

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRANÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE MÁQUINAS (APMA)**



A IMPORTÂNCIA DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA NO SETOR NAVAL

DIOGO FREITAS DA SILVA

**RIO DE JANEIRO, 2013
DIOGO FREITAS DA SILVA**

**A IMPORTÂNCIA DOS CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NO SETOR
NAVAL**

**Monografia apresentada como
exigência para conclusão do curso de
Aperfeiçoamento para Oficiais de
Máquinas (APMA) do Centro de
Instrução Almirante Graça Aranha.**

Orientador: Prof. D. Sc. Alexandre Silva Lima

RIO DE JANEIRO, 2013

**A IMPORTÂNCIA DOS CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NO SETOR
NAVAL**

Elaborado por Diogo

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. D. Sc. Alexandre Silva Lima

Nota: _____

1º Examinador: _____

2º Examinador: _____

Rio de Janeiro, 10 de Setembro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha esposa Michelle Barros, mulher forte, meu porto seguro. Obrigado por sempre estar ao meu lado!

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por todas as obras realizadas em minha vida,
Ao meu pai Renato Pimenteira (in memoriam) homem simples e humilde que sempre me ensinou que o estudo, a dedicação e o trabalho são a melhor forma de vencer na vida,

À minha mãe, mulher de fibra, trabalhadora que possui um enorme coração

Ao professor/orientador Alexandre Lima que tem prazer em ensinar seus alunos

Ao professor Osvaldo Souza e Silva, uma pessoa empenhada incessantemente na busca pelo conhecimento e que transmite com tamanha humildade ricas informações aos seus alunos.

Agradecimento especial à minha esposa por todo seu amor, confiança e companheirismo, pelas palavras de motivação nos momentos de fraqueza, pela alegria que transborda do seu coração e pela paz que me transmite.

EPÍGRAFE

“Se te mostrares fraco no dia da angústia, é sinal que a tua força é bem pequena”.

Provérbios 24, 10

RESUMO

A necessidade de aumento de produção e diminuição de custos fez surgir dentro deste cenário à automação. Com isto uma grande infinidade de equipamentos foram desenvolvidos para as mais diversas aplicações e setores industriais, um dos equipamentos mais utilizados nestes processos conjuntamente com o CLP (controlador lógico programável) é o conversor de frequência, um equipamento versátil e dinâmico. Diante da utilização cada vez maior dos conversores de frequência a bordo das embarcações mercantes em função dos seus vários benefícios, este estudo tem por objetivo definir o que são os conversores de frequência, seu princípio de funcionamento, relacionar seus tipos e classificações, estabelecer características, princípios básicos, definir seus componentes como o retificador, circuito intermediário, inversor, circuito de controle e abordar os circuitos equivalentes e soft-starters. A pesquisa busca elucidar como os conversores de frequência são utilizados a bordo como medida de economia em equipamentos e manutenção.

Palavras-chave: Motor trifásico, Retificador, circuito intermediário, inversor de frequência, aplicação a bordo, economia de energia

ABSTRACT

The need to increase production and decrease costs did arise within this scenario automation. With this a great infinity of devices have been developed for various applications and industries, one of the most used equipment in these processes in conjunction with the PLC (programmable logic controller) is the frequency converter, a versatile and dynamic equipment. Given the increasing use of frequency converters on board merchant vessels due to its various benefits, this study aims to define what are the frequency converters, their working principle, relate their types and classifications, establish characteristics, basic principles, set your components as the rectifier, intermediate circuit, inverter, control circuit and approach the equivalent circuits and soft-starters. The research seeks to elucidate how the frequency converters are used on board as an economy measure in equipment and maintenance.

Keywords: Three phase motor, rectifier, intermediate circuit, frequency inverter, the application board, energy saving

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio da Indução Eletromagnética	15
Figura 2 - Tipos de motores CA	15
Figura 3 - Estrutura de um motor assíncrono	16
Figura 4 - Ligação interna de um estator trifásico	17
Figura 5 - Campo magnético rotativo	18
Figura 6 - Rotor Bobinado	20
Figura 7 - Campo girante e motor curto-circuitado.....	20
Figura 8 - Indução nas barras do rotor.....	22
Figura 9 - Torque do motor: “força vezes o braço da alavanca”	24
Figura 10 - Perdas de um motor assíncrono.....	27
Figura 11 - Circuito elétrico equivalente de uma fase	29
Figura 12 - Circuito elétrico equivalente do motor.....	30
Figura 13 - Diagramas equivalentes: a) do motor a vazio e b) do motor com rotor bloqueado	31
Figura 14 - Ligação de partida direta.....	32
Figura 15 - Ligação de partida estrela – triângulo	34
Figura 16 - Ligação de partida com autotransformador	35
Figura 17 - Ligação de partida com Soft-Starter.....	38
Figura 18 - Forma de onda de tensão gerada pelo soft-starter em processo de aceleração.....	38
Figura 19 - Rampa de tensão aplicada ao motor em aceleração.....	39
Figura 20 - Perfil de tensão na desaceleração	39
Figura 21 - Componentes básicos de um conversor de frequência.....	44
Figura 22 - Vários tamanhos de conversores de frequência.....	44
Figura 23 - Formas de ondas. a) monofásica; b) trifásica.....	45
Figura 24 - Retificador não controlado	45
Figura 25 - Sinal de saída de um retificador não controlado.....	46
Figura 26 - Ângulo de disparo do tiristor	47
Figura 27 - Retificador controlado trifásico	47
Figura 28 - Inversor fonte de corrente	48
Figura 29 - Conversor de tensão.....	48
Figura 30 - Filtragem com tensão CC variável	49
Figura 31 - Circuito inversor.....	51
Figura 32 - Inversor para tensão constante ou variável e saída dependente da frequência de chaveamento.....	51
Figura 33 - Modulação por amplitude e por largura de pulso.....	52
Figura 34 - Tensão média da largura de pulso	53
Figura 35 - Curva V/f	54
Figura 36 - Enfraquecimento de campo.....	55
Figura 37 - Torque x Tensão x Fluxo x Potência.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade síncrona e número de pólos.....	19
Tabela 2 - Comparativo entre métodos de partida.....	36

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. MOTOR DE INDUÇÃO.....	14
2.1 PRINCÍPIO DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	14
2.2 PRINCÍPIO DA REVERSIBILIDADE.....	14
2.3 MOTORES ASSÍNCRONOS.....	16
2.3.1 O ESTATOR.....	16
2.3.2 O ROTOR.....	19
2.3.2.1 ROTOR BOBINADO.....	19
2.3.2.2 ROTOR CURTO-CIRCUITADO.....	20
2.3.3 ESCORREGAMENTO DO MOTOR (DESLIZAMENTO).....	22
2.4 PARÂMETROS MECÂNICOS DO MOTOR ASSÍNCRONO.....	23
2.4.1 VELOCIDADE.....	23
2.4.2 TORQUE OU MOMENTO.....	23
2.4.3 POTÊNCIA.....	24
2.5 RENDIMENTO DO MOTOR ASSÍNCRONO.....	26
2.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR ASSÍNCRONO.....	28
2.7 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO MOTOR.....	30
3. TIPOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS.....	32
3.1 PARTIDA DIRETA.....	32
3.2 PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO.....	33
3.3 PARTIDA POR AUTOTRANSFORMADOR.....	35
4. SOFT-STARTERS.....	37
4.1 TIPOS DE CONTROLE DE SOFT-STARTERS.....	40
4.1.1 CONTROLADOR DE TORQUE.....	40
4.1.2 CONTROLADOR DE TENSÃO EM MALHA ABERTA.....	40
4.1.3 CONTROLADOR DE TENSÃO EM MALHA FECHADA.....	41
4.1.4 CONTROLADOR DE CORRENTE EM MALHA FECHADA.....	41
4.2 CONSIDERAÇÕES.....	42
5. CONVERSORES DE FREQUENCIA.....	43
5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	43
5.2 COMPONENTES.....	44

5.2.1 CIRCUITO RETIFICADOR	44
5.2.1.1 RETIFICADOR NÃO CONTROLADO	45
5.2.1.2 RETIFICADOR CONTROLADO	46
5.2.2 CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE FILTRAGEM OU BARRAMENTO DC	47
5.2.2.1 INVERSOR FONTE DE CORRENTE	48
5.2.2.2 INVERSOR FONTE DE TENSÃO	48
5.2.2.3 CIRCUITO DE FILTRAGEM COM TENSÃO CC VARIÁVEL	49
5.2.3 CIRCUITO INVERSOR.....	50
5.2.4 CIRCUITO DE CONTROLE.....	53
5.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	54
5.3.1 CONTROLE ESCALAR	54
5.3.2 CONTROLE VETORIAL	57
5.3.2.1 CONTROLE DE MALHA FECHADA	58
5.3.2.2 CONTROLE DE MALHA ABERTA	58
5.3.2.3 COMPARATIVO ENTRE CONTROLES MALHA ABERTA E FECHADA	58
5.4 INSTALAÇÃO DO CONVERSOR.....	59
5.4.1 PARAMETRIZAÇÃO.....	60
5.4.2 DIMENSIONAMENTO	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
8. ANEXOS.....	64

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da informática, através da funcionalidade que os microprocessadores trouxeram aos vários setores eletroeletrônicos, os conversores de frequência hoje são dotados de poderosas CPU ou placas de controle microprocessadas, que possibilitam uma grande variedade de 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 motores elétricos trifásicos de corrente alternada, substituam servo motores em muitas aplicações.

De acordo com MATHEUS (2007), conversores de frequência ou inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que basicamente convertem a tensão alternada trifásica ou monofásica senoidal em uma tensão contínua de amplitude e frequência constantes e por último converte esta tensão contínua em tensão alternada de amplitude e frequência variáveis. Com auxílio de um circuito de controle é possível, controlar a variação da frequência de saída e por consequência controlar a velocidade de operação dos motores elétricos assíncronos, controlar as funções de proteção do conversor e do motor, trocar dados entre o conversor e os sistemas periféricos.

Os conversores de frequência podem ser utilizados em diversos sistemas de bordo que vão desde acionamento e controle de ventiladores e bombas podendo ser aplicados em motores elétricos de acionamento do eixo propulsor. Os conversores de frequência acionam estes equipamentos quando necessários (em condição de carga ideal para o processo), podendo até pará-los. Deste modo, economizam energia, diminuem custo com manutenção corretiva e aumentam o tempo de vida útil dos equipamentos.

Os conversores de frequência associados a equipamentos mais modernos, tais como: CLP (controladores lógico programáveis), motores elétricos mais eficientes e softwares de gerenciamento de energia estarão equipando a maioria das embarcações de construção recente, por reduzirem a utilização de vários equipamentos elétricos e mecânicos, por proporcionarem o

uso otimizado desses equipamentos, diminuindo custos operacionais e de manutenção desses equipamentos.

Este estudo tem por objetivo esclarecer como um conversor de frequência funciona, onde pode ser aplicado e como este dispositivo pode trazer benefícios para uma embarcação. A pesquisa será bibliográfica com o objetivo descritivo e explicativo, a fim de tornar o tema mais familiar para as pessoas que lidarão com esses equipamentos a bordo: o oficial de máquinas.

2. MOTOR DE INDUÇÃO

Para entender o funcionamento de um conversor de frequência é muito importante entender primeiramente o princípio de funcionamento do motor de indução elétrica, portanto será feita uma explanação dos fundamentos deste tipo de máquina elétrica. Tais fundamentos virão a justificar efeitos, possibilidades e restrições no uso dos conversores elétricos.

2.1 PRINCÍPIO DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

O princípio da indução eletromagnética é que se um condutor é movimentado através de um campo magnético (B), uma tensão é induzida. Se o condutor é um circuito fechado, uma corrente (I) irá circular. Quando o condutor é movimentado, uma força (F), que é perpendicular ao campo magnético, irá agir sobre o condutor.

2.2 PRINCÍPIO DA REVERSIBILIDADE

De acordo com o princípio da reversibilidade, da mesma forma que uma tensão induzida surgirá do movimento relativo entre um condutor e um campo magnético, uma força eletromagnética existirá entre um condutor e um campo sempre que o condutor percorrido por uma corrente estiver localizado no campo magnético. Assim, faz-se entender que máquina elétrica é um conversor eletromecânico que recebendo energia na forma elétrica tem condições de convertê-la na forma mecânica (motor), ou recebendo energia na forma mecânica tem condições de convertê-la na forma elétrica (gerador).

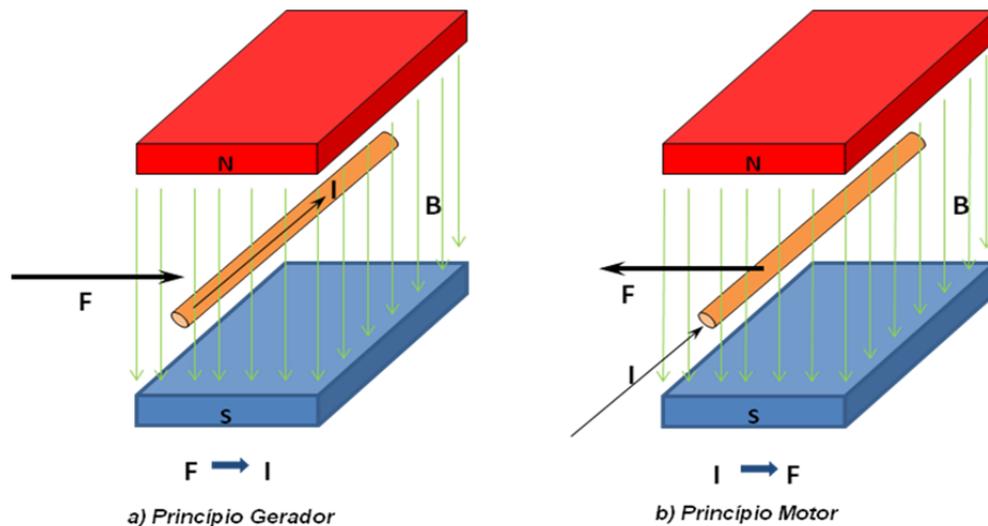


Figura 1 - Princípio da Indução Eletromagnética
Fonte: Internet

No princípio do motor, o campo magnético e o condutor, percorrido por uma corrente, geram o movimento.

O campo magnético é gerado na parte estacionária (o estator) e os condutores, que são influenciados pelas forças eletromagnéticas, estão na parte girante (o rotor). Motores de corrente alternada trifásicos podem ser divididos em dois grupos principais: assíncronos e síncronos. O estator funciona basicamente da mesma maneira nos dois tipos de motores, mas o projeto e o movimento do rotor em relação ao campo magnético é diferente. Nos síncronos (que significa simultâneo ou o mesmo) a velocidade do rotor e do campo magnético são as mesmas e no assíncrono são diferentes.

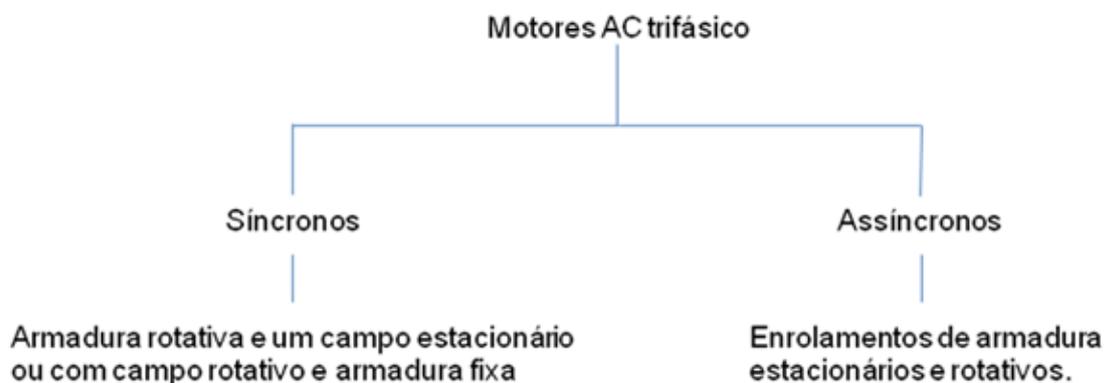


Figura 2 - Tipos de motores CA
Fonte: Internet

2.3 MOTORES ASSÍNCRONOS

O motor assíncrono de CA é o mais empregado por ser de construção simples, forte e de baixo custo. O rotor desse tipo de motor possui uma parte auto-suficiente que não necessita de conexões externas. Em termos mecânicos eles são virtualmente unidades padrão, de forma que fornecedores estão sempre disponíveis. Existem vários tipos de motor assíncrono, mas todos eles seguem o mesmo princípio básico. O índice de utilização dos motores assíncronos na indústria em relação ao uso do motor síncrono é de mais de 90%.

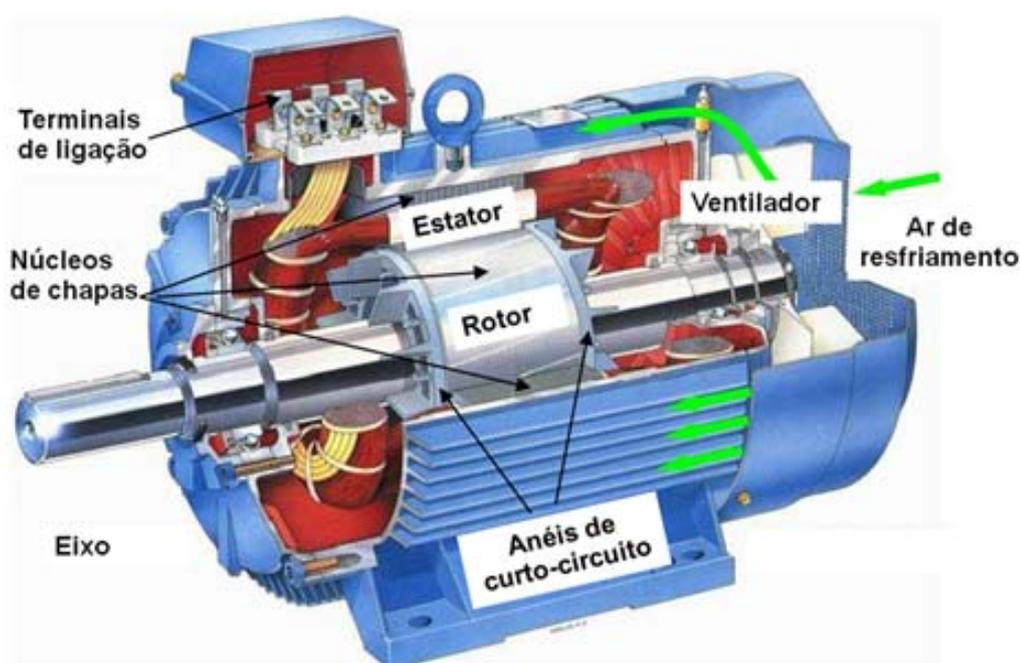


Figura 3 - Estrutura de um motor assíncrono
Fonte: Internet

2.3.1 O ESTATOR

O estator é a parte fixa do motor. Na carcaça do motor existe um núcleo de ferro formado por folhas finas de ferro (0,3 a 0,5mm). Essas folhas de ferro possuem ranhuras para o enrolamento trifásico.

Os enrolamentos de fase e o núcleo do estator geram o campo magnético. O número de par de pólos (ou pólos) determinam a velocidade que o campo magnético irá girar. Se o motor está ligado na sua frequência nominal, a velocidade do campo magnético é chamada de velocidade síncrona do motor (n_0).

No estator do motor assíncrono de CA estão alojados três enrolamentos referentes às três fases. Estes três enrolamentos estão montados com uma defasagem de 120° .

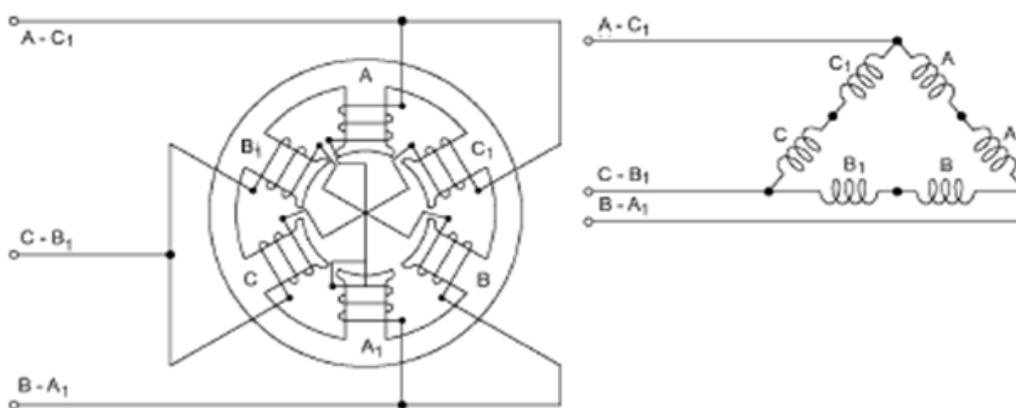


Figura 4 - Ligação interna de um estator trifásico
Fonte: Internet

O campo magnético gerado por uma bobina depende da corrente que no momento circula por ela. Se a corrente for nula, não haverá formação de campo magnético; se ela for máxima, o campo magnético também será máximo.

Como as correntes nos três enrolamentos estão com uma defasagem de 120° , os três campos magnéticos apresentam também a mesma defasagem.

Os três campos magnéticos individuais combinam-se e disso resulta um campo único cuja posição varia com o tempo. Esse campo único, giratório é que vai agir sobre o rotor e provocar seu movimento. A próxima figura mostra como agem as três correntes para produzir o campo magnético rotativo num motor trifásico.

Na figura 5 podemos observar que no instante 1, o valor da corrente A é nulo e, portanto, não há formação de campo magnético. Isto é representado pelo 0 (zero) colocado no pólo do estator.

As correntes B e C possuem valores iguais, porém sentidos opostos.

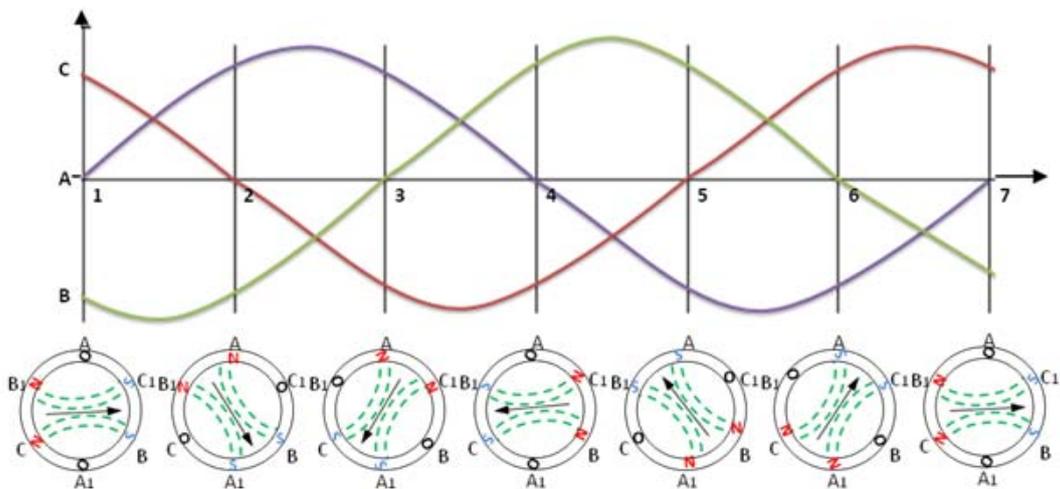


Figura 5 - Campo magnético rotativo
Fonte: Internet

Como resultante, forma-se no estator, no instante 1, um campo único direcionado no sentido Norte (N) Sul (S).

No instante 2, os valores das correntes se alteram. O valor de C é nulo. A e B têm valores iguais, mas A é positivo e B é negativo.

Quando um momento intermediário é analisado, por exemplo entre os instantes 1 e 2, vemos que nesse instante as correntes C e A têm valores iguais e o mesmo sentido positivo. A corrente B, por sua vez, tem valor máximo e sentido negativo. Como resultado, a direção do campo fica numa posição intermediária entre as posições dos momentos 1 e 2. A amplitude do campo girante é constante e igual a 1,5 vezes o valor máximo dos campos alternados.

O campo resultante se desloca em 60° em relação à sua posição anterior. O campo magnético resultante tem um comportamento girante visto que todas as fases alternam entre pólos sul e norte seqüencialmente com velocidade síncrona dada por:

$$N_s = \frac{120f}{P} \text{ RPM}$$

Equação 1

f é a frequência do sinal de alimentação;

P é o número de pólos da máquina de indução.

Supondo a frequência igual a 60Hz temos os seguintes dados:

Par de Pólos	1	2	3	4	6
Número de Pólos	2	4	6	8	12
Velocidade Síncrona	3600	1800	1200	900	600

Tabela 1 - Velocidade síncrona e número de pólos

2.3.2 O ROTOR

Assim como o estator o rotor é feito de folhas de ferro com abertura entre elas. Existem dois tipos principais de rotor: o rotor bobinado e o rotor curto-circuitado (ou rotor em gaiola de esquilo).

2.3.2.1 ROTOR BOBINADO

Rotores bobinados, assim como os estatores, possuem três enrolamentos, um para cada fase, defasados de 120° e seus terminais são ligados a anéis coletores nos quais, através das escovas se tem acesso ao enrolamento.

O motor de indução com rotor bobinado em geral é utilizado para partir cargas de alta inércia ou que exijam conjugados de partida elevados, ou ainda, quando o sistema de acionamento requer partidas suaves. O rotor é constituído por um núcleo de chapas de aço silício, isoladas entre si, sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento. Os terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento são ligados a anéis coletores e estes são ligados a um reostato constituído por resistências variáveis cuja função é a de reduzir as correntes elevadas de arranque, no caso de motores de elevada potência, conseguindo uma partida mais suave.

Deve-se lembrar porém, que o motor do rotor bobinado é mais caro que os outros devido ao elevado custo de seus enrolamentos e ao sistema de conexão das bobinas do rotor, tais como: anéis, escovas, porta-escovas e reostato.

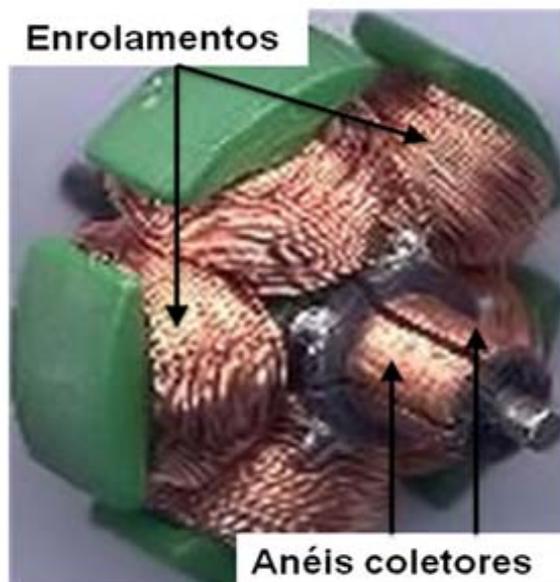


Figura 6 - Rotor Bobinado
Fonte: Internet

2.3.2.2 ROTOR CURTO-CIRCUITADO

O rotor curto-circuitado ou em gaiola de esquilos é o mais usado dos dois.

O motor com rotor curto-circuitado tem um rotor constituído por barras de cobre ou de alumínio colocadas nas ranhuras do rotor. As extremidades são unidas por um anel também de cobre ou de alumínio, como representado na figura acima, daí a denominação gaiola de esquilo.

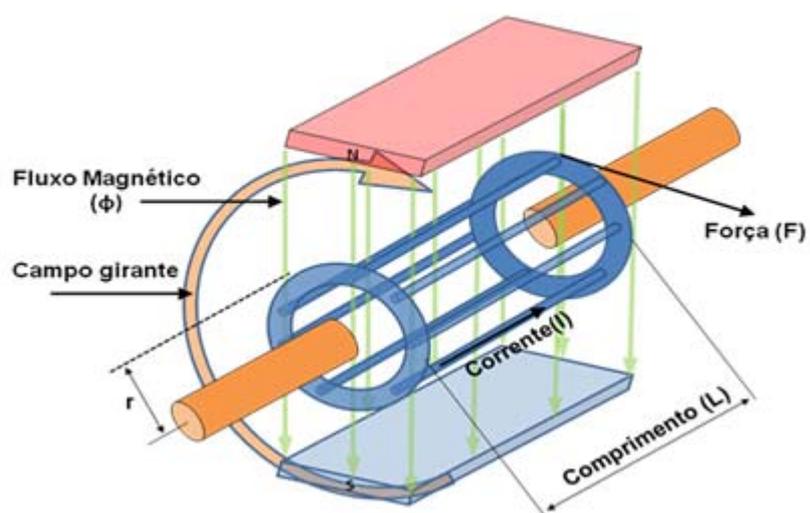


Figura 7 - Campo girante e motor curto-circuitado
Fonte: Monografia APMA 2008

No funcionamento do motor com rotor em gaiola de esquilo, o rotor, formado por condutores de cobre é submetido ao campo magnético giratório, já explicado anteriormente. Como consequência, nesses condutores (barras da gaiola de esquilo) circulam correntes induzidas, devido ao movimento do campo magnético.

Segundo a lei de Lenz, as correntes induzidas tendem a se opor às variações do campo original. Por esse motivo, as correntes induzidas que circulam nos condutores formam um campo magnético de oposição ao campo girante. O campo magnético do pólo induz uma corrente (I) no rotor que é afetada apenas pela força (F).

A força é determinada pela densidade de fluxo (B), a corrente induzida (I), o tamanho do rotor (L) e o ângulo (θ) entre a força e a densidade de fluxo.

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen}(\theta)$$

Equação 2

Se assumirmos que (θ) vale 90° :

$$F = B \cdot I \cdot L$$

Equação 3

Como o rotor é suspenso por mancais no centro do estator, ele girará juntamente com o campo girante e tenderá a acompanhá-lo com a mesma velocidade. Contudo, isso não acontece, pois o rotor permanece em velocidade menor que a do campo girante.

Se o rotor alcançasse a velocidade do campo magnético do estator, não haveria sobre ele tensão induzida, o que o levaria a parar.

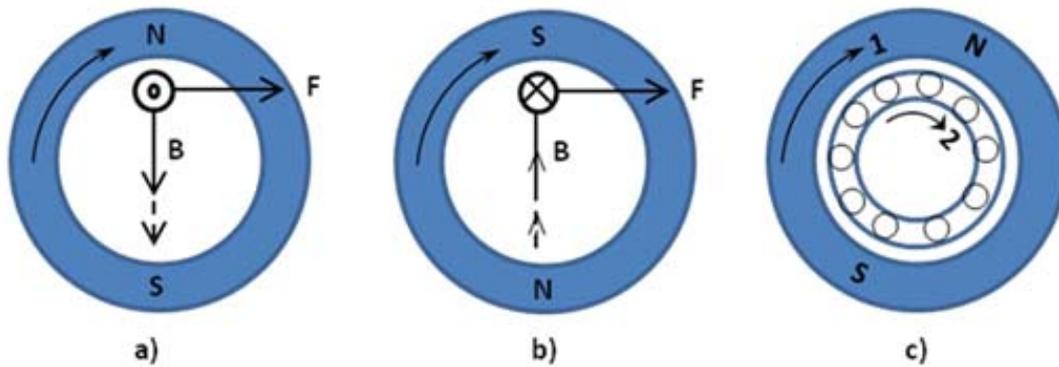


Figura 8 - Indução nas barras do rotor
Fonte: Internet

2.3.3 ESCORREGAMENTO DO MOTOR (DESLIZAMENTO)

Na verdade, é a diferença entre as velocidades do campo magnético do rotor e a do campo do estator que movimenta o rotor. Essa diferença recebe o nome de escorregamento ou deslizamento do motor e é dada percentualmente por:

$$S = \frac{N_s - n}{N_s} \cdot 100$$

Equação 4

Onde:

- N_s é a velocidade de sincronismo,
- n é a velocidade real do rotor.

O escorregamento é normalmente expresso como uma porcentagem da velocidade síncrona e normalmente está entre 4 e 11% da velocidade nominal.

2.4 PARÂMETROS MECÂNICOS DO MOTOR ASSÍNCRONO

Para usar uma máquina elétrica, é necessário conhecer, além de suas propriedades elétricas, seus parâmetros mecânicos, tais como a velocidade, o torque e a potência mecânica.

2.4.1 VELOCIDADE

A velocidade de uma máquina é igual ao número de revoluções do rotor em um determinado tempo e que se mede em revoluções por minuto, e normalmente é apresentada com a letra n , e a unidade é rotações por minuto (RPM).

2.4.2 TORQUE OU MOMENTO

Torque (M) (ou momento) é a força (F) atuando sobre um corpo e causando seu movimento através de uma distância (s) e é dado em Newtons-metro (Nm).

Mesmo que esse corpo não gire, o torque existe como produto daquela força pela distância radial em relação ao centro do eixo da rotação, ou seja, torque é o produto da força pelo comprimento do braço da alavanca. Matematicamente, isso significa:

$$M = F \cdot s$$

Equação 4

Onde:

M é o torque ou momento em Newtons - metro;

F é a força em Newtons;

s é o comprimento em metros.

Como foi representado na figura 7, os condutores do rotor que estão submetidos ao campo magnético são submetidos a uma força. Essa força é aplicada ao condutor a uma distância (r) do eixo do rotor.

Por analogia matemática aplica-se a equação de torque ao motor elétrico onde o raio (r) é a distância de deslocamento. Assim, obtêm-se:

$$M = F \cdot r$$

Equação 5

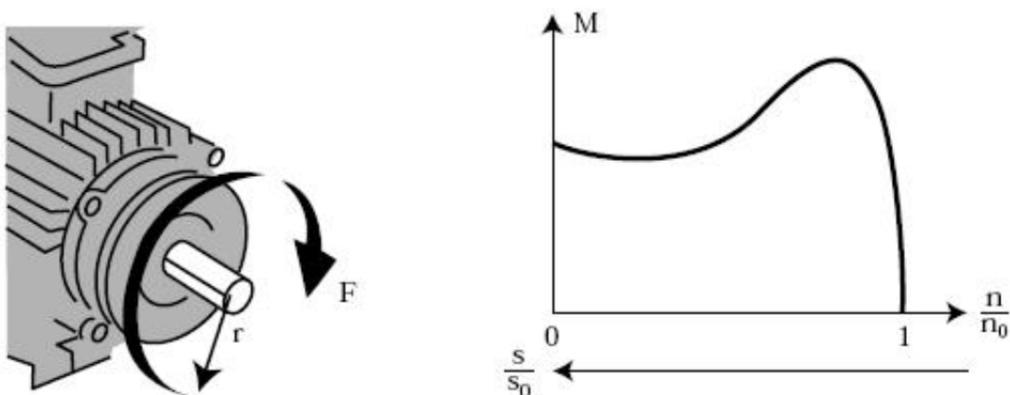


Figura 9 - Torque do motor: “força vezes o braço da alavanca”
Fonte: Internet

Na partida, a rotação é zero e o torque, que atua sobre o eixo nesse instante, é chamado de torque de arranque. A relação entre o torque do motor e a sua velocidade tem uma característica que varia com a construção do rotor. O torque do motor resulta numa força que faz girar o seu eixo.

2.4.3 POTÊNCIA

Por definição a potência (P) de uma máquina é dada pela quantidade de trabalho realizado pela máquina em unidade de tempo, e o trabalho (W) pode ser determinado pelo torque em função do deslocamento que esse torque produz. Portanto, o trabalho realizado pelo motor é dado por:

$$P = W \cdot t$$

Equação 6

e,

$$W = M \cdot d$$

Equação 7

Onde;

P é a potência no eixo do rotor

W é o trabalho em Watts

M é o torque em Newton-metro

d é o deslocamento em metro

t é o tempo em segundos

Como o deslocamento é o giro que o rotor dá em seu proprio eixo, então o deslocamento (d) pode ser escrito como:

$$d = n \cdot 2\pi r$$

Equação 8

Onde;

n é o número de revoluções do rotor

r é o raio do rotor.

Desenvolvendo a equação 5 com base nas equações 6, 7 e 8, obtém-se:

$$M = F \cdot d = \frac{W}{d} \cdot r = \frac{P \cdot t \cdot r}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}$$

; t = 60s

$$M = \frac{P \cdot 9,550}{n}$$

Equação 9

Essa equação mostra a relação entre a velocidade do motor, torque (Nm) e potência (W). A fórmula dá uma visão rápida quando observamos n , M e P em relação aos valores correspondentes num ponto de operação (n_r , M_r , P_r).

Existem alguns pontos importantes na região de trabalho do motor:

- C_p é o torque de partida – aparece quando é aplicado aos terminais do motor tensão e frequência nominal, quando o motor ainda está estacionário.
- $C_{m\acute{a}x}$ é o torque máximo – é o maior torque que o motor é capaz de fornecer

enquanto a tensão e a frequência nominal são aplicadas.

- C_n é o torque nominal. Os valores nominais indicam o ponto de operação ótimo do motor para uma conexão direta à rede de alimentação. Eles podem ser lidos na placa do motor e são também conhecidos como dados de placa do motor.

2.5 RENDIMENTO DO MOTOR ASSÍNCRONO

Comercialmente, os fabricantes especificam a potência nominal desenvolvida por estas máquinas, sendo esta a mesma disponibilizada em seu eixo motor e diferente daquela entregue pela rede, também conhecida como potência aparente (P_a). Para uma máquina trifásica, a potência pode ser relacionada à tensão aplicada em seus terminais e a corrente solicitada pelo motor, conforme mostra a equação seguinte:

$$P_a = \sqrt{3} V \cdot I$$

Equação 10

Onde;

P_a é a potência aparente em Volt-Ampére (VA)

V é a tensão da rede de alimentação em Volts (V)

I é a corrente da rede fornecida ao motor em Ampére (A)

Porém, só uma parte desta potência pode ser convertida em potência ativa de acordo com o fator de potência do motor dado por $\cos(\theta)$, assim:

$$P = P_a \cdot \cos(\theta)$$

Equação 11

A relação entre a potência de saída e a potência de entrada é dada por η . A eficiência típica de um motor de indução está entre 0,7 e 0,95, dependendo do tamanho do motor e do número de pólos.

Há muitas perdas a serem consideradas até chegarmos à potência nominal especificada pelo fabricante.

Existem quatro principais causas de perdas no motor de indução:

1. perdas no enrolamento estatórico (perdas no cobre):

As perdas no cobre ocorrem devido à resistência ôhmica dos enrolamentos do estator e do rotor;

2. perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro):

As perdas no ferro são devidas às perdas por histerese e por correntes de Foucault;

3. perdas por atrito:

As perdas por atrito são devidas aos rolamentos;

4. perdas na ventilação:

As perdas na ventilação são devidas à resistência do ar no ventilador do motor.

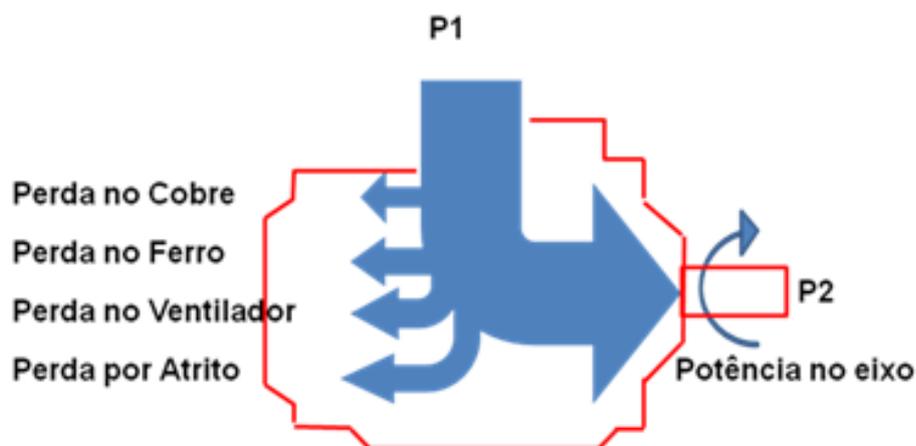


Figura 10 - Perdas de um motor assíncrono
 Fonte: Internet

2.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR ASSÍNCRONO

Os motores elétricos são projetados para trabalharem em condições constantes de tensão e frequência e, a magnetização do motor depende da relação entre a tensão e a frequência.

Quando a relação tensão/frequência aumenta, o motor fica sobre magnetizado, se esta relação diminui, o motor fica sub magnetizado.

O campo magnético de um motor sub magnetizado fica enfraquecido e a capacidade de fornecimento de torque diminui, possivelmente levando a uma condição em que o motor não conseguirá partir, ou então, o tempo de partida será elevado, expondo o motor a uma condição de sobrecarga.

Já um motor sobre magnetizado estará em condição de sobrecarga durante a operação. A potência dessa magnetização extra é convertida em calor no motor e poderá danificar o seu isolamento. Entretanto, motores CA, em particular, os assíncronos são muito robustos e o problema de magnetização só irá danificar o motor se ela ocorrer em operação contínua.

Os motores assíncronos são, normalmente, construídos com seis bobinas: três no estator e três no rotor curto-circuitado. Fazendo análise do conjunto de bobinas pode-se estudá-lo como um diagrama elétrico, que representará suas características em regime de trabalho.

Analisando apenas uma bobina do estator e uma bobina do rotor quando estas estão em condição de influência, teremos um circuito elétrico equivalente, a seguir:

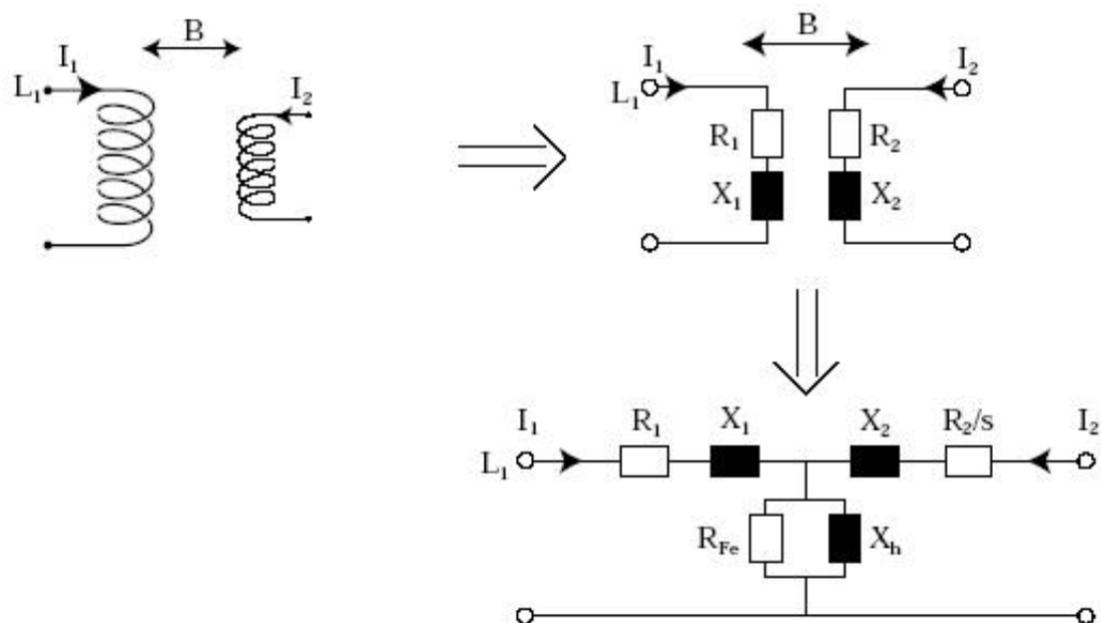


Figura 11 - Circuito elétrico equivalente de uma fase
Fonte: Monografia APMA 2008

A corrente da bobina do estator não é limitada apenas pela resistência ôhmica da bobina. Quando esta é ligada a uma fonte CA, outra resistência aparece. Esta resistência é denominada reatância medida em ohms (Ω).

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Equação 12

Onde:

X_L é a reatância medida em ohms (Ω).

$2 \cdot \pi \cdot f$ é a freqüência angular ω medida em 1/s.

L é a indutância da bobina medida em Henry (H).

A corrente efetiva é então limitada com dependência da freqüência.

As bobinas se influenciam mutuamente através do campo magnético (B). Ao mesmo tempo em que a bobina do rotor induz uma corrente na bobina do estator, também a bobina do estator induz uma corrente na bobina do rotor. Essa influência mútua indica que os dois circuitos elétricos podem ser conectados através de uma ligação comum formada por R_{Fe} e X_h – a contra resistência e a contra reatância.

A corrente que o motor drena para magnetização do estator e do rotor fluem através deles. A queda de tensão no “ramo comum” é chamada de tensão induzida (U_q).

2.7 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO MOTOR

Se o motor trabalha na sua faixa de operação normal, a frequência do rotor é menor que a frequência do campo girante e X_2 é reduzido pelo fator de escorregamento (S).

No circuito equivalente, o efeito é descrito através da mudança da resistência rotórica R_2 por um fator $(\frac{1}{S})$.

$(\frac{R_2}{S})$ pode ser escrito como $R_2 + R_2 \cdot (\frac{1-S}{S})$, onde $R_2 \cdot (\frac{1-S}{S})$ é a carga mecânica sobre o motor.

Os valores R_2 e X_2 representam o rotor. R_2 é a causa das perdas por temperatura do rotor quando o motor está operando.

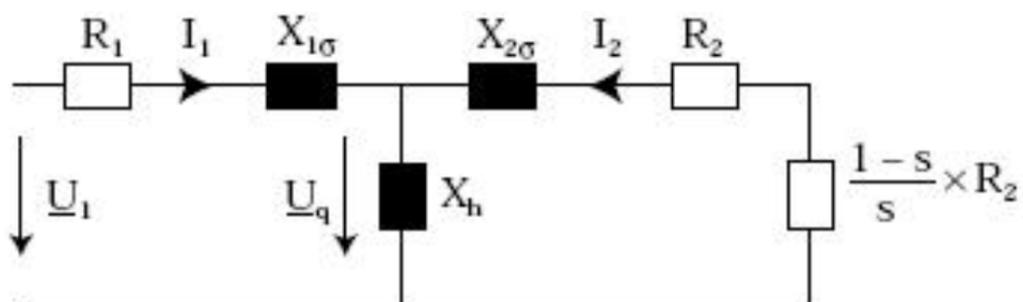


Figura 12 - Circuito elétrico equivalente do motor
Fonte: Monografia APMA 2008

O escorregamento (S) tende a zero quando o motor está a vazio. Isso significa que $R_2 \cdot (\frac{1-S}{S})$ aumenta, e por consequência, virtualmente, nenhuma corrente iria passar pelo rotor. Idealmente, essa é a situação em que a resistência (representado a carga mecânica) é removida do circuito elétrico equivalente.

Quando colocamos carga no motor, o escorregamento aumenta, reduzindo $R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)$. A corrente (I_2) no rotor também aumenta quando a carga é aumentada.

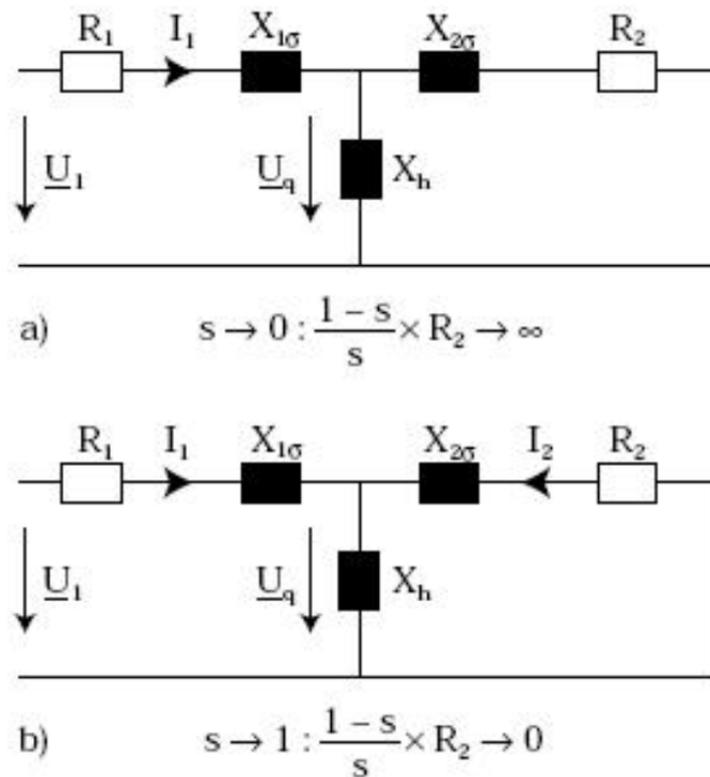


Figura 13 - Diagramas equivalentes: a) do motor a vazio e b) do motor com rotor bloqueado

Fonte: Monografia APMA 2008

O circuito equivalente pode ser levado em consideração para descrever as condições de trabalho de um motor elétrico.

É muito importante não assumir, de maneira errada, a tensão de magnetização (U_q) como sendo a mesma tensão nos terminais de alimentação (U_1). Isso acontece porque o diagrama elétrico equivalente é simplificado, só para facilitar o entendimento das diferentes condições de trabalho do motor. Contudo, deve-se lembrar que a tensão induzida tem seu valor próximo ao da tensão terminal apenas quando o motor está a vazio, sem carga. Porém, se a carga aumenta então I_2 e I_1 , também aumentam e a queda de tensão deve então ser levada em consideração, principalmente quando o motor é controlado por um inversor de frequência.

3. TIPOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

Os métodos de partida dos motores trifásicos serão analisados a fim de adquirir base comparativa para avaliação das vantagens da aplicação dos conversores de frequência.

3.1 PARTIDA DIRETA

É o modo de partida mais simples, com o estator ligado diretamente à rede. O motor parte com as suas características naturais.

Este tipo de partida não é utilizado em motores de grande porte por exigir uma corrente de partida muito alta, o que causaria uma elevada queda de tensão na rede de alimentação.

Principais características:

Destina-se a máquinas que partem em vazio ou com carga;

Partidas normais (< 10s). Para partidas prolongadas, deve-se ajustar as especificações do contator, relé de sobrecarga, condutores, etc;

Relé de sobrecarga: ajustar para a corrente de serviço (nominal do motor);

Frequência de manobras: média 15 manobras/hora.

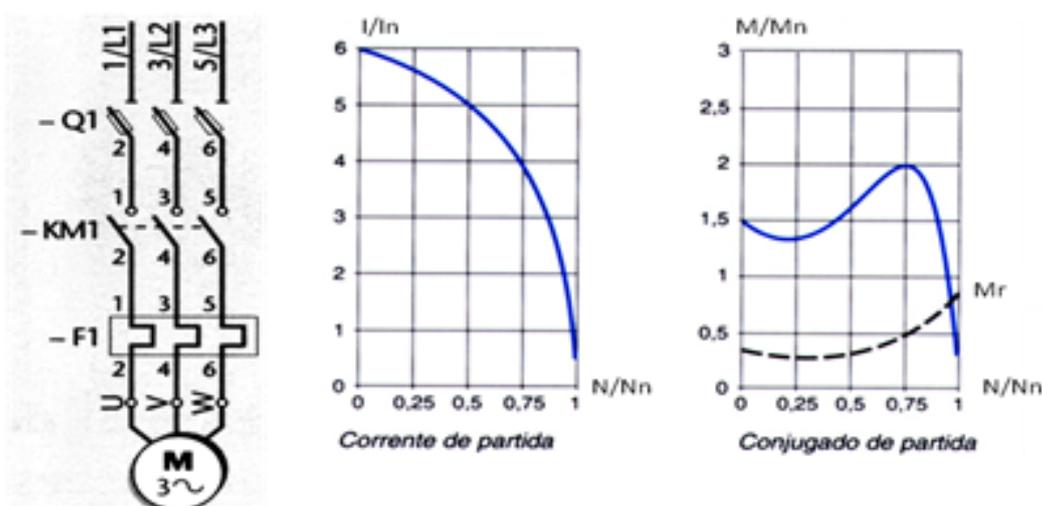


Figura 14 - Ligação de partida direta
Fonte: Internet

Vantagens:

Menor custo

Muito simples de implementar

Alto torque de partida

Desvantagens:

Alta corrente de partida, provocando queda de tensão na rede de alimentação (interferência em equipamentos ligados na mesma instalação)

É necessário sobredimensionar cabos e contatores

Limitação do número de manobras/hora

3.2 PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

Este processo de partida só pode ser utilizado num motor em que as duas extremidades de cada um dos três enrolamentos estatóricos estejam ligadas à placa de terminais. Consiste na alimentação do motor com redução de tensão na partida.

Este processo de partida só pode ser utilizado em motores que possuam ligação em dupla tensão (por exemplo 380/220V).

A menor tensão deverá ser igual a tensão de rede e a outra $1,73 (\sqrt{3})$ vezes maior. Esta partida é implementada com dois contatores, proporcionando na partida ligação estrela no motor (maior tensão, com redução da corrente de partida) e após a partida ligação em triângulo (tensão nominal).

Principais características:

Partidas normais (< 15s). Para partidas prolongadas (pesadas), deve-se ajustar as especificações do contator, relé de sobrecarga, condutores, etc.

Relé de sobrecarga: ajustar para 0,58 vezes a corrente de serviço (nominal do motor);

Relé de tempo: ajustar a um tempo de aceleração à aproximadamente 90% da rotação nominal;

Frequência de manobras: média de 15 manobras/hora.

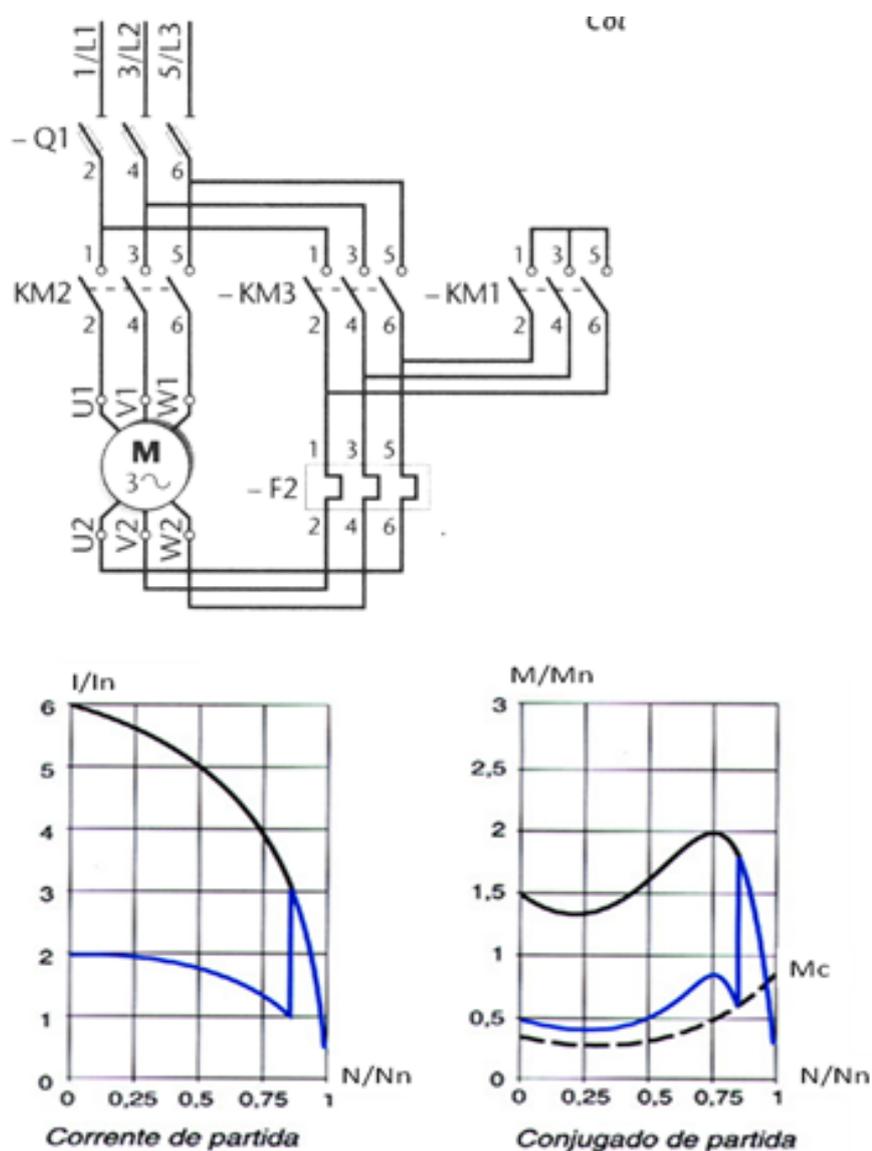


Figura 15 - Ligação de partida estrela – triângulo
Fonte: Internet

Vantagens:

Custo reduzido;

A corrente de partida é reduzida a 1/3 quando comparada com a partida direta;

Não existe limitação do número de manobras/hora.

Desvantagens:

Redução do torque de partida a aproximadamente 1/3 do nominal;

São necessários motores para duas tensões com seis bornes acessíveis;

Caso o motor não atinja pelo menos 90% da velocidade nominal, o pico de corrente na comutação estrela para triângulo é equivalente ao da partida direta;

Em casos de grande distância entre motor e chave de partida, o custo é elevado devido a necessidade de seis cabos.

3.3 PARTIDA POR AUTOTRANSFORMADOR

O motor é alimentado com tensão reduzida através de um autotransformador, que é desligado do circuito no final da partida.

Principais características:

Destina-se a máquinas de grande porte, que partem com aproximadamente metade da carga nominal (conjugado resistente de partida próximo da metade do conjugado nominal do motor), tais como: calandras, mardetes, compressores, etc;

Partidas normais (< 20s). Para partidas prolongadas, deve-se ajustar as especificações do contator, relé de sobrecarga, condutores, etc;

Autotransformador (com proteção térmica): taps de 65 a 80%;

Relé de sobrecarga: ajustar para a corrente de serviço (nominal do motor);

Relé de tempo: ajustar a um tempo de aceleração à aproximadamente 90% da rotação nominal;

Frequência de manobras: média de 10 à 15 manobras/hora.

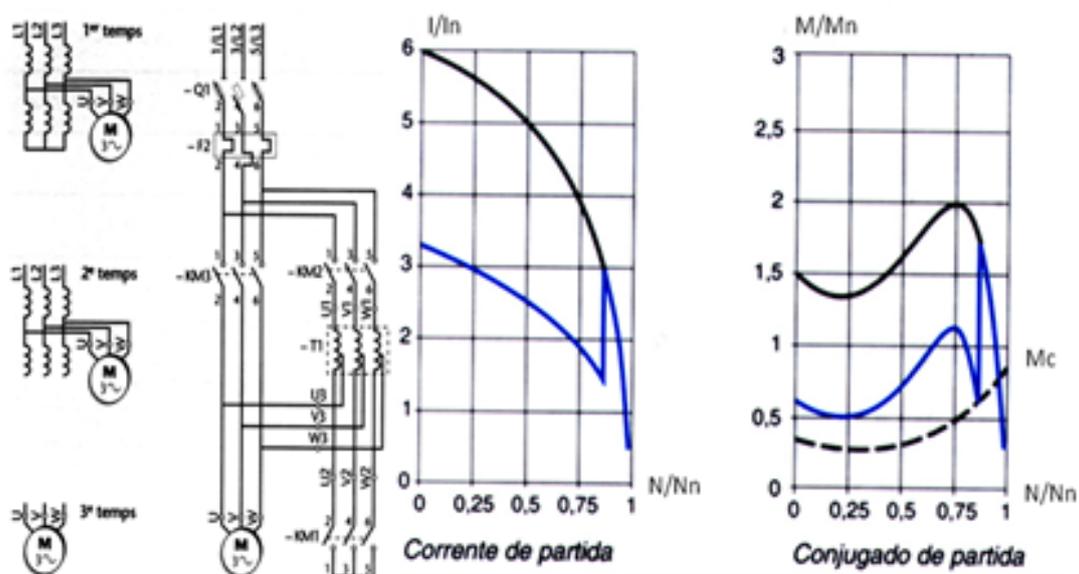


Figura 16 - Ligação de partida com autotransformador
Fonte: Internet

Vantagens:

Pode ser usada para partida de motores sob carga;

Proporciona um conjugado de partida ajustável às necessidades da carga;

A corrente de partida é reduzida (proporcional a I²):

TAP 65% de Un: redução para 42% do seu valor de partida direta

TAP 80% de Un: redução para 64% do seu valor de partida direta

Desvantagens:

Custo maior que a estrela-triângulo, além da construção mais volumosa, necessitando de quadros maiores;

Frequência de manobras limitada.

Na tabela a seguir é feito um comparativo entre os métodos de partida de motores assíncronos comentados acima.

QUADRO COMPARATIVO

<u>Tipo de chave</u>	<u>Tensão</u>	<u>Corrente Partida</u>	<u>Torque</u>	<u>Partida</u>
Direta	100%	I _p	M _p	A plena carga
Estrela-triângulo	58%	I _p x 0,33	M _p x 0,33	A vazio*
Compensadora	80%	I _p x 0,64	M _p x 0,64	Com carga
	65%	TAP 80% TAP 80% I _p x 0,42	M _p x 0,42	
		TAP 65% TAP 65%		

* ex: bombas e ventiladores com registro fechado, correias transp. sem carga, compressores com válvula fechada, etc.

Tabela 2 - Comparativo entre métodos de partida

Todos os métodos de partida vistos anteriormente conseguem uma redução na tensão, torque e corrente de partida, porém a comutação é por degraus de tensão. Onde essa variação de tensão ocorre em valores fixos.

4. SOFT-STARTERS

O Soft-Starter é uma aplicação de conversor de frequência com a finalidade de controlar a partida de motores elétricos de corrente alternada. É um equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como no momento da frenagem. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência e dos controladores eletrônicos foi percebido que seria possível otimizar o método de partida de motores assíncronos. Assim, o soft-starter surge como uma opção de método de acionamento estático de motores de indução, a partida se dá de modo suave, daí o seu nome em inglês.

Seu princípio de funcionamento baseia-se em componentes estáticos, os tiristores. As características de tensão, corrente e torques máximos formam um conjunto que limita o número de partidas com tensão reduzida de um motor.

A corrente de partida pode ser reduzida até o ponto onde o torque de partida seja maior do que o torque exigido pela carga a ser acionada por este motor. Abaixo desse ponto o motor elétrico não conseguirá mais acelerar a carga até sua velocidade nominal.

A alimentação do motor, quando é colocado em funcionamento, é feita por aumento progressivo da tensão (uma rampa de tensão), o que permite uma partida sem golpes e reduz o pico de corrente. Um dispositivo eletrônico é responsável em controlar a tensão aplicada ao motor, ajustando-se o ângulo de disparo de um par de tiristores em antiparalelo em cada fase da fonte, ou seja, servem para acelerar/desacelerar a velocidade dos motores na partida. Pelo ajuste correto das variáveis de controle, o torque do motor e a corrente são idealmente ajustadas às necessidades da carga.

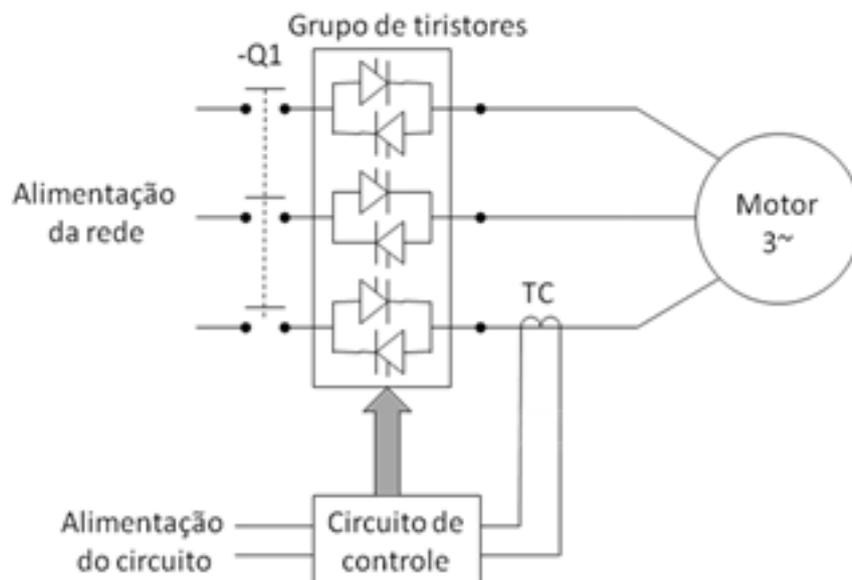


Figura 17 - Ligação de partida com Soft-Starter
Fonte: Monografia APMA 2008

No início da partida do motor, o chaveamento dos tiristores para controlar uma partida linearizada gera um sinal de alimentação na forma apresentada abaixo.

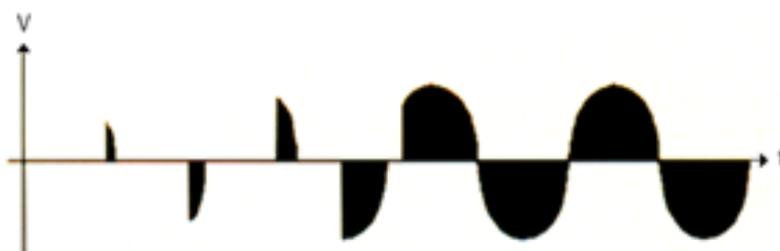


Figura 18 - Forma de onda de tensão gerada pelo soft-starter em processo de aceleração
Fonte: Monografia APMA 2008

Na medida em que a tensão vai aumentando num período ajustável de tempo, a corrente aumenta para acelerar a carga de uma maneira suave e sem degraus.

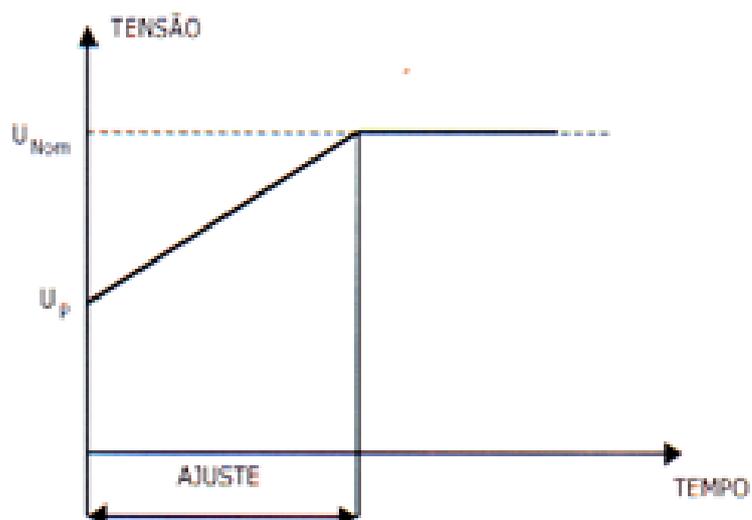


Figura 19 - Rampa de tensão aplicada ao motor em aceleração
Fonte: Monografia APMA 2008

Há dois métodos para parada do motor:

Por inércia: tensão vai à zero de modo instantâneo, implicando que o motor não produza nenhum conjugado na carga, que por sua vez vai perdendo velocidade até parar.

Controlada: soft-starter vai gradualmente reduzindo a tensão de saída até um valor mínimo de tempo pré-definido.

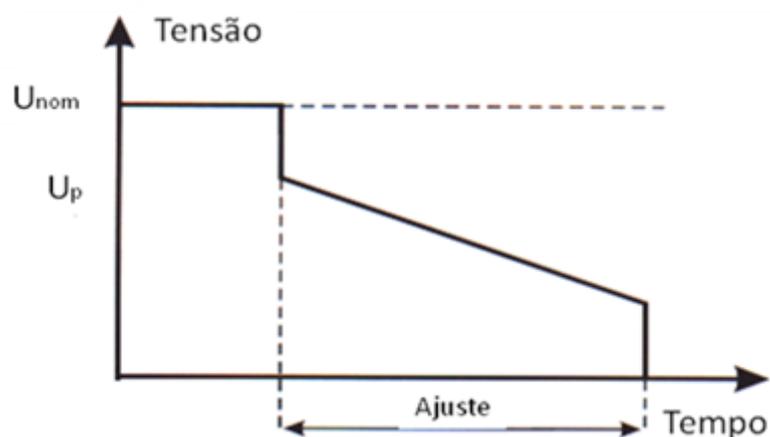


Figura 20 - Perfil de tensão na desaceleração
Fonte: Monografia APMA 2008

Com a redução da tensão aplicada ao motor, o conjugado diminui e aumenta o escorregamento por consequência o motor irá perder velocidade causando a diminuição na velocidade da carga que estiver sido acionada pelo motor.

4.1 TIPOS DE CONTROLE DE SOFT-STARTERS

Para cada aplicação e tipo de motor elétrico existe a forma mais adequada de se realizar o controle do processo de partida deste motor. Assim, os soft-starters podem ser divididos de acordo com a sua estratégia de controle, como:

4.1.1 CONTROLADOR DE TORQUE

Controladores de torque promovem apenas a redução do torque de partida. Dependendo do tipo, eles podem controlar apenas uma ou duas fases. Como consequência não existe controle sobre a corrente de partida como é conseguido com os tipos mais modernos de soft-starters.

Controladores de torque com apenas uma fase devem ser utilizados com contator e rele de sobrecarga. Eles são apropriados para aplicações pequenas. O controle trifásico deve ser usado para partidas frequentes ou com cargas de alta inércia pois os controladores monofásicos causam um aquecimento extra na partida. Isso acontece pois a tensão nas bobinas que não são controladas ficam sob a tensão nominal. Essa corrente circula por um período maior do que durante uma partida direta resultando num sobre aquecimento do motor.

Controladores com duas fases devem ser usados com um rele de sobrecarga mas podem parar e partir o motor sem um contator, entretanto a tensão continua presente no motor mesmo que ele não esteja rodando. Se instalado dessa maneira é importante assegurar medidas de segurança.

4.1.2 CONTROLADOR DE TENSÃO EM MALHA ABERTA

Controladores de tensão em malha aberta controlam todas as três fases e tem todos os benefícios fornecidos pelos soft-starters. Esses sistemas controlam a tensão aplicada no motor de maneira pré configurada e não tem nenhuma realimentação de corrente. A performance da partida é conseguida configurando-se parâmetros como tensão inicial, tempo de rampa e tempo de rampa duplo. A parada suave também está disponível.

Controladores de tensão em malha aberta também devem ser usados com relés de sobrecarga e com contatores se requerido. Dessa forma são componentes que devem estar agregados a outros componentes para formar um sistema de partida do motor.

4.1.3 CONTROLADOR DE TENSÃO EM MALHA FECHADA

Controladores de tensão em malha fechada são uma variante do sistema de malha aberta. Eles recebem realimentação da corrente de partida do motor e usam essa informação para cessar a rampa de partida do motor quando a corrente de limite configurada pelo usuário é atingida. O usuário tem as mesmas configurações do sistema de malha aberta com a adição do limite de corrente.

A informação da corrente do motor também é normalmente utilizada para fornecer um variedade de proteções baseadas na corrente. Essas funções incluem, sobrecarga, desbalanceamento de fases, sub corrente, etc. Esses são sistemas completos de partida fornecendo ambos, controle sobre a partida/parada e proteções para o motor.

4.1.4 CONTROLADOR DE CORRENTE EM MALHA FECHADA

Controladores de corrente em malha fechada é o mais avançado de todos. Diferentemente do sistema de tensão em malha fechada eles usam a corrente como referência principal. As vantagens dessa aproximação são controle preciso da corrente de partida e fácil ajuste. Muitos ajustes do usuário podem ser feitos automaticamente por sistemas baseados em corrente. Se for necessária a correção estática do fator de potência, os capacitores devem ser instalados do lado da alimentação do soft-starter.

4.2 CONSIDERAÇÕES

Durante muitos anos foram utilizados exclusivamente os dispositivos eletromecânicos, com uso de contatores e relés, para partida dos motores de indução. Somente em algumas pequenas aplicações, como no caso de bombas de recalque com vazão ajustável, é que se utilizavam equipamentos para a variação da velocidade do motor de indução trifásico. Nesse caso, a variação de velocidade era feita por meio de dispositivos com embreagens, com grande perda de energia.

Os soft starters são os equipamentos mais avançados para redução de tensão na partida. Elas oferecem melhor controle sobre a corrente e o torque assim evitando desperdício de energia e esforços repentino no equipamento acionado pelo motor. Também podem incorporar funções avançadas para proteção do motor e ferramentas de interface para controle e acionamento remoto do motor acionado.

Vantagens:

- Controle da corrente de partida (próxima à nominal);
- Não existe limitação do número de manobras/hora;
- Longa vida útil pois não possui partes eletromecânicas móveis;
- Torque de partida próximo do torque nominal;
- Controle Soft stop (parada suave) para aumentar o tempo de parada dos motores;
- Controles para freio para reduzir o tempo de parada dos motores;
- Possibilita inversão do sentido de rotação;
- Proteções integrais (falta de fase, sobrecorrente, subcorrente, sobrecarga etc).

Desvantagens:

- É necessário tensão auxiliar para o soft-starter;
- Maior custo na medida em que a potência do motor é reduzida;
- Distorções harmônicas na linha.

5. CONVERSORES DE FREQUENCIA

5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

De acordo com MATHEUS (2007), os conversores de frequência são comumente divididos em quatro módulos. O primeiro módulo é o retificador, composto de um retificador trifásico. Este é o responsável em transformar a alimentação da rede alternada em tensão contínua, além de fornecer alimentação elétrica para o módulo de controle. O segundo módulo é o filtro ou barramento DC, composto por capacitores, indutores e circuito chopper de frenagem, responsável por filtrar e linearizar o sinal contínuo para alimentar o terceiro módulo. O módulo inversor é composto por transistores controláveis IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), este módulo é o responsável por transformar o sinal contínuo em alternado que irá alimentar o motor elétrico. O método mais comum para se controlar a frequência e tensão é o PWM (Pulse Width Modulation) modulação na largura de pulso da tensão de saída do conversor. O quarto módulo é o circuito de controle responsável pela estratégia de controle do conversor, ele que determinará de fato a frequência de alimentação do motor elétrico a ser acionado, além de servir de interface com os outros equipamentos do sistema em que está sendo empregado.

O conversor de frequência varia a velocidade do motor elétrico de acordo com a demanda necessária do equipamento acionado pelo motor elétrico. Este controle otimiza a utilização da energia fornecida ao equipamento em toda sua faixa de operação. Por ter dimensões pequenas pode ser montado em quadro elétrico substituindo os vários contadores utilizados nas partidas convencionais de motores elétricos, além de poder controlar mais de um motor elétrico simultaneamente.

5.2 COMPONENTES

Muito embora haja vários modelos e tamanho de conversores de frequência, todos são basicamente divididos em quatro componentes principais:

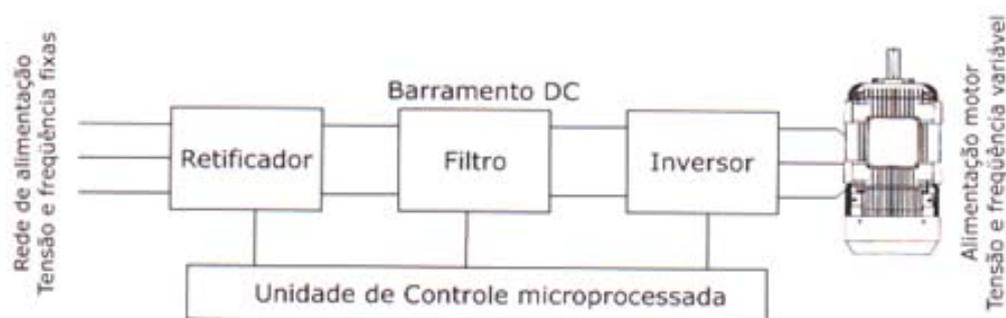


Figura 21 - Componentes básicos de um conversor de frequência
Fonte: Internet



Figura 22 - Vários tamanhos de conversores de frequência
Fonte: Catálogo WEG CFW09

5.2.1 CIRCUITO RETIFICADOR

É o circuito retificador que recebe a alimentação da fonte externa. A tensão de alimentação é do tipo alternada trifásica ou alternada monofásica com frequência fixa. No Brasil o mais comum é a distribuição de rede em 3 x

380V/60Hz, 1 x 220V/60Hz ou 1 x 127V/60Hz e suas características podem ser ilustradas a seguir:

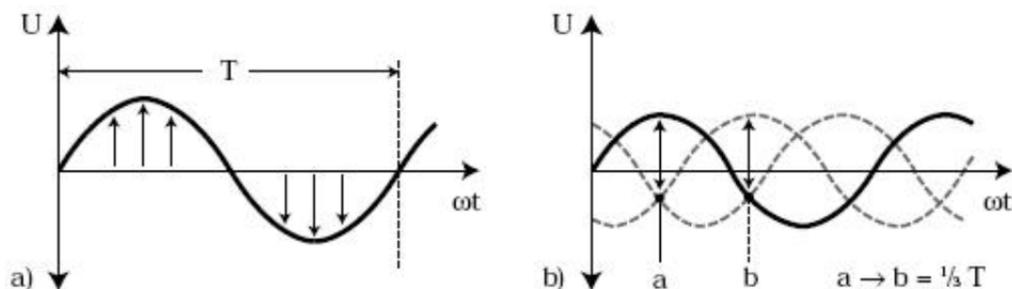


Figura 23 - Formas de ondas. a) monofásica; b) trifásica
Fonte: Internet

5.2.1.1 RETIFICADOR NÃO CONTROLADO

Os diodos são componentes semi-condutores que permitem a passagem da corrente em apenas uma direção: do anodo (A) para o catodo (K). Não é possível - como é o caso de outros componentes semi condutores - controlar a intensidade da corrente que passa pelo diodo quando em estado de condução.

Uma tensão alternada sobre um diodo é convertida em uma tensão CC pulsante. Se uma fonte trifásica é utilizada junto com um retificador não controlado, a tensão CC continuará a ser pulsante.

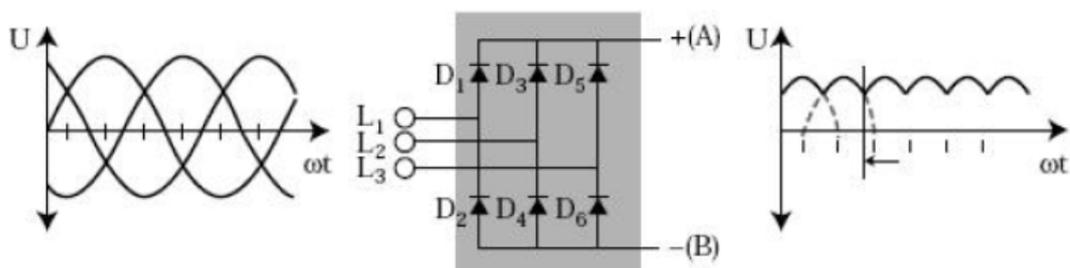


Figura 24 - Retificador não controlado
Fonte: Internet

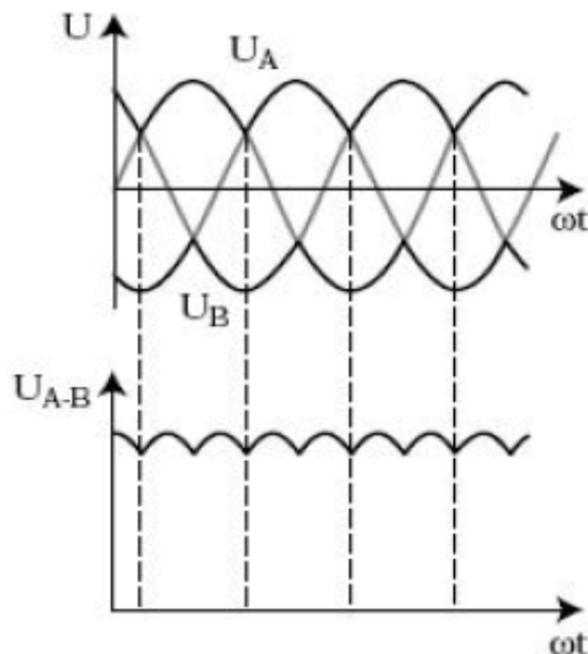


Figura 25 - Sinal de saída de um retificador não controlado
Fonte: Internet

5.2.1.2 RETIFICADOR CONTROLADO

Nos retificadores controlados os diodos são trocados por tiristores. Assim como os diodos, os tiristores permitem a passagem da corrente em apenas uma direção. Entretanto, a diferença entre esses dois componentes é que os tiristores tem um terceiro terminal o gate ou porta (G). Essa porta deve ser comandada por um sinal antes do tiristor conduzir. Quando uma corrente passa pelo tiristor, o tiristor irá conduzi-la até que ela atinja o valor nulo.

Tiristores são utilizados tanto nos retificadores quanto nos inversores. O sinal para a porta é o sinal de controle α do tiristor, que é um atraso de tempo, expresso em graus. O valor em graus representa o atraso entre a passagem da tensão por zero e o instante em que o tiristor inicia sua condução.

O retificador controlado tem basicamente a mesma configuração do retificador não controlado com exceção de que os tiristores são controlados por α e começam a conduzir a partir do ponto que um diodo normal inicia até 30° de atraso em relação a passagem da tensão por zero.

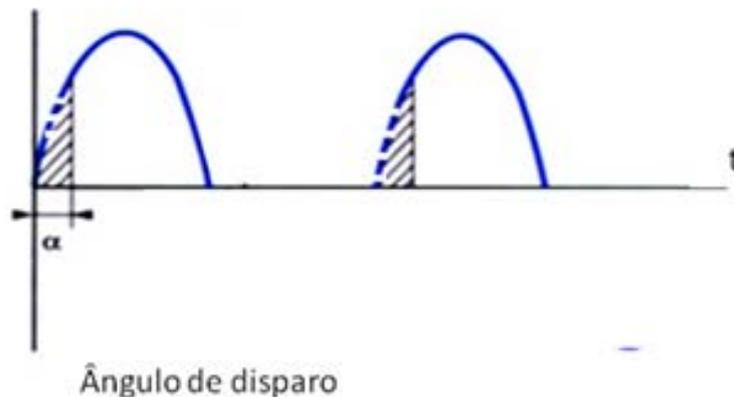


Figura 26 - Ângulo de disparo do tiristor
Fonte: Internet

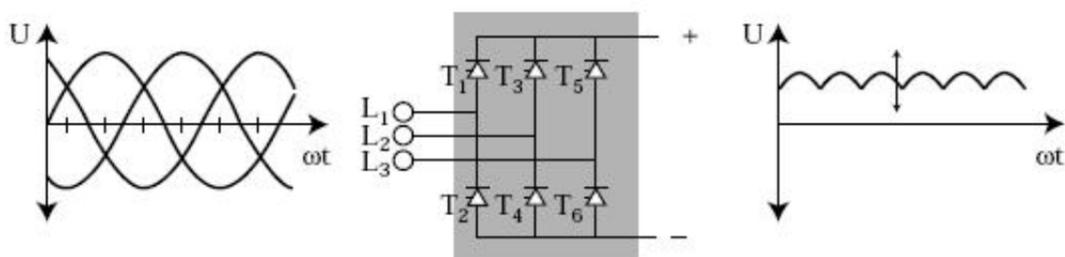


Figura 27 - Retificador controlado trifásico
Fonte: Internet

Comparado com o retificador não controlado, o controlado causa maiores perdas e distúrbios na rede de alimentação, porque o retificador drena uma corrente reativa maior se o tiristor conduzir por um curto período de tempo. Entretanto, a vantagem dos retificadores controlados é que a energia pode ser devolvida para rede.

5.2.2 CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE FILTRAGEM OU BARRAMENTO DC

O módulo de filtragem é alimentado diretamente pelo módulo retificador e pode ser visto como um reservatório do qual o motor pode drenar energia através do inversor. Ele pode ser construído de acordo com três princípios diferentes dependendo do tipo de retificador e inversor.

5.2.2.1 INVERSOR FONTE DE CORRENTE

Em conversores fonte de corrente o circuito de filtragem consiste de um grande indutor e é combinado apenas com um retificador controlado. O indutor transforma a tensão variável do retificador em uma corrente contínua variável. A carga determina a amplitude da tensão do motor.



Figura 28 - Inversor fonte de corrente
Fonte: Internet

5.2.2.2 INVERSOR FONTE DE TENSÃO

Em conversores fonte de tensão o circuito intermediário de filtragem consiste em um filtro capacitivo e pode ser combinado com os dois tipos de retificador. O filtro alisa a tensão pulsante do retificador.

Num retificador controlado, a tensão é constante numa dada frequência, e fornecida aos inversores como uma tensão contínua pura com amplitude variável. Com retificadores não controlados, a tensão na entrada do conversor é uma tensão CC com amplitude constante.

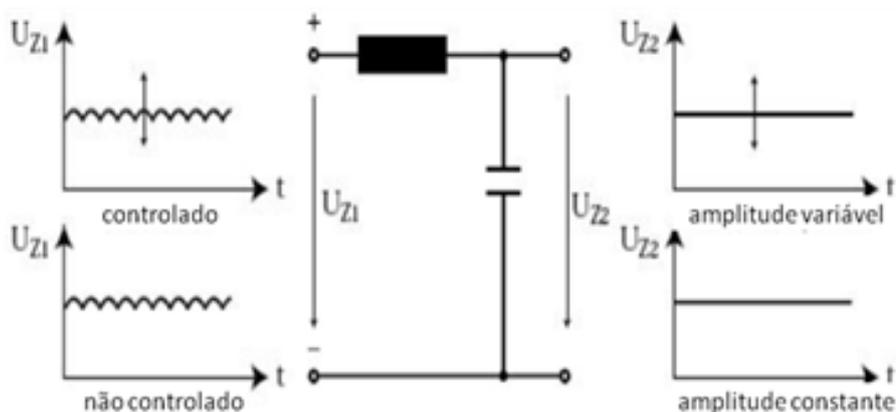


Figura 29 - Conversor de tensão
Fonte: Monografia APMA 2008

5.2.2.3 CIRCUITO DE FILTRAGEM COM TENSÃO CC VARIÁVEL

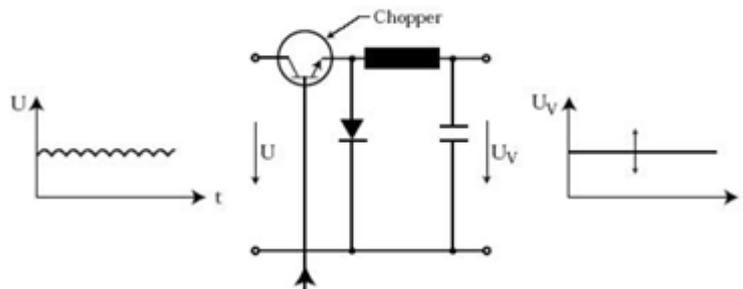


Figura 30 - Filtragem com tensão CC variável
Fonte: Monografia APMA 2008

Num circuito de filtragem com tensão variável um chopper pode ser inserido na frente do filtro. O chopper tem um transistor que funciona como uma chave para ligar ou desligar a tensão do retificador. O circuito de controle regula o chopper através da comparação da tensão variável depois do filtro com um sinal de entrada. Se existe diferença, a relação é regulada pelo tempo que o transistor conduz e o tempo que ele é bloqueado.

Isso varia o valor efetivo e o tamanho da tensão contínua e pode ser expresso como:

$$U_v = U \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Equação 13

Onde,

U_v é o valor da tensão controlada,

U é a tensão de entrada no filtro

t_{on} é o tempo de condução do transistor

t_{off} é o tempo de corte do transistor

Quando o transistor do chopper interrompe a corrente, a bobina do filtro faz com que a tensão através do transistor seja muito grande. Para impedir que isso aconteça, o chopper é protegido por um diodo de roda-livre. O circuito de filtragem alisa a tensão quadrada que é fornecida pelo chopper. O filtro capacitivo e indutivo mantém a tensão constante para uma dada frequência.

O módulo de filtragem também pode fornecer outras funções adicionais dependendo do seu projeto, como por exemplo:

Desacoplamento entre o retificador e o inversor;

Redução de harmônicas;

Reserva de energia para suportar variações bruscas de carga.

5.2.3 CIRCUITO INVERSOR

O inversor é a última conexão do inversor de frequência antes do motor e é onde a adaptação da tensão de saída ocorre. Do circuito intermediário de filtragem o inversor pode receber tanto:

Uma corrente contínua variável;

Uma tensão contínua variável;

Uma tensão contínua constante.

Em todos os casos o inversor assegura que a saída de alimentação para o motor se torne variável. Ou seja, a frequência para o motor é gerada no inversor.

Se a corrente ou tensão são variáveis, o inversor gera apenas a frequência.

Se a tensão é constante o inversor gera a tensão e a frequência.

Mesmo que os inversores trabalhem de formas diferentes, sua estrutura básica é sempre a mesma. Os componentes principais são semi condutores controláveis, colocados em paralelo em três ramos.

Atualmente os tiristores tem sido largamente substituídos pelos transistores IGBT que podem ser chaveados de forma mais rápida. Apesar de depender do tipo de semicondutor utilizado, a frequência de chaveamento esta tipicamente entre 300Hz e 20kHz.

Os semi condutores no inversor são ligados e desligados por sinais gerados no circuito de controle. Os sinais podem ser controlados de diferentes formas.

Inversores tradicionais, trabalhando principalmente com circuitos intermediários de filtragem de tensão variável, consistem de seis diodos, seis tiristores e seis capacitores.

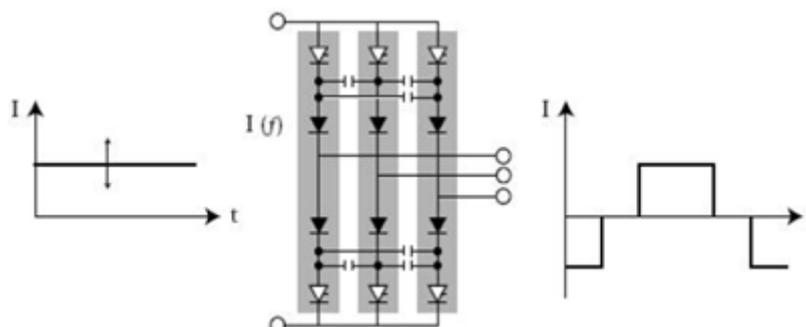


Figura 31 - Circuito inversor
Fonte: Internet

Os capacitores habilitam os tiristores para o chaveamento, de forma que a corrente entregue as bobinas do motor esteja defasada de 120° elétricos em cada bobina e devem estar de acordo com a capacidade do motor. Um campo girante intermitente com a frequência desejada é produzido quando os terminais do motor são excitados com esta corrente. Mesmo que a corrente entregue ao motor seja quase quadrada, a tensão do motor é quase senoidal. Entretanto, sempre existem picos de tensão quando a corrente é chaveada.

Os diodos isolam os capacitores da corrente de carga do motor.

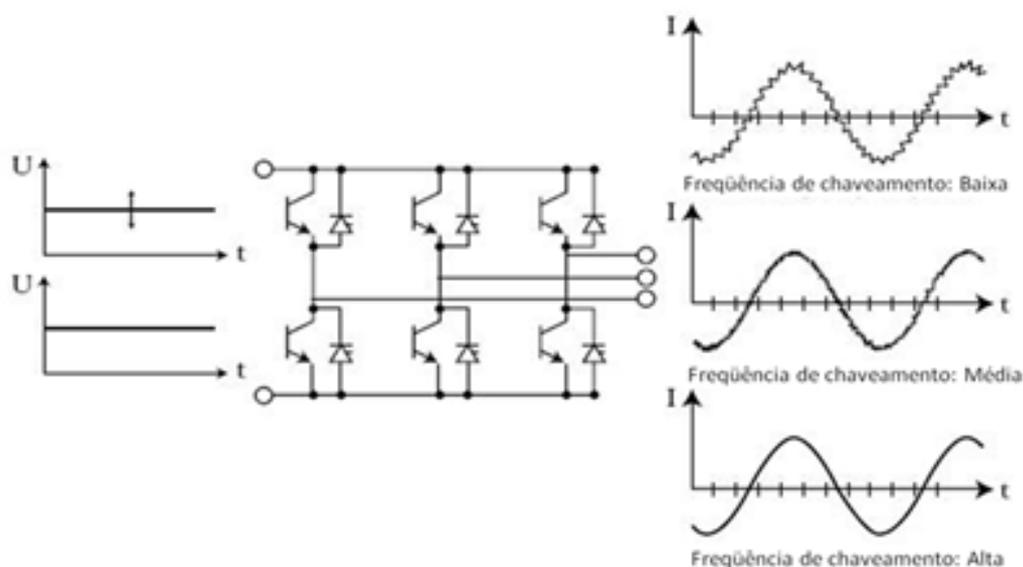


Figura 32 - Inversor para tensão constante ou variável e saída dependente da frequência de chaveamento
Fonte: Monografia APMA 2008

Em inversores com circuitos intermediários de tensão constante ou variável existem seis componentes chaveadores e independentemente do tipo de semicondutor utilizado, a função é basicamente a mesma. O circuito de controle chaveia os semicondutores utilizando-se das mais diversas técnicas de modulação, mudando, dessa forma, a frequência de saída do inversor.

A primeira técnica trabalha com tensão ou corrente variável no circuito intermediário de filtragem. Os intervalos em que os semicondutores individualmente são conduzidos são colocadas numa seqüência que é usada para se obter as frequências de saída desejada.

Essa seqüência de chaveamento é controlada pela amplitude da tensão ou corrente do circuito intermediário. Utilizando-se um oscilador controlado por tensão, a frequência sempre obedece a amplitude da tensão. Esse tipo de inversor é chamado de PAM (Pulse Amplitude Modulation ou Modulação por amplitude de pulso).

A outra principal técnica usa um circuito intermediário de tensão constante. A tensão no motor é conseguida aplicando-se a tensão do circuito intermediário por períodos mais longos ou mais curtos.

A frequência é mudada através da variação dos pulsos de tensão ao longo do eixo do tempo – positivamente para meio período e negativamente por o outro meio.

Como a técnica muda a largura dos pulsos de tensão, ela é chamada de PWM (Pulse Width Modulation ou Modulação por Largura de Pulso). PWM é a técnica mais utilizada no controle dos inversores.

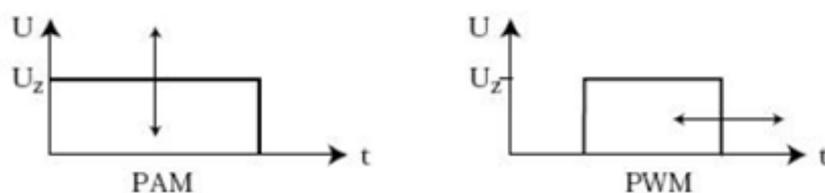


Figura 33 - Modulação por amplitude e por largura de pulso
Fonte: Internet

Num determinado período, se a largura do pulso é maior na sua parte superior, a tensão média neste período será maior, da mesma maneira se a largura de pulso for maior na parte inferior, a tensão média gerada será menor.

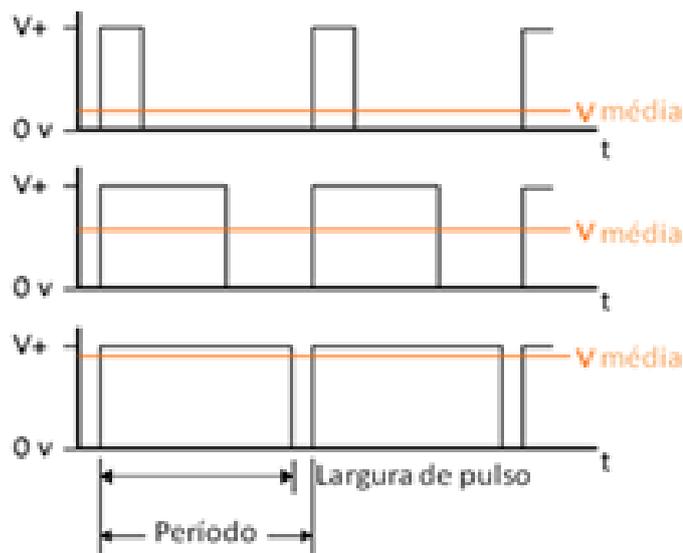


Figura 34 - Tensão média da largura de pulso
 Fonte: Internet

5.2.4 CIRCUITO DE CONTROLE

O circuito de controle é o quarto componente essencial para um conversor de frequência e tem quatro tarefas essenciais:

- Controlar os semicondutores do conversor de frequência;
- Troca de dados entre o conversor de frequência e os periféricos;
- Verificar e reportar mensagens de falha;
- Cuidar das funções de proteção do conversor de frequência e do motor.

Os micro-processadores tem aumentado sua capacidade de processamento e velocidade, aumentando significativamente o número de aplicações possíveis aos conversores de frequência e reduzindo o número de cálculos necessários a sua aplicação. Com os micro-processadores o processamento é integrado dentro do conversor de frequência e este está apto a determinar o melhor padrão de chaveamento para cada estado de operação.

5.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Os conversores de frequência utilizam softwares que determinarão a estratégia de como devem ser controlados os motores de indução para que esses estejam sempre em regime ótimo de operação.

O módulo inversor pode ser acionado de acordo com dois métodos mais comuns:

Controle escalar;

Controle vetorial.

5.3.1 CONTROLE ESCALAR

A tecnologia do modo de controle de velocidade escalar se baseia na utilização das variáveis de controle: Tensão [V] e Frequência [f].

As quais são aplicadas diretamente à bobinagem do estator do motor assíncrono trifásico fornecendo ao motor uma relação V/f correspondente. Esta relação da tensão pela frequência, é fornecida de forma proporcional, limitados até a frequência nominal (frequência da rede) e tensão de alimentação do conversor (tensão da rede).

Após a frequência nominal (no caso do Brasil, igual a 60 Hz), os conversores de frequência têm a capacidade de elevar a frequência de saída, porém a limitação fica por conta da tensão que não tem como ser maior do que a fornecida pela rede.

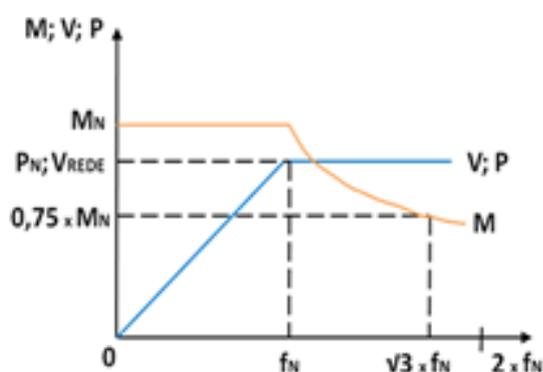


Figura 35 - Curva V/f
Fonte: Internet

A variação V/f é feita linearmente até a frequência nominal (ex. 60Hz);

Acima de 60Hz, a tensão, que já é a nominal permanece constante;

A partir de 60Hz, a corrente, o fluxo, e conseqüentemente o torque, diminuirão (região de enfraquecimento de campo).

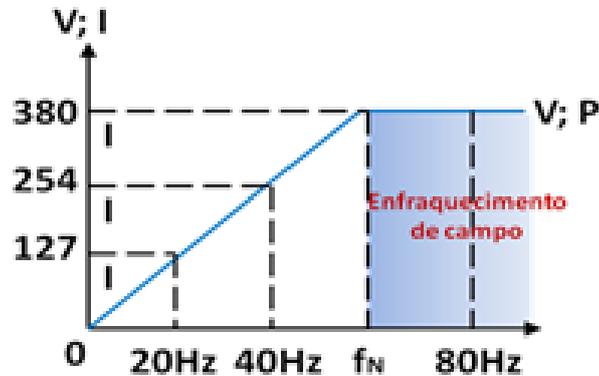


Figura 36 - Enfraquecimento de campo
Fonte: Internet

A região de enfraquecimento de campo é uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir.

$$\downarrow \Phi_m \approx \frac{U}{f} \begin{array}{l} \rightarrow \text{Constante após } f_n \\ \uparrow \text{Aumentando} \end{array}$$

$$M \approx \Phi_m \cdot I_2$$

A potência de saída do conversor de frequência segue a variação V/f , ou seja, cresce linearmente até a frequência nominal e permanece constante acima desta.

$$P = M \cdot \omega$$

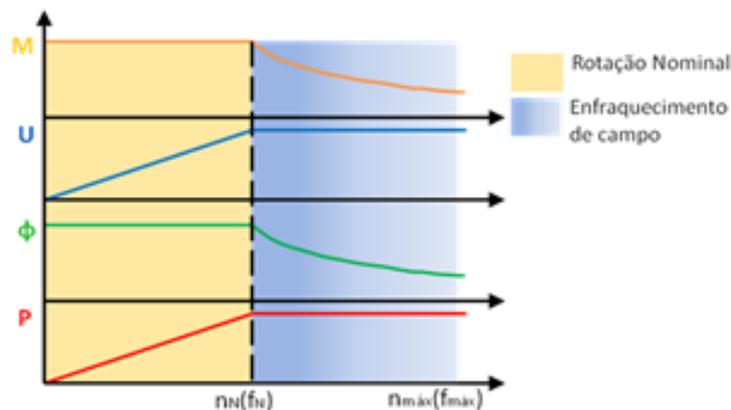


Figura 37 - Torque x Tensão x Fluxo x Potência
Fonte: Internet

A queda do torque do motor assíncrono trifásico ocorre devido às características físicas do motor e não do conversor, mas como através do modo de controle escalar não é possível efetuar o controle de torque, não há a possibilidade de corrigir esse efeito no motor.

Algo similar ao torque ocorre à potência do motor (P_N): com o aumento da relação tensão e frequência, a potência aumenta proporcionalmente até a frequência nominal (f_N). Chegando nesse instante, a potência nominal do motor permanecerá a mesma, independente do aumento da frequência.

Característica:

A tensão de saída do conversor apresenta distorção harmônica (forma de onda não perfeitamente senoidal), provocando aumento da corrente eficaz e conseqüente aumento de perdas;

Controle escalar em inversores de frequência é utilizado em aplicações normais que não requerem elevada dinâmica (grandes acelerações e frenagens), nem elevada precisão e nem controle de torque;

Um inversor com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com precisão de 0,5% da rotação nominal para sistemas sem variação de carga, e de 3 a 5% com variação de carga de 0 a 100% do torque nominal;

A faixa de variação de velocidade é pequena e da ordem de 1:10 (ex: 6Hz a 60Hz);

O inversor de frequência escalar é mais utilizado em sistemas que não requerem alto desempenho;

Custo menor em relação ao controle vetorial.

5.3.2 CONTROLE VETORIAL

Em aplicações onde é necessária uma dinâmica de alta performance, respostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade, o motor elétrico deverá fornecer essencialmente um controle preciso de torque para uma faixa extensa de condições de operação.

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 vetoriais 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.

Inversores Vetoriais de Fluxo

Os Inversores Vetoriais de Fluxo produzem uma saída trifásica com tensão(V) e frequência (f) controladas independentemente, não seguindo uma curva V/F pré- fixada.

A idéia 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 será imposto e controlado diretamente no motor, 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 realimentação: controle de malha fechada

Sem realimentação: controle de malha aberta

5.3.2.1 CONTROLE DE MALHA FECHADA

A realimentação permite ao controlador saber como está acontecendo o movimento do eixo do motor, possibilitando controlar a velocidade com alta precisão e também o torque, mesmo em velocidade zero. A operação com realimentação é também conhecida como controle de malha fechada.

A realimentação é realizada utilizando um gerador de pulsos, também conhecido com "Encoder". O encoder é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos elétricos. Esses pulsos gerados podem ser analógicos ou digitais, e são usados para determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção.

5.3.2.2 CONTROLE DE MALHA ABERTA

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 conversor deve calcular através de artifícios matemáticos a velocidade real e o escorregamento do motor. A operação sem realimentação possui performance inferior em comparação ao inversor com realimentação.

5.3.2.3 COMPARATIVO ENTRE CONTROLES MALHA ABERTA E FECHADA

Malha fechada:

Regulação de velocidade: 0,01%

Regulação de torque: 5%

Faixa de variação de velocidade: 1:1000

Torque de partida: 400% máx.

Toque máximo (não contínuo): 400%

Malha aberta:

Regulação de velocidade: 0,1%

Regulação de torque: não tem

Faixa de variação de velocidade: 1:100

Torque de partida: 250% máx.

Toque máximo (não contínuo): 250%

5.4 INSTALAÇÃO DO CONVERSOR

Existe uma grande quantidade de fabricantes, e uma infinidade de aplicações diferentes para os inversores. Os terminais identificados como: R, S, e T (ou L1, L2, e L3), referem-se à entrada trifásica da rede elétrica. Para pequenas potências, é comum encontrarmos inversores com a entrada monofásica (porém a saída continua sendo trifásica). Para diferenciar a entrada da rede para a saída do motor, a saída (normalmente) vem indicada por: U, V e W.

Além da potência, temos os bornes de comando. Cada fabricante possui sua própria configuração, portanto, para saber "quem é quem" temos de consultar o manual do respectivo fabricante. De qualquer maneira, os principais bornes são as entradas (analógicas ou digitais), e as saídas (geralmente digitais).

Cuidados que devemos ter ao instalar um conversor:

1. Cuidado! Não há conversor que resista à ligação invertida de entrada da rede elétrica (trifásica ou monofásica), com a saída trifásica para o motor.
2. O aterramento elétrico deve estar bem conectado, tanto ao inversor como ao motor. O valor do aterramento nunca deve ser maior que 5. (norma IEC536), e isso pode ser facilmente comprovado com um terrômetro, antes da instalação.
3. Caso o inversor possua uma interface de comunicação(RS 232, ou RS 485) para o PC, o tamanho do cabo deve ser o menor possível.

4. Devemos evitar ao máximo, misturar (em um mesmo eletroduto ou canaleta), cabos de potência (rede elétrica, ou saída para o motor) com cabos de comando (sinais analógicos, digitais, RS 232, etc...).
5. O inversor deve estar alojado próximo a “orifícios” de ventilação, ou, caso a potência seja muito alta, deve estar submetido a uma ventilação (ou exaustão). Alguns inversores já possuem um pequeno exaustor interno.
6. A rede elétrica deve ser confiável, isto é, jamais ultrapassar variações de +ou- 10% em sua amplitude.
7. Sempre que possível, utilizar os cabos de comando devidamente blindados.
8. Os equipamentos de controle (PLC, CNC, PC, etc...), que funcionarem em conjunto com o inversor, devem possuir o "terra" em comum. Normalmente, esse terminal vem indicado pela referência “PE” (proteção elétrica), e sua cor é amarela e verde (ou apenas verde).
9. Utilizar sempre parafusos e arruelas adequadas para garantir uma boa fixação ao painel. Isso evitará vibrações mecânicas. Além disso, muitos inversores utilizam o próprio painel em que são fixados como dissipador de calor. Uma fixação pobre, nesse caso, causará um aquecimento excessivo (e possivelmente sua queima).
10. Caso haja contatores e bobinas agregadas ao funcionamento do inversor, utilizar sempre supressores de ruídos elétricos (circuitos RC para bobinas AC, e diodos para bobinas DC).

Essas precauções não visam apenas melhorar o funcionamento do inversor, mas evitar que ele interfira em outros equipamentos ao seu redor. O inversor de frequência é, infelizmente, um grande gerador de EMI (interferências eletromagnéticas), e caso não seja instalado de acordo com estas orientações, pode-se prejudicar toda a máquina (ou sistema) ao seu redor.

5.4.1 PARAMETRIZAÇÃO

Para que o inversor funcione a contento, não basta instalá-lo corretamente. É preciso "informar" a ele em que condições de trabalho irá

operar. Essa tarefa é justamente a parametrização do inversor. Quanto maior o número de recursos que o inversor oferece, tanto maior será o número de parâmetros disponíveis. Existem inversores com tal nível de sofisticação, que o número de parâmetros ultrapassa a marca dos 900.

5.4.2 DIMENSIONAMENTO

Para se chegar a conclusão de qual modelo, tipo e potência deve-se usar em determinada aplicação, é necessário analisar três tópicos muito importantes: 1.Capacidade do inversor: Para se definir a capacidade do inversor temos de saber qual a corrente do motor (e qual carga) ele acionará. Normalmente se escolhe um inversor com uma capacidade de corrente igual ou um pouco superior à corrente nominal do motor. A tensão, tanto do inversor quanto do motor deve ser igual a da rede de alimentação.

2. Tipo de inversor: A maioria dos inversores utilizados são do tipo escalar. Só utilizamos o tipo vetorial em duas ocasiões: extrema precisão de rotação, torque elevado para rotação baixa ou zero

3. Modelo e fabricante: Para escolher o modelo, basta consultarmos os catálogos dos fabricantes, e procurar um que atenda as seguintes características mínimas necessárias. Quanto ao fabricante, o preço e qualidade desejada deve determinar a escolha. Apenas como referência os mais encontrados na indústria são:Siemens, Weg, Yaskawa, Allen Bradley e ABB.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vimos neste estudo o princípio de operação dos conversores de frequência e como estes equipamentos conseguem acelerar e desacelerar o motor de maneira estável, diminuindo os esforços aplicados nos motores. Além de controlar a velocidade, pode-se manter o torque constante, para que sejam provocadas alterações nos motores quando estiverem com cargas; com o uso dos conversores o motor não gera altas cargas de inércia, o motor é acelerado e desacelerado gradativamente. Portanto esta conversão de velocidade constante para velocidade variável gera uma diminuição no consumo de energia. Pudemos observar então que os conversores de frequência tem uma vasta aplicação na indústria e estão cada vez mais sendo utilizados em diversos sistemas a bordo de embarcações mercantes, como: acionamento de ventiladores, bombas de carga, motores elétricos dos thrusters, motores elétricos de acionamento do eixo propulsor e motores elétricos de comando da máquina do leme.

Os benefícios são diversos, como redução: no custo de desenvolvimento, custo dos sistemas de acionamento, custo de manutenção. E nos casos da operação marítima o elevado grau de autonomia e simplicidade no monitoramento constitui uma grande vantagem devido ao reduzido número de tripulantes a bordo. O conversor de frequência contribui muito para uma melhor condução da praça de máquinas.

E diante do avanço tecnológico mundial, os armadores da Marinha mercante estão em constante processo de modernização de sua frota de navios para otimizar a operacionalidade, aumentar a segurança e reduzir os riscos de acidentes nas embarcações.

Portanto é de suma importância que o Oficial de máquinas mantenha-se atualizado e conheça o princípio de funcionamento dos conversores de frequência, pois dessa forma será capaz de operar qualquer conversor, independente do fabricante e das alterações nos drives de programação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRANCHI, Claiton Moro. Inversores de Frequência- Teoria e Aplicações. 1ª Edição. São Paulo: Editora Erica, 2008

HENRIQUE, Matheus. Conversores de Frequência e Soft Starters. Disponível em: <<http://www.ejm.com.br/download/Inversores.pdf>> Acesso em 20 ago.2013

INVERSOR de Frequência. Disponível em <<http://www.faculdadedavilamatilde.com.br/publicacoes/inversoresdefrequencia.pdf>> Acesso em 21 ago.2013

MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; MARTINS, André R. Silva. (Coord.) Conservação de energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações; 3ª ed; Itajubá, MG; FUPAI; 2006

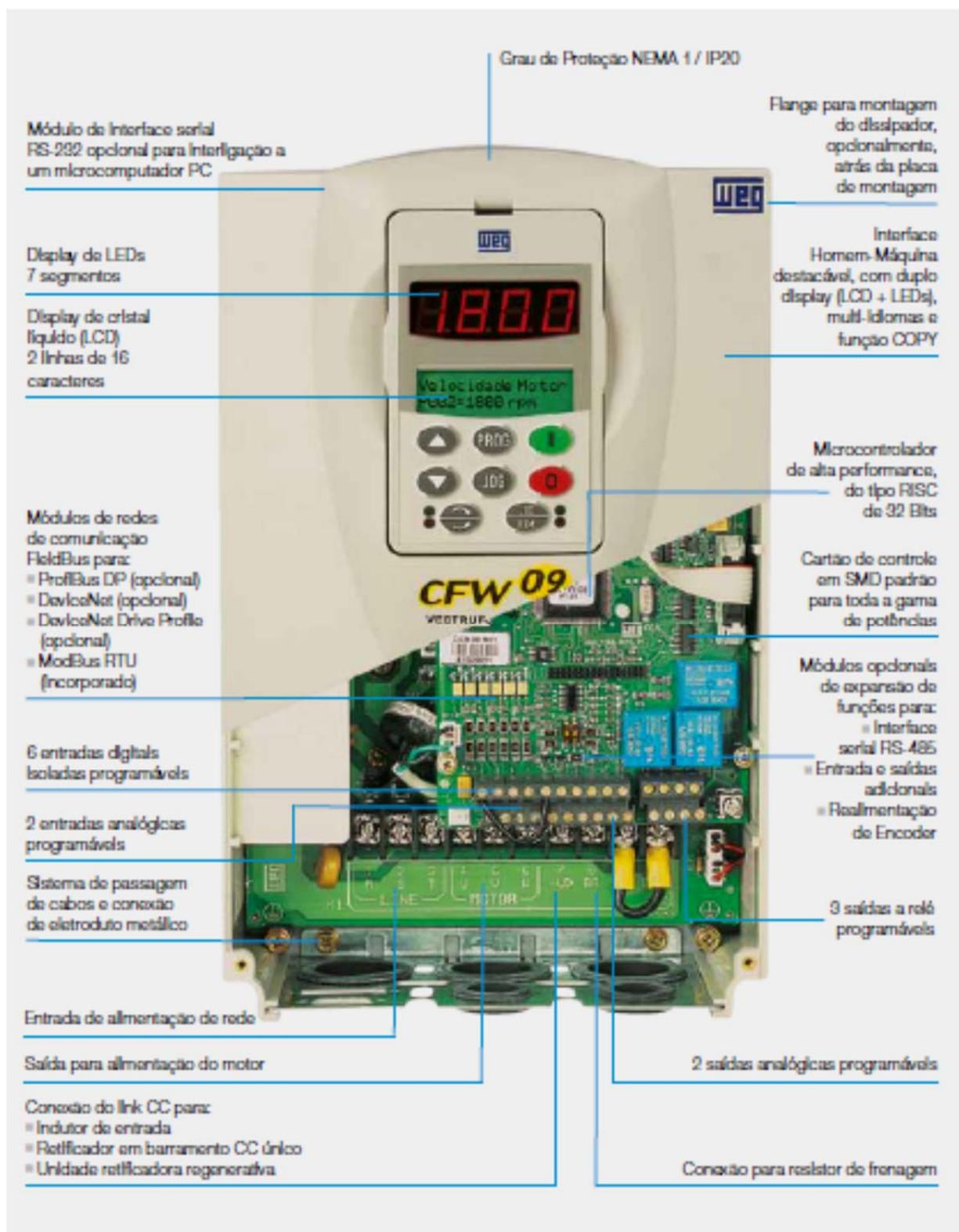
RODRIGUES, Roberto Barroso. Conversores de frequência: benefícios de sua aplicação a bordo. Rio de Janeiro. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha Monografia APMA 2008

SILVA, Leonardo Perpétuo da. Inversor de Frequência . Rio de Janeiro. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Monografia APMA 2011.

VANTAGENS e benefícios do rotor bobinado em relação ao rotor gaiola e suas principais diferenças. Disponível em <http://www.nishi.com.br/portugues/link_not_nishisan.php?id=133>, Acesso 30 ago.2013

8. ANEXOS

ANEXO A - Módulo de Interface serial RS-232, Catálogo WEG CFW 09



ANEXO B – Conversor de frequência de um dos motores elétricos de propulsão da embarcação Skandi Iguaçu da empresa Norskan Offshore



