

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA**  
**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS – APMA**

**PERICLES JOSÉ PENA SILVA**

**INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

**RIO DE JANEIRO**  
**2016**

**PERICLES JOSÉ PENA SILVA**

**INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

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 necessários à obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 emendada.

Orientador: Swami Novaes Chamarelli.

**RIO DE JANEIRO**

**2016**

**PERICLES JOSÉ PENA SILVA**

**INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

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 necessários à obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 emendada.

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

Orientador: Swami Novaes Chamarelli.

---

Assinatura do Orientador

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, e a toda minha família pelo apoio e por caminharem ao meu lado enfrentando principalmente o fator distância.

Aos meus colegas de turma que muito me ajudaram para concluir este curso.

Em especial meu orientador o Sr. Swami Novaes Chamarelli por todo ensino passado e ajuda para realização deste trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar  
seria menor se lhe faltasse uma gota”

Madre Tereza de Calcuta

## RESUMO

Os inversores de frequência surgiram para substituir os rústicos e pesados sistemas de variação de velocidade mecânicos, inversores de velocidade e variadores hidráulicos, bem como os custosos motores de corrente contínua. Os conversores de frequência convertem a tensão de uma rede alternada senoidal, em tensão contínua e depois em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Os conversores de frequência podem atuar como dispositivos de proteção para os problemas como desbalanceamento entre fases, sobrecargas, queda de tensão, entre outros. Os inversores de frequência possuem diversas aplicações na indústria. Como por exemplo, indústria naval, indústria do petróleo, siderúrgicas, veículos elétricos entre outras. São muitas as vantagens desse sistema, como por exemplo, a redução dos custos, menos robustez e quantidade de equipamentos do sistema e melhor manutenção e monitoramento.

**Palavras-chave:** Inversores de frequência. Conversores de frequência. Tensão.

## **ABSTRACT**

The frequency inverters have emerged to replace the rustic and heavy mechanical speed variation systems, speed drives and hydraulic drives, as well as the expensive DC motors. Frequency converters, also known as frequency converters, convert a sinusoidal alternating voltage network, for direct voltage and then a voltage of variable amplitude and frequency. frequency converters can act as protective devices for problems such as imbalance between phases, overloads, voltage drop, among others. The frequency converters have many applications in industry. Such as shipbuilding, petroleum, steel, electric vehicles among others. There are many advantages of this system, such as the reduction of costs, less strength and amount of system and equipment maintenance and monitoring best.

**Keywords:** Frequency inverters. Frequency converters. Tension.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b>	Representação do diodo	15
<b>Figura 2:</b>	Símbolo do diodo Zener	16
<b>Figura 3:</b>	Lógica de controle PWM	18
<b>Figura 4:</b>	Funcionamento do Tiristor	19
<b>Figura 5:</b>	Chaveamento e estrutura interna do GTO	22
<b>Figura 6:</b>	Característica físicas do IGBT	24
<b>Figura 7:</b>	Tensão CA monofásica e trifásica	25
<b>Figura 8:</b>	Modo de operação do diodo	26
<b>Figura 9:</b>	Modo de operação do tiristor	27
<b>Figura 10:</b>	Estrutura do motor de indução	31
<b>Figura 11:</b>	Circuito básico do inversor monofásico	34
<b>Figura 12:</b>	Ondas de saída do inversor	35
<b>Figura 13:</b>	VSI em meia ponte	36
<b>Figura 14:</b>	Forma de onda de saída do VSI em meia ponte	37
<b>Figura 15:</b>	Circuito básico do inversor em ponte completa	38
<b>Figura 16:</b>	Inversor trifásico	38
<b>Figura 17:</b>	Saídas do motor Trifásico	39



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>HISTÓRICO</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Componentes mecânicos</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Componentes hidráulicos</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Componentes eletromagnéticos</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Chaves semicondutoras</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Diodos</b>	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>PWM</b>	<b>17</b>
<b>3.4</b>	<b>Tiristores</b>	<b>18</b>
3.4.1	Princípio de funcionamento do tiristor	18
3.4.2	Maneiras de disparo do tiristor	19
<b>3.5</b>	<b>Gate turn-off thyristor (GTO)</b>	<b>21</b>
3.5.1	Princípio de funcionamento	22
<b>3.6</b>	<b>Insulated gate bipolar transistor (IGBT)</b>	<b>23</b>
3.6.1	Operação física do IGBT	24
<b>3.7</b>	<b>Integrated gate commutated thyristor (IGCT)</b>	<b>25</b>
<b>3.8</b>	<b>Retificador de entrada</b>	<b>25</b>
<b>3.9</b>	<b>Elo cc</b>	<b>28</b>
<b>3.10</b>	<b>Inversor</b>	<b>28</b>
<b>3.11</b>	<b>Motores de indução</b>	<b>29</b>
3.11.1	Motores de indução monofásico	31
3.11.2	Motores de indução trifásico	33
<b>4</b>	<b>TIPOS DE INVERSORES</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Inversor monofásico</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Inversores de ponte de tensão (VSIs)</b>	<b>35</b>
4.2.1	VSI meia ponte	35
4.2.2	VSI ponte completa	37
<b>4.3</b>	<b>Inversor ca-cc trifásico</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÕES DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA</b>	<b>40</b>
<b>5.1</b>	<b>Indústria naval</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Indústria do petróleo</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Siderurgia</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Há uma necessidade cada vez maior do controle de processos industriais, tanto para a melhoria da qualidade e da produtividade como proporcionar maior confiabilidade dos processos, além de dar mais segurança aos operadores. É nesse contexto que se desenvolve a automação industrial que tem por objetivo a melhoria de processos desde a redução do consumo de matérias primas até melhorias nas condições de segurança.

Anteriormente à década de 60, os sistemas mais utilizados para variação de velocidade eram implementados por motores de corrente contínua, que exigem manutenção periódica (seja preventiva ou preditiva, com elevado grau de controle), conhecidos como os primeiros dispositivos de conversão de energia elétrica para energia mecânica.

Para a obtenção de velocidade variável o sistema precisava de um segundo dispositivo de conversão de energia, que utilizavam componentes mecânicos, hidráulicos ou eletromagnéticos. Atualmente são usados motores elétricos de indução trifásicos para substituir estes rústicos e pesados sistemas de variação de velocidade.

Os conversores de frequência de última geração, não somente controlam a velocidade do eixo de motores elétricos trifásicos de corrente alternada, como também controlam outros parâmetros inerentes ao motor elétrico, sendo que um deles é o controle de torque.

Modernas técnicas de chaveamento da forma de onda de tensão e também da frequência aplicada sobre o estator do motor elétrico, permitem o controle com excelente precisão, sobre o eixo o motor. Uma das técnicas mais conhecidas é o PWM (Pulse Width Modulation). Os conversores de ultima geração, fazem medições precisas e estimativas dos parâmetros elétricos do motor, de modo a obter os dados necessário para o modelamento e conseqüentemente controle preciso do motor.

Em navios, os conversores são montados em painéis elétricos, sendo bastante utilizado na automação industrial. Podem trabalhar em interfaces com computadores, centrais de comando, e conduzir, simultaneamente, dezenas de motores. É incorporado os inversores de frequência aos motores de indução de frequência formando desta forma unidades compactas. Utilizado em espaços

pequenos, onde se necessita variação de velocidade com fácil instalação, ou em situação que exijam mobilidade.

Com advento da informática, através da funcionalidade que os microprocessadores trouxeram aos vários setores elétrico-eletrônico, os conversores de frequência hoje são dotados de poderosas CPUs ou placas de controle microprocessadas, que possibilitam uma variedade grande nos métodos de controle, ampliando e flexibilizando o uso dos mesmos. Assim, cada fabricante consegue implementar sua própria estratégia de controle, de modo a obter domínio total sobre o comportamento do eixo do motor elétrico, permitindo em muitos casos que os motores elétricos trifásicos de corrente alternada, substituam o uso de motores em muitas aplicações.

Os conversores de frequência por serem dotados comumente de uma ponte retificadora trifásica a diodos, ou seja, trata-se de cargas não lineares, geram harmônicas. Os fabricantes de conversores de frequência disponibilizam filtros de harmônicas, para diminuição e até mesmo eliminação das harmônicas tanto de corrente quanto de tensão elétrica.

Os conversores de frequência podem atuar como dispositivos de proteção para os mais variados problemas de rede elétrica que se pode ocorrer, como desbalanceamento entre fases, sobrecargas, queda de tensão, entre outros.

São muitas as vantagens geradas pelo conversor de frequência, como redução no custo de desenvolvimento, custo dos sistemas de acionamento e custo de manutenção. E nos navios trouxe autonomia e simplicidade no monitoramento. Este dispositivo contribui muito para o serviço na praça de máquinas facilitando o trabalho do operador.

## 2 HISTÓRICO

As aplicações industriais de velocidade variável sempre foram ditadas pelos requisitos dos processos, e, de acordo com sua época de utilização, suas limitações eram bem diversificadas, tais como as impostas pela tecnologia, pelo custo, pela eficiência e pelos requisitos de manutenção dos componentes empregados.

Anteriormente à década de 60, os sistemas mais utilizados para variação e velocidade eram implementados com motores de corrente contínua (CC), conhecidos como os primeiros dispositivos de conversão de energia elétrica em energia mecânica. Para obtenção de velocidade variável, o sistema necessitava de um segundo dispositivo de conversão de energia, que utilizava componentes mecânicos, hidráulicos ou eletromagnéticos.

### 2.1 Componentes mecânicos

Os Primeiros sistemas utilizados para se obter uma velocidade diferente das impostas pelo campo magnético, utilizando motores de indução, foram os sistemas mecânicos, pois eram de maior simplicidade de construção e baixo custo.

Pode-se citar como exemplo desse tipo de sistema, o variador com polias cônicas e correia, e o variador com discos de fricção. Estes equipamentos eram usados onde necessitava-se de uma redução ou ampliação de velocidade, com possibilidade de variação contínua de rotação.

O inconveniente era operacional, pois a troca constante de polias dificultava o andamento do processo, e, além disto, este tipo de equipamento geralmente oferecia baixo rendimento com o motor quase sempre operando na sua capacidade nominal, independente das rotações desejadas na saída.

Os variadores mecânicos, como por exemplo, os moto-redutores, foram um avanço em relação aos anteriores, pois permitiam a variação da rotação de saída através de um jogo de polias e engrenagens, variáveis embora alguns pontos devessem ser analisados. Como com o motor ligado diretamente à rede elétrica, independentemente da rotação desejada na saída, o motor poderá girar na rotação e frequência nominal, obtendo baixo rendimento.

## 2.2 Componentes hidráulicos

O sistema Hidráulico, cujo funcionamento se baseia no projeto de um motor hidráulico desenvolvido para converter potência de um fluido em potência mecânica, permitia variação contínua de velocidade.

Esta conversão era feita por meio de um dispositivo de engrenagens planetárias ou através de acionamentos de pistões com controle efetuado por válvulas.

Para o acionamento de motores hidráulicos é necessário que se tenha um sistema hidráulico à disposição com tubulações, bombas e motores elétricos auxiliares. Isto faz com que, em uma análise global do conjunto, o sistema tenha rendimento baixo e nível de manutenção elevado pela existência de muitas partes mecânicas.

O variador hidrocínético também permitia variação contínua de velocidade. Era composto de um eixo de entrada de rotação fixa e um eixo de saída, cuja rotação podia variar linearmente de zero até uma rotação muito próxima à do eixo de entrada.

## 2.3 Componentes Eletromagnéticos

Com os variadores eletromagnéticos, mudou-se o conceito de variação exclusivamente mecânica para variação eletromecânica, através de técnicas baseadas no princípio de Foucault, utilizando um sistema de discos acoplados às bobinas que podem ter seu campo magnético variável, alterando-se assim o torque (e também velocidade) na saída do variador. Algumas limitações eram observadas para aplicação desse equipamento:

- a) A rotação máxima de saída era sempre a nominal do motor, nunca além desta.
- b) Rendimento muito baixo, pois apresentava perdas por aquecimento e ruídos.
- c) As manutenções preventivas e corretivas eram frequentes, pois exigiam muitas partes girantes que necessitavam de ajustes constantes e substituições periódicas.

Na década de 80, Com o desenvolvimento de semicondutores de potência com capacidade de comando de condução e bloqueio e excelentes características

de desempenho e confiabilidade, que foi possível a implementação de sistemas de variação de velocidade eletrônicos.

O dispositivo de conversão de energia elétrica para mecânica continuou sendo o motor de indução, mas agora sem a utilização de dispositivos secundários mecânicos, hidráulicos ou eletromagnéticos.

Estes equipamentos eletrônicos para variação de velocidade de motores de indução são conhecidos como inversores de frequência.

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 Chaves semicondutoras

As chaves são dispositivos semicondutores que, devido às suas características intrínsecas ou modo de uso, apresentam completo bloqueio ou oferecem livre condução à passagem de corrente elétrica. Estes componentes também são chamados de semicondutores de potência.

Estes dispositivos têm passado por grande mudanças, tendo surgido novas chaves com características semelhantes e ainda mais flexíveis, destacam-se: MOSFETs (Metal Oxide Field Effect Transistors), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), IGCTs (Integrated Gate Commutated Thyristors) e GTOs (gate Turn- off Thyristors).

A chave ideal deveria ser capaz de suportar uma tensão infinita quando no estado de bloqueio e conduzir um valor infinito de corrente numa pequena área, com queda de tensão nula em condução. Também deveria ser capaz de mudar do estado em condução para o estado de bloqueio (e vice-versa) instantaneamente. Nenhuma das chaves reais possuem essas características ideais, sendo a pesquisa e o desenvolvimento os responsáveis por uma aproximação cada vez maior destes limites.

De acordo com a tecnologia empregada na fabricação, pode-se classificar os atuais componentes semicondutores de potência em quatro grandes grupos principais: os tiristores (SCRs, GTOs e etc...), os transistores de junção bipolar (BJTs), os transistores de efeito de campo (MOSFETs) e os transistores híbridos ou transistores bipolar de gatilho isolado (IGBTs). Esta ordem é cronológica, sendo assim os tiristores começaram a era dos semicondutores de potência, e os IGBTs são uma tecnologia mais recente.

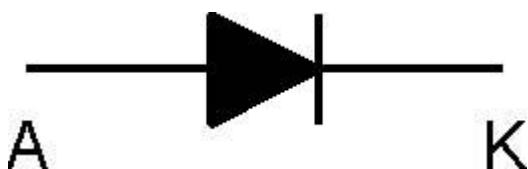
Os IGBTs substituíram os transistores bipolares em aplicações industriais e tem substituído os tiristores em conversores de média e alta tensão. Os tiristores ainda são absolutos em aplicações de alta potência e baixa frequência. Os IGBTs tem sido aplicados em frequências intermediárias (menor que 50Hz) e em potências cada vez maiores (módulos 6,5kV, 600A). São usados hoje em conversores, em acionamento de motores industriais de média e alta potência e em inversores para sistemas de geração distribuída.

Os IGCTs concorrem com os IGBTs em aplicações de média frequência (50 a 600kHz), em fontes fechadas com comutação não dissipativa, periféricos de computadores, eletrônica automotiva, fontes de potência para aquecimento indutivo e sistemas fotovoltaicos.

### 3.2 Diodos

O diodo é um dispositivo constituído por uma junção de dois materiais semicondutores (em geral silício), um do tipo n e o outro do tipo p, ou de um material semicondutor e de um metal. Sendo comumente representado pelo símbolo da figura 1.

**Figura 1:** Representação do diodo



Fonte: <http://enginhocas-eletronicas.webnode.pt/diodo/>

Quando o ânodo (A) estiver a um potencial positivo em relação ao catodo (K), aparecendo uma pequena tensão, o diodo conduz qualquer corrente, até a nominal, e a mesma terá sentido convencional indicado pela seta. Nestas condições diz-se que o diodo está diretamente polarizado. Quando o ânodo (A) estiver a um potencial negativo em relação ao catodo (K), apenas uma mínima corrente flui. Nesse caso, a corrente terá o sentido contrário da seta, diz-se que o diodo está inversamente polarizado.

Existem diferentes tipos de diodos, que apesar de apresentar características elétricas semelhantes, são adaptados à execução de determinadas funções.

O diodo da figura 1 é normalmente utilizado para retificação, transformando corrente bidirecional em corrente unidirecional, e processamento de sinal nela baseado.

Além destes outros tipos de diodos são utilizados usualmente:

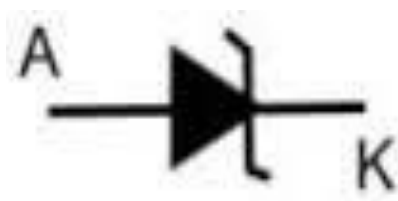
a) Diodo Zener:

O Diodo Zener que pode funcionar polarizado diretamente e inversamente. Quando polarizado diretamente, funciona como outro diodo qualquer.



A diferença é que, no diodo convencional, ao atingir uma determinada tensão inversa, a corrente inversa aumenta bruscamente (efeito avalanche) e a dissipação térmica acaba por destruir o dispositivo, não sendo possível inverter o processo. No diodo Zener (inversamente polarizado), por outro lado, ao atingir a tensão chamada Zener (bem menor que a tensão de ruptura de um diodo comum), o dispositivo passa a permitir a passagem de correntes bem maiores que a de saturação inversa, mantendo constante a tensão entre os seus terminais. A figura 2 mostra a simbologia do diodo Zener.

**Figura 2:** Símbolo do Diodo Zener



Fonte: <http://enginhocas-eletronica.webnode.pt/diodo/>

b) Varistor ou Varicap:

Todos os diodos apresentam uma capacitância que é variável com a tensão aplicada. Os varistores são diodos especialmente desenhados para se obter uma capacitância fortemente dependente da tensão. São usados em osciladores cuja frequência é controlada por tensão.

c) Fotodiodo:

Quando a zona da junção recebe luz, geram-se pares de portadores de carga (elétron-lacuna) que geram uma tensão ou uma corrente no dispositivo. Existe assim, conversão opto-eletrônica. Estes dispositivos são utilizados como detectores de luz, nas mais diversas aplicações.

d) LED:

Diodo emissor de luz (L.E.D= Light Emitter Diode), tem a propriedade de transformar energia elétrica em luz. Tal transformação é diferente da encontrada nas lâmpadas convencionais que utilizam filamentos metálicos, radiações ultravioletas e

descarga de gases, dentre de outras. Nos LEDs, a transformação de energia elétrica em luz feita na matéria. Mais recentemente, os LEDs com maior potência vem sendo empregados em iluminação.

e) Ultra- rápido:

São bastante utilizados em altas tensões de bloqueio. Também são amplamente utilizados em fontes chaveadas de alta frequência e alta eficiência e possuem um tempo de recuperação baixo, da ordem micro- segundos, em tensões e correntes que variam entre centenas de volts e ampères.

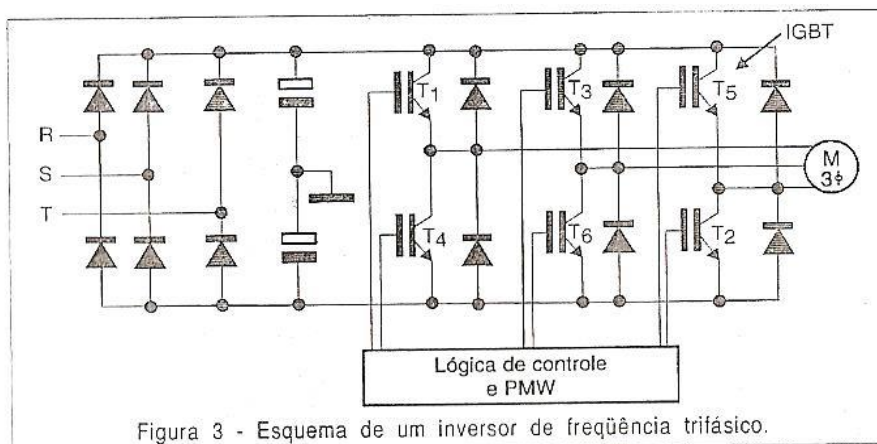
### 3.3 PWM

A modulação por largura de pulso varia a razão cíclica aplicada aos interruptores em uma alta frequência de comutação com o intuito de suprir uma determinada tensão ou corrente na saída em baixa frequência, ou seja, tem-se como objetivo criar uma sequência de pulsos que devem ter o mesmo valor fundamental de uma referência desejada. Todavia, nesta sequência de pulsos existem componentes harmônicos indesejados que devem ser minimizados.

Na SPWM, a largura dos pulsos enviados para os interruptores depende da amplitude da referência senoidal de tensão, fazendo com que a tensão  $V_{ab}$  tenha uma componente fundamental na mesma frequência da tensão de referência e os harmônicos deslocados em torno da frequência da portadora  $V_{tri}$ . Esta modulação apresenta a característica de possuir um único comando para cada dois interruptores, como por exemplo, S1 e S4. Nos outros dois interruptores pode-se usar, idealmente, um comando complementar.

Entre os pontos positivos da vasta utilização da SPWM na indústria destacam-se a operação em frequência fixa e o conteúdo harmônico deslocado para altas frequências utilizando-se uma portadora. O emprego de frequência fixa aperfeiçoa o projeto dos componentes magnéticos, tendo em vista que em aplicações onde a frequência é variável os componentes magnéticos devem ser projetados para toda a faixa de frequência utilizada. Quando o conteúdo harmônico se concentra nas altas frequências tem-se uma diminuição de dimensão, peso e custo dos componentes do filtro.

**Figura 3:** Lógica de controle PWM



Fonte: <http://evectra.blogspot.com.br/203/01/material-explicativo-sobre-funcao.html>

### 3.4 Tiristores

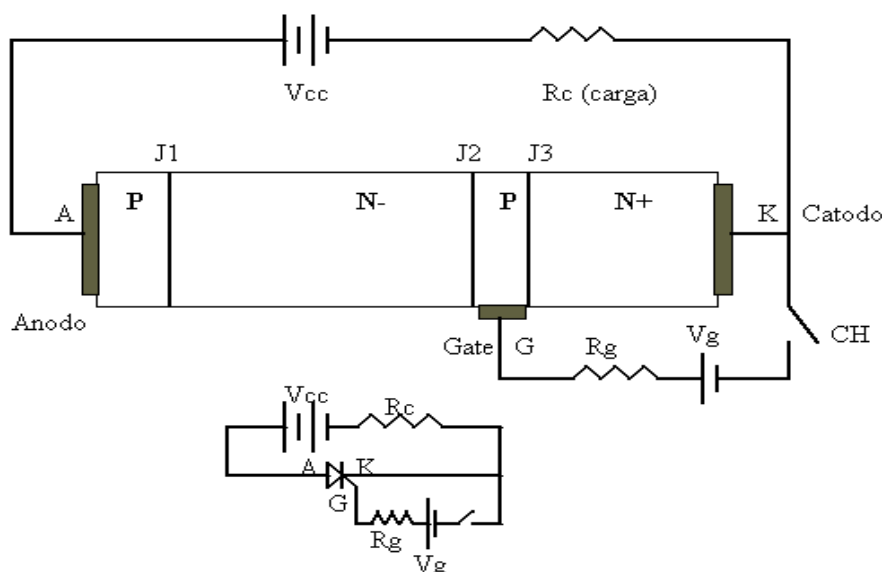
O nome tiristor engloba uma família de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura e quatro camadas semicondutoras, apresentando um funcionamento biestável.

O tiristor de uso mais difundido é o SCR (Retificador controlado de Silício), usualmente chamado simplesmente de tristor. Outros componentes, no entanto, possuem basicamente a mesma estrutura LASCR (SCR ativado por luz), TRIAC (tiristor tríodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional) e GTO (tiristor comutável pelo gate).

#### 3.4.1 Princípio de funcionamento dos Tiristores

O Tiristor é formado por quatro camadas semicondutoras, alternadamente p-n-p-n, possuindo três terminais: anodo e catodo, pelos quais fluem a corrente, e o gate, no qual somente a injeção de uma corrente faz com que se estabeleça a corrente anodo-catodo.

**Figura 4:** Funcionamento do tiristor



Fonte: [www.dsce.fea.unicamp.br](http://www.dsce.fea.unicamp.br)

Se entre o anodo e o catodo houver uma tensão positiva, as junções J1 e J3 estarão diretamente polarizadas, enquanto a junção J2 estará reversamente polarizada. Não haverá condução de corrente até que a tensão  $V_{ak}$  se eleve a um valor que provoque a ruptura da barreira potencial em J2.

Seu houver uma tensão  $V_{gk}$  positiva, circulará uma corrente através de J3, com portadores negativos indo do catodo para o gate. Por construção a camada P ligada ao gate é suficientemente estreita para que parte dos elétrons que cruzam J3 possua energia cinética suficiente para vencer a barreira de potencial existente em J2, sendo então atraída pelo anodo.

Desta forma, a junção reversamente polarizada tem sua diferença de potencial diminuída e estabelece-se uma corrente entre anodo e catodo, que poderá persistir mesmo na ausência da corrente gate.

Quando a tensão  $V_{ak}$  for negativa, J1 e J3 estarão reversamente polarizadas enquanto J2 estará diretamente polarizada. Assim, o tiristor bloqueará o fluxo de portadores enquanto não for superada a tensão de ruptura das duas junções.

### 3.4.2 Maneiras de disparar um tiristor

Há cinco maneiras distintas de fazer com que um tiristor entre em condução.

a) Tensão:

Quando polarizado diretamente, no estado desligado, a tensão de polarização é aplicada sobre a junção J2. O aumento da tensão  $V_{ak}$  leva a uma expansão da região de transição tanto para o interior da camada do gate, quanto para a camada N adjacente. Mesmo na ausência de corrente gate, por efeito térmico, sempre existirão cargas livres que penetrarão na região de transição, as quais são aceleradas pelo campo elétrico presente em J2.

Para valores elevados de tensão, e conseqüentemente de campo elétrico, é possível iniciarem processo de avalanche, no qual as cargas aceleradas, ao chocarem-se com átomos vizinhos, provocam a expulsão de novos portadores, os quais reproduzem o processo. Tal fenômeno, do ponto de vista do comportamento do fluxo de cargas pela junção J2, tem efeito similar ao de uma injeção de corrente pelo gate, de modo que, se ao iniciar a passagem de corrente for atingido o limiar  $I_L$ , o dispositivo se manterá em condução.

b) Taxa de crescimento de tensão direta:

Quando reversamente polarizadas, a área de transição de uma junção comporta-se de uma maneira similar a um capacitor, devido ao campo criado pela carga espacial. Considerando que praticamente toda a tensão está aplicada sobre a junção (quando o SCR estiver desligado e polarizado diretamente), a corrente que atravessa tal junção é dada por:

$I_j = d(C_j \cdot A_k)/dt = C_j \cdot dV_{ak}/dt + V_{ak} \cdot dC_j/dt$ , onde  $C_j$  é a capacitância da junção.

Quando  $V_{ak}$  cresce, a capacitância diminui, uma vez que a região de transição aumenta de largura. Entretanto, se a taxa de variação da tensão for suficientemente elevada, a corrente que atravessará a junção pode ser suficiente para levar o tiristor à condução.

Uma vez que a capacitância cresce com o aumento da área do semiconductor, os componentes para correntes mais elevadas tendem a ter um limite de  $dv/dt$  menor. Observa-se a limitação diz respeito apenas ao crescimento da tensão direta ( $V_{ak} > 0$ ). A taxa de crescimento da tensão reversa não é importante, uma vez, que as correntes que circulam pelas junções J1e J3, em tal situação, não têm a capacidade de levar o tiristor a um estado de condução.

c) Temperatura

À altas temperaturas, a corrente de fuga numa junção p-n reversamente polarizada dobra aproximadamente com o aumento de 8°C. Assim, a elevação da temperatura pode levar a uma corrente, através de J2, suficiente para levar o tiristor à condução.

d) Ação da corrente positiva de gate:

Sendo o disparo através da corrente de gate a maneira mais usual de se ligar o tiristor, é importante o conhecimento dos limites máximos e mínimos para a tensão  $V_{gk}$  e a corrente  $I_g$ .

Para garantir a operação correta do componente, a reta de carga do circuito de acionamento deve garantir a passagem além dos limites  $V_{gm}$  (mínima tensão de gate que garante a condução de todos os componentes de um dado tipo, na mínima temperatura especificada) e  $I_{gm}$  (mínima corrente necessária para garantir a entrada em condução de qualquer dispositivo de um certo tipo, na mínima temperatura.), sem exceder os demais limites (tensão, corrente e potência máxima)

e) Energia radiante:

Energia radiante dentro da banda espectral do silício, incidindo e penetrando no cristal, produz considerável quantidade de pares de elétrons-lacunas, aumentando a corrente de fuga reversa, possibilitando a condução do tiristor. Este tipo de acionamento é utilizado nos LASCR, cuja aplicação principal é em sistemas que operam em elevado potencial, onde a isolação necessária só é obtida por meio acoplamento ótico.

### 3.5 Gate turn-off thyristor (GTO)

O GTO, embora tenha sido criado no início da década de 60, por problemas de fraco desempenho, foi pouco utilizado. Com o avanço da tecnologia de construção de dispositivos semicondutores, novas soluções foram encontradas para aprimorar tais componentes, que hoje ocupam significativa faixa de aplicação, especialmente naquelas de elevadas potência, umas vez que estão disponíveis dispositivos para 5000V/ 4000<sup>a</sup>.

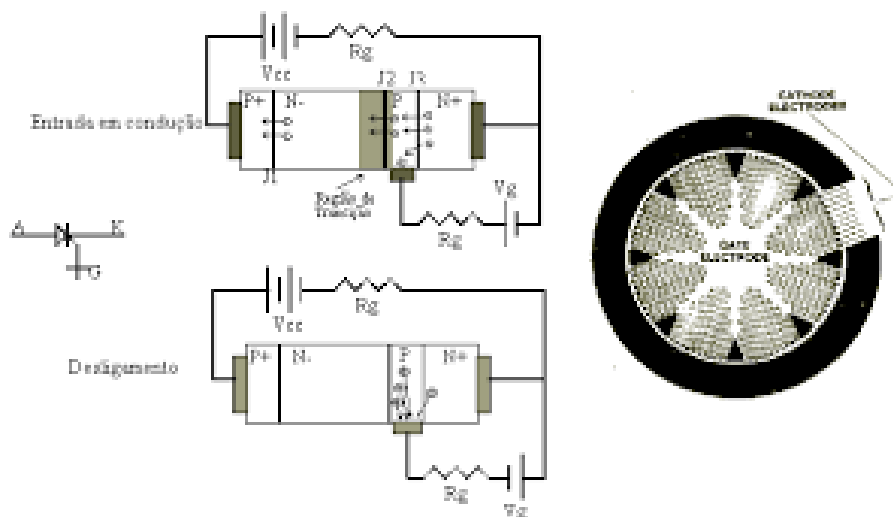
### 3.5.1 Princípio de funcionamento

O GTO possui uma estrutura de quatro camadas, típica dos componentes da família dos tiristores. Sua característica principal é a sua capacidade de entrar em condução e bloquear e bloquear através de comandos adequados no terminal gate.

O mecanismo de disparo é semelhante ao do SCR: supondo- o diretamente polarizado, quando a corrente gate é injetada, circula uma corrente entre o gate e o catodo. Grande parte de tais portadores, por a camada de gate ser suficientemente fina, desloca-se até a camada N adjacente, atravessando a barreira de potencial e sendo atraídos pelo potencial anodo, dando início à corrente anódica. Se esta corrente mantiver acima da corrente de manutenção, o dispositivo não necessita do sinal gate para manter-se conduzindo.

A aplicação de uma polarização reversa na junção gate-catodo pode levar ao desligamento do GTO. Portadores livres, presentes nas camadas centrais do dispositivo, são atraídos pelo gate, fazendo com que seja possível o restabelecimento da barreira de potencial na junção J2.

**Figura 5:** processo de chaveamento e estrutura interna do GTO



Fonte: [www.gta.ufrj.br](http://www.gta.ufrj.br)

O funcionamento do GTO depende de fatores como:

- Facilidade de extração de portadores pelo terminal de gate, isto é possibilitado pelo uso de dopantes com alta mobilidade.

- b) Desaparecimento rápido de portadores nas camadas centrais devido ao uso de dopante com baixo tempo de recombinação. Isto implica que um GTO, tem uma maior queda de tensão quando em condução, comparado a um SCR de mesmas dimensões.
- c) Suportar tensão reversa na junção porta-catodo, sem entrar em avalanche, isso resulta em menor dopagem na camada de catodo.

Existem duas possibilidades de construir a região de anodo: uma delas é utilizando apenas uma camada p+, como no SCR. Neste caso o GTO apresentará uma característica lenta de comutação, devido a maior dificuldade de extração dos portadores, mas suportará tensões reversas na junção J2.

A outra alternativa é introduzir regiões n+ que penetraram na região p+ do anodo, fazendo contato entre a região intermediária n- e o terminal de anodo. Isto, virtualmente, curto-circuita a junção J1 quando o GTO é polarizado reversamente. No entanto, torna-o muito mais rápido no desligamento (com polarização direta). Como a junção J3 é formada por regiões muito dopadas, ela não consegue tensões reversas elevadas. Caso um GTO deste tipo deva ser utilizado em circuitos nos quais fiquem sujeitos à tensão reversa, ele deve ser associado em série com um diodo que bloqueará a tensão.

### **3.6 Insulated gate bipolar transistor (IGBT)**

Reunindo as características de comutação dos transistores bipolares de potência e elevada impedância de entrada dos MOSFET's, o IGBT se torna cada vez mais popular nos circuitos de controle de potência de uso industrial e até mesmo eletrônica de consumo embarçada.

Os transistores bipolares de potência possuem características que permitem sua utilização no controle de elevadas correntes com muitas vantagens, tais como baixas perdas no estado de condução. No entanto, as suas características de entrada exigem correntes elevadas de base, já que operam como amplificadores de corrente trazendo certas desvantagens em algumas aplicações.

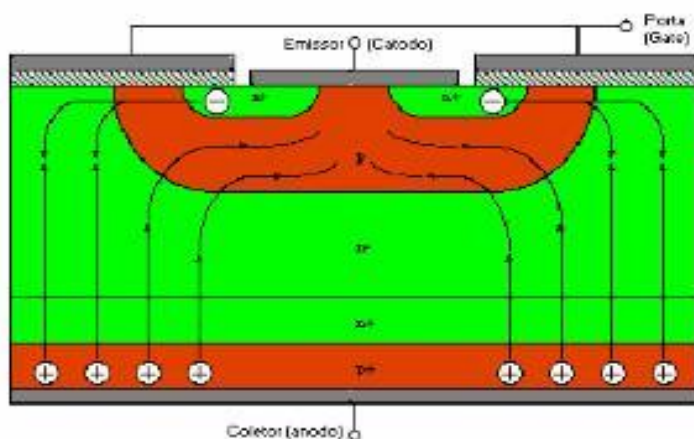
O IGBT reúne a facilidade de acionamento dos MOSFETs e sua elevada impedância de entrada com pequenas perdas de condução dos TBP (Transistores bipolares de potência). Sua velocidade de chaveamento é determinada, a princípio,



pelas características mais lentas, oriundas das características do TBP. Assim, a velocidade dos IGBTs é semelhante a dos TBP, no entanto, nos últimos anos tem crescido gradativamente permitindo a sua operação em frequência de dezenas de KHz nos componentes para correntes na faixa de dezenas e até centenas de amperes.

Juntando o que há de bom nesses dois tipos de transistores, o IGBT é um componente que se torna cada vez mais recomendado para comutação de carga de alta corrente em regime de alta velocidade.

**Figura 6:** Características físicas IGBT



Fonte: [www.gta.ufrj.br](http://www.gta.ufrj.br)

### 3.6.1 Operação física do IGBT

O IGBT é frequentemente utilizado como uma chave, alternando os estados de condução (On-state) e corte (off-state), os quais são controlados pela tensão de gate.

Se aplicarmos uma pequena tensão de gate positiva em relação ao emissor, a junção J1 ficará reversamente polarizada e nenhuma corrente irá circular através dessa junção. No entanto, a aplicação de uma tensão positiva no terminal de gate fará com que se forme um campo elétrico na região de óxido de silício responsável pela repulsão das lacunas pertencentes ao substrato tipo P e a atração de elétrons livres desse mesmo substrato para a região imediatamente abaixo da gate.

Enquanto não houver condução de corrente na região a baixo dos terminais da gate, não haverá condução de corrente entre o emissor e o coletor porque a

junção J2 estará reversamente polarizada, bloqueando a corrente. A única corrente que poderá fluir é a corrente de escape e o emissor será a corrente de escape.

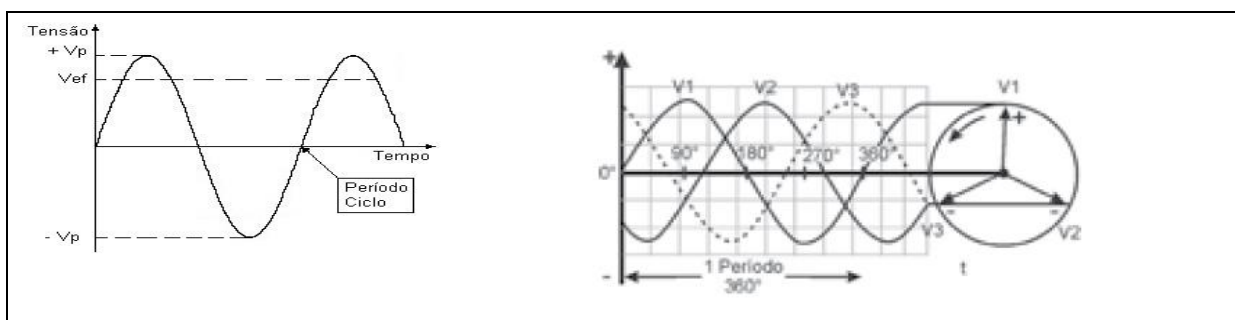
### 3.7 Integrated gate commutated thyristor (IGCT)

O IGCT é um dispositivo surgido no final da década de 90 e pode-se dizer que é um tipo de GTO onde o circuito de gatilho é integrado à chave, permitindo assim maior velocidade de chaveamento, e, conseqüentemente reduzindo o tempo em que a chave fica na região instável durante o transitório de desligamento.

### 3.8 Retificador de entrada

A tensão de entrada pode ser fornecida como uma tensão de correntes alternadas (CA) trifásica ou monofásica, que podem ser representadas como:

**Figura 7:** Tensão CA monofásica e tensão CA trifásica respectivamente



Fonte:www.sean.com.br

Conforme se pode ver, a tensão está constantemente mudando de sentido oscilando senoidalmente entre valores positivos e negativos durante um determinado intervalo de tempo. O tempo que se gasta para completar um ciclo é chamado período, e a quantidade de períodos contidos em um segundo é a frequência.

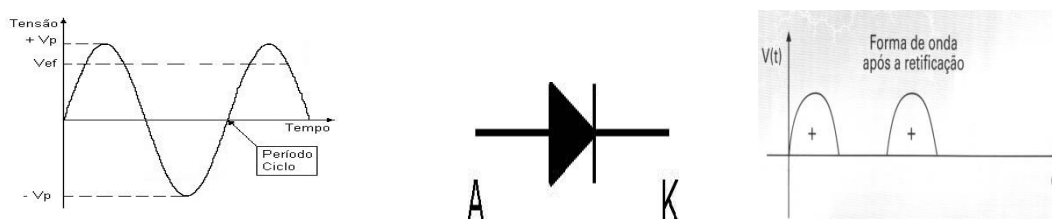
Em relação à tensão com três fases (trifásica), temos ainda um certo atraso (deslocamento) de uma fase para outra, que é de  $120^\circ$ , este atraso equivale a um terço do período da onda.

A função do retificador é transformar essa onda oscilatória em uma onda praticamente lisa. Existem dois tipos de retificadores, os não-controlados que são compostos por diodos, e os controlados que são compostos por tiristores.

- Retificador não controlado a diodo

Como já foi dito anteriormente, o diodo só permite o fluxo de corrente em apenas um sentido.

**Figura 8:** Modo de operação do diodo



Fonte: [www.sabereletronica.com.br](http://www.sabereletronica.com.br)

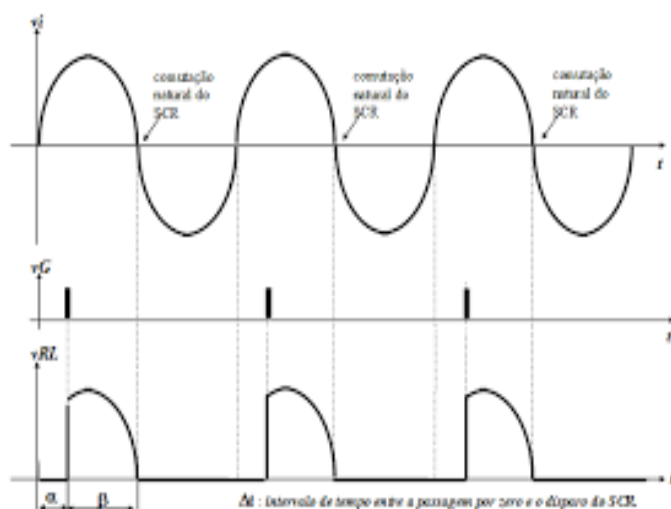
Após a onda passar pelo diodo, a tensão CA (corrente alternada) é retificada e passa a ser uma tensão CC (corrente contínua) pulsante, como mostra a figura 4, portanto os pulsos de tensão retificada terão a mesma forma de onda da tensão de entrada, porém apenas com a parte positiva. Com outros tipos de semicondutores é possível ter um controle de amplitude da tensão retificada, mas no caso dos diodos, ela resulta em pulsos com amplitudes iguais às da onda de entrada.

A ponte retificadora usada no estágio retificador dos inversores de frequência deve conter diodos dispostos de tal forma que se obtenha uma onda de saída com pulsos positivos e negativos de tensão.

- Retificador controlado

Nos retificadores controlados os tiristores são usados no lugar dos diodos, e possuem características semelhantes, pois também só permitem o fluxo de corrente em um sentido. No entanto os tiristores possuem um terceiro terminal chamado "Gate" (G). O Gate controla o tiristor através de um sinal, que, depois de recebido, o tiristor é liberado para que a corrente possa fluir até que se torne negativa novamente quando o tiristor para de conduzir.

**Figura 9:** Modo de operação de um tiristor



Fonte: [www.professorhumberto/fsp.pro.br](http://www.professorhumberto/fsp.pro.br)

Como se pode ver, o sinal recebido pelo Gate é o sinal de controle  $\alpha$  que é graduado em graus. O valor de  $\alpha$  indica o atraso entre a passagem da onda de tensão pelo zero e o começo da condução do tiristor.

A partir de então o tiristor funcionará como um diodo. Da mesma forma que os diodos, os tiristores fazem com que a onda senoidal de entrada seja retificada em pulsos contínuos tanto na parte positiva como na parte negativa, ambos em relação ao ponto neutro comum, a única diferença é que através do ângulo  $\alpha$  pode se determinar a amplitude dessas ondas retificadas. Com isso o valor da tensão CC a saída do retificador possui um valor que pode variar a tensão de acordo com o ângulo  $\alpha$ , assumindo desde zero até valores da tensão de entrada.

Uma característica interessante dessa ponte retificadora é que ela pode tanto ser usada como retificador como inversor, para isso basta ter o controle do ângulo  $\alpha$ , por exemplo, no caso do ângulo ser estabelecido no valor entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  o arranjo dos tiristores é usado como retificador, e se for entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  é usado como inversor.

Fazendo uma ligeira comparação entre os dois tipos de retificadores, o controlado causa maiores perdas e distúrbios na rede elétrica de entrada, pois, se o tiristor é controlado para que seu período de condução seja bastante reduzido, o retificador irá drena valores crescentes de potência relativa. No entanto uma vantagem da retificação controlada é que a energia pode ser refletida de volta para a rede, por exemplo, permitindo a devolução da energia de frenagem de um acionamento, contribuindo-se assim para uma melhoria do rendimento do sistema.

### 3.9 Elo CC

Depois de ser retificada a tensão de entrada são necessários filtros devido ao efeito da retificação não proporcionar uma onda lisa, sem variações. Isso é necessário devido à grande precisão que deve ter na entrada do estágio inversor.

O elo CC, também chamado de circuito intermediário, pode ser comparado a um armazenador, pois é dele que o motor, através do estágio inversor, retira a energia necessária para seu funcionamento. E isto é possível de acordo com alguns princípios de construção do filtro, e dependendo também do tipo de retificador e estágio inversor usados.

Para inversores de corrente imposta, onde é usado o retificador controlado a tiristor, o Elo CC consiste em um grande indutor. Este indutor associado à fonte de tensão ajustável. Nestes casos são as cargas que determinam a tensão que será entregue ao motor.

Para inversores de tensão imposta, o Elo CC consiste de um capacitor. Este filtro pode ser usado para os dois tipos de retificadores. A sua função é a mesma, suavizar pulsação do CC que vem do retificador.

Na saída de um retificador controlado, a tensão é ondulada e ajustável, mas ao passar pelo filtro, é fornecida ao estágio inversor uma tensão CC perfeita com amplitude ajustável. Já em um retificador não controlado a tensão CC que passa pelo filtro é entregue com amplitude constante.

### 3.10 Inversor

Este é o ultimo estágio em um inversor de frequência, onde ocorre a elaboração através de chaveamentos dos semicondutores da tensão de saída para o acionamento do motor. O inversor pode receber do circuito uma corrente contínua, uma tensão CC ajustável, ou uma tensão CC constante.

Em cada caso, o estágio inversor assegura o funcionamento do motor de uma tensão de saída para o acionamento do motor. Se a corrente ou tensão forem variáveis, o inversor apenas gera sua frequência, porém, se a tensão do Elo CC for constante, o inversor gera tanto a frequência como tensões variáveis necessárias para o motor.

O inversor de frequência caracteriza-se pelo conjunto de todos os seus estágios, porém é no estágio inversor que se encontram as diferentes topologias de como são construídos os diferentes tipos de inversores. Existem várias topologias do bloco inverso, que seguem o mesmo padrão, a diferença está nos diferentes tipos de componentes usados, e também pela quantidade desses bloco.

O diodo em anti-paralelo com o semiconductor é usado para permitir que a corrente possa fluir no sentido contrário (caso necessário), já que os semicondutores usados não permitem corrente reversa. No Gate do semiconductor, um cartão de memória controlado por um micropulso que proporciona um disparo gerando o chaveamento que dará origem à forma de onda na saída.

### **3.11 Motores de indução**

Funciona normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio dos inversores de frequência.

Para análise de funcionamento, pode-se considerar o motor de indução como um transformador, onde o enrolamento primário deste é formado pelo estator e o enrolamento secundário pelo rotor. O próprio nome “motor de indução” se deve ao fato de toda a energia requerida pelo rotor para geração de torque é induzida pelo estator.

A partir do momento que os rolamentos localizados nas cavidades do estator são sujeitos a uma corrente alternada, gera-se um campo magnético no estator, conseqüentemente, no rotor surge uma força eletromotriz induzida devido ao fluxo magnético variável que atravessa o rotor. A f.e.m induzida dá origem a uma corrente induzida no rotor que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, criando assim um movimento giratório no rotor.

Como podemos constatar o principio de funcionamento do motor de indução baseia-se em duas leis eletromagnéticas, a Lei de Lenz e a Lei de Faraday.

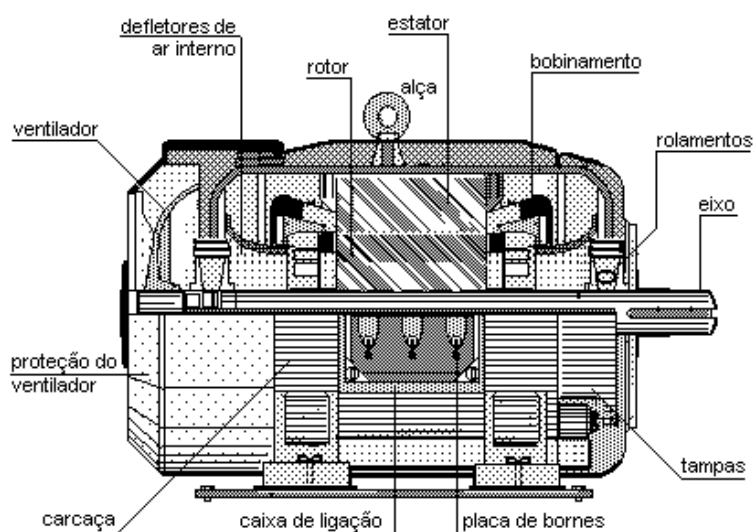
Faraday: “Sempre que através da superfície abraçada por um circuito tiver lugar uma variação de fluxo, gera-se nesse circuito uma força eletromotriz induzida. Se o circuito é fechado será percorrido por uma corrente induzida.”

Lenz: “O sentido de uma corrente induzida é tal que esta pelas suas ações magnéticas tende sempre a opor-se à causa que lhe deu origem”

Há dois tipos de rotores:

- a) Rotor de gaiola: Consiste de barras de cobre, de grande seção, unidas em cada extremidade por um anel de cobre ou de bronze. Não há necessidade de isolamento entre o núcleo do rotor e as barras, porque as tensões induzidas nas barras do rotor são muito baixas. O entreferro entre o rotor e o estator é muito pequeno, para se obter a máxima intensidade de campo.
  
- b) Rotor Bobinado: É envolvido por um enrolamento isolado semelhante ao enrolamento do estator. Os enrolamentos de fase do rotor (trifásico) são trazidos para o exterior através de três anéis coletores montados sobre o eixo do motor. O enrolamento do rotor não está ligado a nenhuma fonte de alimentação. Os anéis coletores e as escovas constituem simplesmente uma forma de se ligar resistências variáveis externas, em série, com o circuito do rotor. As resistências variáveis (uma para cada anel coletor) proporcionam um meio para aumentar a resistência do rotor durante a partida, a fim de melhorar suas características de partida. Quando o motor atinge sua velocidade normal, os enrolamentos são curto-circuitados e o funcionamento passa a ser semelhante ao de um rotor de gaiola. As resistências variáveis, também permitem controlar a corrente no rotor e a velocidade do motor.

**Figura 10:** Estrutura do motor de indução



Fonte: [www.solucoesindustriais.com.br](http://www.solucoesindustriais.com.br)

### 3.11.1 Motores de indução monofásicos

Os motores de indução monofásicos são construídos para suprir a necessidade de movimento de rotação em situações onde é disponibilizada apenas uma única fase de corrente alternada. Utilizados na maioria das vezes para aplicações simples, porém indispensáveis nos dias de hoje, como em escritórios, residências e comércios, locais onde não é necessária tanta potência.

Os motores monofásicos são assim chamados porque os seus rolamentos de campo são ligados diretamente uma faz monofásica. Os motores de indução monofásicos são a alternativa natural aos motores de indução trifásicos, nos locais onde não se dispõe alimentação trifásica, como residências, escritórios e zonas rurais.

Existem diversos tipos de motores monofásicos, porém, os motores com rotor tipo gaiola destacam-se pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez e manutenção reduzida.

O motor monofásico, possui estator e rotor como qualquer outro atuador eletromagnético. Porém, por se tratar de um componente monofásico possui apenas um conjunto de bobinas, análogo a visão de apenas uma fase de um motor trifásico



de indução. O motor monofásico utiliza o bobinamento para um rotor gaiola de esquilo.

Os motores de indução trifásicos possuem diferentes tipos de acionamento:

- a) *Método fase dividida*: o motor é enrolado com dois enrolamentos o principal e o auxiliar, o auxiliar tem sua resistência maior que o principal, com isso os campos ficam defasados entre as bobinas e surge um campo magnético girante, levando o motor a partida. É importante salientar que o enrolamento auxiliar deve ser desligado quando o motor atinge 85% da velocidade nominal do mesmo, isso geralmente é feito através de um interruptor centrifugo-platinado que desliga o enrolamento ao atingir essa velocidade.
- b) *Método com capacitor de partida*: Também faz uso de um enrolamento auxiliar só que ligado em série com um capacitor de partida, que faz com que o atraso entre as bobinas seja maior que no método anterior, aumentando o conjugado de partida.
- c) *Método com capacitor de partida e capacitor de marcha*: nesse método, como nos outros, também se faz uso do enrolamento auxiliar, só que nesse caso o enrolamento auxiliar não é desligado. O funcionamento é o seguinte: quando o motor é ligado, os dois capacitores estão ligado em paralelo (partida e marcha). Quando o motor atinge 75% da velocidade nominal, o interruptor desliga o capacitor de partida deixando sempre o enrolamento ligado e com o capacitor de marcha ligado com ele.
- d) *Método com capacitor permanente*: nesse caso o enrolamento auxiliar (junto com um capacitor de marcha) fica ligado permanentemente, esse método é empregado principalmente em ventiladores de teto.
- e) *Método com bobina de arrastamento*: nesse método o motor não possui enrolamento auxiliar, no estator do motor se constrói duas bobinas (além da principal), geralmente com uma ou duas voltas de fio, com uma espessura razoavelmente grande, essas bobinas ficam curto-circuitadas e se localizam numa porção de cada polo do estator, com a energização do motor a bobina principal

induz nessas bobinas uma corrente fazendo que elas criem um campo magnético defasado da principal e inicie o movimento do motor.

### 3.11.2 Motores de indução trifásicos

No estator de motor de CA, estão alojados três enrolamentos referentes às três fases. Esses três enrolamentos estão montados com uma defasagem de 120 graus. Quando a corrente alternada trifásica é aplicada aos enrolamentos do estator assíncrono CA, produz-se um campo magnético rotativo. Esse campo giratório e que vai girar sobre o rotor e provocar seu movimento.

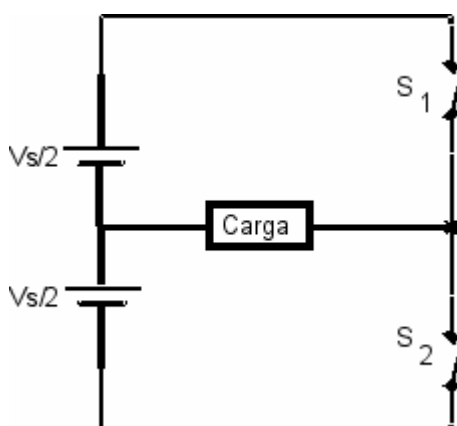
A utilização de motores de indução trifásicos é aconselhável a partir dos 2 KW, para potências inferiores justifica-se o uso de monofásicos. O motor de indução trifásico apresenta algumas vantagens em relação ao monofásico. O motor de indução trifásico apresenta algumas vantagens em relação ao monofásico, como o arranque mais fácil, menor nível de ruídos e menor preço para potências superiores a 2KW.

## 4 TIPOS DE INVERSORES

### 4.1 Inversor monofásico

O circuito básico para gerar uma tensão alternada monofásica, a partir de uma alimentação de potência CC. Esse circuito é também conhecido como inversor em H-ponte (meia-ponte) porque usa duas chaves semicondutoras. As chaves S1 e S2 ligam e desligam a fonte CC à carga de modo alternado, o que produz uma forma de onda retangular de tensão CA.

**Figura 11:** Circuito básico inversor monofásico



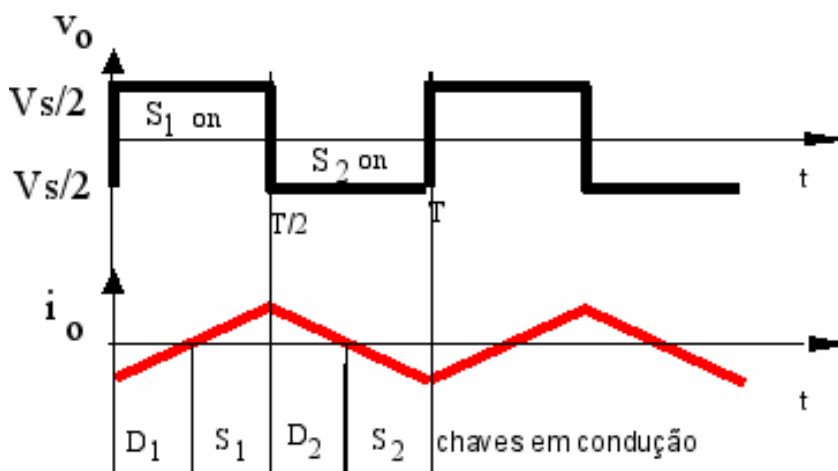
Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

A tensão de saída CA retangular, de acordo com a figura, do inversor serve para algumas aplicações, entretanto, a tensão de saída senoidal é a forma de onda ideal para muitas aplicações.

Dois métodos podem ser usados para tornar a saída o mais próximo possível de uma senóide. Um deles consiste em empregar um circuito filtro, Elo CC, no lado da saída do inversor. Esse filtro deve ser capaz de deixar passar a grande potência de saída do dispositivo, o que significa ter um tamanho adequado. Isso aumenta o custo e o peso do inversor. Mas ainda, a eficiência ficará reduzida por causa das perdas adicionais de potência no filtro.

O segundo método, modulação por largura de pulso (*pulse width modulation – PWM*), usa um esquema de chaveamento no inversor para modificar a forma de onda da tensão de saída.

Figura 12: Ondas de saída do inversor



Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

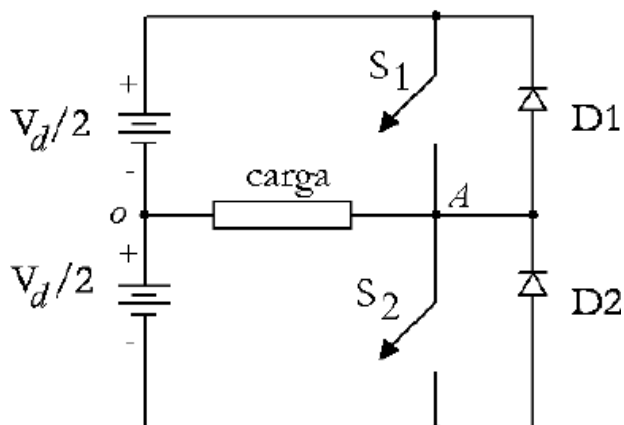
## 4.2 Inversores de fonte de tensão (VSIs)

O inversor de fonte de tensão (VSI) é o mais usado. Nele, a tensão da fonte de entrada CC é essencialmente constante e independente da corrente puxada pela carga. A tensão de entrada CC pode vir de uma fonte independente, como uma bateria, ou pode ser a saída de um retificador controlado. Um capacitor de valor grande é colocado em paralelo com a entrada da linha CC para o inversor. O capacitor garante que os eventos de chaveamento não alterem de modo significativo a tensão CC. Ele carrega e descarrega, de acordo com a necessidade de fornecimento de uma saída estável. O inversor converte a tensão de entrada CC em uma onda quadrada CA na saída da fonte.

### 4.2.1 VSI em meia ponte

O inversor em meia-ponte, usado para aplicações de baixa potência, é o alicerce básico dos circuitos inversores. A figura mostra uma configuração de VSI monofásico em meia-ponte que utiliza duas chaves ( $S_1$  e  $S_2$ ) e duas fontes de alimentação CC.

**Figura 13:** VSI em meia ponte

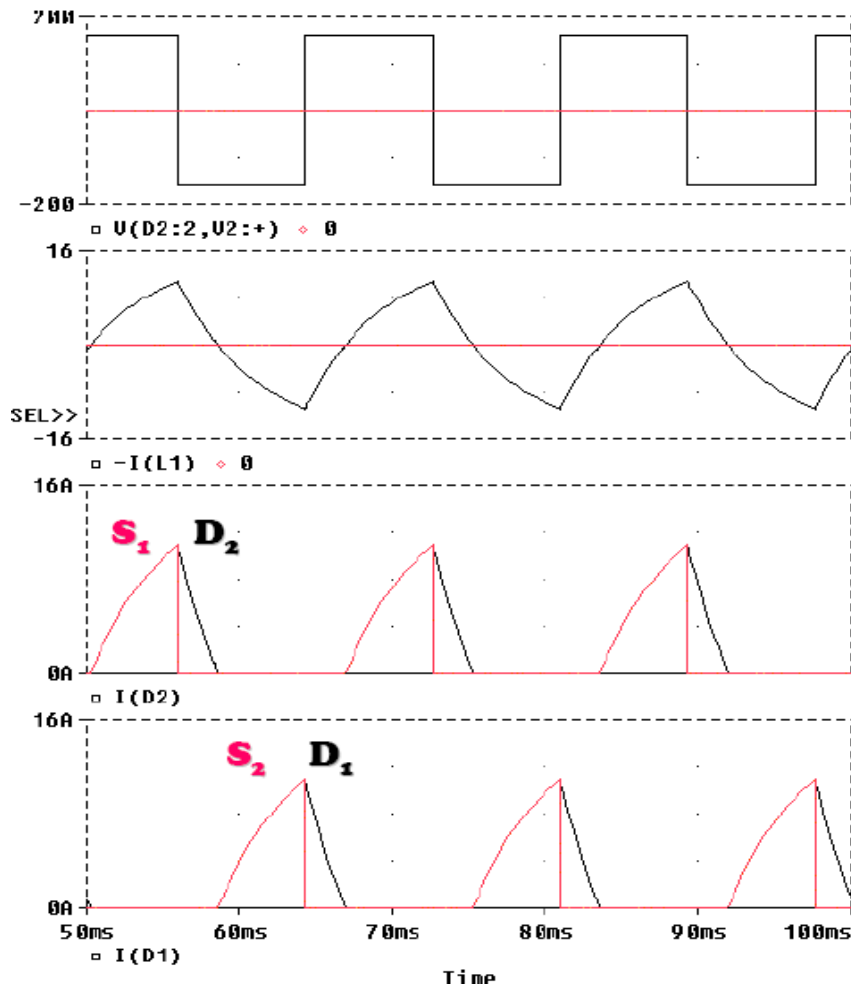


Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

O dispositivo de chaveamento pode ser um transistor de potência um BJT (bipolar junction transistor – transistor bipolar de junção) ou um MOSFET (metal-oxide semiconductor field-effect transistor – transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor), um tiristor GTO (Gate-turnnoff thyristor – tiristor de desligamento por porta) ou um SCR (silicon controlled rectifier – retificador controlado de silício), com seu circuito de comutação. Os diodos D1 e D2 são de retorno.

As chaves passam para o estado/ ligado e desligado alternadamente: uma estará ligada enquanto a outra estiver desligada. No período de 0 a  $T/2$ , a chave S1 se mantém fechada, o que faz com que  $V_o = +E$ . Em  $T/2$ , S1 fica aberta e S2, fechada. Durante  $T/2$  a  $T$ , a tensão de saída  $V_o = -E$ . Portanto, essa tensão tem uma forma de onda retangular com frequência  $f = 1/T$ . Ao controlar  $T$ , podemos dominar a frequência das tensões de saída do inversor. Entretanto, deve-se tomar cuidado para não passar ambas as chaves ao estado ligado, pois nesse caso elas produziram um curto na fonte CC.

Figura 14: Forma de onda de saída do VSI em meia ponte

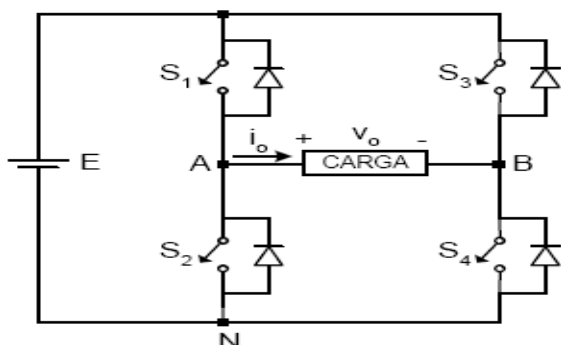


Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

#### 4.2.2 VSI em ponte completa

Um VSI em ponte completa pode ser montado com dois VSIs em meia ponte. O circuito básico para um inversor monofásico de fonte de tensão em ponte completa. São necessárias quatro chaves e quatro diodos de retorno. A amplitude da tensão de saída, e portanto, a potência de saída é o dobro do modelo meia-ponte. As chaves são passadas para os estados *ligados* e *desligados* por pares em diagonal. Assim, ou as chaves S1 e S4 ou as S2 e S3 vão para o estado *ligado* em um semiciclo ( $T/2$ ). Portanto, a fonte CC fica ligada de maneira alternada à carga, em direções opostas. A frequência de saída é controlada pela taxa de velocidade, segundo a qual as chaves se abrem e se fecham. Se os pares de chaves passarem para o estado *ligado* em intervalos iguais, a forma de onda da tensão de saída será uma onda quadrada com um pico de amplitude  $E$ .

**Figura 15:** Circuito básico do inversor em ponte completa



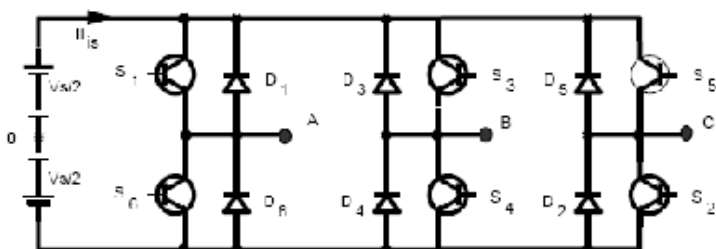
Fonte: Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

Quando o estado do chaveamento muda, enquanto se estiver passando de um estado para outro, ambos os pares de chaves devem estar desligados por um curto período de tempo. Impedindo que ocorra algum curto na fonte CC no estado transitório, em que as duas chaves pode estar se fechando ao mesmo tempo. Portanto, o chaveamento do estado *ligado* para o *desligado* deve ser feito o mais rápido possível, enquanto o do *desligado* para o *ligado* deve contar com um atraso apropriado, o que o faz levar um tempo definido.

### 4.3 Inversor CA-CC Trifásico

A estrutura do inversor trifásico pode ser obtida pela inserção de mais uma “perna” ao bloco do inversor monofásico em ponte, e os sinais para acionamento das chaves superiores devem estar defasados de  $120^\circ$  um do outro e as chaves na mesma “perna” devem estar alternadamente ligadas por  $180^\circ$  uma da outra, abaixo na figura 12 podemos ver o esquemático de inversor trifásico.

**Figura 16:** Inversor Trifásico

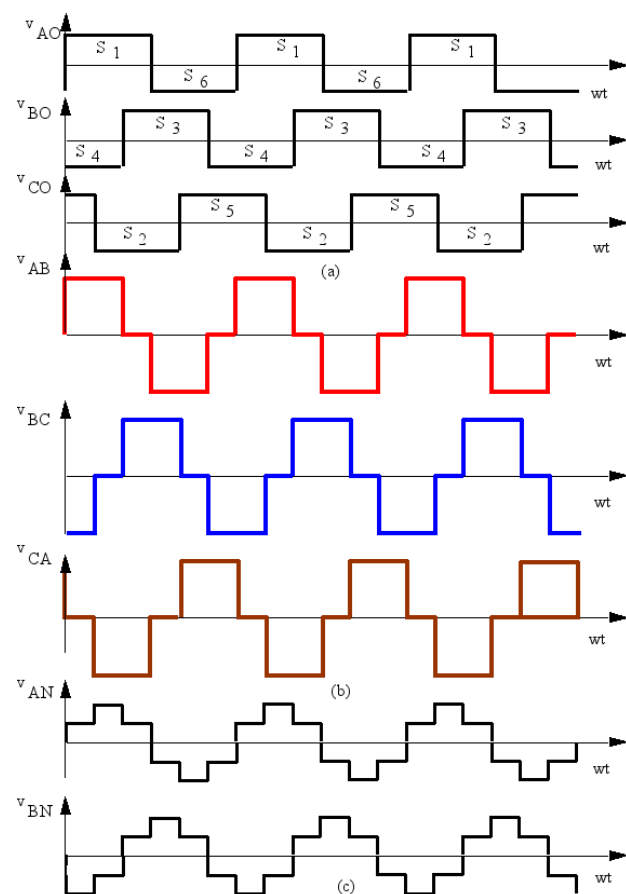


Inversor Trifásico

Fonte: Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

A operação do inversor de seis passos é essencialmente a mesma de um inversor monofásico em ponte, como no monofásico cada chave é ligada e desligada durante intervalos de  $180^\circ$  e cada terminal de saída é conectado alternadamente por meio período aos polos positivos e negativos da fonte de tensão contínua. A tensão trifásica é obtida conservando um defasamento mútuo de  $120^\circ$  entre as sequencias de chaveamento nas três “pernas” do conversor.

**Figura 17:** Saídas do motor Trifásico



Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)



## **5 APLICAÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

### **5.1 Indústria naval**

Os inversores de frequência são amplamente utilizados em várias aplicações na indústria naval seja para acionamento de motores de bombas de carga ou para acionamento de motores de propulsão principal e ou de túnel das embarcações, fora outras aplicações.

Como exemplo, podemos citar algumas embarcações com sistema elétrico WEG, onde motores que fazem girar os propulsores azimutais são acionados com Inversores de frequência Regenerativos e refrigerados a água, chamados “Active Front- Water cooled”. Neste caso, o inversor precisa ser refrigerado a água, pois o compartimento onde ele é instalado não tem um sistema de troca de calor adequado, ultrapassando os limites de temperatura aceitáveis para operação de inversores WEG, refrigerados a ar.

Como plantas elétricas de embarcações requerem alguns detalhes especiais, foram criadas sociedades classificadoras que certificam os projetos e inspecionam os equipamentos presentes na mesma. Após esse processo, diz-se que o barco é classificado, e adquire um certo grau de confiança por isso. Por este motivo alguns cuidados com relação a qual tipo de inversor de frequência deverá ser utilizado tem que ser tomados, principalmente ao que diz respeito ao nível de distorção harmônica que este tipo de equipamento gera na rede elétrica, ou seja, nível THD(Total Harmonic Distortion).

### **5.2 Indústria do petróleo**

Dependendo do tipo de plataforma, uma importante utilização é para acionar os motores das bombas de combate a incêndio, pois geralmente estes motores são alimentados pelo gerador de emergência, em baixa tensão, e necessitam de uma partida suave ou o próprio inversor de frequência para controle da velocidade do motor, não exigindo alta demanda de corrente na partida do mesmo poupando o gerador.

### 5.3 Siderurgia

Na área siderúrgica, variadores de velocidade são utilizados para controle de laminação, mesa de rolos, sistemas de lingotamento, e diversos outros sistemas deste segmento. Aplicações como estas tem grande variação de velocidade e exigem torque contínuo em toda a faixa de operação, por este motivo, até poucos anos atrás, os acionamentos eram baseados em variadores de velocidade tipo conversores de tensão, pois, para obter tal resultado de controle, era necessário a aplicação de motores de corrente contínua (CC).

Somente com o aparecimento dos inversores de frequência foi possível a utilização de motores de corrente alternadas (CA), que possuem baixo custo de compra e operação, quando comparados a motores de corrente contínua (CC).

A faixa de potência nestas operações podem variar bastante, permitindo de motores de 10KW até motores de 5000KW, sendo os de maior potencia, normalmente em média tensão para reduzir a corrente dos mesmos, fator este que define os custos da instalação e dos acionamentos destes motores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os inversores de frequência surgiram para substituir os rústicos e pesados sistemas de variação de velocidade mecânicos, inversores de velocidade e variadores hidráulicos, bem como os custosos motores de corrente contínua. Então concluímos que em relação ao sistema mecânico de variação de velocidade, os inversores de frequência são mais baratos em preço final.

Os conversores de frequência de última geração, não somente controlam a velocidade do eixo de motores elétricos trifásicos de corrente alternada, como também, controlam outros parâmetros inerentes a motor de indução, um deles é o controle de torque. Essa característica é de muita importância em navios de propulsão elétrica.

O trabalho abordou aspectos teóricos, explicando cada fase do inversor de frequência, tais como retificador controlado e não controlado, diodos, filtros e controles de disparos das chaves desses inversores, visando o melhor desempenho.

Foi especificado nesse trabalho os motores trifásicos e monofásicos, suas estruturas físicas e modo de acionamento, através do campo magnético no estator e no rotor surgem uma força eletromotriz induzida, essa força dá origem a uma corrente induzida no rotor oposta a força que lhe deu origem, criando um movimento giratório no rotor (a parte móvel do motor).

O trabalho abordou os diferentes inversores, tais como inversores monofásico, inversores de fonte de tensão em meia ponte e em ponte inteira e inversores CA-CC trifásicos, com seus circuitos e demonstrou suas ondas de saída de acordo com o chaveamento.

Concluímos que os inversores de frequência possuem diversas aplicações na indústria. Citamos a indústria naval para acionamento de motores de bombas de carga ou para acionamento de motores de propulsão principal e ou de túnel das embarcações. Indústria do petróleo para acionar os motores das bombas de combate a incêndio, pois necessitam de uma partida suave ou o próprio inversor de frequência para controle da velocidade do motor. Indústria siderúrgica para controle de laminação, mesa de rolos, sistemas de lingotamento, pois exigem torque contínuo em toda a faixa de operação.

Os benefícios como redução do custo de desenvolvimento, custo dos sistemas de acionamento, custos de manutenção, redução de equipamentos robustos que ocupam muito espaço e aumento da autonomia e simplicidade no monitoramento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CREDER, Helio. **Instalações elétricas industriais**. 15ª edição. DF.

GONTIJO Jr, Milton. **Controle de um inversor de frequência via CLP**. Minas gerais: 2009.

MANUAL do inversor de frequência série: CFW-09-Software. 2015.

STEPHAN, Richard M. **Acionamento, controle e comando de máquinas elétricas**. Rio de janeiro: 2013

SILVA, Leonardo. **Inversor de frequência**. Rio de janeiro: 2015.