

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

RAPHAEL TEIXEIRA PINHEIRO

INVERSORES DE FRENQUÊNCIA APLICADOS A INDÚSTRIA NAVAL

**RIO DE JANEIRO
2016**

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

RAPHAEL TEIXEIRA PINHEIRO

INVERSORES DE FRENQUÊNCIA APLICADOS A INDÚSTRIA NAVAL

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 Certificação de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: MSc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

**RIO DE JANEIRO
2016**

RAPHAEL TEIXEIRA PINHEIRO

INVERSORES DE FRENQUÊNCIA APLICADOS A INDÚSTRIA NAVAL

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 Certificação de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: ___/___/___

Orientador: MSc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

RESUMO

Os motores elétricos são responsáveis por uma grande parcela do consumo mundial de energia, por isso existe uma preocupação muito grande sobre sua eficiência. Até algumas décadas atrás, os sistemas de controle para motores de indução trifásicos, eram mais custosos e, por isso, em várias aplicações não se fazia o uso de técnicas de controle desses motores. Com o desenvolvimento de teorias de controle e do desenvolvimento tecnológico dos semicondutores esse contexto se alterou, e assim viabilizou a aplicação de controle nos motores de indução trifásica. O presente trabalho de conclusão de curso tem por finalidade apresentar o embasamento teórico básico para a montagem de um projeto elétrico utilizando um inversor de frequência e, para isso, são apresentados os principais conceitos relacionados aos inversores de frequência.

Palavras-chave:

ABSTRACT

Electric motors are responsible for a great share of the world's energy consumption, so the efficiency of electric motors receives great attention. Up until a few decades ago, control systems for three-phase induction motors were very expensive, and in several applications no control techniques were used. With the development of control theories and the technological advancements in semiconductors, this situation has changed, therefore making it affordable to apply control to three-phase induction motors. This course completion project has the objective to present the basic theoretical foundation for the assembly of an electric design with a frequency inverter, and for this the main concepts of frequency inverters will also be presented.

Key words:

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figura 1: | Esquema partida direta | 8 |
| Figura 2: | Esquema partida estrela-triangulo | 9 |
| Figura 3: | Esquema Partida compensada autotransformador | 9 |
| Figura 4: | Esquema Partida com Soft Starter | 10 |
| Figura 5: | Gráfico corrente x tempo | 11 |
| Figura 6: | Quadro elétrico com inversor de frequência | 13 |
| Figura 7: | Diagrama de blocos do inversor de frequência | 13 |
| Figura 8: | Azipod | 19 |
| Figura 9: | Aterramento e Blindagem | 22 |
| Figura 10: | Relé Térmico | 23 |
| Figura 11: | Reatância de saída | 24 |
| Figura 12: | Barramento CC Único | 25 |
| Figura 13: | Inversor Regenerativo | 26 |
| Figura 14: | Planta Elétrica de uma embarcação Diesel-Elétrica | 27 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 7 |
| 2 | INVERSOR DE FREQUÊNCIA | 12 |
| 2.1 | Blocos de Componentes | 13 |
| 2.1.1 | Unidade central de processamento | 14 |
| 2.1.2 | Interface homem máquina | 14 |
| 2.1.3 | Interfaces analógicas e digitais | 14 |
| 2.1.4 | Circuito de potência | 15 |
| 2.2 | Dimensionamento de inversores | 15 |
| 2.2.1 | Potência de inversores | 15 |
| 2.2.2 | Tipos de inversores | 16 |
| 2.2.3 | Modelo e fabricante | 19 |
| 2.3 | Instalação | 20 |
| 2.3.1 | Rede de alimentação elétrica | 20 |
| 2.3.2 | Fusíveis de proteção | 20 |
| 2.3.3 | Cabos | 20 |
| 2.3.4 | Aterramento e blindagem | 21 |
| 2.3.5 | Dispositivos de saída | 23 |
| 2.4 | Configurações com barramento CC | 25 |
| 2.4.1 | Barramento CC único | 25 |
| 2.4.2 | Inversores regenerativos | 25 |
| 3 | APLICAÇÃO NAVAL | 27 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 31 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 32 |

1 INTRODUÇÃO

Com a busca por melhores desempenhos e aumento da vida útil de motores, redução da temperatura e corrente de partida, etc., os inversores de frequência ganharam espaço no mercado de trabalho, visando solucionar as necessidades dos consumidores.

Nos dias atuais vemos a difusão do uso de inversores de frequência no nosso cotidiano, um exemplo bem visível dessa nova tecnologia são os ar condicionados Splits Inverters, que segundo dados dos fabricantes a economia de energia pode chegar até a 60% dos sistemas convencionais.

Antes de entrarmos no assunto de inversores de frequência, vamos fazer uma breve introdução sobre o acionamento elétrico para motores de indução.

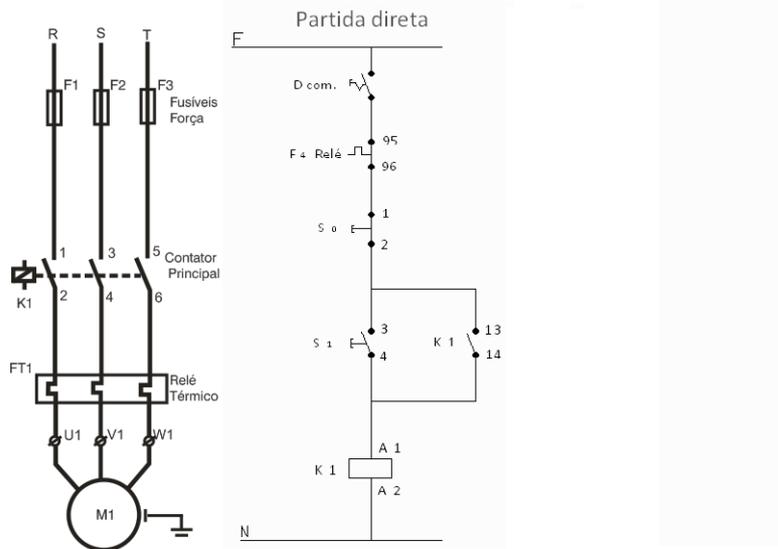
Quando um motor de indução é colocado em operação o mesmo absorve muita corrente no momento da partida e, dependendo do sistema onde o motor esteja instalado, esse grande consumo de corrente pode ser prejudicial à rede de alimentação. A corrente que um motor de indução exige na partida pode ser de 6 a 10 vezes maior que a corrente nominal. Devido ao fato dos motores exigirem correntes altas na partida, pode ocorrer queda de tensão na rede, e assim afetar os demais equipamentos ligados a mesma rede. Com o intuito de diminuir a corrente de partida, controlar a velocidade, torque do motor de indução, algumas técnicas de acionamento de partida e controle foram desenvolvidas. A seguir serão brevemente apresentadas algumas dessas técnicas:

- Partida direta:

Esta técnica pode ser considerada a mais simples, pois necessita apenas de contadores, disjuntores e chaves para manobras. Comumente, a vantagem principal é o custo, pois não é necessário nenhum outro dispositivo de suporte que auxilie a suavizar as amplitudes de corrente durante a partida. Há inúmeras desvantagens com relação a outros métodos de partida, como por exemplo, um transiente de corrente e torque durante a partida. A corrente variando entre 6 e 10 vezes a nominal, obriga o projetista do sistema elétrico a superdimensionar o sistema de alimentação, disjuntores, fusíveis, que fazem parte do circuito de elétrico que alimenta o motor. O Transiente de torque, faz com que os componentes mecânicos associados ao eixo do motor, sofram desgaste prematuro. A situação piora à medida que a potência elétrica do motor aumenta. Métodos alternativos que suavizam a

partida direta podem ser obtidos com contatores e temporizadores (partida Estrela-Triângulo), autotransformadores ou sistemas eletrônicos como os Soft Starters. A partida direta é utilizada para motores abaixo de 5CV desde que a corrente de partida seja menor que a corrente suportada pela rede. Somente em casos especiais é utilizada em grandes potências.

Figura 1: Esquema partida direta



Fonte: <http://clubedaeletrica.blogspot.com.br/2012/02/partida-direta.html>.

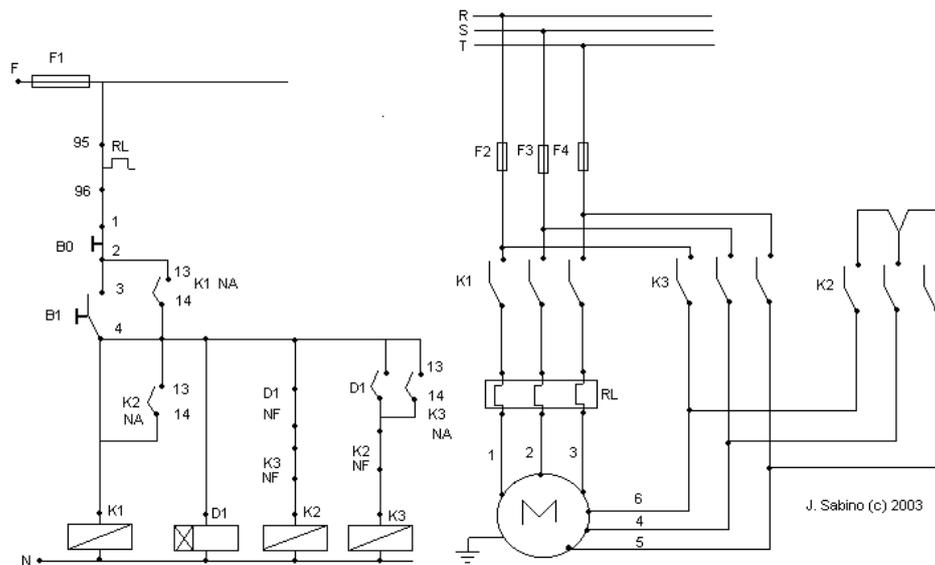
- Partida estrela-triângulo:

A partida estrela-triângulo é utilizada em motores de elevada potência com o intuito de diminuir a corrente na partida. Trata-se de uma técnica bastante utilizada, pois a sua implementação é de baixo custo.

Nesta técnica, o motor parte na configuração estrela e, após uma determinada velocidade, passa para triângulo, e assim operando em suas condições nominais.

Neste tipo de partida, a corrente e o torque são reduzidos a $1/3$, ou aproximadamente entre 25% e 33% da corrente de partida nominal.

Figura 2: Esquema partida estrela-triângulo

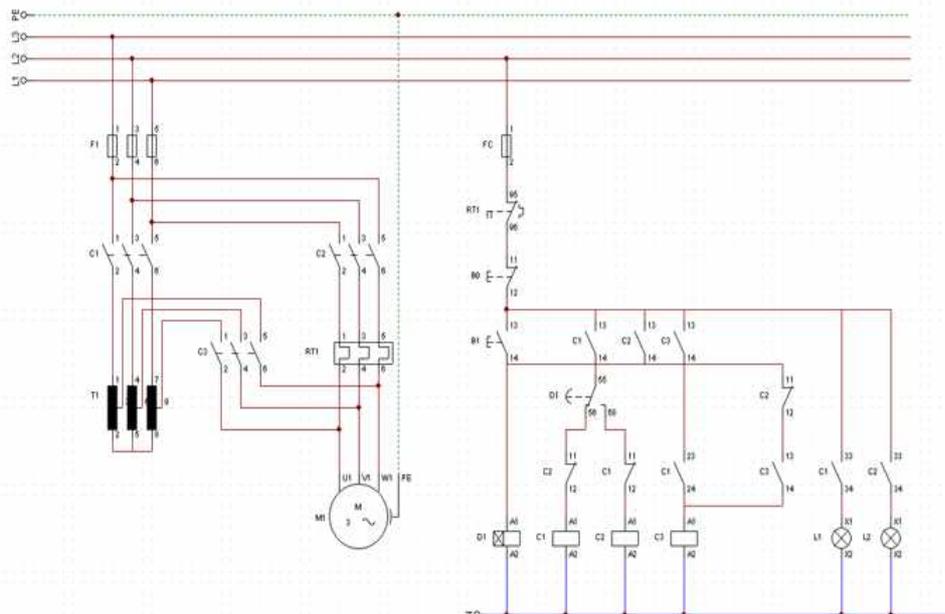


Fonte: <http://www.geocities.ws/transistor548/estrela.html>.

- Partida compensada autotransformador:

É utilizada na partida de motores maiores, de até 15CV. A função do autotransformador é diminuir a tensão na partida, podendo assim, diminuir a corrente de pico. Essa técnica de partida tem um custo mais elevado quando comparado com a técnica de partida estrela-triângulo, o que faz com que sua aplicação seja mais limitada a casos especiais.

Figura 3: Esquema Partida compensada autotransformador



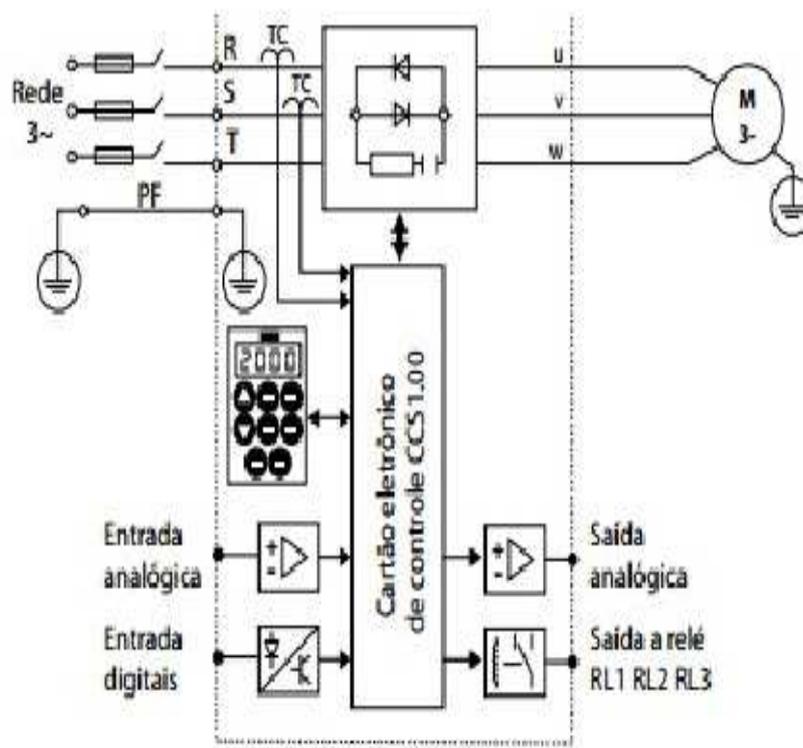
Fonte: <http://etnautransformadores.com.br/auto-trafo-compensador-de-partida/>.

- Partida com Soft Starter:

O *Soft Starter* é um dispositivo capaz de efetuar além do controle de partida, o controle de frenagem e torque e, com isso, consegue manter a corrente de partida muito próxima da corrente nominal com baixa variação durante todo o período de tempo da partida.

Para ser possível o controle fino de corrente de partida, o soft starter oferece um ajuste de tensão inicial de partida e um tempo de ciclo pré-determinado para que o motor acelere até a velocidade nominal e consequentemente obtenha a tensão nominal da rede. Com isso, os picos de correntes são evitados, evitando-se desgastes em peças mecânicas e amenizando efeitos na rede elétrica.

Figura 4: Esquema Partida com Soft Starter



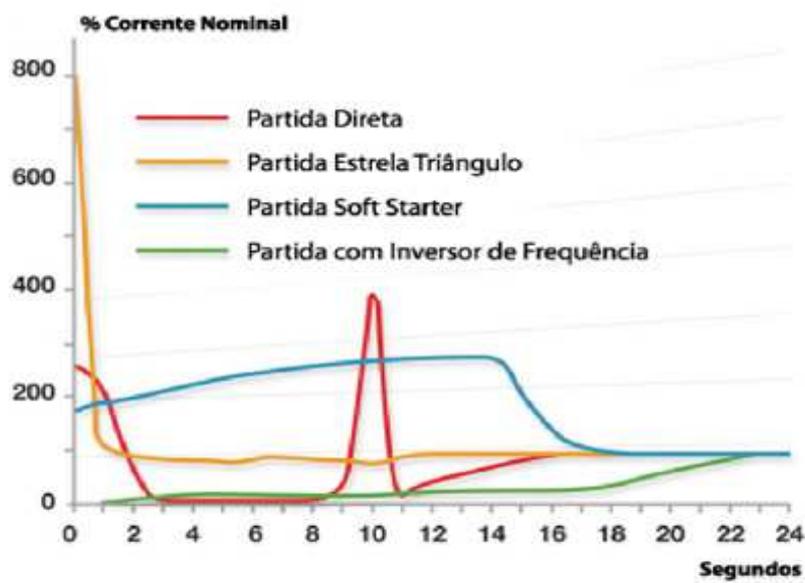
Fonte: <http://www.portaleletricista.com.br/chave-soft-starter/>.

- Inversores de Frequência:

Além do controle de partida de motores de indução, a indústria necessita do controle de velocidade variável ao longo do processo. Esses controles que antes eram feitos por motores de corrente contínua, agora passam a ser realizados por motores de indução, cujo processo é possível graças aos conversores de frequência.

Devido ao baixo custo, economia de energia, fácil instalação e parametrização, os inversores de frequência, como também são chamados, são utilizados amplamente no meio industrial. O gráfico a seguir mostra a eficiência de uma instalação com inversor de frequência:

Figura 5: Gráfico corrente x tempo



Fonte: <http://arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227>.

2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência, também conhecido como conversor de frequência, é um dispositivo eletrônico que converte a tensão da rede alternada senoidal, em tensão contínua e finalmente convertem esta última, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Em poucas palavras são equipamentos de relativo baixo custo para o controle da velocidade de motores de indução trifásicos.

A denominação Inversor ou Conversor é bastante controversa, sendo que alguns fabricantes utilizam Inversor e outros Conversor. O Inversor de Frequência tem na sua entrada um bloco retificador, o circuito intermediário composto de um banco de capacitores eletrolíticos e circuitos de filtragem de alta frequência para os harmônicos gerados no chaveamento de alta potência e finalmente o bloco inversor, ou seja, o inversor na verdade é um bloco composto de transistores IGBT ou TRIACs, dentro do conversor. Na indústria, entretanto, ambos os termos são imediatamente reconhecidos, fazendo alusão ao equipamento eletrônico de potência que controla a velocidade ou torque de motores elétricos.

Eles são usados em motores elétricos de indução trifásicos para substituir os rústicos sistemas de variação de velocidades mecânicos, tais como polias e variadores hidráulicos, bem como os custosos motores de corrente contínua pelo conjunto motor assíncrono e inversor, mais barato, de manutenção mais simples e reposição facilitada.

Os inversores de frequência costumam também atuar como dispositivos de proteção para os mais variados problemas de rede elétrica que se pode ocorrer, como desbalanceamento entre fases, sobrecarga, queda de tensão, etc. Permitem também inversão de sentido de rotação e usar redes monofásicas.

Normalmente, os conversores são montados em painéis elétricos, sendo um dispositivo utilizado em larga escala na automação industrial. Podem trabalhar em interfaces com computadores, centrais de comando, e conduzir, simultaneamente, dezenas de motores, dependendo do porte e tecnologia do dispositivo.

Na figura abaixo, vemos um quadro elétrico equipado com um inversor de frequência:

Figura 6: Quadro elétrico com inversor de frequência



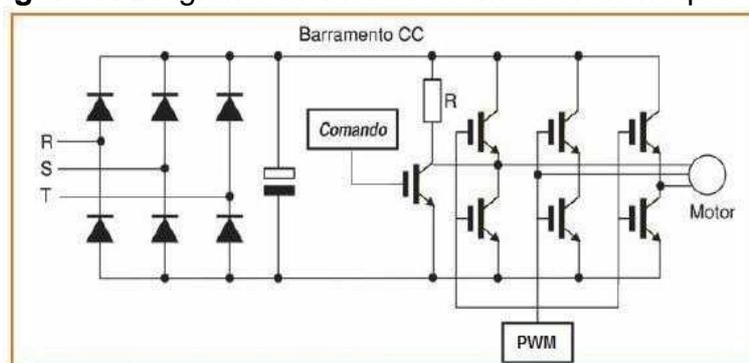
Fonte: <https://supeletrica.wordpress.com/>.

2.1 Blocos de Componentes do Inversor

Para entender o funcionamento de um inversor de frequência, é necessário, antes de mais nada, saber a função de cada bloco que o constitui. Ele é ligado na rede, podendo ser monofásica ou trifásica, e em sua saída há uma carga que necessita de uma frequência diferente da rede. Para tanto, o inversor tem como primeiro estágio, um circuito retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua, após isso a um segundo estágio capaz de realizar o inverso, ou seja, de CC para CA (conversor – antigamente, o equipamento que fazia isso a partir de baterias era chamado de inversor), e com a frequência desejada pela carga.

A figura 7 ilustra o diagrama de blocos do inversor de frequência:

Figura 7: Diagrama de blocos do inversor de frequência



Fonte: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/783-inversor-de-frequncia-menos-custo-e-maior-confiabilidade>.

2.1.1 unidade central de processamento

O bloco da CPU, de um inversor de frequência pode ser formado por um micro processador ou por um micro controlador (PLC). Isso depende apenas do fabricante. De qualquer forma, é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a esse conjunto. A CPU não apenas armazena os dados e parâmetros relativos aos equipamentos, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor: Geração dos pulsos de disparo, através de uma lógica de controle coerente, para os IGBT's.

2.1.2 interface homem máquina - IHM

O bloco da IHM é um dispositivo que nos permite visualizar o que está ocorrendo no inversor através do seu display de LCD, e parametrizá-lo de acordo com a aplicação desejada através de suas teclas de programação.

2.1.3 interfaces analógicas e digitais

Os inversores podem ser comandados através de dois tipos de sinais: Analógicos ou digitais. Normalmente, quando queremos controlar a velocidade de rotação de um motor AC no inversor, utilizamos uma tensão analógica de comando. Essa tensão se situa entre 0 á 10 Vcc. A velocidade de rotação (RPM) será proporcional ao seu valor, por exemplo: 1 Vcc = 1000 RPM, 2Vcc = 2000 RPM.

Para inverter o sentido de rotação basta inverter a polaridade do sinal analógico (de 0 á 10 Vcc sentido horário, e -10 á 0 Vcc sentido anti-horário). Esse é o sistema mais utilizados em máquinas-ferramenta automáticas, sendo que a tensão analógica de controle é proveniente do controle numérico computadorizado (CNC). Além da interface analógica, o inversor possui entradas digitais. Através de um parâmetro de programação, podemos selecionar qual entrada é válida (Analógica ou digital).

2.1.4 circuito de potência

A etapa de potência é constituída por um circuito retificador, que alimenta (através de um circuito intermediário chamado “barramento DC”). Neste circuito retificador é utilizado o semicondutor chamado IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) que é o Transistor Bipolar de Porta Isolada, frequentemente utilizado como uma chave, alternando os estados de condução (On-state) e corte (Off-state) os quais são controlados pela tensão de porta.

2.2 DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES

Para a escolha do inversor devemos saber: o modelo, o tipo e a potência do inversor de acordo com a necessidade de utilização do mesmo, bem como a potência do motor a ser controlado.

2.2.1 potência do inversor

Para calcularmos a potência do inversor, temos que saber qual o motor (e qual carga) ele acionará. Normalmente a potência dos motores é dada em CV ou HP. Basta fazer a conversão em watts, por exemplo:

- a) Rede elétrica = 380Vca
- b) Motor = 1 HP
- c) Aplicação = Exaustor industrial

Cálculos:

1HP = 746W. Portanto, como a rede elétrica é de 380Vca e os inversores (normalmente) possuem fator de potência igual a 0,8 ($\cos\phi = 0,80$), teremos:

- a) I = Corrente do inversor
- b) P = Potência em Watts
- c) Tensão na rede $\times \cos\phi$

$$I = P / (\text{Tensão na rede} \times \cos\phi) \text{ (eq.1)}$$

$$I = 746 / (380 \times 0,8) = 2,45 \text{ A}$$

Tensão de entrada = 380 Vca (arredondando 2,45 para cima).

2.2.2 tipos de inversores

A maioria dos inversores utilizados é do tipo escalar (ou seja, só controlam a velocidade e não o torque, por isso são mais baratos). Só utilizamos o tipo vetorial em duas ocasiões: Extrema precisão de rotação, torque elevado para rotação baixa ou zero (guindastes, pontes rolantes, elevadores, etc).

➤ **Inversor Escalar**

Em linhas gerais, podemos dizer que os inversores escalares são fontes de alimentação com valores de tensão/frequência pré-determinados dentro de toda a faixa de variação de velocidade.

Existem curvas V/F prontas, destinadas a aplicações mais comuns, como curvas quadráticas para bombas e ventiladores e curvas com alto torque de partida. Também existe a possibilidade de programação dos valores da curva V/F possibilitando a sua adaptação a cargas especiais.

Considerando-se que o torque no eixo do motor é proporcional à relação V/F, os inversores escalares irão disponibilizar ao motor torques pré-determinados, não compensando as necessidades de torques adicionais requeridas por determinadas aplicações. A compensação de torque principalmente em baixas rotações é normalmente realizada através da programação da curva V/F, que ao ser elevado o valor da relação V/F, eleva-se a disponibilidade de torque no motor. Tal efeito é normalmente denominado de Reforço de Torque para baixas rotações, ou Torque Boost em inglês.

➤ **Inversor Vetorial de Tensão**

Nos controles vetoriais de tensão, a tensão no motor é calculada pelo programa do inversor e compensa em parte os conjugados no rotor. Uma das técnicas de fazer o controle vetorial de tensão é manter o escorregamento constante.

No motor AC:

$$N = 120.f/p \text{ (eq.2)}$$

N = Veloc. do campo girante calculada (rpm);

f = frequência da alimentação (Hz);

p = número de polos do motor.

E escorregamento (s) é:

$$s = (N - n)/N \text{ (eq.3)}$$

n = veloc. medida no rotor (rpm – tacômetro)

Esse controle melhora a eficiência do motor, pois ele trabalha com tensões menores quando o conjugado é menor que o nominal, comparando-se com inversores escalares.

Alguns inversores escalares possuem um algoritmo incorporado ao software o qual aumenta a tensão independentemente da frequência, de forma a compensar "em parte" as solicitações de torque do motor, este sistema é normalmente denominado de Controle Vetorial da Tensão.

Apesar da Curva V/F ser pré-fixada, os inversores escalares dispõem de funções adicionais capazes de influir sobre a curva V/F, hora sobre o valor da tensão, hora sobre o valor da frequência, proporcionando melhor performance do motor. Funções como a de compensação de Escorregamento, aumentam a frequência de saída na mesma proporção da elevação de corrente de motor, acima da corrente de vazio, compensando a queda de velocidade devido ao escorregamento.

Funções como a de Economia de Energia, reduzem a tensão de saída do inversor quando a carga é reduzida melhorando a eficiência do motor e economizando energia elétrica.

➤ **Inversor Vetorial de Fluxo**

Os inversores com controle vetorial de fluxo mantêm o fluxo magnético no motor constante. Diferente do controle vetorial de tensão em que o conjugado é controlado pelo escorregamento, o campo é diretamente proporcional ao conjugado no rotor, produzindo uma saída trifásica com tensão(V) e frequência (F) controladas independentemente, não seguindo uma curva V/F pré-fixada. A ideia é manter o

fluxo magnético do motor constante e controlar diretamente o torque do eixo do motor controlando-se a corrente rotórica do mesmo.

Os Inversores Vetoriais de Fluxo possuem dois controladores, um controla a corrente de magnetização e o outro a corrente do motor. O torque no motor será imposto e controlado diretamente, ao contrário dos Inversores Escalares onde o torque é consequência do escorregamento do motor.

Os inversores Vetoriais de Fluxo estão divididos em duas categorias: com e sem realimentação. A realimentação ou "Feedback", permite "enxergar" o movimento do eixo do motor possibilitando controlar a velocidade com alta precisão e também o torque em velocidade zero. A operação com realimentação é também conhecida como controle de malha fechada e sem realimentação como controle de malha aberta. A realimentação é realizada utilizando um gerador de pulsos, também conhecido com "Encoder". Alguns equipamentos permitem a utilização dos dois modos, sendo necessária uma placa opcional para a operação de malha fechada.

A operação de malha aberta, ou sem realimentação é também conhecida como "SensorLess", nesse caso o algoritmo de controle torna-se mais complexo pois o inversor deve calcular através de artifícios matemáticos a velocidade real e o escorregamento do motor. A operação sem realimentação possui performance inferior à operação com realimentação.

Os Inversores Vetoriais de Fluxo necessitam da programação de todos os parâmetros do motor como, resistências elétricas, indutâncias, correntes nominais do rotor e estator, dados esses normalmente não encontrados com facilidade. Para facilitar o set-up, alguns inversores dispõem de sistemas de ajustes automáticos também conhecidos como "Auto-tuning", não sendo necessária a pesquisa de dados sobre o motor, comum quando o inversor é do mesmo fabricante do motor.

➤ **Inversores Escalares x Vetoriais de Fluxo**

A principal diferença entre os inversores Escalares e Vetoriais de Fluxo deve-se a capacidade dos inversores vetoriais de fluxo de imporem o torque necessário ao motor, de forma precisa e rápida permitindo uma elevada velocidade de resposta dinâmica a variações bruscas de carga.

Com Inversores Escalares é necessária a queda de velocidade para aumento do torque, ou seja, o torque produzido no motor é proporcional ao escorregamento.

Nos inversores Vetoriais de Fluxo não existe praticamente redução de velocidade para aumento do torque, visto que o inversor irá impor uma tensão e uma frequência adequada para compensar a queda de velocidade e impor o torque necessário à carga. Em algumas aplicações é necessário que o motor trabalhe com folga de tensão visto que os inversores vetoriais de fluxo impõem o torque elevando a tensão sobre o motor. Caso a velocidade de trabalho seja a nominal e a regulação seja crítica, é necessário utilizar um motor com tensão nominal menor que a rede, como forma de obter-se a folga necessária para a regulação.

2.2.3 modelo e fabricante

Para escolher o modelo, basta consultarmos os catálogos dos fabricantes, ou procurar um que atenda as seguintes características mínimas como no caso do exemplo abaixo:

- a) Tensão de entrada = 380 Vca
- b) Tipo = escalar
- c) Potência a ser controlada

Quanto ao fabricante o preço e a disponibilidade devem determinar a escolha. Os mais encontrados nas indústrias são: Siemens, Weg, YasKawa, ABB, Allen Bradley, GE (Fanuc), etc. Nos navios modernos os mais encontrados são da WEG e ABB, que implementa junto com seu projeto de propulsão registrado AZYPOD).

Figura 8: Azipod



Fonte: <http://tecnologiamaritima.blogspot.com.br/2012/07/posicionamento-dinamico-parte-4.html>.

2.3 Instalação

Agora teremos como objetivo apresentar os componentes e informações gerais necessárias para a instalação de um inversor de frequência. A utilização de cada componente dependerá de cada caso particular.

2.3.1 rede de alimentação elétrica

Os inversores são projetados para operar em redes de alimentação simétricas. A tensão entre fase e terra deve ser constante, se por algum motivo esta tensão varia, por exemplo, pela influência de algum outro equipamento ligado a rede, será necessária colocar um transformador de isolamento.

2.3.2 fusíveis de proteção

Os inversores geralmente não possuem proteção contra curto-circuito na entrada, sendo assim, é responsabilidade do usuário colocar fusíveis para proteção. Estes são normalmente especificados na documentação técnica.

2.3.3 cabos

Os sinais elétricos transmitidos pelos cabos podem emitir radiação eletromagnética e também podem absorver radiação (se comportam como antenas) provocando falsos sinais que prejudicarão o funcionamento do equipamento. É assim que existem cabos especiais com blindagem para minimizar este tipo de interferências. É necessário seguir estritamente as instruções de instalação (ex.: o gabinete precisa ser aterrado). Se perto do equipamento houver contatores, será necessário instalar supressores de transientes (snubers) nas bobinas dos contatores.

O cabo de conexão do inversor com o motor é uma das fontes mais importantes de emissão de radiação eletromagnética. Sendo assim é necessário seguir os seguintes procedimentos de instalação:

- a) Cabo com blindagem e fio-terra; como alternativa pode ser usado um eletroduto metálico com fiação comum interna;
- b) Blindagem ou eletroduto metálico deve ser aterrado;
- c) Separar dos cabos de sinal, controle e cabos de alimentação de equipamentos sensíveis;
- d) Manter sempre continuidade elétrica de blindagem, mesmo que contadores ou relés térmicos sejam instalados entre conversor e o motor.

Já os Cabos de Sinal e Controle devem ter os seguintes procedimentos:

- a) Cabo blindado aterrado ou eletroduto metálico aterrado;
- b) Separação da fiação de potência;
- c) Caso necessário, cruzamento de cabos fazê-lo a 90°;
- d) Caso necessário seguirem na mesma canaleta, usar separador metálico aterrado.

2.3.4 aterramento e blindagem

O aterramento de um equipamento é de extrema importância para o seu correto funcionamento, devido a segurança e a blindagem eletromagnética. Todas as partes condutoras de um equipamento elétrico que podem entrar em contato com o usuário, devem ser aterradas para proteger os mesmos de possíveis descargas elétricas. Quando um equipamento está corretamente aterrado, toda a parte condutora que podem entrar em contato com o usuário tem que ter uma diferença de potencial de 0 volts a respeito do aterramento. A blindagem dos equipamentos é realizada normalmente com placas metálicas formando um gabinete ou caixa. Estas devem estar ligadas umas as outras através de materiais condutores e todas corretamente aterradas.

- i) Utilizar cabos com blindagem aterrada ou eletroduto metálico aterrado separado dos demais;
- j) A rede elétrica deve estar referenciada ao terra (neutro) aterrado na subestação).

2.3.5 dispositivos de saída

Os dispositivos de saída do projeto desenvolvido, Que permitem o bom funcionamento do controle de eixos, são: Relés Térmicos e Reatância de Saída.

➤ Relés Térmicos

Os inversores possuem normalmente proteção contra sobre correntes que tem como finalidade proteger o motor. Quando mais de um motor é acionado pelo mesmo inversor será necessário colocar um relé térmico de proteção em cada motor. Como o sinal de saída do inversor é chaveado a altas frequências, podem acontecer disparos nos relés, mesmo sem estes terem atingido a corrente nominal de disparo. Para isto não acontecer é necessário aumentar a corrente de disparo do relé em aproximadamente 10% da corrente nominal do motor.

A figura 10 ilustra o Relé Térmico:

Figura 10: Relé Térmico



Fonte: <http://lustressantaisabel.com.br/?a=verProduto&cat=43>.

➤ Reatância de Saída

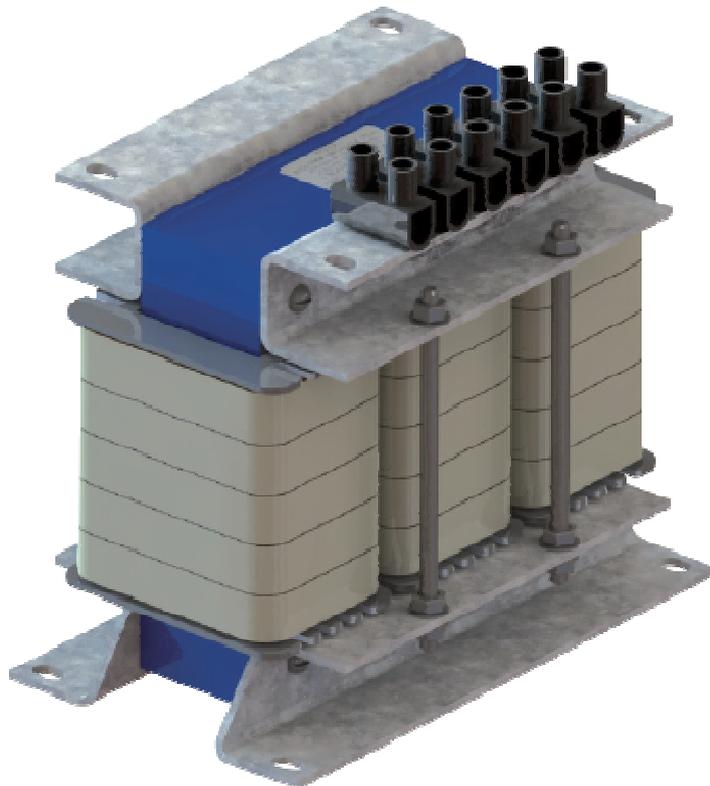
Quando a distância entre motor e inversor é grande (valor dependente do tipo de motor utilizado) podem ocorrer:

- Sobre tensões nos motores produzidas por um fenômeno chamado de onda refletida;
- Geração de capacitâncias entre os cabos de potência que retornam para o inversor produzindo o efeito de “fuga a terra”, bloqueando o inversor.

Este tipo de problemas pode ser solucionado utilizando uma reatância entre o motor e o inversor. Esta reatância deve ser projetada especialmente para altas frequências, pois os sinais de saída do inversor possuem frequências de até 20 kHz.

A figura 11 ilustra uma reatância de saída:

Figura 11: Reatância de saída



Fonte: <http://polux.ind.br/reatancia-trifasica.html>.

2.4 Configurações com barramento CC

Alguns tipos de inversores possuem acesso ao barramento CC (Link CC) interno permitindo ser configurado para atender aplicações envolvendo a utilização de um barramento CC único, assim como para sistemas regenerativos.

2.4.1 barramento CC único

Utilizado para configurações em sistemas de máquinas multimotores onde as pontes retificadoras de cada inversor são substituídas por uma única unidade retificadora geral de entrada, através da interligação dos inversores por intermédio de um barramento CC único, proporcionando uma solução mais econômica do sistema. Esta solução proporciona ainda uma otimização do consumo energético do sistema em função da transferência de energia entre as unidades inversoras.

Figura 12: Barramento CC Único



Fonte: Catalogo WEG – CFW09.

2.4.2 Inversores regenerativos

Utilizado para configurações de sistemas regenerativos através da interligação de uma unidade retificadora regenerativa (CFW09-RB) ao barramento CC do inversor. Esta solução permite frenagens regenerativas, com total devolução da energia à rede durante as frenagens, proporcionando um fator de potência unitário. Destina-se principalmente às aplicações de regime cíclico e/ou de paradas extremamente rápidas e de elevada dinâmica, tais como: Rebobinadeiras de Papel,

Centrífugas de Açúcar, Pórticos e Guindastes, etc. Além dessa vantagem esta configuração elimina as correntes harmônicas na entrada do inversor, sendo útil nas aplicações onde não admite-se distorções harmônicas de corrente na rede de alimentação.

Figura 13: Inversor Regenerativo



Fonte: Catalogo WEG – CFW09.

3 APLICAÇÃO NAVAL

Os inversores de frequência são amplamente utilizados em varias aplicações na industria naval, seja para acionamento de motores de bombas de carga ou para acionamento de motores de propulsão principal e ou propulsores laterais, fora outras aplicações. Com exemplo, podemos citar algumas embarcações com sistema elétrico WEG, onde os motores que fazem girar os propulsores azimutais são acionados com Inversores de Frequencia regenerativos e refrigerados a agua, os chamados “Active front End – 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 aceitaveis para operação de inversores de frequência refrigerados a ar. Chegando a potências relativamente altas em baixa tensão, os inversores de frequência da WEG podem acionar motores de até 2500kw em 690v.

Como as plantas eletricas 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 no que diz respeito ao nível de distorção harmônica que este tipo de equipamento gera na rede elétrica, ou seja, o nível de THD (Total Harmonic Distorcion).

Abaixo tem-se uma breve explicação sobre os inversores de frequência padrões da WEG, 6 pulsos, e seus níveis de THD, utilizados na area naval: é a solução padrão para todos os inversores de frequência do mercado, possuindo o nivel de THD muito alto e a forma de onda da corrente é muito afetada.

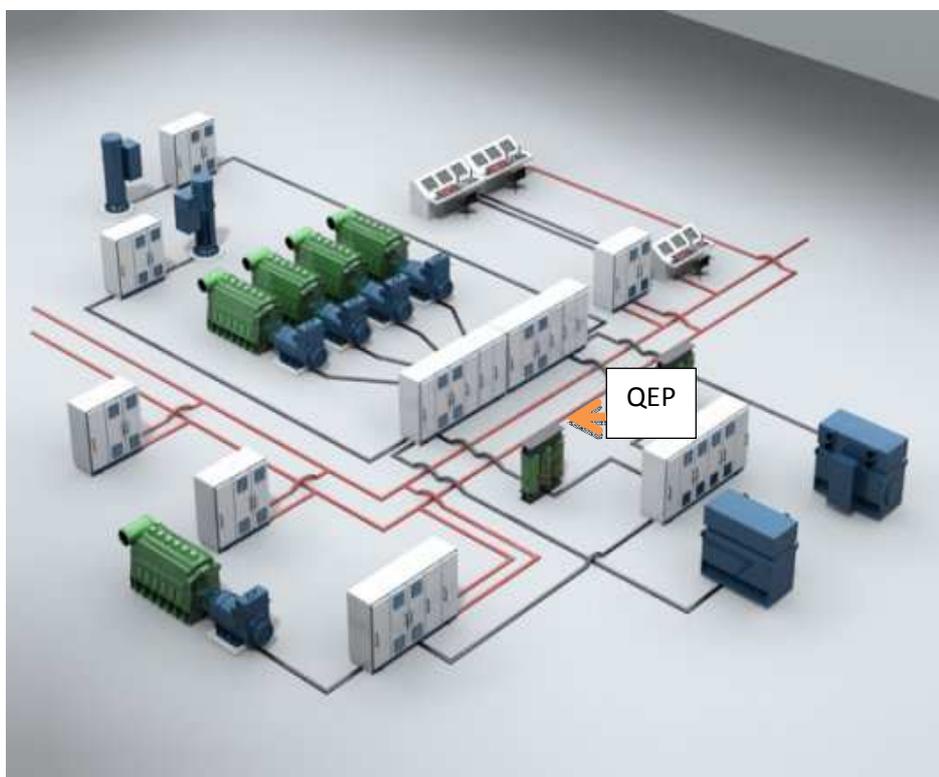
Seguem algumas características técnicas deste tipo de inversor:

- a) 400V: 380-480V;
- b) 500V: 500-600V;
- c) 600V: 660-690V
- d) 300 até 2500kw;
- e) Suportam sobrecarga de 110% durante 1 minuto;
- f) São plug and play;
- g) Funções de monitoramento e diagnose completa.

O inversor padrão da WEG – CFW 09, 6 pulsos, na realidade da área naval é utilizado apenas para acionamento dos motores de bombas de carga, ventiladores, exaustores, outras cargas com baixa potencia que necessitam de variação de velocidade e não estejam conectados diretamente ao barramento principal, pois geram alto nível de distorção harmônica e, como geralmente os equipamentos mais sensíveis da embarcação (navegação) estão conectados a ele, as certificadoras não permitem este tipo de operação.

Quando a carga necessita estar ligada ao barramento principal e tem potência elevada, utilizam-se os inversores com retificadores 12, 18 ou 24 pulsos, ou ainda os inversores regenerativos, pois possuem menor nível de distorção harmônica do que o inversor 6 pulsos, não afetando assim, os equipamentos mais sensíveis da embarcações. Dessa forma, o barco é classificado pelas sociedades classificadoras sem maiores problemas. Para efeito de ilustração, segue abaixo, a Figura 14 que mostra claramente uma planta elétrica padrão para embarcações com sistema de propulsão Diesel-Elétrica:

Figura 14: Planta Elétrica de uma embarcação Diesel-Elétrica



Fonte: Soluções para o segmento Naval – Publicação WEG.

Na figura acima, tem-se os quatro grupo-geradores protegidos e controlados pelo Quadro Elétrico Principal (QEP). O QEP ainda alimenta os motores de propulsão principal e de propulsão lateral da embarcação, alimenta os primários de dois transformadores abaixadores (redundantes), que por sua vez, através de seus secundários, alimentam o Quadro Elétrico de Distribuição (QED). O QED alimenta, geralmente, as cargas não essenciais da embarcação e o Quadro Elétrico de Emergência (QEE). O QEE geralmente protege e controla o gerador de emergência e alimenta algumas cargas não essenciais também.

A primeira embarcação que foi lançada utilizando o sistema elétrico da WEG é o Saveiro Fragata, um PSV 3000, que conta com os seguintes equipamentos WEG instalados:

- a) 04 x Geradores principais 1375kVA/690v;
- b) 01 x Gerador de emergência 250kVa/ 690V;
- c) 02 x Motores 600KW / 690V acionados por Soft-Starter SSW06, para propulsão lateral da embarcação;
- d) 02 x Motores 1500kW / 690V acionados por Soft-Starter SSW06, para a propulsão principal da embarcação;
- e) Quadros Elétricos Principais, de distribuição, de emergência e de iluminação;
- f) Sistema de automação – Gerenciamento de energia(PMS);
- g) Sistema de automação – Alarmes.

A indústria naval Brasileira esteve em alta por um longo período, em 2006, teve um faturamento de US\$ 3 bilhões e foram gerados 36 mil empregos diretos, esse crescimento se manteve até 2013. No segundo semestre de 2014 a crise econômica brasileira se intensificou e a Petrobras teve grandes perdas também, basicamente devido ao baixo preço do barril de petróleo e das investigações da Operação Lava Jato. Essa situação levou a falência muitos estaleiros e com isso demissões em massa. Ainda em 2016 vivemos os reflexos desses acontecimentos, culminando até em abertura de processo de impeachment do Presidente da República, que até o momento não foi concluído.

Indústria de Petróleo

Os inversores de frequência CFW-09 são bastante utilizados em cargas de baixa potência para a indústria de Petróleo, tais como pequenas bombas, ventiladores e etc. Em sua grande maioria, as cargas com maiores potências, que

necessitam de variação de velocidade, são alimentadas em média tensão, daí surge a necessidade de se utilizar outra linha de inversores da WEG, a linha MVW.

Dependendo do tipo de plataforma, uma importante utilização é 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 o controle da velocidade do motor, não exigindo assim, alta demanda de corrente na partida do mesmo, “poupando” os geradores e não atuando as proteções de sobrecarga dos mesmos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, podemos concluir que a utilização de Inversor es de frequência tem crescido rapidamente, pois estes equipamentos estão se tornando cada vez mais práticos, econômicos e úteis na indústria atual. Por este motivo abordamos que controlar velocidade, posicionamento e torque com tais equipamentos pode ser uma solução eficiente e econômica para a máquina ou processo industrial que exige confiabilidade.

O uso do inversor de frequência para esse objetivo se torna muito fácil devido sua fácil parametrização, facilidade de instalação e inúmeras opções oferecidas por diversos fabricantes, comparando com outros métodos de controle que são mais complexos e que exige um alto investimento.

Atualmente a maioria dos inversores de frequência já possui a opção de controle vetorial, que é um forma de controlar eixos com elevado torque independente da rotação. Este tipo de controle é muito utilizado em aplicações que exigem elevado torque, mesmo funcionando com baixas rotações. Em conjunto com o inversor de frequência, também podemos utilizar o CLP onde sua função no controle de eixos é armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como: lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando o inversor de frequência por meio dos módulos de saída. A vantagem do uso do CLP para estes fins é pela possibilidade de ser facilmente programado e alterado quando necessário. Através do software de programação o usuário pode criar sequências lógicas de acordo com a necessidade do processo.

Já o Motor de Indução Trifásico é diretamente controlado pelo inversor de frequência, onde o usuário define através de parâmetros as seguintes variáveis: velocidade, tensão, corrente, torque, aceleração, desaceleração, etc.

Os motores elétricos são responsáveis por até 50% do consumo de energia elétrica industrial, por isso abordamos o seu acionamento por um inversor de frequência, que de forma consciente pode gerar uma economia de energia do sistema, eliminando os picos de partida e rotações desnecessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLI, Pedro Luís. **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)**. Rio de Janeiro, 1998.

SANTOMAURO, Antônio C. **Inversores de Frequência: novos projetos**. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/pquimica/14407/inversores-de-frequencia-novos-projetos-adotam-inversores-nos-motores/>>. Acesso em: mai. 2016.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Guia prático para instalações industriais e infraestrutura**. São Paulo, 2009. 768p.

SIEMENS. **Motores Trifásicos de Baixa Tensão**. São Paulo, 2010. 19p.

SINAVAL. **Cenário da Construção Naval Brasileira**. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/wp-content/uploads/Cen%C3%A1rio-da-Constru%C3%A7%C3%A3o-Naval-Brasileira-Balan%C3%A7o-e-defesa-do-setor.pdf>>. Acesso em: mai. 2016.

SOUZA, Neemias S. **APOSTILA DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS**. Rio Grande do Norte, 2009.

SOUZA, Waldecy dos Santos. **Posicionamento Dinâmico**. Disponível em: <<http://tecnologiamaritima.blogspot.com.br/2012/07/posicionamento-dinamico-parte-4.html>>. Acesso em: mai. 2016.

WEG AUTOMAÇÃO. **GUIA DE APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**. 2ª Edição. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: mai. 2016.

WEG AUTOMAÇÃO. **CATALOGO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA – CFW09**. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: mai. 2016.

WEG. **OFFSHORE NEWS**. 2009. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: mai. 2016.

WEG. **SOLUÇÕES PARA O SEGMENTO NAVAL**. 2012. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: mai. 2016.