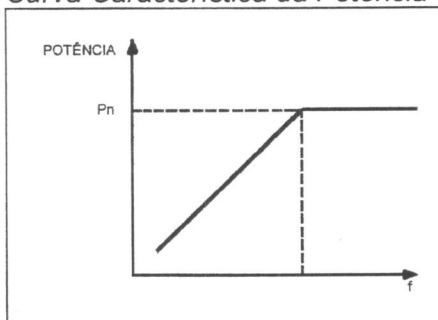
Motores com Ventilação Forçada



(Weg automação)

O conjugado para motores com ventilação forçada permanece constante até a frequência nominal, e acima dela começa a decrescer. A potência de saída do conversor de frequência comporta-se da mesma maneira que a variação V/f , ou seja, cresce linearmente até a frequência nominal e permanece constante acima dela.

Curva Característica da Potência de Saída do Inversor

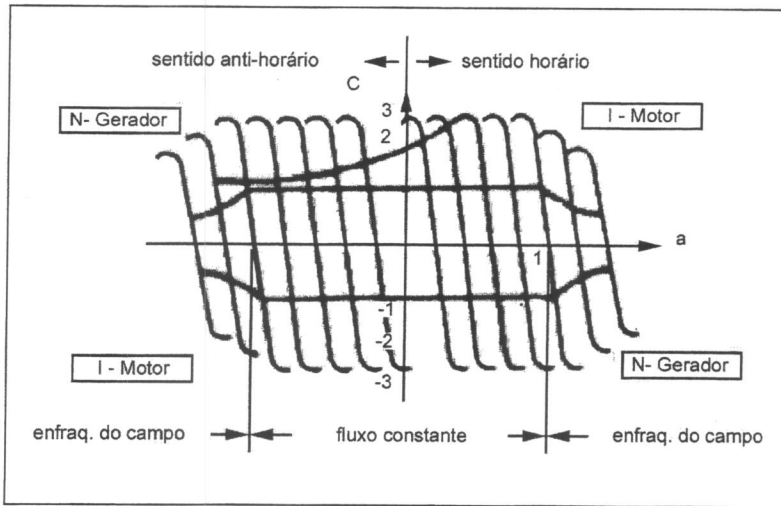


(Weg automação)

A curva da figura abaixo demonstra o comportamento do conjugado x velocidade, idealizado da máquina assíncrona em todos os quadrantes de acionamentos.

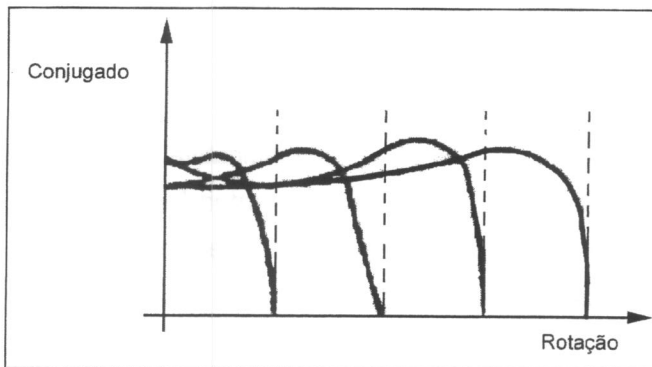
Com a variação da frequência obtém-se um deslocamento paralelo da curva característica conjugado x velocidade em relação à curva característica para frequência nominal (50 ou 60 Hz).

Curva Característica Conjugado x Velocidade, em todos os Quadrantes de Acionamento



(Weg automação)

Forma Simplificada da Curva Conjugado x Velocidade



(Weg automação)

Teoricamente, existem duas faixas de atuação: uma com o fluxo constante, até a frequência nominal; e outra, com enfraquecimento de campo, correspondente àquela acima da frequência nominal, ou seja:

$f_s = 0 \text{ Hz até } f_{nom} \Rightarrow V/f = \text{constante} = \text{fluxo constante}$

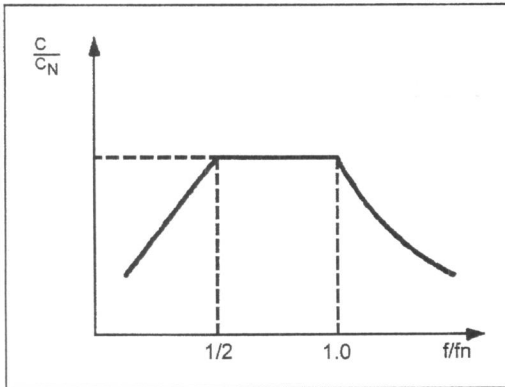
$f_s > f_{nom}: V/f = \text{campo enfraquecido.}$

Fatores a serem considerados:

- Se um motor autoventilado trabalha com velocidade menor do que a nominal terá sua capacidade de refrigeração diminuída.

- b. A corrente de saída dos inversores apresenta uma forma não perfeitamente senoidal, o que implica harmônicas de ordem superior, que provocam um aumento de perdas no motor.

Curva Característica do Conjugado x Freqüência para uso do motor com Inversor de Freqüência



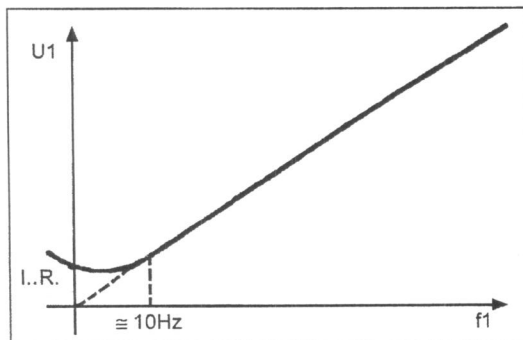
(Weg automação)

Considerações Importantes

Quanto menor a tensão e a freqüência do estator, mais significativa é a queda de tensão no estator, de modo que para baixas freqüências, mantendo-se a proporcionalidade entre a freqüência e a tensão, o fluxo e conseqüentemente o conjugado da máquina diminuem de forma acentuada.

Para que este fato seja evitado, a tensão do estator para baixas freqüências deve ser aumentada através da compensação $I \times R$.

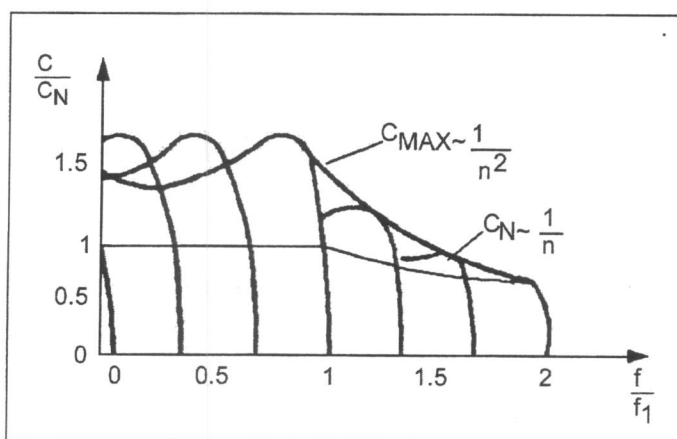
Curva Característica V/f com Compensação $I \times R$



(Weg automação)

Para exemplificar o caso anterior, consideramos que em condições nominais de operação (380 V / 60 Hz) a queda de tensão sobre a resistência do estator seja de 10 volts, que é desprezível. Porém, quando estivermos operando em baixa rotação (38 V / 6 Hz), esses mesmos 10 V correspondem a uma perda elevada em termos de fluxo, causando uma diminuição na capacidade de produção de torque.

Curva de Enfraquecimento de Campo para Tensões e Frequências acima das Nominais



(Weg automação)

Aplicação dos Inversores de Frequência

Afirmar que uma carga mecânica requer uma determinada potência P é equivalente a dizer que tal carga necessita de um dado conjugado C , a uma dada velocidade (rotação n).

$$P = (C \cdot n) / K$$

onde:

P = Potência

C = Conjugado

n = Rotação

K = Constante relacionada às unidades empregadas

A curva de C em função de n é uma característica fundamental para o processo de seleção do motor adequado ao acionamento, e o conjugado resistente depende da carga, mas todos podem ser representados pela expressão:

$$C_c = C_o + K_c.n^x$$

C_c = Conjugado resistente da carga

C_o = Conjugado da carga para rotação zero

K_c = Constante que depende da carga

X = Parâmetro que depende da carga, podendo assumir valores $x = -1, 0, 1, 2$

De acordo com a equação, percebe-se que o conjugado da carga varia com a rotação n

Essa variação depende do parâmetro "x", e em função dele as cargas podem ser classificadas em quatro grupos:

- a. **Cargas com conjugado resistente constante**
- b. **Cargas com conjugado resistente linear**
- c. **Cargas com conjugado resistente quadrático**
- d. **Cargas com conjugado resistente hiperbólico**

Tipos de Conjugados Resistentes

a Conjugado Constante ($x = 0$)

Para esse tipo de carga o parâmetro x é igual a zero, ou seja:

$$C_c = C_o + K_c$$

Nas máquinas desse tipo, o conjugado permanece constante durante a variação de velocidade e a potência aumenta proporcionalmente com a velocidade. Logo:

$$P_c = K.n$$

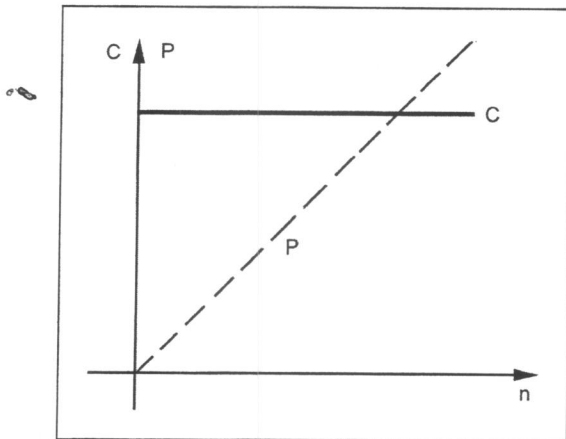
P_c = Potência da carga

k = Constante que depende da carga

n = Rotação

Exemplos de aplicação: Equipamentos de içamento (Guindaste, Elevadores de carga), Correias Transportadoras, Laminadores, Extrusoras, Bombas de Deslocamento Positivo, Bombas de Pressão Controlada.

Gráfico do Conjugado x Rotação e da Potência x Rotação para Conjugado Constante



(Weg automação)

b. Conjugado Linear

Nesse tipo de carga o parâmetro x é igual a 1, ou seja:

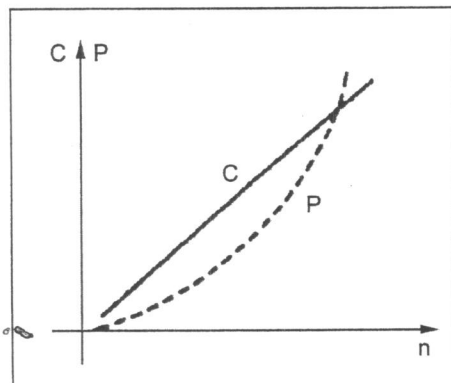
$$C_c = C_o + K_c \cdot n$$

Nesse tipo de máquina o conjugado varia linearmente com a rotação, e a potência com o quadrado da rotação. Assim, têm-se:

$$P_c = C_o \cdot n + K_c \cdot n^2$$

Exemplos de aplicação: Calandras, Freios a correntes de Foucault.

Gráfico do Conjugado x Rotação e da Potência x Rotação para Conjugado Linear



(Weg automação)

c. Conjugado Quadrático

Nesse tipo de carga o parâmetro x é igual a 2, ou seja:

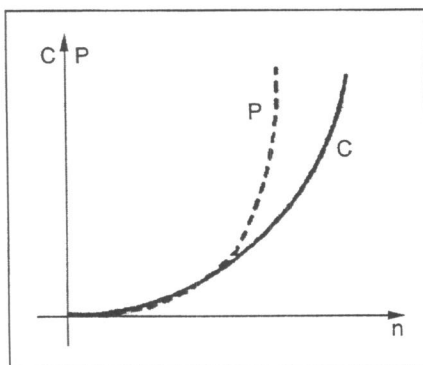
$$C_c = C_o + K_c.n^2$$

Nesse caso o conjugado varia com o quadrado da rotação, e a potência com o cubo da rotação. Assim, têm-se:

$$P_c = C_o.n + K_c.n^3$$

Exemplos de aplicação: Bombas Centrifugas, Ventilador centrífugo, Agitadores, Compressores.

Gráfico do Conjugado x Rotação e da Potência x Rotação para Conjugado Quadrático



(Weg automação)

d. Conjugado Hiperbólico

Nesse tipo de carga o parâmetro x é igual a -1 , ficando:

$$C_c = K_c / n$$

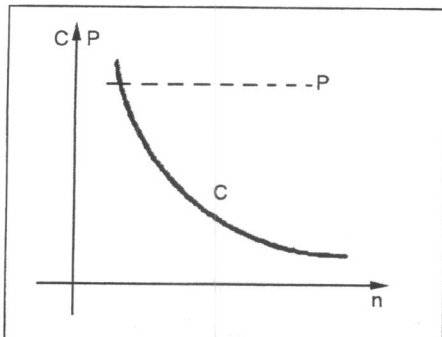
Nesse tipo de carga despreza-se a constante C_0 , pois ela teria valor infinito. Pela expressão acima se pode perceber que para $n = 0$ o conjugado seria infinito, o que não tem sentido físico.

Na prática o fato não ocorre porque a rotação da máquina só pode variar entre um limite mínimo (n_1) e máximo (n_2).

A potência permanece constante, não varia com a rotação, ou seja:

$$P_c = K_c$$

Gráfico do Conjugado x Rotação e da Potência x Rotação para um Conjugado Hiperbólico



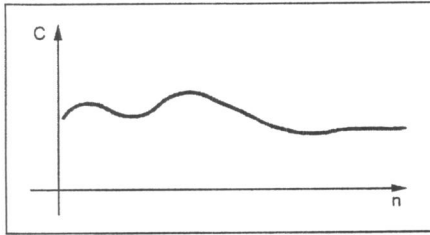
(Weg automação)

e) Conjugados não definidos

Neste caso a equação genérica do conjugado não pode ser aplicada, pois não pode-se determinar sua equação de maneira precisa. Logo, têm-se que determinar seu conjugado utilizando técnicas de integração gráfica.

Na prática, analisa-se como conjugado constante, pelo máximo valor do torque absorvido.

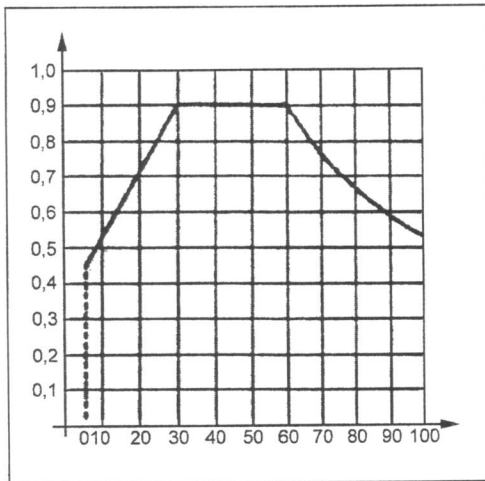
Gráfico do Conjugado x Rotação para Conjugados não definidos



(Weg automação)

Gráficos para Dimensionamento do Inversor

Gráfico 1 – Conjugado Disponível x Rotação em Motores Autoventilados

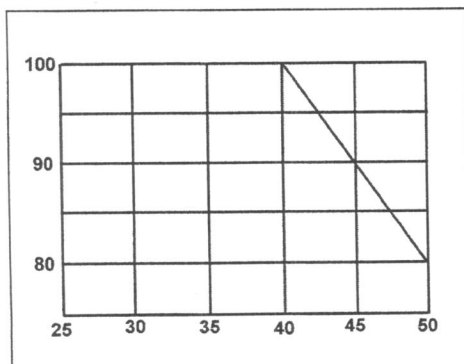


(Weg automação)

Operação em Ambientes com Temperatura Elevada ($T > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

A redução da potência (corrente) nominal do conversor de frequência em virtude da elevação da temperatura ambiente – acima de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e limitada a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – é dada pela relação do gráfico.

Fator de Redução = $1\% / ^{\circ}\text{C}$



(Weg automação)

2. Uma esteira transportadora horizontal de uma empresa de mineração opera a uma altitude de 2.000 metros, onde a temperatura ambiente é de 45 °C. O motor é acoplado à esteira por meio de correias com polias em "V", cuja relação de redução é de 2:1, e o rendimento do acoplamento é de 97%. A faixa de variação de velocidade desejada na esteira é de 200 a 1.100 rpm.

O processo de operação estabelecido determina que a esteira, para operação com conversor, sempre parta em vazio. Em casos de emergência, que necessitem de partida com a esteira totalmente carregada, ela é realizada com o motor ligado direto à rede.

O conjugado resistente é de 241 Nm e a rede de é de 440 V, trifásica, 60 Hz. Determine o motor e o conversor recomendados.

Dados:

Altitude: 2.000 m

Temperatura ambiente: 45°C

Acoplamento: correia em V

Acoplamento: 2:1

$\eta_{ac} = 0,97$

$n = 200$ a 1.100 rpm

$C_r = 241 \text{ Nm} = 241 / 9,81 = 24,57 \text{ Kgfm}$

Tensão de rede = 440 V

Frequência = 60 Hz



Sistemas de partida

Aqui, abordaremos o funcionamento das principais chaves de partida. Analisaremos o funcionamento das chaves de partida direta, reversora, estrela-triângulo, compensadora e de aceleração rotórica, suas principais aplicações e suas limitações, procurando sempre traçar paralelos com as aplicações industriais.

Sistemas de Partidas de Motores Elétricos Trifásicos

Limitação da Corrente de Partida em Motores Trifásicos

Sempre que possível, a partida de um motor trifásico de gaiola deve ser direta, por meio de contatores.

Deve-se ter em conta que para um determinado motor as curvas de conjugado e corrente são fixas, independentemente da dificuldade de partida, para uma tensão constante.

Nos casos em que a corrente de partida do motor é elevada, podem ocorrer conseqüências prejudiciais que requerem cuidados:

- Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede, provocando interferência em equipamentos instalados no sistema.
- O sistema de proteção (cabos, contatores) deverá ser superdimensionado, o que implica em um custo elevado.
- As concessionárias de energia impõem limitações na queda de tensão da rede.

Caso a Partida Direta não seja possível, em virtude dos problemas citados acima, pode-se usar sistemas de Partida Indireta para reduzir a corrente de partida.

Estes sistemas de Partida Indireta (tensão reduzida) são:

- Partida com Chave Estrela–Triângulo
- Partida com Chave Compensadora
- Partida com Chave Série–Paralelo
- Partida com Resistor Primário
- Partida com Reator Primário
- Partida Eletrônica (Soft Start)

Caso o Motor seja de Rotor Bobinado:

- **Partida com Aceleração Rotórica**

Sistema de Partida Direta

É o método de partida mais simples, em que não são empregados dispositivos especiais de acionamento do motor. Apenas são utilizados contadores, disjuntores ou chaves interruptoras.

Os motores só podem partir diretamente da rede caso sejam satisfeitas as seguintes condições:

- A corrente de partida do motor é de baixo valor porque sua potência é pequena.
- A partida do motor é feita sem carga, o que reduz a duração da corrente de partida e, conseqüentemente, também os efeitos sobre o sistema de alimentação.
- A corrente que a rede de alimentação pode fornecer é tão elevada que a corrente de partida do motor não é relevante.

Os fatores que impedem a partida dos motores diretamente à rede de alimentação são:

- A potência do motor é superior ao máximo permitido pela concessionária local, normalmente estabelecida em 5 cv.
- A partida do motor provoca o desligamento dos circuitos dos outros motores ou disjuntores primários.
- A carga a ser acionada necessita de acionamento lento e progressivo.

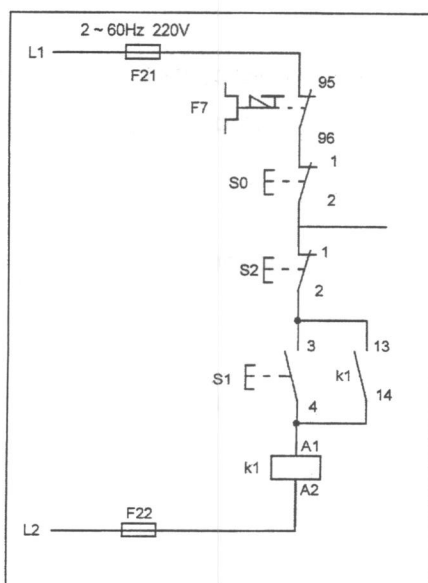
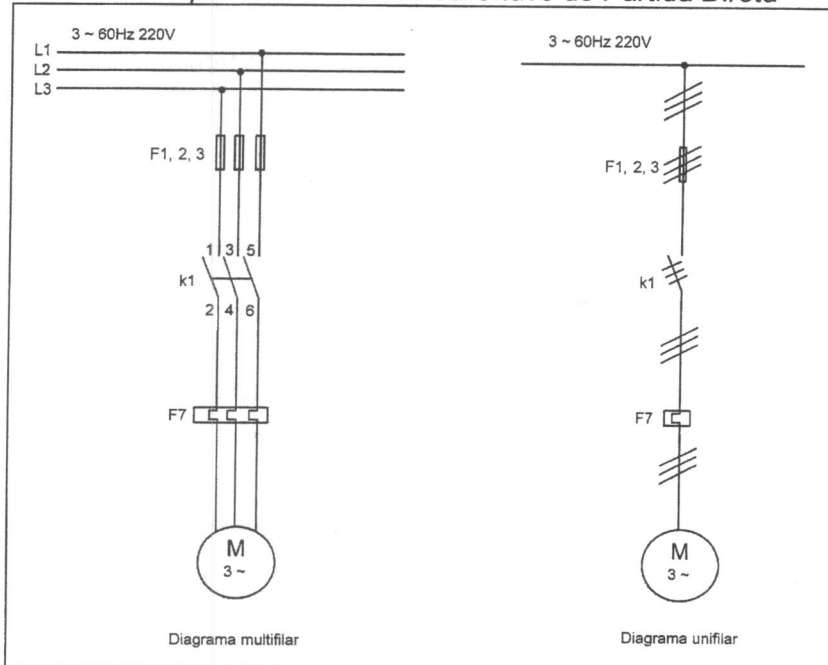
Funcionamento

Ao se apertar o botão S1 quando os bornes L1, L2 e L3 estão sob tensão a bobina do contator K1 será energizada, conforme a Figura 8.1. Essa ação faz fechar o contato de selo K1 (13–14), que manterá a bobina energizada; os contatos principais do contator de fecharão, e o motor funcionará.

Interrupção

Para interromper o funcionamento do contator, pulsa-se o botão S0 que se abrirá, eliminando a alimentação da bobina, o que provocará a abertura do contato de selo e, conseqüentemente, dos contatos principais, e a parada do motor.

Circuito Principal e de Comando da Chave de Partida Direta



Sistema de Partida de Motor Trifásico com Reversão

A reversão do sentido de rotação de um motor trifásico é feita pela inversão de duas fases de alimentação.

Esse trabalho é realizado por 2 contatores, comandados por 2 botões conjugados, cujo acionamento permite que se obtenham rotações nos dois sentidos, horário e anti-horário.

Seqüência Operacional

Ao pulsar-se o botão conjugado S1 com os bornes L1, L2 e L3 sob tensão a bobina do contador K1 será energizada, o que fechará o contato de selo K1 (13–14), que a mantém energizada.

No mesmo instante os contatos S1 (1–2) se abrirão, impedindo o acionamento de K2, no que se chama de **intertravamento por botões**.

Após o acionamento, a segurança do sistema é mantida pelo contato K1 (21–22), também chamado de **intertravamento por contatos do contator**.

Permanecendo energizada a bobina do contator K1, haverá o fechamento dos contatos principais e o acionamento do motor num sentido.

Inversão do sentido de rotação do motor

Ao pulsar o botão conjugado S2, têm-se o desligamento de K1 pelo contato S2 (1–2) e o fechamento do contato K1 (21–22) que estava aberto, habilitando o acionamento de K2 através do contato S2 (3–4).

Nesse instante a bobina de K2 será energizada, provocando o fechamento do contato de selo K2 (13–14), o qual a mantém energizada.

A bobina do contator K2 permanecendo energizada, haverá o fechamento dos contatos principais e o acionamento do motor no sentido inverso.

Após o acionamento, a segurança do sistema é mantida pelo contato K2 (21–22), chamada de **intertravamento por contatos do contator**.

Este sistema possui dois fins de curso, FC1 e FC2, que podem ser usados com dispositivos de segurança ou sensores de posicionamento.

Segurança do sistema

- **Por meio dos botões conjugados S1 e S2**

Ao pulsar S1 e S2 simultaneamente, têm-se o acionamento dos contatos NA e NF dos dois dispositivos.

O contato NF atua antes do contato NA, proporcionando **intertravamento elétrico**.

- **Por meio dos contatos auxiliares K1 (21–22) e K2 (21–22)**

Os contatos NF de K1 ou K2 impossibilitam a energização de uma bobina quando a outra estiver energizada.

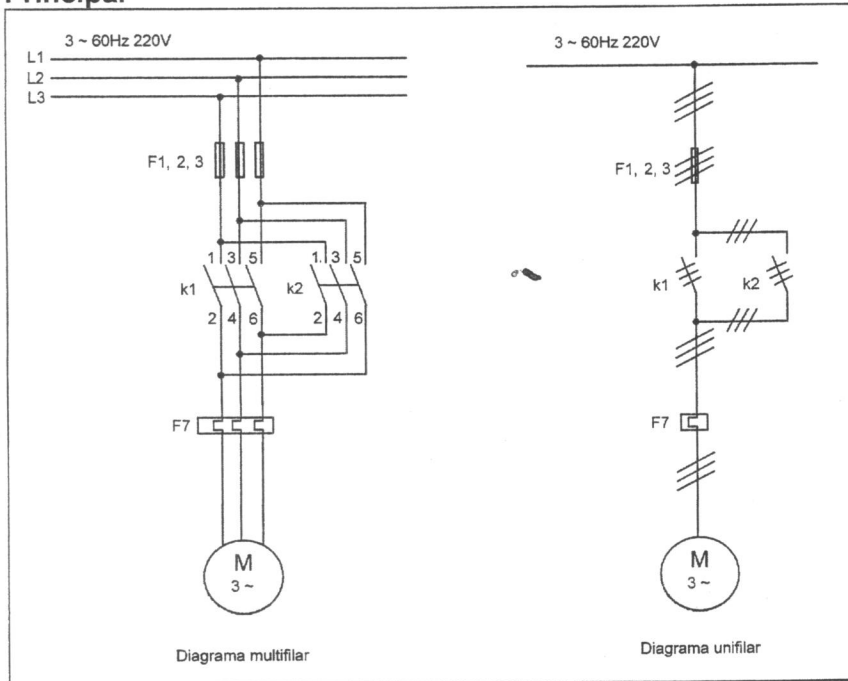
Observação:

Do ponto de vista elétrico a reversão deverá ocorrer somente com o motor parado, com afinidade de evitar valores elevados de correntes de pico, mas sabemos que nem sempre isto é possível, sendo assim, em algumas aplicações, temos de conviver com o problema.

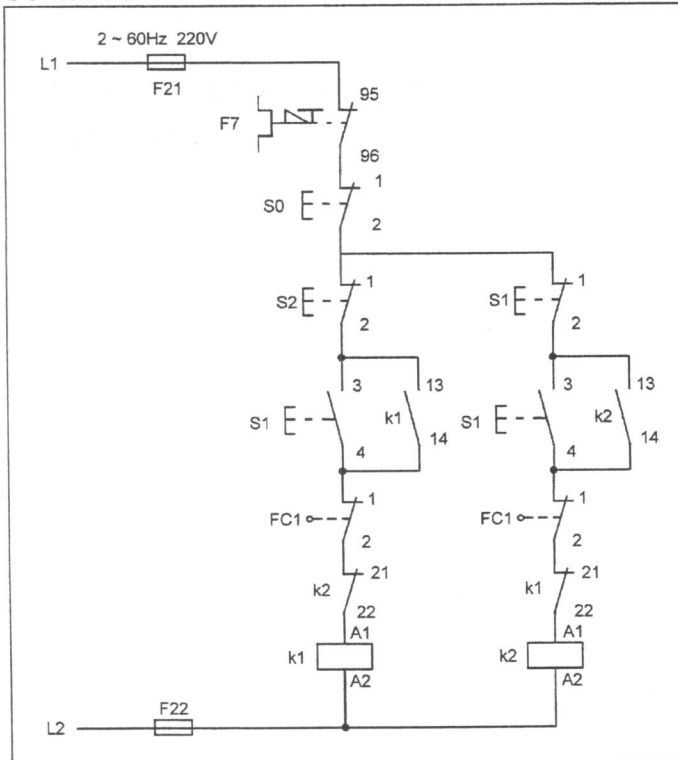
Por exemplo, nos tornos mecânicos em geral, assim como em outros tipos de máquinas, às vezes se faz necessário aplicar a frenagem por contracorrente, para se conseguir inverter rapidamente a rotação do motor.

Circuito Principal e de Comando da Chave Reversora

Principal



Comando



Chave de Partida Estrela–Triângulo

Para a partida estrela–triângulo é fundamental que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, 220/380V, 380/660V, 440/760V.

Nesses casos, os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação.

A partida estrela–triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugado do motor for suficientemente elevada para garantir a aceleração da máquina com corrente reduzida.

Na ligação estrela–triângulo, o conjugado fica reduzido para 25 a 33% do conjugado de partida na ligação triângulo.

Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela–triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado elevada.

Antes de se decidir por uma partida estrela–triângulo, é necessário verificar se o conjugado de partida será suficiente para operar a máquina.

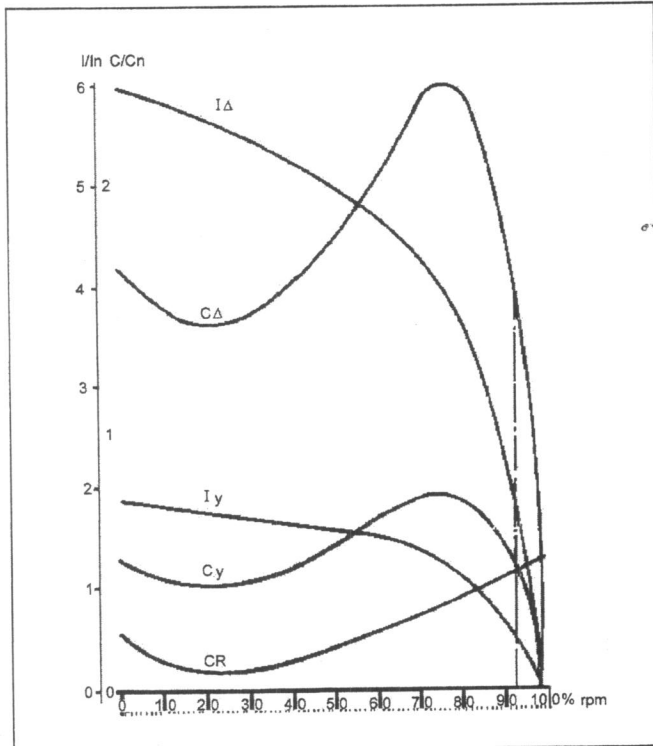
O conjugado resistente da carga não poderá ultrapassar o conjugado de partida do motor, nem a corrente no instante da mudança para triângulo poderá ser de valor inaceitável.

Existem casos em que esse sistema de partida não poderá ser usado, como mostram os exemplos que seguem:

Exemplo 1

Na figura abaixo temos um alto conjugado resistente, C_r . Se a partida for em estrela, o motor acelera a carga aproximadamente até 85% da rotação nominal. Nesse ponto, a chave deverá ser ligada em triângulo.

A corrente, que era aproximadamente a nominal, ou seja, 100%, salta repentinamente para 320%, o que não é nenhuma vantagem, uma vez que na partida ela era de somente 190%.



(Manual de motores – Weg)

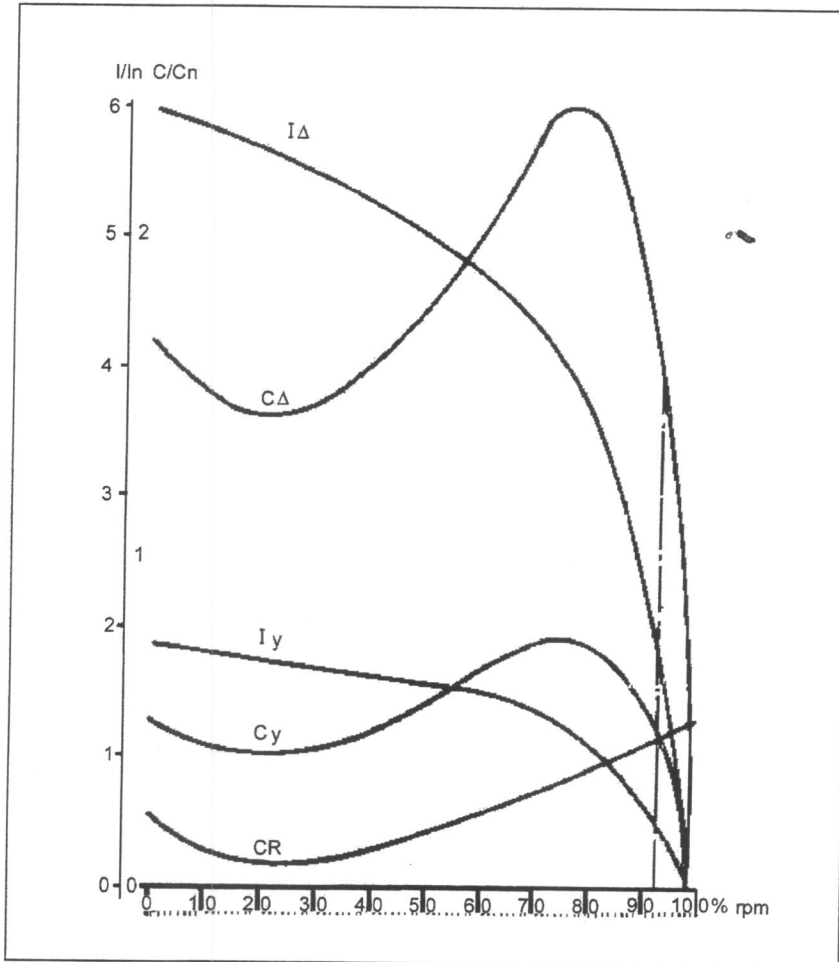
Exemplo 2

Na figura abaixo temos o motor com as mesmas características, mas o conjugado resistente C_r é bem menor. Na ligação estrela, o motor acelera a carga até 95% da rotação nominal.

Quando a chave é ligada em triângulo, a corrente, que era de aproximadamente 50%, sobe para 170%, ou seja, praticamente igual à da partida em estrela. Nesse caso, a ligação estrela-triângulo apresenta vantagem, pois, se a ligação fosse direta, absorveria da rede 600% da corrente nominal.

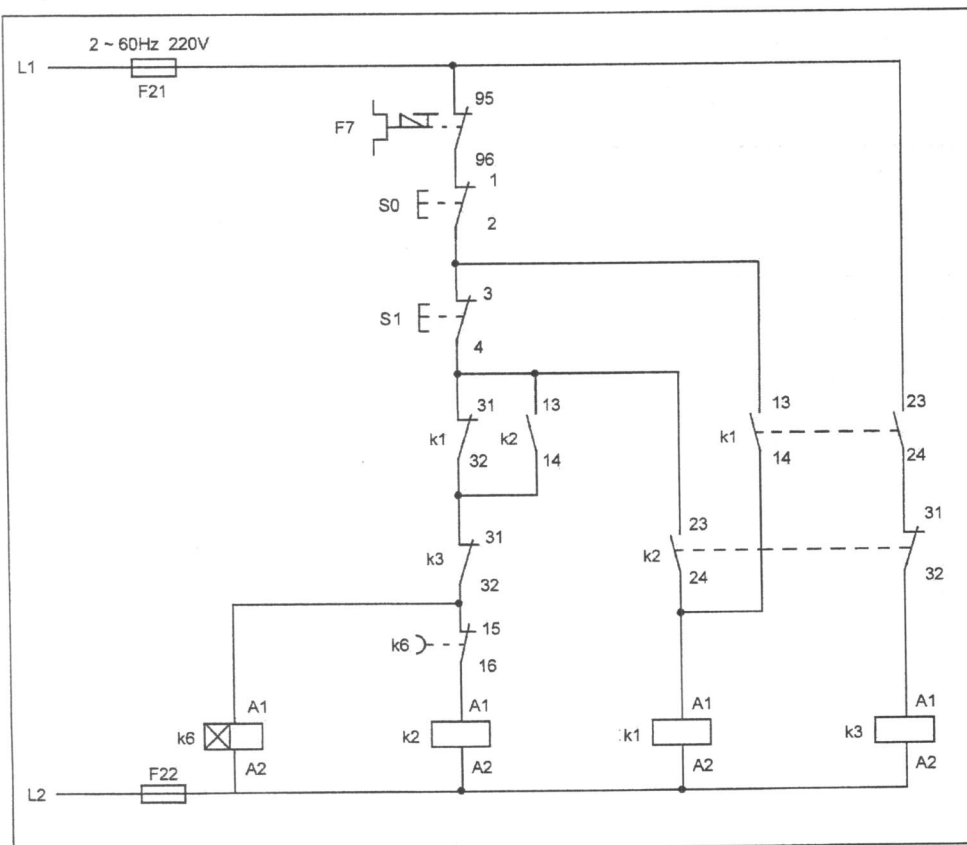
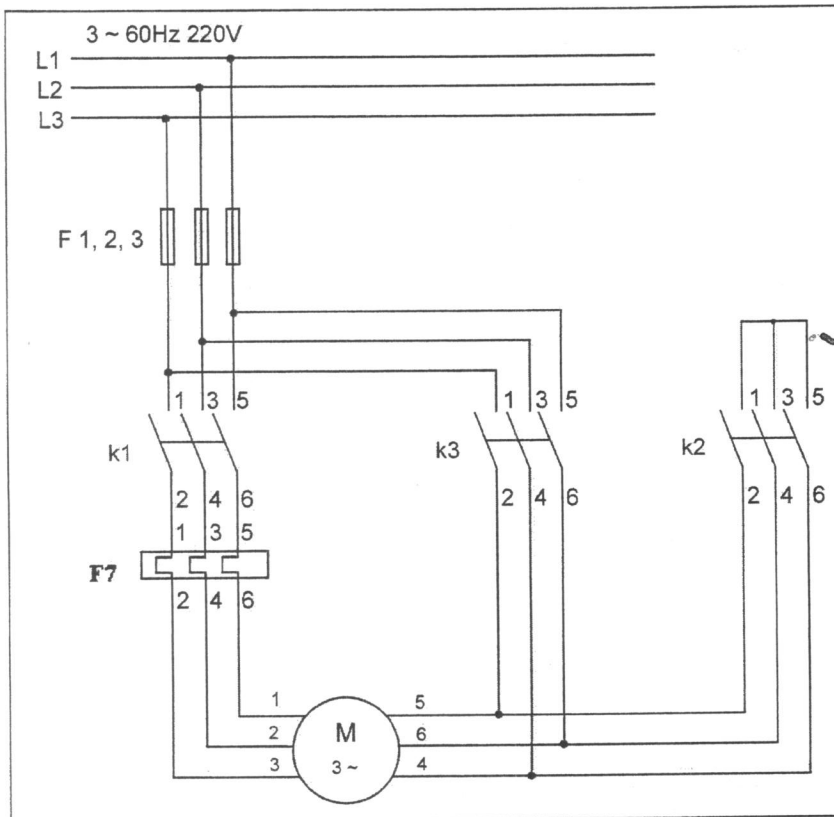
Em geral, a chave estrela-triângulo só pode ser empregada em partidas da máquina em vazio, isto é, sem carga. Somente depois de ter atingido a rotação nominal, a carga poderá ser aplicada.

O instante da comutação de estrela para triângulo deve ser criteriosamente determinado, para que esse método de partida possa efetivamente ser vantajoso nos casos em que a partida direta não é possível.



(Manual de motores – Weg)

Circuito Principal e de Comando da Chave Estrela-Triângulo



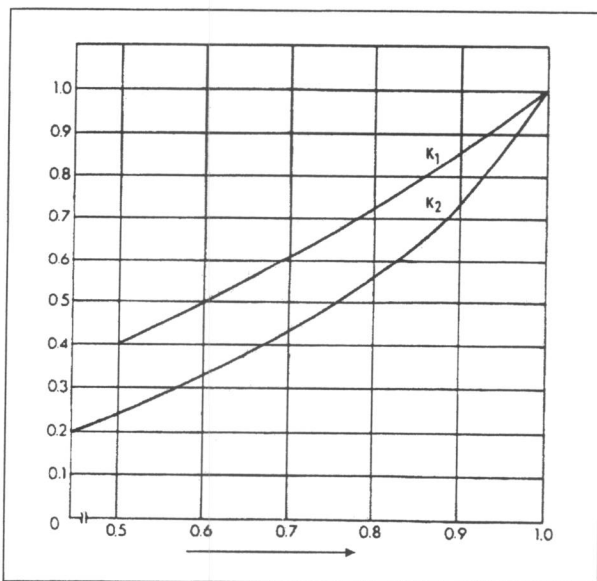
Partida de Motores com Chave Compensadora

A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga no circuito, mas deixa, porém, o motor com um conjugado suficiente para a partida e a aceleração.

A tensão na chave compensadora é reduzida através de um autotransformador que possui normalmente Taps (derivações) de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

Para motores que partem com uma tensão menor que a tensão nominal, a corrente e o conjugado de partida devem ser multiplicados pelos fatores K1 (fator de multiplicação da corrente) e K2 (Fator de multiplicação do conjugado) obtidos no gráfico da figura abaixo:

Relação de Tensões



Fatores de redução K1 e K2 em função das relações de tensão do motor e da rede (Vm/Vn)

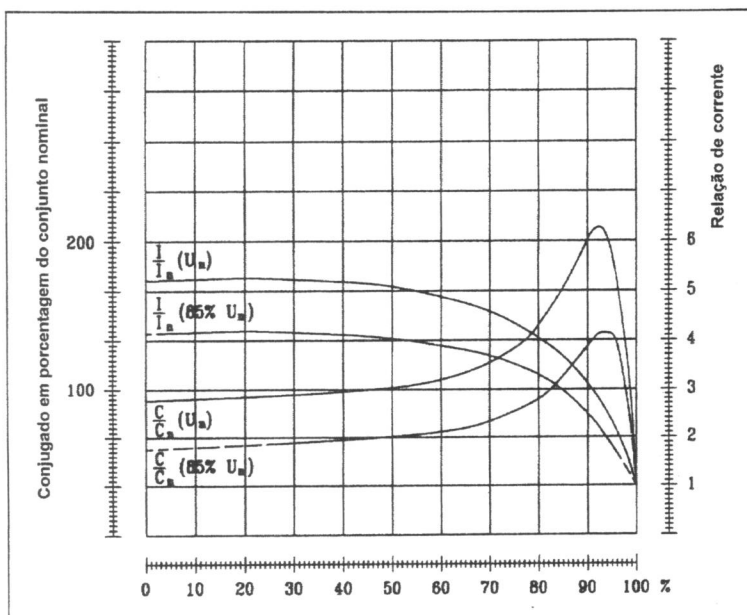
(Manual de motores – Weg)

Exemplo: Para 85% da Tensão nominal

$$\left(\frac{Cp}{Cn}\right)_{85\%} = K2 \times \left(\frac{Cp}{Cn}\right)_{100\%} = 0,66 \times \left(\frac{Cp}{Cn}\right)_{100\%}$$

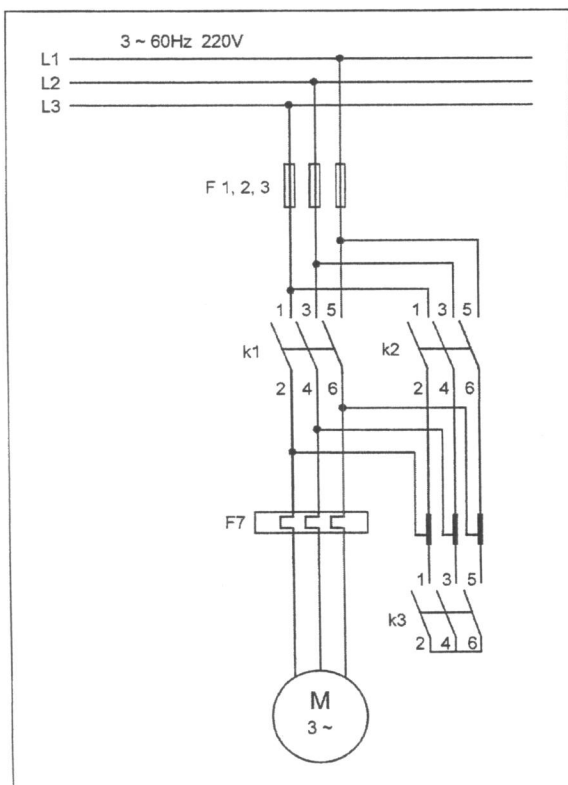
$$\left(\frac{Ip}{In}\right)_{85\%} = K1 \times \left(\frac{Ip}{In}\right)_{100\%} = 0,8 \times \left(\frac{Ip}{In}\right)_{100\%}$$

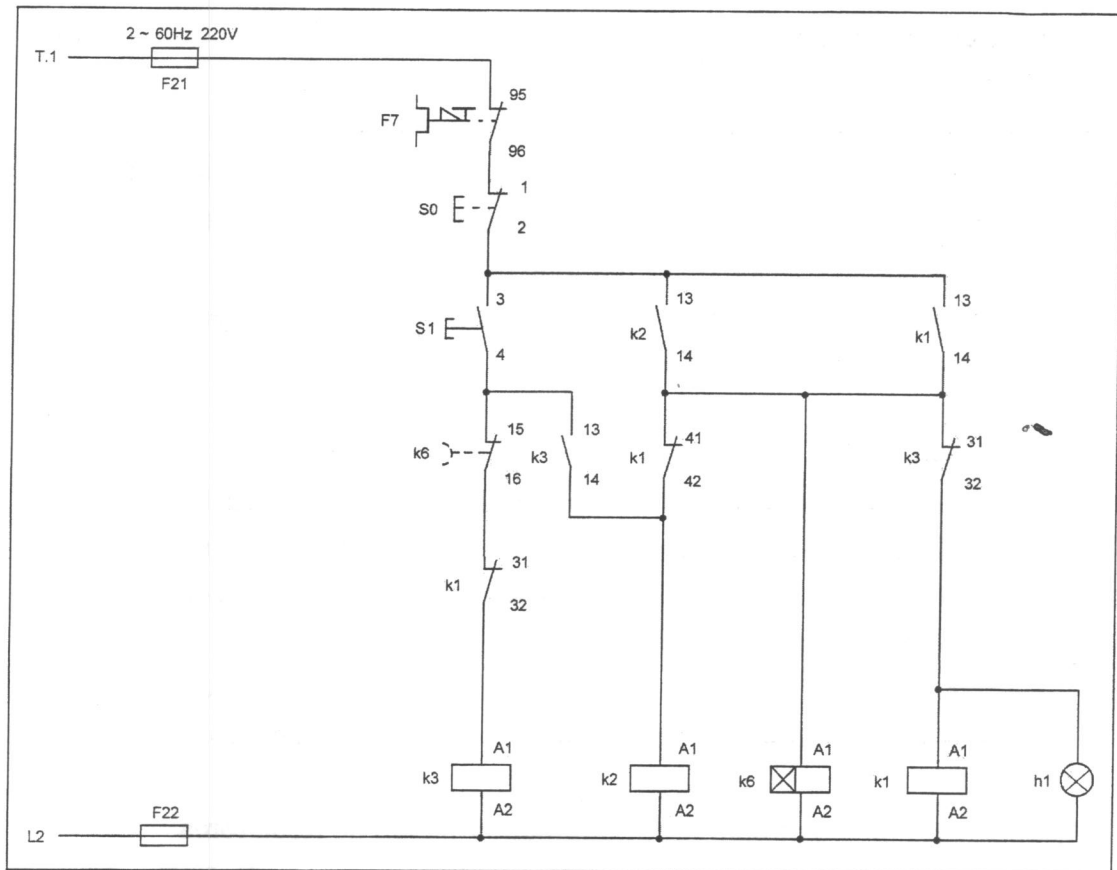
Exemplo das características de desempenho de um motor de 425 cv, 6 pólos, quando parte com 85% da tensão nominal:



(Manual de motores – Weg)

Circuito Principal e de Comando da Chave Compensadora





Comparação entre as chaves Estrela-Triângulo e Compensadora Chave Estrela-Triângulo

Vantagens

- A chave estrela-triângulo é muito utilizada por seu baixo custo
- Não possui limite quanto ao número de manobras
- Os dispositivos ocupam pouco espaço físico
- A corrente de partida fica reduzida a 1/3

Desvantagens

- A Chave só pode ser aplicada a motores com 6 bornes acessíveis
- A tensão da rede deve coincidir com a tensão em Triângulo do motor
- Com a corrente de partida reduzida a 1/3, reduz-se também o conjugado de partida para 1/3.
- Caso o motor não atinja pelo menos 90% da rotação nominal, o pico de corrente na comutação estrela-triângulo será quase como se fosse uma partida direta, o que se torna prejudicial aos contatos dos contatores e não traz nenhuma vantagem para a rede elétrica.

Chave Compensadora

Vantagens

- No tap de 65% a corrente de linha é aproximadamente igual à da chave estrela-triângulo. Entretanto, na passagem da tensão reduzida para a tensão da rede o motor não é desligado e o segundo pico é bem reduzido, visto que o autotransformador se torna, por um curto período, uma reatância.
- É possível a variação do tap de 65% para 80% da tensão da rede, para que o motor possa partir satisfatoriamente.

Desvantagens

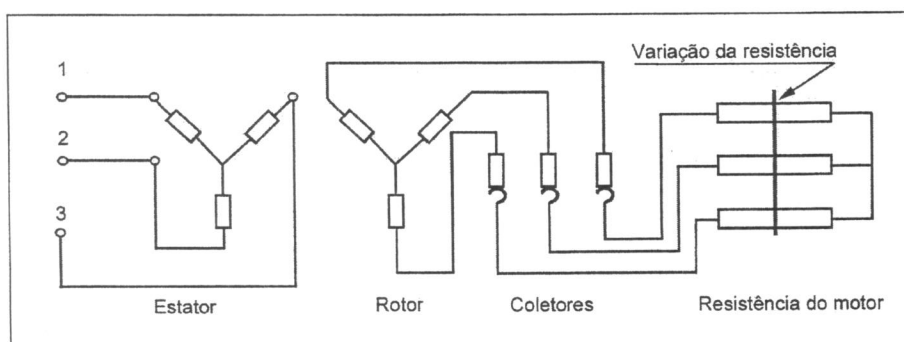
- A grande limitação é a limitação de sua frequência de manobras. Na chave compensadora é sempre necessário saber o número de manobras.
- A chave compensadora é muito mais cara do que a chave estrela-triângulo, por causa do autotransformador.
- Em virtude do tamanho do autotransformador, a construção é volumosa, necessitando de quadros maiores, o que torna seu preço elevado.

Acionamento de Motor com Rotor Bobinado Através de Resistores

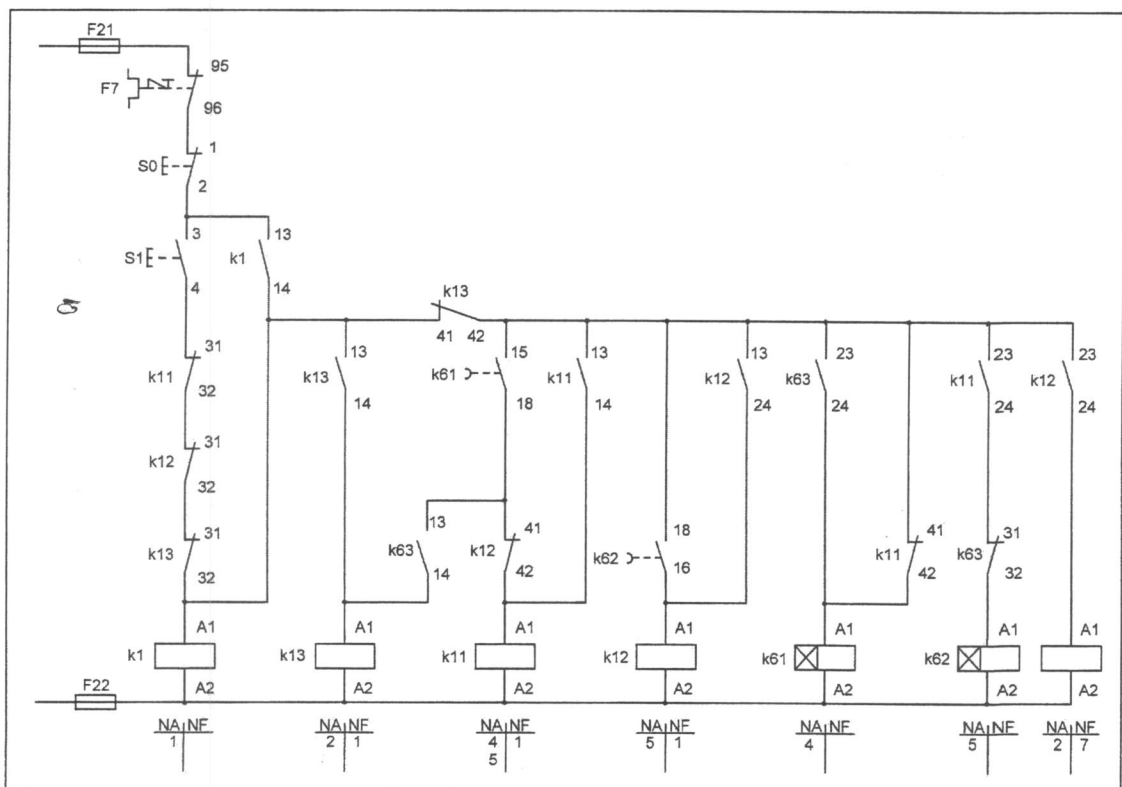
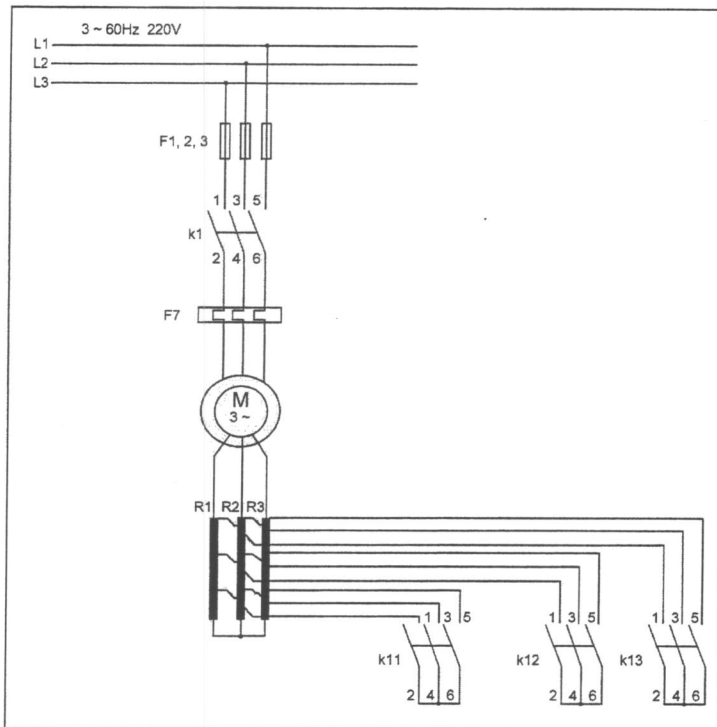
Esses motores são construídos com o rotor envolvido por um conjunto de bobinas, normalmente internas, configuração estrela, com os terminais conectados a três anéis, presos mecanicamente ao eixo do motor, porém isolados eletricamente e ligados através de escovas condutoras a uma resistência trifásica.

As resistências são colocadas em série com o circuito do rotor, e sua quantidade depende do número adotado de estágios de partida, que por sua vez é dimensionado em função exclusivamente do valor máximo da corrente admissível para o acionamento da carga.

A figura abaixo mostra, esquematicamente, a ligação dos anéis acoplados ao reostato de partida com a barra de curto-circuito inserida.



Circuito Principal e de Comando da Aceleração Rotórica



Máquinas de corrente contínua

As máquinas de corrente contínua resultaram do desenvolvimento tecnológico e das exigências cada vez maiores dos processos automáticos de produção. Essas máquinas, por sua grande versatilidade, são largamente usadas na indústria moderna.

Nesta unidade, vamos estudar os tipos e princípios de funcionamento das máquinas de CC empregadas na indústria.

Para melhor assimilar esse conteúdo, é necessário ter conhecimentos anteriores sobre magnetismo, eletromagnetismo e indutores.

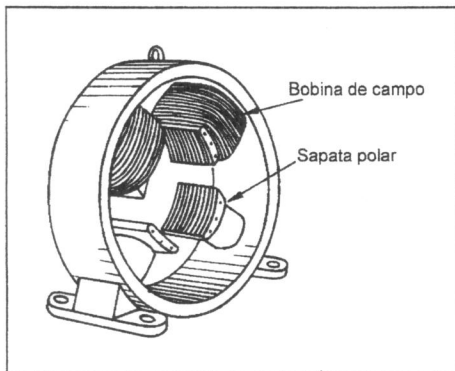
Geradores e motores

A máquina é um motor quando transforma energia elétrica em energia mecânica. E quando transforma energia mecânica em energia elétrica, ela é um gerador.

Do ponto de vista da construção, motores e geradores de CC são iguais. Assim, um motor de CC pode funcionar como gerador de CC e vice-versa.

Construção

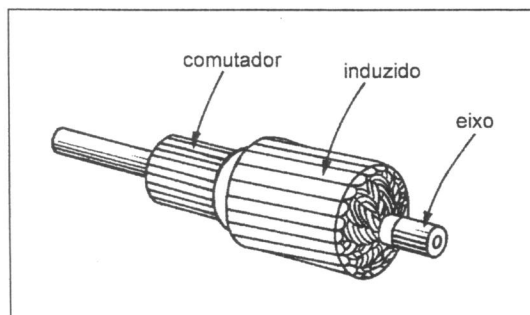
As máquinas de CC são compostas basicamente por duas partes: o estator e o rotor. O estator (ou carcaça) é a parte fixa da máquina. Nele se alojam as bobinas de campo cuja finalidade é conduzir o fluxo magnético.



O estator é formado por:

- Pólos de excitação (ou sapatas polares) - constituídas por condutores enrolados sobre o núcleo de chapas de aço laminadas;
- Pólos de comutação - têm a função de evitar o deslocamento da linha neutra em carga e reduzir a possibilidade de centelhamento. Localizam-se na região interpolar e por eles passa a corrente da armadura (rotor);
- Conjunto porta-escova - aloja as escovas feitas de material condutor e que têm a função de realizar a ligação elétrica entre a armadura e o exterior.

O rotor é a parte móvel que abriga as bobinas ligadas ao comutador.



É formado pelas seguintes partes:

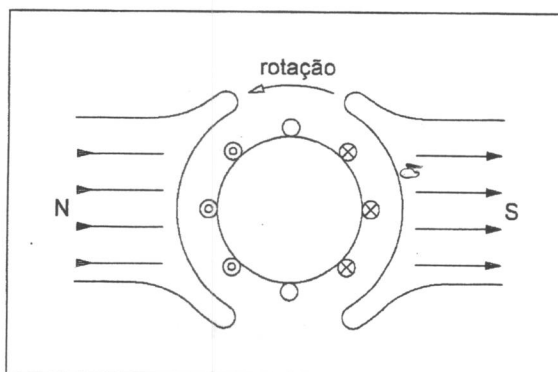
- Induzido (ou armadura) - fica dentro do estator. O mais usado é o do tipo tambor. É constituído por chapas de aço laminadas em cujas ranhuras se acomoda o enrolamento;
- Comutador - constituído por lâminas de cobre isoladas uma das outras por lâminas de mica; sua função é transferir a energia do enrolamento da armadura para o exterior;
- Eixo - é o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pela máquina.

Gerador de CC

O funcionamento do gerador de CC baseia-se no princípio da indução eletromagnética, ou seja, quando um condutor elétrico é submetido a um campo magnético, surge no condutor uma tensão reduzida.

Além disso, a magnitude dessa tensão induzida é diretamente proporcional à intensidade do fluxo magnético e à razão de sua variação.

O gerador de CC funciona segundo esses dois princípios. Assim, ao ser girado com velocidade (n), o induzido (rotor) faz os condutores cortarem as linhas de força magnética que formam o campo de excitação do gerador CC.



Nos condutores da armadura aparece, então, uma força eletromotriz induzida. Essa força depende da velocidade de rotação (n) e do número de linhas magnéticas que tais condutores irão cortar, ou do fluxo magnético (Φ) por pólo do gerador.

Representando a tensão induzida por $E\Phi$ (quando o gerador está em vazio), conclui-se:

$$E\Phi = k \cdot n \cdot \Phi$$

Onde:

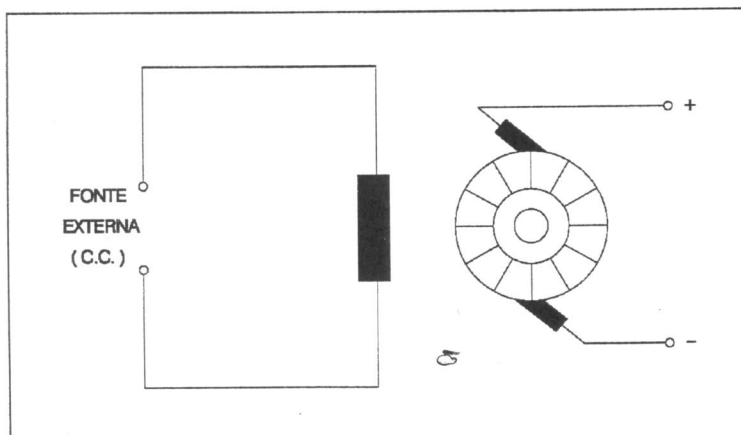
- k é uma constante que depende das características construtivas da máquina,
- n é a velocidade de rotação,
- Φ é o fluxo magnético.

Classificação dos geradores de CC

Os geradores de CC são classificados de acordo com o tipo de ligação (excitação) para a alimentação de suas bobinas de campo. Assim, temos:

- Geradores de CC com excitação independente - quando a corrente de alimentação vem de uma fonte externa;
- Geradores com auto-excitação - quando a corrente de excitação vem do próprio gerador.

No gerador de CC com excitação independente, as bobinas de campo são construídas com várias espiras de fio relativamente fino. Essas espiras são alimentadas (excitadas) por uma fonte externa, como mostra a representação esquemática a seguir.



Quando esse gerador começa a funcionar, mesmo sem excitação, aparece uma força eletromotriz (fem) de pequeno valor devido ao magnetismo remanescente.

Durante a excitação gradativa do gerador, ocorre também um aumento gradativo do fluxo magnético. Conseqüentemente, a tensão gerada eleva-se de modo gradual. Isso ocorre até que haja a saturação magnética. Quando isso acontece, o acréscimo da corrente excitadora não aumenta mais o fluxo magnético.

Quando o gerador é posto em carga, a tensão por ele fornecida diminui. Isto se deve a três fatores:

- Resistência do enrolamento do induzido;
- Resistência de contato nas escovas;
- Diminuição do fluxo indutor pela reação do induzido.

Nesses tipos de geradores, para que a tensão se mantenha constante, para cada aumento de carga deve haver, manual ou automaticamente, um aumento da excitação. Um exemplo desse tipo de gerador de CC é o dínamo do automóvel.

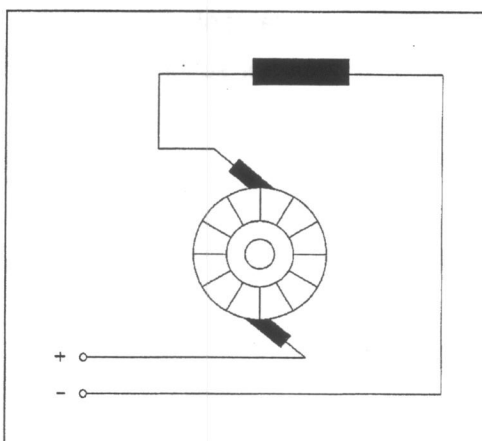
No gerador de CC auto-excitado, as bobinas de campo são ligadas ao induzido. Assim, o próprio gerador se auto-alimenta.

Tipos de geradores

Conforme o tipo de ligação entre as bobinas de campo e o induzido, os geradores são classificados como:

- Gerador de CC em série;
- Gerador de CC em paralelo;
- Gerador de CC misto.

No gerador de CC em série, as bobinas de campo são constituídas por poucas espiras de fio relativamente grosso, ou seja, com bitola suficiente para suportar a corrente de armadura. As espiras são ligadas em série com o induzido como mostra a figura a seguir.



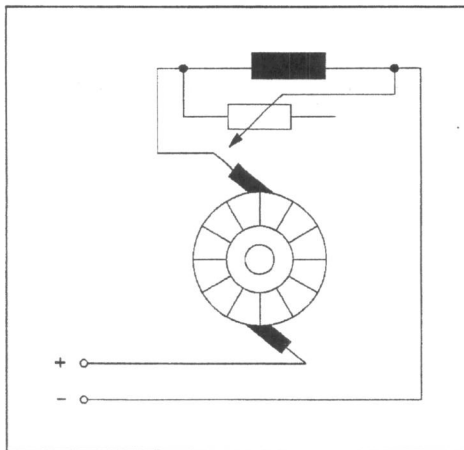
É preciso notar que neste gerador a corrente de carga é a própria corrente de excitação. No trabalho em vazio a fem é gerada apenas pelo magnetismo residual das sapatas polares.

Ao acrescentar carga ao gerador, uma corrente circula pela carga e pela bobina de excitação, fazendo com que aumente o fluxo indutor e, por conseguinte, a tensão gerada.

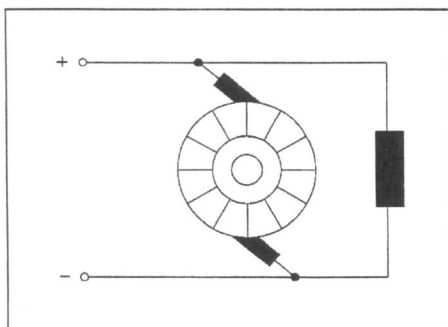
Ao elevar-se a tensão, a corrente aumenta e, conseqüentemente, aumenta também o fluxo indutor. Isso se repete até que se verifique a saturação magnética, quando a tensão se estabiliza.

Observações:

- Antes da saturação magnética, a tensão pode alcançar valores perigosos.
- Para evitar que a tensão se eleve, quando se acrescenta uma carga ao circuito, coloca-se um reostato em paralelo com a excitação.



No gerador de CC em paralelo, as bobinas de campo são ligadas em paralelo com o induzido. Elas são formadas por várias espiras de fio relativamente fino, cuja bitola varia de acordo com a potência do motor. Essa bitola deve ser suficiente para suportar a corrente do campo paralelo.

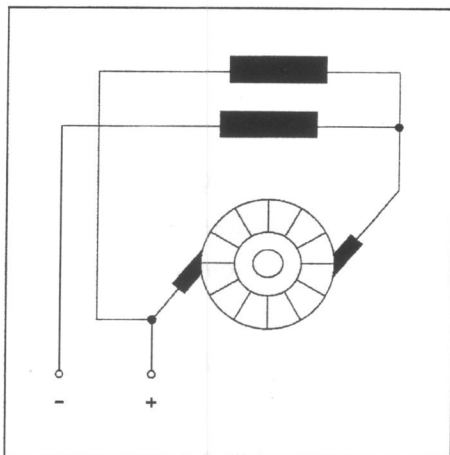


A corrente de excitação resulta de uma pequena parcela da corrente do gerador e pode ser controlada por um reostato ligado em série com o campo magnético.

Assim que o gerador entra em funcionamento, a tensão geradora entra em vazio devido ao magnetismo remanescente (?). Essa tensão faz circular uma corrente pela bobina de excitação, o que, por sua vez, reforça o fluxo magnético e eleva a tensão gerada até o ponto de saturação do fluxo. É neste momento que a tensão se estabiliza.

A corrente do gerador deve alimentar tanto a carga como a bobina de campo, pois ambas estão em paralelo. Assim, a tensão gerada diminui com o aumento de carga. A cada aumento de carga há uma diminuição na excitação e, conseqüentemente, uma queda na tensão. Se ocorrer um curto, ocorre também uma elevação instantânea da corrente. Em seguida, o gerador deixa de gerar energia, pois a tensão nos terminais será nula, não havendo, portanto, excitação.

No gerador de CC misto, a excitação é efetuada por dois enrolamentos. Um deles é constituído por poucas espiras de fio grosso ligadas em série com o induzido. O outro é formado por várias espiras de fio fino ligadas em paralelo como o induzido.



Nesse gerador, a tensão mantém-se constante, tanto em carga como em vazio, já que ele reúne as características dos geradores em série e em paralelo.

A tensão gerada é controlada através de reostato em série com a bobina de campo em paralelo e de reostato em paralelo com a bobina de campo em série.

Observação

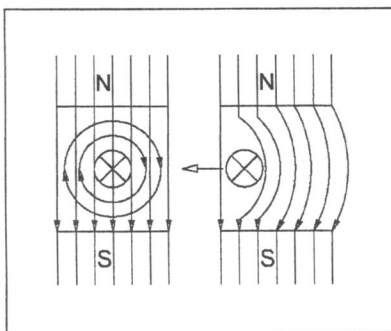
A relação entre as tensões em vazio e em carga de qualquer tipo de gerador é denominada de tensão de regulação e é dada em porcentagem pela seguinte fórmula:

$$\frac{E_o - E_t}{E_t}$$

Motor de corrente contínua - funcionamento

O funcionamento do motor de corrente contínua baseia-se no princípio da reação de um condutor, colocado num campo magnético fixo, ao ser percorrido por uma corrente elétrica.

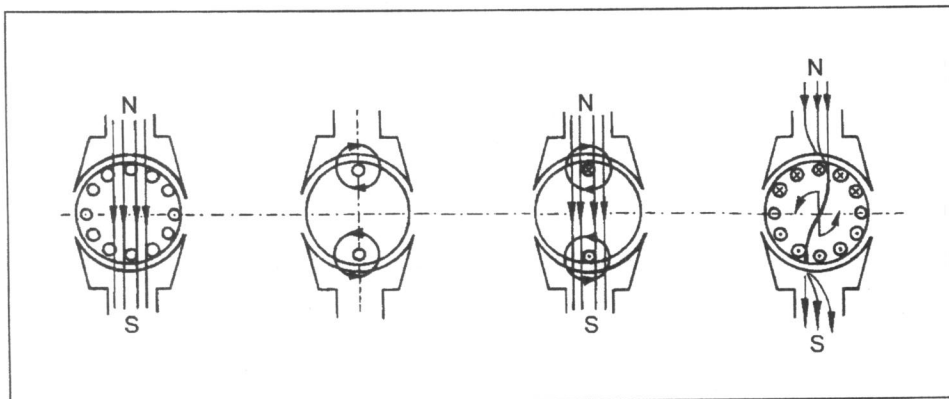
A interação entre o campo magnético fixo e o campo magnético produzido pela corrente que circula no condutor provoca o aparecimento de uma força. É essa força que impele o condutor para fora do campo magnético fixo. As figuras a seguir ilustram esse princípio.



De acordo com a figura, de um lado do condutor há uma diminuição das linhas magnéticas, já do lado oposto há um acúmulo dessas linhas. Elas provocam o aparecimento da força magnética, que é a responsável pelo movimento do condutor.

O motor de corrente contínua funciona sob o mesmo princípio. Nele existe um campo magnético fixo formado pela bobinas de campo. Há também condutores instalados nesse campo (no rotor), os quais são percorridos por correntes elétricas.

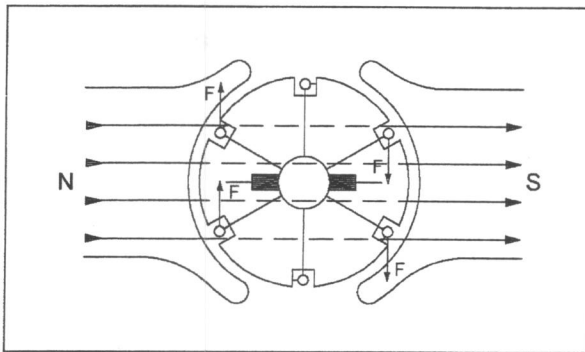
A figura a seguir mostra como aparece o movimento girante em motores de CC.



Podemos observar que a corrente que circula pela espira faz isso nos dois sentidos: a corrente entra por um lado e sai por outro. Isso provoca a formação de duas correntes contrárias de igual valor (binário), das quais resulta um movimento de rotação (conjugado), uma vez que a espira está presa à armadura e suspensa por mancal.

Essas forças não são constantes em todo giro. À medida que o condutor vai se afastando do centro do pólo magnético, a intensidade das forças vai diminuindo.

Nos motores, para que haja força constante, as espiras que são colocadas nas ranhuras da armadura devem estar defasadas entre si e interligadas ao circuito externo através do coletor e escova.



Quando o rotor do motor de CC começa a girar, condutores de cobre cortam as linhas magnéticas do campo. Em consequência, uma força eletromotriz induzida força a circulação de corrente no circuito da armadura, no sentido contrário à corrente de alimentação do motor.

A força eletromotriz induzida, por ser de sentido contrário à tensão aplicada, recebe o nome de força contra-eletromotriz (f_{cem}).

O valor da força contra-eletromotriz induzida (EO) é dado por:

$$EO = n \cdot \Phi \cdot k$$

Onde n é a rotação; Φ é o fluxo magnético; k é a constante da máquina.

A corrente total que circulará pela armadura (I_a) será dada por:

$$I_a = \frac{E - EO}{R_a}$$

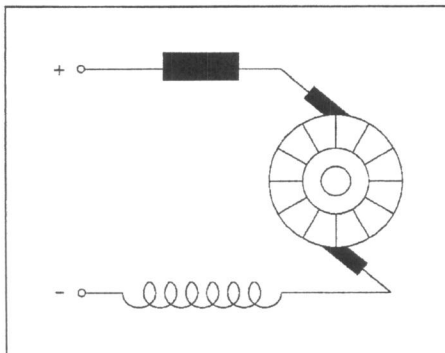
Onde:

- E é a tensão aplicada,
- EO é a força contra-eletromotriz,
- Ra é a resistência.

Tipos de motores

Assim como os geradores, os motores também são classificados segundo o tipo de ligação de seus campos, ou seja: motor de CC em série, motor de CC em paralelo, e motor de CC misto.

No motor de CC em série, as bobinas são constituídas por espiras de fio relativamente grosso ligadas em série com o rotor (induzido).



Nesse motor, o conjugado é diretamente proporcional ao fluxo indutor e à corrente que circula pelo induzido por causa da ação magnética.

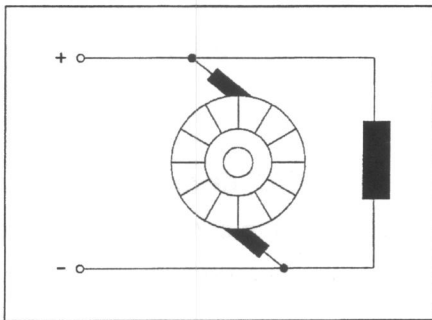
Esses motores possuem arranque vigoroso. A partida e a regulagem de velocidade podem ser feitas por meio do reostato intercalado no circuito.

No arranque, o valor da corrente e, por conseqüência, o fluxo magnético são elevados. O que fornece um alto conjugado ao motor.

Esse tipo de motor é indicado para casos em que é necessário partir com toda a carga. Por isso, eles são usados em guindastes, elevadores, e locomotivas, por exemplo.

Como tendem a disparar (aumentar a rotação), não é recomendável que esses motores funcionem a vazio, ou seja, sem carga.

No motor de CC em paralelo, as bobinas de campo são constituídas por muitas espiras de fio relativamente fino e ligadas em paralelo com o induzido.



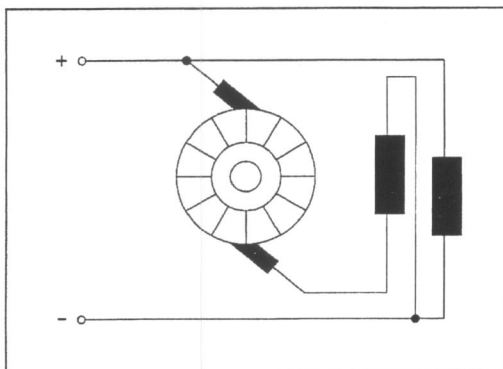
O reostato da armadura (R_a), ligado em série com o induzido, limita a corrente no momento da partida. E o reostato de campo (R_c), ligado em série com as bobinas do campo magnético, regula a velocidade dentro de determinado limite.

Na partida, o cursor do reostato R_c deve estar no ponto médio para possibilitar o ajuste de velocidade. A resistência do reostato R_a , por sua vez, deve estar intercalada no circuito.

Pela ação eletromagnética, o conjugado é proporcional ao fluxo e à corrente. No momento da partida, a corrente no induzido deve ser limitada pelo reostato, o que diminui o conjugado. Por isso, recomenda-se que esse tipo de motor inicie seu funcionamento em vazio, ou seja, sem carga.

O motor de CC em paralelo é empregado, por exemplo, em máquinas-ferramentas.

No motor de CC misto, as bobinas de campo são constituídas por dois enrolamentos montados na mesma sapata polar. Um desses enrolamentos é de fio relativamente grosso e se liga em série com o induzido. O outro, de fio relativamente fino, se liga em paralelo com o induzido.



Este tipo de motor apresenta características comuns ao motor em série e ao motor em paralelo.

Assim, seu arranque é vigoroso e sua velocidade estável em qualquer variação de carga. Pode também partir com carga.

Na partida, a resistência do reostato do campo paralelo (RC) deve estar totalmente intercalada no circuito. Isso permite que o motor se comporte como motor em série sem o perigo de disparar, mesmo quando a carga é pequena ou nula.

Por sua vez, o reostato da armadura (Ra), ligado em série com o induzido, limita a corrente no momento da partida. Após a partida, o cursor RC é deslocado para ajuste da velocidade.

Esses motores são empregados em prensas, estamperia, etc.

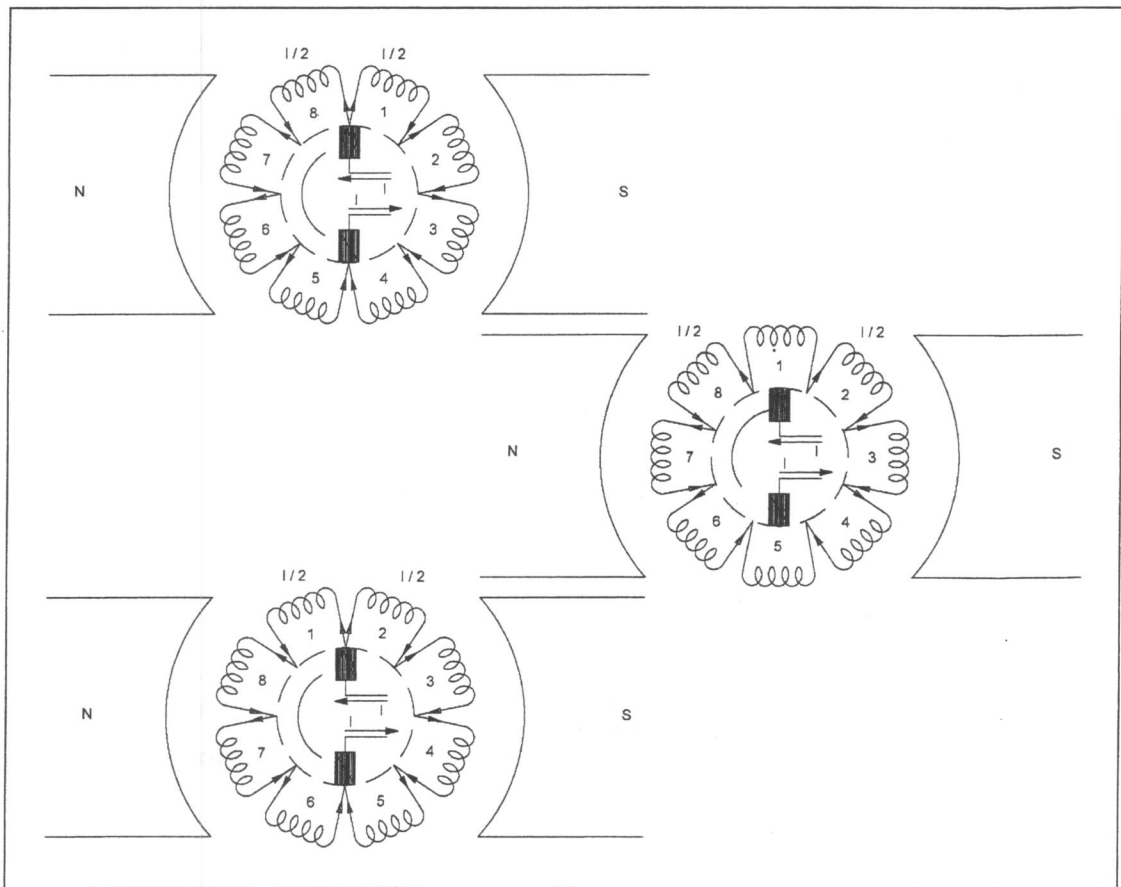
Comutação

Nos motores e geradores de corrente contínua, a ligação da armadura com o circuito externo é feita por meio de escovas que se apoiam sobre as lâminas do coletor.

Quando se alimenta o motor ou se retira a corrente gerada pelo gerador, as escovas fecham durante a rotação, no mínimo, duas lâminas do coletor em curto. Isso provoca um faiscamento.

Esse faiscamento acontece porque, no momento em que a escova está comutando de uma lâmina para outra, a corrente que circula na bobina tem seu sentido invertido.

As figuras a seguir ilustram esta situação.

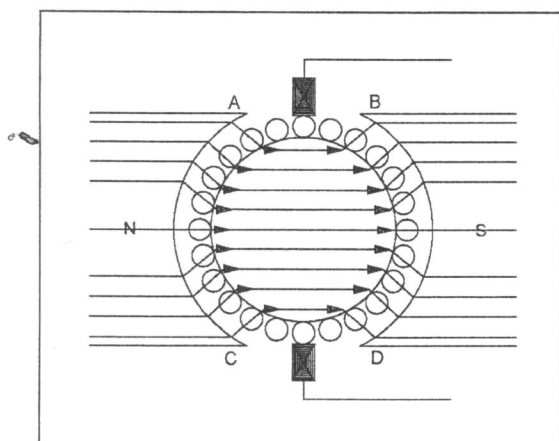


Para que o motor ou o gerador não sejam danificados, devido ao faiscamento, o curto deverá ocorrer quando a bobina estiver passando pela zona neutra do campo magnético, já que aí não há tensão induzida.

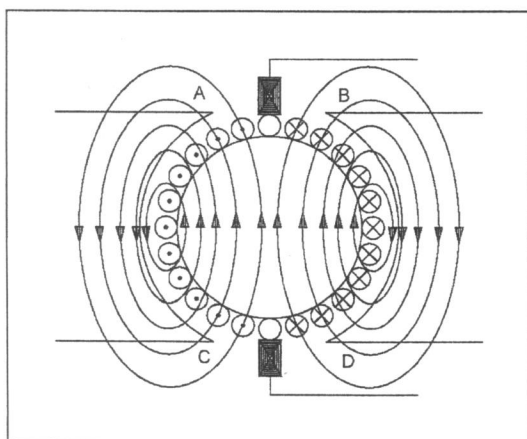
Por causa da reação do induzido, o ponto de comutação no motor e no gerador é móvel e varia de acordo com a carga.

Reação do induzido

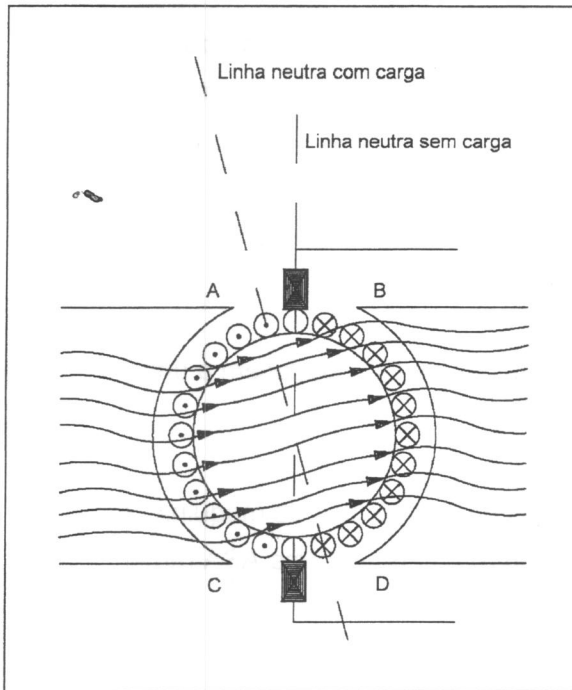
Nas máquinas de CC, quando não circula corrente no induzido, o campo magnético produzido pelas bobinas do estator é constituído por linhas retas, e a densidade do fluxo é praticamente uniforme.



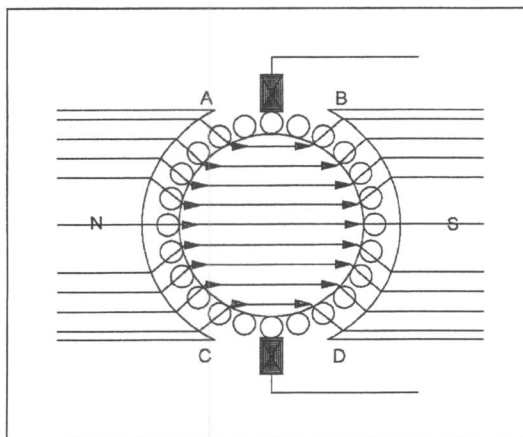
Quando uma corrente é aplicada ao induzido com uma fonte externa qualquer e se interrompe a corrente das bobinas do estator, o campo magnético produzido no induzido será constituído por linhas concêntricas.



Quando a máquina estiver em funcionamento e com carga, ou seja, quando a máquina estiver com corrente circulando nas bobinas do estator e nos condutores do induzido, seus campos magnéticos interagem formando um novo campo magnético com as linhas destorcidas e sem uniformidade.



Nas extremidades polares A e D, as linhas do campo magnético, criado pela corrente que circula no induzido, têm sentido oposto ao campo produzido pela corrente que flui do estator. O inverso acontece nas extremidades B e C, onde as linhas do campo magnético, criado pelo induzido, têm o mesmo sentido das linhas produzidas pelo estator. Isso pode ser observado quando analisamos as figuras a seguir, as quais indicam os sentidos dos campos magnéticos do estator do rotor.



Em consequência, ocorre uma redução das linhas nos campos magnéticos das extremidades A e D e uma intensificação nas extremidades B e C. Todavia, a intensificação em B e C não compensa a redução que se verifica em A e D. Isto se deve à saturação magnética que provoca a redução do fluxo magnético total.

Assim, para evitar o faiscamento, a reação da armadura ou induzido provoca a redução do fluxo total, o deslocamento da linha neutra e a necessidade de deslocamento das escovas.



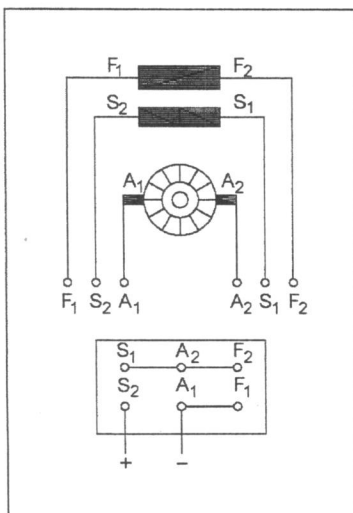
Identificação dos terminais das máquinas de CC

Os bornes da placa de ligação das máquinas de CC obedecem a uma nomenclatura normalizada.

A tabela a seguir mostra as designações dos elementos da máquina com seus correspondentes para a norma DIN (alemã) e para a norma ASA (americana).

Elemento	Norma	
	DIN	ASA
Armadura ou induzido	A.B.	A1 A2
Campo de derivação	C.D.	F1 F2
Campo em série	E.F	S1 S2

Veja agora um exemplo da placa de máquina de CC conectada para funcionar como motor misto de acordo com a norma ASA.



Tiristores – retificador controlador de silício - SCR

Neste texto, verificaremos o funcionamento do SCR pela análise de circuitos equivalentes, curvas características, métodos de disparo e sistemas de comutação para corrente alternada e corrente contínua.

Dentro da família dos dispositivos PNP, o Retificador Controlado de Silício é sem dúvida o de maior interesse. Foi introduzido pela primeira vez em 1956 pela Bell Telephone Laboratories.

As áreas mais comuns de aplicação dos SCRs incluem Controle de relés, Circuitos de retardo de tempo, Fontes de potência regulada, Chaves estáticas, Controle de motor, Choppers, Inversores, Ciclo-conversores, Carregadores de bateria, Circuitos de proteção, Controle de aquecedores e Controle de fase.

Atualmente, os SCRs são projetados para controlarem potências de até 10 MW, com valores nominais individuais de até 2KA e 1,8KV.

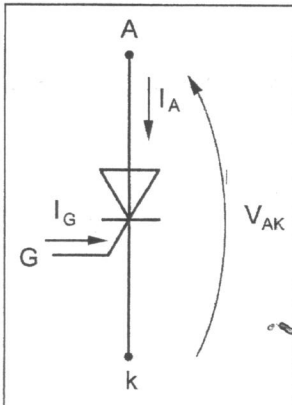
A faixa de frequência foi estendida até 50KHz, permitindo aplicações em alta frequência como o aquecimento por indução e a limpeza ultra-sônica.

Princípio de Funcionamento

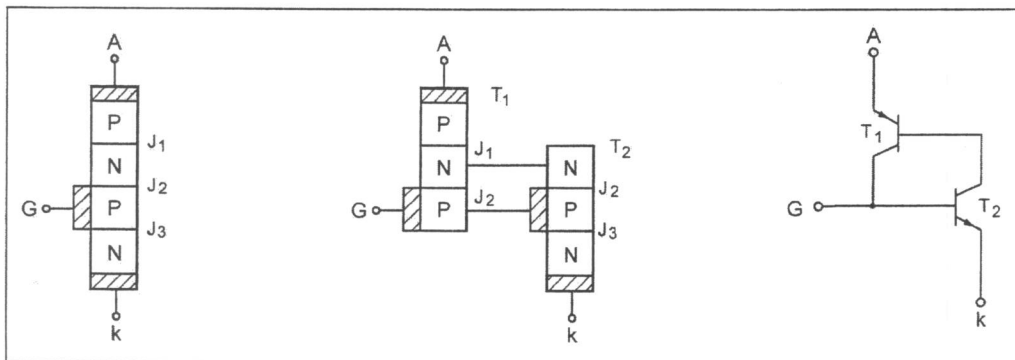
A operação básica de um SCR é diferente do diodo semicondutor de duas camadas fundamentais, pelo fato de um terceiro terminal, chamado de Gate, determinar quando o SCR chaveia do estado de circuito aberto para o de circuito fechado. Ou seja, não basta apenas polarizar diretamente a região de ânodo para catodo do dispositivo.

Quando o SCR conduz, a resistência dinâmica é de 0,01 a 0,1 Ω , e a resistência reversa é tipicamente de 100K Ω ou mais.

Simbologia:

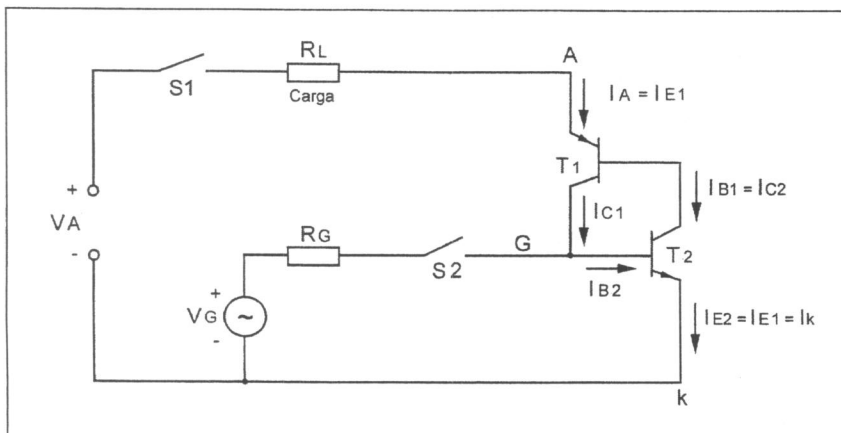


Para entendermos o funcionamento do SCR, vamos utilizar uma analogia com dois transistores, conforme a figura a baixo:



Na figura abaixo verificamos o dispositivo de 4 camadas representado por dois transistores, um NPN (T2) e um PNP (T1).

Quando interligamos os dispositivos conforme a figura abaixo, podemos analisar seu funcionamento na região de polarização reversa e direta.



Na **região de polarização reversa** (tensão de ânodo < tensão de cátodo), mesmo quando se aplica pulso no gate o dispositivo não dispara.

Isso não é aconselhável, pois faria fluir uma corrente de fuga de ânodo, de valor aproximadamente igual à corrente de gatilho, causando um superaquecimento da junção, que poderia danificar o componente.

Na **região de polarização direta** (tensão de ânodo > tensão de cátodo), têm-se o dispositivo preparado para disparar, necessitando apenas de um pulso positivo no gate referenciado ao cátodo. Isto ocorre quando se fecha a chave CH2.

Nesse instante o transistor T2 entra em condução, fazendo com que o transistor T1 conduza, de modo que circule corrente do anodo para o catodo do SCR.

Pode-se verificar que após o gatilho, mesmo abrindo a chave CH2, o dispositivo continua conduzindo corrente, pois a corrente I_{b2} é mantida por I_{c1} .

O dispositivo somente irá parar de conduzir a corrente quando a chave CH1 for aberta, interrompendo a circulação dela.

Curva Característica do SCR

A curva real do SCR é mostrada na figura abaixo, onde podemos observar que são várias as curvas que dependem da corrente de gatilho aplicada no dispositivo.

Observando a curva, podemos distinguir três regiões de polarização:

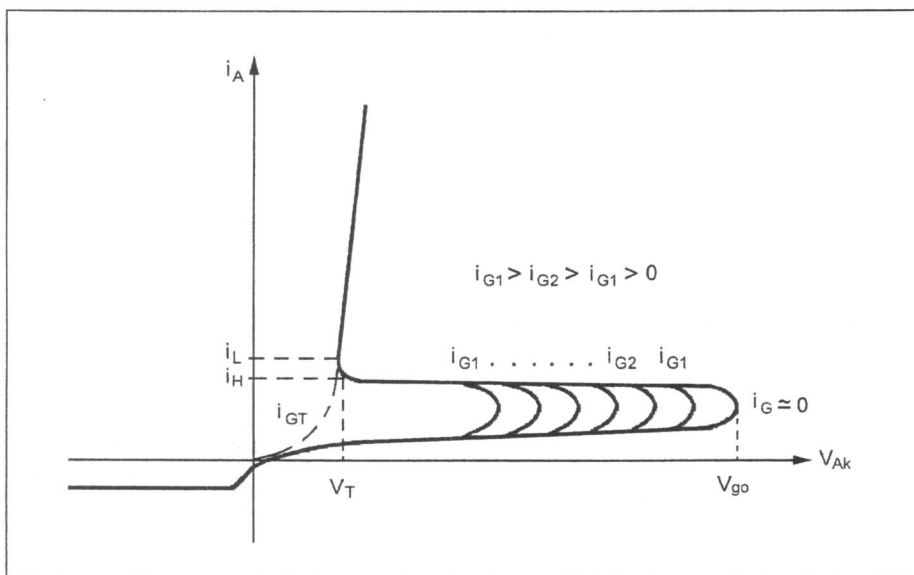
- **Região de polarização reversa**
- **Região de polarização direta em bloqueio**
- **Região de polarização direta em condução**

Na **região de polarização reversa**, onde $V_{AK} < 0$, praticamente não há condução. A corrente que circula possui um valor muito baixo, que depende do tipo de SCR.

Para SCRs de baixa potência a corrente reversa é da ordem de dezenas a centenas de μA . Já nos de maior potência a corrente reversa pode chegar a centenas de mA.

Na **região de polarização direta em bloqueio** temos várias curvas parametrizadas pela corrente de gatilho IG. Quando IG é igual a 0, o SCR permanece bloqueado, desde que a tensão seja inferior à VBO (Breakover Voltage ou tensão de disparo). Quando VAK é igual ao VBO, o SCR dispara e a corrente IAK cresce, sendo limitada pela carga colocada em série com o dispositivo.

Na **região de polarização direta em condução**, para que o SCR permaneça em condução é necessário que a corrente de anodo atinja um **valor mínimo de disparo IL** (Latching Current ou corrente de disparo). Caso esse valor não seja atingido, **após o disparo o SCR volta ao estado de Bloqueio**.



Analisando a curva característica, verificamos que quanto maior o valor da corrente de gatilho IG, menor a tensão VAK necessária para disparar o SCR. Isso é verdade até o limite de IG igual a IGT (Gate Trigger Current ou corrente de gatilho com disparo).

A curva correspondente a IGT está tracejada na figura acima. Por definição, IGT é a mínima corrente de gatilho que garante o disparo do SCR com tensão direta de condução V_T .

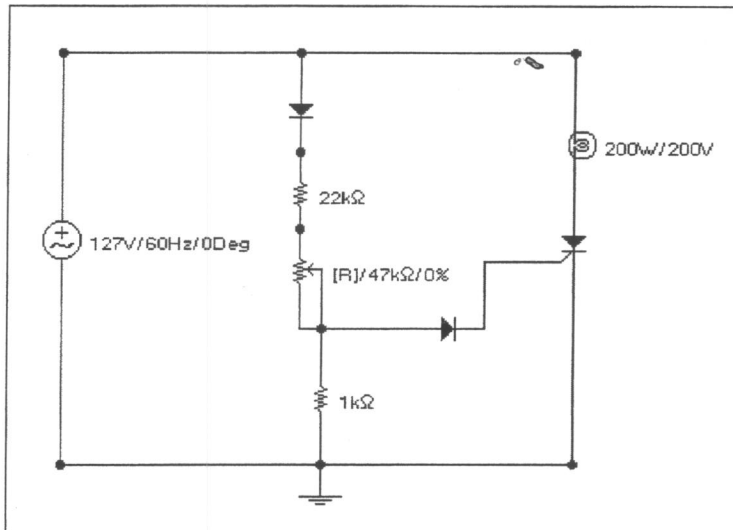
Na região de polarização direta em condução, a queda de tensão no SCR é igual a V_T . Essa tensão possui o valor típico de 1,5 V.

Após o disparo, sendo estabelecida a condução ($i_A > i_L$), a corrente de gatilho poderá ser retirada, uma vez que o SCR permanece conduzindo. O SCR voltará ao bloqueio

quando a corrente I_A cair abaixo de I_H (Holding Current ou corrente de manutenção), ou se **VAK for menor que zero (ânodo negativo em relação ao cátodo)**.

Outros métodos de Disparo do SCR

Sabemos que para disparar um SCR, a tensão de ânodo deve ser positiva em relação à tensão de catodo ($V_{AK} > 0$), e nesse instante devemos aplicar um pulso positivo no gate referenciado ao catodo, conforme a figura abaixo.



Portanto, além da aplicação do pulso de gatilho, o SCR pode ser disparado de outras formas. Normalmente esses disparos são indesejados, pois, em alguns casos, podem danificar o dispositivo.

Métodos de Disparo:

- Disparo por sobretensão
- Disparo por variação de tensão (dv/dt)
- Disparo por aumento da temperatura
- Disparo por luz ou radiação

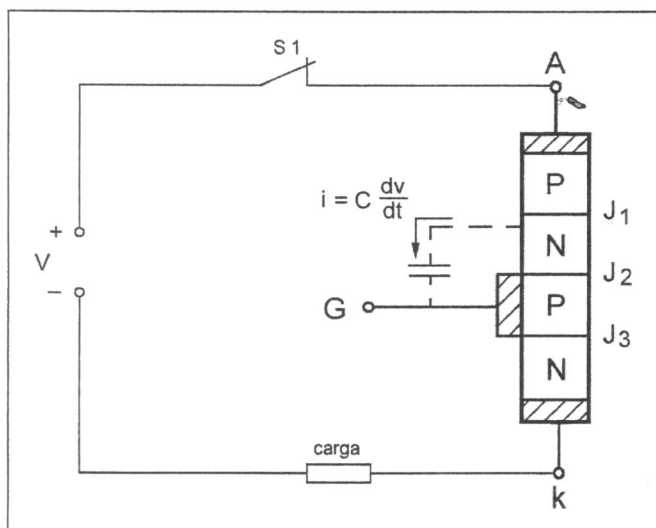
Disparo por sobretensão

Esse tipo de disparo ocorre quando o SCR está polarizado diretamente, sendo I_G igual a 0. Com o aumento da tensão V_{AK} acima da tensão V_{BO} , o dispositivo entra em condução.

Esse processo de disparo, nem sempre destrutivo, raramente é utilizado na prática. Devemos dimensionar o SCR com uma tensão V_{BO} muito maior que a tensão da fonte de alimentação, para evitar o disparo acidental por sobretensão.

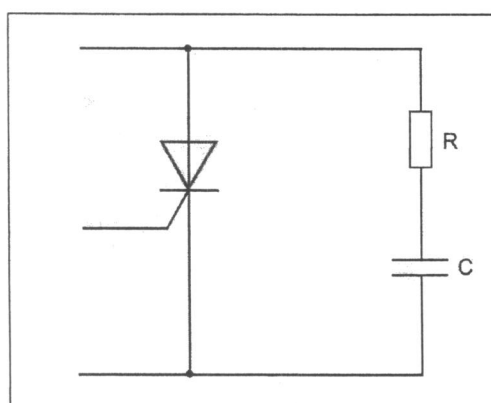
Disparo por variação de tensão (dv/dt)

Quando um SCR está polarizado diretamente, a junção interna J2 está polarizada reversamente. Nesta junção existe carga armazenada: íons positivos de um lado e íons negativos do outro. Isto funciona como um capacitor, conforme a figura abaixo. Mesmo não havendo pulso no gate, quando fechamos a chave CH1, a capacitância da junção J2 fará com que circule uma corrente de gatilho.



Como a variação da tensão é muito grande (de zero para V_{max}), a corrente resultante será muito grande. Essa corrente é suficiente para disparar o SCR.

Esse disparo indesejado pode ser evitado pela proteção de um circuito chamado Snubber. Esse circuito é formado por um resistor em série com um capacitor devidamente calculado, colocado em paralelo com o SCR, conforme a figura a baixo.



Circuito Snubber

Disparo por aumento da temperatura

Quando um dispositivo semicondutor está reversamente polarizado, à medida que aumentamos a sua temperatura teremos um aumento da corrente reversa de saturação.

No caso do SCR, mesmo estando polarizado diretamente, existe uma junção J2 que está reversamente polarizada, sendo extremamente dependente da temperatura.

À medida que aumentamos a temperatura, teremos um aumento da corrente reversa de saturação, podendo ocorrer o disparo acidental do dispositivo.

Disparo por luz ou radiação

Quando temos a incidência de energia radiante na forma de fótons (luz), sobre uma janela adequadamente colocada no SCR, podemos dispará-lo.

O disparo ocorre porque a radiação que incide sobre a janela provoca o aparecimento de pares elétrons-lacunas, que irão aumentar a corrente de fuga na junção J2 do SCR. Um aumento da corrente de fuga faz com que o dispositivo dispare e entre em condução.

Os dispositivos com esse tipo de disparo são chamados de LASCR (Light Activated Silicon Controlled Rectifier ou Retificador Controlado de Silício Ativado por Luz).

Métodos de Comutação de um SCR

Comutar um SCR significa cortar a corrente que o dispositivo está conduzindo e impedir que ele retorne à condução.

A comutação estará completa quando a corrente de anodo IA for menor que a corrente de manutenção IH, e a reaplicação da tensão direta entre o anodo e o catodo não provocar o retorno do SCR ao estado de condução.

O tempo que um SCR demora para assumir a condição de Bloqueio é de 5 a 30 μ s.

Tipos de Comutação

- Comutação natural
- Comutação forçada

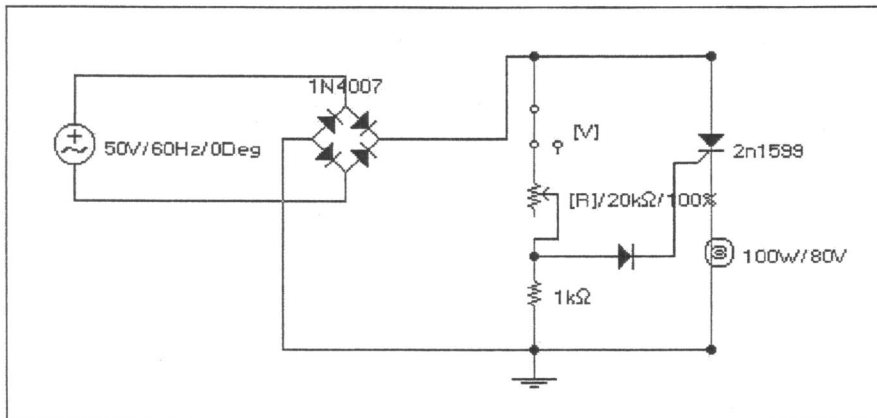
Comutação natural

Quando a corrente de ânodo se reduz a um valor menor que a corrente de manutenção IH, o SCR é bloqueado.

A corrente de manutenção possui um valor muito pequeno, cerca de 1.000 vezes menor que a corrente nominal do dispositivo.

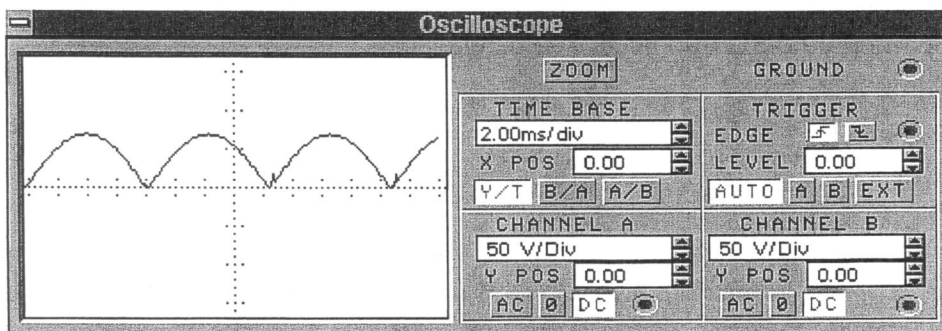
Em um circuito de corrente alternada, a corrente passa por zero a cada meio ciclo (8,33ms), e isso leva o SCR ao bloqueio.

Podemos verificar a comutação natural no circuito da figura abaixo.

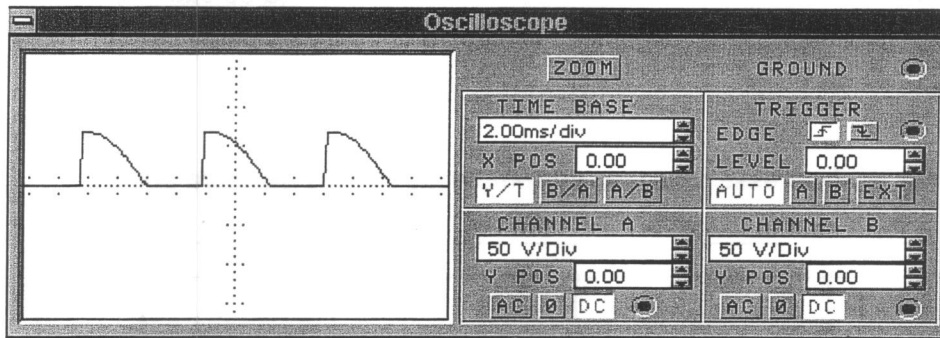


Formas de onda do circuito da

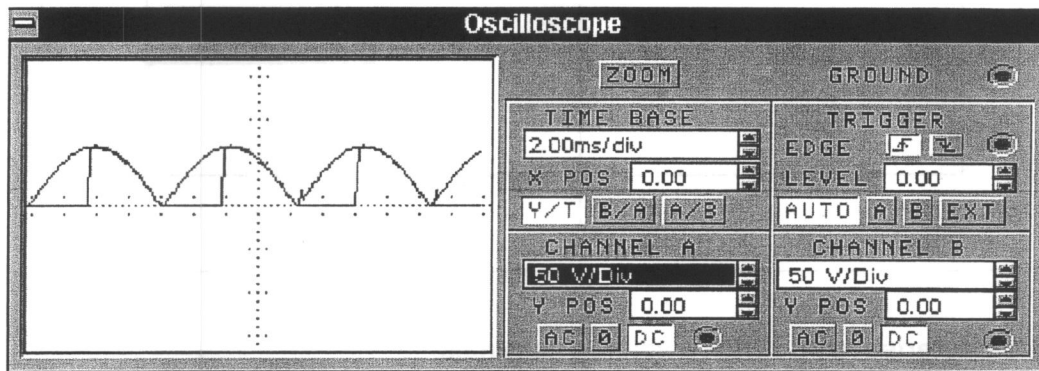
- Tensão na saída do retificador



- **Tensão na carga**



- **Comparação das formas de onda**

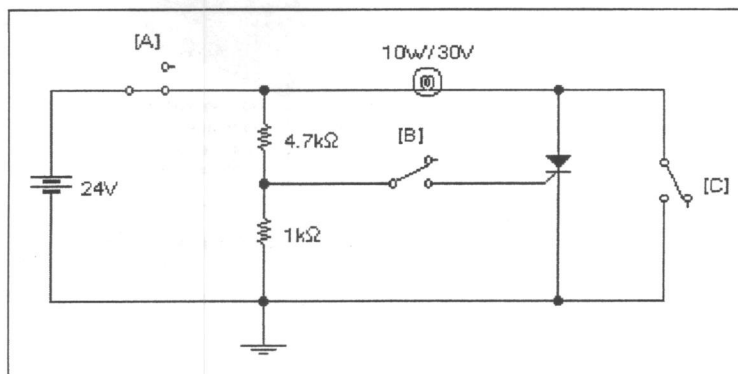


Comutação Forçada

A comutação forçada deve ser utilizada em circuitos de corrente contínua, porque a tensão entre ânodo e catodo permanece sempre positiva.

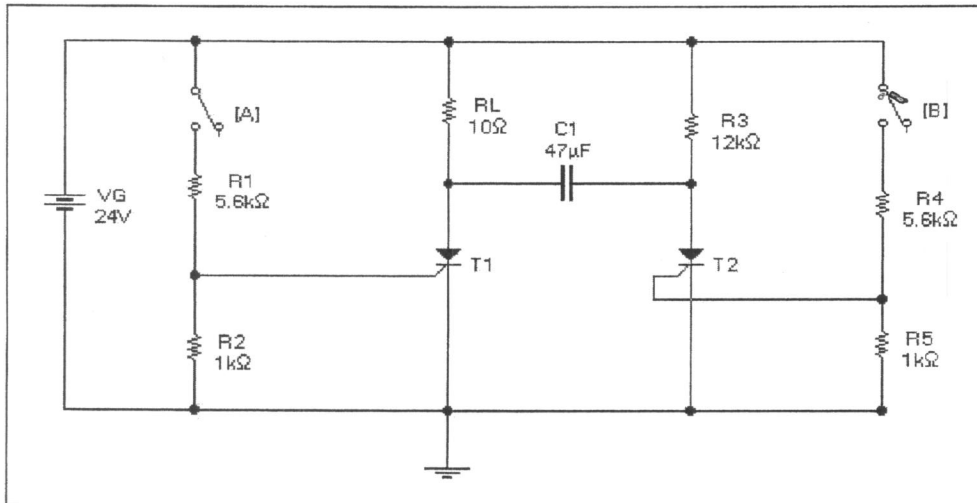
Para realizar a comutação forçada podemos desviar a corrente por um caminho de menor impedância. Isto faria com que a corrente que circula pelo SCR ficasse menor que a corrente de manutenção I_H , provocando o bloqueio do dispositivo.

Podemos verificar o processo através da figura abaixo:



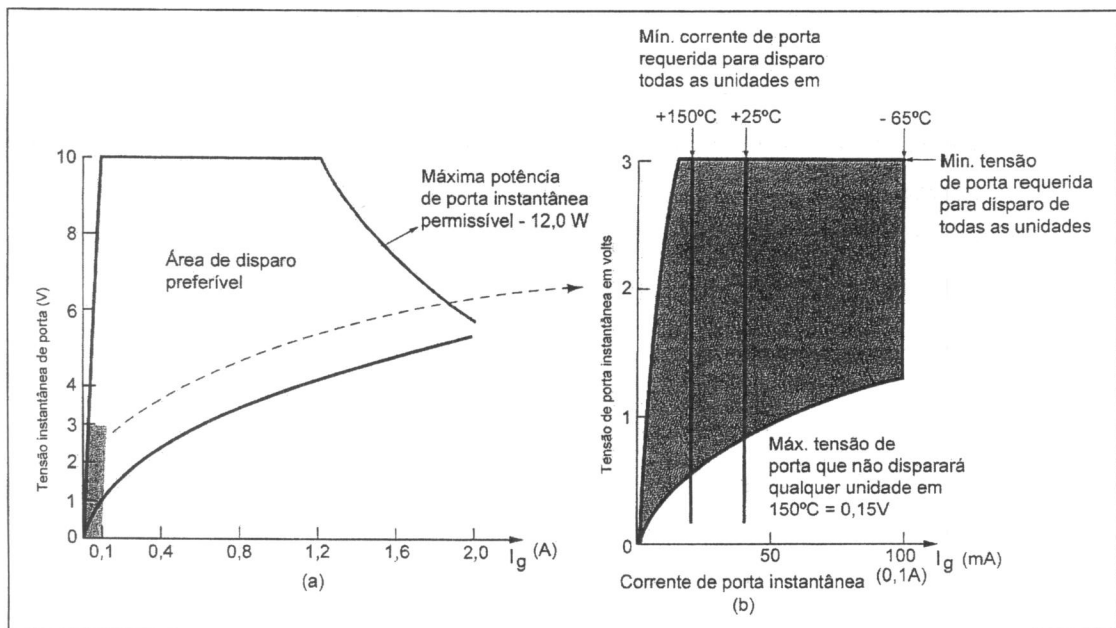
Outra forma de realizar a comutação forçada é aplicar tensão reversa nos terminais do SCR, forçando-o a operar na região de polarização reversa de sua curva característica. Com isso a corrente no SCR diminui abaixo do valor de I_H e o dispositivo entra em bloqueio.

Podemos verificar esse processo de comutação através da figura abaixo:



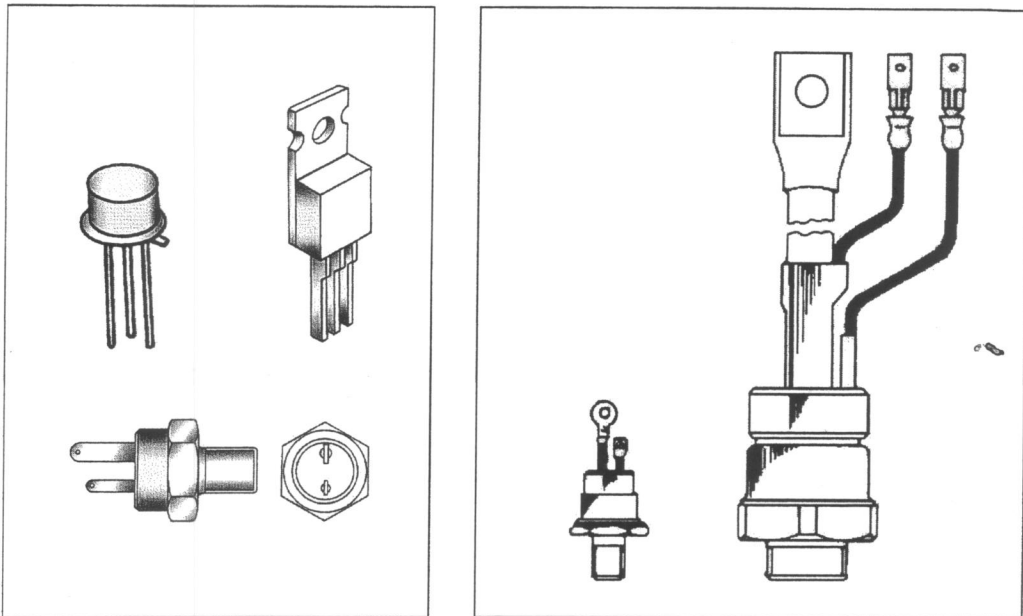
Características do SCR e valores nominais

Na figura abaixo podemos verificar as características de disparo do SCR em função da temperatura, tensão e corrente.



(Dispositivos eletrônicos e Teoria de circuitos)

Tipos de SCR



(Dispositivos eletrônicos e Teoria de circuitos)

DIAC

O Diac é basicamente uma combinação paralela inversa, com dois terminais de camadas semicondutoras, o que permite o disparo em qualquer direção.

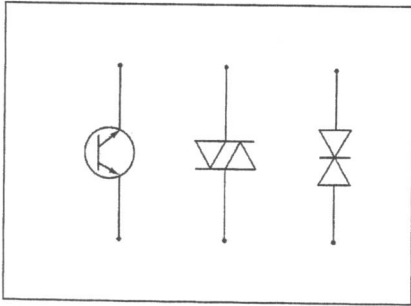
As características do dispositivo, apresentadas na Figura 12.4, demonstram que existe uma tensão de ruptura em qualquer direção.

As tensões de ruptura podem variar de um valor mínimo de 28 V a um valor máximo de 42 V. Elas estão relacionadas pela seguinte equação, fornecida pela tabela de especificação:

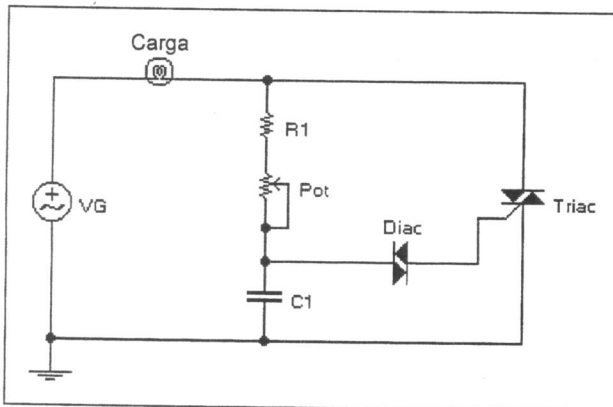
$$V_{BR1} = V_{BR2} \pm 10\% \times V_{BR1}$$

Os níveis de corrente (I_{BR1} e I_{BR2}) são muito próximos em amplitude para cada dispositivo, e os níveis de corrente são de cerca de 200 μ A

Simbologia

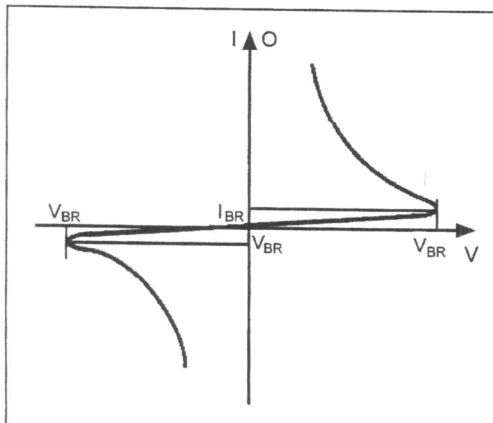


O Diac pode ser usado para disparar o Triac quando este é usado como dispositivo de controle, como na figura abaixo:



Analisando a curva característica do Diac, na figura abaixo, fica fácil entender o funcionamento do circuito da figura acima. A rede R1, Pot defasa a tensão sobre C1.

O capacitor se carrega até atingir a tensão de disparo V_d do Diac. Quando isso ocorre, o Diac entra em condução e cria um caminho de baixa impedância para o capacitor descarregar-se sobre o gate do Triac. A corrente de descarga do capacitor é suficientemente elevada para conseguir disparar Triacs de baixa potência, mesmo com valores relativamente baixos de capacitância.



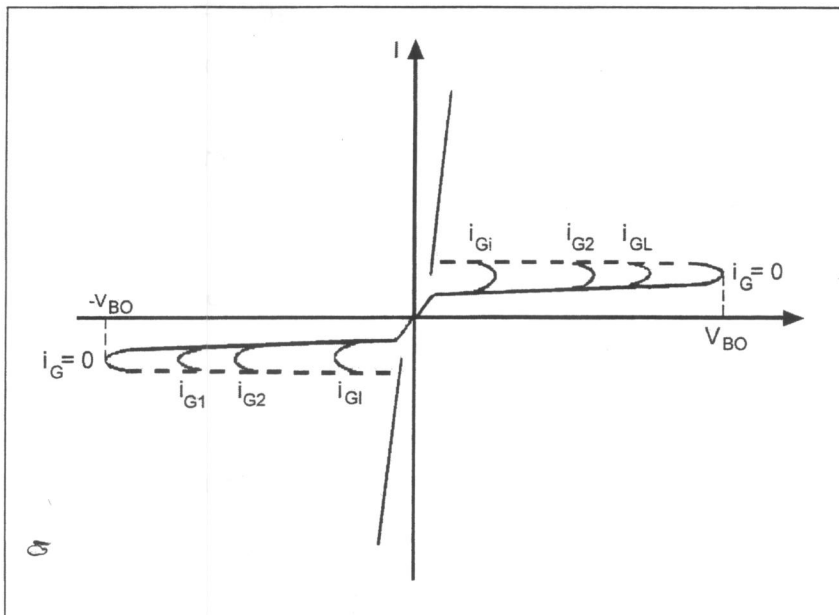
TRIAC

O triac é, fundamentalmente, um Diac com terminal de porta (gate) para controlar as condições de condução do dispositivo bilateral em qualquer direção.

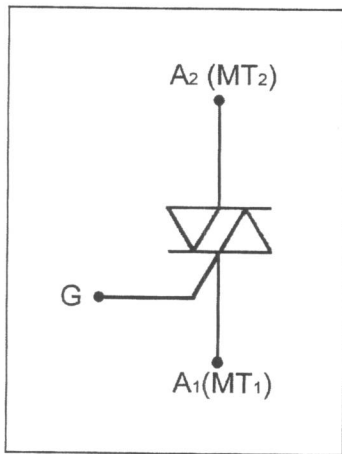
Isto significa que qualquer que seja o sentido da corrente pode-se controlar o disparo do dispositivo de uma maneira muito semelhante àquela demonstrada para o SCR.

Seu nome é formado por TRI (Triode ou Tríodo, de três terminais) e AC (Alternate Current ou Corrente Alternada), portanto TRIAC é um tríodo que permite o controle de corrente alternada.

Sua curva característica e seu símbolo são mostrados na figura abaixo:



Simbologia:



Pode-se verificar, pela curva característica, que o Triac pode conduzir nos dois sentidos de polarização. O dispositivo entra em condução de modo análogo ao SCR.

O Triac pode disparar quando a tensão de breakover (VBO) sem pulso no gate é ultrapassada, ou quando for aplicada uma corrente de gatilho.

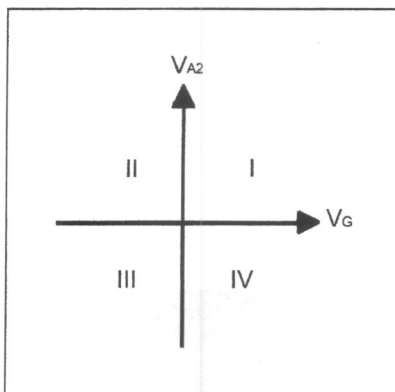
Quando o Triac está conduzindo, a queda de tensão entre o ânodo e catodo situa-se entre 1 e 2V.

Como o Triac é bidirecional, as palavras ânodo e catodo perdem seu sentido. Os terminais do Triac passam a ser chamados de ânodo 1 (A1), ânodo 2 (A2) e gatilho (G).

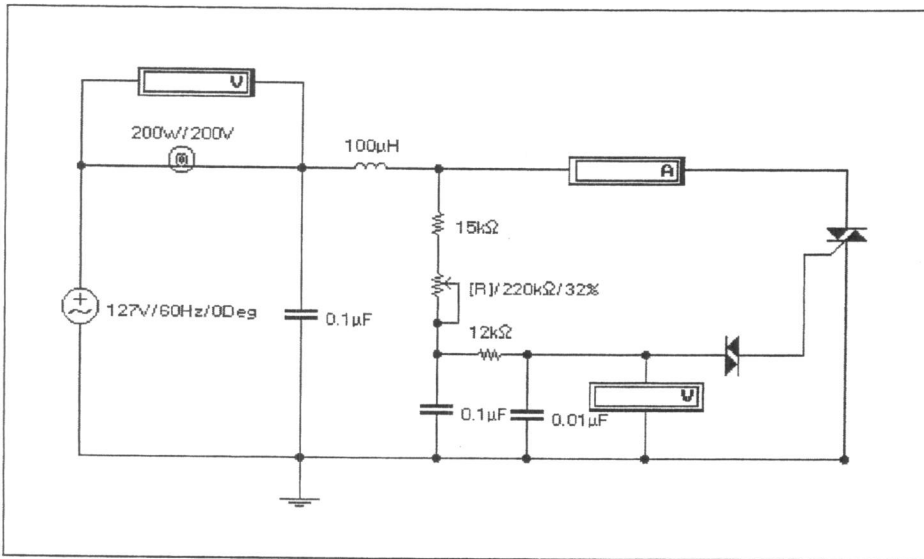
A nomenclatura terminal principal 1 (MT1) e terminal principal 2 (MT2) também é utilizada para os ânodos.

O Triac opera em quatro quadrantes. Tomando-se como referência o terminal A1, os quadrantes são definidos pelas polaridades de A2 e G, seguindo o gráfico e a tabela abaixo.

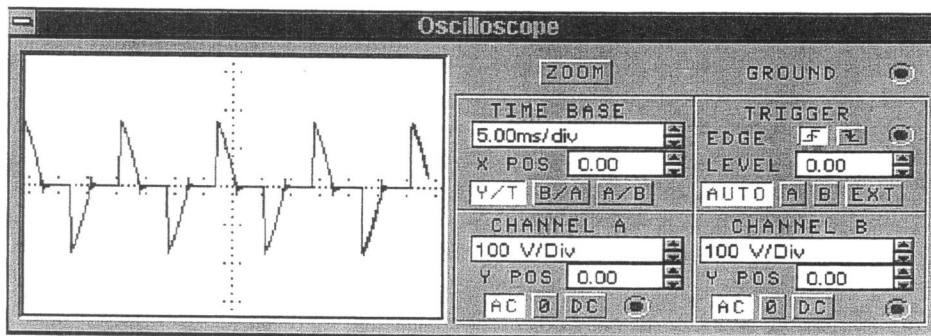
Quadrante	A ₂	G
I	>0	>0
II	>0	<0
III	<0	<0
IV	<0	>0



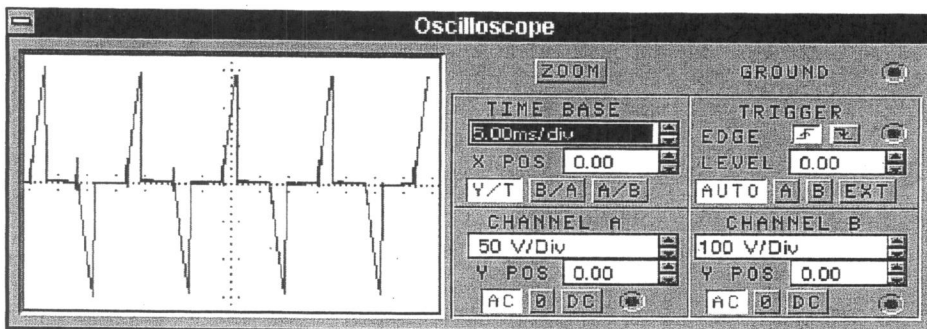
Circuito de aplicação



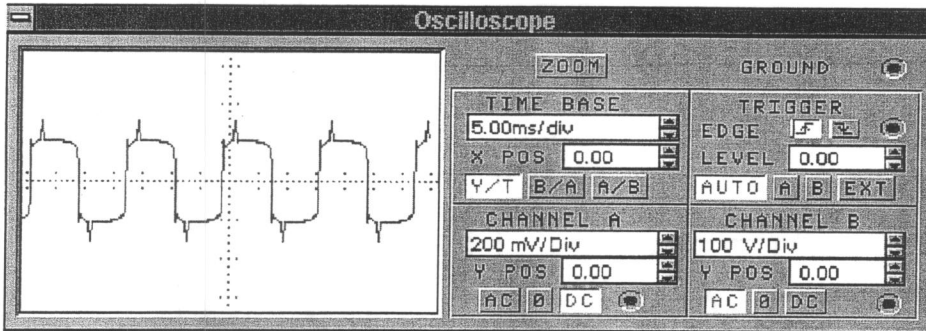
Formas de onda na tensão na carga



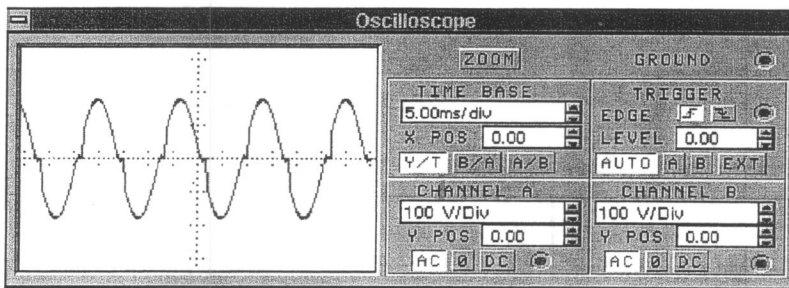
Tensão reversa no Triac



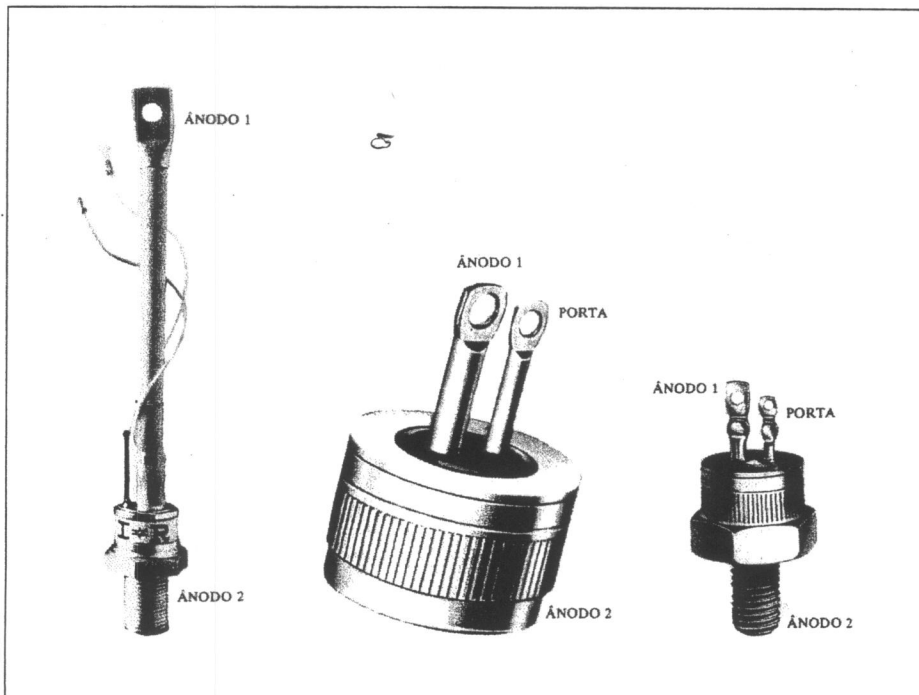
Tensão de disparo no gate do Triac



Forma de onda da tensão na carga para $\alpha = 0^\circ$



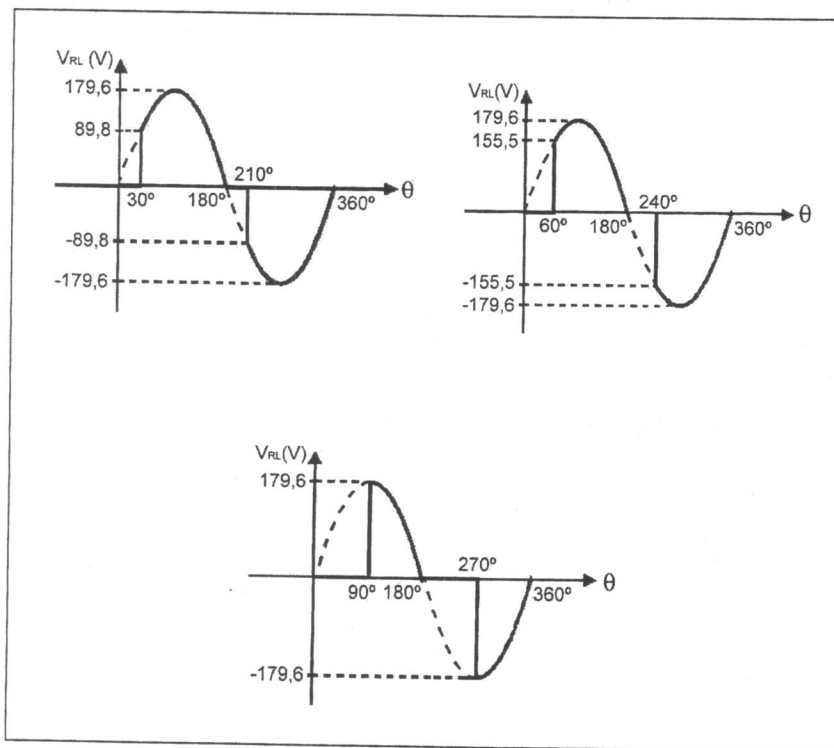
Tipos de Triacs



(Dispositivos eletrônicos e Teoria de circuitos)

Dimensionamento

A partir das formas de onda da figura abaixo, vamos calcular a tensão eficaz na carga:



(Dispositivos eletrônicos e Teoria de circuitos)

Cálculo da tensão eficaz na carga:

$$V_{\text{efc}} = V_{\text{max}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \text{sen} 2\alpha \right\}}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga:

$$I_{\text{efc}} = \frac{V_{\text{efc}}}{R}$$

Cálculo da potência eficaz na carga:

$$P_{\text{efc}} = \frac{V_{\text{efc}}^2}{R}$$

Cálculo da tensão média na carga:

$$V_{\text{med}} = 0$$

Transistor bipolar com porta isolada - IGBT

No IGBT as pequenas perdas em condução são aliadas com a facilidade de acionamento dos MOSFET. A velocidade de chaveamento nos IGBT é superior à dos transistores bipolares. Em dispositivos únicos os limites atuais de tensão e de corrente estão em torno de 2kV e 1000A, o que possibilita o seu uso em aplicações de média potência quando associados em série ou em paralelo.

Princípio de funcionamento

O IGBT tem estrutura similar à do MOSFET, mas à ele é incluído uma camada de P+ que forma o seu coletor.

Simplificadamente, o IGBT pode ser analisado como um MOSFET, no entanto em sua região N- a condutividade é 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.

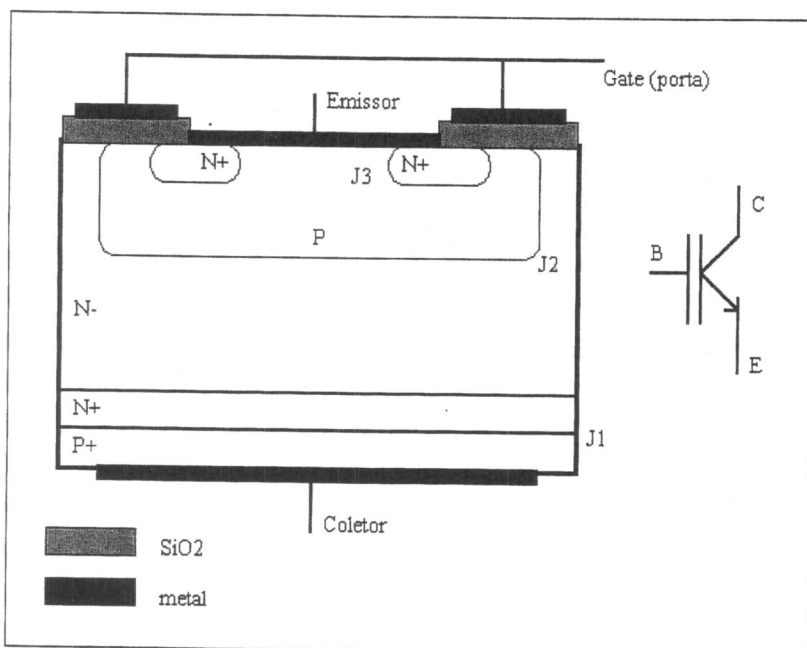
O seu controle de componente também é análogo ao do MOSFET, que é feito pela aplicação de uma polarização entre gate e emissor. Para o IGBT o acionamento é feito também por tensão.

E a máxima tensão suportável é determinada pela junção J2 (polarização direta) e por J1 (polarização reversa). Já que J1 divide 2 regiões muito dopadas, deduz-se que um IGBT não suporta tensões elevadas quando polarizado reversamente.

Os IGBTs apresentam um tiristor parasita.

A construção do dispositivo deve ser realizada de tal maneira que evite o acionamento desse tiristor, especialmente devido às capacitâncias associadas à região P, a qual relaciona-se à região do gate do tiristor parasita.

Os componentes modernos não apresentam problemas relativos a este elemento indesejado.



Estrutura básica de IGBT

No IGBT a entrada em condução é similar ao MOSFET, a queda da tensão V_{ce} é um pouco mais lenta, visto que ela depende da chegada dos portadores vindos da região P+.

No entanto no processo de desligamento, , esses 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+, em que a taxa de recombinação é muito mais elevada do que na região N-. Assim, as lacunas presentes em N+ recombinam-se com muita rapidez, fazendo com que, por difusão, as lacunas existentes na região N- refluam, apressando a extinção da carga acumulada na região N-, o que possibilita o restabelecimento da barreira de potencial e o bloqueio do componente.

Tiristor com desligamento pelo gatilho - GTO

Aqui, verificaremos o funcionamento do GTO pela análise de circuitos equivalentes, curvas características, métodos de disparo e sistemas de comutação.

A grande vantagem do GTO (Gate Turn-off) em relação ao SCR é o fato de este dispositivo permitir ser ligado ou desligado através de um pulso na porta de catodo (Gate).

Uma consequência dessa capacidade de desligamento é o aumento na amplitude da corrente de porta requerida para o disparo. Para um SCR e um GTO com relações nominais de correntes máximas semelhantes, a corrente de disparo de porta de um SCR particular é $30\mu\text{A}$, enquanto a corrente de disparo do GTO é de 20mA .

A corrente de desligamento de um GTO é sensivelmente maior do que a corrente de disparo necessária.

A corrente máxima e as relações nominais de dissipação fornecidas por fabricantes de GTOs, hoje, são limitadas a cerca de 3A e 20W .

O tempo de ativação de um GTO é semelhante ao de um SCR (tipicamente $1\mu\text{s}$). Entretanto, seu tempo de desligamento tem mais ou menos a mesma duração ($1\mu\text{s}$), muito menor que o tempo de desligamento do SCR, de 5 a $30\mu\text{s}$.

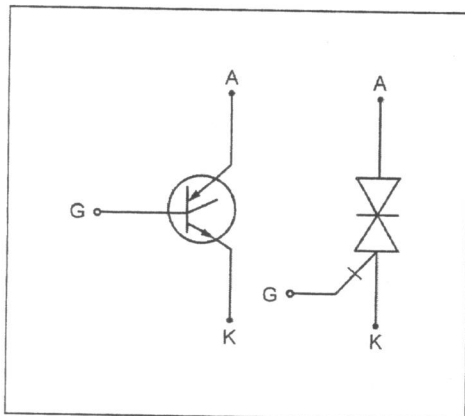
Algumas das áreas de aplicação do GTO incluem contadores, geradores de pulso, multivibradores, reguladores de tensão e controle de potência.

Teoricamente, os GTOs facilitariam a implementação de circuitos chaveados em CC, como os inversores de frequência e os choppers, pois eliminariam a necessidade dos circuitos auxiliares de comutação (comutação forçada), hoje necessários para bloquear o SCR nesses tipos de aplicação.

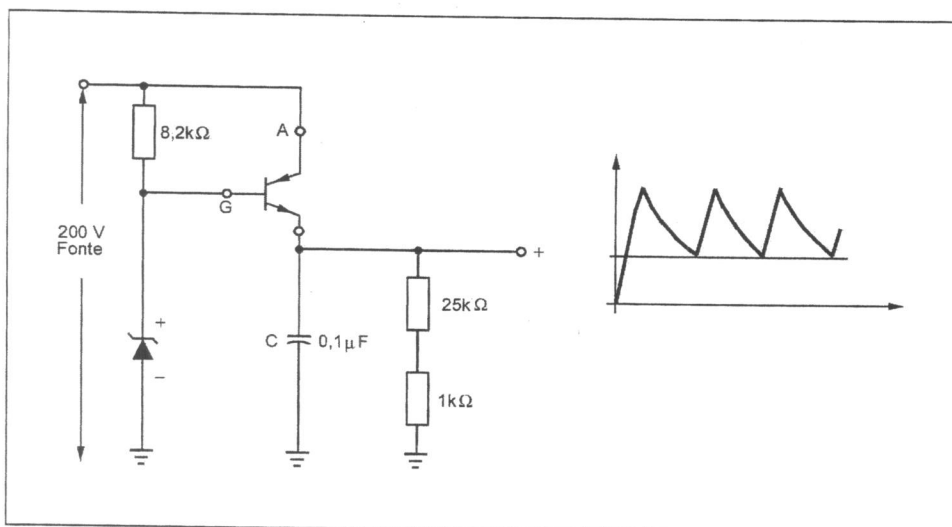
Apesar de possuírem tempo de comutação inferior ao dos SCRs, os GTOs possuem dois grandes problemas relacionados a sua aplicação:

- Limitação com relação à capacidade de condução de corrente.
- O valor da corrente de bloqueio é muitas vezes maior que a corrente de disparo, necessitando de circuitos adicionais para bloquear o dispositivo.

Símbolo



Circuito de aplicação (Oscilador dente-de-serra)



Funcionamento:

Quando a fonte é energizada, o GTO entra em condução, resultando em baixa impedância entre o anodo e o catodo do dispositivo.

O capacitor C1 começa a se carregar em direção ao nível da fonte de alimentação. Quando a tensão no capacitor C1 for maior que a tensão do diodo zener, uma reversão na tensão de porta para o anodo resultará em uma reversão na corrente da porta.

A corrente de porta negativa será grande o suficiente para desligar o GTO. Nesse instante o capacitor se descarregará no resistor R3.

O tempo de descarga será dado pela constante de tempo do circuito ($\tau = R3.C1$), e a escolha correta dos valores de R3 e C1 resultará na forma de onda mostrada na figura acima.



Transistor unijunção

Agora, verificaremos o funcionamento do UJT pela análise de circuitos equivalentes, curvas características e métodos de disparo.

Vamos aprender a construir circuitos de disparo onde são engatilhados, por exemplo, SCRs ou Triacs, com o objetivo de realizar o controle de tensão (AC ou DC) na carga.

Verificaremos as principais características das cargas resistivas e indutivas.

Vamos comentar os circuitos de isolamento galvânica e os circuitos geradores de trens de pulso.

O Transistor unijunção é um dispositivo semicondutor de três terminais, formado por apenas uma junção PN e utilizado como elemento de disparo para SCRs e TRIACs.

Princípio de Funcionamento

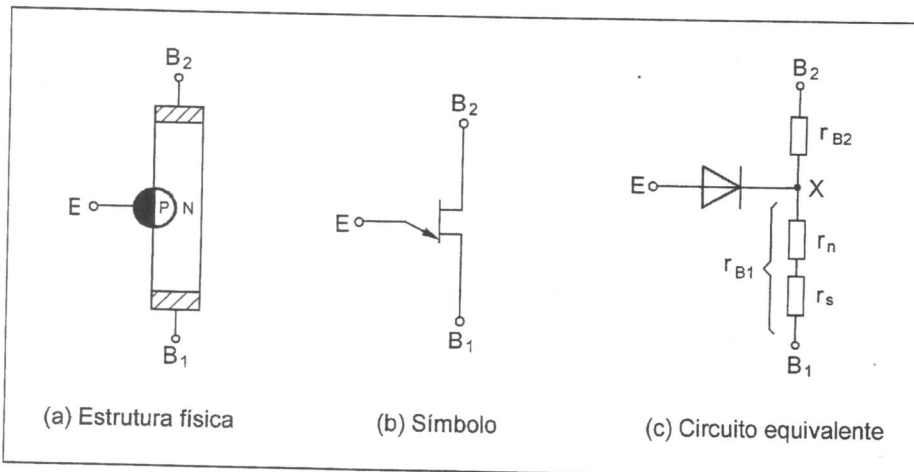
A primeira figura abaixo ilustra a estrutura física do UJT. Verificamos uma barra de material N levemente dopado, onde é soldada uma barra de alumínio, que o UJT é um elemento trivalente, ou seja, pode receber elétrons.

Na região próxima à junção temos, portanto, um material tipo P de dopagem elevada, chamado de emissor (E), e os outros terminais da barra são chamados de base1 (B1) e base 2 (B2).

Com relação aos terminais B1 e B2, a barra nada mais é do que uma simples resistência, cujo valor depende de detalhes construtivos e dimensões do dispositivo. Na segunda figura abaixo é mostrado o símbolo do dispositivo. A flecha indica o sentido de circulação da corrente pela junção PN.

O circuito equivalente é mostrado na terceira figura abaixo. O diodo representa a junção PN do emissor. A barra é dividida em duas partes, sendo a primeira, r_{B2} , equivalente à parte superior da barra. A segunda parte é formada pela resistência fixa (r_s) e por outra, a variável r_n , sendo $r_{B1} = r_s + r_n$.

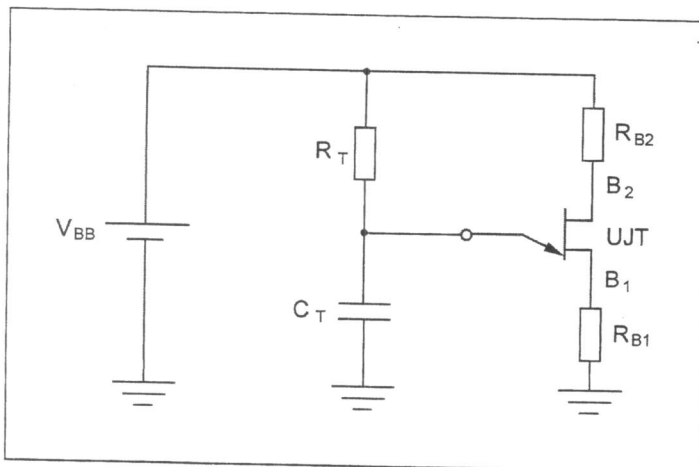
A soma das resistências $r_{BB} = r_{B1} + r_{B2}$ corresponde à resistência entre os terminais B1 e B2.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

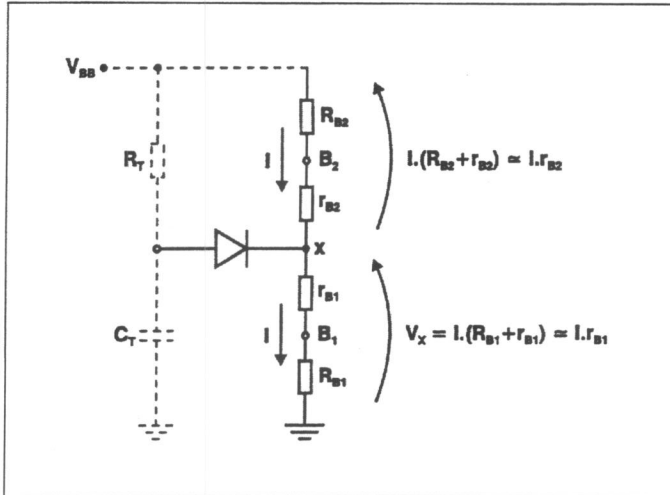
Oscilador de Relaxação com o UJT

Um circuito tradicional de disparo usando o UJT é chamado de oscilador de relaxação, e pode ser verificado na figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Sem considerar o que ocorre com o capacitor, vamos supor que ele esteja descarregado. Pelo circuito equivalente do UJT, entre a base 1 e a base 2 existe um divisor de tensão, conforme pode ser visto na figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Na prática utiliza-se $R_{B2} \ll r_{B2}$, fazendo com que a queda de tensão R_{B2} seja desprezível. O mesmo ocorre em relação a R_{B1} e r_{B1} , assim a corrente (I) e a tensão (V_x) no ponto X valem:

$$I \cong \frac{V_{BB}}{r_{B1} + r_{B2}} \cong \frac{V_{BB}}{r_{BB}}$$

$$V_x \cong r_{B1} \times I \cong r_{B1} \times \frac{V_{BB}}{r_{BB}}$$

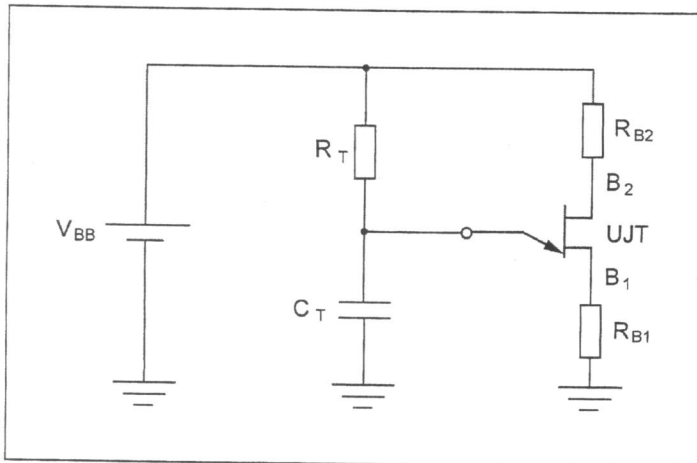
A relação entre a r_{B1} e r_{BB} é chamada de relação intrínseca do UJT, e é representada pela letra grega η (eta). Este é um parâmetro do UJT que varia entre 0,4 e 0,9. Assim, temos:

$$\eta = \frac{r_{B1}}{r_{B1} + r_{B2}} \Rightarrow \eta = \frac{r_{B1}}{r_{BB}}$$

A tensão V_x pode ser então expressa através da seguinte equação:

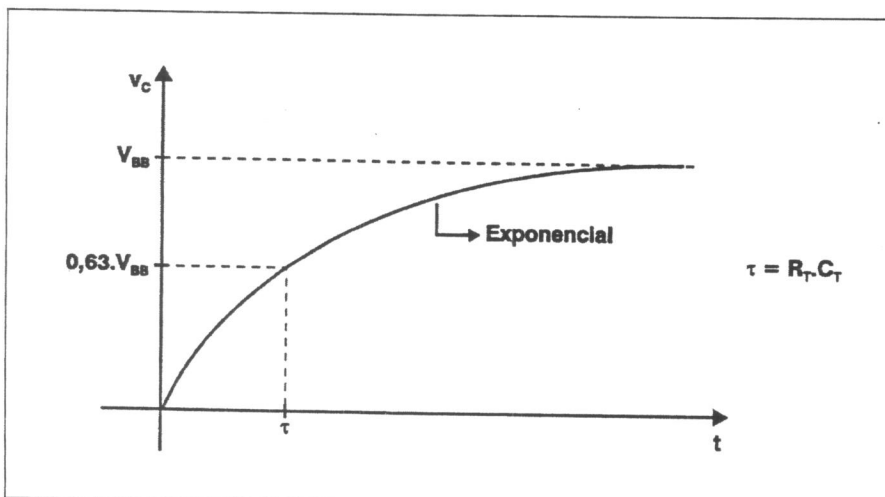
$$V_x = \eta \times V_{BB}$$

Analisando novamente o oscilador de relaxação da figura abaixo e supondo que o capacitor esteja totalmente descarregado antes da ligação da fonte V_{BB} , sabemos que a tendência é o capacitor se carregar até o valor da fonte, de forma exponencial, e que esse tempo seria igual a 5τ .



A constante de tempo $\tau = R_T \times C_T$ é conceitualmente o tempo necessário para que o capacitor se carregue com 63% da tensão da fonte.

Quando o capacitor começa a se carregar a partir de zero volt, a tensão no emissor é igual à tensão no capacitor e menor que a tensão no ponto X (V_X), portanto o diodo de emissor está cortado e o UJT bloqueado. Podemos observar a curva de carga do capacitor na figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a.)

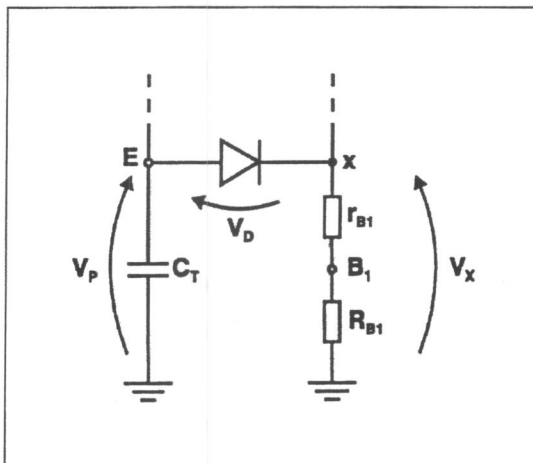
O capacitor carrega-se até o ponto em que o diodo de emissor começa a ficar polarizado diretamente. Quando isso ocorre, a tensão no capacitor está próxima de V_p , que é a tensão de disparo do UJT.

Quando o diodo de emissor conduzir, no instante do disparo, a tensão no capacitor será:

$$V_{CT} = V_p = V_x + V_D$$

A figura abaixo mostra o instante do disparo do UJT.

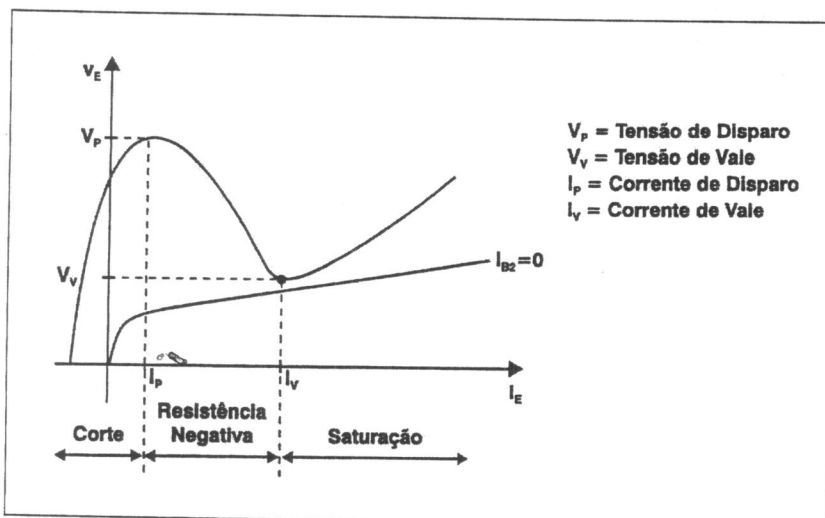
Quando o UJT entra em condução, temos a injeção de portadores de carga do emissor para a região da barra de material N.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

A resistência da região entre emissor e base1 diminui (esta é a parte variável da resistência r_{B1} , que foi chamada de r_n).

Curva característica do UJT



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Considerando $V_D = 0$, a corrente de início de descarga de CT é dada por:

$$I_E \cong \frac{V_p}{r_{B1} + R_{B1}} \Rightarrow I_E \cong \frac{V_p}{r_n + r_s + R_{B1}}$$

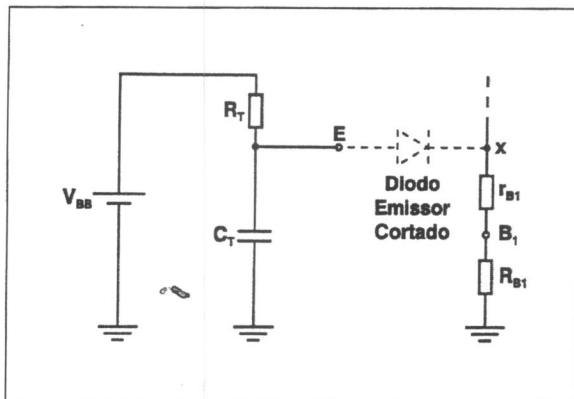
Observamos que se r_n diminui, a corrente I_E irá aumentar. Esse é o efeito que caracteriza a região de **resistência negativa** na curva característica do UJT.

Quando o UJT é disparado, o fato de r_n diminuir faz com que a corrente aumente, portanto mais portadores são injetados e a resistência diminui ainda mais.

A tensão no ponto E diminuirá (o capacitor está se descarregando), mas a corrente aumentará. Por este motivo, a região é chamada de região de **resistência negativa**.

A resistência r_n diminui até o ponto em que ocorre a saturação dos portadores de carga. Nesse instante temos tantos portadores de carga na região do emissor que um novo aumento de portadores não diminui mais a resistência r_n ; o UJT corta [o que?] e o capacitor pára de se descarregar.

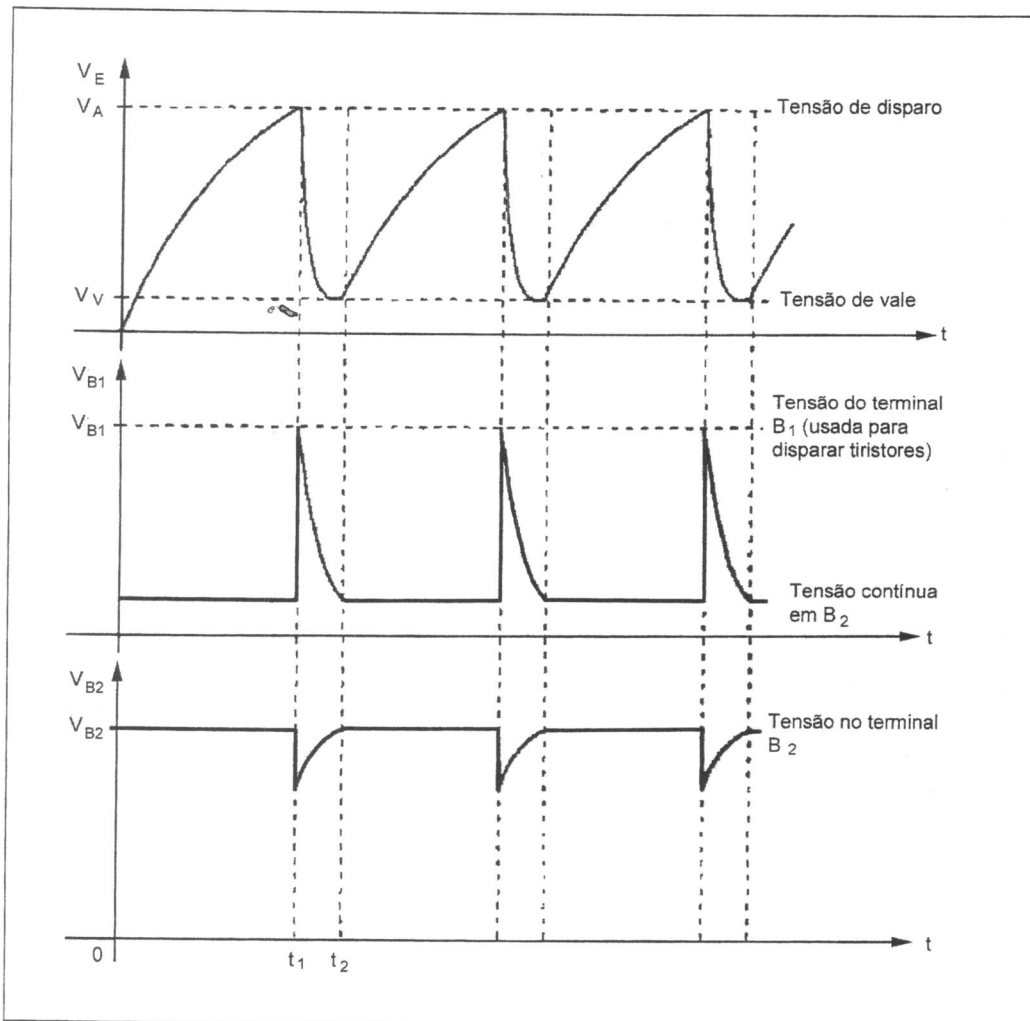
Após o corte do UJT para o capacitor, o circuito equivalente do oscilador de relaxação fica conforme a figura abaixo



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Analisando a figura acima, notamos que após o corte do UJT o capacitor volta a se carregar via R_T e V_{BB} , de forma exponencial, até atingir novamente a tensão de disparo V_p e provocar um novo disparo no UJT, então o processo descrito anteriormente se repete.

O circuito é, portanto, oscilatório, e as formas de onda de V_E , V_{B1} e V_{B2} são as mostradas na figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Projeto de um Oscilador de Relaxação Sincronizado com Rede de Alimentação

Antes de iniciarmos um projeto, devemos fazer algumas considerações:

R_{B1} sempre terá um valor muito pequeno, variando de **10 a 100Ω**, e seu valor é normalmente escolhido para não provocar o disparo do UJT quando o capacitor estiver sendo carregado.

O disparo ocorreria se a tensão de polarização fosse maior ou igual a V_{GD} (este é um parâmetro do SCR que significa a máxima tensão CC que não provoca o chaveamento do SCR do estado de bloqueio para o estado de condução).

$$V_{RB1} = \frac{R_{B1} \times V_{BB}}{R_{B1} + R_{B2} + r_{BB \min}} < V_{GD}$$

Esta expressão pode ser simplificada para o pior caso:

$$V_{RB1} = \frac{R_{B1} \times V_{BB}}{r_{BB \min}}$$

Cálculo da frequência de operação

$$F = \frac{1}{RT \times CT \times \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}$$

O resistor R_{B2} melhora a estabilidade térmica do UJT, e alguns fabricantes fornecem um valor prático para R_{B2} como 15% de r_{BB}. Outros definem R_{B2} com expressões que dependem do tipo de UJT, como por exemplo:

Para UJT tipo 2N2646 ou 2N2647:

$$R_{B2} = \frac{10000}{\eta \times V_{BB}}$$

Para UJT tipo 2N1671 ou 2N2160:

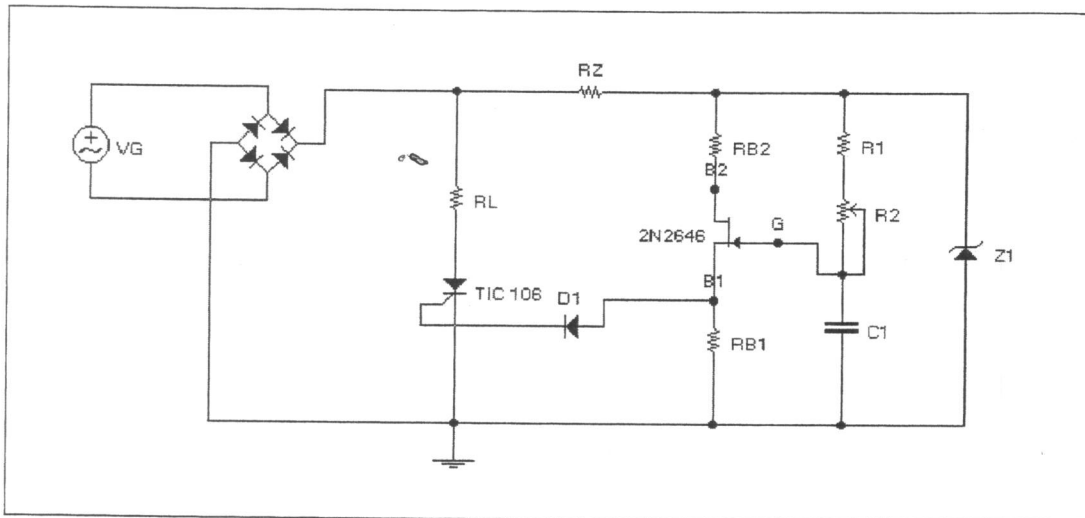
$$R_{B2} = \frac{0,40 \times r_{BB}}{\eta \times V_{BB}} + \frac{(1-\eta) \times R_{B1}}{\eta}$$

Dados do UJT e do SCR

UJT 2N2646		
η	0,56 (mínimo)	0,75 (máximo)
r _{BB}	4,7KΩ	9,1KΩ
I _p	1μA (típico)	5μA (máximo)
I _v	4mA (mínimo)	6mA (típico)
SCR TIC 106		
V _{GD} = 0,2V		V _{GT} = 1 V

A fonte de alimentação V_{BB} deve ter seu valor entre **10 e 30V**; o menor valor é determinado pela amplitude da tensão do pulso desejado na base 1 do UJT, e o maior valor é definido pela máxima dissipação de potência admitida pelo UJT.

Circuito:



Como exercício, projete o circuito acima para controlar a tensão na carga R_L de (0 a $V_{m\acute{a}x}$), sabendo que a tensão V_G é igual a $24V_{ef}$, o diodo zener é de 12V / 1W e o capacitor C_1 é de $0,1\mu F$.

Equações:

1. Cálculo da relação intrínseca do UJT

$$\eta = \frac{\eta_{min} + \eta_{max}}{2}$$

2. Cálculo do resistor R_{B1}

Adotar um valor entre 10 e 100Ω .

3. Cálculo da tensão contínua em R_{B1} para o pior caso

$$V_{RB1} = \frac{V_{BB} \times R_{B1}}{r_{BB\ min}} < V_{GD}$$

Caso $V_{RB1} > V_{GD}$, devemos adotar um valor menor para R_{B1} .

4. Cálculo do ângulo mínimo e máximo de disparo

$$V_z = V_{\max} \sin \alpha_{\min}$$

$$\alpha_{\min} = \text{Arc sen} \frac{V_z}{V_{\max}}$$

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - \alpha_{\min}$$

5. Cálculo do resistor R_z e da potência do resistor R_z

$$R_z = \frac{V_{\max} - V_z}{0,9 \times \frac{P_{z \max}}{V_z}}$$

$$P_{Rz} = V_{Rz} \times I_{Rz}$$

6. Cálculo do resistor R_{B2}

$$R_{B2} = \frac{10000}{\eta \times V_{BB}}$$

7. Cálculo da tensão de disparo

$$V_p = V_x + V_D$$

$$V_p = \eta \times V_{BB} + V_D$$

8. Cálculo dos resistores R_1 e R_2

$$\tau_{\alpha \min} \leq R \times C \leq \tau_{\alpha \max}$$

$$\frac{\tau_{\alpha \min}}{C} \leq R \leq \frac{\tau_{\alpha \max}}{C}$$

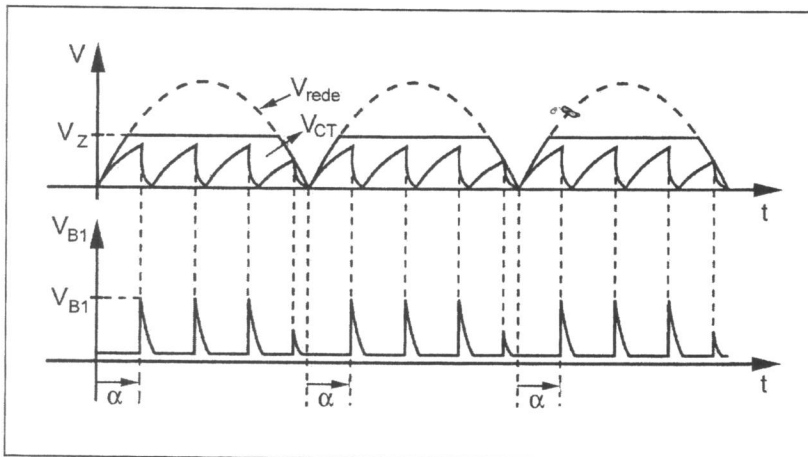
9. Cálculo da frequência máxima de oscilação

$$f_{\max} = \frac{1}{R_1 \times C_1 \times \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}$$

10. Cálculo da frequência mínima de oscilação

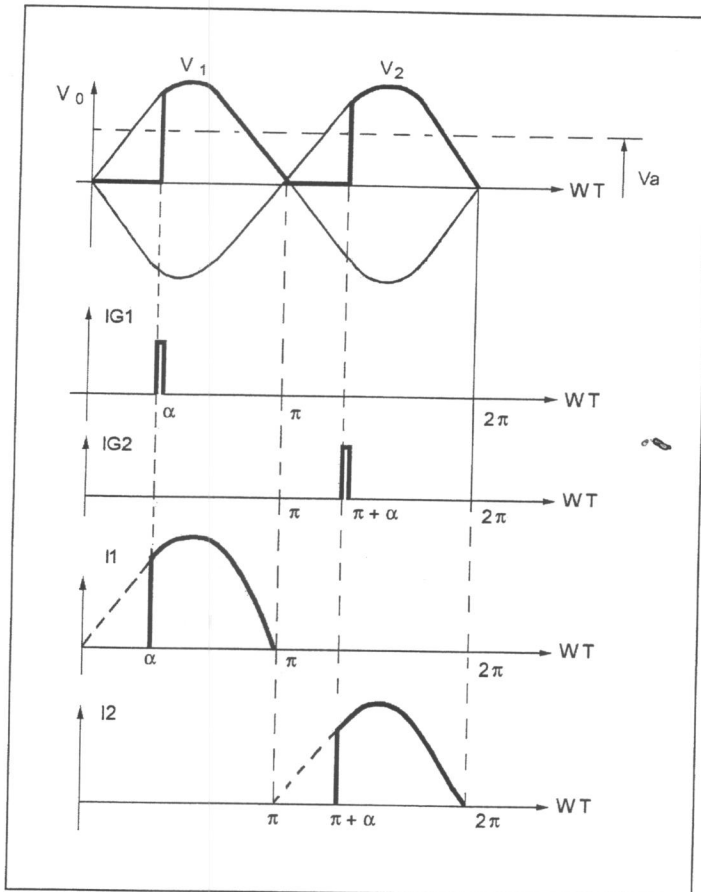
$$f_{\min} = \frac{1}{(R1 + R2) \times C1 \times \ln\left(\frac{1}{1 - \eta}\right)}$$

Formas de onda no diodo zener, capacitor, rede de alimentação e tensão de disparo



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Formas de Onda – Carga Resistiva



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Cálculo da Tensão Média na Carga

$$V_{med} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Cálculo da Tensão Eficaz na Carga

$$V_{efc} = V_{max} \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \text{sen} 2\alpha \right\}}$$

Cálculo da Corrente Média na Carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da Corrente Eficaz na Carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da Potência Média na Carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da potência dissipada na Carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da Tensão Reversa no SCR

$$V_{DR\ max} \geq V_{max}$$

O fabricante determina a seguinte equação como fator de segurança:

$$V_{DR\ máx} \leq \frac{V_{DRm}}{K_s}$$

O valor de K_s pode variar conforme

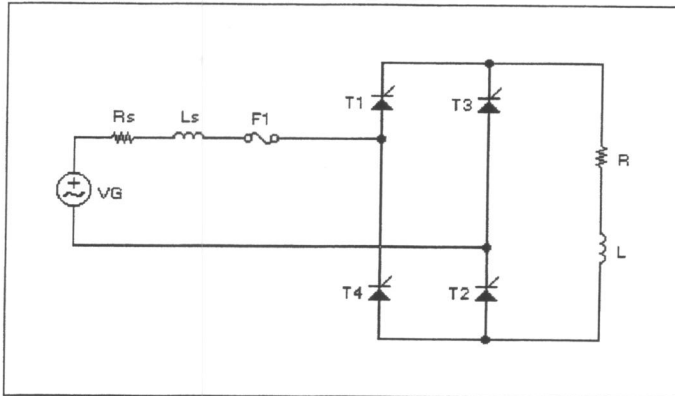
$K_s = 2,2$ a $2,5$ para conversores comutados pela rede.

$K_s = 1,5$ a $2,5$ para conversores autocomutados.

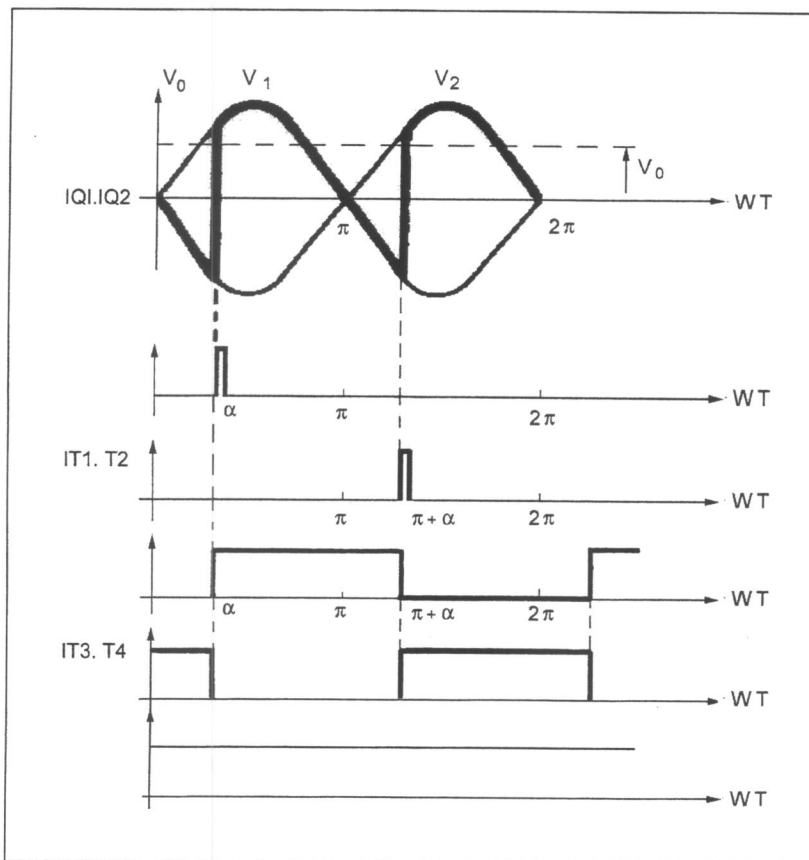
$$V_{DRM} \geq V_{DRm\acute{a}x} \times K_s$$

Retificador em ponte totalmente controlado – carga indutiva

Circuito:



Formas de Onda:



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Vamos considerar em nossa análise um indutor muito grande, de modo que a forma de onda da corrente na carga é constante (bastante lisa).

Cálculo da Tensão Média na Carga

$$V_{med} = \frac{2V_{max}}{\pi} [\cos \alpha]$$

Cálculo da Tensão Eficaz na Carga

$$V_{efc} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

Cálculo da Corrente Média na Carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{Z}$$

Cálculo da Corrente Eficaz na Carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{Z}$$

Cálculo da Potência Média na Carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da Potência Dissipada na Carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{Z}$$

Cálculo da Tensão Reversa no SCR

$$V_{DRmáx} \geq V_{max}$$

O fabricante determina a seguinte equação como fator de segurança:

$$V_{DRmáx} \leq \frac{V_{DRm}}{K_s}$$

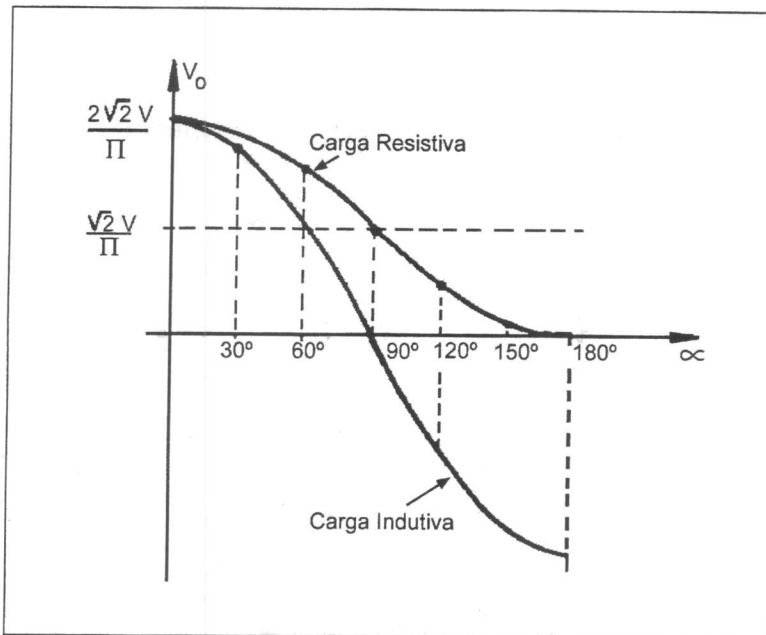
O valor de K_s pode variar conforme

$K_s = 2,2$ a $2,5$ para conversores comutados pela rede.

$K_s = 1,5$ a $2,5$ para conversores autocomutados.

$$V_{DRM} \geq V_{DRm\acute{a}x} \times K_s$$

Diferenças entre acionamento com carga resistiva e indutiva



(Informativo técnico Siemens)

Isolação dos Pulsos de Disparo

Os SCRs e os TRIACs são dispositivos utilizados para o controle de potência na carga, que trabalham com tensões e correntes elevadas quando comparados aos circuitos de disparo.

Os circuitos de disparo operam em sua grande maioria com tensões baixas e correntes baixas (algumas dezenas de volts e alguns miliamperes).

Para que os dispositivos de disparo não sejam afetados pelas tensões e pelas correntes dos circuitos de potência é necessário isolá-los **galvanicamente**.

A isolação galvânica garante que não exista circulação de corrente entre o circuito de potência e o circuito de disparo.

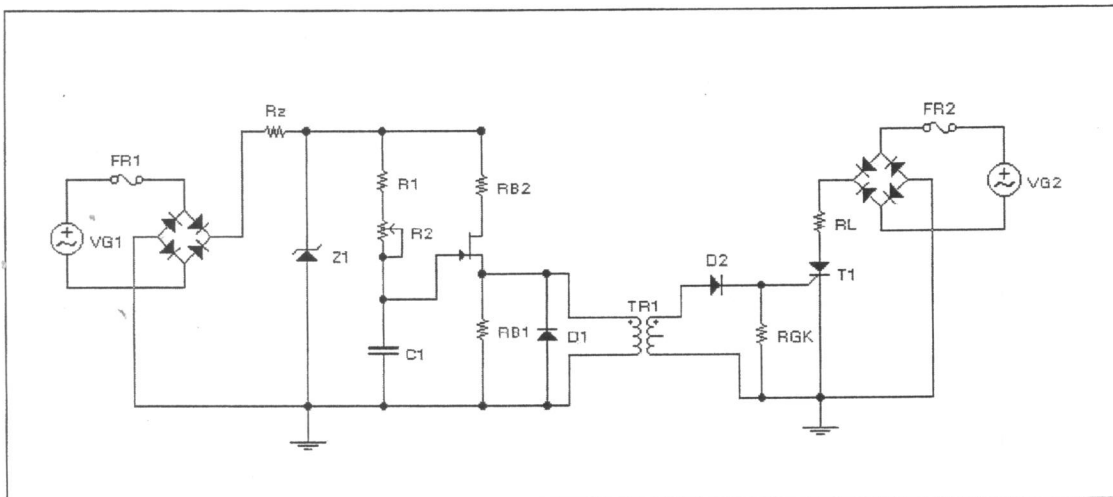
Essa isolação deve ser usada para evitar que os circuitos de disparo compostos por dispositivos eletrônicos sensíveis sejam queimados quando ocorrer uma fuga de corrente ou sobretensões no circuito de potência.

Para garantir uma isolação galvânica eficiente pode-se utilizar os **acopladores magnéticos** ou os **acopladores ópticos**.

Acoplamento Magnético – Transformadores de Pulso

Os transformadores de pulso são especialmente projetados para transferir os pulsos de disparo para os TRIACs e os SCRs.

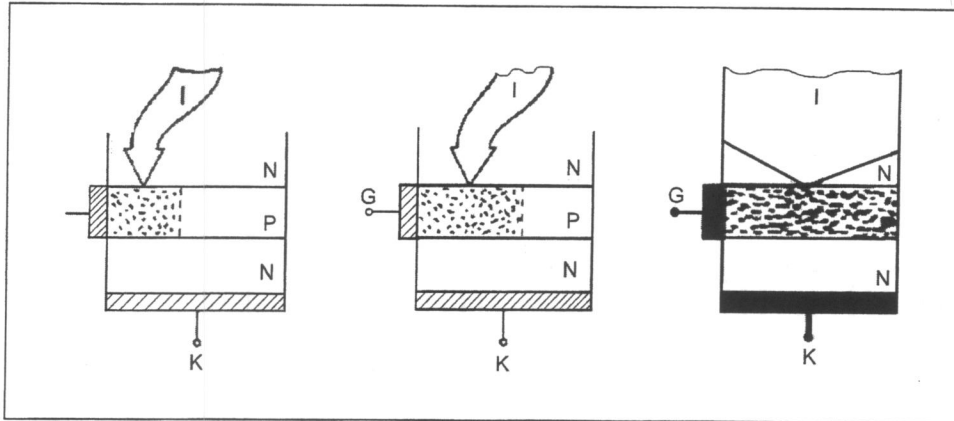
A Figura 14.14 mostra um exemplo de utilização do transformador de pulso em um circuito de disparo utilizando UJT.



O projeto dos transformadores de pulso deve atender a algumas condições, entre as quais a de que o acoplamento entre primário e secundário deve ser o mais perfeito possível.

Durante o disparo do SCR ou TRIAC a corrente injetada no gatilho propaga-se transversalmente no material semicondutor. Durante a propagação da corrente as áreas atingidas vão se tornando condutoras, permitindo a circulação da corrente de ânodo.

Se o acoplamento não for adequado durante o disparo, a área condutora pode não se espalhar rapidamente, fazendo com que a corrente de ânodo se concentre em uma pequena área, criando os chamados "pontos quentes" que podem queimar os TRIACs ou SCRs. Podemos verificar esse efeito na figura acima.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Outra característica desejada para os transformadores de pulso é uma Isolação elevada entre o primário e o secundário (em torno de KV), para evitar que as tensões desenvolvidas nos conversores danifiquem o transformador e os circuitos de disparo.

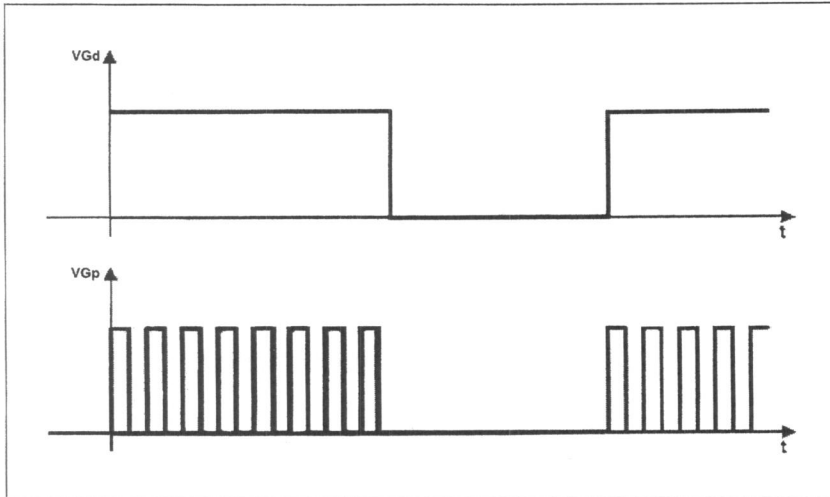
Em conversores comutados pela rede têm-se sempre mais que um Tiristor sendo utilizado. Eles alteram entre si a condução, ou seja, ora um conduz, ora outro.

- Quando a carga é resistiva a transição é imediata, portanto não se têm problemas.
- Quando a carga é indutiva, entretanto, têm-se um intervalo entre o disparo e o momento em que o tiristor entra em condução.

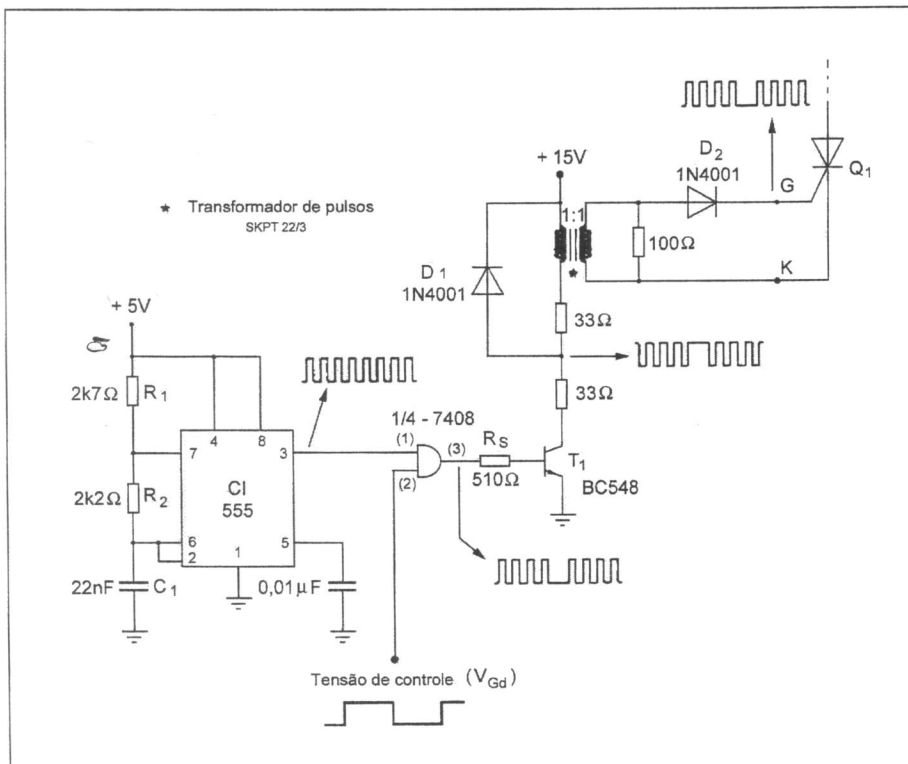
Desta forma, deve-se manter o pulso aplicado por um intervalo maior, para garantir que o tiristor entre em condução.

Têm-se portanto pulsos largos, que tendem a saturar o núcleo do transformador de pulso.

Para evitar a saturação, deve-se utilizar o processo chamado de “trens de pulso”, em que se transforma o pulso largo em pulsos de alta frequência. Podemos verificar esse processo na figura acima.



Na figura acima verificamos um circuito de trens de pulso:

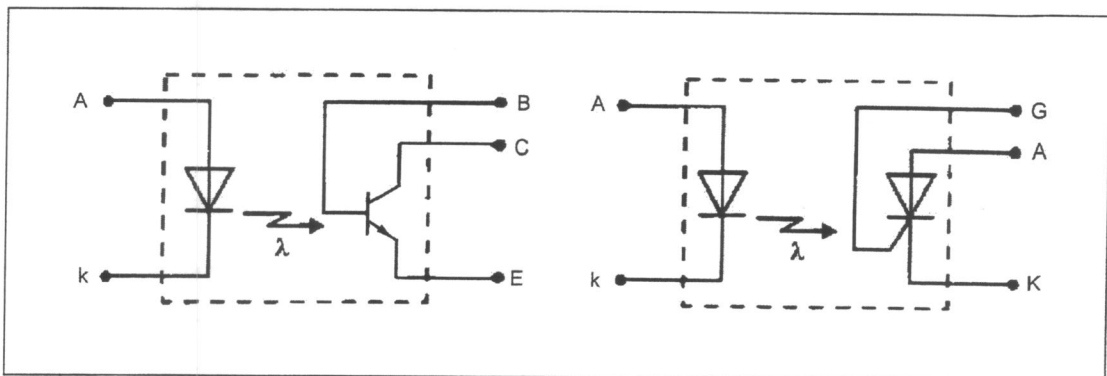


(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Acopladores Ópticos

Uma outra maneira de isolar os pulsos de disparo consiste na utilização de acopladores ópticos.

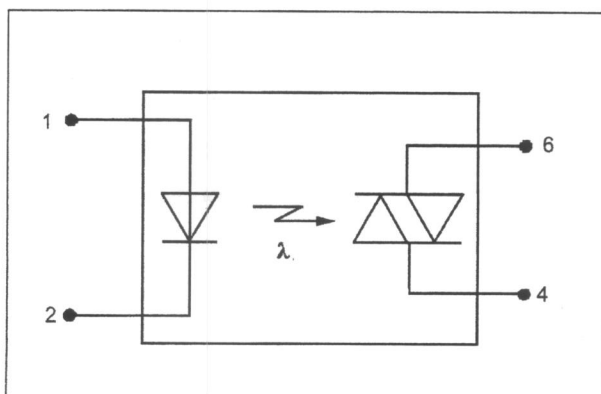
Esses componentes eletrônicos são constituídos por um diodo emissor de luz (infravermelho) e um fotodetector. O fotodetector pode ser um Transistor, SCR ou TRIAC, arranjados em um mesmo invólucro, conforme a Figura 14.18:



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

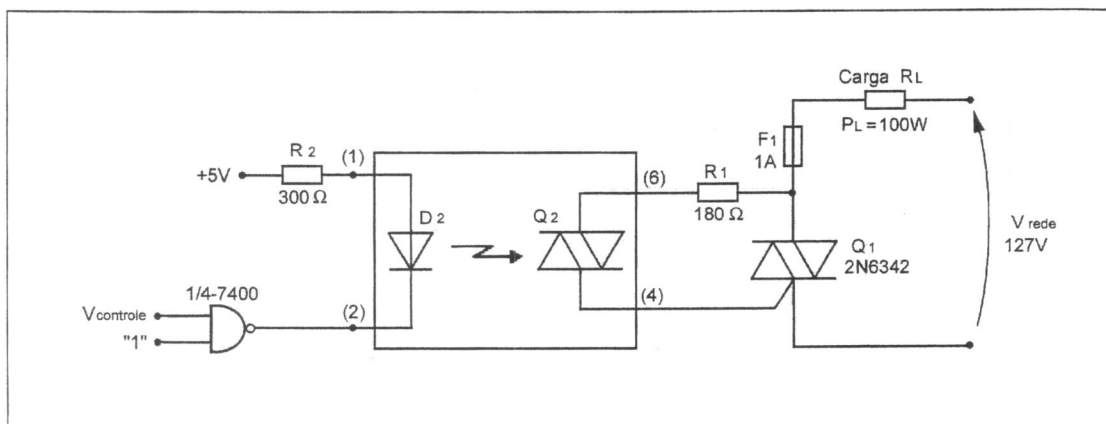
Um grande inconveniente de usarmos acopladores ópticos com transistores é a necessidade de uma fonte adicional para polarizar o circuito de coletor do transistor e fornecer a corrente para o gatilho do Tiristor.

Uma solução para esse problema é utilizarmos acopladores ópticos com tiristores, como o MOC 3011 da Motorola, que utiliza um Triac como fotodetector, conforme a figura acima.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Com o MOC 3011 é possível acionar outro Triac diretamente a partir de um sinal digital, como podemos verificar na figura acima.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Parâmetros do TRIAC Q1		
VGT	2 V	
IGT	100mA	
Parâmetros do MOC 3011		
LED		
IA	10 mA (min)	50mA (máx)
VF	1,3 V @ 10mA	
TRIAC		
VRRM ; VDRM	250V	
VT	3V (máx) @ 100mA	
I6	1,2 A (máx)	

É importante lembrar que:

VGT ⇒ é a tensão CC necessária para produzir a corrente de gatilho.

IGT ⇒ é o mínimo valor da corrente contínua aplicada ao gatilho, necessária para chavear um tiristor do estado de bloqueio para o estado de condução.

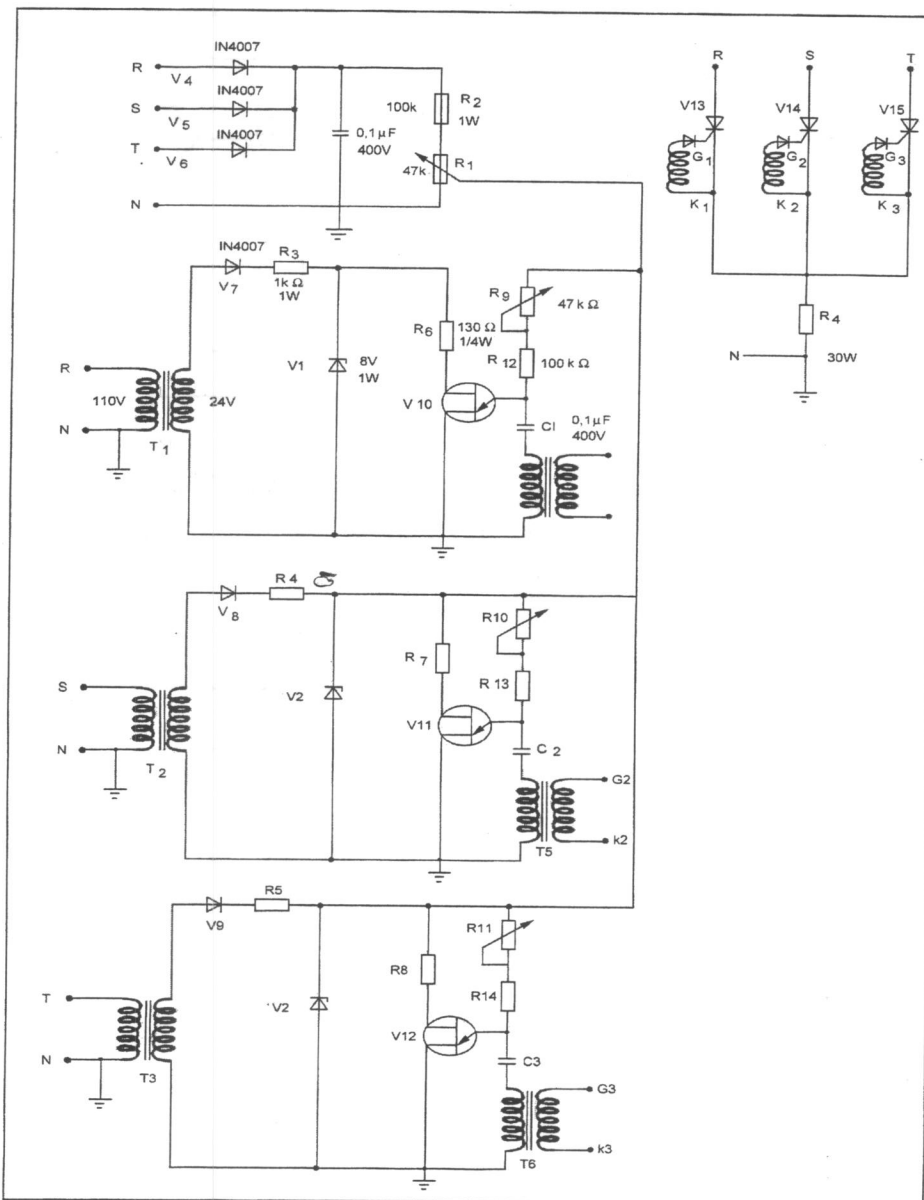
VRRM ⇒ Tensão RMS repetitiva máxima.

VDRM ⇒ Tensão Direta repetitiva máxima.

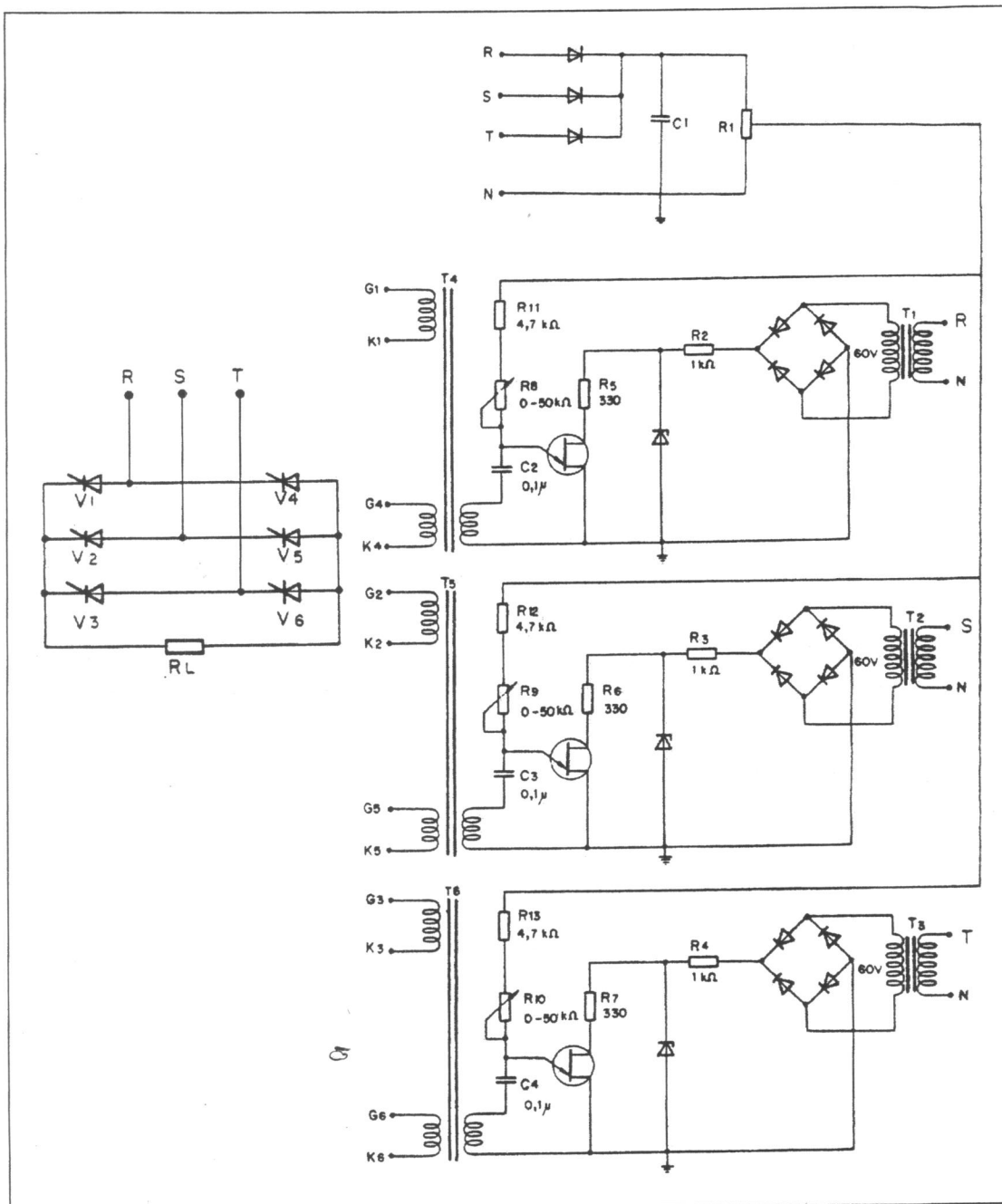
VT ⇒ Máxima queda de tensão entre anodo 1 e anodo 2.

Sistema de disparo usando o UJT

Aqui, verificaremos o processo analógico para geração dos ângulos de disparo utilizando o transistor unijunção.



Sistema de Disparo usando o UJT



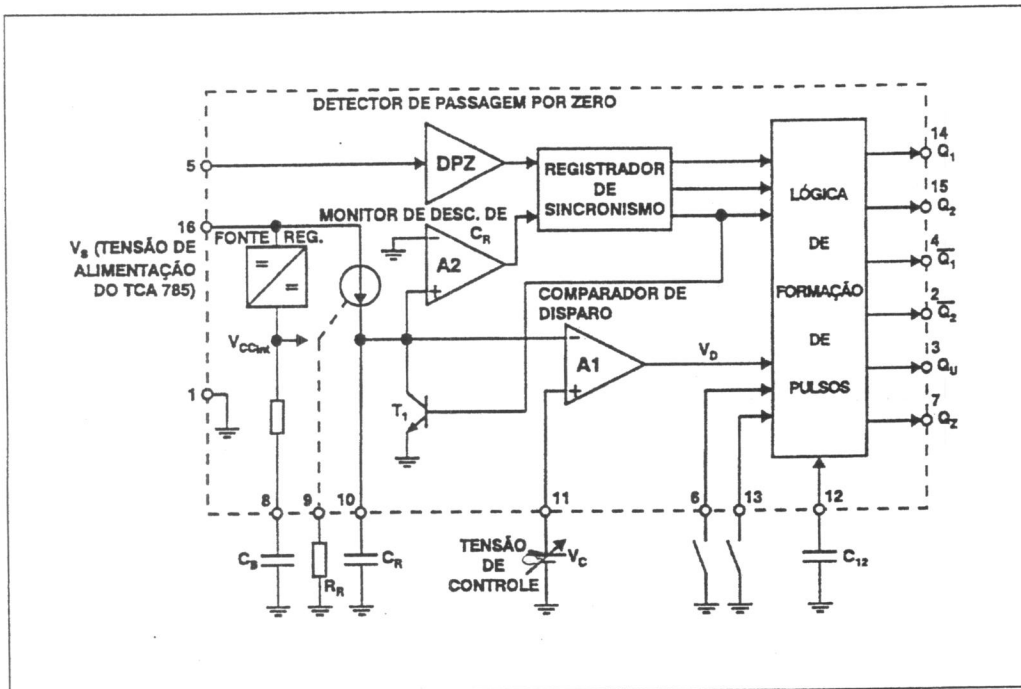
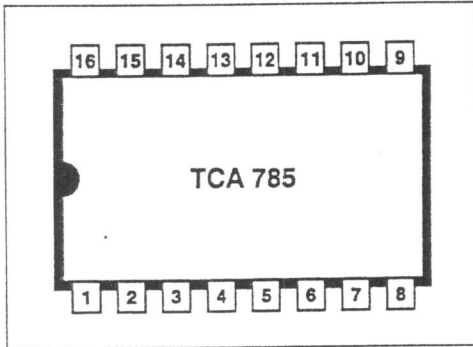
Circuito de disparo TCA 785

Nesta unidade, abordaremos o funcionamento do CI TCA 785 e suas principais aplicações em retificadores monofásicos ou trifásicos, semi ou totalmente controlados.

Vamos analisar o TCA 785 por meio de diagramas elétricos, procurando mostrar suas principais características referentes a sincronismo, lógica de formação de pulsos, tensão de controle e tensão de rampa. Para tanto, faremos alguns cálculos com o objetivo de aprender a polarizar o TCA 785 de acordo com as características fornecidas pelo fabricante do CI.

O objetivo desses circuitos de disparo é facilitar a elaboração de um projeto e torná-lo compacto e confiável.

Destacamos o CI TCA 785 da Siemens, utilizado em muitos aparelhos industriais, e que pode ser visualizado na figura a seguir.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

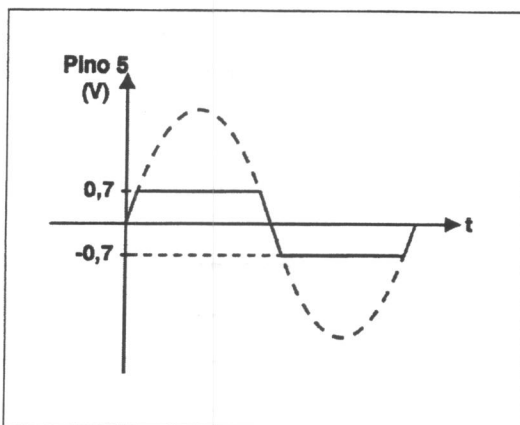
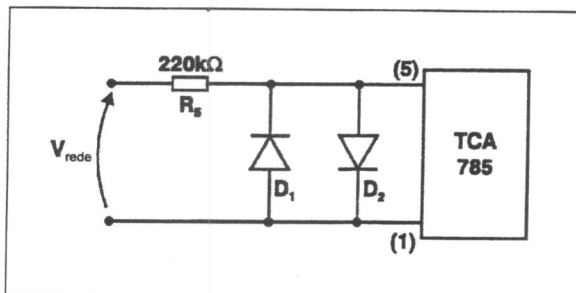
Estudo do Circuito Integrado TCA 785

Todo circuito de disparo em retificadores controlados comutados pela rede deve ser sincronizado com a rede de alimentação. Caso contrário, ocorrerá o disparo aleatório dos tiristores, pois cada pulso será aplicado em um instante diferente, que não está relacionado com a rede de alimentação.

Um ponto utilizado como referência é a passagem da rede por zero, que acontece aproximadamente a cada 8,33ms em uma rede de 60Hz.

Internamente ao TCA existe um detector de passagem por zero (DPZ), que gera um pulso de sincronismo toda vez que a rede passa por zero.

A entrada para a tensão de sincronismo se faz no pino 5, conforme a figura abaixo.

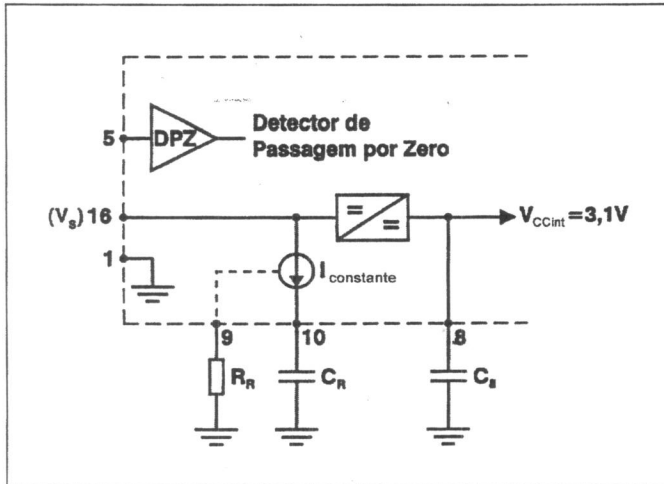


(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

A fonte de alimentação para os circuitos internos é de 3,1V e regulada pelo próprio TCA 785 a partir da tensão de alimentação do próprio TCA (V_s).

Isto permite que o CI possa ser alimentado com diversos níveis de tensão, que variam de 8 a 18V.

A tensão de 3,1V está disponível no pino 8 do CI, sendo filtrada por C8 para evitar ondulações, conforme a figura a seguir.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

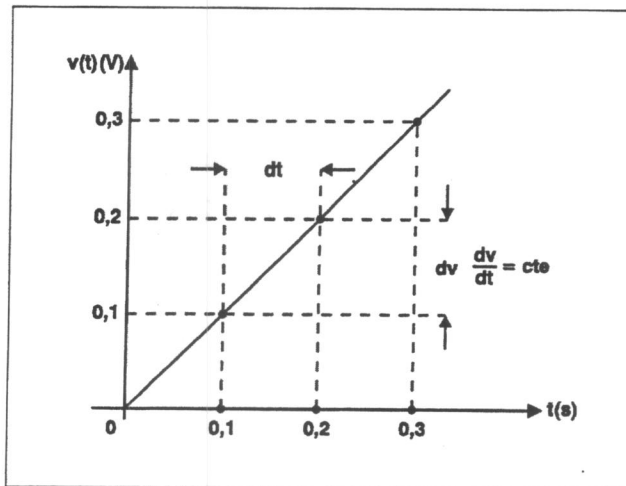
A base do sincronismo é um gerador de rampa, cuja característica é ajustada por Rr e Cr nos pinos 9 e 10.

Parâmetros do TCA 785

Tensões de alimentação	$8 < V_S < 18V$
Carga máxima do TCA	$I_{smax} = 100ma^*$
Consumo máximo interno	$I_F = 10Ma$
Tensão máxima nos pinos 14 e 15	$V_S - 3V$
Corrente máxima dos pulsos de saída	60mA

* → (60mA (saídas) + 10mA (consumo interno) + 30 mA folga

O gerador de rampa fornece uma tensão que varia linearmente com o tempo (gera uma reta). A tensão dobra se o intervalo de tempo dobrar, ou seja, a tensão cresce proporcionalmente com o aumento do tempo, conforme a figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Pelo gráfico da figura acima verificamos que quando a variação de tempo for de 0,1s (como por exemplo, de 0,2s para 0,3s) a variação de tensão será sempre a mesma.

Com I_c constante, a tensão aumentará segundo uma reta em relação ao tempo, conforme a figura acima.

No TCA o capacitor C_r é carregado linearmente através de uma fonte de corrente constante, e seu valor é controlado por R_r , segundo a seguinte equação:

$$I_{Cr} = \frac{V_{ccint} \times K}{R_r}$$

onde $K = 1,1$ e $V_{ccint} = 3,1V$

Os valores mínimo e máximo de I_{cr} são $10\mu A$ e $1000\mu A$, e o mesmo ocorre com R_r , que deve estar entre $3K\Omega$ e $300 K\Omega$.

A tensão V_{Cr} , que é a tensão de rampa do capacitor, cresce linearmente com o tempo conforme a seguinte equação:

$$V_{Cr} = \frac{I_{Cr}}{C_r} \times t$$

Para o correto funcionamento do circuito o fabricante determina os valores mínimo e máximo do C_r , respectivamente 500pF e 1μF. Um valor elevado de C_r tornaria a descarga do capacitor muito lenta, comprometendo o novo ciclo de carga. Como consequência, teríamos perda de sincronismo.

Exemplo:

Sendo $R_r = 120K\Omega$ e $C_r = 47nF$, temos:

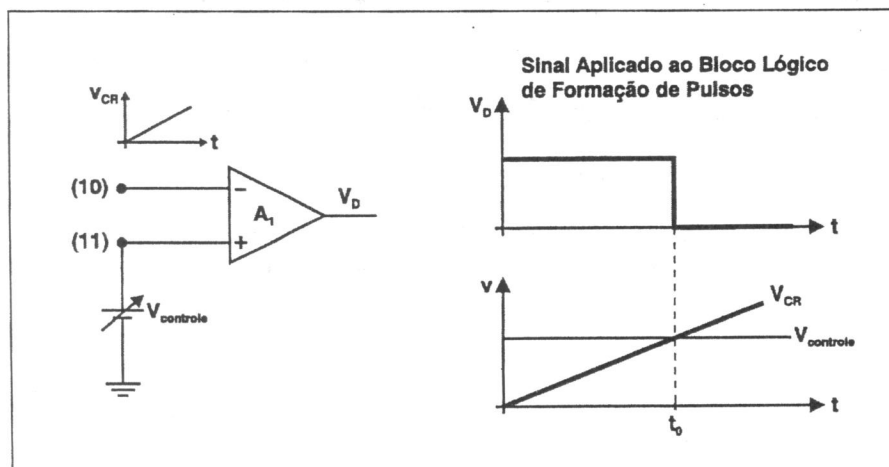
$$I_{Cr} = \frac{V_{ccint} \times K}{R_r} \Rightarrow I_{Cr} = \frac{3,1 \times 1,1}{120 \times 10^3} \Rightarrow I_{Cr} = 28,42\mu A$$

$$V_{Cr} = \frac{I_{Cr}}{C_r} \times t \Rightarrow V_{Cr} = \frac{28,42\mu A}{47 \times 10^{-9}} \times t \Rightarrow V_{Cr} = 604,7t$$

A carga máxima do capacitor ocorre para $t = 8,33ms$, portanto V_{Cr} será:

$$V_{Cr} = 604,7 \times 8,33 \times 10^{-3} \Rightarrow V_{Cr} = 5,04V$$

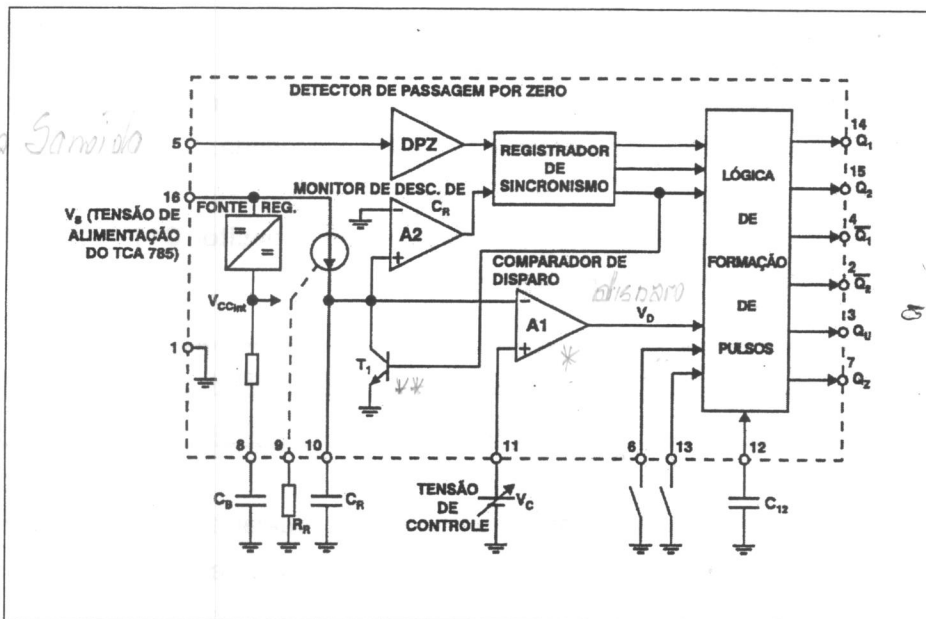
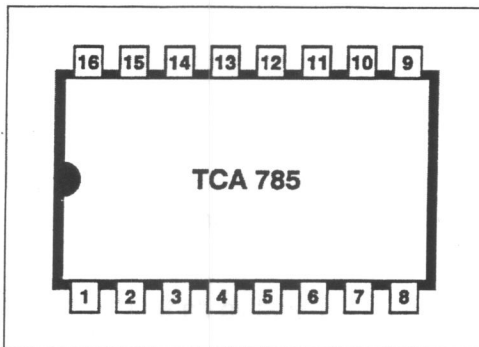
A tensão de rampa do capacitor V_{Cr} é comparada com a tensão de controle V_c , no pino 11 do TCA, conforme a figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

No instante t_0 temos o ângulo de disparo α em relação ao sinal da rede de alimentação. Quando as tensões forem iguais ($V_{Cr} = V_c$), ocorrerá a mudança do estado da saída V_d do bloco comparador de disparo. Isso irá indicar ao bloco (lógica de formação de pulsos) que um pulso de disparo deve ser acoplado em uma de suas saídas.

Observação: A tensão de rampa V_{Cr} é limitada a $V_s - 2V$, ou seja, 2V abaixo da tensão de alimentação.



*Circuito Comparador... Quando recebe um valor maior que o outro, ele gera um pulso.

** Quando passa novamente por "zero" dos carregos o capacitor.

Na figura acima o capacitor continua a se carregar até que, no próximo cruzamento por zero, o detector de passagem por zero informe o evento ao registrador de sincronismo. Esse registrador irá gerar um pulso de sincronismo na base de T1, que irá saturá-lo.

Com T1 saturado o capacitor Cr (pino 10) irá se descarregar rapidamente, ficando preparado para gerar a próxima rampa.

A informação de passagem por zero somente ficará liberada após a descarga de Cr, que é monitorada pelo Bloco A2 (monitor de descarga de Cr).

Saídas do TCA 785

O TCA possui uma saída Q1 (pino 14) e outra Q2 (pino 15), defasadas 180°.

A saída Q1 é usada para disparar o Tiristor no semiciclo negativo da tensão da rede, enquanto a saída Q2 é usada para disparar o Tiristor no semiciclo positivo da tensão da rede. Existem outras saídas que serão abordadas mais adiante.

Com as informações dos circuitos anteriores, o bloco “lógica de formação de pulsos” encarrega-se de colocar nas saídas a forma de pulso selecionada.

A duração dos pulsos de disparo depende dos valores do **capacitor C12** e do **coeficiente β** , fornecidos pelo fabricante conforme a seguinte tabela:

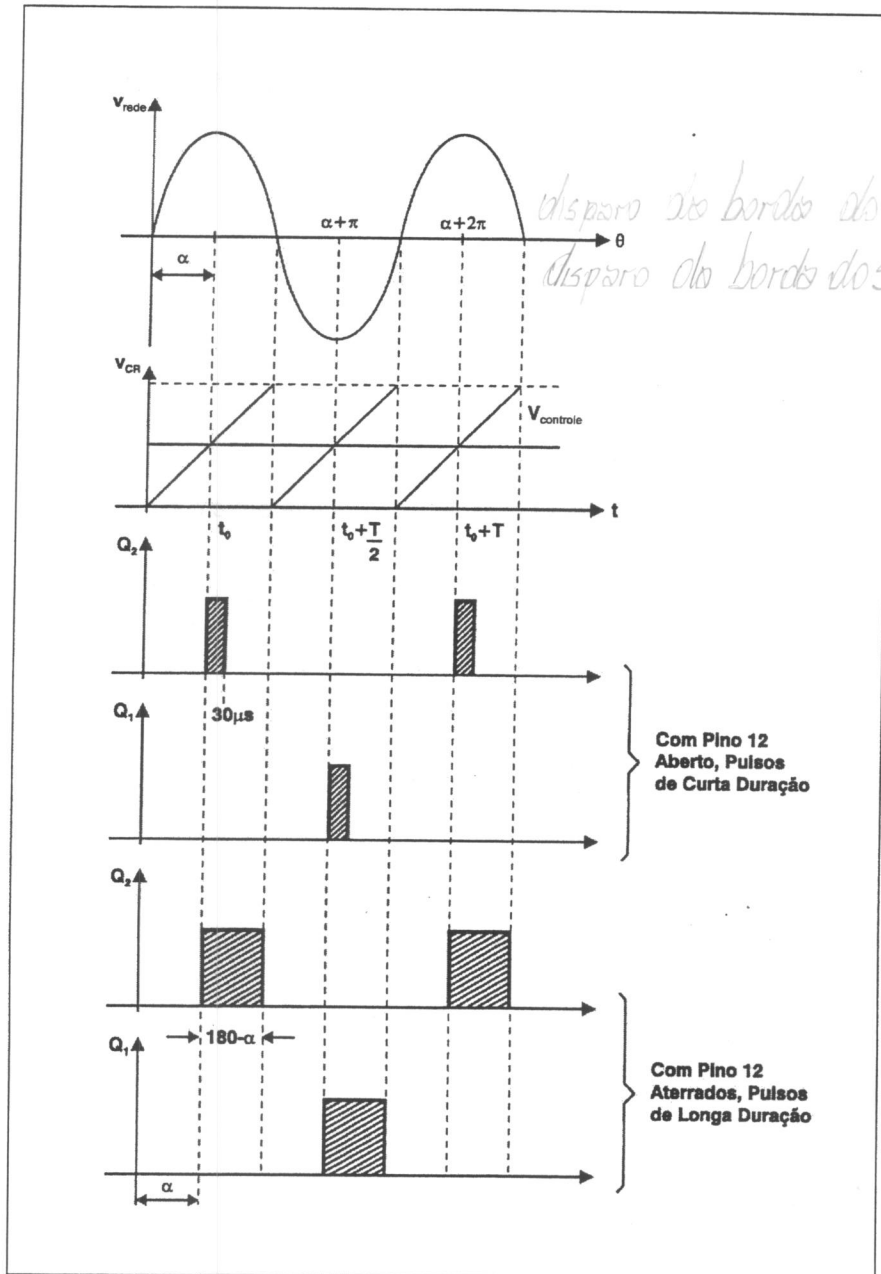
C12	Aberto	150pF	220pF	330pF	680pF	1000pF	Curto
$\beta = 620\mu\text{s/nF}$	30 μs	93 μs	136 μs	205 μs	422 μs	620 μs	180°- α

Com o pino 12 aberto, quando a tensão de rampa VCr se igualar à tensão de controle Vc (pino 11) teremos na saída Q2 (pino 15) um pulso de 30 μs se a rede estiver no semiciclo positivo. Caso a tensão da rede esteja no semiciclo negativo, teremos um pulso de 30 μs na saída Q1 (pino 14).

Se o pino 12 estiver conectado à terra, a largura de pulso será fixa, valendo 180° - α , e poderá ser usada para garantir o disparo dos tiristores quando estivermos usando carga indutiva.

Para cada valor de C12 mostrado na tabela teremos pulsos com outras durações, dadas pelo parâmetro β .

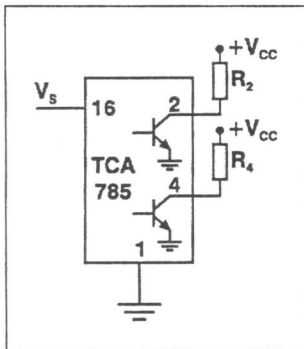
Na figura abaixo podemos verifica a lógica de disparo do TCA 785



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

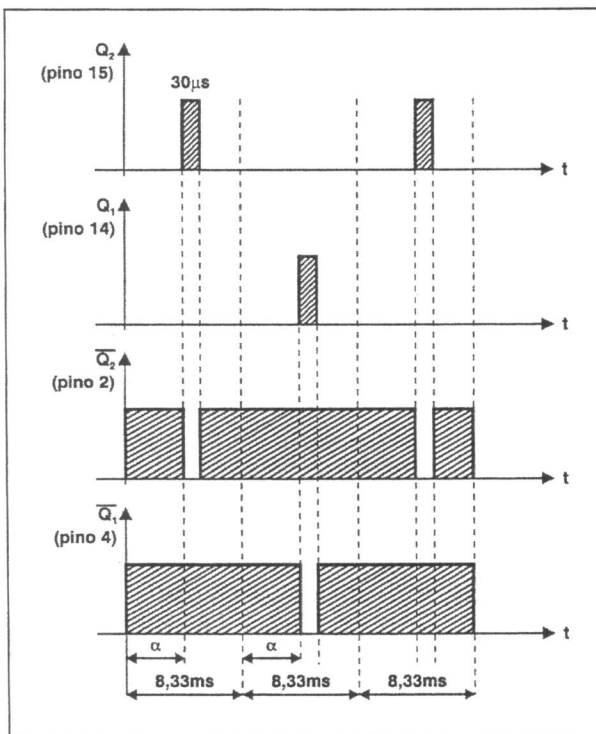
Como comentado anteriormente, o TCA 785 possui outras opções de pulsos. As saídas /Q1 (pino 4) e /Q2 (pino 2) são complementares (com sinal lógico invertido) em relação às saídas Q1 (pino 14) e Q2 (pino 15).

/Q1 e /Q2 são saídas em coletor aberto, ou seja, com transistores internos que recebem sinais nas suas respectivas bases, mas que somente conduzirão quando polarizados corretamente através de resistores externos R2 e R4, conforme a figura abaixo.



(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Na figura abaixo podemos verificar as formas de onda de /Q1, /Q2, Q1 e Q2.



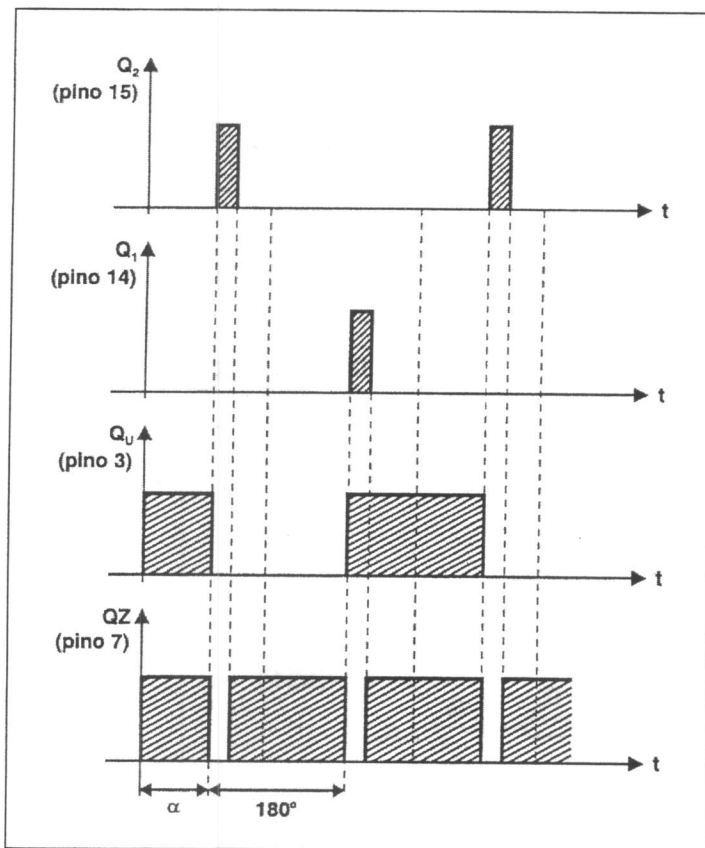
(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Os valores de R1 e R2 devem ser calculados corretamente, levando em conta que a corrente máxima de saída dos coletores dos transistores é de 10mA.

Aterrando o pino 13, teremos pulsos de longa duração ($180^\circ - \alpha$) nas saídas /Q1 e /Q2, de modo semelhante ao que ocorre com o pino 12 nas saídas Q1 e Q2.

Existem duas saídas auxiliares, Qu (pino 3) e Qz (pino 7), também em coletor aberto. A saída Qu é análoga à saída Q1, diferenciando-se apenas pelo fato de que os pulsos em Qu possuem duração de 180° (em 60Hz, equivale a 8,33ms).

A saída Qz é igual a uma associação lógica Nor das saídas Q1 e Q2. Podemos verificar essa análise na figura abaixo.

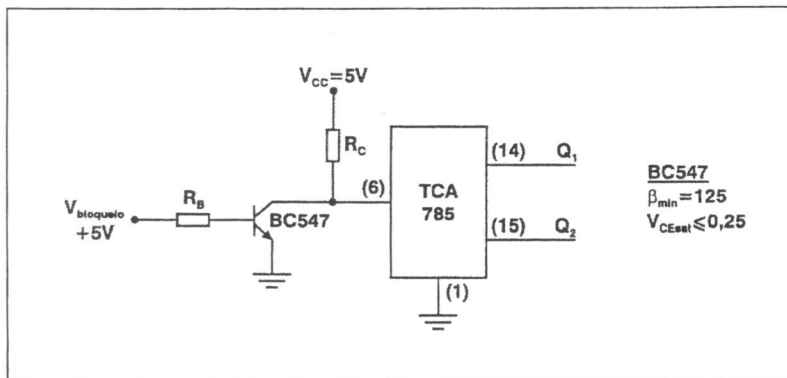


(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Uma outra opção importante no TCA é a possibilidade de bloqueio das saídas através do pino 6. Quando esse pino estiver com uma tensão superior a 4V as saídas estarão liberadas, mas, quando essa tensão for inferior a 2,5V as saídas estarão bloqueadas.

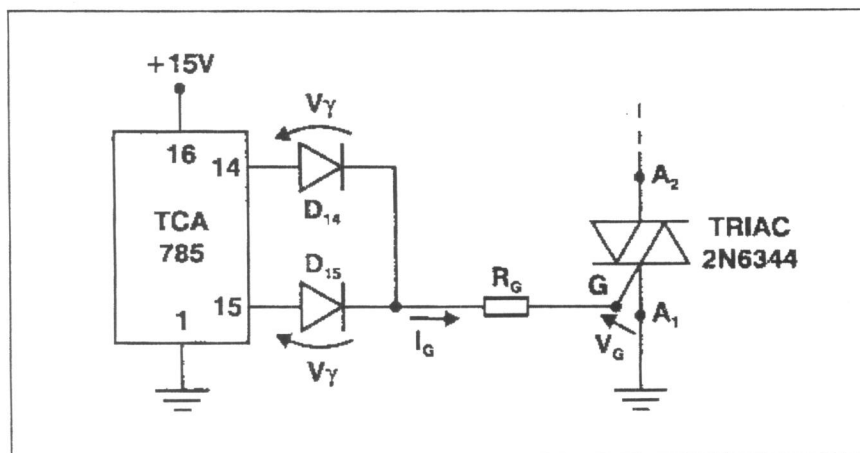
Esta opção é muito interessante, pois permite bloquear os pulsos de disparo do TCA em caso de possíveis defeitos no sistema de potência do equipamento.

O bloqueio pode ser feito através de uma chave ou um contato de relê, como também através de um transistor npn. A figura abaixo mostra essa possibilidade.



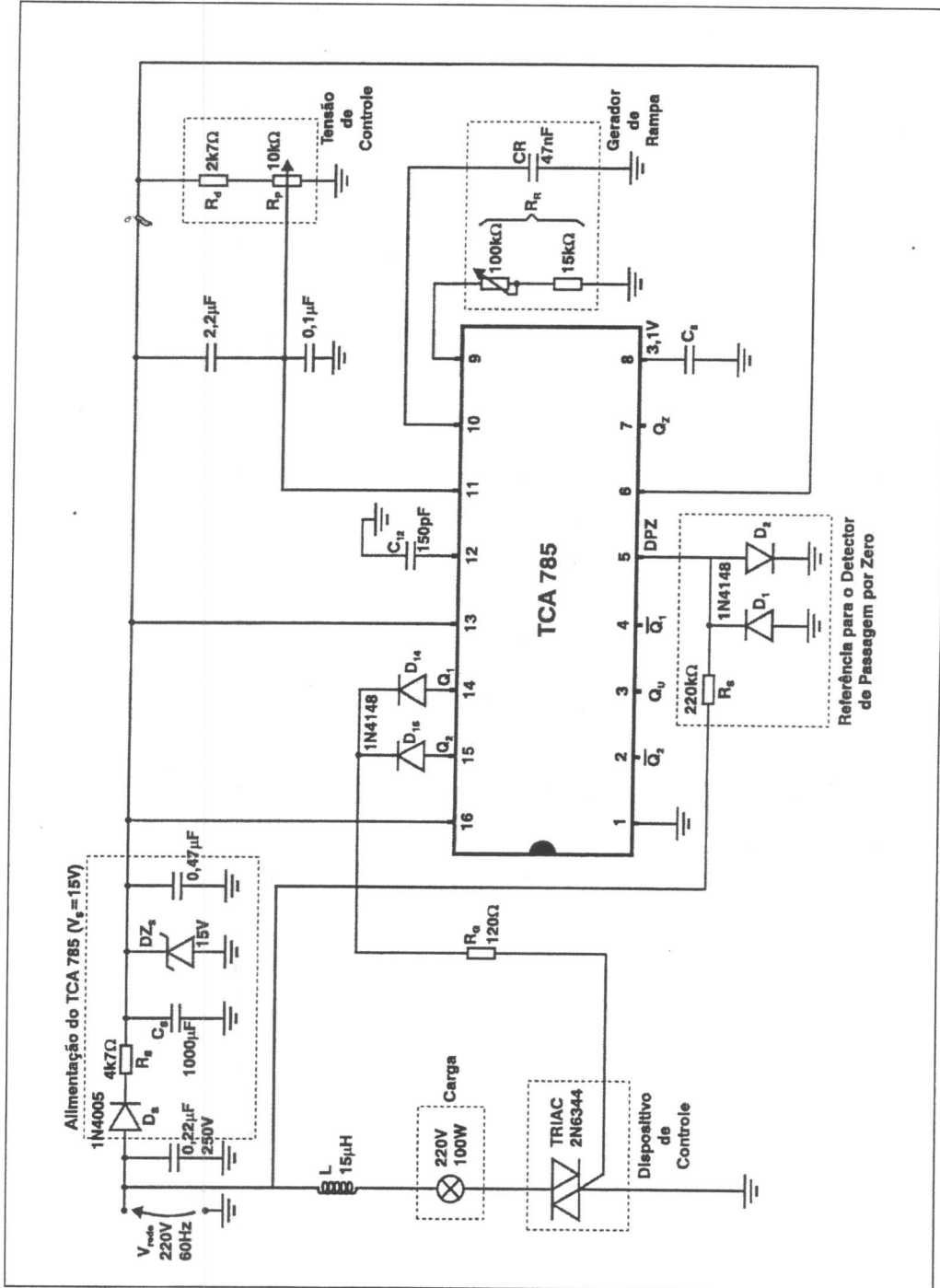
(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Podemos utilizar o TCA 785 para engatilhar TRIACs, conforme a figura a seguir.

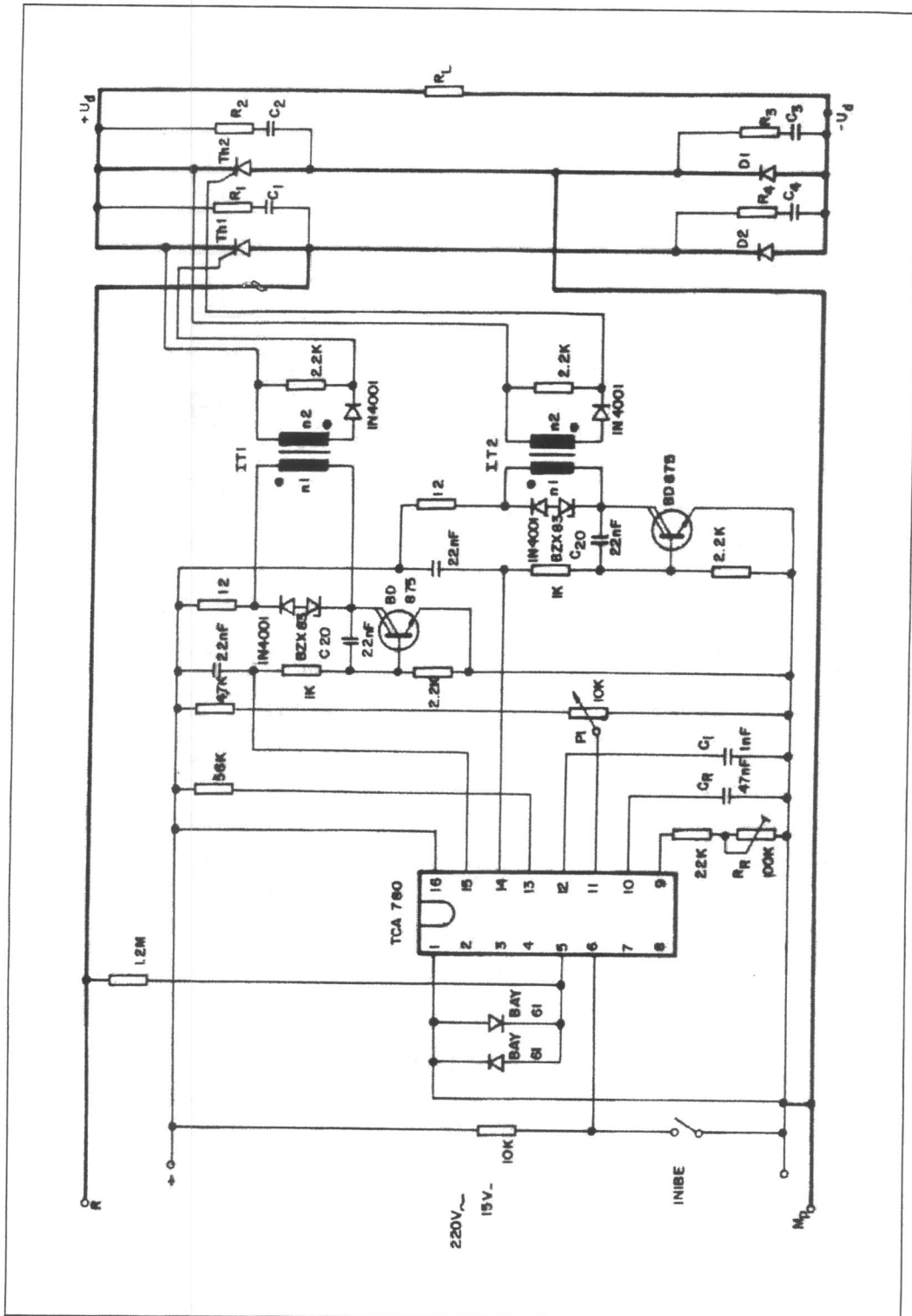


(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

Exemplos de aplicação:

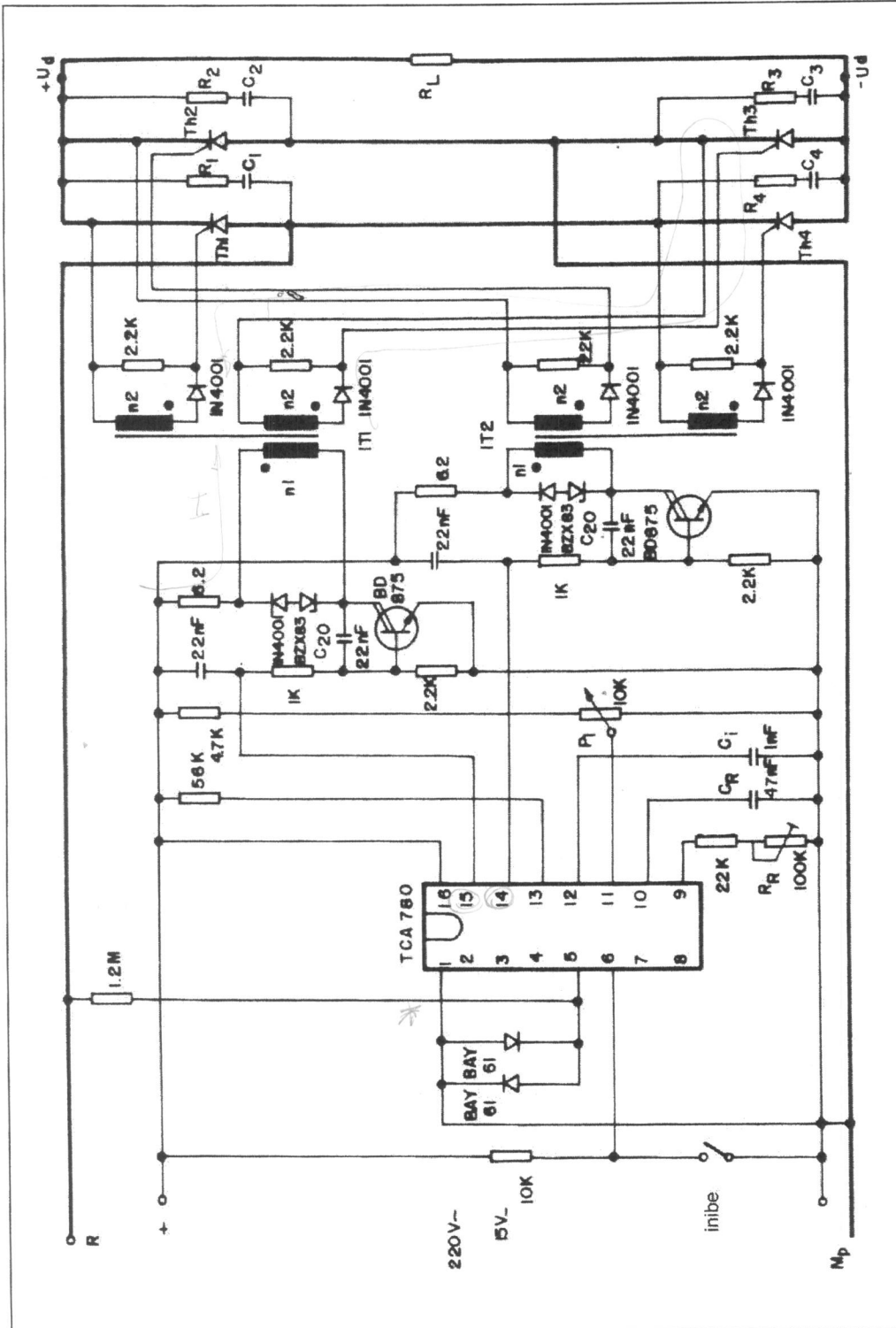


(Dispositivos semicondutores: Tiristores Controle de Potência em c.c e c.a)

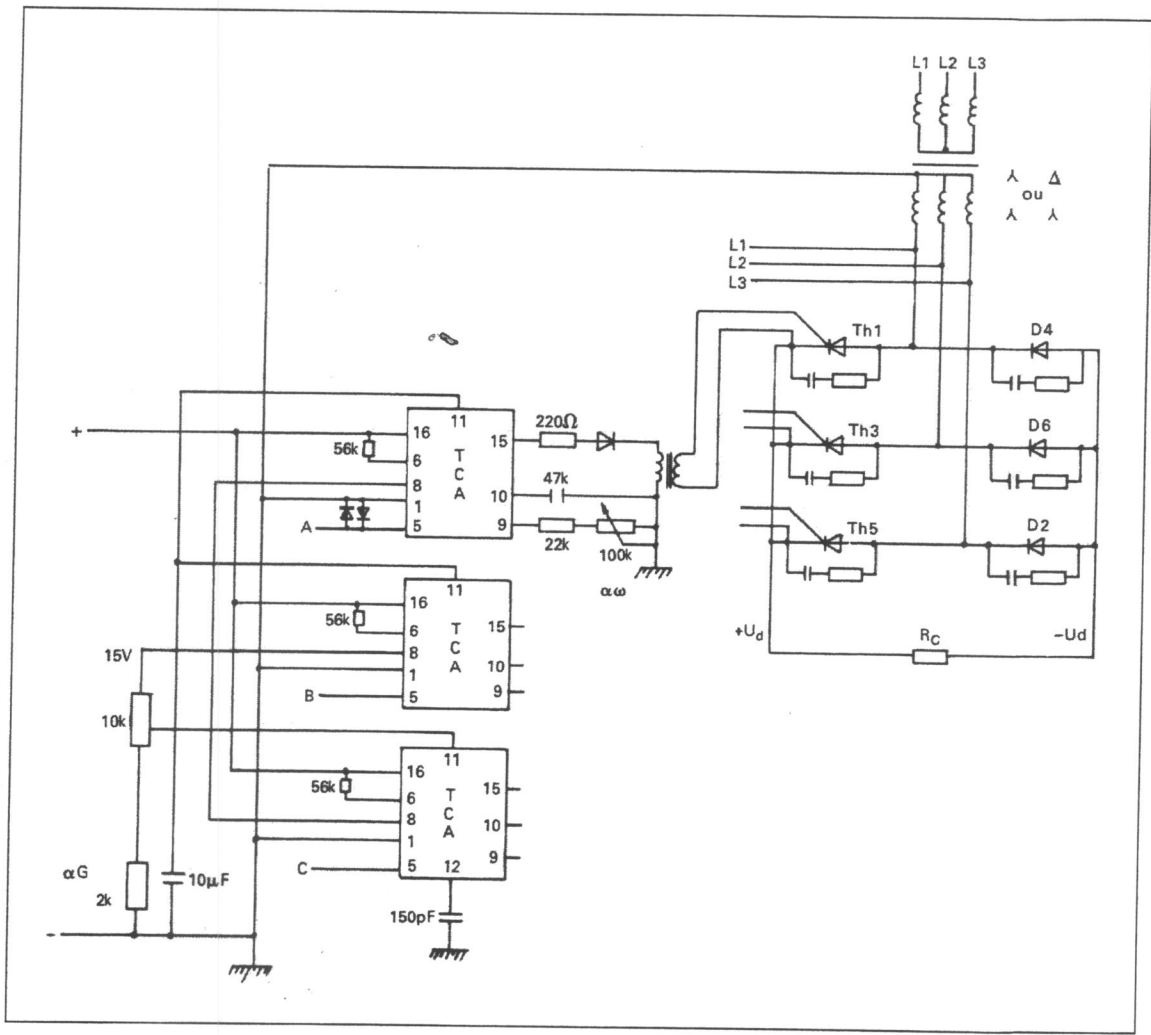


(Eletrônica industrial)

** Rede de potência do sistema de controle de potência*



(Eletrônica industrial)



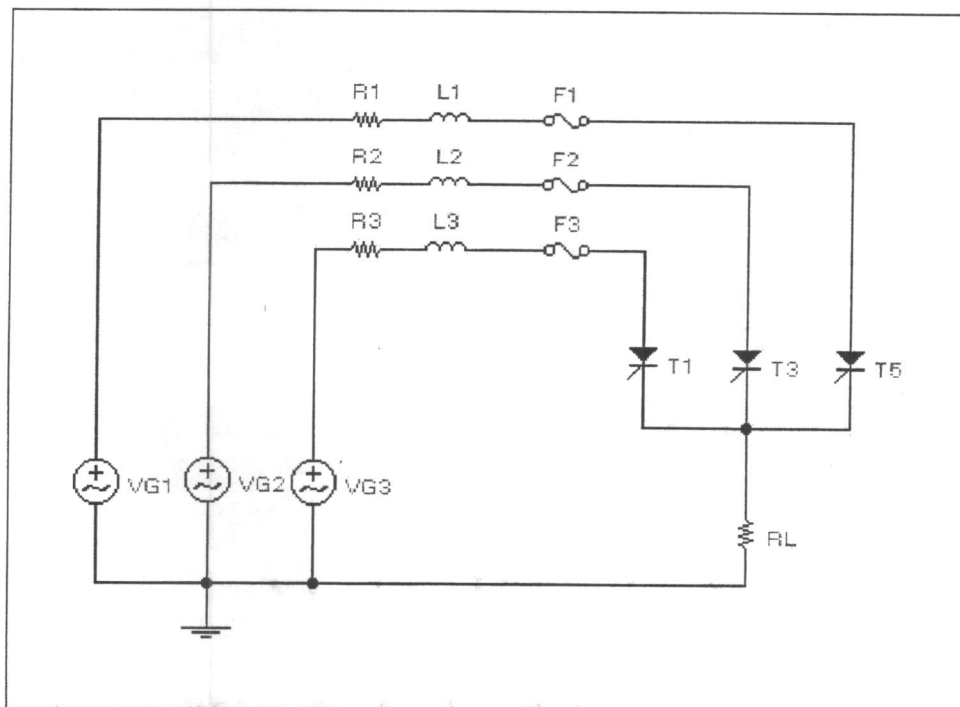
(Eletrônica industrial)

8

Retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva

Aqui, verificaremos o funcionamento do retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva e carga indutiva. Essa análise vai basear-se na construção gráfica das formas de onda da tensão na carga, da tensão reversa nos diodos e da tensão nos fusíveis de alimentação para diversos valores do ângulo α .

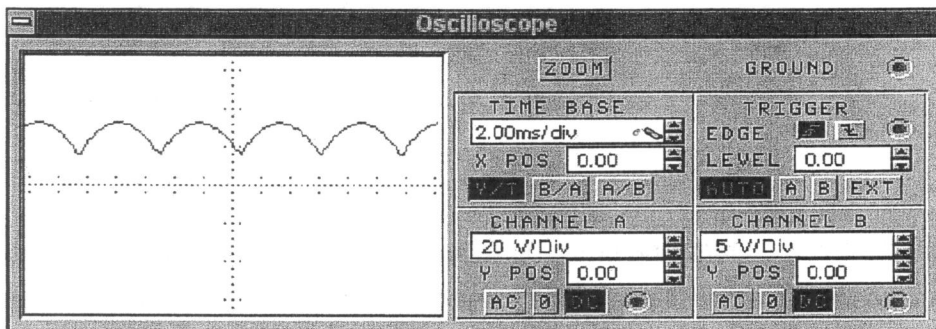
Circuito:



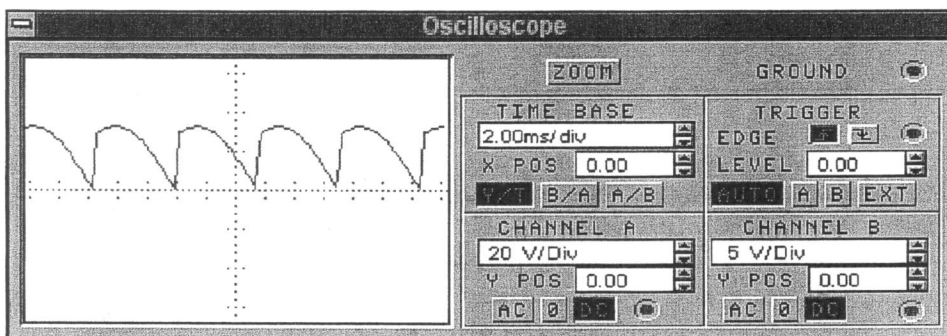
Formas de onda:

Tensão média na carga para diversos valores do ângulo de disparo α :

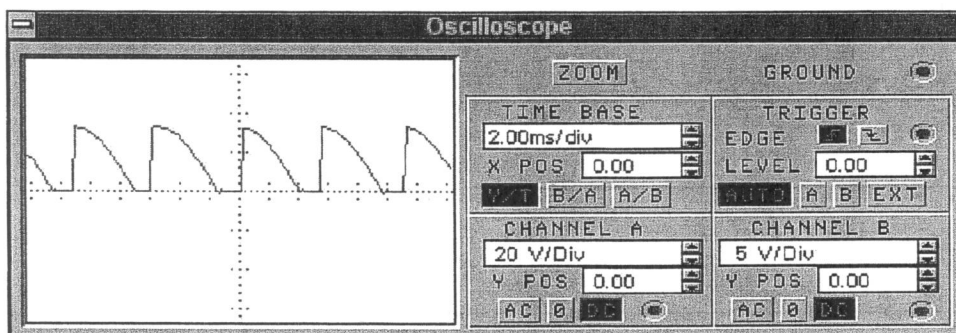
Para $\alpha = 0^\circ$



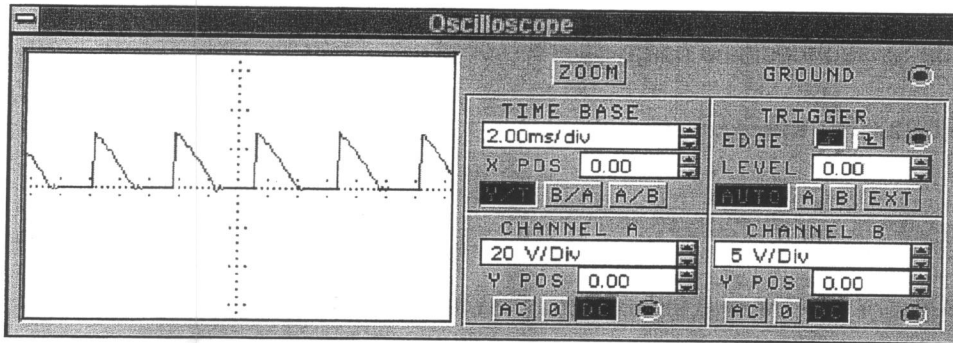
Para $\alpha = 30^\circ$



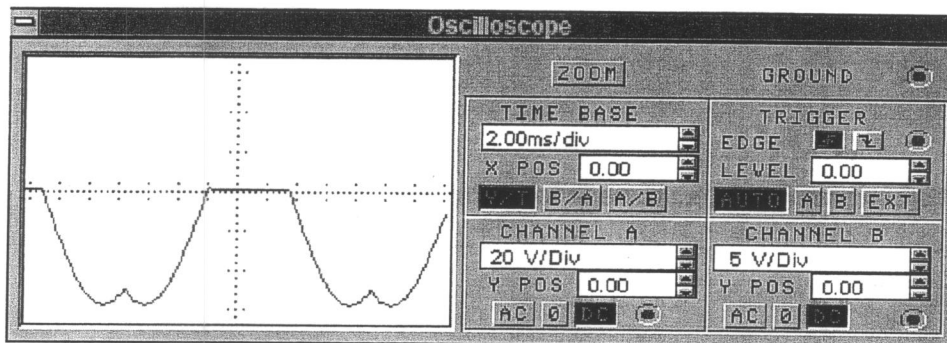
Para $\alpha = 60^\circ$



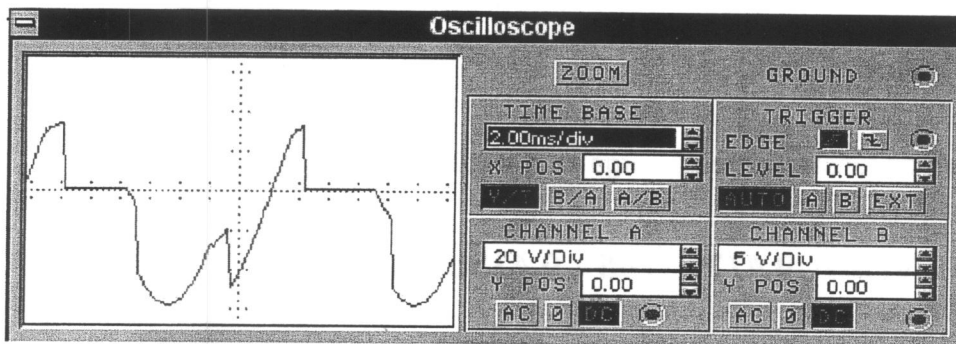
Para $\alpha = 90^\circ$



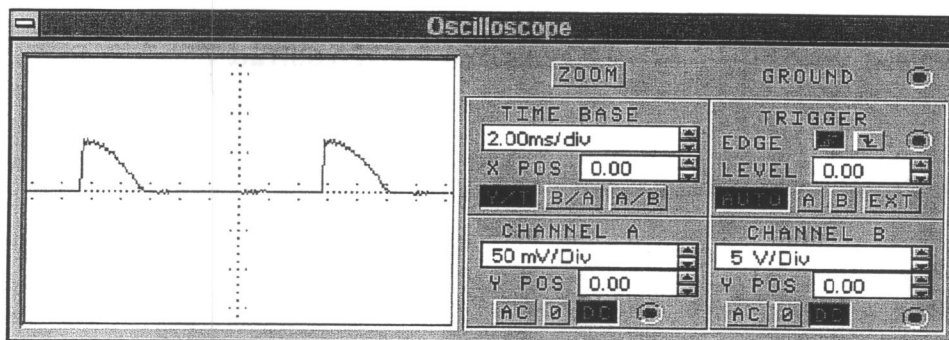
Tensão reversa no Tiristor T1 para $\alpha = 0^\circ$



Tensão reversa no Tiristor T1 para $\alpha = 60^\circ$



Forma de onda no Fusível F1 para $\alpha = 60^\circ$



Dimensionamento

Cálculo da tensão média na carga para $\alpha = 0^\circ$

$$V_{med} = 0,827 \times V_{F\ max} \times \cos \alpha$$

Para $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$

$$V_{med} = 0,477 \times V_{F\ max} [0,866 \cos \alpha - 0,5 \sin \alpha + 1]$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média em cada tiristor

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha = 0^\circ$

$$V_{efc} = V_{F\ max} \sqrt{0,477 \times (1,05 + 0,433 \cos 2\alpha)}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$

$$V_{efc} = V_{F\ max} \sqrt{0,477 \left(\frac{5\pi}{12} - \frac{\alpha}{2} + 0,22 \cos 2\alpha + 0,125 \sin 2\alpha \right)}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$V_{RT} \geq \sqrt{3} \times V_{f \max} \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo do rendimento do Retificador

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um diodo de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{dp} = 3 \times (1,2 \times I_{efd}) \text{ W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{ent} = P_{dc} + P_{dp}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{dc}}{P_{ent}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{med}}{V_{efc}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos diodos

O diodo escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no diodo maior que a calculada.

$$VR_d > VR \text{ calculada}$$

$$I_{efd} > I_{efd} \text{ calculada}$$

Cálculo da corrente eficaz no diodo e da corrente eficaz na linha de alimentação RMS

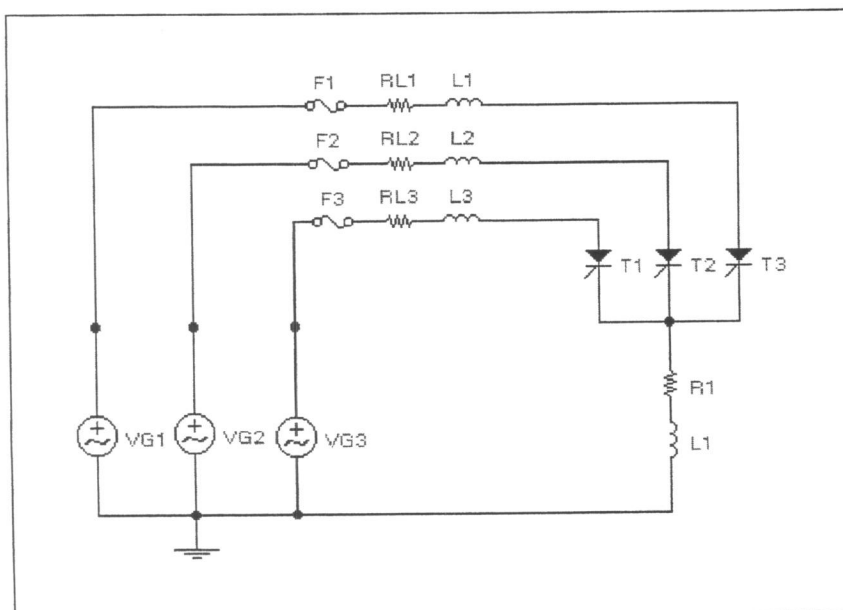
$$I_{efd} = I_{Lef} = \frac{I_{med}}{\sqrt{3}}$$

Retificador Trifásico Totalmente Controlado Unidirecional Carga Resistiva e Indutiva (RL)

Para a análise do retificador totalmente controlado unidirecional com carga indutivamos considerar um indutor com um valor muito alto, que, por sua vez, absorve uma corrente do retificador, cuja onda tem formato bastante liso (consideração teórica).

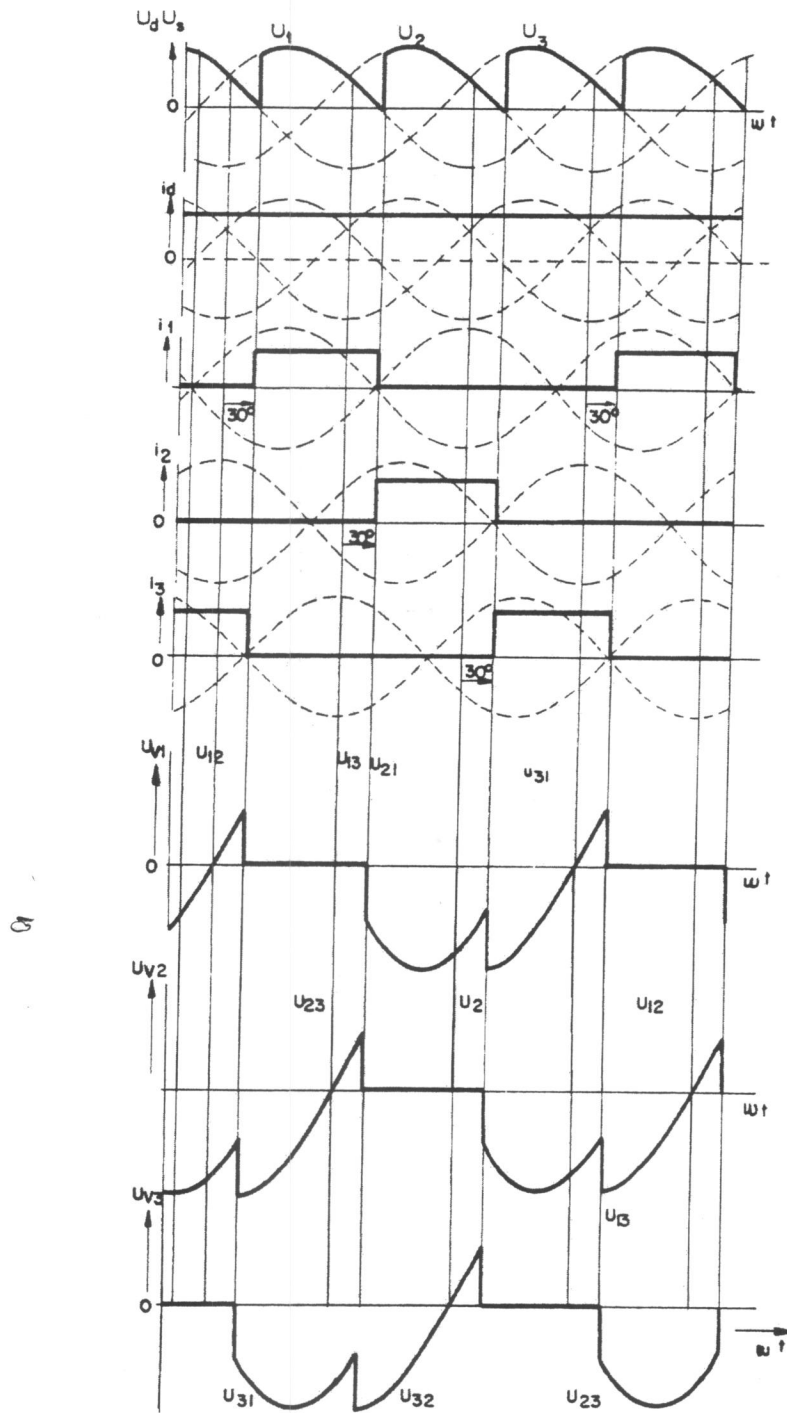
Para uma primeira análise não vamos considerar os transientes gerados pela carga indutiva, ou seja, vamos analisar o sistema em regime contínuo de trabalho.

Circuito:



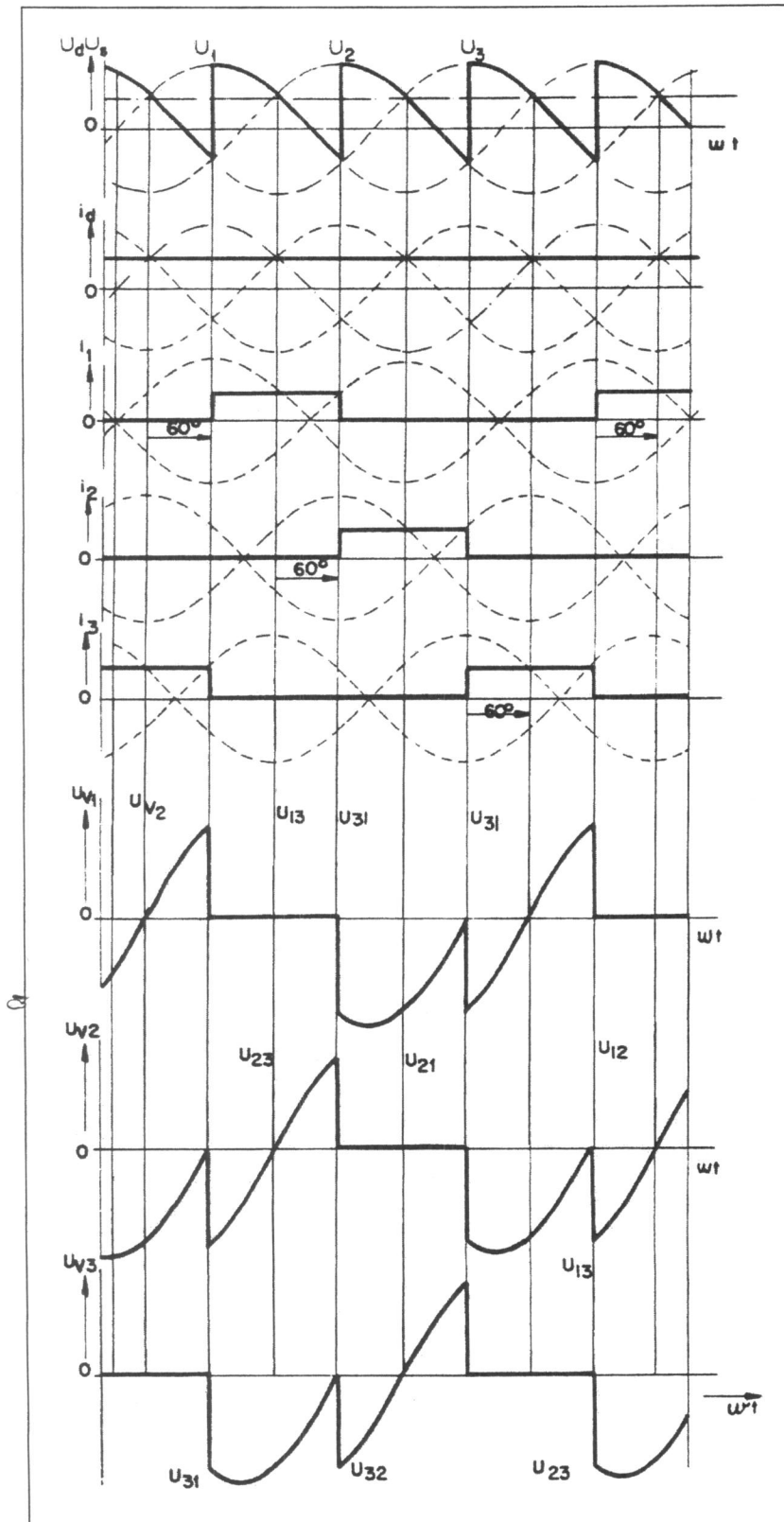
Formas de onda da tensão média na carga, corrente média na carga e tensão reversa nos tiristores:

Para $\alpha = 30^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Para $\alpha = 60^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Eletrônica de potência

Cálculo da tensão média na carga para α variando de 0° a 150° :

$$V_{med} = 0,827 \times V_{fmax} \times \cos \alpha$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média em cada tiristor

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para α variando de 0° a 150°

$$V_{efc} = V_{Fmax} \sqrt{0,477 \times (1,05 + 0,433 \cos 2\alpha)}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$V_{RT} \geq \sqrt{3} \times V_{fmax} \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo do Rendimento do Retificador

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um diodo de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{dp} = 3 \times (1,2 \times I_{efd}) \quad W$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{ent} = P_{dc} + P_{dp}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{dc}}{P_{ent}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{med}}{V_{efc}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos diodos

O diodo escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no diodo maior que a calculada.

$V_{Rd} > V_R$ calculada

$I_{efd} > I_{efd}$ calculada

Cálculo da corrente eficaz no diodo e da corrente eficaz na linha de alimentação RMS

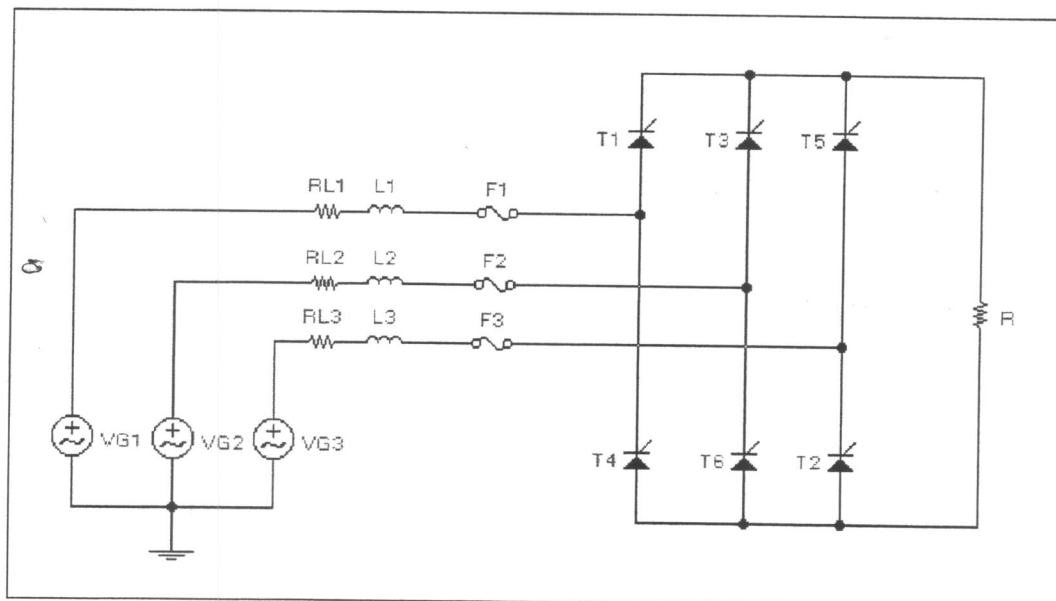
$$I_{efd} = I_{Lef} = \frac{I_{med}}{\sqrt{3}}$$

Retificador totalmente controlado bidirecional com carga resistiva e carga indutiva

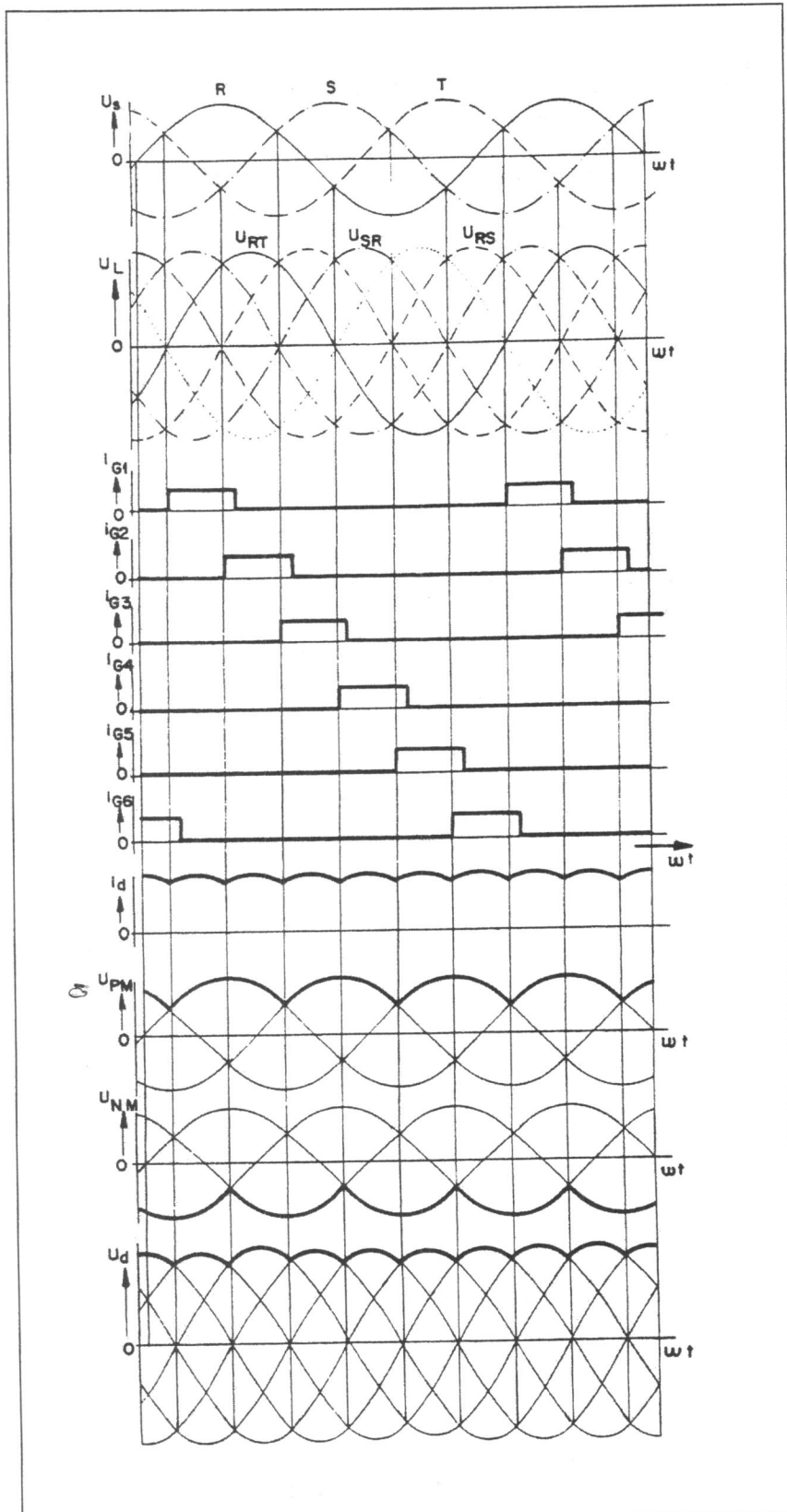
Aqui, verificaremos o funcionamento do retificador trifásico totalmente controlado bidirecional com carga resistiva e carga indutiva.

Essa análise vai basear-se na construção gráfica das formas de onda da tensão na carga, da tensão reversa nos diodos e da tensão nos fusíveis de alimentação para diversos valores do ângulo α .

Circuito:

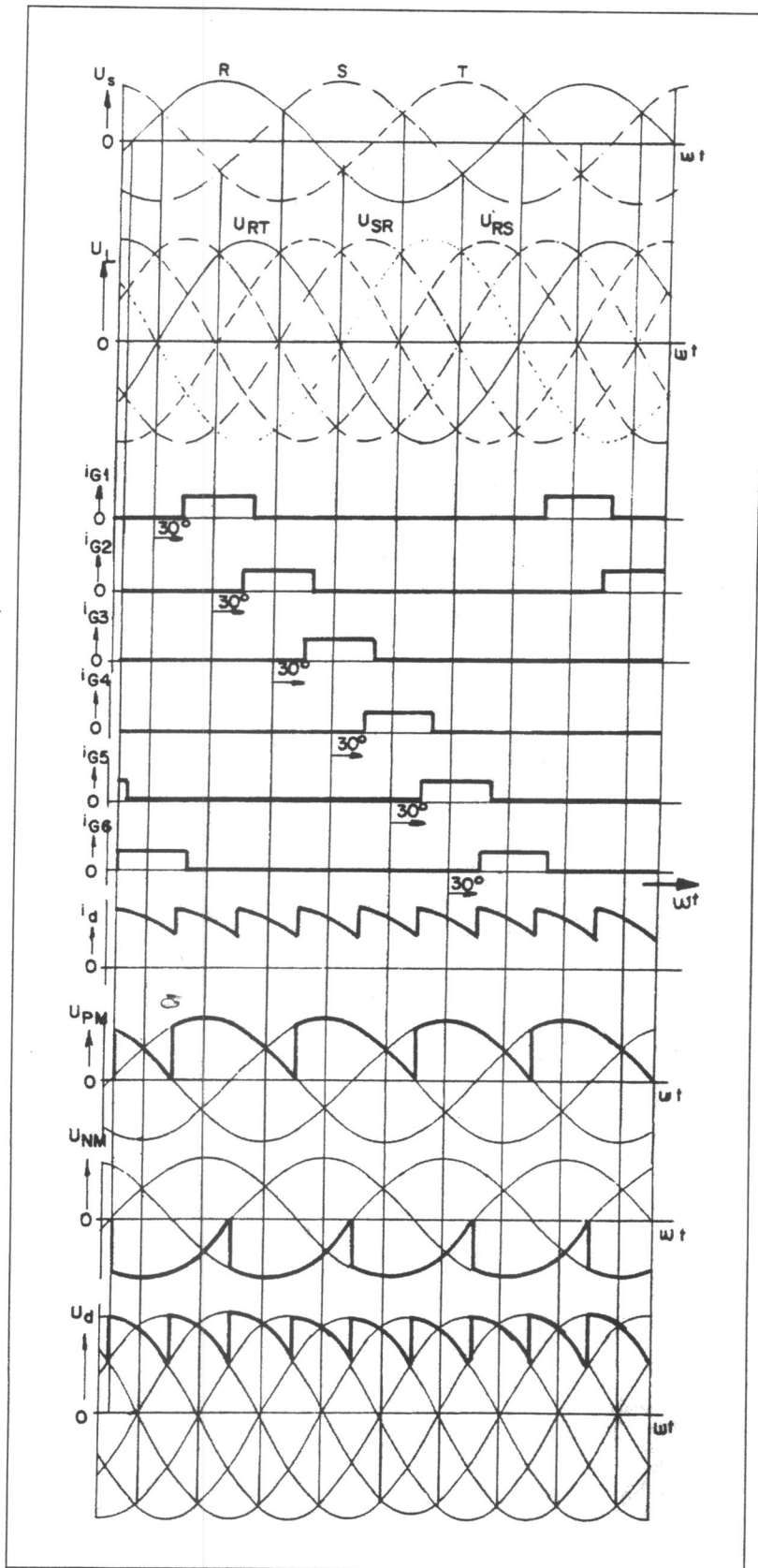


Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$



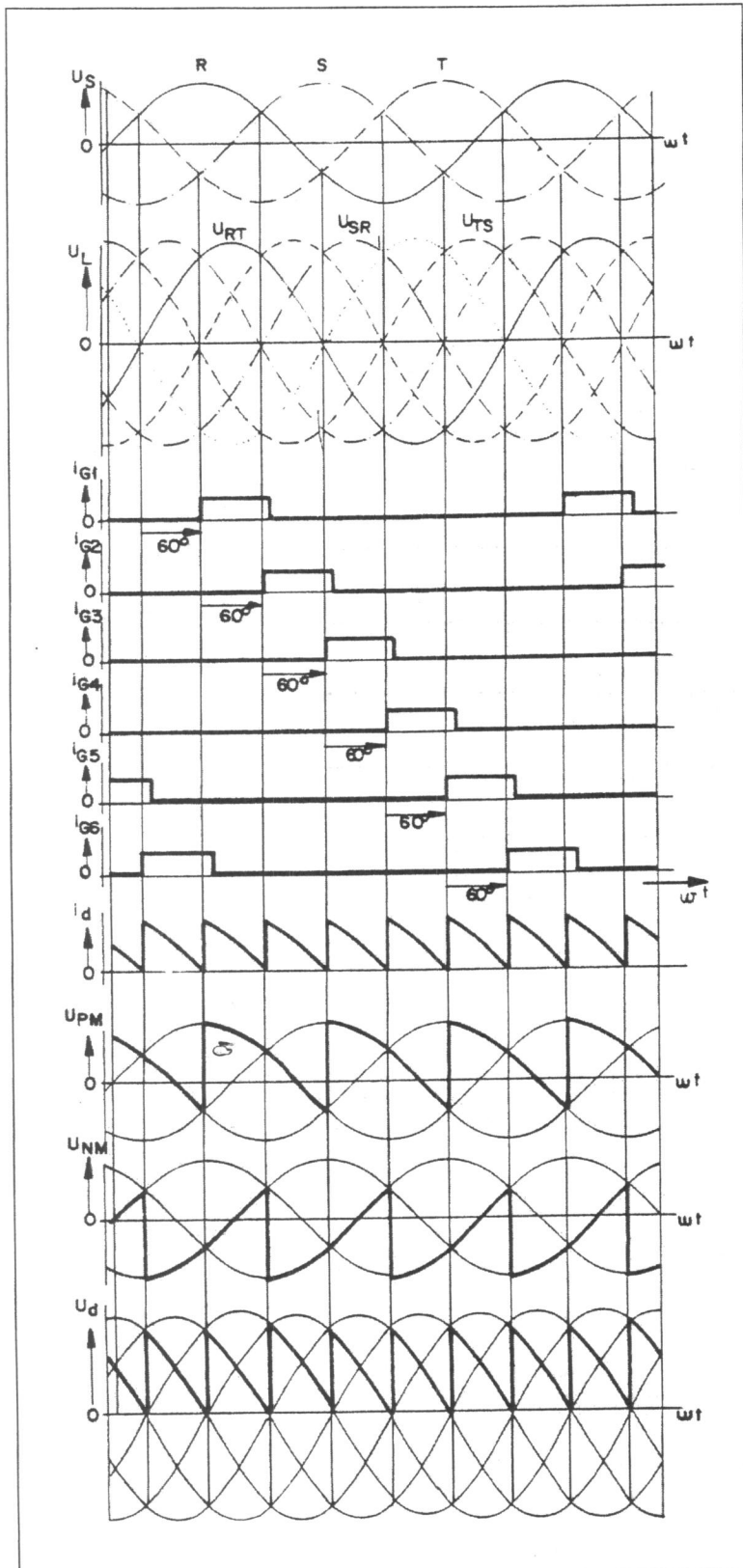
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 30^\circ$



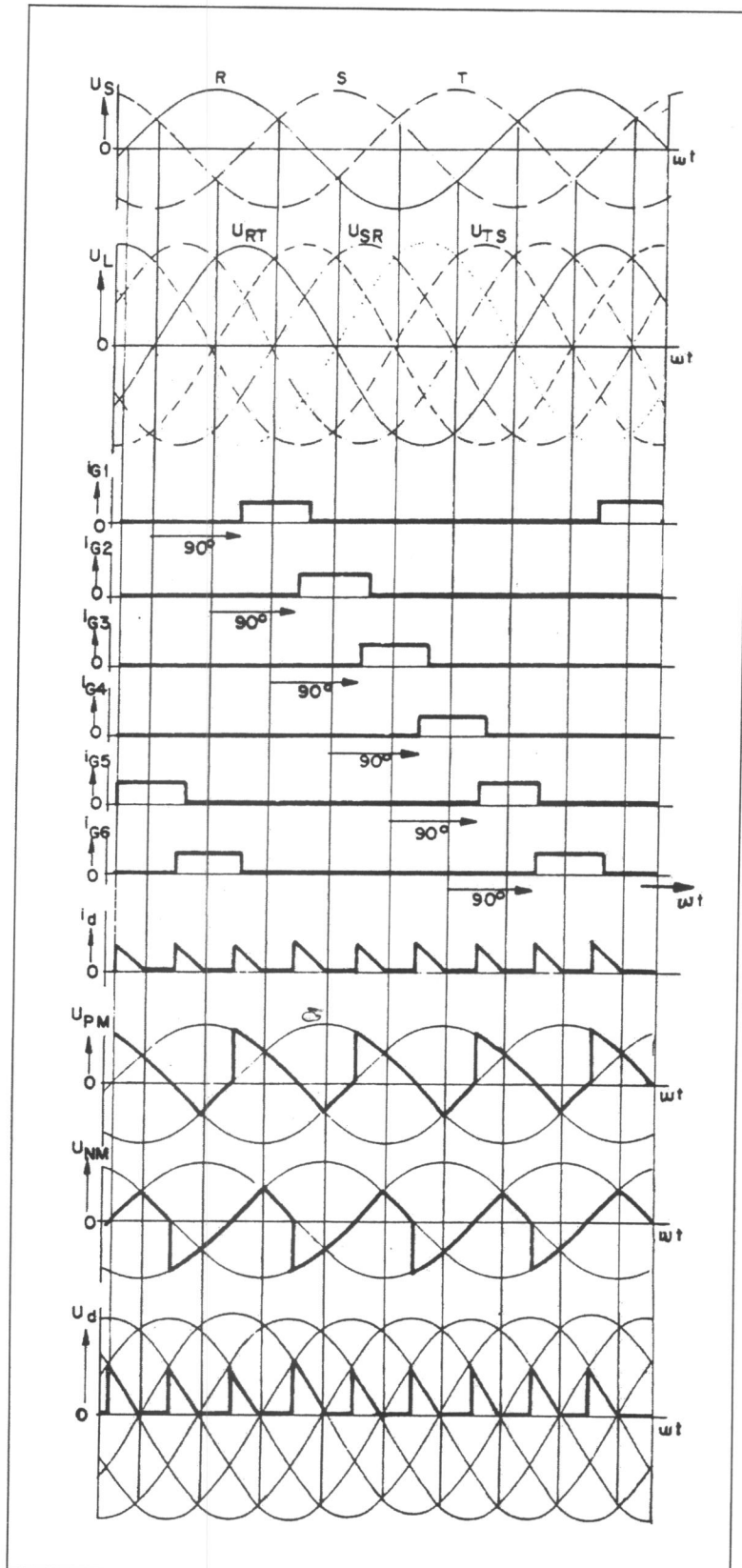
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 60^\circ$



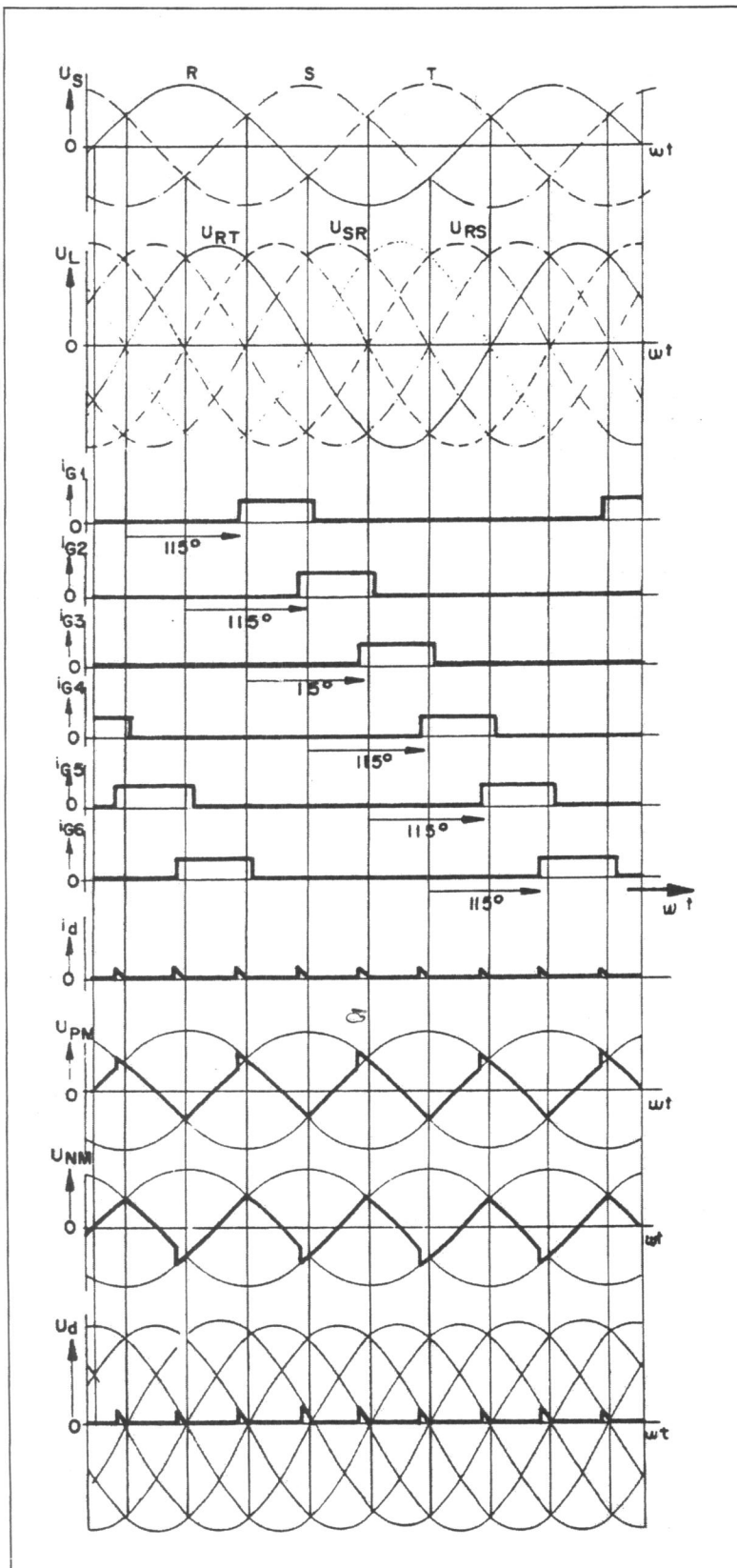
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 90^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 115^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Cálculo da tensão média na carga para $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$

$$V_{med} = 0,955 \times V_L \max \times \cos \alpha$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$

$$V_{efc} = V_L \max \sqrt{0,955 \left[\frac{x}{6} + 0,433 \cos 2a \right]}$$

Cálculo da tensão média na carga para $\alpha > 60^\circ$ até 120° (Forma de onda descontínua)

$$V_{med} = 0,955 V_L \max [1 + 0,5 \cos \alpha - 0,866 \sin \alpha]$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha > 60^\circ$ até 120° (Forma de onda descontínua)

$$V_{efc} = V_L \max \sqrt{0,955 \left[\frac{2x}{6} - \frac{\alpha}{2} + 0,22 \cos 2\alpha - 0,125 \sin 2\alpha \right]}$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média nos Tiristores

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$V_R > V_L \max \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo da corrente eficaz na carga.

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da corrente eficaz nos Tiristores (RMS)

$$I_{\text{efT}} = \frac{I_{\text{med}}}{\sqrt{3}}$$

Cálculo da corrente de linha eficaz (RMS)

$$I_{\text{Lef}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{\text{med}} \Rightarrow I_{\text{Lef}} = 0,816 \times I_{\text{med}}$$

Cálculo do rendimento

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um Tiristor de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{\text{dp}} = 6 \times (1,2 \times I_{\text{efT}}) \quad \mathbf{W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{\text{ent}} = P_{\text{dc}} + P_{\text{dp}}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{dc}}}{P_{\text{ent}}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{\text{med}}}{V_{\text{efc}}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos Tiristores

O Tiristor escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no Tiristor maior que a calculada.

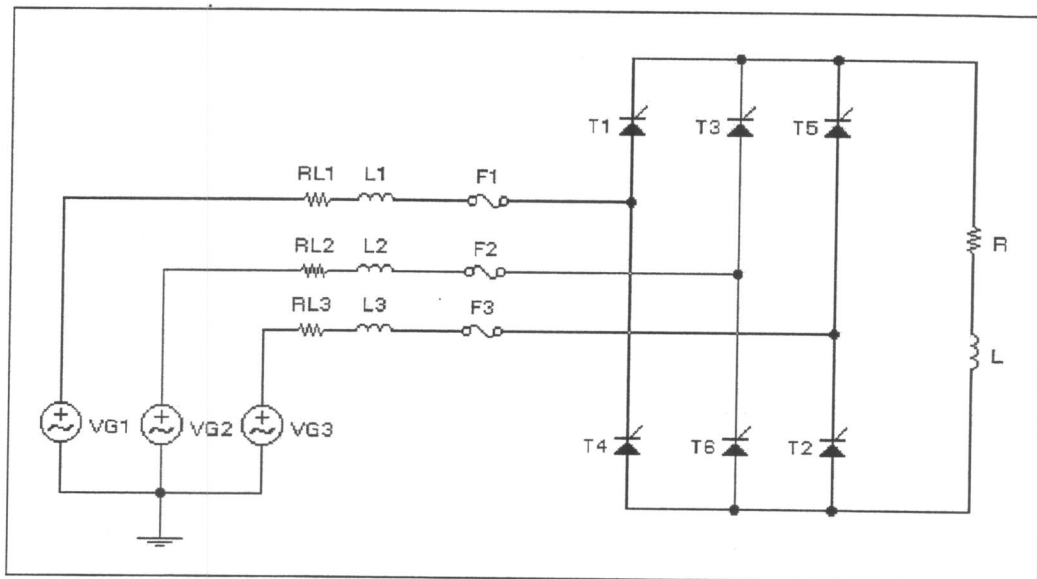
$V_{Rd} > V_R$ calculada

$I_{\text{efT}} > I_{\text{efT}}$ calculada

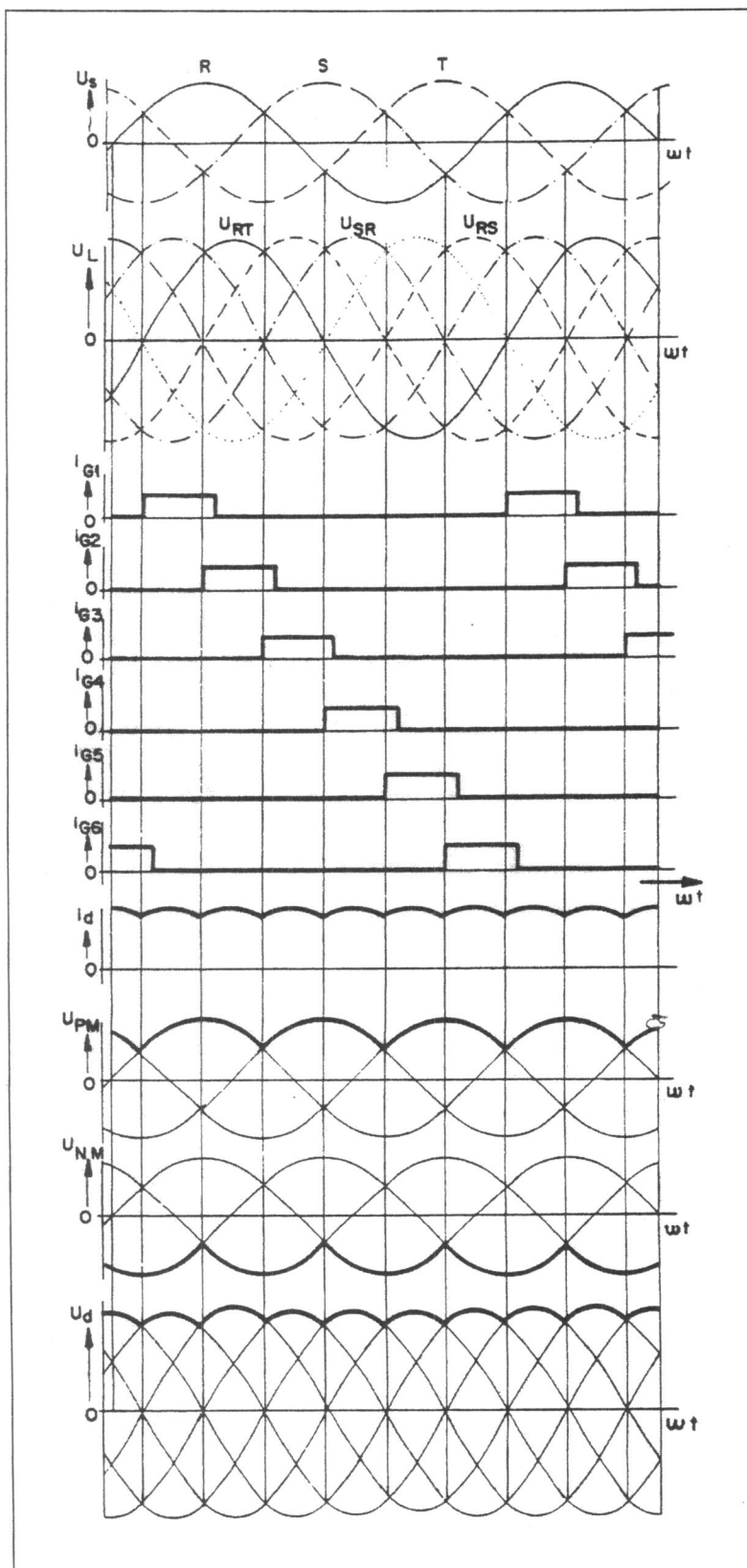
Retificador Totalmente Controlado Bidirecional com Carga Indutiva

- Para a análise do retificador bidirecional totalmente controlado com carga indutiva, vamos considerar um indutor com um valor muito alto, que, por sua vez, absorve uma corrente do retificador cuja onda tem formato bastante liso (consideração teórica).
- A carga deve ser considerada em regime contínuo de trabalho.

Circuito

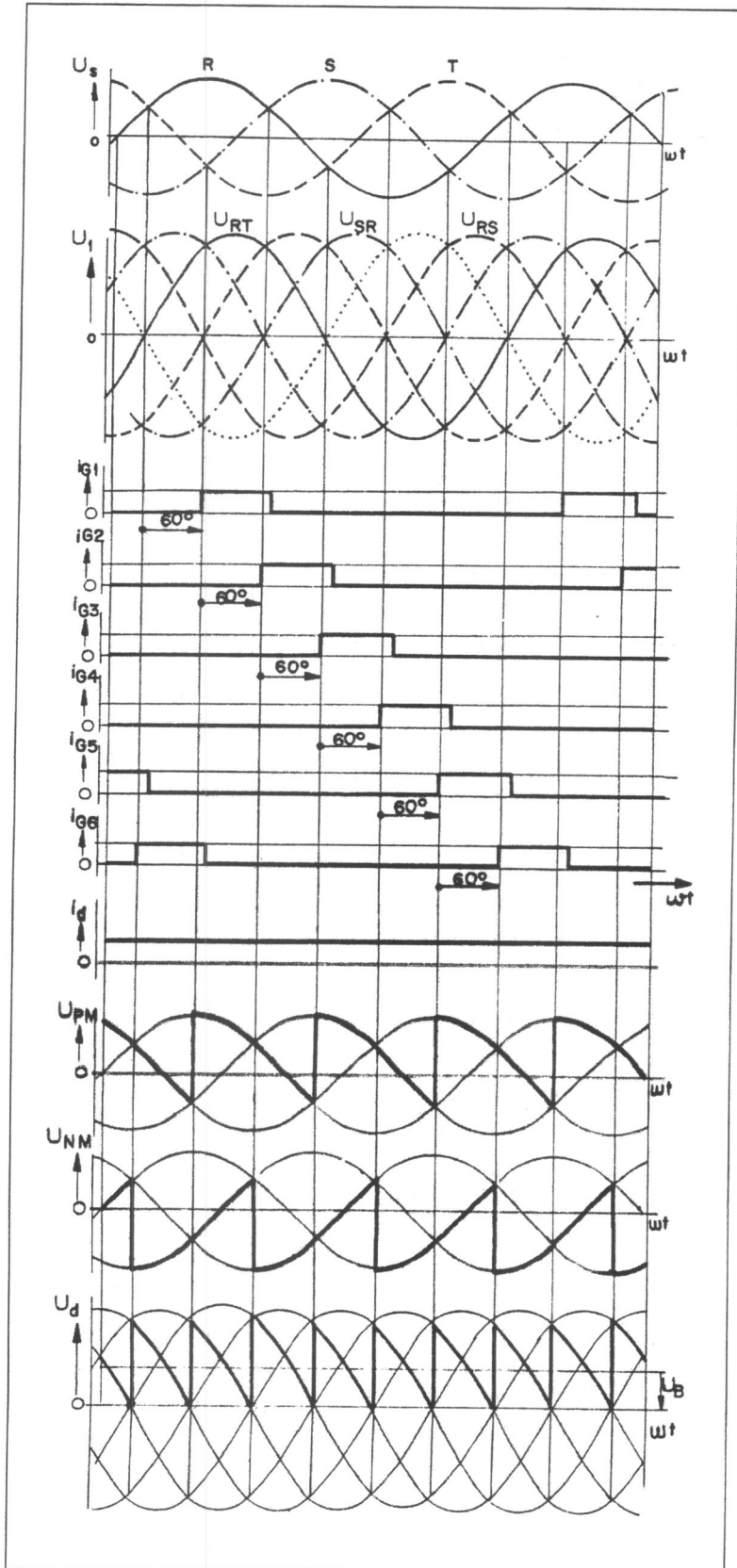


Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$



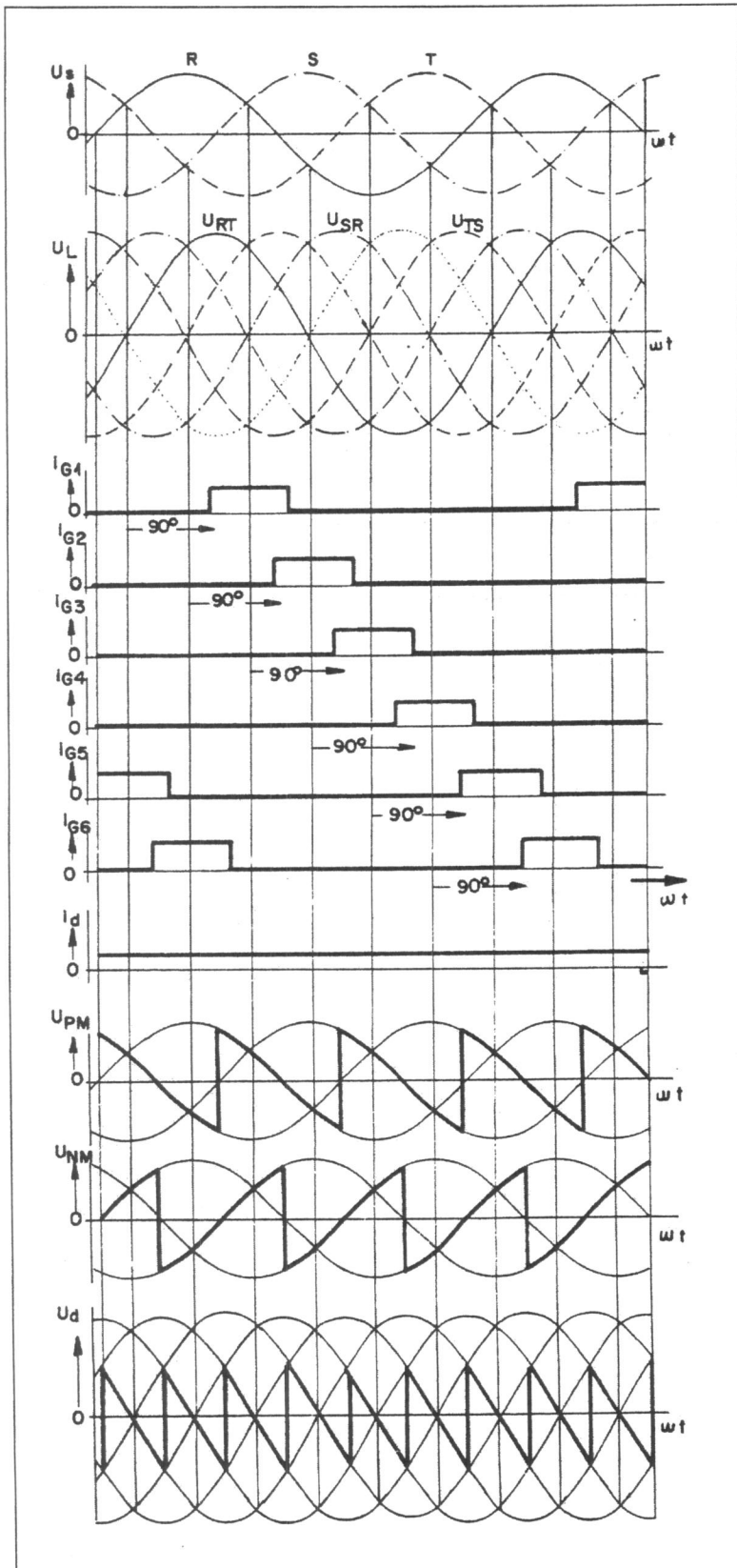
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 60^\circ$



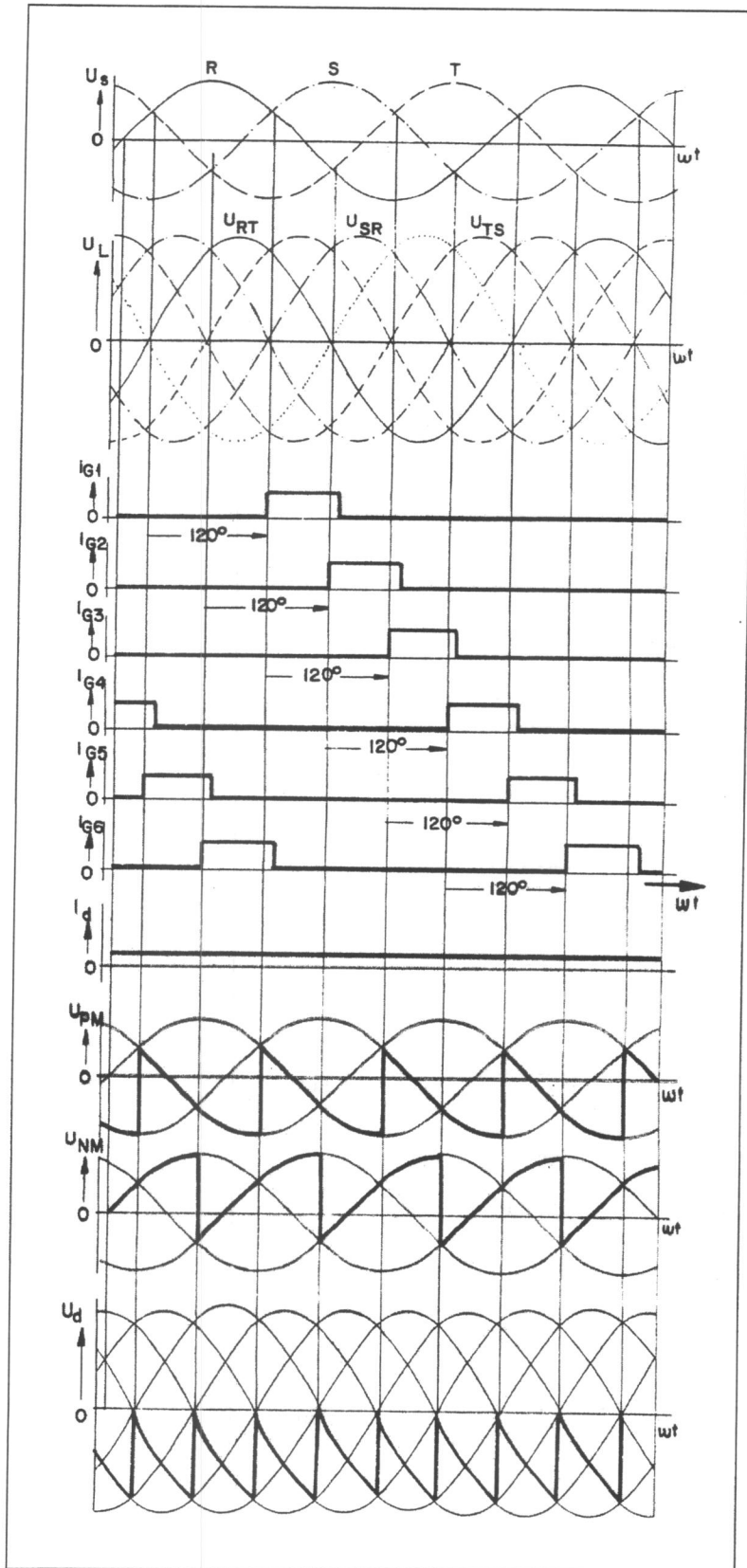
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 90^\circ$



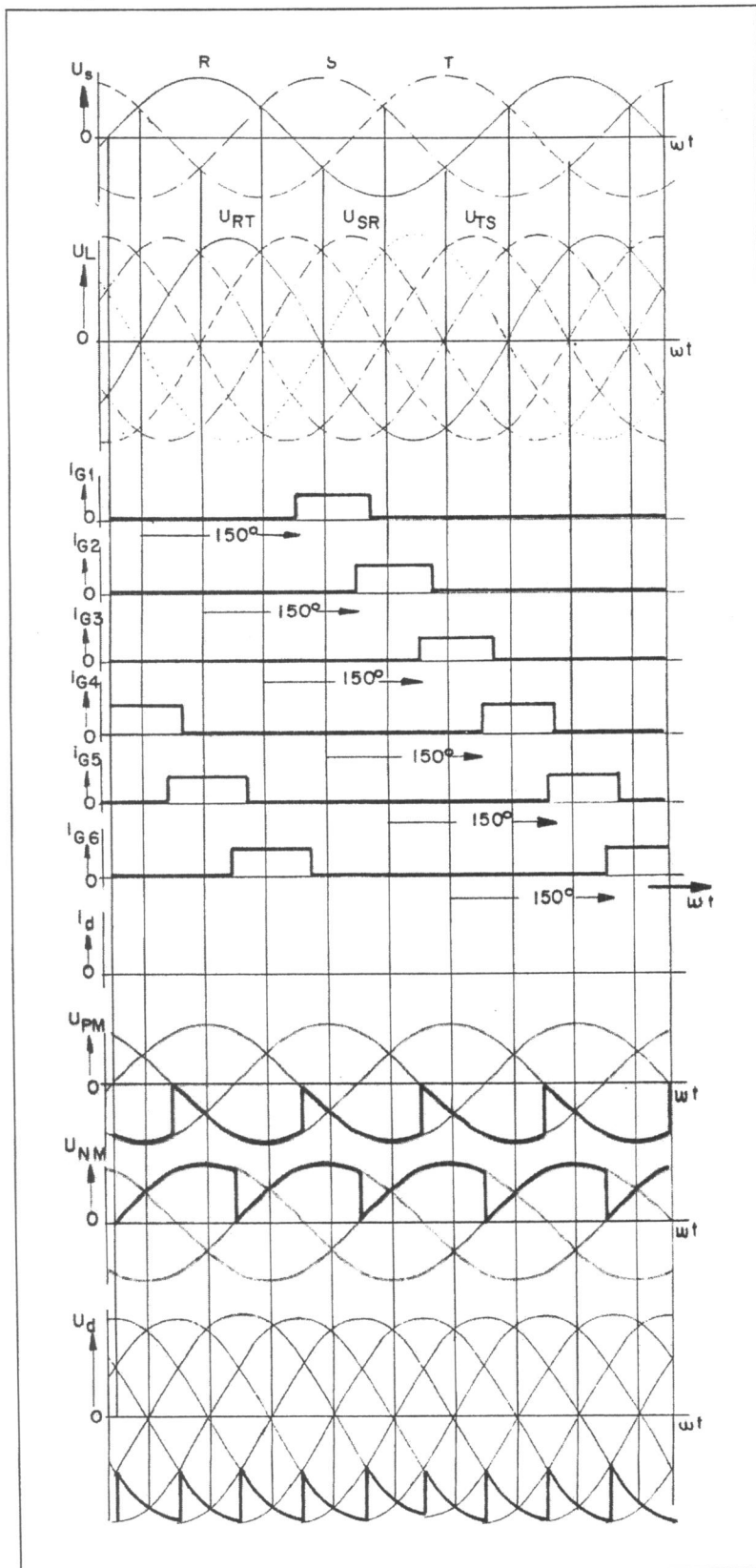
(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 120^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Formas de onda para $\alpha = 150^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Cálculo da tensão média na carga para α variando de 0° a 150°

$$V_{med} = 0,955 \times V_{L\ max} \times \cos \alpha$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para α variando de 0° a 150°

$$V_{efc} = V_{L\ max} \sqrt{0,955 \left[\frac{\pi}{6} + 0,433 \cos 2\alpha \right]}$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{Z} \Rightarrow Z = \sqrt{R^2 + Xl^2}$$

Cálculo da corrente média nos Tiristores

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$VR > V_{L\ max} \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{Z}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{Z}$$

Cálculo da corrente eficaz nos Tiristores (RMS)

$$I_{\text{efT}} = \frac{I_{\text{med}}}{\sqrt{3}}$$

Cálculo da corrente de linha eficaz (RMS)

$$I_{\text{Lef}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{\text{med}} \Rightarrow I_{\text{Lef}} = 0,816 \times I_{\text{med}}$$

Cálculo do rendimento

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um Tiristor de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{\text{dp}} = 6 \times (1,2 \times I_{\text{efT}}) \quad \text{W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{\text{ent}} = P_{\text{dc}} + P_{\text{dp}}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{dc}}}{P_{\text{ent}}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{\text{med}}}{V_{\text{efc}}} \right)^2 \times 100\%$$

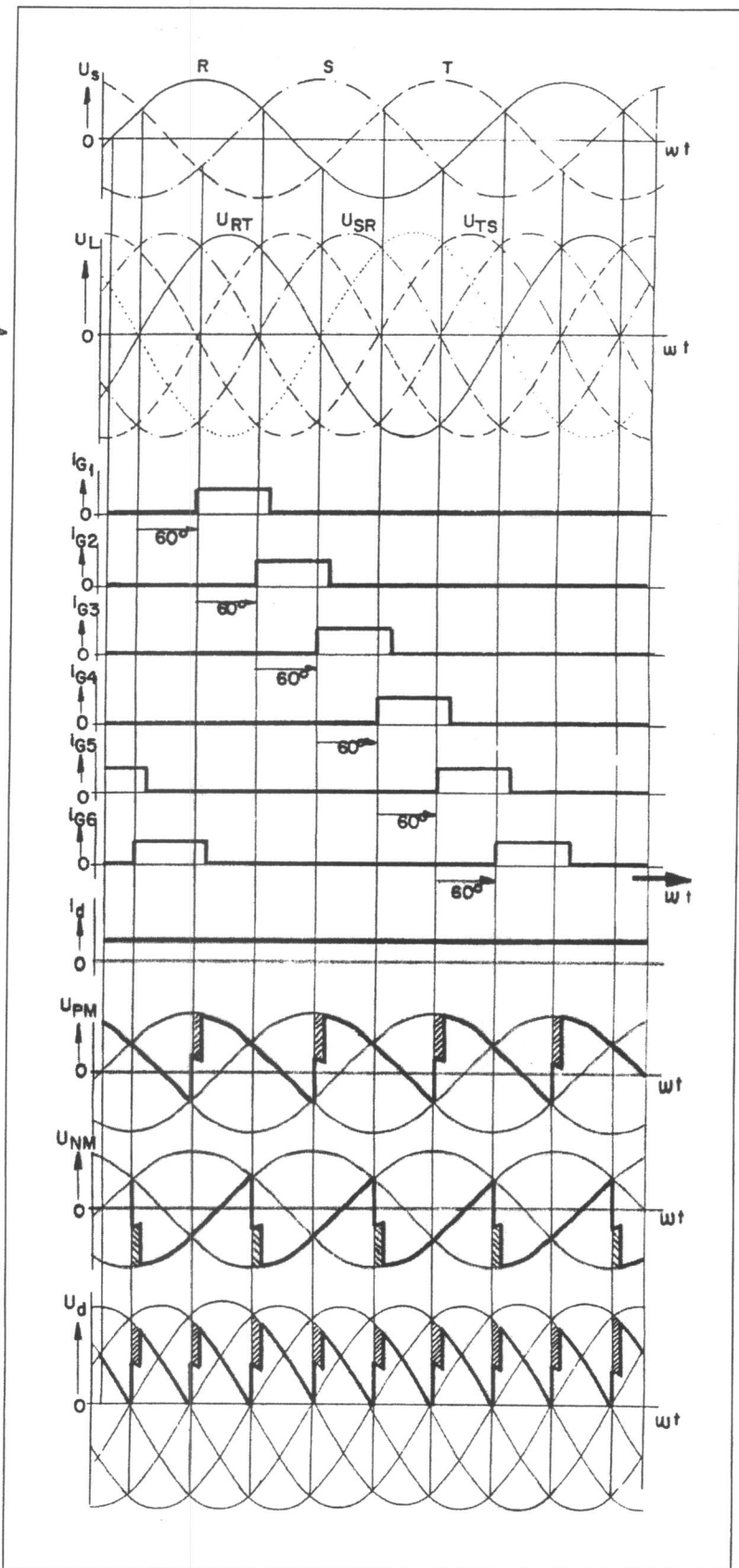
Dimensionamento dos Tiristores

O Tiristor escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no Tiristor maior que a calculada.

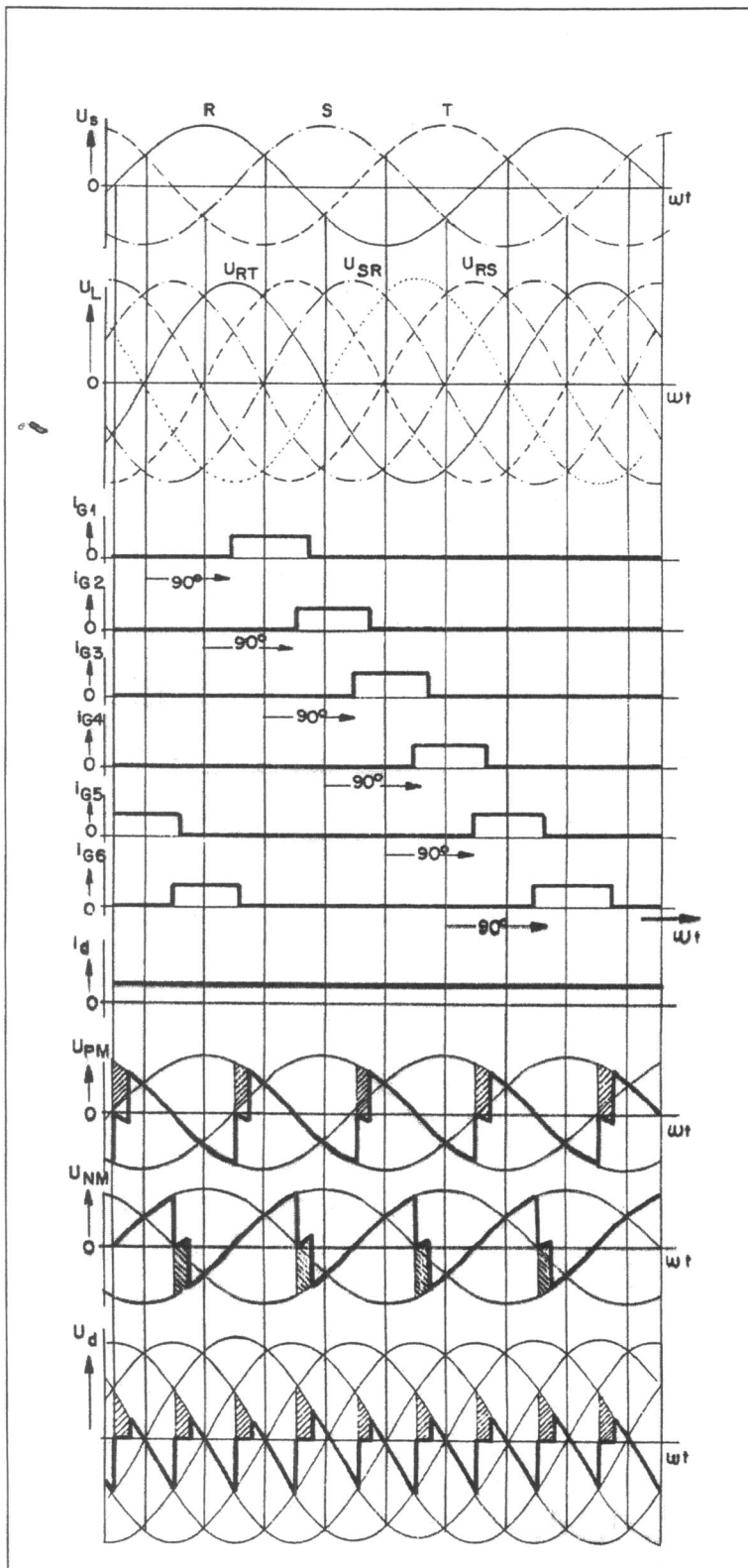
$V_{\text{Rd}} > V_{\text{R}} \text{ calculada}$

$I_{\text{efT}} > I_{\text{efT}} \text{ calculada}$

Influência da rede de alimentação na comutação do tiristor:



(Informativo técnico Siemens)



(Informativo técnico Siemens)

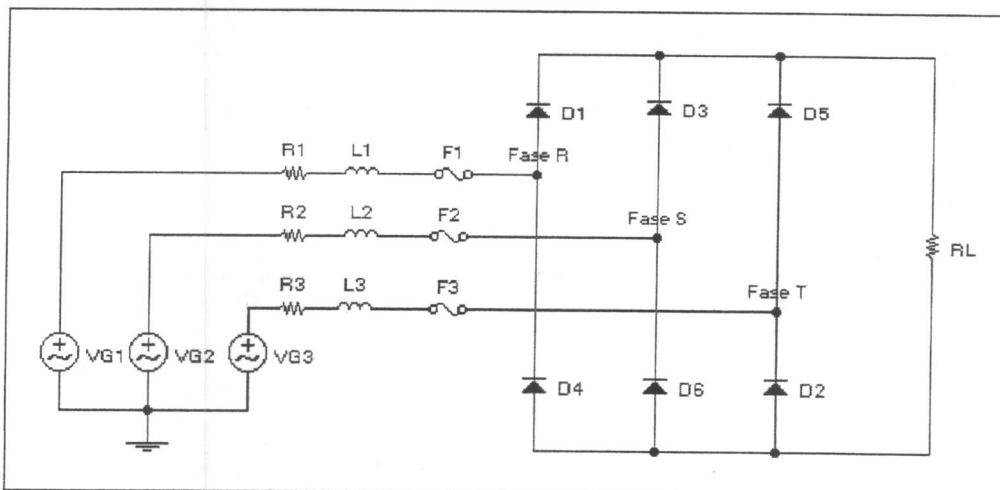
Considerando o efeito da indutância da rede, temos:

$$V_{med} = (0,955 \times V_L \max \cos \alpha) - (6 \times f \times L_s) I_{med}$$

Retificador trifásico bidirecional não controlado

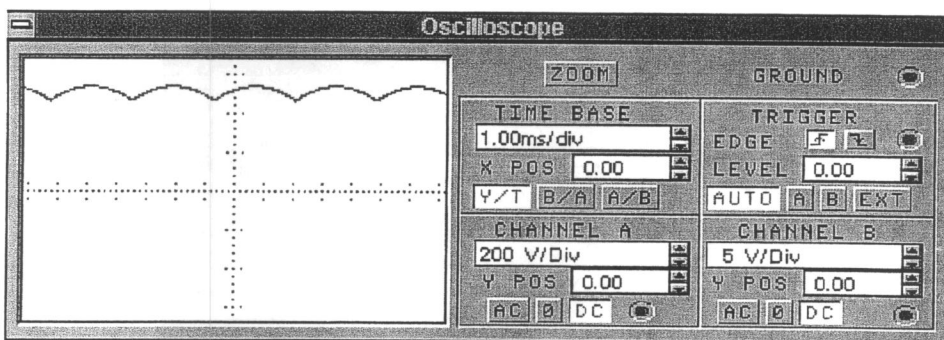
Nesta unidade, verificaremos o funcionamento do retificador trifásico de onda completa por meio da construção gráfica das formas de onda da tensão na carga, da tensão reversa nos diodos e da tensão nos fusíveis de alimentação.

Circuito:

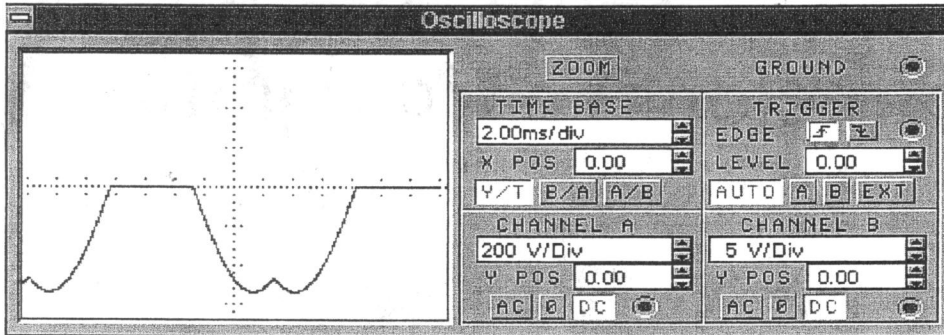


Formas de ondas:

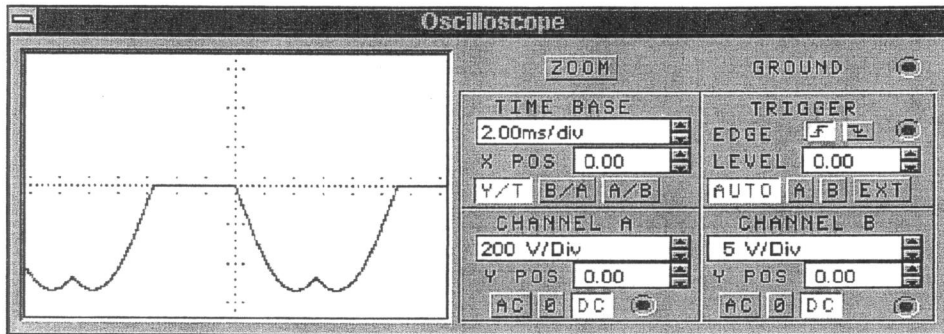
Tensão média na carga



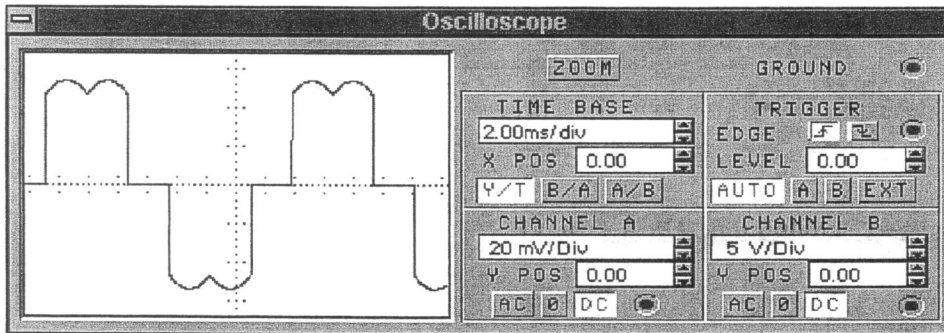
Tensão Reversa no Diodo D1



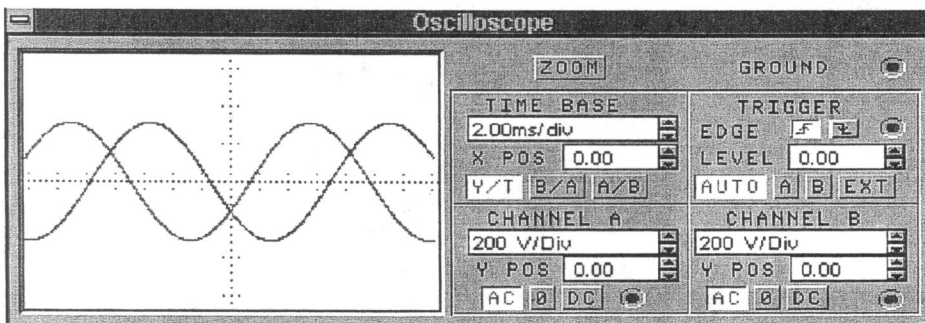
Tensão Reversa no Diodo 6



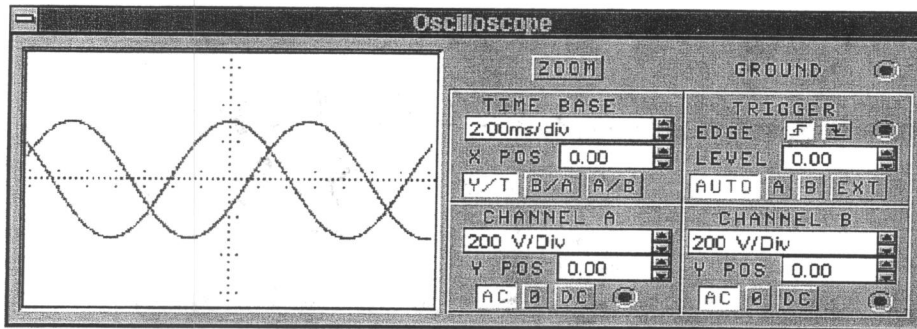
Queda de tensão no fusível F1



Tensões de Fase VRN e VSN



Tensões de Fase VSN e VTN



Dimensionamento

Cálculo da tensão média na carga

$$V_{med} = 0,955 \times V_L \text{ max}$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média nos diodos

$$I_{med} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão reversa nos diodos

$$V_R > V_L \text{ max} \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo da tensão eficaz na carga

$$V_{efc} = 0,956 \times V_L \text{ max}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{\text{efc}} = \frac{V_{\text{efc}}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{\text{dc}} = \frac{V_{\text{efc}}^2}{R}$$

Cálculo da corrente eficaz no diodo (RMS)

$$I_{\text{efd}} = \frac{I_{\text{med}}}{\sqrt{3}}$$

Cálculo da corrente de linha eficaz (RMS)

$$I_{\text{Lef}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{\text{med}} \Rightarrow I_{\text{Lef}} = 0,816 \times I_{\text{med}}$$

Cálculo do rendimento

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um diodo de potência é de aproximadamente 1,2 V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{\text{dp}} = 6 \times (1,2 \times I_{\text{efd}}) \text{ W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{\text{ent}} = P_{\text{dc}} = P_{\text{dp}}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{dc}}}{P_{\text{ent}}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{\text{med}}}{V_{\text{efc}}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos diodos

O diodo escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada e uma corrente eficaz no diodo maior que a calculada.

$V_{Rd} > V_R$ calculada

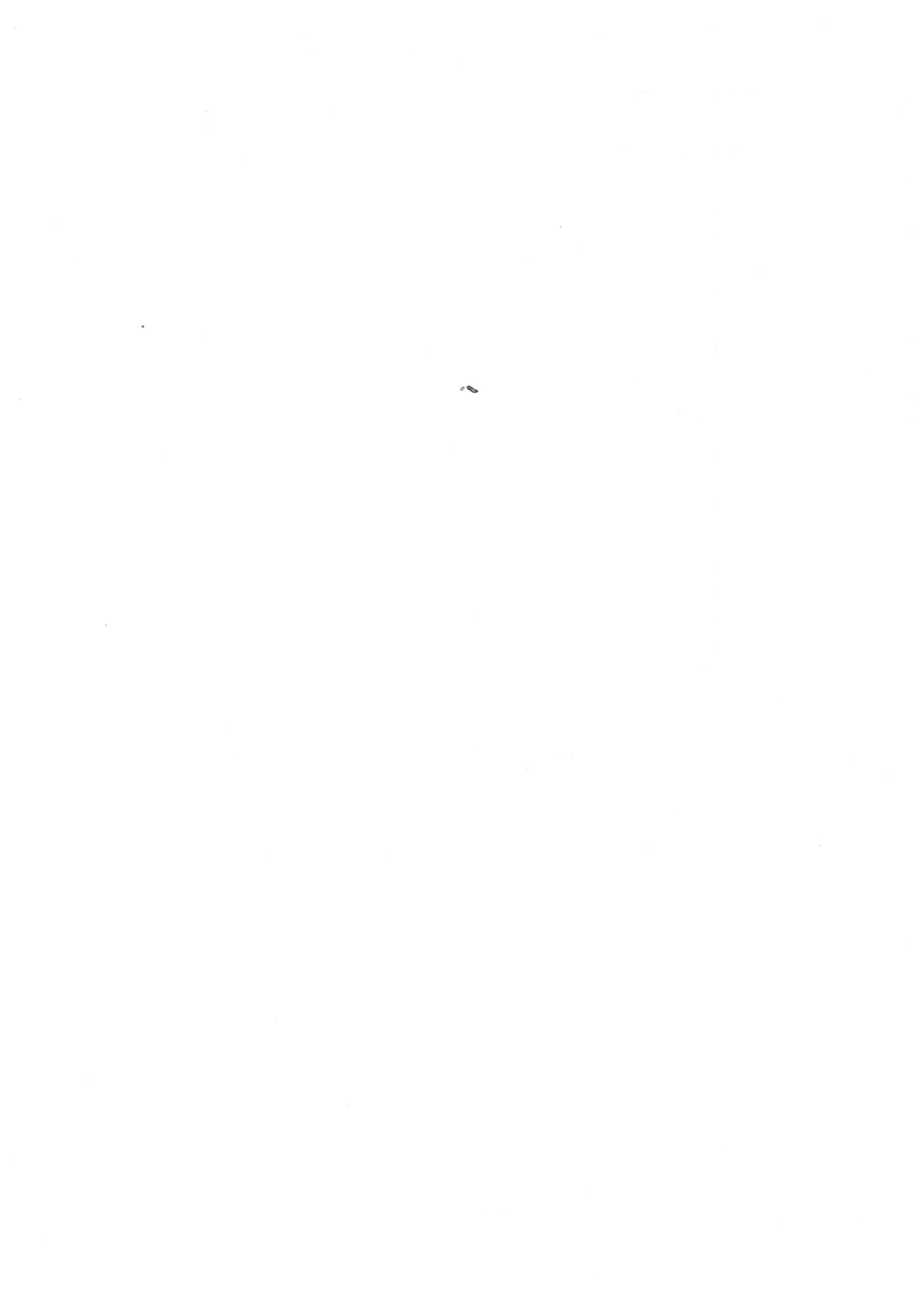
$I_{efd} > I_{ef}$ calculada

As equações acima podem ser usadas para carga indutiva, observando-se as seguintes análises:

- Para os cálculos da corrente I_{med} , P_{dc} , I_{efc} devemos substituir nas equações R por Z (Impedância da carga), onde:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

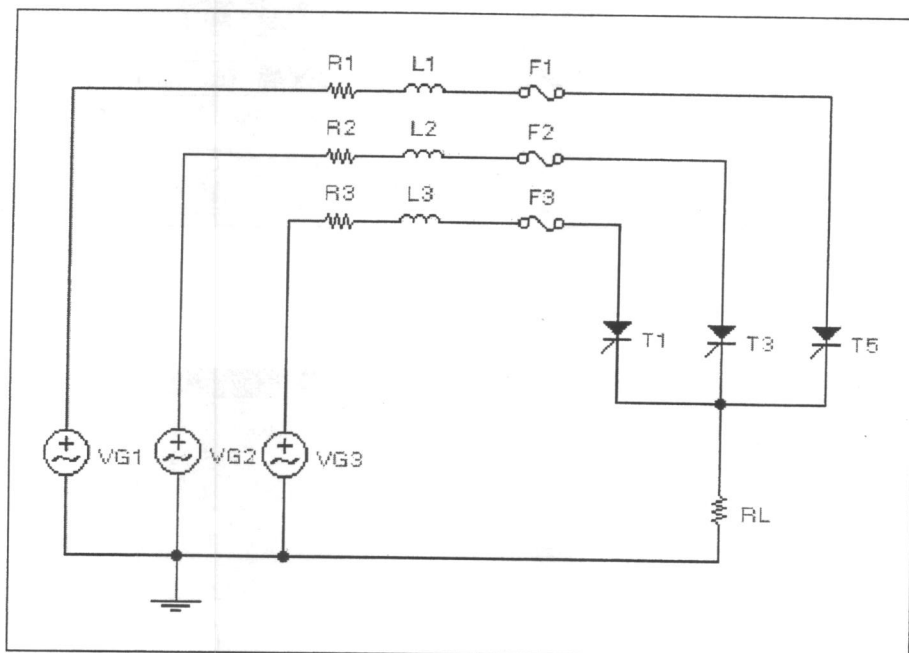
- Para a análise do retificador bidirecional carga indutiva vamos considerar um indutor com um valor muito alto, que por sua vez, absorve uma corrente do retificador, cuja onda tem formato bastante liso (consideração teórica), e a carga deve ser considerada em regime contínuo de trabalho.



Retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva

Aqui, verificaremos o funcionamento do retificador trifásico totalmente controlado unidirecional com carga resistiva e carga indutiva. Essa análise vai basear-se na construção gráfica das formas de onda da tensão na carga, da tensão reversa nos diodos e da tensão nos fusíveis de alimentação para diversos valores do ângulo α .

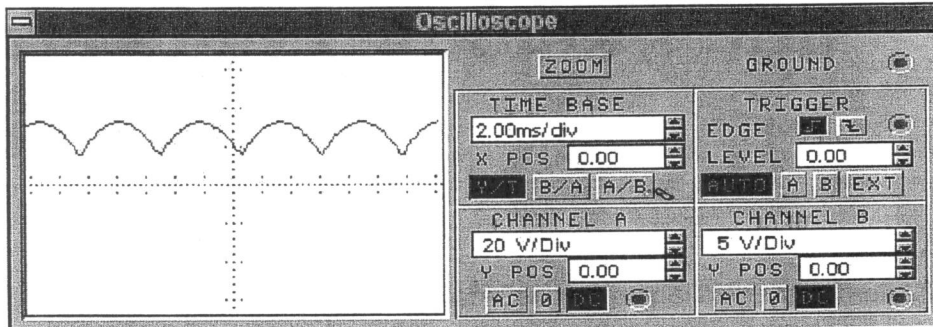
Circuito:



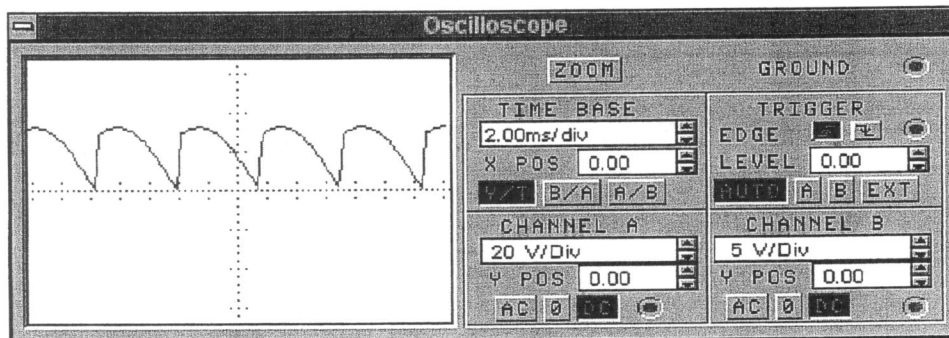
Formas de onda:

Tensão média na carga para diversos valores do ângulo de disparo α :

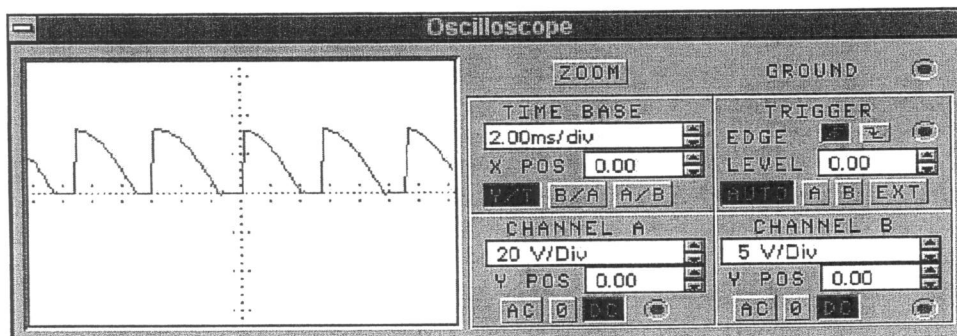
Para $\alpha = 0^\circ$



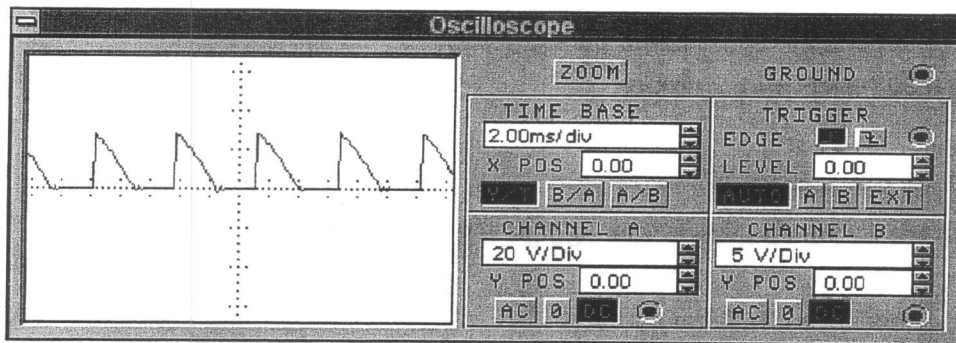
Para $\alpha = 30^\circ$



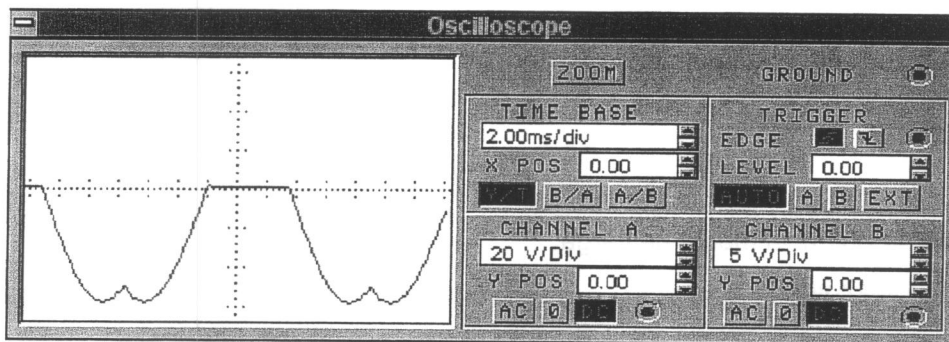
Para $\alpha = 60^\circ$



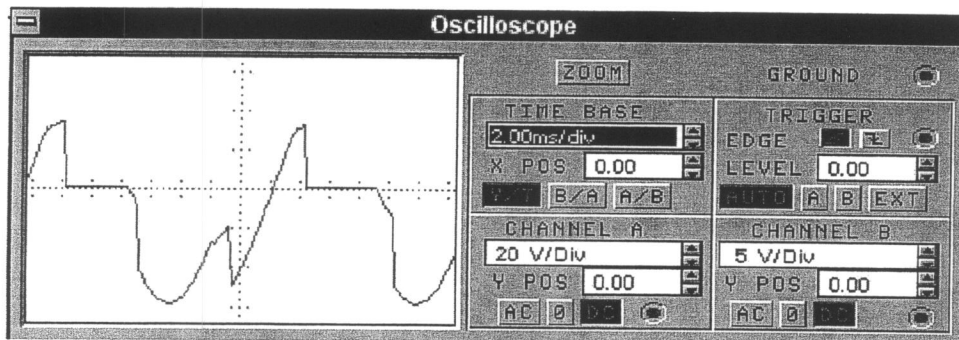
Para $\alpha = 90^\circ$



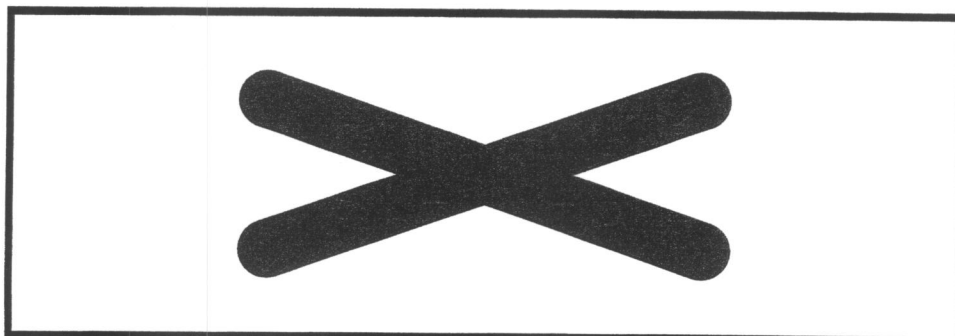
Tensão reversa no Tiristor T1 para $\alpha = 0^\circ$



Tensão reversa no Tiristor T1 para $\alpha = 60^\circ$



Forma de onda no Fusível F1 para $\alpha = 60^\circ$



Dimensionamento

Cálculo da tensão média na carga para $\alpha = 0^\circ$

$$V_{med} = 0,827 \times V_{F \max} \times \cos \alpha$$

Para $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$

$$V_{med} = 0,477 \times V_{F \max} [0,866 \cos \alpha - 0,5 \sin \alpha + 1]$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média em cada tiristor

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha = 0^\circ$

$$V_{efc} = V_{F \max} \sqrt{0,477 \times (1,05 + 0,433 \cos 2\alpha)}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$

$$V_{efc} = V_{F \max} \sqrt{0,477 \frac{5\pi}{12} \frac{\alpha}{2} + 0,22 \cos \alpha + 0,125 \sin 2\alpha}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$V_{RT} \geq \sqrt{3} \times V_{f_{max}} \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo do rendimento do Retificador

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um diodo de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{dp} = 3 \times (1,2 \times I_{efd}) \text{ W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{ent} = P_{dc} + P_{dp}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{dc}}{P_{ent}} \right) \times 100\%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{med}}{V_{efc}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos diodos

O diodo escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no diodo maior que a calculada.

$$V_{Rd} > V_R \text{ calculada}$$

$$I_{efd} > I_{efd} \text{ calculada}$$

Cálculo da corrente eficaz no diodo e da corrente eficaz na linha de alimentação RMS

$$I_{efd} = I_{Lef} = \frac{I_{med}}{\sqrt{3}}$$

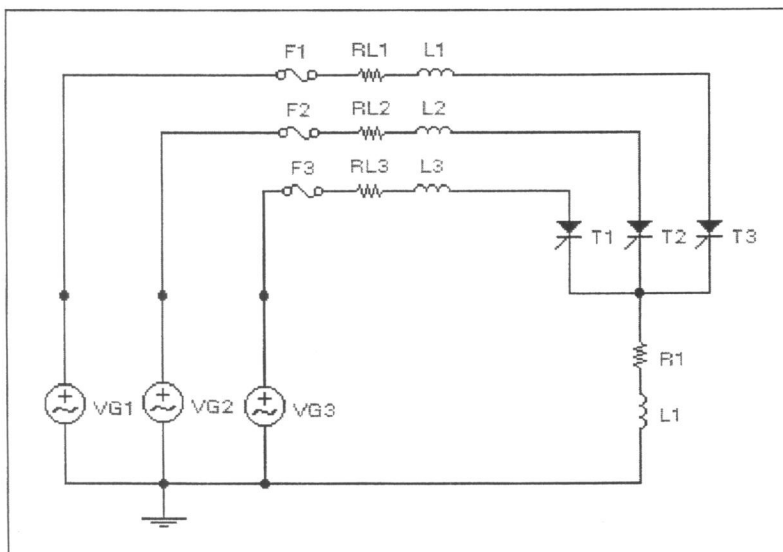
Retificador Trifásico Totalmente Controlado Unidirecional

Carga Resistiva e Indutiva (RL)

Para a análise do retificador totalmente controlado unidirecional com carga indutivamos considerar um indutor com um valor muito alto, que, por sua vez, absorve uma corrente do retificador, cuja onda tem formato bastante liso (consideração teórica).

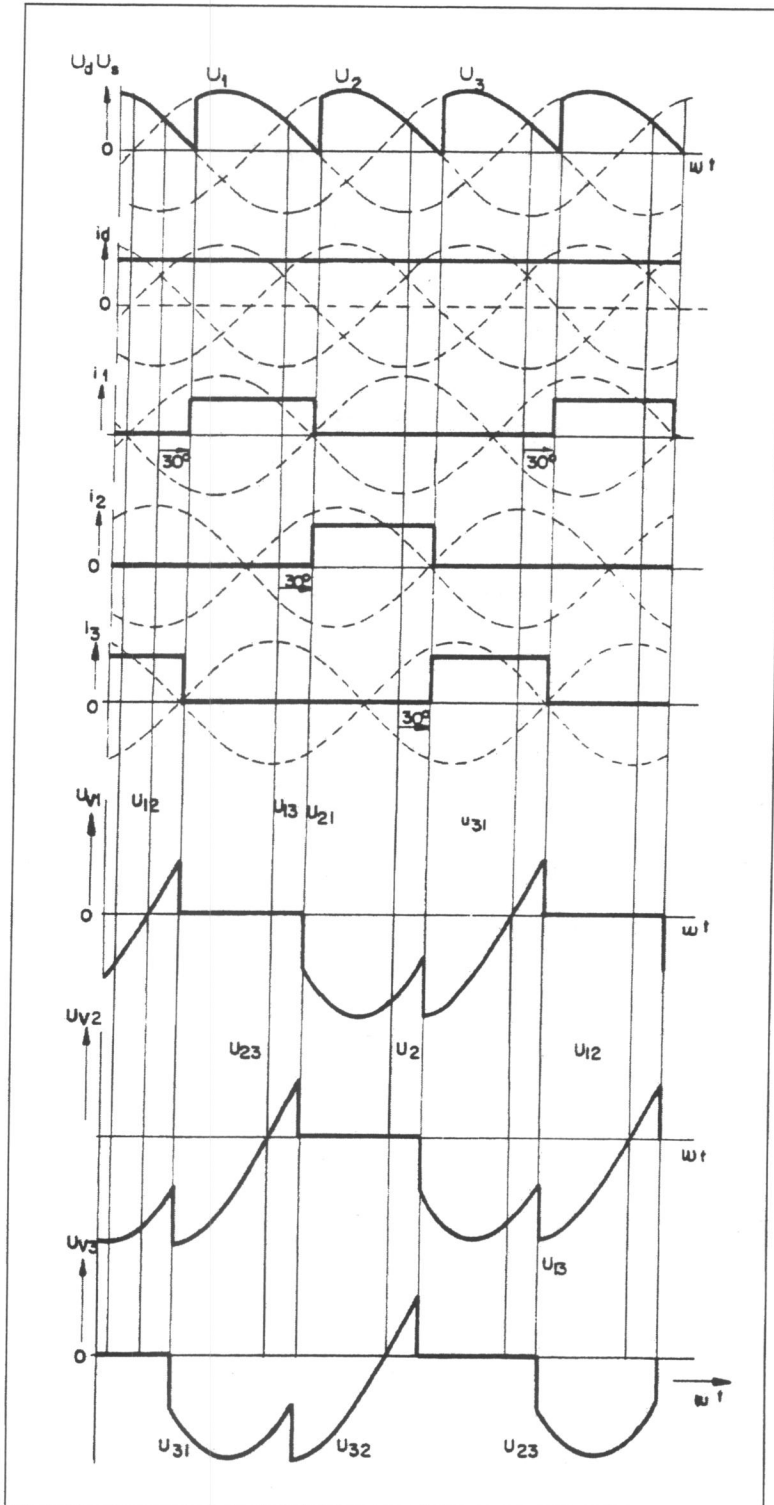
Para uma primeira análise não vamos considerar os transientes gerados pela carga indutiva, ou seja, vamos analisar o sistema em regime contínuo de trabalho.

Circuito:



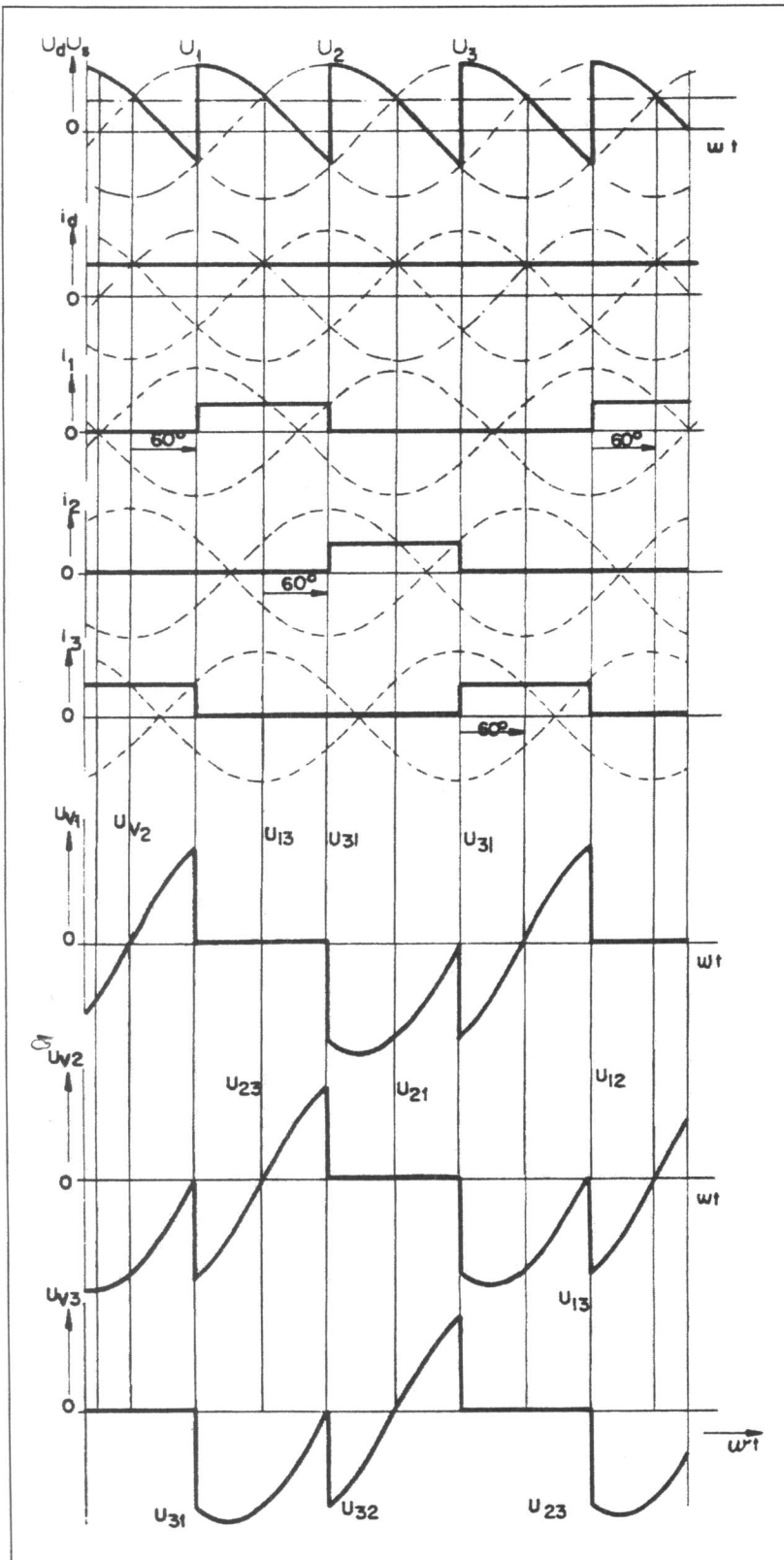
Formas de onda da tensão média na carga, corrente média na carga e tensão reversa nos tiristores:

Para $\alpha = 30^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Para $\alpha = 60^\circ$



(Informativo técnico Siemens)

Cálculo da tensão média na carga para α variando de 0° a 150° :

$$V_{med} = 0,827 \times V_f \max \times \cos \alpha$$

Cálculo da corrente média na carga

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R}$$

Cálculo da corrente média em cada tiristor

$$I_{medT} = \frac{I_{med}}{3}$$

Cálculo da potência média na carga

$$P_{med} = V_{med} \times I_{med}$$

Cálculo da tensão eficaz na carga para α variando de 0° a 150°

$$V_{efc} = V_{Fmax} \sqrt{0,477 \times (1,05 + 0,433 \cos 2\alpha)}$$

Cálculo da corrente eficaz na carga

$$I_{efc} = \frac{V_{efc}}{R}$$

Cálculo da potência dissipada na carga

$$P_{dc} = \frac{V_{efc}^2}{R}$$

Cálculo da tensão reversa nos Tiristores

$$V_{RT} \geq \sqrt{3} \times V_f \max \times K$$

$$K = 2,2 \text{ a } 2,5$$

Cálculo do Rendimento do Retificador

Sabendo que a queda de tensão aproximada em um diodo de potência é de aproximadamente 1,2V, temos:

- Cálculo da potência dissipada na ponte

$$P_{dp} = 3 \times (1,2 \times I_{efd}) \text{ W}$$

- Cálculo da potência de entrada

$$P_{ent} = P_{dc} + P_{dp}$$

- Rendimento

$$\eta = \left(\frac{P_{dc}}{P_{ent}} \right) \times 100 \%$$

Podemos calcular o rendimento através da equação seguinte, com grande aproximação:

$$\eta = \left(\frac{V_{med}}{V_{efc}} \right)^2 \times 100\%$$

Dimensionamento dos diodos

O diodo escolhido deve possuir uma tensão reversa maior que a calculada, e uma corrente eficaz no diodo maior que a calculada.

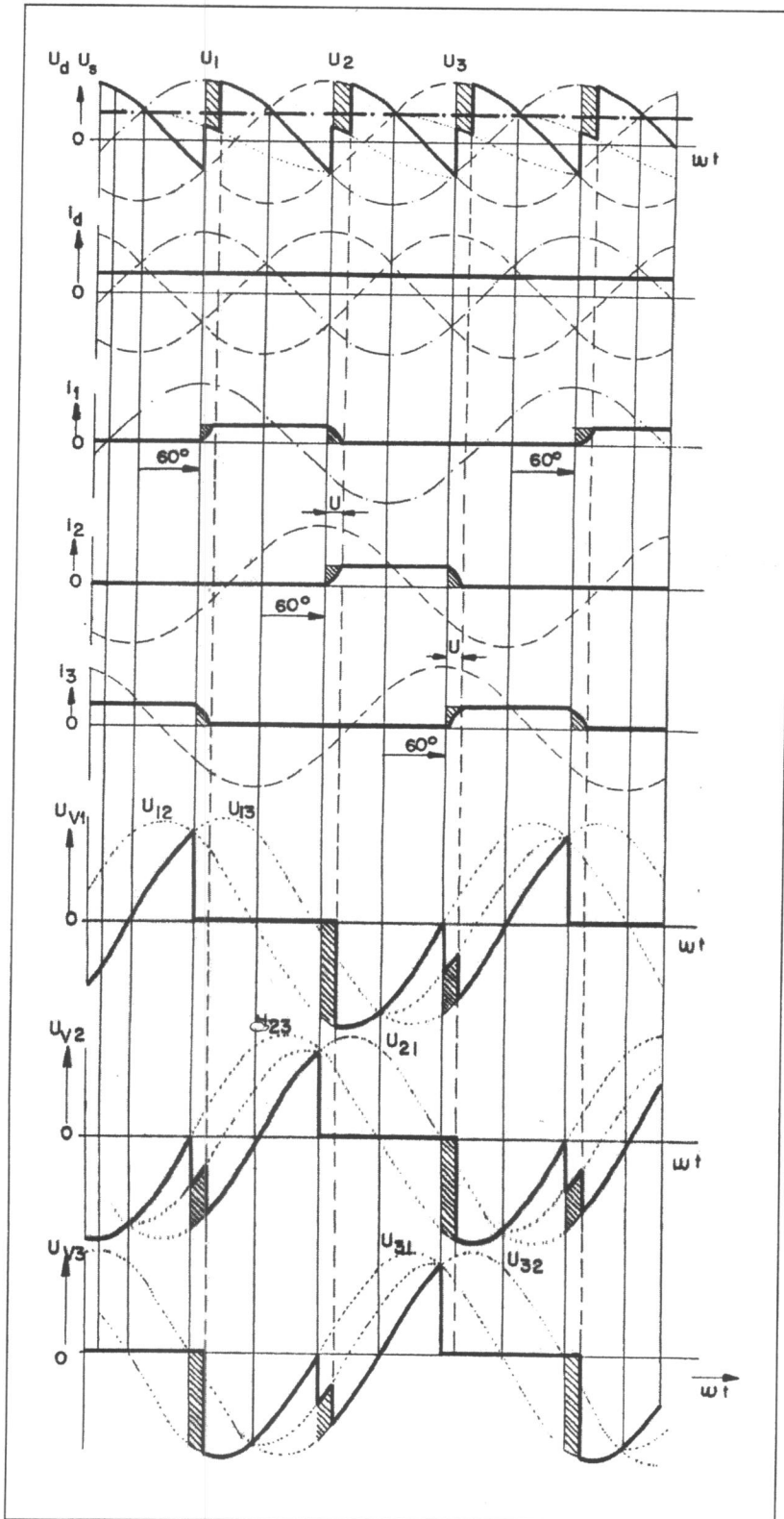
$$V_{Rd} > V_R \text{ calculada}$$

$$I_{efd} > I_{efd} \text{ calculada}$$

Cálculo da corrente eficaz no diodo e da corrente eficaz na linha de alimentação RMS

$$I_{efd} = I_{Lef} = \frac{I_{med}}{\sqrt{3}}$$

Influência da rede de alimentação nas formas de onda de saída:



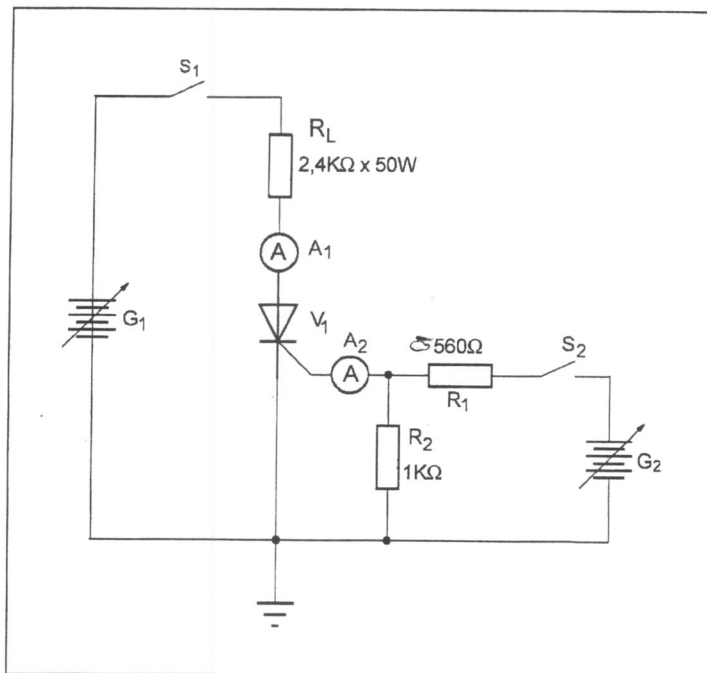
(Informativo técnico Siemens)

Verificar o funcionamento de um SCR

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do SCR utilizando duas fontes.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar G_1
3. Ajustar G_2

4. Executar medições de:

I_{GATE}

I_{AK}

V_{AK}

V_G

V_{CARGA}

5. Decrementar G2

6. Explicar o ocorrido

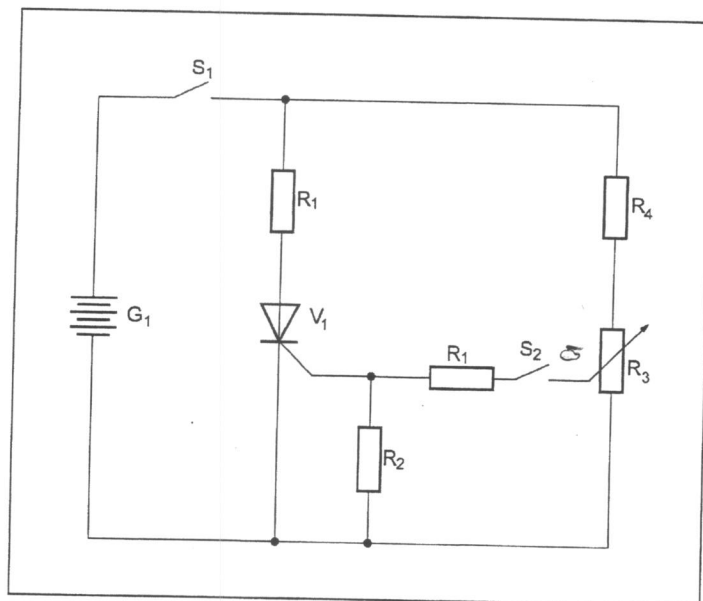
8

Verificar o funcionamento de um SCR com divisor de tensão

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do SCR utilizando divisores de tensão.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar G_1
3. Ligar S_1
4. Ajustar R_3 até disparar o SCR

5. Executar medições de:

I_{GATE}

I_{AK}

I_{AK}

V_{GATE}

V_{AK}

6. Voltar o potenciômetro R3

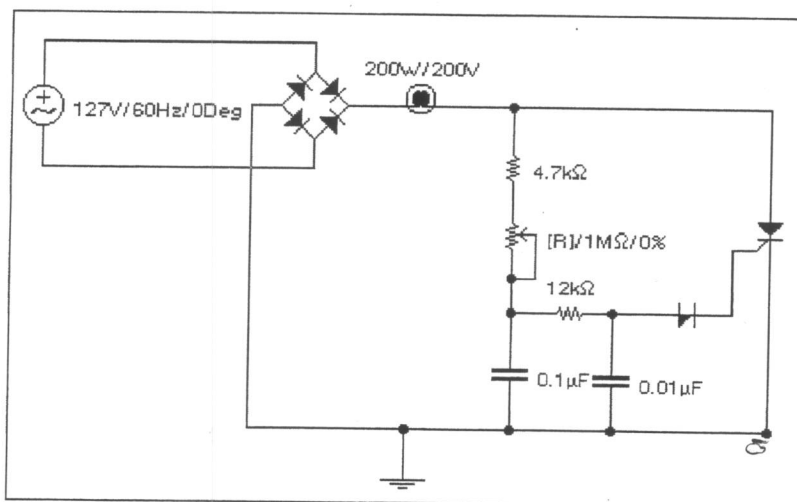
7. Explicar o ocorrido

9

Verificar o funcionamento do diodo schockley

Este ensaio tem como objetivo utilizar o diodo de 4 camadas para disparar o SCR. tensão.

Procedimentos



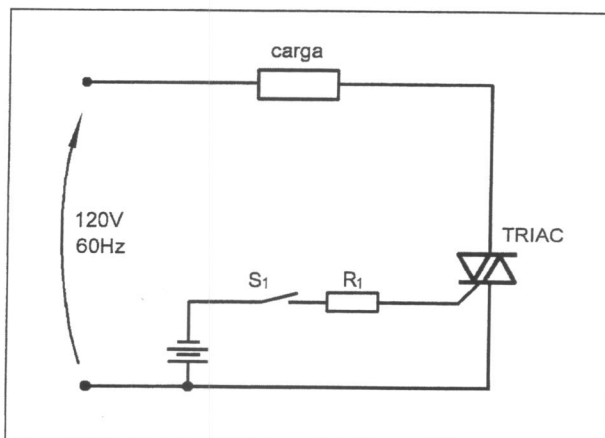
1. Montar o circuito
2. Efetuar medições

Verificar o funcionamento do triac com fonte CC

Este ensaio tem como objetivo verificar o triac com fonte CC.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar a fonte CC
3. Ajustar S1

4. Executar medições de:

I_G

I_{AK}

V_G

V_{AK}

V_{CARGA}

5. Abrir S1

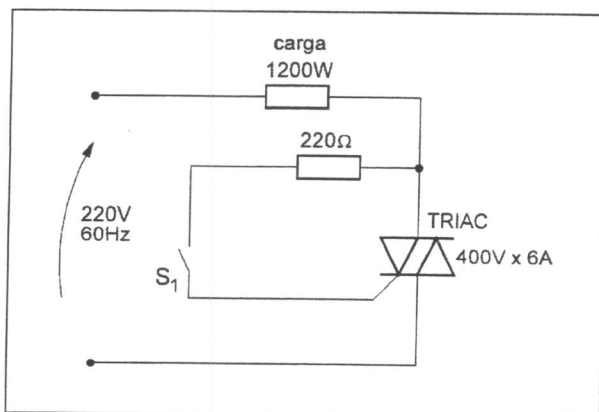
6. Explicar o ocorrido

Verificar o funcionamento do triac em CA

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do triac com fonte CA.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Fechar S₁
3. Executar medições de:

I_G
 I_{AK}
 V_G
 V_{AK}
 V_{CARGA}

4. Abrir S1

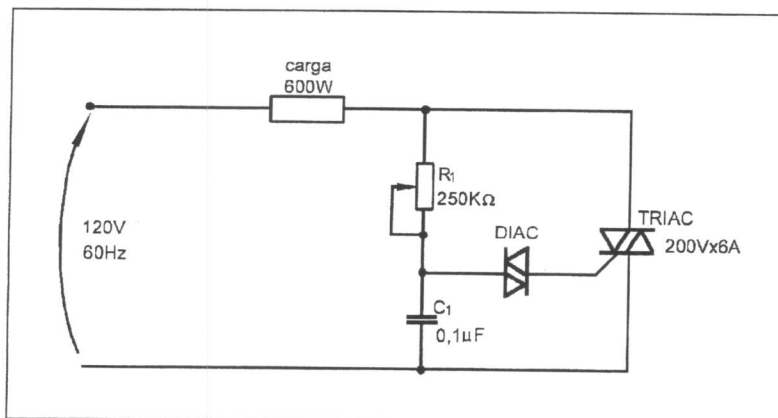
5. Explicar o ocorrido

Verificar o funcionamento do diac

Este ensaio tem como objetivo utilizar o diac para disparar o triac por controle de fase.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar R_1 para o valor máximo
3. Reduzir lentamente o valor de R_1
4. Executar medições de:
 I_{AK}
 V_{AK}
 V_{CARGA}

5. Elaborar os gráficos, utilizando o osciloscópio para:

$$V_{\text{CARGA}} \cong V_{\text{REDE}}$$

$$V_{\text{CARGA}} \cong \frac{V_{\text{REDE}}}{2}$$

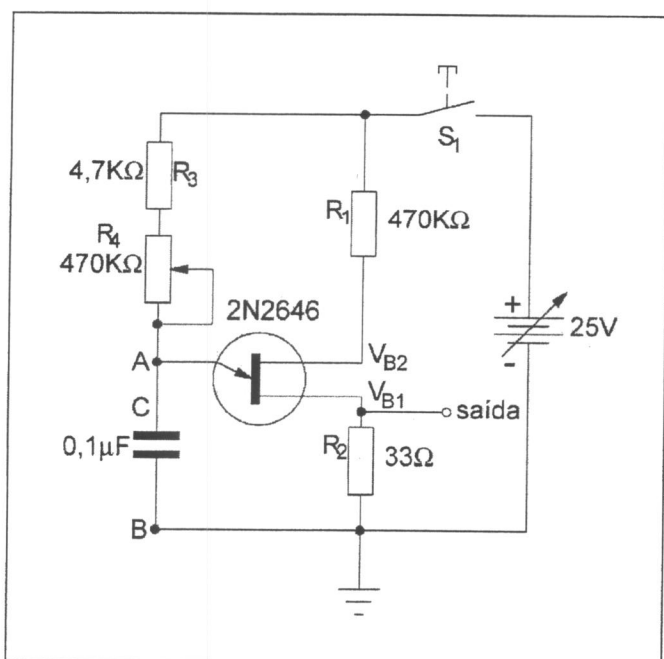
6. Relacionar a “Vg” com “V_{CARGA}”

Verificar o funcionamento de UJT

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do UJT.

Procedimentos

1. Montar o circuito a seguir.



2. Mantendo S_1 aberta, ajuste R_4 para a resistência máxima.
3. Aplicar 25V_{CC} na entrada do circuito e feche S_1 .
4. Conectar o canal 1 do osciloscópio sobre o capacitor C.

Observação

Lembre-se de que o terminal massa do osciloscópio deve estar conectado à massa do circuito.

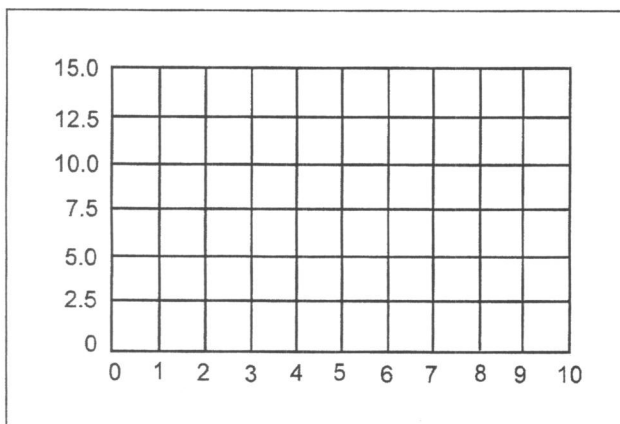
5. Ajustar a base de tempo horizontal até obter de 2 a 3 ciclos. Mantenha-a calibrada.
6. Medir a tensão de pico a pico. Anote o valor obtido e o alcance utilizado.

Tensão V_{PP}/div

Alcance vertical V_{PP}/div

7. Observar a forma de onda e complete o diagrama a seguir. Indique a base de tempo utilizada.

Base de tempo horizontal



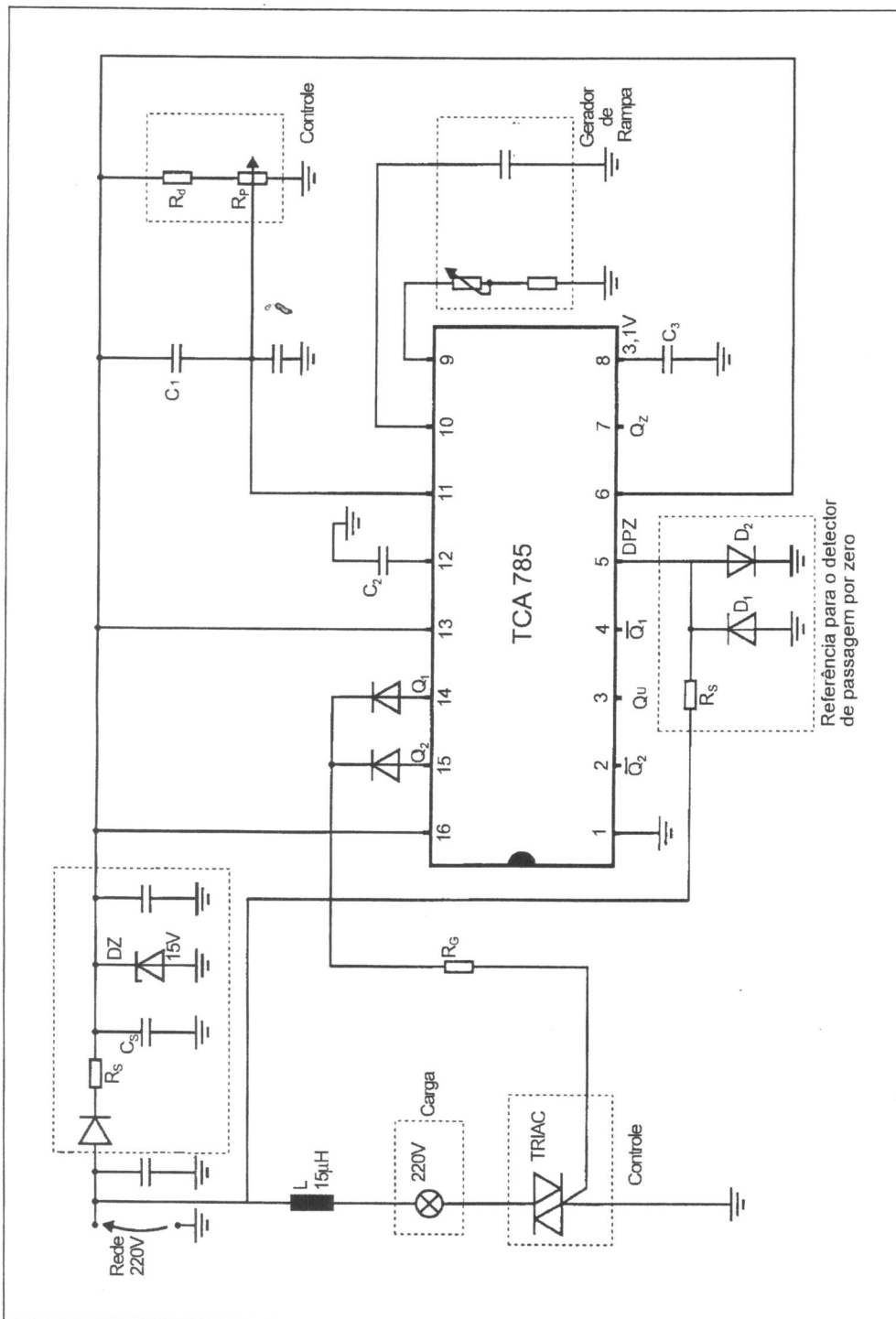
8. Calcular a frequência dos pulsos gerados.

Frequência:

Verificar o funcionamento do TCA-785

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do TCA-785

Procedimentos



1. Montar a placa interligando-a.

Eletrônica de potência

2. Com o auxílio do osciloscópio anotar:

V_{FONTE}
 V_{controle} - pino 11
 $V_{\text{referência}}$ - pino 5
 V_{rampa} - pino 10
 V_{disparo} - pino 14
 V_{carga}

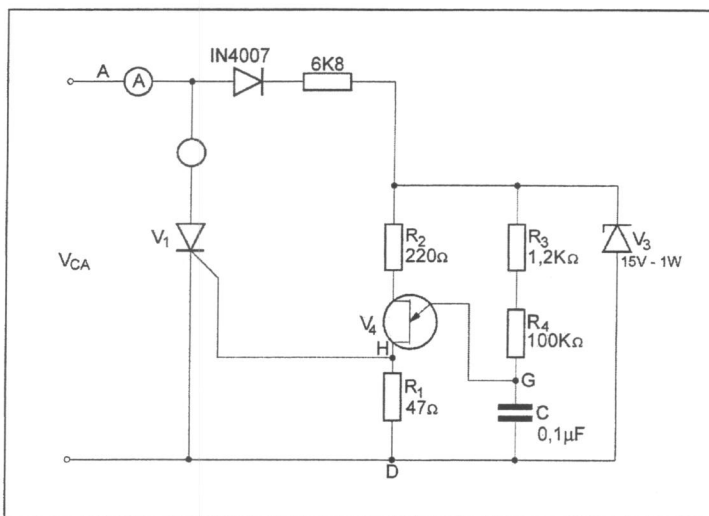


Disparar SCR com UJT

Este ensaio tem como objetivo utilizar o UJT para disparo do SCR.

Procedimentos

1. Montar o circuito a seguir.



2. Ajustar R_4 para o valor máximo.
3. Reduzir lentamente R_4 .

4. Com o auxílio do osciloscópio anotar:

V_{FONTE}

V_{V3}

V_C

V_{R1}

V_{RL}

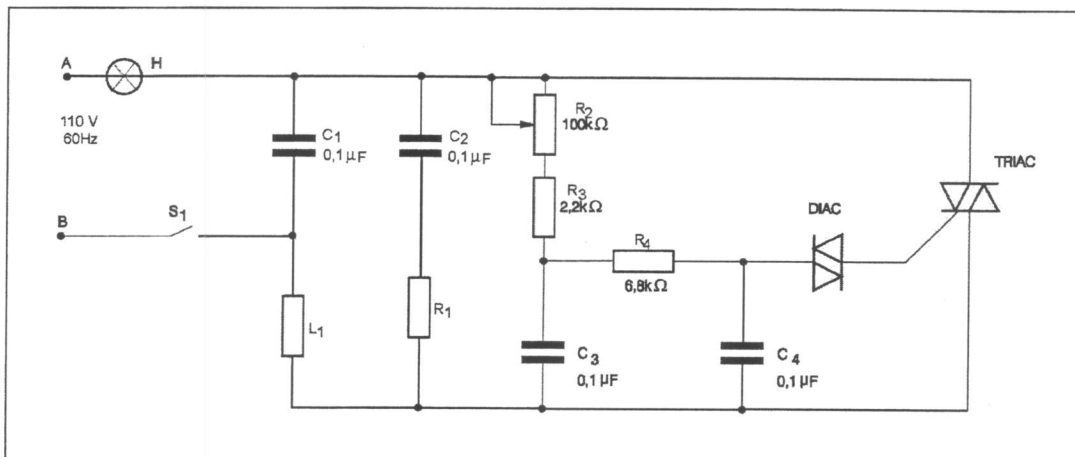
V_{AK}

Montar circuito para controle de iluminação

Este ensaio tem como objetivo aplicar os tiristores em um controle manual de iluminação.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar R2 para o valor máximo
3. Fechar S1
4. Reduzir lentamente o valor de R2
5. Explicar o ocorrido

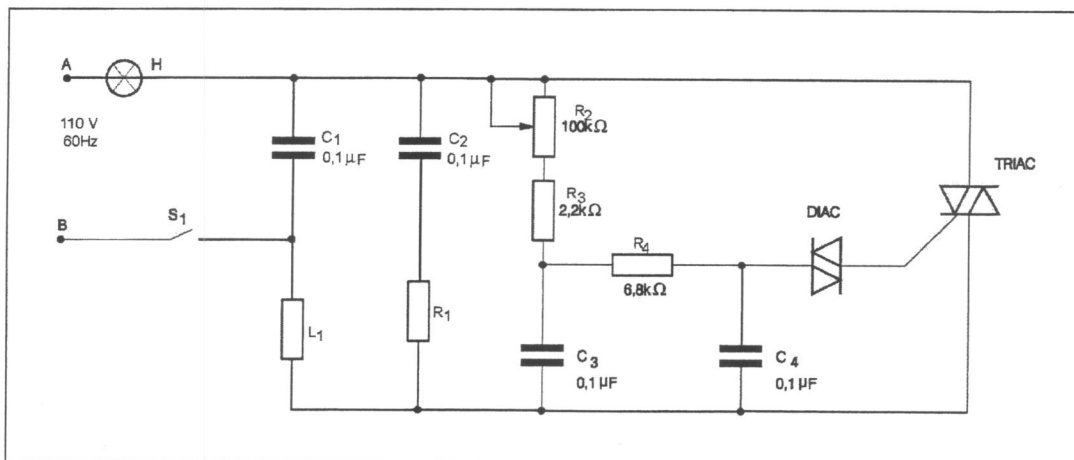


Montar circuito para controle automático de iluminação

Este ensaio tem como objetivo aplicar os tiristores em um controle automático de iluminação.

Procedimentos

1. Montar o circuito abaixo



2. Ajustar R4 para o valor médio
3. Fechar S1
4. Indicar luz sobre o LDR
5. Explicar o ocorrido

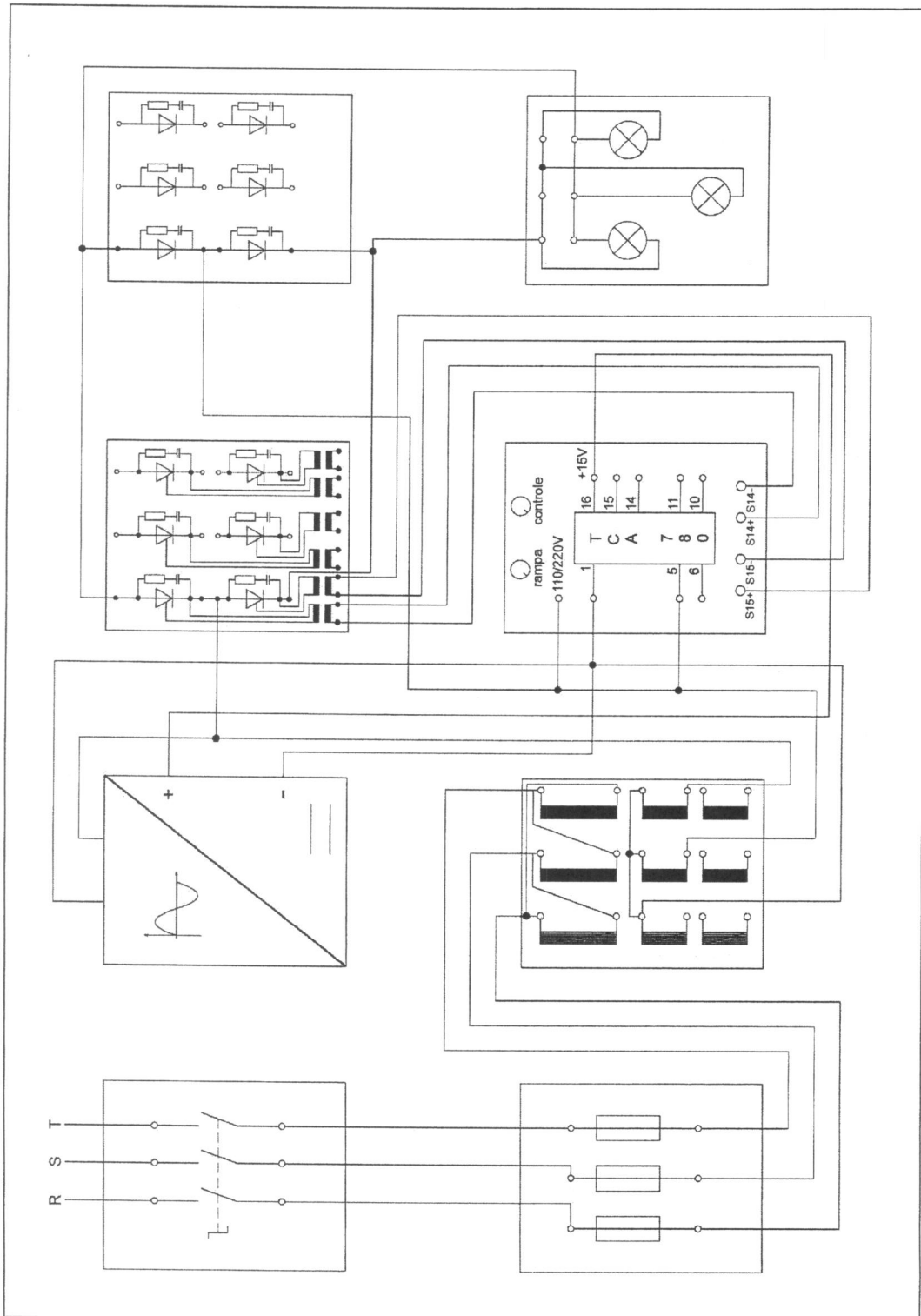
Montar um retificador monofásico semi-controlado

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do retificador monofásico semi-controlado.

Procedimentos

01

1. Montar o circuito conforme o diagrama a seguir. Utilizar como carga o módulo de lâmpadas.



Eletrônica de potência

2. Com auxílio do osciloscópio, verificar as formas de onda das tensões e correntes indicadas.

$V_{ENTRADA}$

V_{CARGA}

V_{SCR}

U_{DIODO}

I_{CARGA}

I_{LINHA}

Tensão de rampa pino 10

Pulso de disparo pino 14

Pulso de disparo pino 15

3. Trocar a carga resistiva do circuito pela carga indutiva (associação série entre indutor e reostato).
4. Repetir o passo 2 com e sem diodo de retorno. Desenhar as seguintes formas de ondas.

V_{ENT}

V_{SCR}

U_{DIODO}

I_{CARGA}

I_{LINHA}

Tensão na rampa U10

Pulso de disparo U14

Pulso de diparo U12

V_{CARGA}

5. Desligar um SCR do circuito e verificar a forma de onda na carga. Explicar o porquê da diferença em relação à forma de onda obtida no passo 4.
6. Religar o SCR e desligar um diodo da ponte. Verificar a forma de onda na carga e explique a diferença com relação à forma de onda medida no passo 5.
7. Religar o diodo e desligar os pulsos de disparo de um SCR. Verificar a forma de onda da tensão sobre a carga. Compará-la com a forma de onda medida no passo 4 e explicar a diferença, se existir.

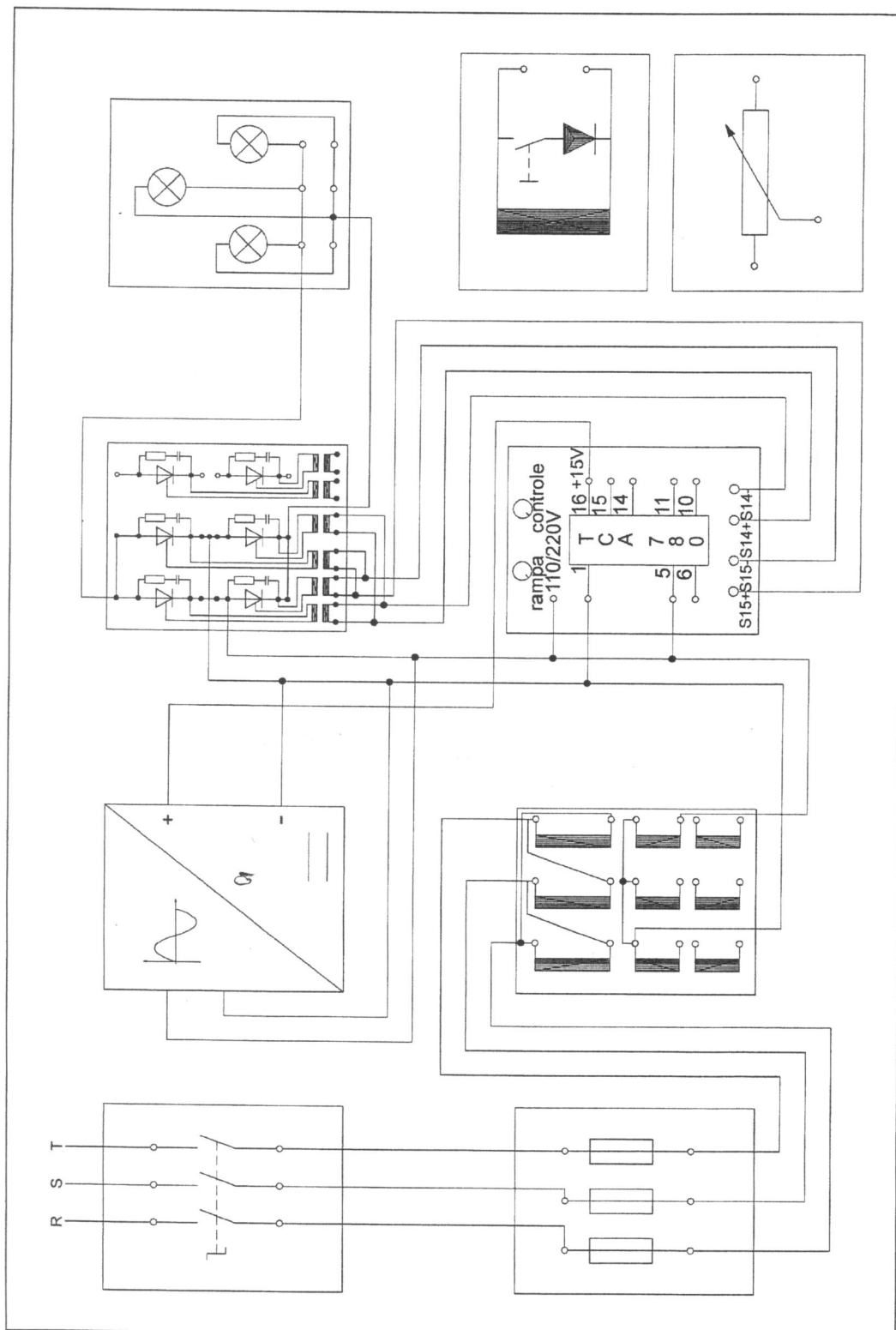
Montar um retificador monofásico controlado

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do retificador monofásico controlado.

Procedimentos

01

1. Montar o circuito a seguir. Utilizar como carga o módulo com três lâmpadas. Ajustar a rampa do módulo de disparo para que atue de 0 a 180°.

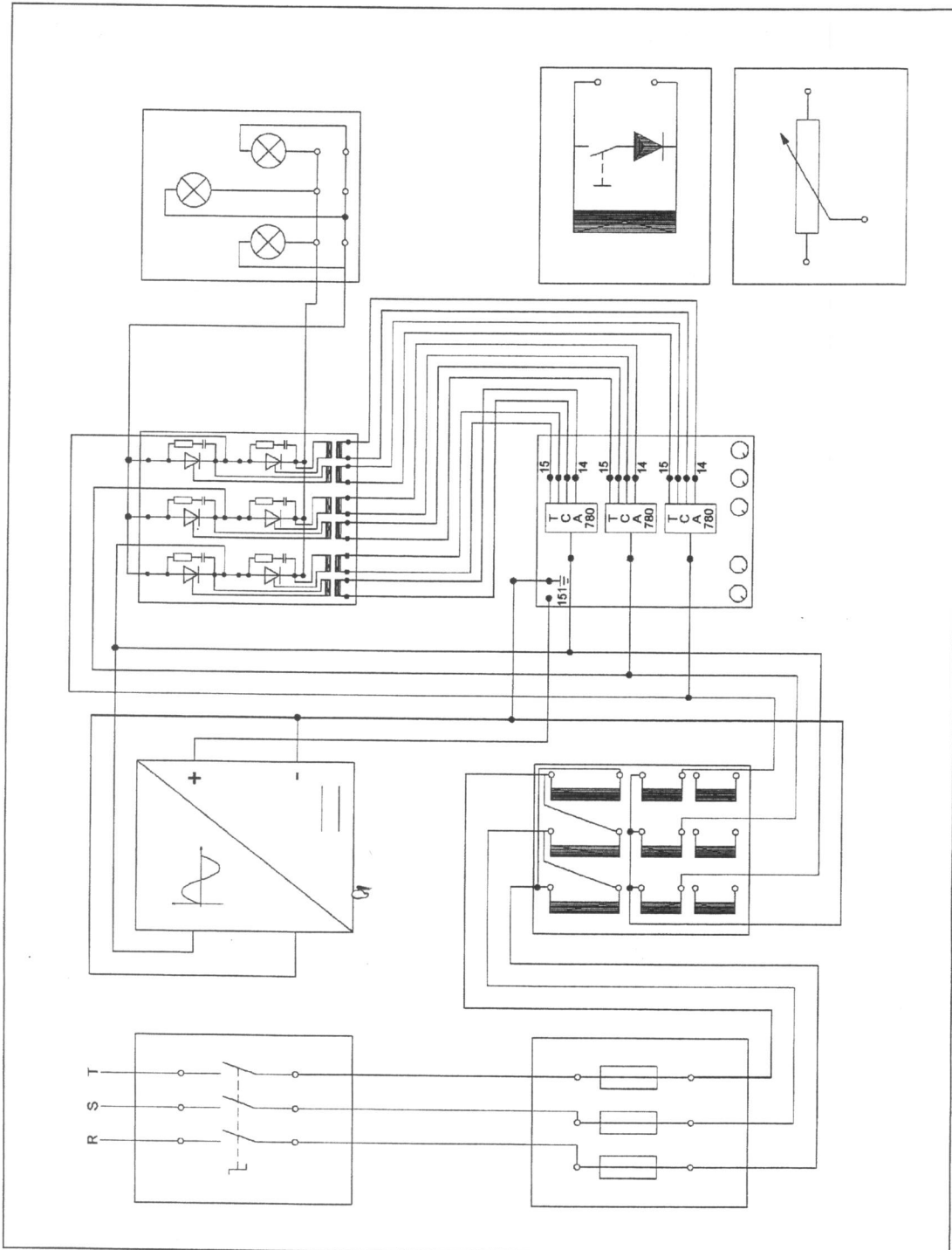


Montar um retificador trifásico controlado em ponte

Este ensaio tem como objetivo verificar o funcionamento do retificador trifásico controlado em ponte.

Procedimentos

1. Montar o circuito do retificador mostrado a seguir, observando o sincronismo da rede com módulos de disparo. Utilizar como carga as três lâmpadas.



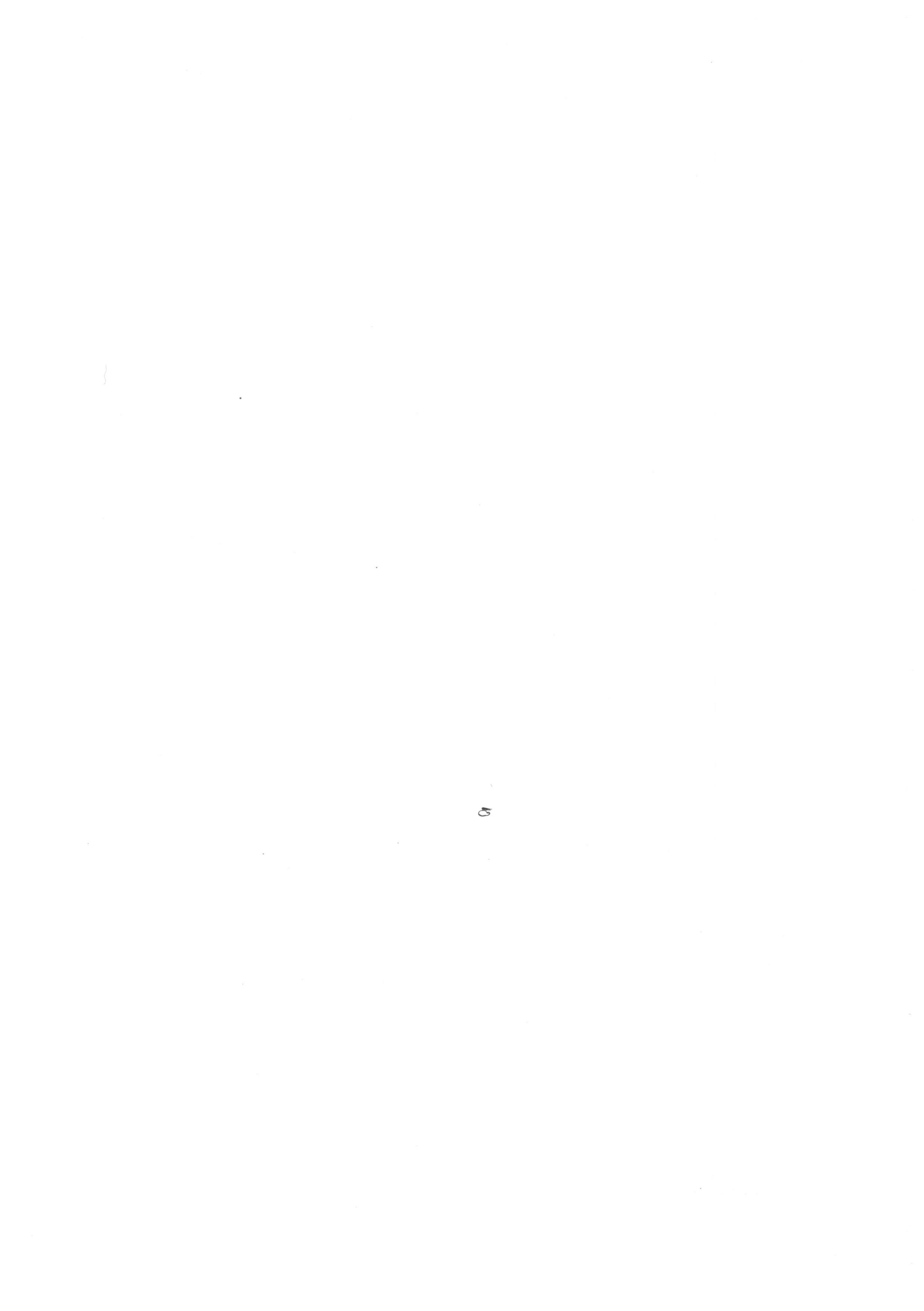
2. Com o auxílio do osciloscópio, verificar e desenhar as formas de onda para um ângulo de disparo de 30° .

U_{LINHA}	U_{FASE}	U_{CARGA}	U_{SCR1}	I_{LINHA}	I_{CARGA}	Pulso de disparo SCR_1	Período de condução
--------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	------------------------------------	------------------------

3. Trocar a carga resistiva pela carga indutiva e refaça o levantamento das formas de onda. Fazer as medições com e sem o diodo de retorno. Desenhar abaixo as formas de onda obtidas.

U_{LINHA}	U_{FASE}	U_{CARGA}	U_{SCR1}	I_{LINHA}	I_{CARGA}	Pulso de disparo SCR_1	Período de condução
--------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	------------------------------------	------------------------

4. Desligar um SCR da ponte. Verificar e explicar o que acontece com a tensão sobre a carga.
5. Religar o SCR e desligar outro SCR da ponte. Verificar e explicar o que acontece com a tensão de carga.
6. Religar o SCR desligado no passo 5 e desligar dois outros SCRs quaisquer. Verificar e explicar o que acontece com a tensão de carga.
7. Religar os SCRs e desligar os pulsos de disparo gerados por um dos TCAs. Verificar e explicar o que acontece com a tensão da carga.
8. Religar os pulsos do TCA e desligar os pulsos de dois SCRs (um de cada TCA). Verificar e explicar o que acontece com a tensão na carga.



Referências bibliográficas

SENAI-SP. **Eletrônica de Potência**. Por Sérgio Luiz Volpiano. São Paulo, 2000.

SENAI-SP. **Tecnologia Eletroeletrônica I**. Por Airton Almeida de Moraes e Regina Célia Roland Novaes. São Paulo, 1998.

GOLDEMBERG, C. **Acionamentos em Corrente Alternada** (Versão 1.4 – novembro de 1999. Apostila do curso de pós-graduação, EPUSP).

