

**MARINHA DO BRASIL  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS  
(APMA 2/2016)**

**ALISSON DA COSTA SILVA**

**SISTEMA DE CONTROLE E REGULAÇÃO EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

**RIO DE JANEIRO  
2016**

**ALISSON DA COSTA SILVA**

**SISTEMA DE CONTROLE E REGULAÇÃO EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: MSc Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

**RIO DE JANEIRO**

**2016**

**ALISSON DA COSTA SILVA**

**SISTEMA DE CONTROLE E REGULAÇÃO EM ACIONAMENTOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: MSc. Eng. Paulo Pinto Roberto Batista Pinto

---

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me deu paz para fazer esse trabalho e a todos que contribuíram para minha formação no APMA. À minha esposa por me compreender e ter a paciência para me aguentar. Ao meu amigo Segundo por ter me convencido a fazer a prova para EFOMM, ao meu eterno Chefe Renato Malatesta sem ele não estaria aqui. E finalmente aos meus cachorros Sophie, Skill e Charlie por todo amor e alegria que me dão para aliviar tanto stress do dia a dia.

A minha falha e o meu fracasso não são  
as minhas paixões, mas a falta de  
controle sobre elas.

(Jack Kerouac)

## RESUMO

Este trabalho fornece um estudo especificado sobre os acionadores elétricos de uma forma profunda e descritiva. Apresenta a composição de cada tipo de conversores e acionadores nas instalações elétricas adquirindo características próprias para situações diferentes. Com diversos tipos de demonstrações, este estudo tenta passar uma visualização dinâmica sobre a necessidade a bordo dos componentes dentro de cada conversor. O funcionamento básico e teórico dos componentes presentes nos acionadores mais utilizados é descrito de uma forma estrutural e didática a fim de complementar o entendimento sobre esses objetos complexos.

Palavras-chave: Inversor. Retificador. Tiristor.

## **ABSTRACT**

This work provides a study specified on the electric drives of a deep and descriptively. It shows the composition of each type of converters and drives in electrical installations acquiring characteristics for different situations. With various types of statements, this study attempts to pass a dynamic view on the need to board components within each converter. The basic theory and operation of the components present in the most commonly used triggers is described in a structural and didactic way to supplement the understanding of these complex objects.

Keyword: Inverter.Retifier.Tiristor.

## LISTA DE FRIGURAS

Figura 1:	Controle do conversor	12
Figura 2:	Esquema de comutação, conversor controlado externamente	13
Figura 3:	Conversor auto-controlado	14
Figura 4:	Esquema de comando de ignição	15
Figura 5:	Conversor de corrente alternada com carga ôhmica	18
Figura 6:	SCR: Simbologia, camadas e junções	21
Figura 7:	Um tipo de estrutura interna das camadas de um SCR	21
Figura 8:	Encapsulamentos tipo TO para SCR, com dissipador de calor	22
Figura 9:	SCR com encapsulamentos tipo rosca/disco	22
Figura 10:	Polarização direta, características estáticas, SCR ideal	23
Figura 11:	Polarização de SCR	24
Figura 12:	Polarização reversa de SCR	25
Figura 13:	Disparo de um SCR	26
Figura 14:	Circuito para disparo do SCR	27
Figura 15:	Resistência para evitar disparos por ruído no gatilho	27
Figura 16:	Circuito de disparo CA com rede resistiva	29
Figura 17:	Equivalente Thèvenin no gatilho do SCR	30
Figura 17:	Circuito de disparo CA com rede defasadora RC	31
Figura 19:	Formas de onda para o circuito com rede defasadora	31
Figura 20:	Topologia e formas de onda (com carga resistiva) de retificador monofásico não controlado, meia-onda	34
Figura 21:	Retificadores monofásicos não controlados, onda completa	35
Figura 22:	Formas de onda para retificador com carga resistiva	35
Figura 23:	<b>Formas de onda no lado CA para retificador monofásico, onda-completa, não-controlado, alimentando carga indutiva</b>	35
Figura 24:	Retificador trifásico, onda completa, não-controlado	36
Figura 25:	Formas de onda no lado CA para retificador trifásico, onda completa, não-controlado, alimentando diferentes tipos de carga	37
Figura 26:	Pontes retificadoras monofásica, semi-controlada assimétrica, semi-controlada simétrica, totalmente controlada	37
Figura 27:	<b>Formas de onda de ponte retificadora semi-controlada assimétrica, com carga altamente indutiva</b>	38
Figura 28:	Formas de onda, comparação.	39
Figura 29:	<b>Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva</b>	41

Figura 30:	Inversor monofásico em ponte com carga resistiva	42
Figura 31:	Tensão e corrente de carga para o circuito da figura 30	43
Figura 32:	Etapas de funcionamento para carga indutiva	43
Figura 33:	Formas de onda para o circuito da figura passada	44
Figura 34:	Inversor monofásico com ponto médio	44
Figura 35:	Inversor monofásico com ponto médio a capacitor	458
Figura 36:	Estrutura do inversor trifásico	45
Figura 37:	Diagrama de comando do inversor trifásico	46
Figura 38:	Tensões de carga para cada etapa de funcionamento	46
Figura 39:	Inversor monofásico em ponte	47
Figura 40:	Formas de onda para o circuito da figura 39	48
Figura 41:	Acionador de velocidade variável	51
Figura 42:	Propulsor de passo variável	52
Figura 43:	Curvas de cargas para propulsores de passo variável	53
Figura 44:	Característica de carga, motor síncrono de ligação direta	53
Figura 45:	Acionador tiristor em um motor propulsor	54
Figura 46:	Aplicação de acionadores no navio de propulsão elétrica	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>CONVERSORES ESTÁTICOS</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações Gerais</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de Controle</b>	<b>12</b>
2.2.1	Comutação em conversores controlados externamente	12
2.2.2	Comutação em conversores auto-controlados	14
<b>2.3</b>	<b>Comando de ignição</b>	<b>15</b>
<b>2.4</b>	<b>Retificador</b>	<b>16</b>
<b>2.5</b>	<b>Conversor de tensão contínua</b>	<b>16</b>
<b>2.6</b>	<b>Inversor</b>	<b>16</b>
<b>2.7</b>	<b>Conversor de tensão alternada</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>TIRISTOR SCR</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Características básicas do SCR</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>SCR Ideal</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Polarização direta</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Polarização reversa</b>	<b>24</b>
<b>3.5</b>	<b>Modos de disparo de um SCR</b>	<b>25</b>
3.5.1	Corrente de Gatilho	25
3.5.2	Corrente de Retenção e Corrente de Manutenção	27
<b>3.6</b>	<b>Requisitos básicos para o circuito de disparo</b>	<b>28</b>
<b>3.7</b>	<b>Circuitos de disparo com Sinais CA</b>	<b>28</b>
3.7.1	Circuito de disparo CA com rede resistiva	29
3.7.2	Circuito de disparo CA com rede defasadora	31
<b>4</b>	<b>RETIFICADOR</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Classificação</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Retificadores não controlados</b>	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Retificadores não controlados com entrada trifásica</b>	<b>36</b>
<b>4.5</b>	<b>Retificadores controlados</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>INVERSOR</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Estruturas básicas</b>	<b>42</b>

<b>5.2</b>	<b>Reversibilidade dos inversores de tensão</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Controle de tensão nos inversores</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>APLICAÇÕES MOTORES ELÉTRICOS PARA PROPULSÃO</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Sistemas AC com propulsores de passo variável</b>	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Controlador SCR em propulsores de passo fixo</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Os acionamentos elétricos em embarcações marítimas correspondem a um modo separado dos demais. Seja devido às singularidades da geração de energia a bordo, devido à restrição de espaço e também às altas temperaturas acima das encontradas em ambiente convencionais tais como indústrias e usinas. Assim, uma série de considerações adicionais deve ser verificada para selecionar um motor marítimo e seus componentes acionadores.

A maior dificuldade encontrada na elaboração desse sistema elétrico parte dos problemas de manutenção e serviço dos componentes a bordo, dada a restrições de reposição de qualquer equipamento de um navio em alto mar. Por isso, a durabilidade e confiabilidade nesses equipamentos são primordiais.

## 2 CONVERSORES ESTÁTICOS

### 2.1 Considerações gerais

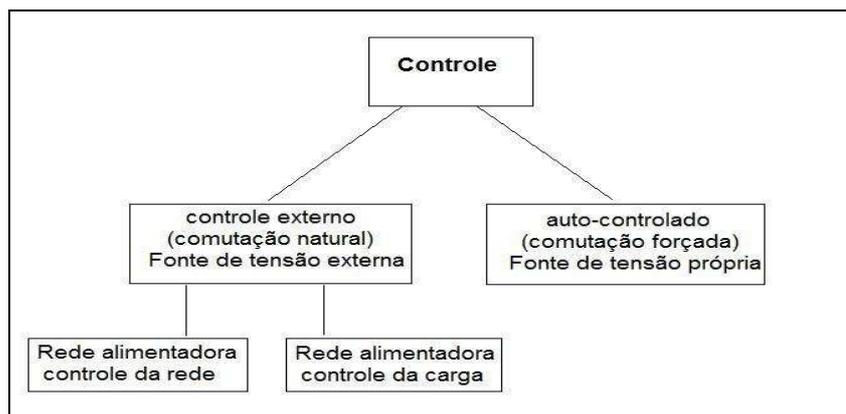
O funcionamento interno é caracterizado no conversor por fenômenos como comutação e pulsação. A comutação é forçada pela tensão de comutação. Com auxílio de conversores é possível manter-se uma tensão de saída constante para frequência e tensão de entrada variáveis, muito importante para redes elétricas em navios, nas quais o gerador é acionado por um motor a explosão de velocidade variável.

### 2.2 Tipos de controle

Quanto ao funcionamento interno o conversor é definido com base na origem desta tensão de comutação. Num conversor controlado externamente a comutação é forçada por uma fonte de tensão externa ao conversor.

Nos conversores controlados pela rede a tensão da rede é que define a comutação. Nos conversores controlados pela carga, essa tensão é fornecida pela própria carga.

Figura 1: Controle do conversor



Fonte: Informativo técnico Siemens S.A volume X.

#### 2.2.1 Comutação em conversores controlados externamente

Analisando a comutação de dois ramos do conversor em um circuito trifásico estrela na qual contém três fonte de tensão alternada, com a mesma amplitude e

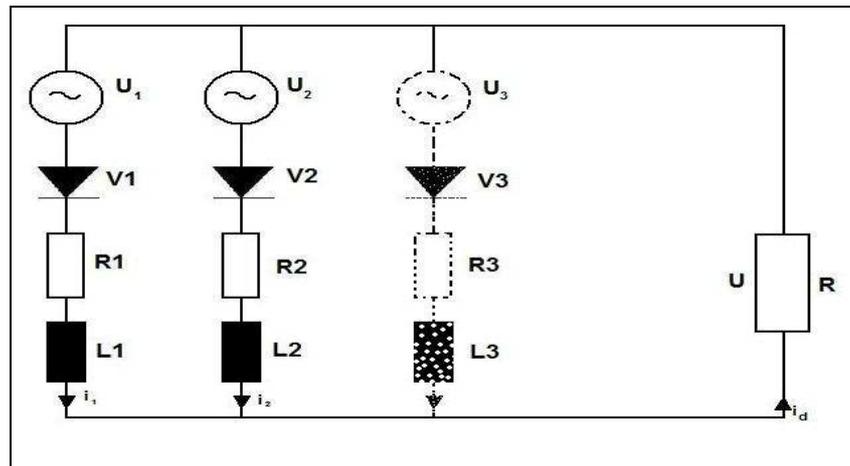
freqüência e defasadas  $120^\circ$ . Estas fontes estão ligadas a carga ôhmica R através de diodos. Nos ramos existem indutâncias L (originadas das reatâncias de dispersão das fontes), cuja influencia na corrente da carga pode ser desprezada.

Do instante  $t_0$  até o instante  $t_1$  vai circular pela carga R uma corrente  $i_d$  proporcional a tensão  $U_1$ .

Os valores instantâneos das tensões são tais que a corrente circula apenas pelo diodo V1. No instante  $t_1$  a tensão  $U_2$  iguala-se a tensão  $U_1$ .

A tensão  $U_2$  torna-se posteriormente maior que  $U_1$ . A corrente passará então, sem qualquer influência externa, do diodo V1 para o diodo V2. Ocorre então comutação.

Figura 2: Esquema de comutação em um conversor controlado externamente



Fonte: Adaptação Próprio Autor.

Devido as indutâncias dos ramos, a comutação não é instantânea. A corrente  $i_1$  em V1 deverá primeira ser anulada e a corrente  $i_2$  em V2 ser formada. Este fenômeno é forçado pela tensão de comutação  $U_k = U_2 - U_1$ . Durante o tempo de comutação  $\Delta t = t_2 - t_1$  ambos os diodos conduzem corrente. A tensão resultante na carga será de  $U_r = \frac{1}{2} (U_1 + U_2)$ .

Do fenômeno conclui-se, que para um comportamento definido da tensão de alimentação, a comutação da corrente é automática, chamada inicialmente de comutação natural.

### 2.2.2 Comutação em conversores auto-controlados

Ao contrário dos conversores controlados externamente, os conversores não exigem para comutação qualquer comportamento especial da tensão de alimentação. Durante a comutação surge uma tensão no circuito, que é fornecida ou por uma fonte disponível no próprio conversor (na maioria capacitiva) ou através da elevação da resistência do componente a ser bloqueado (no caso transistores).

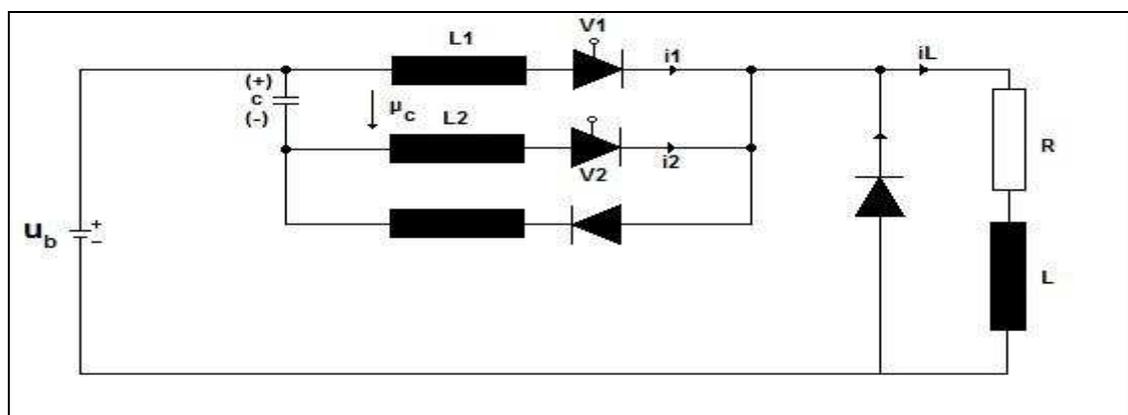
Antigamente denominava-se este fenômeno de comutação forçada, o que não é totalmente correto, pois, toda comutação é relativamente forçada.

Analisando o processamento da comutação na ação de desligamento de um conversor de corrente contínua. O tiristor V1 sofreu ignição ( $t_0$ ) e está conduzindo. A tensão de alimentação  $U_B$  é contínua. Se o fluxo energético para a carga tiver que ser interrompido, o tiristor V1 deve ser bloqueado e a corrente de carga  $i_L$ , que devido a indutância do circuito tende a manter-se circulando, deverá ser comutada para o outro tiristor.

Como a tensão de comutação tem-se a tensão  $U_c$  do capacitor C, que após ignição do tiristor auxiliar V2 ( $t_1$ ) força uma comutação da corrente de carga de V1 para V2. A corrente circula posteriormente pelo capacitor, carregando-o ( $t_2$  até  $t_3$ ).

Após o processo de carga, ocorrerá uma nova comutação de V2 para o diodo V ( $t_3$  até  $t_4$ ). A indutância da carga deve ser tão grande que a corrente de carga, mesmo durante o processo de comutação, não varia.

Figura 3: Conversor auto-controlado



Fonte: Adaptação próprio Autor.

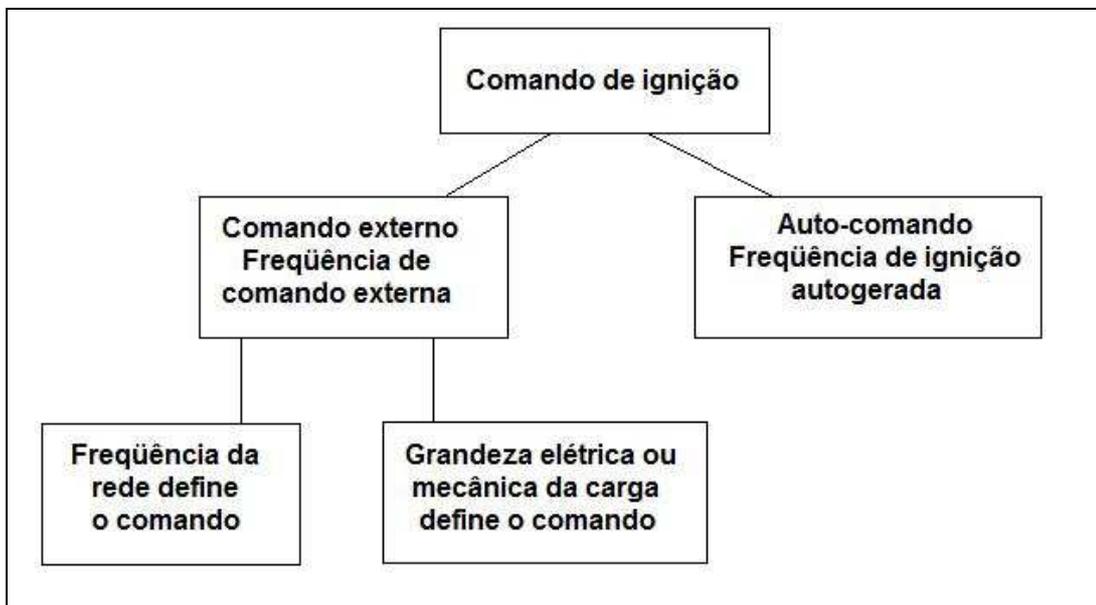
### 2.3 Comando de Ignição

O conversor pode ainda ser definido quanto à origem dos pulsos de ignição. A frequência de ignição é aquela na qual um ramo principal, através de um dispositivo de comando, é levado ao estado de condução dentro de um período. Da mesma forma que para o controle, diferenciam-se conversores com comando de ignição externo ou com comando próprio de ignição.

Conversores com comando de conversão externo necessitam de uma fonte de tensão alternada independente do conversor, que através do dispositivo de comando define a frequência de ignição dos tiristores. Em conversores com comando ignição pela rede, esta define a frequência da ignição. Quando a carga fornece o comando de ignição, exemplo a frequência de ressonância de um circuito oscilante, ela define a frequência de ignição.

Conversores com comando próprio de ignição não necessitam de fonte externa de tensão alternada. Nestes conversores o dispositivo de comando define a frequência de ignição.

Figura 4: Esquema de comando de ignição



Fonte: Informativo técnico Siemens S.A. volume X.

## 2.4 Retificador

Os conversores estáticos retificadores possuem a propriedade de converter a tensão alternada qualquer na qual estão alimentados em tensão contínua. A proporção de tensão alternada produzida pelo retificador varia de acordo com suas características, como o retificador não controlado que produzem, além da tensão alternada, uma tensão contínua proporcional.

O princípio de funcionamento do retificador baseia-se no comando pulsante, ou seja, através de fornecimento de apenas uma parte da tensão alternada no lado de tensão contínua, consegue-se uma tensão contínua controlada. Para obtenção dessa função pode ser utilizado tiristores e também através de um transformador de ajuste. Algumas retificações de tensão podem ser obtidas por uma combinação de um retificador não controlado com um conversor controlado. Ressaltando que o fluxo energético no retificador tem sempre o sentido do lado alternado para o contínuo.

## 2.5 Conversor de tensão contínua

Estes conversores possibilitam a conversão de uma dada tensão contínua em outra também contínua constante ou variável. A conversão pode ser direta se a tensão de saída é obtida diretamente da tensão de entrada ou indireta se entre a ligação de entrada e saída do conversor existir um estágio sob forma alternada. No caso da conversão direta a tensão de saída pode assumir no máximo valores iguais a tensão de entrada. Já com o uso de circuitos intermediários na conversão do tipo indireta os valores de tensão de saída independem da tensão de entrada. O uso de transformadores nos circuitos intermediários permitem também uma separação galvânica entre a fonte geradora e o consumidor.

## 2.6 Inversor

Entende-se por inversor um conversor de corrente contínua em corrente alternada. Ao contrário do retificador, o fluxo energético é do lado da tensão contínua para o de tensão alternada, mas esse fluxo não é irreversível, pode ocorrer uma rápida inversão deste fluxo dentro de um período de onda alternada.

Os inversores podem ser auto-controlados, na qual alimentam uma rede cujas características são definidas pelo inversor, ou controlados pela rede com características da rede definidas.

## 2.7 Conversor de tensão alternada

Um conversor de tensão alternada deve ser capaz de obter a conversão de uma tensão alternada com amplitude  $U_1$ , frequência  $f_1$  e número de fases  $m_1$  em outra tensão alternada com amplitude  $U_2$ , frequência  $f_2$  e número de fases  $m_2$ .

São também diferenciados em conversores diretos e indiretos. Os conversores diretos operam sem circuitos intermediários. Entrada e saída são ligados diretamente através de “elementos estáticos controláveis”. A tensão de saída de conversores diretos é formada por pulsos da tensão de entrada e depende da frequência de entrada.

Conversores indiretos contem um retificador e um inversor interligados por um circuito intermediário. A frequência da tensão de saída é, nos conversores indiretos, em largos limites, independente da frequência da tensão de entrada.

Nas instalações elétricas dos navios as necessidades de um dispositivo que permita variações de tensão em quaisquer proporções são muito grandes.

Os processos utilizados baseavam-se em métodos clássicos da eletrotécnica, como exemplo resistores ou divisores de tensão, transformadores de ajuste, transformadores com estágios, transformadores de corrente alternada e os transdutores de tensão.

Desde a descoberta do tiristor<sup>1</sup>, que trouxe um grande desenvolvimento na técnica dos conversores, é possível variar quase sem perdas e continuamente, a tensão alternada. Dispositivos que possuem esta característica são denominados conversores de corrente alternada.

O circuito de um conversor de corrente alternada é composto tal um par de tiristores  $V_1$  e  $V_2$  está ligado em conexão anti-paralela e pode sofrer ignição através de um dispositivo de comando, em um instante qualquer dentro do semi-ciclo correspondente da tensão da rede  $u_{RO}$ . O tiristor que sofreu ignição, ou seja

---

<sup>1</sup> Componente que é acionado através de um pulso de energia na sua porta (gate), sendo ativado e passando a conduzir no circuito composto.

está conduzindo, coloca o consumidor sob tensão e haverá circulação de corrente. Os impulsos de ignição podem ser fornecidos em qualquer instante no período entre as passagens pelo zero da tensão.

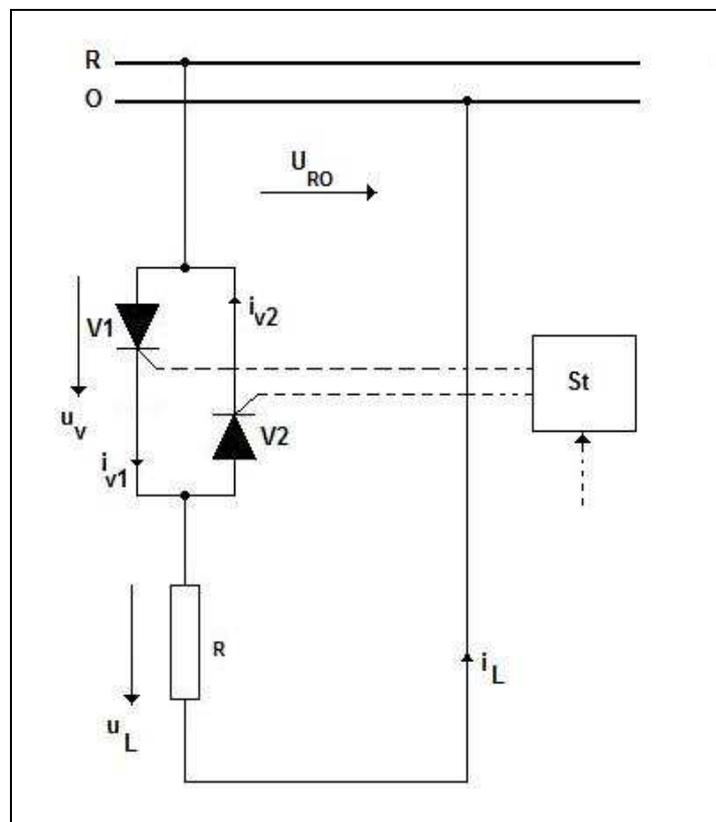
Antes da ignição o tiristor V1 está sob a tensão indicada de fase do circuito. Após a ignição, a tensão é aplicada a carga e para a carga ôhmica, também a corrente circula até a nova passagem da tensão pelo zero.

A corrente também varia na forma senoidal e em fase com a tensão.

O mesmo é válido para o semi-ciclo negativo do tiristor V2. Através da variação do ângulo de ignição de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , os valores médio e eficaz da tensão aplicada à carga poderão ser ajustadas desde o zero até o valor máximo.

Analisando o circuito a seguir vemos um exemplo do esquema de conversor de corrente alternada composto por dois tiristores em paralelo controlados por um comando de ignição externo que poderia ser um CLP, circuito lógico programável, muito utilizado atualmente a bordo. A alimentação do circuito pode ser corrente alternada ou variável de acordo com um ajuste de tensão que pode estar contido no sistema.

Figura 5: Conversor de corrente alternada com carga ôhmica



Fonte: Informativo técnico Siemens S.A. volume X.

Com a ignição do tiristor haverá circulação de uma corrente dada por  $(u/R)$ . O  $\text{sen}\omega t$  que varia, conforme indicado a seguir, até a passagem pelo zero.

$$\begin{aligned} \omega t &= \pi \\ i_L &= \frac{u}{R} \cdot \text{sen}\omega t \\ \omega t &= \alpha \end{aligned}$$

No semi-ciclo negativo valemos limites:

$$\begin{aligned} \omega t &= \pi + \alpha \\ \omega t &= 2\pi \end{aligned}$$

A partir dessas referências pode-se calcular o valor médio e o valor eficaz da corrente para um determinado ângulo de ignição  $\alpha$ .

O valor médio da corrente:

$$I_{Lm} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_L \cdot \text{sen}\omega t d(\omega t) = \frac{i_L}{\pi} (1 + \cos\alpha)$$

O valor eficaz da corrente:

$$I_{\text{leff}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_L^2 \text{sen}^2 \omega t d(\omega t)} = i_{\text{leff}} \sqrt{\frac{1}{2} [(\pi - \alpha) + \frac{1}{4} \text{sen}2\alpha]}$$

Referimos o valor eficaz e o valor médio da corrente para o ângulo de ignição  $\alpha = 0$  aos valores para o ângulo de ignição  $\alpha$  obtemos as “características de controle”.

### 3 TIRISTOR SCR

#### 3.1 Características Básicas do SCR

O Tiristor SCR (**Silicon Controlled Rectifier**) foi desenvolvido por um grupo de engenheiros do **Bell Telephone Laboratory** (EUA) em 1957. É o mais conhecido e aplicado dos Tiristores existentes. Tiristor é o nome genérico dado à família dos componentes compostos por quatro camadas semicondutoras (PNPN).

Os Tiristores SCR's funcionam analogamente a um diodo, porém possuem um terceiro terminal conhecido como Gatilho (*Gate* ou Porta). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo). Em condições normais de operação, para um SCR conduzir, além de polarizado adequadamente (tensão positiva no Ânodo), deve receber um sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso.

A principal aplicação que os SCR têm é a conversão e o controle de grandes quantidades de potência em sistemas CC e CA, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Isso se deve à sua ação de chaveamento rápido, ao seu pequeno porte e aos altos valores nominais de corrente e tensão em que podem operar.

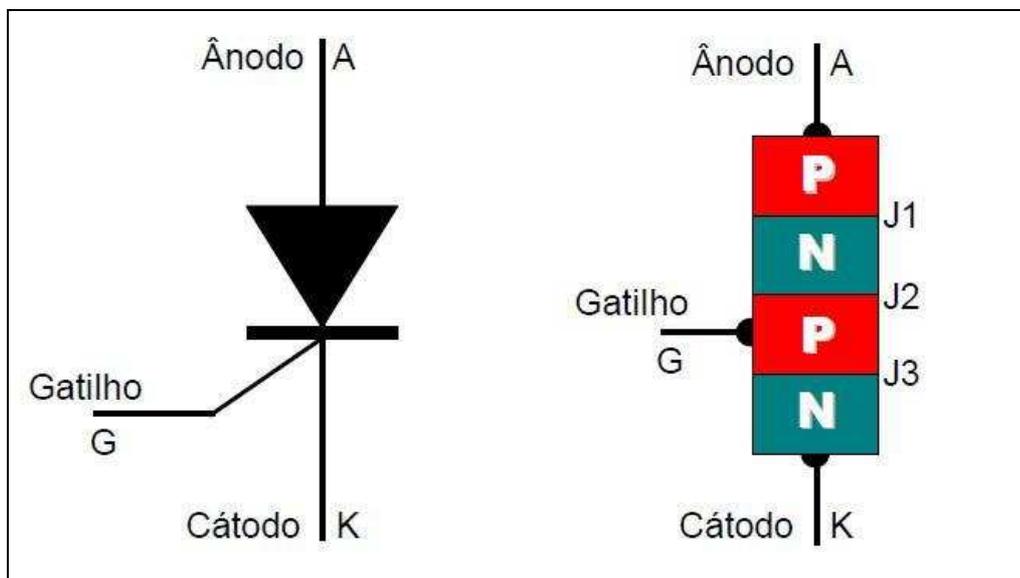
Algumas características dos SCR's:

- a) São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: não condução e condução, com a possibilidade de controle.
- b) Em muitas aplicações podem ser considerados chaves ideais, mas há limitações e características na prática.
- c) São compostos por 4 camadas semicondutoras (P-N-P-N), três junções (P-N) e 3 terminais (Ânodo, Cátodo e Gatilho).
- d) São semicondutores de silício. O uso do silício foi utilizado devido a sua alta capacidade de potência e capacidade de suportar altas temperaturas.
- e) Apresentam alta velocidade de comutação e elevada vida útil;
- f) Possuem resistência elétrica variável com a temperatura, portanto, dependem da potência que estiverem conduzindo.
- g) São aplicados em controles de relés, fontes de tensão reguladas, controles de motores, **Choppers** (variadores de tensão CC), Inversores CC-CA, Ciclo-conversores (variadores de frequência), carregadores de baterias, circuitos de

proteção, controles de iluminação e de aquecedores e controles de fase, entre outras.

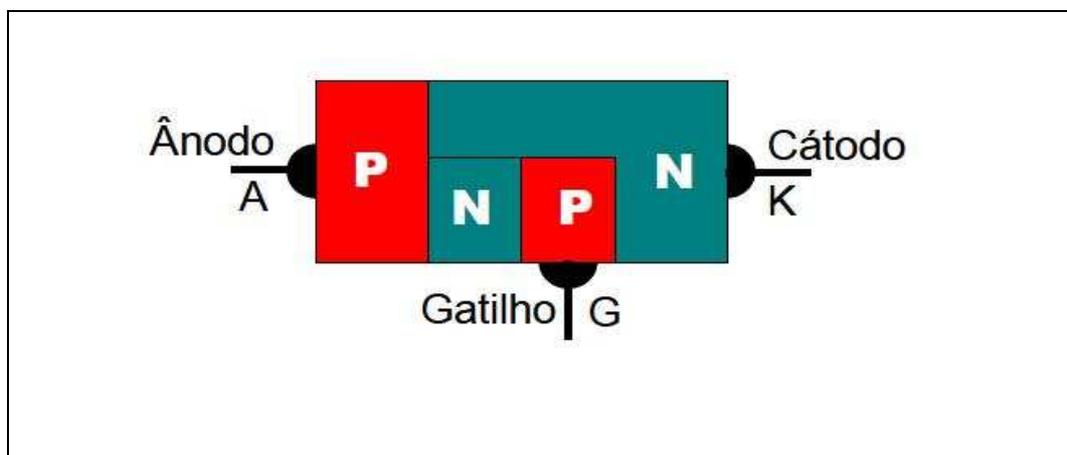
A figura 6 apresenta a simbologia utilizada e as camadas, junções e terminais, enquanto a figura 7 apresenta um tipo de estrutura construtiva para as camadas de um SCR. A figura 8 mostra a aparência do encapsulamento tipo TO de um SCR muito utilizado, já acoplado a um dissipador de calor. A figura 9 mostra alguns SCR de alta potência com encapsulamento tipo rosca e tipo disco.

Figura 6: SCR: Simbologia, camadas e junções



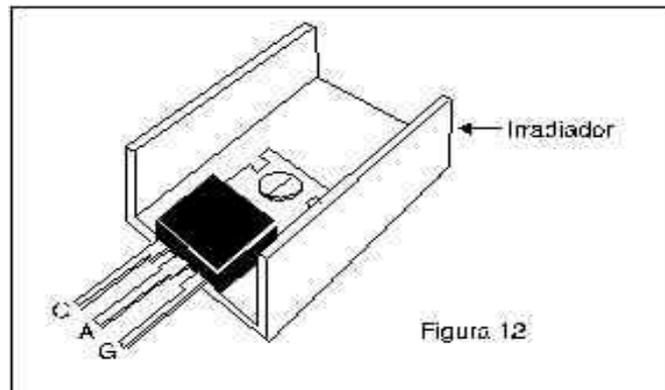
Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Figura 7: Um tipo de estrutura interna das camadas de um SCR



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Figura 8: Encapsulamento tipo TO para SCR, com dissipador de calor



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Figura 9: SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências



Fonte: Prof Fernando Luiza Mussoi (cefet/SC).

### 3.2 SCR Ideal

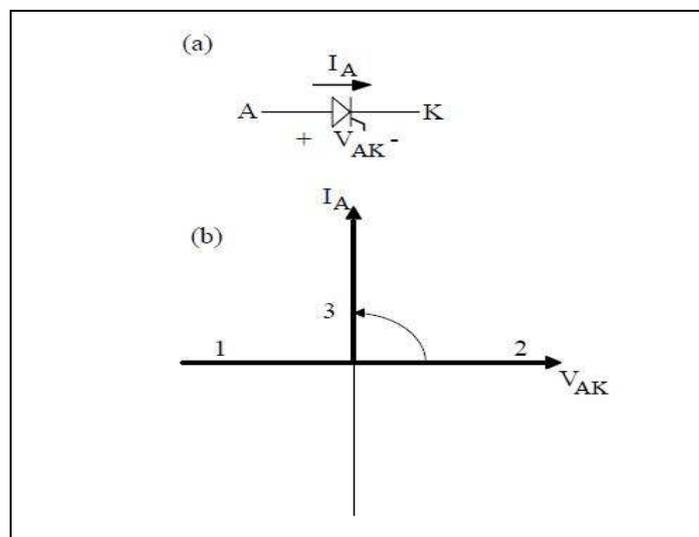
Um SCR ideal se comportaria com uma chave ideal, ou seja, enquanto não recebesse um sinal de corrente no gatilho, seria capaz de bloquear tensões de valor infinito, tanto com polarização direta como reversa. Bloqueado, o SCR ideal não conduziria qualquer valor de corrente. Tal característica é representada pelas retas 1 e 2 na Figura 10.

Quando disparado, ou seja, quando comandado por uma corrente de gatilho  $I_{GK}$ , o SCR ideal se comportaria como um diodo ideal, como podemos observar nas retas 1 e 3. Nesta condição, o SCR ideal seria capaz de bloquear tensões reversas

infinitas e conduzir, quando diretamente polarizado, correntes infinitas sem queda de tensão e perdas de energia por Efeito Joule. Assim como para os diodos, tais características seriam ideais e não se obtêm na prática.

Os SCR reais têm, portanto, limitações de bloqueio de tensão direta e reversa e apresentam fuga de corrente quando bloqueados. Quando habilitados têm limitações de condução de corrente, pois apresentam uma pequena resistência à circulação de corrente e queda de tensão na barreira de potencial das junções que provocam perdas de energia por Efeito Joule e conseqüente aquecimento do componente.

Figura 10: (a) polarização direta (b) características estáticas de um SCR ideal



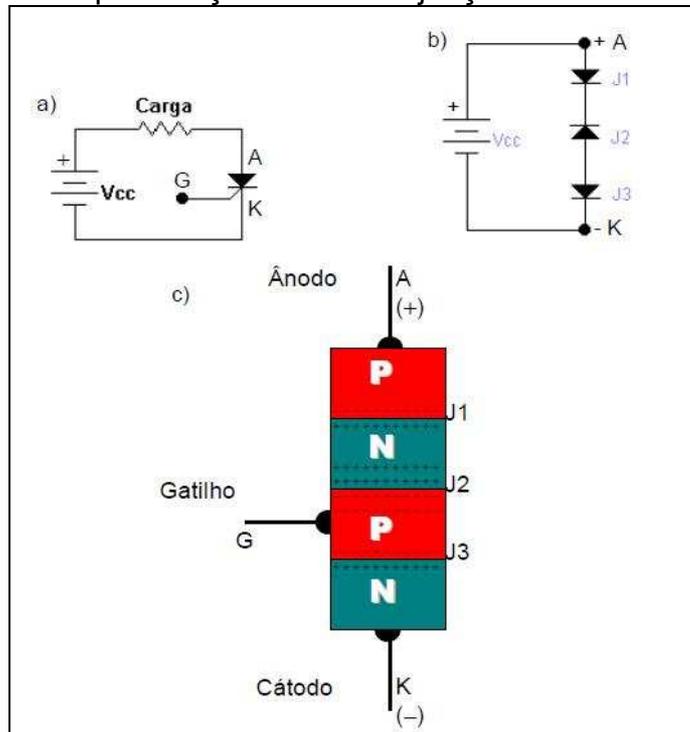
Fonte: Adaptação próprio Autor.

### 3.3 Polarização direta

A figura 11 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão do Ânodo positiva em relação ao Cátodo
- J1 e J3 polarizadas diretamente
- J2 polarizada reversamente apresenta maior barreira de potencial.
- Flui pequena Corrente de Fuga Direta de Ânodo para Cátodo,  $I_F$  (*Forward Current*).

Figura 11: A) SCR bloqueado em polarização direta; b) analogia com diodos; c)efeito da polarização direta das junções



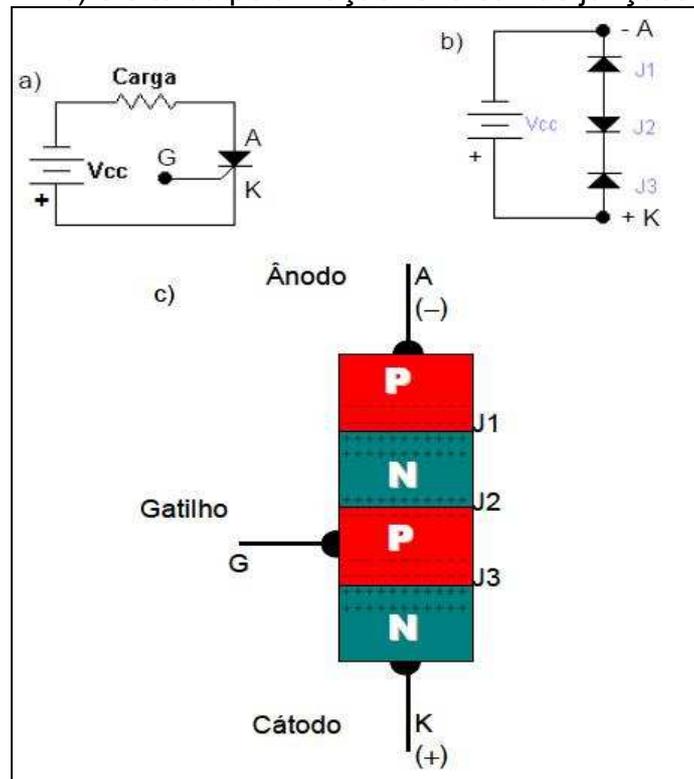
Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

### 3.4 Polarização reversa

A figura 12 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão de Cátodo positiva em relação ao Ânodo.
- J2 diretamente polarizada.
- J1 e J3 reversamente polarizadas: apresentam maiores barreiras de potencial.
- Flui pequena Corrente de Fuga Reversa de Cátodo para Ânodo,  $I_R$  (*Reverse Current*).
- Bloqueio Reverso – DESLIGADO.

Figura 12: a) SCR bloqueado em polarização reversa. b) analogia com diodos c) efeito da polarização reversa nas junções



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

### 3.5 Modos de Disparo de Um SCR

Um SCR é disparado (entra em condução) quando aumenta a Corrente de Ânodo  $I_A$ , através de uma das seguintes maneiras:

#### 3.5.1 Corrente de Gatilho $I_{gk}$

É o procedimento normal de disparo do SCR. Quando estiver polarizado diretamente, a injeção de um sinal de corrente de gatilho para o cátodo ( $I_g$  ou  $I_{gk}$ ), geralmente na forma de um pulso, leva o SCR ao estado de condução. À medida que aumenta a corrente de gatilho para cátodo, a tensão de bloqueio direta diminui até que o SCR passa ao estado de condução.

A Figura 13 apresenta um circuito para disparo do SCR. Enquanto diretamente polarizado o SCR só começa a conduzir se receber um comando através de um sinal de corrente (geralmente um pulso) em seu terminal de gatilho

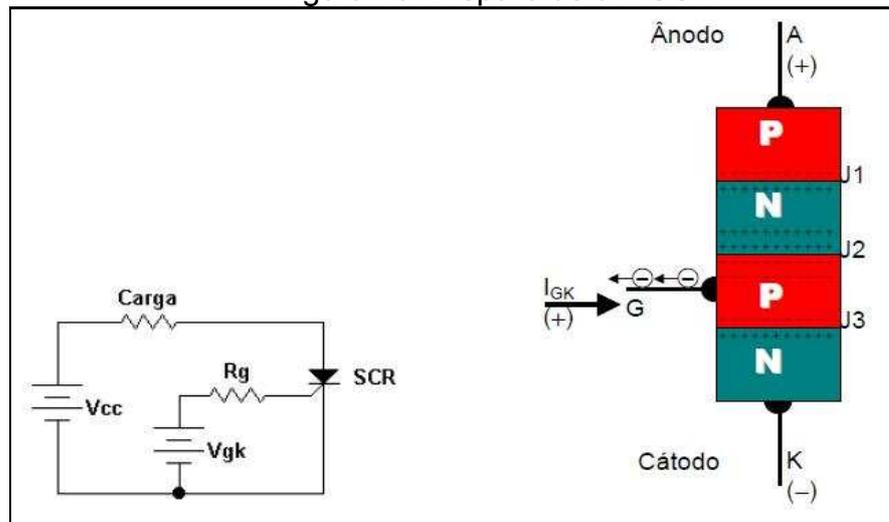
(*Gate* ou *Porta*). Esse pulso polariza diretamente o “segundo diodo formado pelas camadas N e P” e possibilita a condução.

Enquanto tivermos corrente entre ânodo e cátodo o SCR continua conduzindo, sendo ele cortado (bloqueado) somente quando a mesma for praticamente extinta. Nesta condição, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR precisará de um novo sinal de corrente no gatilho para voltar ao estado de condução.

Polarizado reversamente o SCR funciona como um diodo, bloqueando a passagem de corrente, mesmo quando efetuado um pulso em seu Gatilho.

A característica gatilho-cátodo de um SCR se assemelha a uma junção PN, variando, portanto, de acordo com a temperatura e características individuais do componente, um exemplo de curva de disparo pode ser encontrado no anexo deste documento.

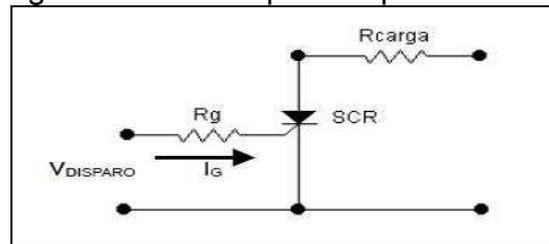
Figura 13: Disparo de um SCR



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Como entre o gatilho e o cátodo há uma junção PN, temos uma tensão de aproximadamente 0,7V. Desta forma, analisando o circuito da figura a seguir podemos determinar os requisitos para o circuito de disparo do SCR.

Figura 14: circuito para disparo do SCR



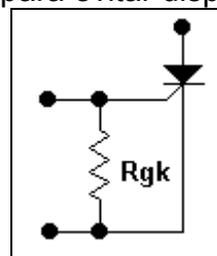
Fonte: Adaptação próprio Autor.

Assim, a tensão  $V_{\text{disparo}}$  necessária para proporcionar a corrente de disparo  $I_G$  através da resistência limitadora  $R_G$  pode ser dada por:

$$V_{\text{disparo}} = I_G \cdot R_G + 0,7$$

Um SCR pode disparar por ruído de corrente no gatilho. Para evitar estes disparos indesejáveis devemos utilizar um resistor  $R_{GK}$  entre o gatilho e o cátodo que desviará parte do ruído, como indica a figura 15. Em alguns tipos de SCR, a resistência  $R_{GK}$  já vem internamente no componente para diminuir sua sensibilidade.

Figura 15: Resistência para evitar disparos por ruído no gatilho



Fonte: Adaptação próprio Autor.

### 3.5.2 Corrente de retenção e corrente de manutenção

Para entrar em condução o SCR deve conduzir uma corrente suficiente, cujo valor mínimo recebe o nome de Corrente de Retenção  $I_L$  (**Latching Current**). O SCR não entrará em condução se a Corrente de Gatilho  $I_{GK}$  for suprimida antes que a Corrente de Ânodo  $I_A$  atinja o valor da

Corrente de Retenção  $I_L$ . Uma vez retirada a corrente de gatilho, a mínima Corrente de Ânodo  $I_A$  para manter o SCR em condução é chamada Corrente de Manutenção  $I_H$  (**Holding Current**). Se a Corrente de Ânodo for menor que a

Corrente de Manutenção, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR entrará em Bloqueio.

A Corrente de Retenção é maior que a Corrente de Manutenção ( $I_L > I_H$ ). O valor de  $I_L$  é em geral de duas a três vezes a corrente de manutenção  $I_H$ . Ambas diminuem com o aumento da temperatura e vice-versa.

É por este motivo que dizemos que o SCR é uma **Chave de Retenção** (ou Travamento) porque uma vez em condução, permanece neste estado enquanto a Corrente de Ânodo  $I_A$  for maior que a Corrente de Manutenção ( $I_A > I_H$ ), mesmo sem corrente no gatilho ( $I_{GK}$ ).

### 3.6 Requisitos básicos para circuito de disparo

Os circuitos de disparo devem proporcionar ao SCR o sinal adequado e no instante desejado para que o componente entre em condução corretamente. São, portanto, requisitos fundamentais no projeto de um circuito de disparo de SCR:

- a) O sinal de gatilho deverá ter amplitude adequada e tempo de subida suficientemente curto;
- b) A largura do pulso de gatilho (o tempo de duração do pulso  $t_G$ ) deve ser maior que tempo necessário para a corrente ânodo-cátodo passar o valor da corrente de retenção  $I_L$ . Na prática:  $t_G > t_{on}$ .
- c) Evitar ocorrência de disparos indesejados por sinais falsos ou ruídos;
- d) O sinal de gatilho deve ser removido após o disparo. Sinal contínuo aumenta as perdas de potência, levando ao sobreaquecimento o que reduz a vida útil do componente.
- e) Quando reversamente polarizado é desaconselhável haver sinal de gatilho, pois o componente pode queimar pelo aumento da corrente de fuga reversa.
- f) O controle deverá ser suficientemente preciso;
- g) Em circuitos trifásicos, garantir a defasagem de  $120^\circ$  nos sinais dos gatilhos.
- h) Em associações de SCR, garantir o acionamento simultâneo.

### 3.7 Circuito de disparo com sinais CA – controle de fase

Um circuito de disparo sincronizado para o controle de fase é capaz de gerar e injetar uma corrente no gatilho do SCR para dispará-lo, quando polarizado

diretamente, com a possibilidade de controlar o instante em que essa corrente será injetada no gatilho

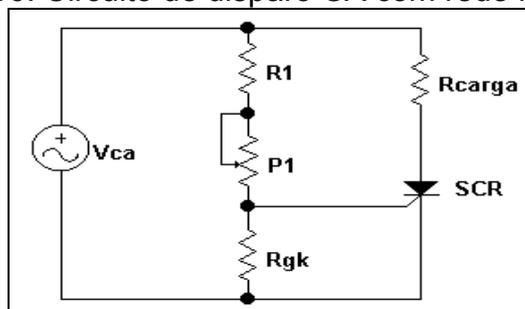
O método mais comum em aplicações de corrente alternada é derivar o sinal de disparo a partir da própria fonte principal CA. A grande vantagem é que este processo mantém o sinal de gatilho **sincronizado** com o ciclo de acionamento do tiristor, principiando o controle do ângulo de fase  $\alpha$  onde o SCR dispara. É o chamado **Controle de Fase**.

### 3.7.1 Circuito de disparo CA com rede resistiva

A figura 16 mostra um circuito bastante simples para o controle de fase a partir do sinal CA e de uma rede resistiva no gatilho. Durante o semi-ciclo positivo o SCR está em bloqueio direto.

Num dado instante a tensão  $V_{CA}$  proporciona uma tensão  $e$ , conseqüentemente, uma corrente no gatilho suficiente para disparar o SCR. Esse instante pode ser controlado pelo potenciômetro  $R_1$ .

Figura 16: Circuito de disparo CA com rede resistiva

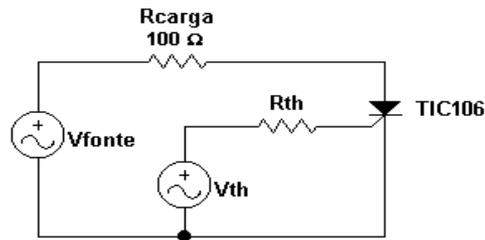


Fonte: Adaptação próprio Autor.

O objetivo é determinar as resistências que fazem com que a tensão em  $R_{GK}$  seja suficiente para provocar a corrente mínima para disparo do SCR,  $I_{GK}$ .

Usando a técnica do Equivalente Thèvenin para os ramos do circuito de controle, temos o circuito equivalente na figura 17.

Figura 17: Equivalente Thèvenin no gatilho do SCR



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Seja  $R_x = R_1 + R_2$  e aplicando a técnica do Equivalente Thèvenin, temos:

$$V_{th} = \frac{R_{GK} \cdot V(t)}{R_{GK} + R_x}$$

$$R_{th} = \frac{R_{GK} \cdot R_x}{R_{GK} + R_x}$$

Como queremos determinar o valor de  $R_x$  que suprim a corrente necessária  $I_{GK}$  para o disparo do SCR, analisando a malha do Equivalente Thèvenin, determinamos a corrente que ele fornece ao gatilho:

$$I_G = \frac{V_{th} - V_{GK}}{R_{th}}$$

Substituindo nesta equação as equações para o cálculo de  $V_{th}$  e de  $R_{th}$  e isolando  $R_x$ , encontramos:

$$R_x = \frac{R_{GK} \cdot v(t) - V_{GK} \cdot R_{GK}}{V_{GK} + R_{GK} \cdot I_{GK}}$$

Concluimos, então, que a resistência necessária é função da tensão instantânea  $v(t)$ . Como queremos disparar o SCR, em diversos ângulos, basta determinarmos qual o valor da tensão instantânea nestes ângulos e finalmente a resistência  $R_x$  que proporciona a corrente de disparo nestes mesmos ângulos.

### 3.7.2 Circuito de disparo CA com rede defasadora RC

No circuito RC da figura 18 a tensão no gatilho está atrasada da tensão de alimentação, devido o capacitor e as resistências do resistor e do potenciômetro. O potenciômetro controla a defasagem e o tempo em que a tensão no capacitor leva para atingir o valor suficiente para disparar o SCR. O objetivo é atrasar a tensão que irá comandar o disparo do tiristor. A tensão se disparo ocorrerá mais tarde no semi-ciclo, como indicam as formas de onda na figura 19, onde:

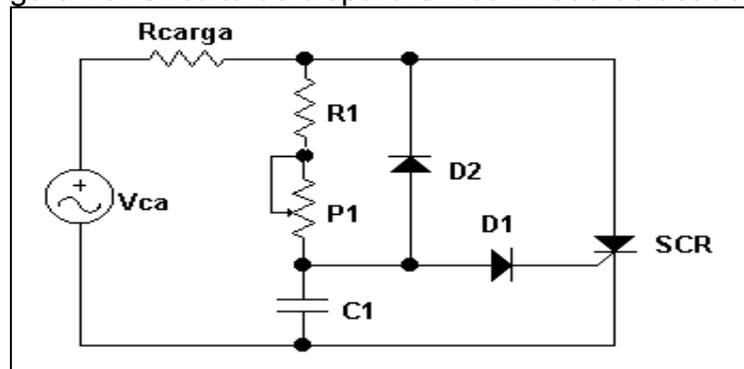
$\alpha$  - ângulo de disparo proporcionado pela senóide da fonte.

$\alpha'$  - ângulo de disparo proporcionado pela rede defasadora (RC).

$\phi$  - atraso proporcionado pela rede defasadora (RC).

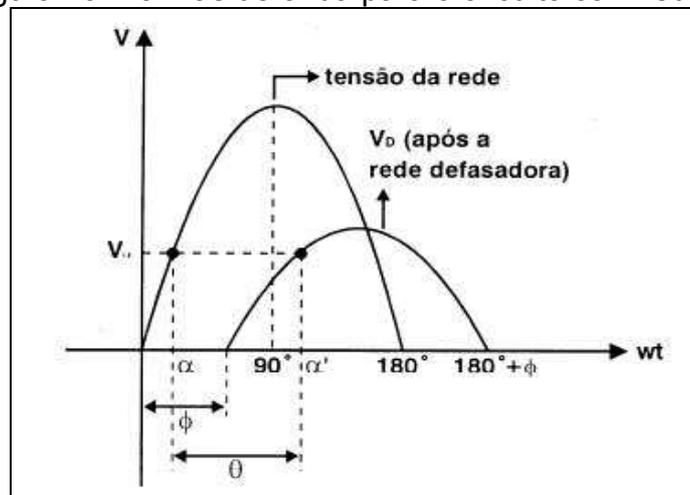
$\theta$  - defasagem entre o ângulo de disparo normal e o ângulo de disparo com rede defasadora. Assim:  $\alpha' = \alpha + \theta$ .

Figura 18: Circuito de disparo CA com rede defasadora RC



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Figura 19: Formas de onda para o circuito com rede defasadora



Fonte: Prof. Fernando Luiz Mussoi (cefet/SC).

Durante o semi-ciclo negativo o SCR se mantém em bloqueio reverso. O diodo em série com o gatilho garante a unidirecional do sinal de disparo evitando assim, sinais no gatilho no semi-ciclo negativo.

A tensão de disparo, sobre o capacitor, está atrasada em relação à tensão da rede, por um ângulo  $\varphi$ . O valor dessa defasagem depende da constante de tempo de carga do capacitor:  $\tau = R \cdot C = (R_1 + R_2) \cdot C_2$ .

Variando  $R_2$  varia o ângulo  $\varphi$  e, portanto varia também o ângulo de disparo  $\alpha'$  do SCR.

$D_1$  garante que só haverá corrente no gatilho no semi-ciclo positivo, preservando o SCR.

$D_2$  conduz no semi-ciclo negativo, carregando  $C_1$  com tensão negativa. Isso garante que no início de cada semi-ciclo positivo, o capacitor sempre esteja carregado com uma tensão fixa (negativa), mantendo a regularidade do disparo.

## **4 RETIFICADOR**

### **4.1 Considerações iniciais**

O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, devido, principalmente, à facilidade de adaptação do nível de tensão por meio de transformadores.

Em muitas aplicações, no entanto, a carga alimentada exige uma tensão contínua. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados retificadores. Serão explanadas as novas estruturas de retificadores e suas aplicações.

### **4.2 Classificação**

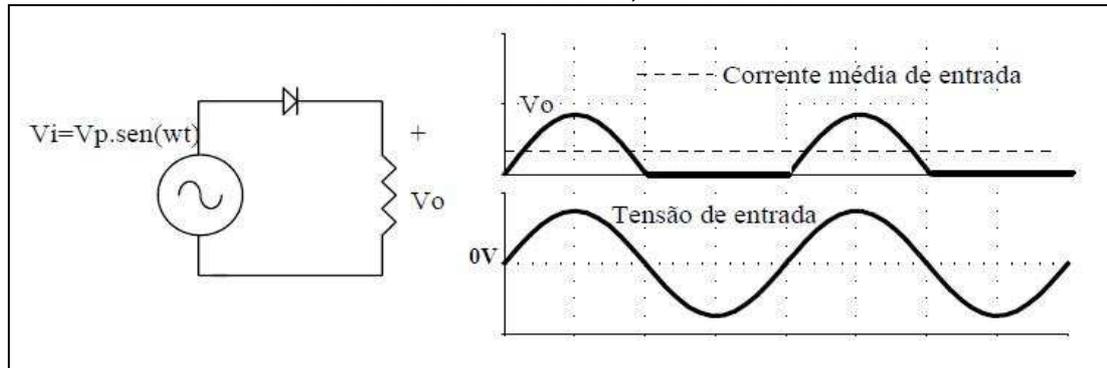
Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída (controlados e não controlados); de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, polifásico); em função do tipo de conexão dos elementos retificadores (meia ponte e ponte completa).

Os retificadores não-controlados são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação, enquanto os controlados utilizam tiristores ou transistores.

Usualmente topologias em meia ponte não são aplicadas. A principal razão é que, nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero. Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos presentes no sistema (indutores e transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema. Topologias em ponte completa absorvem uma corrente média nula da rede, não afetando, assim, tais elementos magnéticos.

A figura 20 mostra o circuito e as formas de onda com carga resistiva para um retificador monofásico com topologia de meia-ponte, também chamado de meia-onda.

Figura 20: Topologia e formas de onda (com carga resistiva) de retificador monofásico não controlado, meia-onda.



Fonte: J.A. Pomilio.

### 4.3 Retificadores não controlados

A figura 21 mostra topologias de retificadores a diodo (não-controlados). Neste caso não há possibilidade de controlar a tensão de saída devido à ausência de interruptores controláveis. Têm-se os três tipos básicos de carga: resistiva, capacitiva e indutiva.

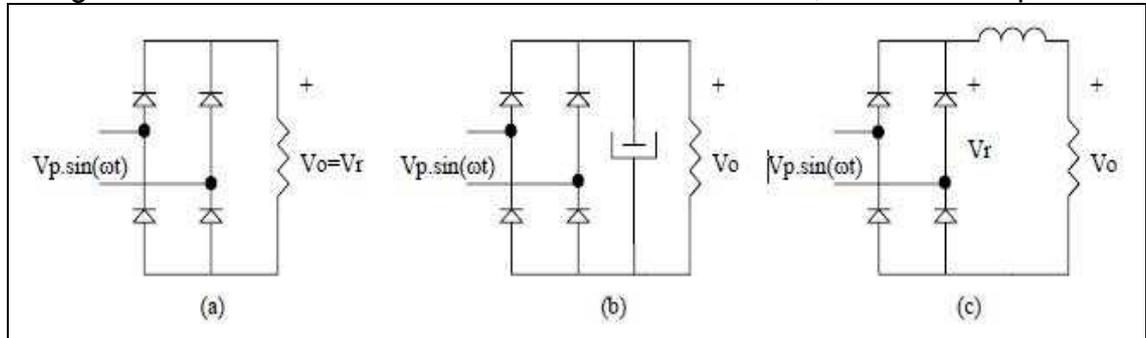
Com carga resistiva (fig. 21a) as formas de onda da tensão e da corrente na saída do retificador e na carga são as mesmas, como mostrado na figura 22. A corrente de entrada apresenta-se com a mesma forma e fase da tensão.

Um retificador com carga capacitiva (fig. 21b) faz com que a tensão de saída apresente se alisada, elevando o seu valor médio em relação à carga resistiva. O capacitor carrega-se com a tensão de pico da entrada (desprezando a queda nos diodos). Quando a tensão de entrada se torna menor do que a tensão no capacitor os diodos ficam bloqueados e a corrente de saída é fornecida exclusivamente pelo capacitor, o qual vai se descarregando, até que, novamente, a tensão de entrada fique maior, recarregando o capacitor. A forma de onda da corrente de entrada é muito diferente de uma senóide, apresentando pulsos de corrente nos momentos em que o capacitor é recarregado, como mostrado na figura 22.

Para o retificador com carga indutiva (fig. 21c), a carga se comporta como uma fonte de corrente. Dependendo do valor da indutância, a corrente de entrada pode apresentar-se quase como uma corrente quadrada, como mostrado na figura 23. Para valores reduzidos de indutância, a corrente tende a uma forma que depende do tipo de componente à sua jusante. Se for apenas uma resistência, tende

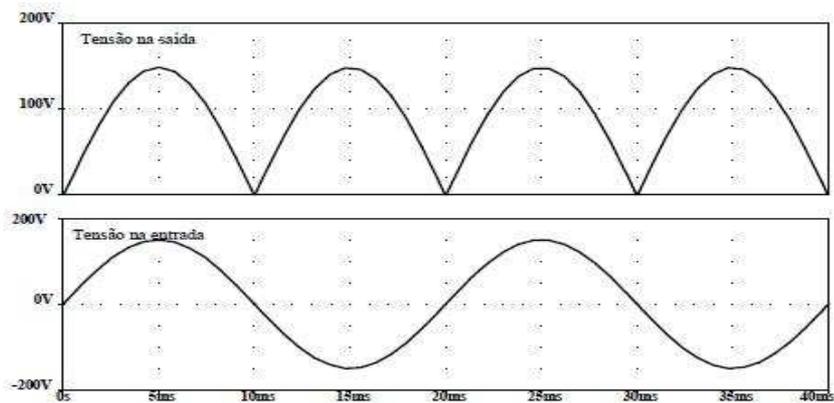
a uma senóide. Se for um capacitor, tende à forma de pulso, mas apresentando uma taxa de variação ( $di/dt$ ) reduzida.

Figura 21: Retificadores monofásicos não controlados, de onda completa.



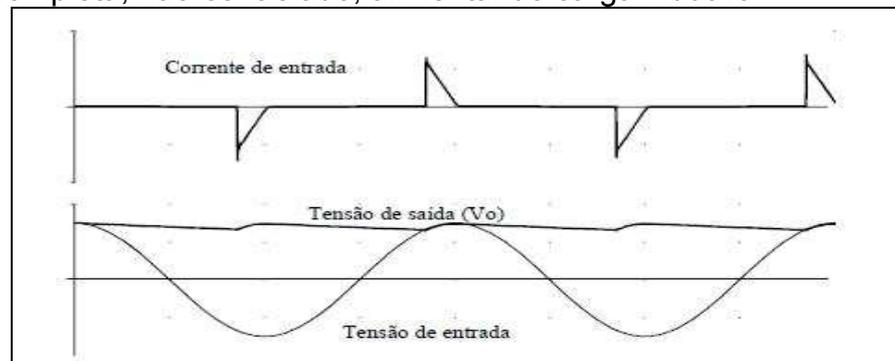
Fonte: J. A. Pomilio.

Figura 22: Formas de onda para retificador com carga resistiva.



Fonte: J. A. Pomilio,

Figura 23: Formas de onda no lado CA para retificador monofásico, onda-completa, não-controlado, alimentando carga indutiva



Fonte: J. A. Pomilio,

#### 4.4 Retificadores não-controlados com entrada trifásica

Quando a potência da carga alimentada se eleva, são utilizados retificadores trifásicos, como mostra a figura 24, a fim de, distribuindo a corrente entre as três fases, evitar desequilíbrios que poderiam ocorrer caso a corrente fosse consumida de apenas uma ou duas fases.

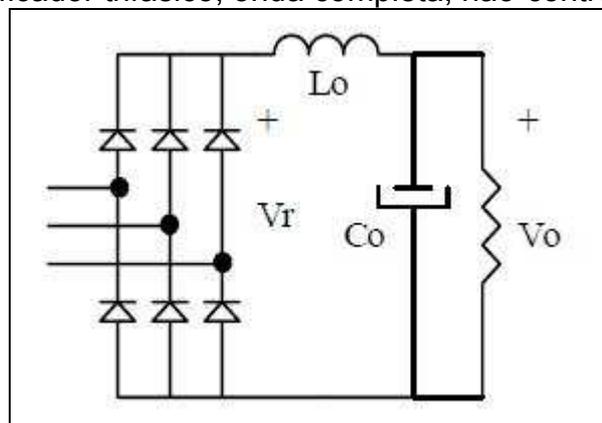
Neste caso a corrente é fornecida, a cada intervalo de 60 graus, por apenas duas das três fases.

Poderão conduzir aquelas fases que tiverem, em módulo, as duas maiores tensões. Ou seja, a fase que for mais positiva, poderá levar o diodo a ela conectado, na semi-ponte superior, à condução.

Na semi-ponte inferior poderá conduzir o diodo conectado às fase com tensão mais negativa. Pela fase com tensão intermediária não haverá corrente.

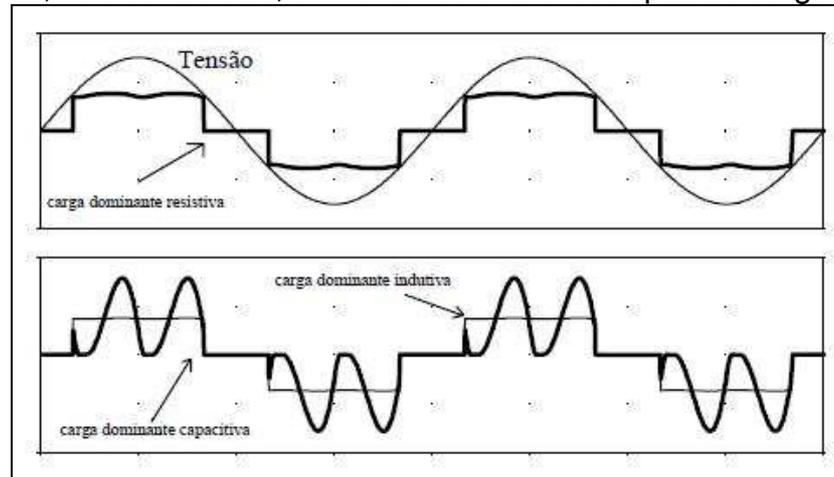
A figura 25 mostra formas de onda típicas considerando que o lado CC é composto, predominantemente, por uma carga resistiva, indutiva ou capacitiva. No primeiro caso a corrente segue a mesma forma da tensão sobre a carga, ou seja, uma retificação de 6 pulsos. Quando um filtro indutivo é utilizado, tem-se um alisamento da corrente, de modo que a onda apresenta-se praticamente retangular. Já com um filtro capacitivo (mantendo ainda uma pequena indutância série), têm-se os picos de corrente. Com o aumento da indutância tem-se uma redução dos picos e, eventualmente, a corrente não chega a se anular.

Figura 24: Retificador trifásico, onda completa, não-controlado.



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Figura 25: Formas de onda no lado CA para retificador trifásico, onda completa, não-controlado, alimentando diferentes tipos de carga.



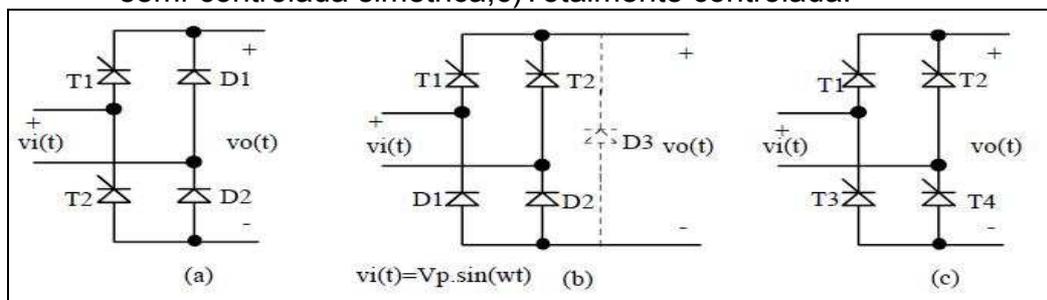
Fonte: J. A. Pompilio.

#### 4.5 Retificadores controlados

Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores em conversores estáticos. Possuem vasta aplicação naval, no acionamento de motores de corrente contínua, em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, corrente contínua, no acionamento de propulsores DP<sup>2</sup>, etc.

Analisaremos brevemente pontes retificadoras monofásicas, embora o estudo das pontes trifásicas não seja substancialmente diferente. Para potência superior a alguns kVA geralmente se usam pontes trifásicas (ou mesmo hexafásicas). A maioria dos navios mercantes utiliza pontes trifásicas. A Figura 26 mostra três estruturas de pontes de retificadores monofásicas.

Figura 26: Pontes retificadoras monofásica. a) semi-controlada assimétrica; b) semi-controlada simétrica; c) Totalmente controlada.



Fonte: J. A. Pompilio.

<sup>2</sup> Do inglês "Dynamic Positioning", posicionamento dinâmico.

A principal vantagem das pontes semi-controladas é o uso de apenas dois tiristores, sendo indicadas quando o fluxo de energia será apenas da fonte para a carga. Neste circuito a tensão de saída,  $v_o(t)$ , pode assumir apenas valores (instantâneos e médios) positivos. Sempre que a tensão de saída tender a se inverter haverá um caminho interno que manterá esta tensão em zero, desconectando a carga da rede.

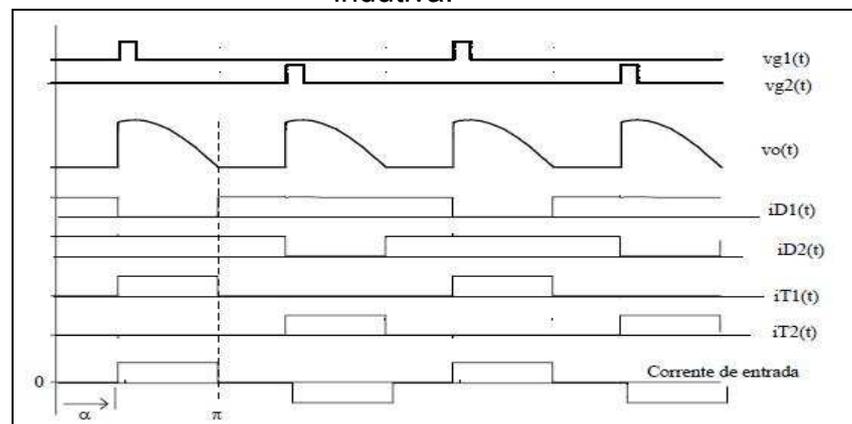
Quando a carga for resistiva, a forma de onda da corrente de linha será a mesma da tensão sobre a carga (obviamente sem a retificação). Com carga indutiva, a corrente irá se alisando à medida que aumenta a constante de tempo elétrica da carga, tendo, no limite, uma forma plana. Vista da entrada, a corrente assume uma forma retangular, como mostram as figuras a seguir.

#### a) Ponte semi-controlada assimétrica

Na ponte assimétrica, cujas formas de onda estão mostradas na figura 27, existe um caminho de livre-circulação formado pelos diodos D1 e D3. Supondo a polaridade da tensão da entrada como indicada em 3.19, o disparo de T1 conecta a entrada à carga (suposta indutiva) através do tiristor e D2. Quando a tensão de entrada se inverter, D1 entrará em condução e T1 cortará. Enquanto, devido ao tempo de desligamento do tiristor, T1, D1 e D2 conduzirem, a fonte estará curto-circuitada, com sua corrente sendo limitada pela impedância da fonte. Quando T2 for disparado, D1 cortará.

O intervalo de condução de cada SCR é de  $(\pi - \alpha)$ . Cada diodo conduz por  $(2\pi - \alpha)$ . A figura a seguir mostra formas de onda para este conversor.

Figura 27: Formas de onda de ponte retificadora semi-controlada assimétrica, com carga altamente indutiva.



Fonte: J. A. Pompilio.

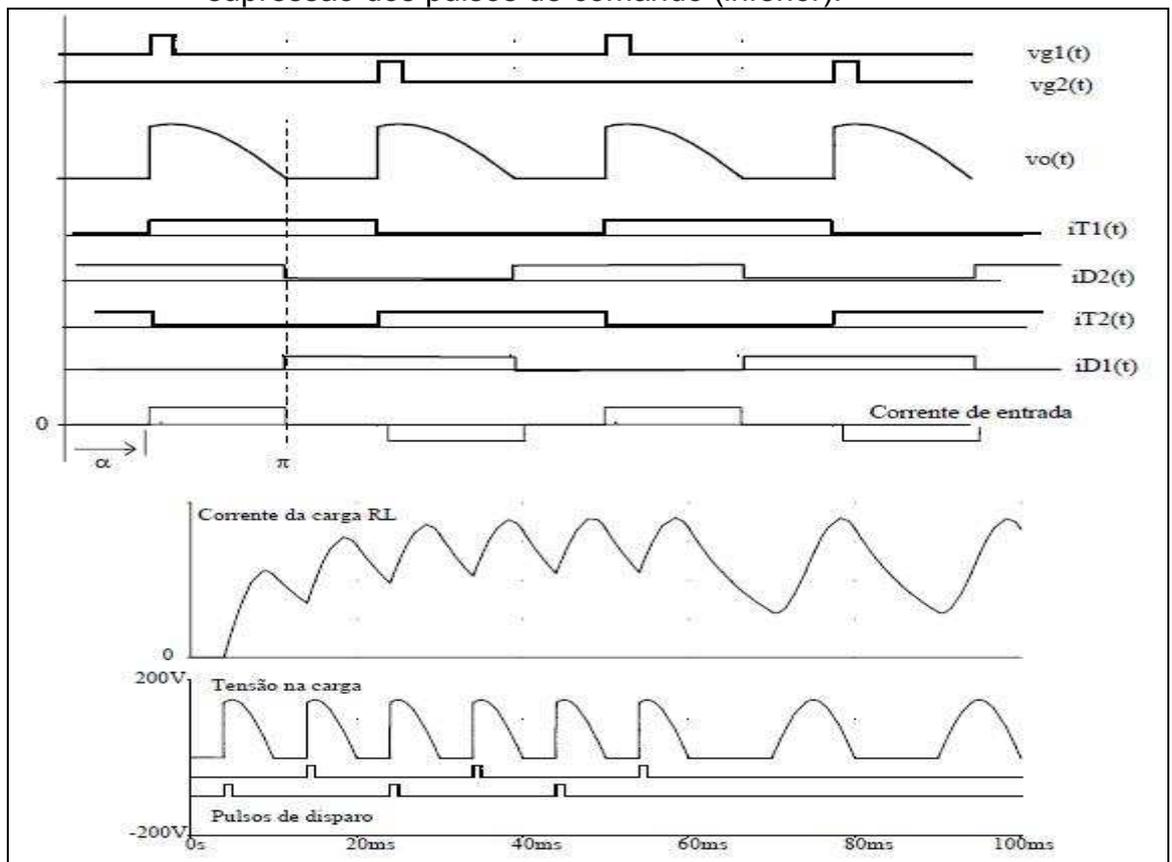
A tensão média de saída, calculada a cada semi-ciclo é dada por:

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_p \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta = \frac{V_p}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

b) Ponte semicontrolada simétrica

Neste circuito não existe um caminho natural de livre-circulação, a qual deve ocorrer sempre através de um SCR e um diodo. As mesmas equações da ponte assimétrica são válidas para este conversor.

Figura 28: Formas de onda de ponte retificadora semi-controlada simétrica, com carga altamente indutiva. Funcionamento normal (superior) e efeito da supressão dos pulsos de comando (inferior).



Fonte: J. A. Pompilio.

Supondo  $v_i(t)$  com a polaridade indicada, quando T1 for disparado, a corrente circulará por T1 e D3. Quando a tensão da fonte inverter a polaridade, D1 entrará em condução e D2 bloqueará. A tensão na carga será nula pois T1 e D1 conduzirão,

supondo que a corrente não se interrompa (carga indutiva). Quando T2 for disparado, T1 bloqueará. Diodos e tiristores conduzem, cada um por  $180^\circ$ .

Note que se T2 não for disparado, e supondo que T1 continue a conduzir, em função da elevada constante de tempo elétrica da carga, no próximo semiciclo positivo a fonte será novamente acoplada à carga fornecendo-lhe mais corrente. Ou seja, a simples retirada dos pulsos de disparo não garante o desacoplamento entre carga e fonte. Para que isso ocorra é necessário diminuir o ângulo de disparo para que a corrente se torne descontínua e assim T1 corte. Obviamente o mesmo comportamento pode ocorrer com respeito ao outro par de componentes. Este comportamento é ilustrado na figura passada.

Isto pode ser evitado pela inclusão do diodo de livre-circulação D3, o qual entrará em condução quando a tensão se inverter, desligando T1 e D1. A vantagem da montagem assimétrica é que os catodos estão num mesmo potencial, de modo que os sinais de acionamento podem estar num mesmo potencial.

#### c) Ponte totalmente controlada

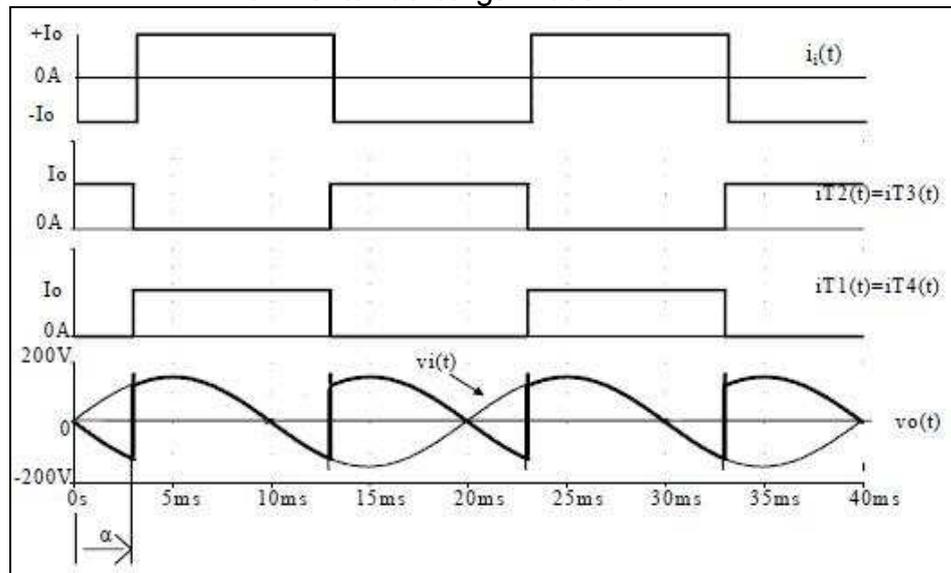
Seu principal uso é no acionamento de motor de corrente contínua quando é necessária uma operação em dois quadrantes do plano tensão x corrente. Nestes circuitos não pode haver inversão de polaridade na corrente, de modo que, mantida a polaridade da tensão  $E_g$ , não é possível a frenagem da máquina. A tensão sobre a carga pode se tornar negativa, desde que exista um elemento indutivo que mantenha a circulação de corrente pelos tiristores, mesmo quando reversamente polarizados. A energia retornada à fonte nesta situação é aquela acumulada na indutância de armadura. Formas de onda típicas estão mostradas na figura 29.

Os pares de componentes T1 e T4, T2 e T3 devem ser disparados simultaneamente, a fim de garantir um caminho para a corrente através da fonte.

No caso de corrente descontínua (corrente da carga vai a zero dentro de cada semiciclo da rede), os tiristores desligarão quando a corrente cair abaixo da corrente de manutenção. No caso de condução contínua, o par de tiristores desligará quando a polaridade da fonte se inverter e for disparado outro par de tiristores.

Assim, se houver inversão na polaridade da tensão de entrada, mas não for acionado o outro par de SCRs, a tensão nos terminais do retificador será negativa.

Figura 29: Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva



Fonte: J. A. Pompilio.

A tensão média de saída, calculada a cada semiciclo é dada por:

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_p \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta = \frac{2V_p}{\pi} \cdot \text{cos}\alpha$$

A tensão eficaz de saída é igual ao valor eficaz da tensão de entrada (supondo condução contínua do conversor, ou seja, a ponte retificadora sempre está em funcionamento). A corrente eficaz na entrada vale  $I_0$ .

A corrente de entrada apresenta-se como uma onda quadrada, com sua componente fundamental defasada de um ângulo  $\alpha$  em relação à tensão. Durante os intervalos em que a corrente e tensão na entrada apresentam sinais opostos, há um fluxo de energia da carga para a fonte. Em *regime permanente e com carga passiva*, no entanto, o fluxo de potência é sempre da fonte para a carga, ou seja, o ângulo de disparo deve ser inferior a  $90^\circ$ .

## 5 INVERSOR

Os inversores de tensão são conversores estáticos destinados a controlar o fluxo de energia elétrica entre uma Fonte de Tensão Contínua e uma Carga em Corrente Alternada monofásica ou polifásica, com controle dos níveis do valor eficaz da tensão e da frequência, dependendo da aplicação.

As principais aplicações dos inversores de tensão são as seguintes:

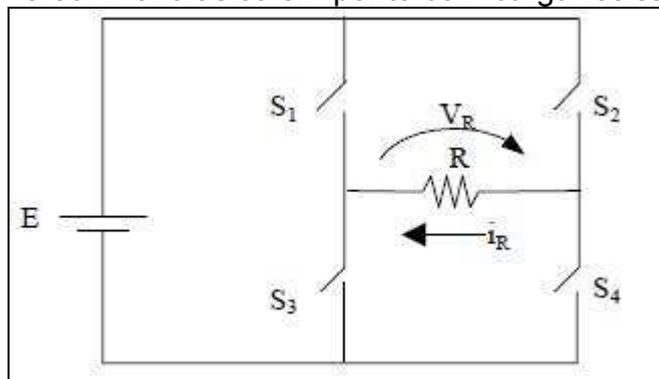
- (a) acionamento de máquinas elétricas de corrente alternada;
- (b) sistemas de alimentação ininterrupta, em tensão alternada, a partir de bateria;
- (c) aquecimento indutivo;
- (d) fontes chaveadas

### 5.1 Estruturas básicas

#### (a) Inversor monofásico em ponte

A estrutura do inversor monofásico em ponte, alimentando carga resistiva está representada na figura 30. Os interruptores são comandados no fechamento e na abertura.

Figura 30: Inversor monofásico em ponte com carga resistiva



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Onde:

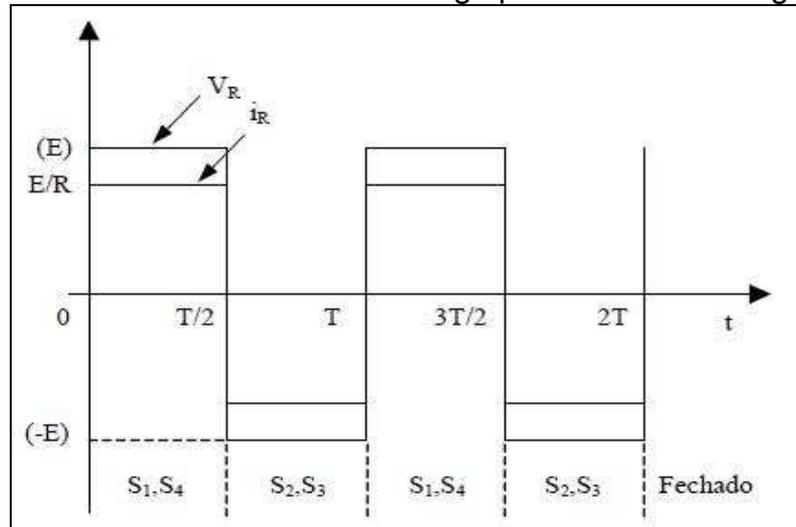
$S_{1,2,3,4}$  – Interruptores Genéricos

R – Resistência de carga

E – Fonte de alimentação

As formas de onda correspondentes estão representadas na figura a seguir.

Figura 31: Tensão e corrente de carga para o circuito da figura 30



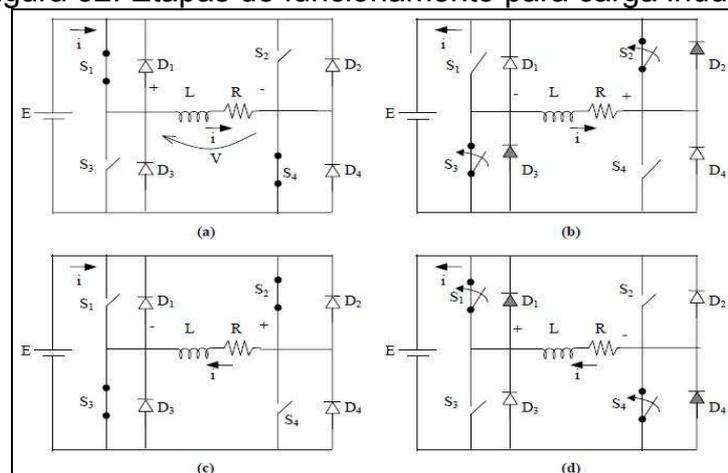
Fonte: Adaptação próprio Autor.

Quando  $S_{1,4}$  conduzem, a tensão de carga é igual a  $E$ .

Quando  $S_{2,3}$  conduzem, a tensão na carga torna-se igual a  $-E$ .

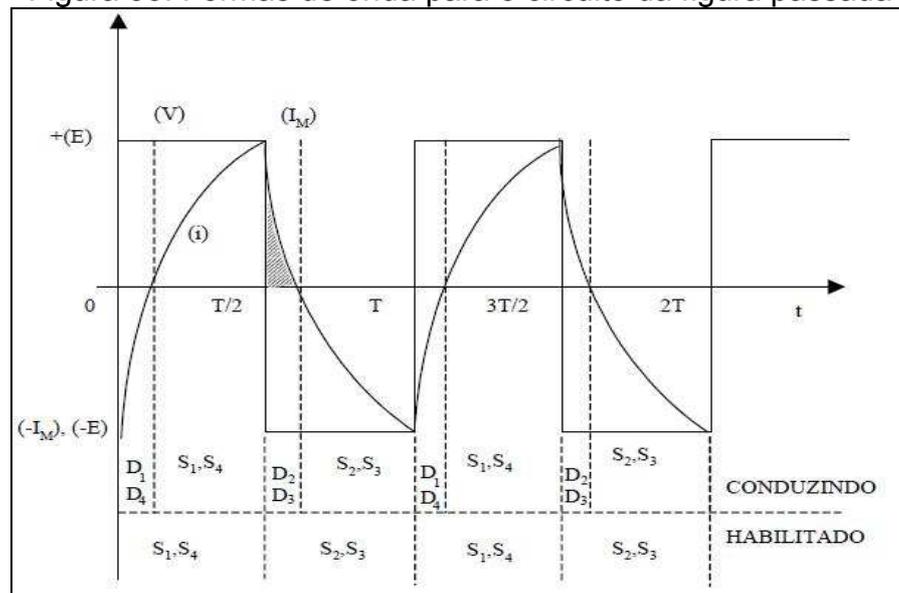
Se a carga for indutiva, devem ser adicionados os diodos de roda livre  $D_{1,2,3,4}$  como está representado na figura 32, onde também aparecem as 4 etapas de funcionamento da estrutura.

Figura 32: Etapas de funcionamento para carga indutiva



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Figura 33: Formas de onda para o circuito da figura passada



Fonte: Adaptação próprio Autor.

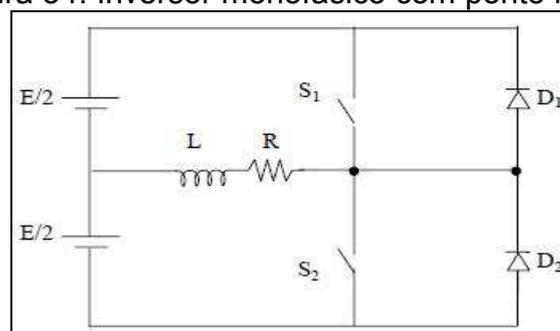
Para o circuito funcionar corretamente, é necessário que a fonte  $E$  seja reversível

em corrente, para os casos em que a carga é indutiva.

### (b) Inversor monofásico com ponto médio

O circuito com ponto médio está representado na figura 34 e emprega apenas um braço, sendo desse modo mais simples de ser comandado que o inversor em ponte.

Figura 34: Inversor monofásico com ponto médio



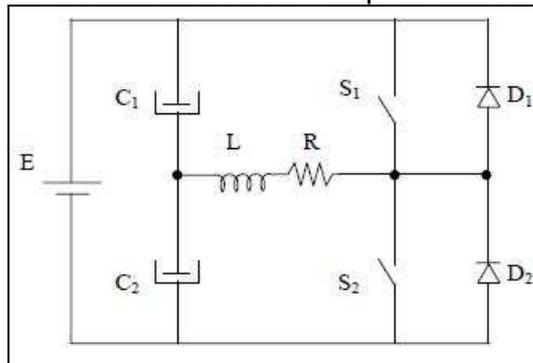
Fonte: Adaptação próprio Autor.

O funcionamento deste circuito é semelhante ao apresentado na figura 32 entretanto, a forma de onda quadrada da tensão na carga terá amplitude  $E/2$ .

### (c) Inversor Monofásico com ponto médio a capacitor

Para potências baixas e frequências elevadas, pode ser empregada a estrutura representada na figura 35, em substituição à estrutura representada na figura 34. O ponto médio é obtido por meio de um divisor capacitivo, que é muito mais fácil de ser obtido.

Figura 35: Inversor monofásico com ponto médio a capacitor



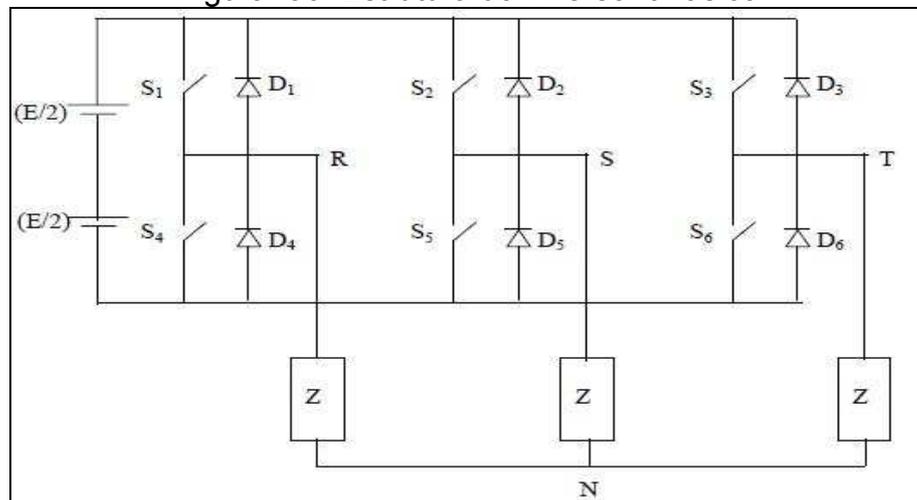
Fonte: Adaptação próprio Autor.

$C_{1,2}$  - para altas frequências são realizáveis em dimensões (Volumes).

### (e) O inversor trifásico

A estrutura do inversor trifásico está representada na figura a seguir.

Figura 36: Estrutura do inversor trifásico



Fonte: Adaptação próprio Autor.

$S_{1,2,3,4,5,6}$  – Interruptores comandados

$D_{1,2,3,4,5,6}$  – Diodos de regeneração

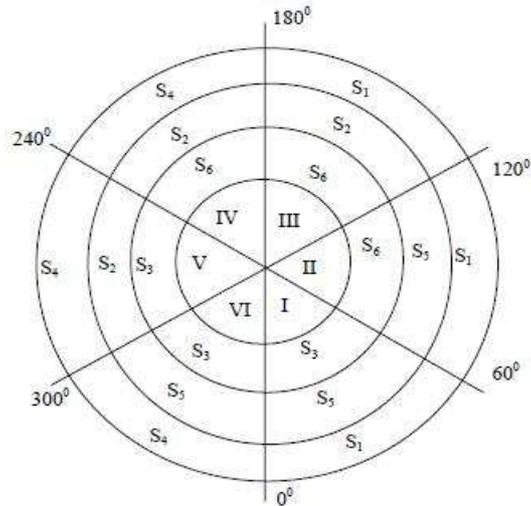
E – fonte de alimentação

Z – carga

Os interruptores são comandados segundo o diagrama representado na figura 37.

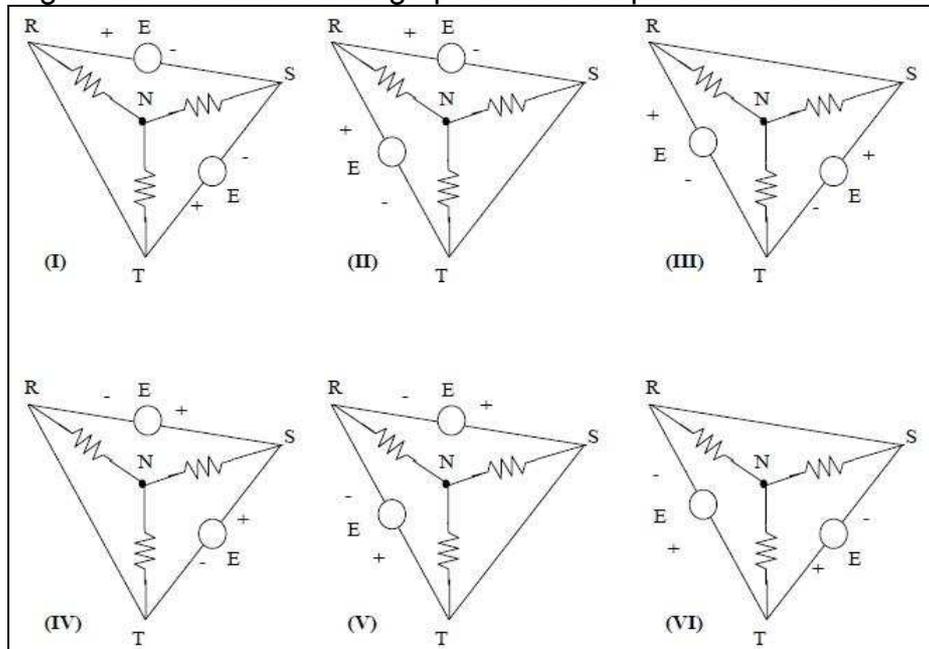
Em cada instante existem 3 interruptores em condução, 2 no grupo positivo e 1 no negativo ou vice-versa. Cada interruptor é mantido habilitado durante 180°, ocorrendo uma comutação a cada 60°.

Figura 37: Diagrama de comando do inversor trifásico



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Figura 38: Tensões de carga para cada etapa de funcionamento



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Sejam as tensões de linha:

$$V_{RS} = V_{RO} - V_{SO}$$

$$V_{ST} = V_{SO} - V_{TO}$$

$$V_{TR} = V_{TO} - V_{RO}$$

Sejam as relações seguintes:

$$V_{RO} = V_{RN} + V_{NO}$$

$$V_{SO} = V_{SN} + V_{NO}$$

$$V_{TO} = V_{TN} + V_{NO}$$

Assim:

$$V_{RO} + V_{SO} + V_{TO} = V_{RN} + V_{SN} + V_{TN} + 3V_{NO}$$

Para um sistema trifásico balanceado vale a relação.

$$V_{RN} + V_{SN} + V_{TN} = 0$$

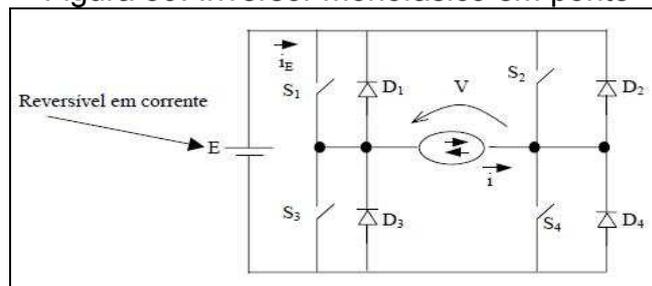
Assim:

$$V_{NO} = \frac{V_{RO} + V_{SO} + V_{TO}}{3}$$

## 5.2 Reversibilidade dos inversores de tensão

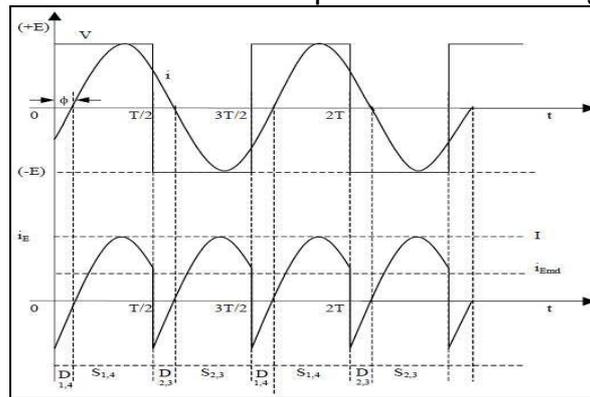
Seja o inversor monofásico em ponte, alimentando uma carga ativa com características tais que a sua corrente seja senoidal pura, como está representado na figura 39 , com as grandezas representadas em função do tempo na figura subsequente.

Figura 39: Inversor monofásico em ponte



Fonte: Adaptação próprio Autor.

Figura 40: Formas de onda para o circuito da figura 39



Fonte: Adaptação próprio Autor.

A potência média entregue pela fonte E é dada pela expressão:

$$P = E \cdot i_{\text{eméd}}$$

Sabendo que,

$$i_{\text{eméd}} = \frac{2}{\pi} I \cos \phi$$

Onde: I = Amplitude de  $i$ .

Assim:

$$P = \frac{2E}{\pi} \cdot I \cdot \cos \phi$$

Para :  $0 \leq \phi < \frac{\pi}{2}$ , P é maior do que zero e o fluxo de potência se dá da fonte E para a carga.

Para :  $\phi = \frac{\pi}{2}$ , não há transferência de potência ativa entre a fonte e a carga.

Para :  $\frac{\pi}{2} < \phi \leq \pi$ , P é menor do que zero e o fluxo de potência se dá da carga para a fonte E. A corrente média na fonte E torna-se negativa.

Para um ângulo  $\phi$  igual a  $\pi$ , os tempos de condução dos interruptores  $S_{1,2,3,4}$  são nulos. Apenas os diodos de regeneração  $D_{1,2,3,4}$  conduzem.

A propriedade de reversibilidade dos inversores de tensão é muito importante no acionamento das máquinas de corrente alternada pelo fato de permitir a frenagem, com a inversão do sentido da corrente na fonte E.

### 5.3 Controle de tensão nos inversores

Normalmente, quando se emprega um inversor, deseja-se controlar ou regular a tensão de carga.

No primeiro caso, pode-se citar a título de exemplo a alimentação de uma máquina de corrente alternada, onde ao se variar a frequência deve-se também variar a tensão (valor eficaz), para manter constante o fluxo no entreferro.

No segundo caso, pode-se citar a alimentação de cargas críticas a partir de baterias. Tanto a variação da tensão da bateria quanto as impedâncias internas da bateria e do próprio inversor alteram a tensão de saída, exigindo a regulação.

Os métodos empregados para esse fim podem ser agrupados do seguinte modo:

- a) Controle da tensão na entrada do inversor;
- b) Controle da tensão dentro do inversor, por modulação ou por defasagem;
- c) Controle da tensão na saída do inversor.

O controle da tensão na saída é raramente empregado, por ser mais complicado e por gerar normalmente muitas harmônicas na carga.

O controle na entrada é muito comum e para isto são empregados dois métodos, dependendo do tipo de fonte. Quando se trata de uma bateria, emprega-se um conversor CC-CC e quando se trata da rede alternada comercial, emprega-se um retificador controlado.

## 6 APLICAÇÕES EM MOTORES ELÉTRICOS PARA PROPULSÃO

Para acionar propulsores de grande porte utilizados nos navios de uma forma elétrica, seriam necessários motores elétricos bem poderosos com alta carga e potência. Navios de tecnologia DP, posicionamento dinâmico, o tipo predominante de controle e regulação deste sistema é via elétrica, por isso, esses navios devem ter um abastecimento elétrico muito grande para suprir motores elétricos dos propulsores.

No princípio da tecnologia DP, que coincidiu com o advento da tecnologia de DC/SCR, poucos motores AC<sup>3</sup>, eram utilizados para acionar propulsores de passo variável com rotação constante (RPM) ou motores DC<sup>4</sup> controlados por SCR para acionar propulsores de passo fixo de variável rotação.

Nos anos recentes, acionadores AC de controle de velocidade tornaram se viáveis e passaram a ser utilizado em algumas aplicações para propulsão DP.

Os acionadores de motor mais comumente utilizados são:

- a) Conversores DC, SCR, para motores DC
- b) Ciclo conversores para motores AC, geralmente para motores síncronos.
- c) Inversores de corrente primária, CSI, para motores AC síncronos.-Inversores de tensão primária, VSI<sup>5</sup>, para motores AC, assíncrono, síncrono simples e de magnetização permanente.

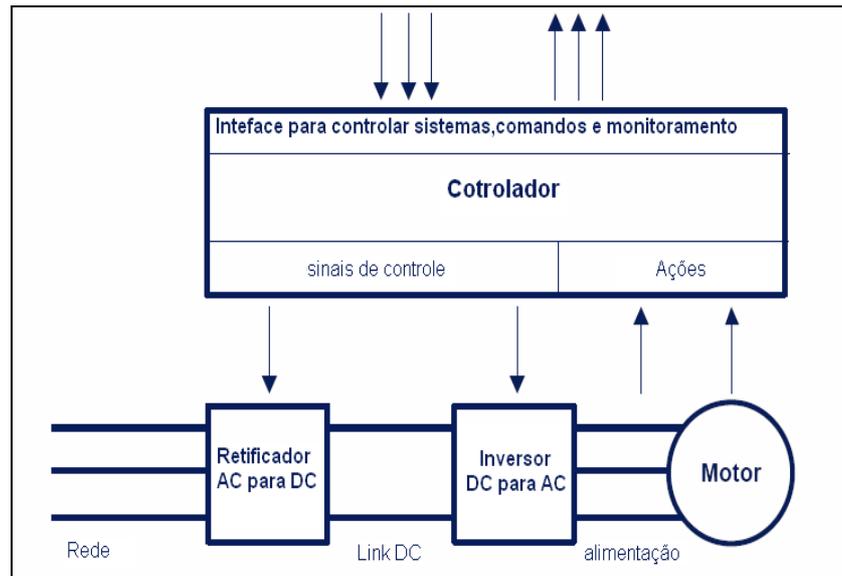
Figura 41: Acionador de velocidade variável, mostrando um conversor de frequência com Link DC, tipicamente para conversores do tipo VSI e CSI. Ciclos não possuem link DC

---

<sup>3</sup> Do inglês "Alternate Current", Corrente Alternada.

<sup>4</sup> Do inglês "Continuous Current", Corrente Contínua.

<sup>5</sup> Do inglês, "Voltage Source Inverter", Inversor de Tensão.



Fonte: Adaptação e tradução próprio Autor.

### 6.1 Sistemas AC com propulsores de passo variável

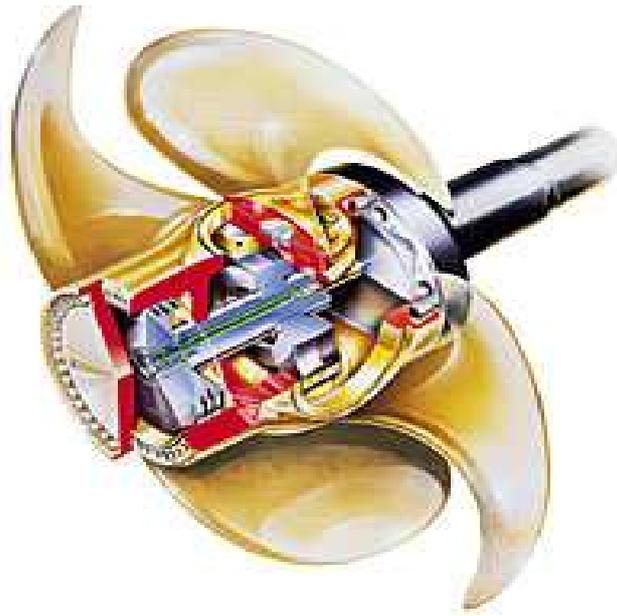
Composto por vários geradores que alimentam com corrente alternada num barramento comum separado com frequência constante e voltagem entre 4160 e 6000 VAC. Um motor elétrico de velocidade constante engraza no motor que aciona o propulsor, esses motores usualmente possuem indução do tipo gaiola podem ser projetados com chave seletora de pólo para permitir duas velocidades operacionais.

Uma simplicidade elétrica garante uma eficiência mais alta no ponto designado (carga máxima) dos sistemas de acionamentos elétricos a bordo.

Propulsores de passo variável são menos eficientes quando comparado a um propulsor de passo fixo em certas quantidades de carga parcial, a energia puxada por um propulsor CP<sup>6</sup> a partir do zero é aproximadamente 20% da energia avaliada real. A parte elétrica desse sistema baseia-se em um arranjo simples e seguro. Mas o propulsor de passo variável é consideravelmente mais complexo do que o passo fixo FP, ressaltando também que é inacessível para manutenção de rotina e sendo necessária a docagem do navio para se ter acesso ou retirar o propulsor.

Figura 42: Propulsor de passo variável. São mais complexos que um propulsor simples por seus mecanismos para a movimentação do hélice

<sup>6</sup> Do inglês, "Controllable pitch", passo controlável.

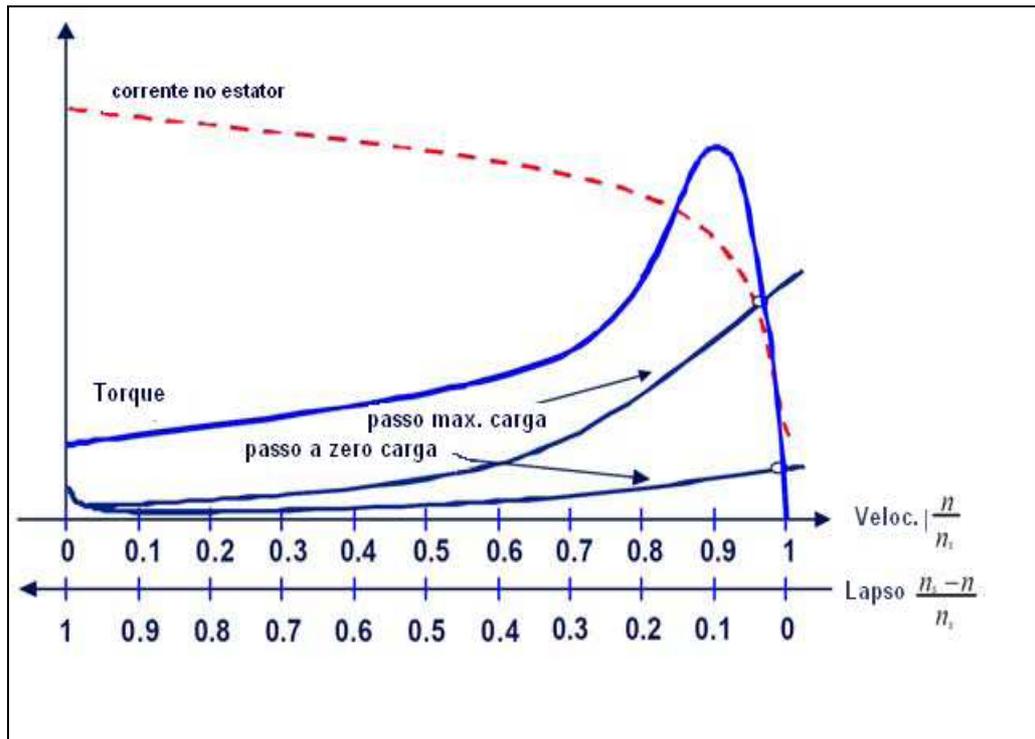


Fonte: Estudante de PhD Damir Radan.

Quando iniciado em linha direta, o motor de indução tem uma grande corrente transitória de arranque, tipicamente de cinco a sete vezes a corrente nominal, com um torque significativo no eixo e quedas de tensão na rede. A capacidade mínima do gerador de trabalho deve ser definida para possibilitar a partida desse grande motor.

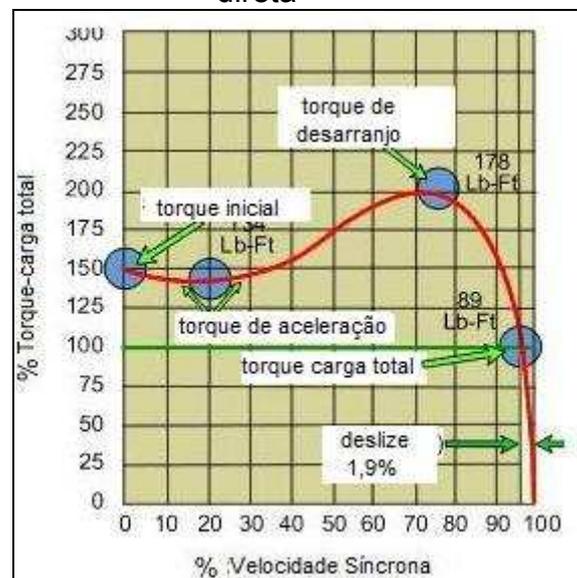
Partidas delta-estrela são frequentemente utilizadas em partidas de alto torque com reduzidas transições, mas não é a melhor solução. Dispositivos chamados de 'soft-starter', partida suave, e auto-transformadores têm mostrado resultados melhores. Esses dispositivos não são comumente utilizados para altos níveis de energia.

Figura 43: Características de carga para motores assíncronos em linha direta, curvas de cargas para propulsores de passo variável



Fonte: adaptação e tradução próprio Autor.

Figura 44: Característica de carga para um motor síncrono de ligação direta



Fonte: Adaptação e tradução próprio Autor.

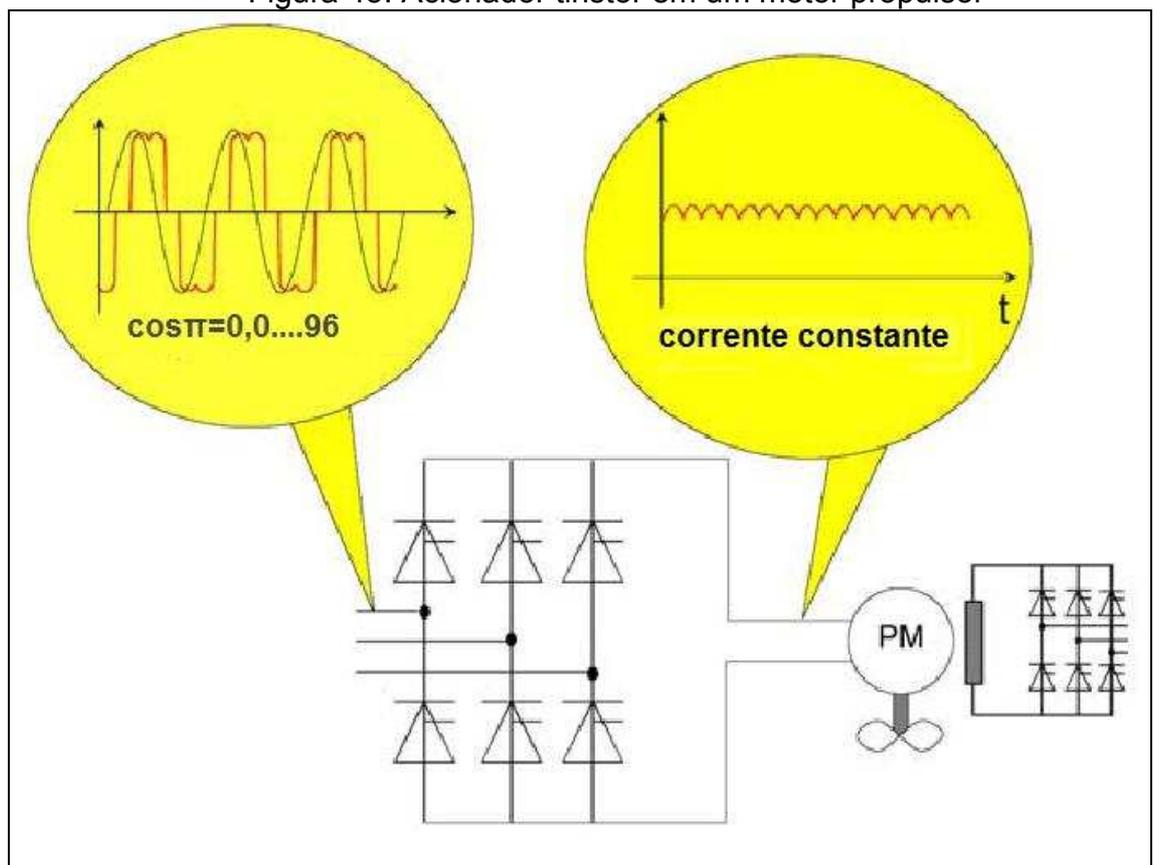
## 6.2 Controlador SCR de corrente contínua e propulsores de passo fixo

Uma corrente do tipo alternada, AC, é produzida por geradores diesel a uma constante voltagem e freqüência. Sendo que, os propulsores de passo fixo são acionados através de motores alimentados por corrente contínua, variando sua velocidade e invertendo a direção de rotação do eixo-propulsor permitindo assim controlar a sua magnitude e direção.

A propulsão AC/DC combina a geração altamente eficiente fidedigna de corrente Alternada AC com a capacidade de produzir alto torque à baixa velocidade dos motores de corrente contínua DC, a viabilidade de variar a característica ajustando a excitação, e fácil inversão da direção de rotação.

O tiristor, retificador controlador de silício(SCR), alimenta o motor DC com uma controlada corrente na armadura enquanto o estator é excitado com uma corrente de campo regulada.

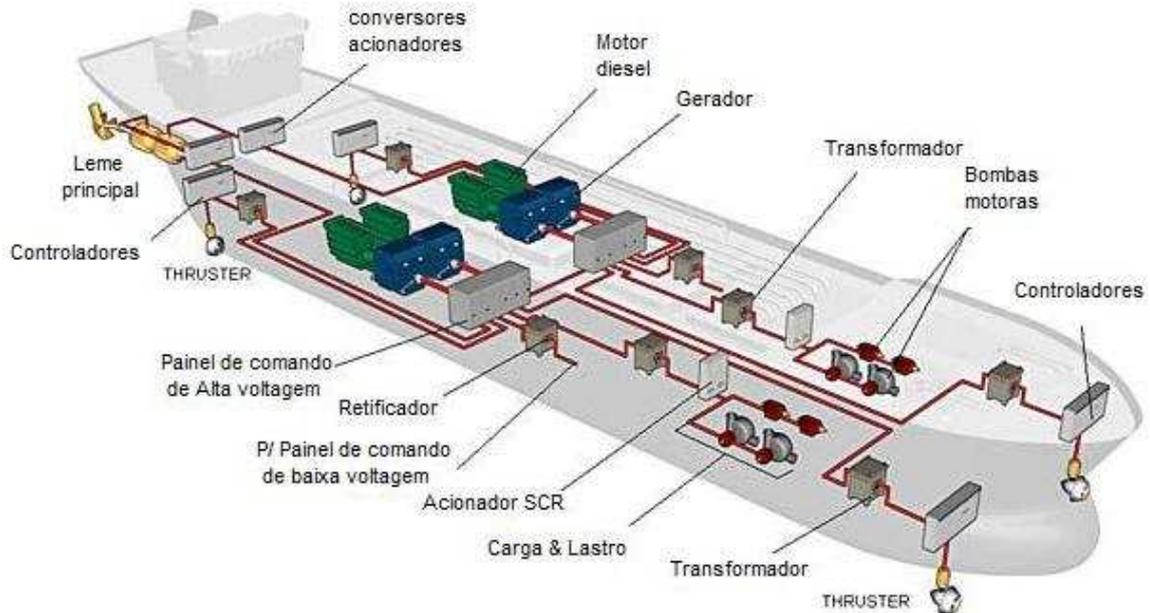
Figura 45: Acionador tiristor em um motor propulsor



Fonte: adaptação e tradução próprio Autor.

Vemos a seguir a distribuição de energia para propulsão e mobilidade nos navios tipo quebra-gelo. Essa configuração também é adotada na maioria dos navios de propulsão elétrica e posicionamento dinâmico.

Figura 46: Aplicação de acionadores no navio de propulsão elétrica



Fonte: ABB Marine.

O controlador SCR foi um grande advento para viabilizar o desenvolvimento de navios de posicionamento dinâmico, pois através dele os motores de grande potência, necessários para esse tipo de função, tornaram-se possíveis em instalações marítimas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de acrescentar informações específicas sobre os acionamentos elétricos, foram apresentados conhecimentos diversos, tais como características singulares em cada tipo de corrente, seja ela contínua ou alternada, e os componentes essenciais para constituir os conversores e acionadores.

A complexidade dos conversores, inversores, retificadores é definida no modo de sua atuação dentro do circuito na qual está presente. A sua função particular deve ser elaborada para que o circuito funcione corretamente, sempre procurando maneiras mais eficientes, rápidas e exatas. Por isso, cada conversor depende um do outro para que o circuito de acionamento funcione corretamente.

É notória a particularidade que possui os componentes formadores dos conversores utilizados a bordo. Ao analisar a sua composição, percebe-se a necessidade de uma confiabilidade e resistência além do normal. Os conversores a bordo são feitos para resistir uma carga fora do normal para padrões industriais. É tanto que só a partir do advento do SCR que foi possível se utilizar a bordo motores elétricos que desenvolvem alta potência com um rendimento viável e eficaz.

O circuito acionador tem como principal função ativar o equipamento elétrico em questão, e graças aos conversores é possível acionar esse equipamento em qualquer tipo de instalação elétrica.

## REFERÊNCIAS

ABB MARINE; Página oficial da empresa. Disponível em: < <http://www.abb.com/marine>. Acesso em: ago. 2016.

AEGIS SEMICONDUTORES. Disponível em: < <http://www.aegis.com.br>. Acesso em: ago. 2016.

ALMEIDA, J. L. A. **Dispositivos semicondutores:** tiristores – Controle de Potência em CC e CA. Coleção Estude e Use, Série Eletrônica Analógica, Editora Érica, São Paulo, 1996.

BARBI, I. **Eletrônica de potência.** Editora da UFSC, Florianópolis, 1986.

CANESIN, C. A. **Eletrônica de potência I.** Apostila do Professor-FEIS-UNESP, Ilha Solteira(SP), 1991.

ERICKSSON, R. W. **Fundamentals of power electronics.** Editora Chapman and Hall, New York-USA, 1997.

MOHAN, Undeland & Robbins. **Power electronics.** IEEE Press, 2ªedição, 1995.

NTNU- “Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet”. Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia. Disponível em: < <http://www.ntnu.no>>. Acesso em: ago. 2016.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência:** circuitos, dispositivos e aplicações. Makron Books, São Paulo, 1999.

R. GOHR Jr. e A. J. PERIN. **Three-Phase Rectifier Filters Analysis.** Apresentado na conferência de energia, COBEP '91, Florianópolis - SC, pp. 281-283.

SIEMENS S.A. **Informativo técnico volume X.** Rio de Janeiro, 1978.

SUGA, M. KIMATA, Y. OHNISHI e R. UCHIDA. **New switching method for single-phase AC to DC converter.** IEEE PCC '93, Yokohama, Japão, 1993.