



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LAURA EDUARDA VIEIRA PEREIRA MARQUES

**ESTUDO SOBRE INVERSORES DE FREQUÊNCIA E ELABORAÇÃO
DE GUIAS EXPERIMENTAIS PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE
INDUÇÃO**

Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2014

LAURA EDUARDA VIEIRA PEREIRA MARQUES

ESTUDO SOBRE INVERSORES DE FREQUÊNCIA E ELABORAÇÃO
DE GUIAS EXPERIMENTAIS PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE
INDUÇÃO

*Trabalho de conclusão de curso
submetido à Unidade Acadêmica
de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do
grau de bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Orientador: Prof. George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2014

LAURA EDUARDA VIEIRA PEREIRA MARQUES

ESTUDO SOBRE INVERSORES DE FREQUÊNCIA E ELABORAÇÃO DE GUIAS EXPERIMENTAIS PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO

*Trabalho de conclusão de curso
submetido à Unidade Acadêmica
de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do
grau de bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador/ UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, Pai e amigo, por todo o bem, toda a força que me deu para seguir em frente, em meio a todas adversidades; por toda a serenidade e calma dadas nas horas de dificuldade.

Agradeço aos meus pais, José Marques e Jozinete Vieira por fazerem o possível e o impossível para que eu tivesse uma educação sólida; por encorajarem-me a enfrentar todos os desafios e por me apoiarem incondicionalmente, incentivando-me a não desistir perante os obstáculos que surgiam.

Agradeço aos meus irmãos, José Neto e Maria Helena, à minha avó, Nazareth, que sempre deu uma palavra de conforto; ao meu avô, José; aos meus avós paternos que já passaram por aqui, mas tenho certeza que olham por sua neta; aos meus padrinhos, Socorro e Marcelino, que sempre torceram por mim, dando-me força e esperança em um futuro melhor e a todos os meus tios e primos.

Agradeço ao Professor George Lira, por toda paciência e confiança entregues a mim; por toda disponibilidade dedicada a orientação deste trabalho, em meio a todas as suas atividades acadêmicas.

Agradeço aos meus amigos, Andreza Andrade, Aquiles Dantas, Érica Manguiera, Jordane Gonçalves, Leandro Duarte, Mikhail Barros, Nelson Carlos, Ramon Dias, Suzanne Andrade, Thamiles Melo e Yoge Sarmiento, pelas inúmeras noites de estudos; pela companhia em viagens técnicas, parcerias em trabalhos e por me ajudarem, até com uma palavra amiga a não esmorecer.

Agradeço a Stefano Basset, pelo esclarecimento de minhas dúvidas; por toda compreensão, paciência e amor para comigo nas horas em que estive mais atarefada.

Agradeço aos meus colegas, Gabriel Vidal, Luís Medeiros, Valdemir Brito, Vinícius Almeida e aos técnicos Adriano, Chico e Eduardo, do Laboratório de Alta Tensão pela disponibilidade em me auxiliarem, com esclarecimentos teóricos, práticos e no manuseio de equipamentos.

Agradeço à coordenação do curso, Adail Paz, Tchai Oliveira e Damásio Fernandes por todo o carinho e auxílio, e à Universidade Federal de Campina Grande, especialmente ao Departamento de Engenharia Elétrica, por ter me proporcionado o estudo em um ambiente com grandes mestres.

A Deus, toda honra e toda glória.

RESUMO

O controle da variação de velocidade de motores de corrente alternada sempre foi almejado e só a partir da década de 60, devido à disponibilidade dos semicondutores, é que pesquisadores voltaram suas atenções em dispositivos capazes de alcançar este objetivo – os inversores de frequência. Após duas décadas, com o desenvolvimento tecnológico de microprocessadores atrelado com a redução de preços, os inversores de frequência melhoraram consideravelmente, tornando-se cada vez mais comum no mercado. Com a crescente utilização deste equipamento nos mais diversos ambientes e a constante inovação tecnológica, faz-se necessário capacitar novos usuários sobre esta tecnologia difundida mundialmente, dando-lhes uma abordagem sobre os princípios de funcionamento, características fundamentais e seu comportamento no acionamento de motores de indução trifásicos. Para isto, realizaram-se montagens e experimentos no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, utilizando o inversor de série CFW-11, versão 3.1X da WEG para o acionamento de motores de indução trifásicos, objetivando, assim, a elaboração de guias experimentais para capacitação de alunos do curso de Engenharia Elétrica.

Palavras-chave: Controle de velocidade; motores de indução trifásicos; inversores de frequência.

ABSTRACT

The control of speed variation of alternating current motors always been desired and only since 60's, due to availability of semiconductors, the researchers have turned their attention to devices able to achieve this goal – the frequency inverters. Only after two decades, with the technological development of microprocessors jointly with lower prices, frequency converters have improved considerably becoming more common in the market. With the increasing utilization of this equipment in various places and the constant technological innovation, it is necessary to rain new users on this widespread technology, giving them a perspective about the operating principles, fundamental characteristics and behavior in activation of three phase induction motors. To accomplish this, montages and essays were performed in the High Voltage Laboratory of the Federal University of Campina Grande, using the CFW-11, series 3.1X WEG, to activate three phase induction motors, aiming draft experimental guides for training students of Electrical Engeneering.

Keywords: speed control; three phase induction motors; frequency inverters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Sinais de referência e da portadora (<i>signal sources</i>) e sinal modulado (PWM <i>signal</i>)	5
Figura 2. Diagrama de blocos de um inversor de frequência.	6
Figura 3. Circuito retificador trifásico não controlado.	7
Figura 4. (a) Tensão trifásica da rede na entrada do inversor (b) Tensão retificada na saída do inversor.	7
Figura 5. Tensões de fase e de linha na saída da etapa inversora.	9
Figura 6. Diagrama elétrico básico de um inversor de frequência.	10
Figura 7. Esquemático de um estator de um motor de indução trifásico.	11
Figura 8. Gráfico de Corrente/Tensão <i>versus</i> Frequência.	12
Figura 9. Diagrama vetorial para tensão e corrente no estator de um MIT.	14
Figura 10. Gráfico de tensão <i>versus</i> frequência.	16
Figura 11. Gráfico de torque <i>versus</i> frequência.	17
Figura 12. Gráfico da potência <i>versus</i> frequência.	18
Figura 13. Bancada didática da WEG.	23
Figura 14. Motor de Indução Trifásico Plus WEG.	24
Figura 15. Inversor de frequência CFW-11, versão 3.1X da WEG.	25
Figura 16. IHM do inversor de frequência CFW-11.	26
Figura 17. Freio de Foucault WEG.	28
Figura 18. Alimentação da bancada didática eletrotécnica industrial.	29
Figura 19. Motor de indução trifásico com eixo acoplado a um disco metálico.	30
Figura 20. Esquemático da conexão entre inversor e motor.	32
Figura 21. Esquemático da conexão entre o inversor e as chaves seletoras.	33
Figura 22. Esquemático da conexão entre o inversor e as chaves seletoras.	34
Figura 23. Esquemático da conexão entre o inversor, motor e freio de Foucault.	36

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quardo1. Formas de onda de tensão e corrente provenientes do inversor.	19
Tabela 1. Parâmetros gerais do inversor de frequência CFW-11.	42
Tabela 2. Parametrização do inversor para operar no modo remoto.	49
Tabela 3. Parametrização para a função MULTI-SPEED.	51
Tabela 4. Parametrização do potenciômetro eletrônico.	53
Tabela 5. Parametrização para a lógica start/stop.	55
Tabela 6. Parâmetros utilizados.	61

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Objetivos.....	3
2.1	Geral	3
2.2	Específicos.....	3
3	Fundamentação Teórica.....	4
3.1	Inversores de Frequência	4
3.1.1	Princípio de Funcionamento	6
3.1.1.1	Retificador	6
3.1.1.2	Filtro	8
3.1.1.3	Inversor.....	8
3.1.2	Configuração Elétrica	9
3.1.3	Estratégias de Controle.....	10
3.1.3.1	Controle Escalar	11
3.1.3.2	Controle Vetorial (VVC).....	13
3.1.3.2.1	Controle Vetorial com <i>Encoder</i>	14
3.1.3.2.2	Controle Vetorial <i>Sensorless</i>	15
3.2	Variação da Velocidade De Motores de indução	15
3.3	Influência do Inversor de Frequência no Acionamento De Motores.....	18
3.3.1	Distorções Harmônicas.....	18
4	Material e Métodos.....	22
4.1	Material.....	22
4.2	Métodos	29
5	Resultados e Discussão.....	31
5.1	Resultados.....	31
5.1	Discussão	36
6	Conclusões.....	38
	Referências	39
	Apêndices	41
	Apêndice 1 - Comandos através da interface homem-máquina	42
	Apêndice 2 - Definição dos limites de velocidade	44
	Apêndice 3- Definição das Rampas de Aceleração e Desaceleração	46

Apêndice 4 - Comandos Via Bornes	48
Apêndice 5 - Parametrização do multi-speed	50
Tabela 3. Parametrização para a função MULTI-SPEED.....	51
Apêndice 6 - Parametrização do Potenciômetro Eletrônico	52
Apêndice 7 - Parametrização do Comando a Três Fios.....	54
Apêndice 8 - Auto Ajuste para Controle Vetorial	56
Apêndice 9 - Simulação de Carga com Freio de Foucault	58
Anexo	60
Anexo 1 – Principais Parâmetros Utilizados	61

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da era industrial, o controle da variação de velocidade de motores de Corrente Alternada (CA) sempre foi almejado, pois algumas aplicações requeriam velocidade variável com motores de indução CA. Inicialmente, o controle de velocidade era realizado exclusivamente por motores de Corrente Contínua (CC), os quais possuíam alta precisão no controle da velocidade e torque, proporcionando respostas rápidas.

Desvantagens como tamanho, preço, necessidade de precauções na partida, maior manutenção, entre outras, relacionadas aos motores CC fizeram com que pesquisadores e investidores voltassem sua atenção para os inversores de frequência, devido à disponibilidade dos semicondutores na década de 60.

Desde então, estes dispositivos têm sofrido grandes mudanças. Primeiramente, seus recursos eram limitados devido à tecnologia encontrada na época, porém constantes desenvolvimentos nas tecnologias dos microprocessadores, principalmente, a partir da década de 80, possibilitaram uma rápida melhoria dos inversores, além da grande redução dos preços, o que proporcionou que este equipamento se tornasse cada vez mais comum no mercado. Apesar de todas essas mudanças desde seu surgimento, o princípio básico de funcionamento dos inversores de frequência permaneceu o mesmo (GRIPP JUNIOR, 2005).

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico, cuja finalidade é converter a tensão alternada em tensão contínua de amplitude constante e, por conseguinte, convertê-la em uma tensão cuja amplitude e frequência são variáveis.

Na indústria, entretanto, este dispositivo é, também, denominado de conversor de frequência e, na maioria dos casos, sua utilização se dá quando é necessário fazer o controle da velocidade de motores elétricos. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, também é possível que este dispositivo controle o torque de motores.

Ainda neste cenário, os inversores de frequência são usados em motores de indução trifásicos (MIT) no intuito de substituir rústicos sistemas mecânicos de variação de velocidades, tais como polias e variadores hidráulicos, bem como os onerosos motores CC, pelo conjunto motor assíncrono e inversor, de baixo custo, manutenção mais simples e reposição profusa (SILVA, 2009).

De acordo com a literatura, ainda é possível observar a utilização destes dispositivos no meio rural, acionando bombas centrífugas, permitindo, assim, o atendimento da demanda

variável do sistema de irrigação e, conseqüentemente, a racionalização do uso da energia elétrica (MORAES; OLIVEIRA FILHO; VIEIRA, 2011).

Além disso, estes conversores apresentam tais vantagens: automatização e flexibilização de processos fabris, economia de energia, também, nas indústrias, haja vista que, mais de 50% da energia gasta é utilizada na alimentação de motores, entre outras.

Então, pode-se afirmar que a variedade de aplicações envolvendo o dispositivo em estudo é muito ampla, compreendendo desde as aplicações mais simples até as mais complexas, tais como acionamento de bombas (válvulas), ventiladores (*dampers*), elevadores, máquinas operatrizes, e, além disso, pode-se observar sua presença em sistemas de automação industrial.

Com a crescente utilização deste equipamento nos mais diversos ambientes, faz-se necessário capacitar novos usuários sobre esta tecnologia difundida mundialmente.

Neste estudo, foi realizada uma revisão de literatura sobre conversores de frequência, desde suas características fundamentais, englobando, também, o princípio de funcionamento, até o acionamento Motores de Indução Trifásicos (MIT). Utilizar-se-á o inversor de série CFW-11, versão 3.1X da WEG, para se elaborar guias experimentais para acionamento de motor de indução, com o propósito de orientar usuários menos experientes, mais especificamente, alunos do curso de Engenharia Elétrica da UFCG.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão na literatura sobre inversores de frequência, abordando suas características, princípio de funcionamento, classificações, assim como, finalidades, vantagens e desvantagens.

2.2 ESPECÍFICOS

Para complementar este estudo, utilizou-se o inversor de frequência de série CFW-11, versão 3.1X da WEG, para elaborar um conjunto de experimentos/montagens que possibilitarão uma rápida assimilação, por parte dos usuários menos experientes, dos princípios de operação e recursos de um inversor comercial. A saber, propõem-se os seguintes experimentos:

- Comandos através da interface homem máquina;
- Definição dos limites de velocidade;
- Definição das rampas de aceleração e desaceleração;
- Comando via bornes;
- Parametrização do *multi-speed*;
- Parametrização do potenciômetro eletrônico;
- Parametrização do comando a três fios;
- Auto-ajuste do inversor para controle vetorial;
- Simulação de carga com freio de Foucault.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência, de um modo geral, é capaz de converter uma tensão alternada de amplitude fixa em uma tensão, também, alternada, contudo, de amplitude e frequência variáveis e que cuja finalidade é o controle da velocidade de motores assíncronos (de indução).

Devido ao controle de tensão e como os conversores de frequência devem ser dimensionados principalmente pela corrente do motor, pode-se afirmar que há um controle da potência consumida pela carga, o que resulta em uma maior economia de energia.

Vale ressaltar, que outras características são importantes no momento do dimensionamento, tais como:

- Tipo e inércia da máquina;
- Tipo de parada;
- Ciclo de trabalho,
- Precisão do controle;
- Torque;
- Entre outras.

De acordo com sua finalidade, os inversores de frequência são classificados de três formas:

- ***Pulse Width Modulated - PWM***

Segundo Mohan; Undeland e Robbins (2003), o principal objetivo de inversores que utilizam tal tecnologia é controlar a frequência e o valor eficaz da tensão de saída, de acordo com a carga, através da técnica de modulação por largura de pulso (PWM), a qual consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência e outro de alta frequência, chamados de modulante e portadora, respectivamente.

Para obter a saída desejada, o sinal de referência tem que possuir forma de onda semelhante a forma de onda do sinal de saída, isto é, no caso do inversor de frequência, em que a saída desejada é uma de tensão alternada, o sinal de referência assume uma forma senoidal. Quanto ao sinal da portadora, este geralmente, tem forma de onda triangular e possui frequência dez vezes maior que o sinal de referência.

Com o intuito de comparar os dois sinais, utiliza-se um modulador (comparador) e denomina-se o sinal de saída de sinal modulado, cuja largura dos pulsos dependerá da amplitude do sinal de referência. Os sinais de referência, da portadora e o modulado são apresentados na Figura 1.

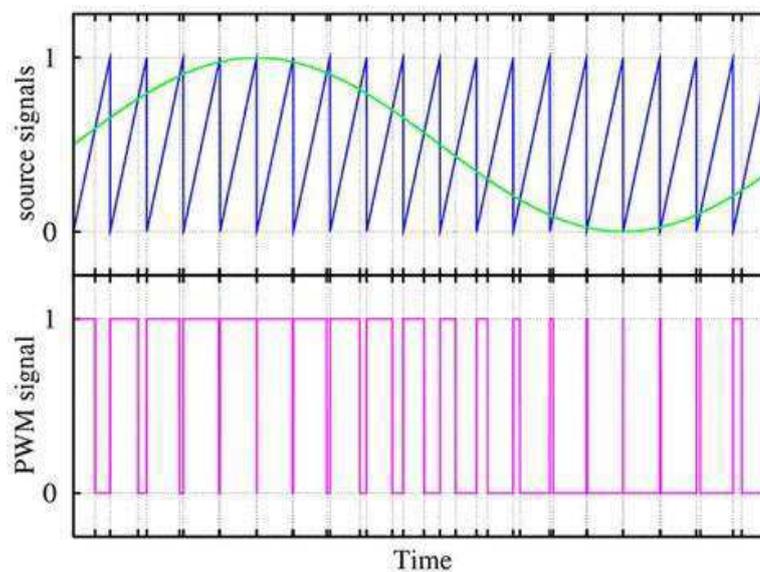


Figura 1. Sinais de referência e da portadora (*signal sources*) e sinal modulado (*PWM signal*). Fonte: <http://www.6moons.com/audioreviews/kharma2/matrix.html>

- **Onda quadrada**

Nos inversores desta categoria, a tensão de entrada é controlada a fim de controlar a magnitude da tensão de saída, sendo assim, este inversor controla apenas a frequência da tensão de saída. A tensão de saída apresenta uma forma de onda similar a de uma onda quadrada.

- **Monofásicos com cancelamento de tensão**

Este tipo de inversor apresenta uma técnica que funciona apenas para sistemas monofásicos. O controle da frequência e magnitude da tensão de saída é realizado a partir da

aplicação de uma tensão constante na entrada, mesmo sem o uso da técnica de modulação por largura de pulso.

3.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Independentemente do tipo de inversor, este dispositivo é composto, de modo generalista, por três blocos funcionais distintos, tais como: retificador, filtro e inversor, tal como apresentado na Figura 2. Para ter um bom entendimento desta categoria de conversor, faz-se necessário, compreender a funcionalidade de cada bloco que o constitui.

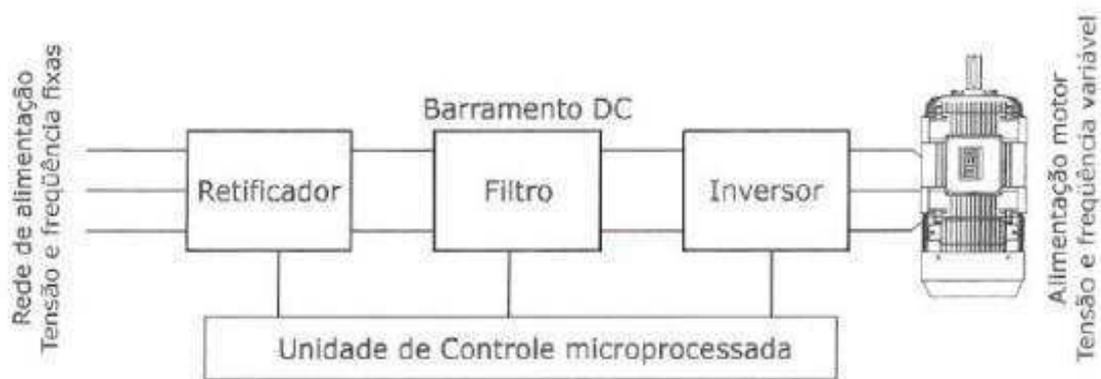


Figura 2. Diagrama de blocos de um inversor de frequência. Fonte: Guia de aplicação de inversor de frequência – Weg apud in Braga (2007).

3.1.1.1 RETIFICADOR

É o primeiro elemento ou etapa inicial do inversor de frequência, conectado à rede elétrica (monofásica ou trifásica), na maioria das vezes, composto por pontes trifásicas de diodo, tal como apresentado na Figura 3:

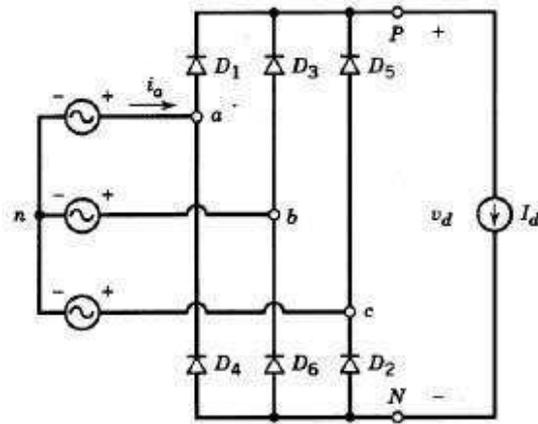


Figura 3. Circuito retificador trifásico não controlado. Fonte: MOHAN, UNDELAND, ROBBINS (2003).

Este tipo de circuito é responsável pela retificação da tensão da rede, ou seja, este elemento é capaz de converter a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua, de menor ondulação na saída, suprindo até cargas elevadas, de acordo com o chaveamento.

Pode-se observar que os diodos D_1 , D_3 e D_5 tem seus cátodos conectados ao terminal P e apenas aquele com maior tensão aplicada no seu ânodo é diretamente polarizado. Analisando os diodos D_2 , D_4 e D_6 , nota-se que seus ânodos estão conectados ao ponto N e somente aquele com menor tensão no cátodo é diretamente polarizado; sendo assim, a tensão de saída (v_d) do retificador será dada por $v_{Pn} - v_{Nn}$.

Na Figura 3 (a), apresenta-se a tensão das três fases na entrada do retificador, assim como, o máximo das tensões, demarcado como v_{Pn} e o mínimo das tensões v_{Nn} . A tensão na saída deste retificador é apresentada na Figura 3 (b).

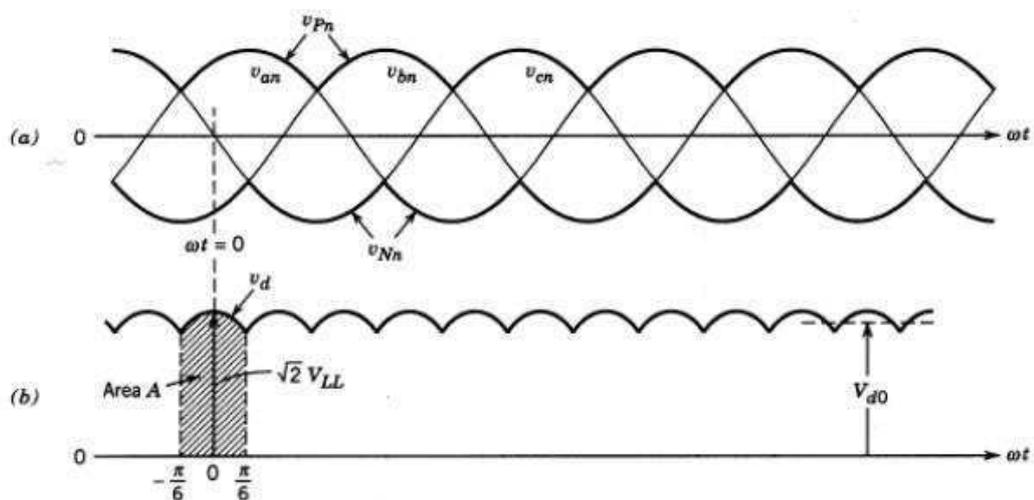


Figura 4. (a) Tensão trifásica da rede na entrada do inversor (b) Tensão retificada na saída do inversor. Fonte: MOHAN, UNDELAND, ROBBINS (2003).

3.1.1.2 FILTRO

É o segundo elemento, ou etapa secundária do inversor de frequência, composto por capacitores que tem a finalidade de reduzir as poucas ondulações da tensão da saída do retificador, proporcionando, assim, uma tensão contínua sem ondulações ao terceiro elemento – o inversor. Assim, a tensão entregue será, aproximadamente, para uma rede monofásica:

$$V_{dc} = \sqrt{2} * V_{rede} \quad (1)$$

Onde:

V_{dc} : tensão contínua entregue ao inversor;

V_{rede} : valor RMS da tensão de rede.

Já para uma rede trifásica, a tensão resultante na saída do filtro será dada por:

$$V_{dc} = \sqrt{3} * V_{frede} \quad (2)$$

Onde:

V_{dc} : tensão entregue ao inversor;

V_{frede} : amplitude da tensão correspondente a uma fase da rede.

De acordo com Fuentes (2005), os capacitores do filtro têm como objetivo a troca de potência reativa com o motor, ou seja, nos momentos em que o motor opera como “motor” ou “gerador”, são os capacitores que fazem estas permutas de energia com o conversor.

3.1.1.3 INVERSOR

Composto por semicondutores, geralmente transistores IGBT's, é o terceiro elemento, ou etapa final do inversor de frequência; tem a finalidade de converter a tensão contínua proveniente da saída do filtro em uma tensão senoidal de frequência variável. Este processo de conversão ocorre devido à modulação PWM, descrita na seção 3.1.

O sinal modulado resultante da modulação é aplicado à base do transistor, o qual funciona ora como uma chave aberta, na ausência de tensão (ausência de pulsos) e ora como uma chave fechada, quando há tensão em sua base.

Como apresentado na Figura 6, observa-se que dois transistores são conectados em série, e a condição para que haja um funcionamento normal, sem danos, é que eles operem alternadamente. Então, considerando que o primeiro transistor é polarizado somente com o nível positivo do pulso, deixando o ramo com uma tensão positiva, enquanto o segundo transistor está aberto. Do mesmo modo, quando polarizado, positivamente, o segundo transistor se fecha e aparece uma tensão negativa em sua saída; o mesmo processo ocorre para os demais ramos. A Figura 5 apresenta as tensões de saída dos ramos (tensões de fase - V_a e V_b) e a tensão de linha dada pela diferença entre as tensões de duas fases ($V_a - V_b$).

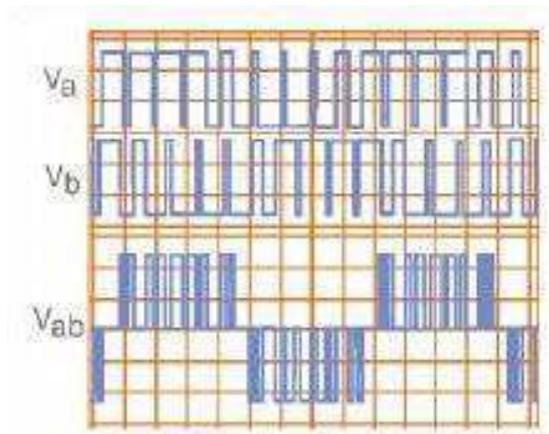


Figura 5. Tensões de fase e de linha na saída da etapa inversora. Fonte: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1508-modulao-pwm-nos-inversores-de-frequencia>

Então, pode-se dizer que, os microcontroladores são de fundamental importância, pois estes são responsáveis pelo controle dos semicondutores, assim como, haja vista que o tempo de operação de cada transistor é determinado pela largura de pulso do sinal PWM.

3.1.2 CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA

A configuração elétrica, conforme apresentada na Figura 2, basicamente, é a mesma para todos os conversores de frequência, desde os mais simples aos mais sofisticados. As pequenas alterações são em relação aos seus componentes, que com o passar dos anos de desenvolvimento, foram aprimorados.

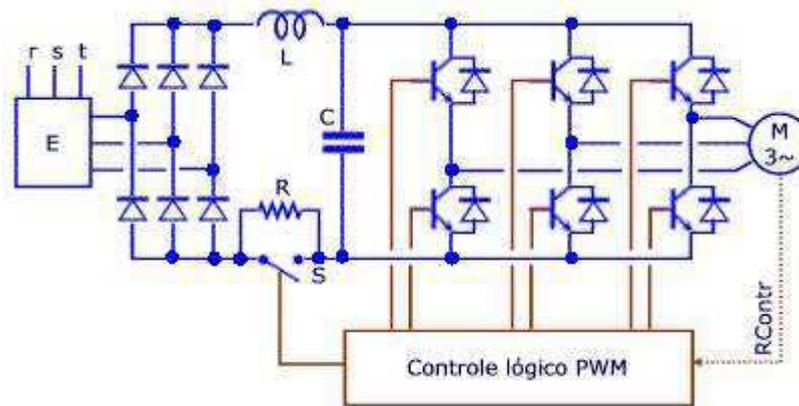


Figura 6. Diagrama elétrico básico de um inversor de frequência. Fonte: http://www.mspc.eng.br/electrn/fontes_130.shtml

Ao analisar a Figura 6, minuciosamente, observa-se que este conversor é composto por:

- Ponte de diodos (etapa do retificador);
- Capacitor e inversor (etapa do filtro);
- Chave que é normalmente fechada em série com um circuito de pré-carga que pode ser um resistor, relé ou contator para evitar pico de corrente devido à carga do capacitor.
- Ponte inversora constituída por transistores IGBT (etapa do inversor);
- Diodos conectados em anti-paralelo com o coletor e o emissor dos IGBT's para que, no caso de aplicações indutivas, evitem que elevadas tensões reversas sejam aplicadas aos IGBT's.
- Módulo de controle lógico PWM constituído de microcontroladores responsáveis pelo disparo dos IGBT's;
- R_{Contr} , de acordo com a aplicação, pode ser um sensor de rotação do motor ou sensor de pressão.

3.1.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Para compreensão das características, benefícios, assim como, desempenho, é necessário compreender como se dá o controle de velocidade que o inversor de frequência impõe ao MIT. Os inversores fabricados pela WEG, tal como CFW-11, fazem o controle de

velocidade através da *Vector Technology*, a qual permite que um só produto englobe as técnicas desenvolvidas para os seguintes tipos de controle:

- Controle escalar;
- Controle Vetorial;
 - ✓ Controle Vetorial com *encoder*;
 - ✓ Controle Vetorial *sensorless*.

3.1.3.1 CONTROLE ESCALAR

Este tipo de controle tem por objetivo manter o fluxo do motor constante (igual ao nominal), independentemente da variação de velocidade do motor. Para alcançar tal meta, utiliza-se a técnica denominada V/f constante, a qual propõe que a tensão de alimentação varie proporcionalmente em relação à frequência.

Constituído por bobinas trifásicas, as quais apresentam uma resistência R e uma indutância, o diagrama básico do estator de um MIT é apresentado na Figura 7:

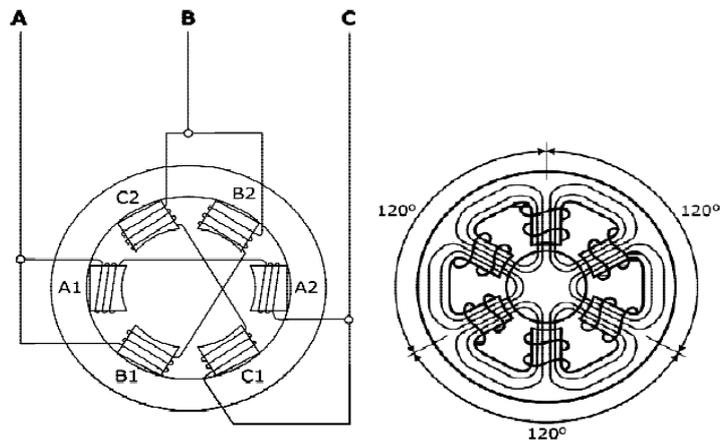


Figura 7. Esquemático de um estator de um motor de indução trifásico.

Sabendo que a corrente é dada por:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (3)$$

E que:

$$Z = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} \quad (4)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3), a corrente estatórica é dada por:

$$I = \frac{V}{\sqrt{(R^2 + X_L^2)}} \quad (5)$$

Relembrando que:

$$X_L = 2\pi Lf \quad (6)$$

Quando comparado o valor da resistência com o valor da reatância indutiva, dada pela Eq. (6), percebe-se que para valores de frequência acima de 30 Hz, o valor da resistência se torna irrelevante, podendo ser desprezado. Assim, a corrente estatórica, é dada pela razão entre a tensão de alimentação e a tal reatância, que, por sua vez, depende da indutância L e da frequência f .

Sabendo que a indutância L é um dos parâmetros inerentes ao motor, dependente da geometria das bobinas estatóricas, única alternativa para se variar a velocidade do MIT é variar a frequência e a tensão de alimentação, mantendo uma relação proporcional.

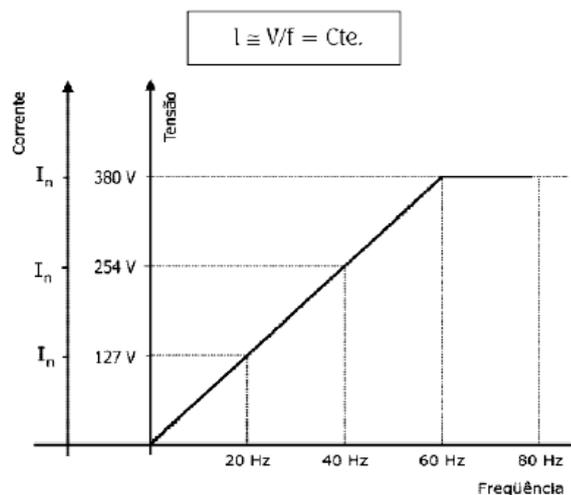


Figura 8. Gráfico de Corrente/Tensão *versus* Frequência. Fonte: GURGEL, 2009.

Analisando o gráfico acima, percebe-se que há uma relação linear ente tensão e a frequência de alimentação, a tensão de rede, também chamada de tensão máxima (380 V), é

atingida na frequência da rede (60 Hz), e a partir deste ponto a corrente não poderá mais crescer linearmente, como até então. Segundo Gurgel (2009), essa área, acima dos 60 Hz, é denominada região de enfraquecimento de campo.

Já para valores abaixo de 30 Hz, a resistência R não é mais tão insignificante quando comparado ao da reatância indutiva X_L , logo, aquela não é mais desprezada no cálculo da corrente circundante no estator da MIT, então para manter a proporcionalidade entre a tensão e frequência, a corrente do motor diminui consideravelmente.

Então, pode-se afirmar que este tipo de controle de motor é utilizado desde aplicações simples, que requerem uma dinâmica menos elevada, sem controle de torque ou precisão, a aplicações que requerem vários motores conectados a um mesmo inversor (GURGEL, 2009).

Este tipo de controle ainda apresenta uma variação – o controle escalar quadrático, o qual reduz as perdas no motor, economizando ainda mais energia, no acionamento com inversor. Ideal para aplicações em que cargas possuam a característica torque \times velocidade quadrática.

3.1.3.2 CONTROLE VETORIAL (VVC)

Devido aos avanços da tecnologia, no que diz respeito ao controle da velocidade de motores realizado por inversores de frequência, surgiu o denominado controle vetorial, o qual possui uma lógica embasada nas equações dinâmicas do motor a fim de desvincular o controle de fluxo do conjugado, por meio de diversas transformações variantes no tempo.

Conversores de frequência que realizam este tipo de controle recebem tal denominação devido à representação de grandezas por meio de vetores. Através desta técnica, a corrente que circula no estator do MIT pode ser dividida em duas componentes vetoriais – a componente de magnetização I_d e outra responsável pelo torque I_q .

Segundo Gurgel (2009), o nível de desempenho do inversor, depende, fundamentalmente, da qualidade com a qual as componentes da corrente estatórica são identificadas e controladas.

A Figura 9 apresenta um diagrama vetorial, o qual ilustra os vetores de tensão e corrente, assim como, a representação das duas componentes da própria – I_d e I_q .

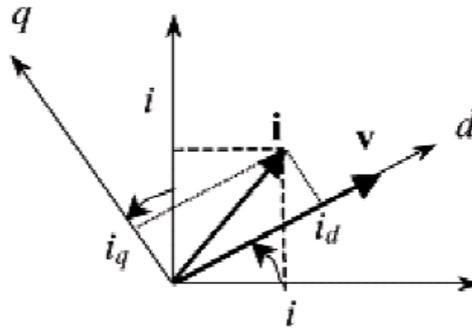


Figura 9. Diagrama vetorial para tensão e corrente no estator de um MIT. Fonte: GURGEL, 2009.

Com o intuito de controlar o motor, faz-se necessário calcular por diversas vezes, as correntes presentes no estator do motor definidas pelas equações dinâmicas, como citado. Então, é imprescindível que haja o conhecimento, ou, até mesmo, o cálculo de parâmetros da MIT que será utilizada, como a indutância e resistência do motor e estator, a indutância de magnetização, além da curva de saturação. Para isto, inversores de frequência vetoriais são dotados de microprocessadores eficientes.

Na prática, os inversores de frequência possuem os valores dos parâmetros dos MIT's mais comuns já pré-programados ou funções de auto-ajuste são utilizadas para o cálculo destes.

Quanto à implementação, pode-se classificar ainda o controle vetorial de duas formas: controle vetorial com *encoder* e controle vetorial *sensorless*.

3.1.3.2.1 CONTROLE VETORIAL COM *ENCODER*

Neste inversor há o controle, com alta precisão, da velocidade e de torque, mesmo em velocidades muito baixas. A realimentação da velocidade é feita por um dispositivo denominado *Encoder*, que nada mais é que um gerador de pulsos, responsável por converter movimentos rotativos em impulsos elétricos de onda quadrada. Em linhas gerais, o *encoder* consegue calcular a I_d e a I_q que compõem a corrente estatórica.

3.1.3.2.2 CONTROLE VETORIAL *SENSORLESS*

No controle *sensorless*, não há necessidade de realimentação de velocidade, operando, assim em malha aberta. A velocidade é calculada através de artifícios matemáticos, o que torna a rotina de controle de velocidade, a qual é baseada no modelo matemático do motor de indução, mais complexa, tendo isso em vista, estes inversores, possuem desempenho menor que os inversores por realimentação. Entretanto, possuem dinâmica melhor que os inversores escalares.

Uma das principais vantagens deste tipo de inversor é a facilidade de ajuste, pois, há necessidade apenas do usuário entrar com os dados de placa do motor utilizado e executar a rotina de auto ajuste, que o inversor consegue se autoconfigurar, funcionando de maneira otimizada.

Inversores vetoriais são utilizados em situações que exigem um alto desempenho dinâmico, precisão na regulação de velocidade e respostas rápidas, além disso, inversores deste tipo são capazes de operar sem oscilações de torque e em baixas velocidades, mesmo quando há variação na carga.

3.2 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO

A fim de controlar a velocidade dos MIT's, pode-se atuar diretamente sobre três parâmetros inerentes aos mesmos, a saber:

- **Escorregamento**

A alteração neste parâmetro é interessante para aplicações em que a faixa de variação de velocidade seja pequena ou que a variação de velocidade seja contínua ou para aquelas que apresentem perdas rotóricas para o motor.

- **Número de pólos**

Já a atuação sobre este parâmetro se faz necessária em aplicações em que há a variação discreta de velocidade ou que apresentem sobredimensionamento da carcaça do motor.

- **Frequência da tensão estatórica**

Por fim, a alteração neste parâmetro é cabível em aplicações que requeiram a variação contínua de velocidade e, é esta característica que o inversor de frequência modifica para controlar a velocidade do motor.

A equação que relaciona estes três parâmetros com a velocidade é dada por:

$$n = \frac{120 * f}{p} * (1 - s) \quad (7)$$

Onde:

n : velocidade do motor;

f : frequência de alimentação;

p : número de pólos;

s : escorregamento.

Analisando a equação acima, observa-se que a velocidade do motor varia linearmente com a frequência da tensão de alimentação. Esta linearidade se dá até o ponto em que a frequência de alimentação se torna igual à frequência nominal do motor. Após isto a tensão se iguala à tensão nominal do motor, permanecendo constante, apesar da variação de frequência, tal como apresentado no gráfico da Figura 10.

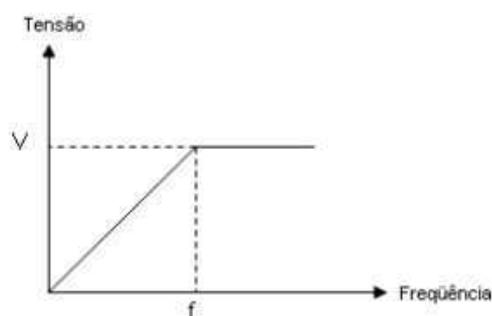


Figura 10. Gráfico de tensão *versus* frequência. Fonte: Guia Técnico WEG - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.

O fluxo de magnetização também passa por modificações ao se variar a frequência da tensão de alimentação, conforme a seguinte equação:

$$\varphi_m = k_2 * \frac{V_e}{f} \quad (8)$$

Onde:

φ_m : fluxo de magnetização

k_2 : constante do motor

V_e : tensão do estator

f : frequência de alimentação

Embasando-se na Figura 8 e na Eq. (8), para cálculo do fluxo de magnetização, é possível observar que a partir da frequência nominal do motor, há uma redução no fluxo de magnetização, caracterizando uma região de enfraquecimento de campo.

Conseqüentemente, observa-se, também uma redução no torque do MIT, pois:

$$T = k_1 * \varphi_m * I_r \quad (9)$$

Onde:

T : torque desenvolvido pelo MIT

k_1 : constante do motor

φ_m : fluxo magnetizante

I_r : corrente do rotor

Tal região é apresentada no gráfico da Figura 11:

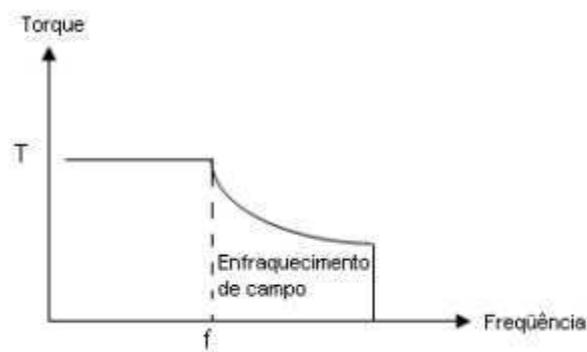


Figura 11. Gráfico de torque *versus* frequência. Fonte: Guia Técnico WEG - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.

A potência útil do motor é dada por:

$$P_u = T * w \quad (10)$$

Onde:

w : velocidade angular.

Então, pode-se afirmar que esta grandeza cresce linearmente até a frequência nominal do motor, tornando-se constante após isto, tal como representado no gráfico da Figura 12:

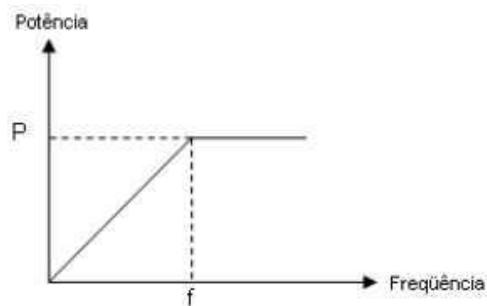


Figura 12. Gráfico da potência *versus* frequência. Fonte: Guia Técnico WEG - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.

3.3 INFLUÊNCIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO ACIONAMENTO DE MOTORES

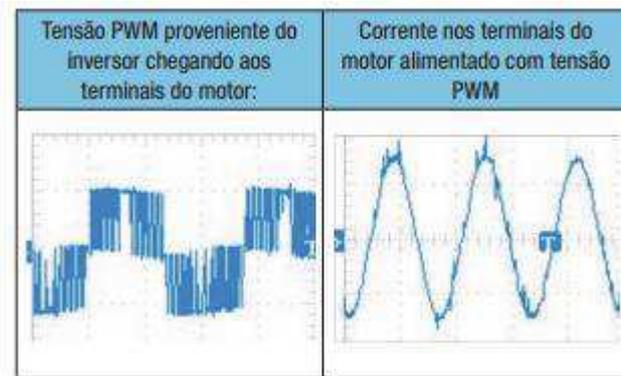
3.3.1 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Devido à interação entre o inversor e o MIT, há o surgimento de componentes harmônicas na corrente circulante, cujas frequências são superiores à frequência fundamental, haja vista que, este conjunto (inversor mais MIT) é visto pela fonte de alimentação como uma carga não linear (WEG, 2009).

Por sua vez, o motor enxerga a tensão proveniente da modulação PWM, como, uma tensão pulsada na saída do inversor, entretanto, uma corrente, praticamente, senoidal. Então, pode-se afirmar que, a tensão é quem possui componentes harmônicas de maior amplitude.

As formas de onda de tensão e corrente que chegam ao motor são apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1. Formas de onda de tensão e corrente provenientes do inversor. Fonte: Guia Técnico WEG - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM



De acordo com sua origem, as distorções harmônicas são classificadas de duas formas:

- *Pulse Width Modulation* (PWM)

Distorções causadas pela modulação são de alta frequência, inerentes ao inversor e segundo Michels, *et al.* (2005), essas componentes harmônicas podem ser atenuadas através da utilização de um filtro LC de saída – técnica corretiva.

- Cargas com comportamento não-linear

Já distorções, assim classificadas, são de baixa frequência, e, além disso, são dependentes da corrente drenada pela carga não linear e da impedância de saída do inversor nestas frequências, dadas pela relação L/C e pela capacidade da lei de controle de atenuá-las (quando o sistema opera em malha fechada) (MICHELS et al., 2005).

Para se estimar o quanto as harmônicas existentes distorcem os valores de tensão e corrente da rede, há um índice denominado de distorção harmônica total (TDH), o qual é calculado através de:

$$TDH = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1}\right)^2} \quad (9)$$

Onde:

A_1 : valor eficaz da componente fundamental de corrente ou tensão.

A_n : valor eficaz das demais componentes harmônicas de corrente ou tensão.

Segundo Teixeira, 2009, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) realizou um estudo sobre a vida útil do isolamento de motores quando estes são submetidos aos desbalanceamentos de tensão e harmônicos. Estes motores foram analisados através do seu modelo térmico, montados a partir de informações de placa, propriedades térmicas e coeficientes de transferência térmica. Constatou-se, então, uma considerável diminuição do tempo de vida do isolamento quando os motores são alimentados por tensões distorcidas. Esta informação foi comprovada através de simulações como a de uma máquina que é alimentada por uma fonte de tensão com WTDH (distorção harmônica total de tensão) igual a 7,4% e um leve desequilíbrio entre as fases (3%). Operando em carga nominal, a redução de vida útil do isolamento desta máquina elétrica foi de 24,3 %.

O surgimento de harmônicas aliado à modulação PWM e à frequência de chaveamento podem influir negativamente no desempenho do motor, ocasionando, como por exemplo:

- Sobreaquecimento devido ao efeito pelicular, no qual há uma tendência da corrente percorrer a superfície do condutor, sendo este efeito proporcional à intensidade da corrente e raiz quadrada da frequência. O aumento de temperatura, também, pode ocorrer devido à presença de componentes harmônicas no fluxo as quais produzem torques com sentidos opostos (por exemplo, 5^a e 7^a harmônicas);
- Diminuição de rendimento e vida útil do motor, devido às perdas de cobre e ferro;
- Ruído audível, devido à vibração gerada nos mancais do motor, haja vista que o motor é projetado para receber uma tensão senoidal ao invés de uma tensão pulsada, como apresentada na Figura 5.

De acordo com Weg (2009), é possível reduzir as harmônicas decorrentes da utilização de um inversor de frequência e, também, dos efeitos subsequentes ao surgimento destas componentes, através dos seguintes métodos:

➤ **Instalação de filtros passivos de saída**—além de ocasionar uma queda de tensão, reduzindo a potência do motor, há um aumento de custo;

➤ **Melhoramento da qualidade de modulação** – esta técnica proporciona um aumento no rendimento, além de um controle mais eficiente de tensão, apesar de não haver acréscimo nos custos de instalação;

➤ **Aumento na frequência de chaveamento** – este método ocasiona um aumento nas perdas por chaveamento, implicando em diminuição do rendimento, porém há um acréscimo nas correntes de fuga para a terra.

➤ **Utilização do inversor com mais níveis** – o controle realizado pelo inversor de frequência se torna mais complexo, há uma perda de confiabilidade, além do aumento nos custos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir é apresentado todo o material empregado na elaboração de experimentos e montagens com o inversor de frequência CFW-11, assim como, os métodos e procedimento adotados. Todas as montagens foram realizadas nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.1 MATERIAL

Os materiais e equipamentos utilizados para realização dos experimentos foram:

➤ **Bancada didática para treinamento WEG**

- ✓ Tensão de Alimentação: 220, 380 ou 440Vca (trifásico);
- ✓ Classe de Tensão: 600Vca;
- ✓ Tensão de Comando: 220Vca;
- ✓ Frequência: 60Hz;
- ✓ Dimensões Aproximadas: A x L x P (1290 x 1050 x 500 mm).

Esta bancada é apresentada na Figura 13, assim como, seus dispositivos e os locais para alocação do inversor e demais placas.



Figura 13. Bancada didática da WEG. Fonte: Catálogo WEG – Bancada didática BDMW.

Para demais informações sobre a Bancada Didática WEG, sugere-se a consulta ao catálogo da Bancada Didática BDMW, disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-bancada-didatica-bdmw-50023199-catalogo-portugues-br.pdf>>.

➤ **Motor de Indução Trifásico (MIT)**

- ✓ Potência de 1,5 CV;
- ✓ Tensão nominal: 220 / 380 Vca trifásico;
- ✓ Frequência: 60 Hz;
- ✓ Número de pólos 4;
- ✓ Velocidade: 1.715 rpm;
- ✓ Alto rendimento.

O motor de indução trifásico utilizado em todos os experimentos e que possui as características citadas acima está apresentado na Figura 14.

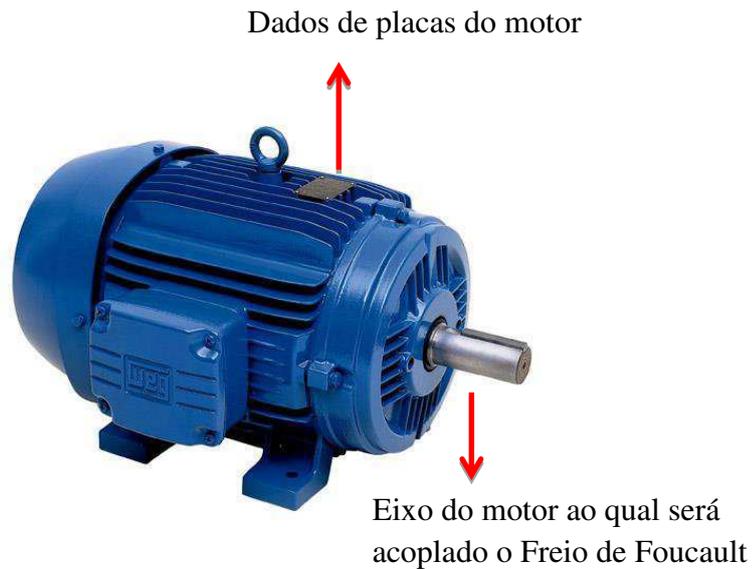


Figura 14. Motor de Indução Trifásico Plus WEG.

➤ **Inversor de frequência CFW-11**

- ✓ Tensão de alimentação: 200 a 240V monofásica;
- ✓ Corrente de saída: 6 a 10A;
- ✓ Potência: 1,5 a 3 CV;

Os inversores de frequência WEG, série CFW-11, são dotados da tecnologia mais avançada disponível mundialmente para variação de velocidade em motores de indução trifásicos e de design arrojado, apresentam um alto grau de compactação e uma grande gama de funcionalidades disponíveis (WEG, MANUAL DE PROGRAMAÇÃO, 2013).

De simples instalação e operação, este produto dispõe de recursos já otimizados em software, facilmente parametrizáveis, através de interface homem-máquina (IHM) simples, que habilitam-no para utilização em controle de processos e máquinas industriais (WEG, 2012). Tal inversor é apresentado na Figura 15.



Figura 15. Inversor de frequência CFW-11, versão 3.1X da WEG.

Assim como outros dispositivos, tais como os *soft-starters*, existentes no mercado, os inversores de frequência são dotados de interface homem-máquina (IHM), a qual possibilita que o usuário ajuste os parâmetros inerentes ao motor, programe-o de acordo com as características desejadas (velocidade, tipo de controle, entre outras) e verifique o *status* do sistema.

A Figura 16 apresenta a IHM do deste inversor, bem como, as funções desempenhadas por cada tecla.

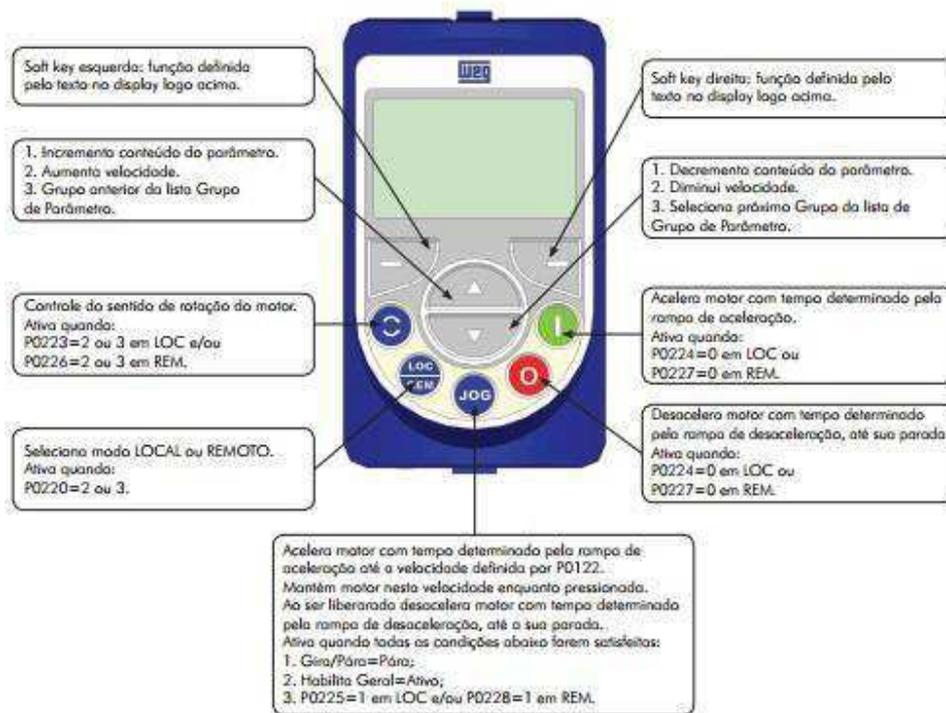


Figura 16. IHM do inversor de frequência CFW-11. Fonte: Manual do Usuário: Inversor de Frequência CFW-11 WEG.

Através do ajuste de parâmetros adequados, o *display* pode exibir outras variáveis no modo monitoração ou apresentar conteúdo dos parâmetros em forma de gráfico de barras ou caracteres maiores (WEG, Manual do usuário, 2012).

A utilização deste conversor de frequência, no acionamento de motores de corrente alternada (CA) de indução trifásicos, traz os seguintes benefícios:

- Acionamento silencioso do motor;
- Interface com teclado de membrana táctil (IHM padrão e remota);
- Programação flexível;
- Alto torque de partida;
- Instalação e operação simplificadas;
- Dimensões compactas;
- Controle escalar ou vetorial *sensorless* ou com *encoder*.

Dentre as principais aplicações deste tipo de inversor estão o acionamento de:

- Ventiladores;
- Exaustores;
- Bombas centrífugas;
- Esteiras;
- Agitadores.

Com relação ao grande leque de recursos e funções especiais, pode-se citar:

- Interface Homem-Máquina incorporada;
- Diagnóstico de problemas e Auto-Ajuste;
- Compensação de escorregamento (controle V/F);
- Função *Multi-Speed* (até 8 velocidades pré-programadas);
- Seleção do sentido de rotação.

➤ **Freio de Foucault**

Para efeito de simulação de carga, utilizou-se um freio de Foucault, o qual é constituído um disco metálico, dois dinamômetros e duas bobinas, tal como representado na Figura 17.

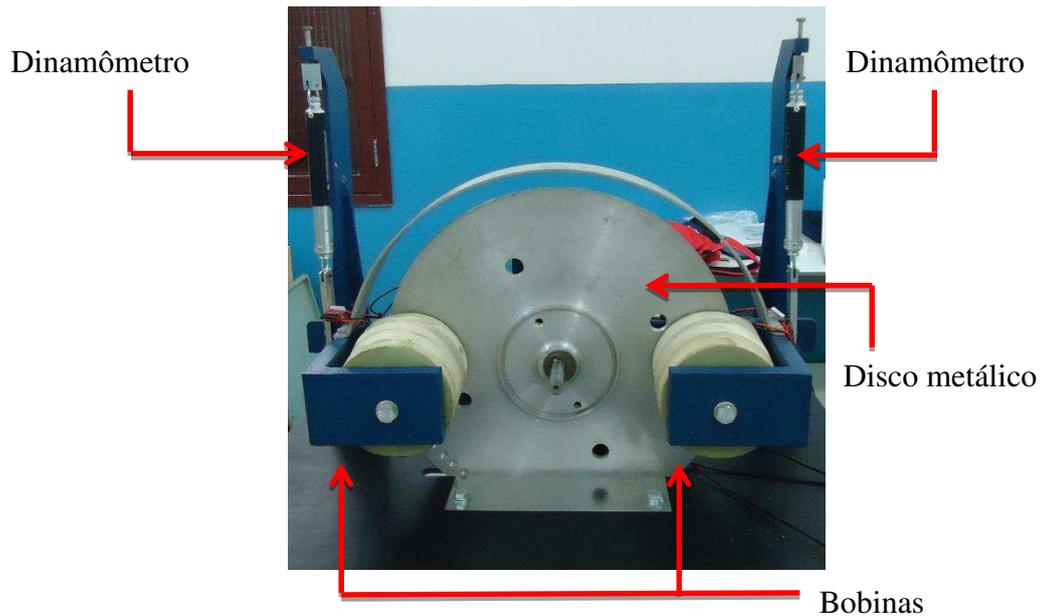


Figura 17. Freio de Foucault WEG.

Ao acionar o motor, o qual tem seu eixo acoplado ao freio magnético, o disco metálico irá girar e esta oscilação, na presença de eletroímãs, provoca uma variação do fluxo magnético do próprio disco, induzindo, assim, o surgimento de uma força eletromotriz. Por sua vez, esta força eletromotriz desencadeia o aparecimento de correntes parasitas, ou de Foucault, que são correntes emergentes em um condutor com fluxo magnético variante.

De acordo com a lei de Lenz, os sentidos destas correntes parasitárias se opõem à variação do fluxo magnético. Com o campo magnético oriundo destas correntes contrário ao campo magnético dos ímãs, são gerados pólos magnéticos, os quais produzem forças que se opõem ao movimento do disco.

Um efeito que surge devido as correntes de Foucault é a dissipação de potência caracterizada pelo efeito Joule, o qual relaciona a elevação de temperatura com a corrente passante pelo condutor.

Assim os freios magnéticos também são conhecidos como freios de Foucault, sendo utilizados, principalmente, na frenagem de trens, pela sua precisão.

➤ **Cabos isolados.**

Estes dispositivos foram utilizados em todas as montagens, devido à segurança que proporcionam tanto para os usuários quanto para os equipamentos, por isolarem eletricamente os condutores entre si e do meio que o circunda.

4.2 MÉTODOS

Para iniciar o processo experimental, verificou-se atentamente o manual da bancada didática eletrotécnica industrial, fornecido pela WEG e em conformidade com as instruções fornecidas para alimentar a bancada com 380 V, conectou-se as três fases de alimentação (R, S e T), o cabo neutro e o condutor terra. A figura 18 apresenta tal conexão:

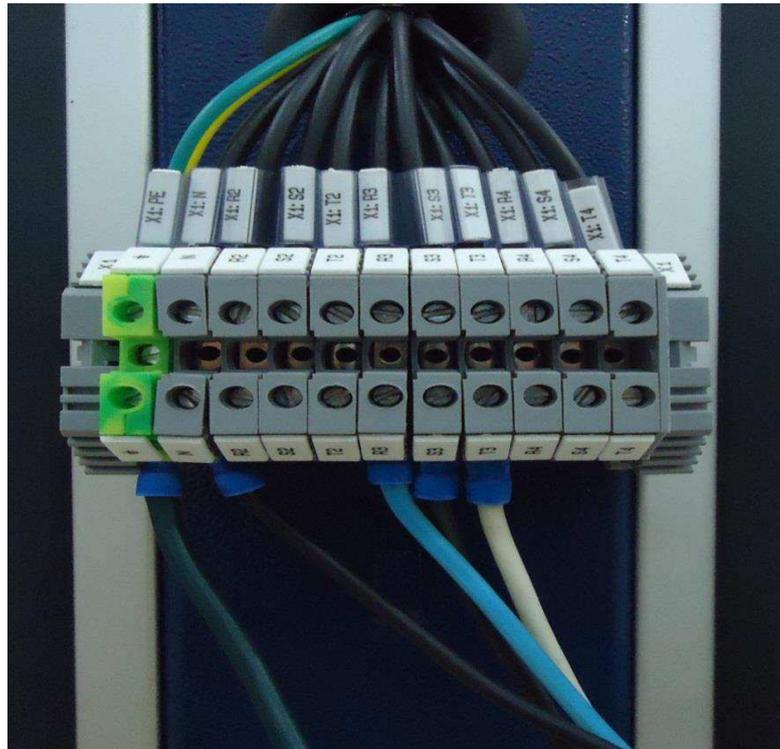


Figura 18. Alimentação da bancada didática eletrotécnica industrial.

Em um segundo momento, verificaram-se o Kit controle de velocidade de motores CA – manual do professor e do aluno, ambos fornecidos pela WEG, e, de acordo com tais, identificou-se o tipo do motor que seria utilizado para os experimentos.

Após sua instalação, acoplou-se ao eixo do motor um disco metálico, constituinte do freio de Foucault, também fornecido pela WEG, tal como apresentado na Figura 19:

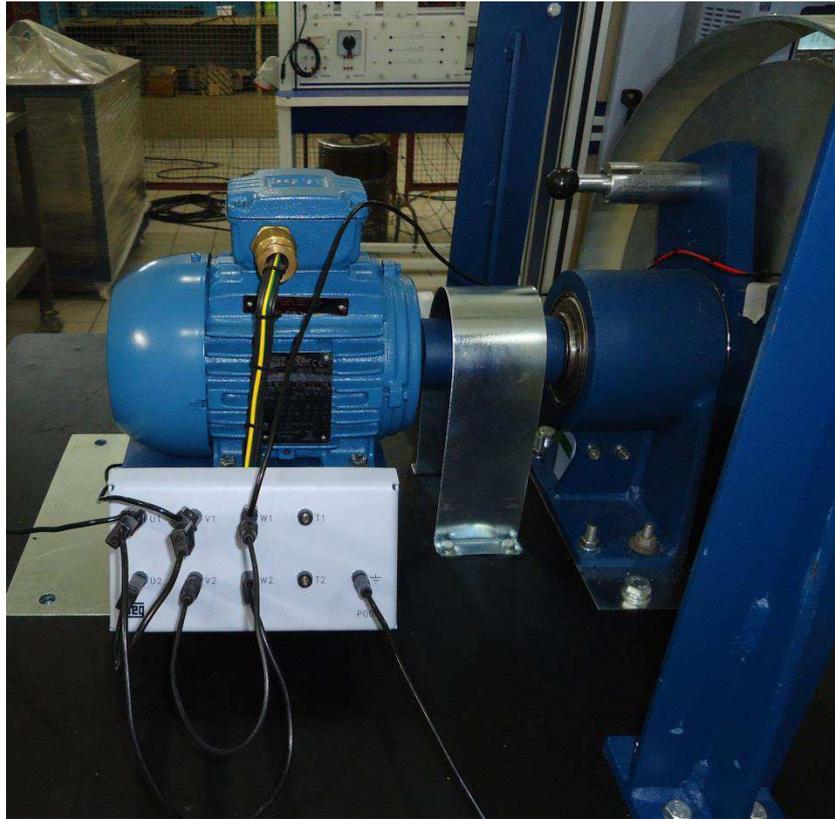


Figura 19. Motor de indução trifásico com eixo acoplado a um disco metálico.

A partir de, então, embasando-se nos manuais do professor e do aluno, foram realizadas as seguintes montagens e elaboração de guias experimentais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com todo o equipamento preparado, o disco metálico acoplado ao eixo do motor trifásico, o inversor instalado na bancada didática e a mesma energizada devidamente, partiu-se para elaboração dos novos guias experimentais, os quais são apresentados sucintamente, a seguir:

5.1 RESULTADOS

- **Comandos através da Interface Homem-Máquina**

Este experimento tem como objetivo propiciar ao aluno efetuar a montagem do circuito da Figura 20 de maneira correta, com segurança, familiarizar-se com as teclas da IHM do inversor de frequência e com a disposição dos parâmetros de acordo com os menus. Além disso, este guia permitirá ao usuário conhecer que, a parametrização do inversor pode ser realizada de acordo com as necessidades e os tipos de motores. Por fim, possibilitará ao usuário acionar o motor através da IHM do inversor.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 1 e o esquema elétrico a ser utilizado é apresentado na Figura 20:

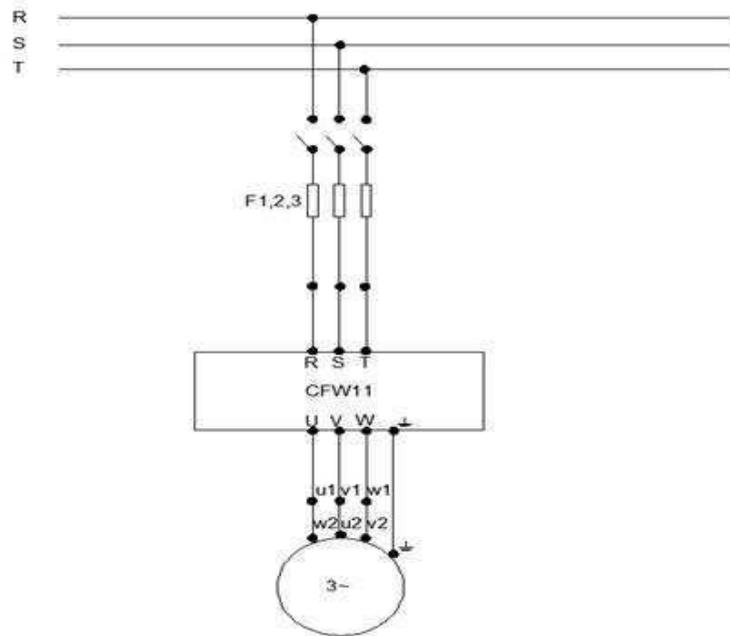


Figura 20. Esquemático da conexão entre inversor e motor.

- **Definição dos limites de velocidade**

Este experimento também permitirá ao aluno efetuar a montagem do circuito da Figura 20 corretamente e com segurança; permitir-lhes saber que os limites de velocidade do motor podem ser alterados através da IHM, conforme cada aplicação e uma vez que esses limites são impostos, qualquer alteração através das teclas da IHM para velocidades acima do limite de velocidade máxima e abaixo do limite de velocidade mínima não são permitidas. Além disso, permite ao usuário perceber, através do *display*, que as frequências apresentadas em relação às velocidades mínimas e máximas estão de acordo com a teoria.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 2 e o esquema elétrico a ser utilizado é apresentado na Figura 20.

- **Definição das Rampas de Aceleração e Desaceleração**

Além de proporcionar ao aluno mais segurança na montagem do circuito da Figura 20, este experimento permitirá ao aluno saber que através da parametrização, se pode impor tempos diferentes para o motor atingir a velocidade máxima e parar totalmente, podendo ser comprovados através cronometragem do tempo.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 3 e o esquema elétrico a ser utilizado é apresentado na Figura 20.

- **Comando Via Bornes**

Tal como os experimentos anteriores, este guia tem como propósito dar maior segurança e confiabilidade ao usuário na montagem dos circuitos elétricos das Figuras 20 e 21; permitir ao usuário conhecer outra forma de comando do inversor, possibilitando-o parametrizar para operar no modo remoto. Também possui objetivo de mostrar que o controle de velocidade pode ser realizado analogicamente através do potenciômetro eletrônico, além de dar a percepção ao usuário da diferença entre o ajuste da velocidade através do potenciômetro e da IHM.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 4 e os esquemas elétricos a serem utilizados são apresentados nas Figura 20 e 21.

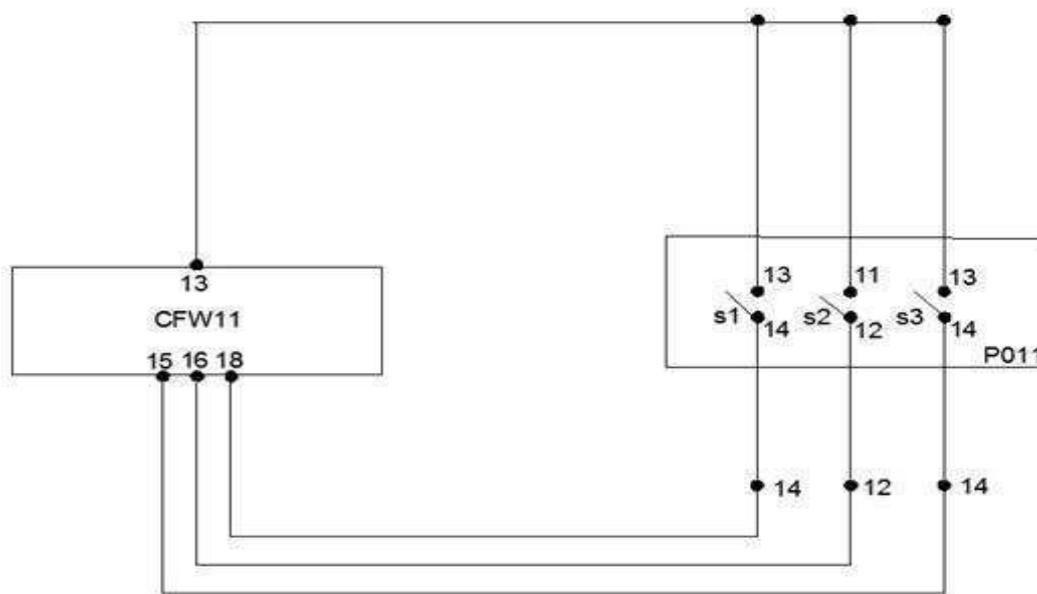


Figura 21. Esquemático da conexão entre o inversor e as chaves seletoras.

- **Parametrização do *Multi-speed***

Este quinto experimento possui objetivo de proporcionar ao usuário maior segurança na montagem dos diagramas elétricos das Figuras 20 e 22, além de permitir ao usuário de

conhecer a lógica *multi-speed*, parametrizando o inversor para operar no modo remoto (comando via bornes) juntamente com este tipo de controle de múltiplas velocidades. Também, possibilitar ao usuário verificar que através da combinação das chaves seletoras, as velocidades atingidas pelo motor são as mesmas impostas no inversor.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 5 e os esquemas elétricos a serem utilizados são apresentados nas Figuras 20 e 22.

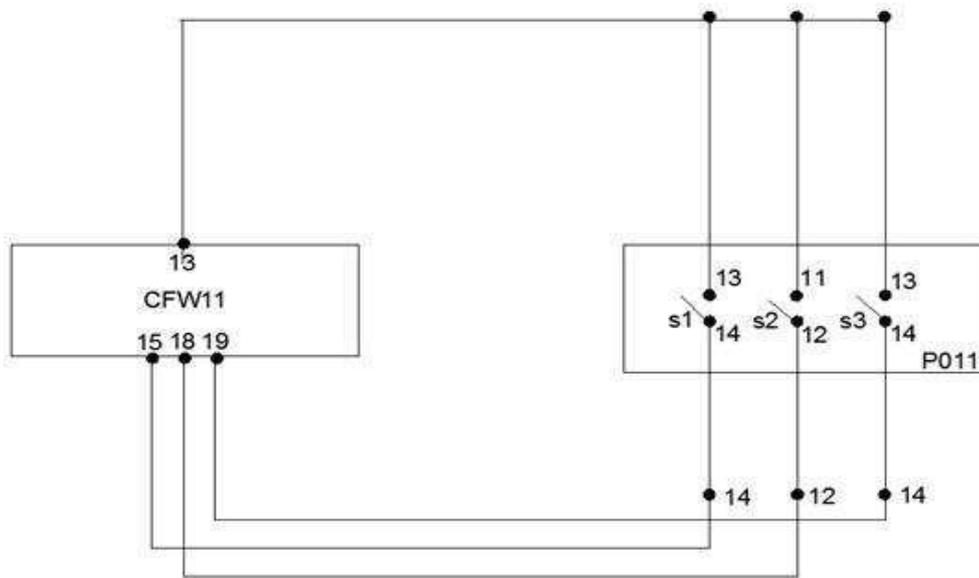


Figura 22. Esquemático da conexão entre o inversor e as chaves seletoras.

- **Parametrização do Potenciômetro Eletrônico**

Após a montagem dos circuitos das Figuras 20 e 22 de maneira correta, este guia possibilitará ao usuário conhecer como se parametriza o inversor para operar com entradas digitais para acelerar e desacelerar o motor através das chaves seletoras ao invés de operar diretamente com o potenciômetro, além de possibilitar a comprovação da parametrização realizada.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 6 e os esquemas elétricos a serem utilizados são apresentados nas Figuras 20 e 22.

- **Parametrização do Comando a Três Fios**

Considerando a montagem dos circuitos das Figuras 20 e 22 para realização dos experimentos anteriores, este guia tem a finalidade de apresentar ao usuário outra lógica de comando do inversor – *start/stop* e como parametrizá-lo para tal fim. Outro propósito importante do guia é proporcionar ao usuário a percepção de que o motor pode ser acionado e desligado através de, apenas, um pulso nas chaves seletoras.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 7 e os esquemas elétricos a serem utilizados são apresentados nas Figuras 20 e 22.

- **Auto Ajuste para Controle Vetorial**

Para realização deste experimento, só é necessário, apenas, a montagem do circuito elétrico da Figura 20, salientando sempre que para o acionamento de qualquer tipo de motor, é necessário que o usuário verifique se o esquema de ligação contido na placa do motor confere com o da Figura 20, caso não, efetuar o esquema da placa. Além disto, este guia possibilita o usuário discernir entre os tipos de controle escalar e vetorial, parametrizar o inversor para o modo vetorial, e verificar através da IHM, que após certo tempo, este conversor é capaz de estimar parâmetros que são inerentes ao motor.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 8 e o esquema elétrico a ser utilizado é apresentado na Figura 20.

- **Simulação de Carga com Freio de Foucault**

Tal como os experimentos anteriores, este guia permitirá ao aluno efetuar a montagem do circuito da Figura 23 de maneira correta e segura; entender o princípio de funcionamento do freio de Foucault; observar que apesar da variação de carga através do inversor, a velocidade do motor permanece constante e, por fim, possibilitar ao usuário a percepção de que o inversor é capaz de proteger o motor, no caso de uma sobrecarga.

O guia para realização deste experimento se encontra no Apêndice 9 e o esquema elétrico a ser utilizado é apresentado na Figura 23:

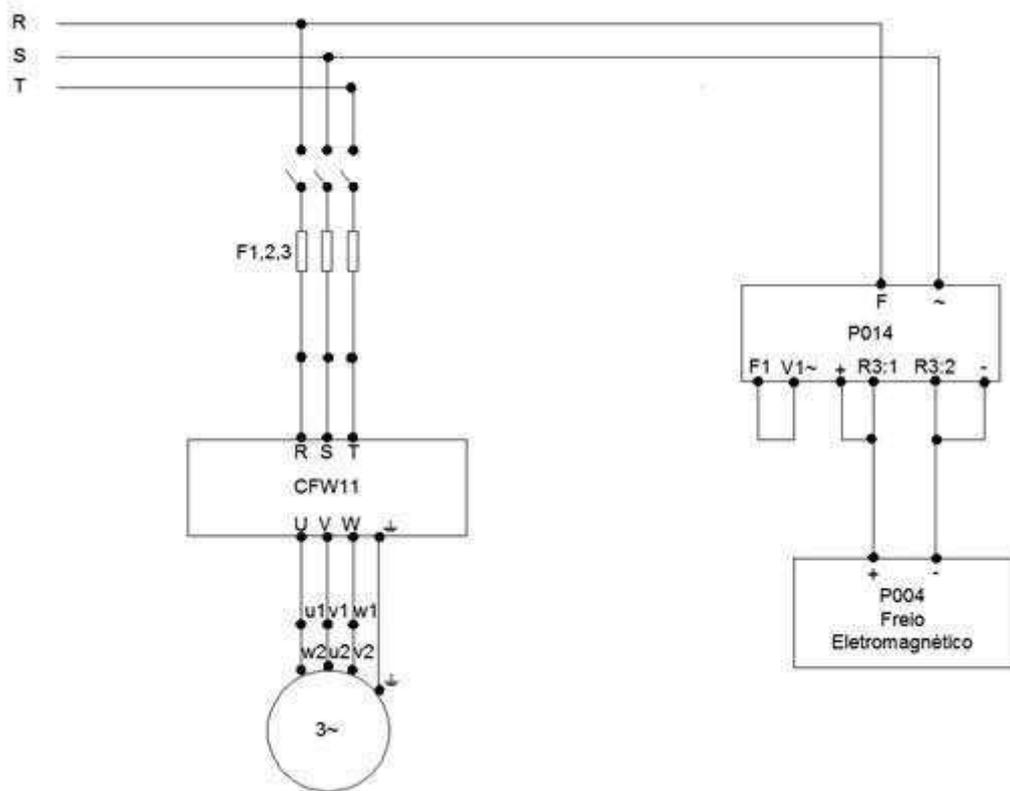


Figura 23. Esquemático da conexão entre o inversor, motor e freio de Foucault.

5.1 DISCUSSÃO

É possível observar que os objetivos de todos os guias apresentam uma similaridade no que diz respeito à montagem correta e segura dos diagramas elétricos (aspectos adquiridos através de uma interpretação correta dos próprios circuitos) como método de precaução à integridade dos usuários e aos equipamentos manuseados. Outro tópico de extrema importância é a leitura correta dos dados de placa do motor e inserção destes parâmetros no inversor.

Corroborando com Teixeira, 2009, tal como descrito na seção 3.3.1, com a realização destes ensaios, puderam-se observar aspectos negativos trazidos pelo inversor em relação ao desempenho do motor, tais como vibração e ruído audível, devido ao surgimento de harmônicas aliado a modulação PWM e à frequência de chaveamento, diminuindo assim a vida útil do motor, apesar do acionamento silencioso.

Apesar das consequências negativas causadas pelo acionamento de motores através destes conversores, o uso destes tem ganhado cada vez mais espaço nos mais diversos setores industriais, tanto pela sua praticidade quanto facilidade de operação.

O inversor utilizado, CFW-11, um dos mais sofisticados do mercado, possui uma interface auto explicativa, porém é imprescindível que o usuário saiba como utilizá-lo de forma otimizada, distinguindo as situações de aplicação e recorrendo ao manual de programação do inversor no caso de dúvidas.

Uma função interessante é o auto ajuste, a qual é capaz de estimar parâmetros inerentes ao motor que não estão disponíveis em sua placa, a partir da aplicação de tensões e correntes no motor, com o surgimento de um ruído audível.

Um aspecto de extrema importância que os inversores de frequência trazem é a identificação das possíveis falhas que o motor pode vir a ter, indicando através de seu *display*, o código da falha e o motivo da falha, facilitando ainda mais a correção destes erros pelo operador.

Então, pode-se dizer que, em contraposição às desvantagens comprovadas tanto na teoria quanto na prática, os inversores, com a evolução tecnológica, vem apresentando mais e mais vantagens, a saber:

- Facilidade de operação;
- Interface auto explicativa;
- Função de auto ajuste para o controle vetorial com *encoder* ou *sensorless*;
- Controle local ou remoto;
- Diagnóstico de falhas.

Ainda é possível observar que há certa frequência na utilização de alguns parâmetros para diversas situações que requeiram o uso de inversores de frequência. No Anexo 1, são apresentados alguns destes parâmetros, bem como, suas funcionalidades. Para demais informações, consultar o Manual de Programação do inversor de frequência CFW-11, disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-manual-de-programacao-0899.5664-3.1x-manual-portugues-br.pdf>.

6 CONCLUSÕES

Diante do exposto, pode-se concluir que:

- A utilização do inversor de frequência para acionamento de motores se tornou amplamente difusa;
- É necessário que os novos usuários sejam capazes de conhecer sua composição, princípio de funcionamento, assim como, as características;
- O operador deve conhecer e ter capacidade de discernir entre a operação do inversor na forma vetorial e escalar;
- O usuário deve saber como ocorre a variação de velocidade em MIT's e observar isso, de fato, na prática;
- É imprescindível que os operadores conheçam as funções, para aplicar o inversor uma maior quantidade de situações;
- É de extrema importância que o usuário se familiarize e aprenda a parametrizar corretamente o inversor, para que ele atue de forma otimizada.

REFERÊNCIAS

BRAGA, Rafael Poloni. **Inversor de frequência em acionamento de motobombas com função "booster": comparativo com outros métodos, análise de investimento e projeto.** 2007. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007. Disponível em: <http://www2.ele.ufes.br/~projgrad/documentos/PG2007_1/rafaelpolonibraga.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2014.

FUENTES, Rodrigo Cardozo. Automação industrial. Santa Maria - RS, 2005. (Apostila).

GRIPP JUNIOR, Percy Emerich. **Estudo das tecnologias e aplicações dos inversores de frequência de média tensão.** 2005. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. Disponível em: <http://www2.ele.ufes.br/~projgrad/documentos/PG2005_1/percyemerichgrippjunior.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2014.

GURGEL, Fábio Meireles. **Aplicações de Inversores Eletrônicos na Indústria Nacional: a Contribuição Brasileira.** 2009. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MICHELS, Leandro; CAMARGO, Robinson F. de; BOTTERÓN, Fernando; PINHEIRO, Humberto. Metodologia de projeto de filtros de segunda ordem para inversores de tensão com modulação PWM digital. **Sba Controle e Automação**, Campinas, v. 16, n. 12, p.221-242, jun. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-17592005000200010&script=sci_arttext>. Acesso em: 04 jan. 2014.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P.. **Power electronics: Converters, applications and design.** 3. ed. Minnesota: Media Enhanced, 2003. 801 p.

MORAES, Maria J. de; OLIVEIRA FILHO, Delly; VIEIRA, Gustavo H. S.. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p.875-882, jun. 2011. Disponível em: <[file:///C:/Users/user/Documents/TCC Novo/Revista Brasileira de Engenharia](file:///C:/Users/user/Documents/TCC%20Novo/Revista%20Brasileira%20de%20Engenharia)>

Agrícola e Ambiental - Demand side management for water pumping for irrigated perimeter.htm>. Acesso em: 02 jan. 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, *Procedimentos de Rede: Sub-Módulo 2.8 – Padrões de Desempenho da Rede Básica*, Rio de Janeiro, 2009.

S&E Instrumentos de Teste e Medição Ltda. **Encoders (Geradores de impulso)**: catálogo. São Paulo. 2000. 2p. Disponível em: <<http://www.seinstrumentos.com.br/pdf/cat-encoders.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2014.

SILVA, André Tavares da. **Especificação de equipamentos para dosagens em estações de tratamento de água**. 2009. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas – estudo de caso de um sistema industrial**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

WEG – Automação S.A.. **Bancada Didática BDMW**: catálogo. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2011. 08 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-bancada-didatica-bdmw-50023199-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2014.

WEG – Drives & Controls - Automação S.A.. **CFW-08 – Inversores de frequência**: catálogo. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2011. 08 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-08-inversor-de-frequencia-10413066-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2014.

WEG – Drives & Controls – Automação Ltda. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**: catálogo. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2009. 36 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2014.

WEG – Inversor de Frequência CFW-11 – Automação Ltda. **Manual do Usuário**. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2013. 87 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-manual-do-usuario-mec.-f-e-g-10000694773-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em: 02 jun. 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - COMANDOS ATRAVÉS DA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Uma das formas mais comuns de parametrização do inversor de frequência se dá através da interface homem-máquina (IHM) e ajustar os parâmetros conforme a aplicação, carga e, principalmente, com motor utilizado, deve-se consultar o manual que descreve todos os parâmetros detalhadamente, sendo assim, pode-se dizer que a parametrização deve ocorrer de forma cuidadosa, para que os valores selecionados façam com que o inversor de frequência acione adequadamente o motor em questão.

Os parâmetros gerais do inversor, nos quais seus conteúdos devem ser regulados em conformidade com os dados do motor são:

Tabela 1. Parâmetros gerais do inversor de frequência CFW-11.

Parâmetro	Conteúdo
P0154	39R
P0155	0.3kW
P0156	4.7A
P0157	3.9
P0158	2.2A
P0169	9A
P0220	2=Tecla LR (LOC)
P0295	2=6A
P0296	0=220/240V
P0401	4.4A
P0404	4=1.5cv

O significado de cada parâmetro está descrito no Anexo 1.

• Objetivos

- ✓ Efetuar a montagem do circuito da Figura 20 de maneira correta;
- ✓ Permitir ao usuário saber que a parametrização do inversor, pode ser realizada de acordo com as necessidades;

- ✓ Colocar o inversor de frequência em funcionamento através da IHM;
 - ✓ Familiarizar-se com as teclas da IHM.
- **Material necessário à realização da tarefa**
 - ✓ 01 multímetro ou voltímetro teste;
 - ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
 - ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
 - ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
 - ✓ cabos ou fios.
 - **Procedimentos**
 - ✓ Verifique com auxílio do multímetro (voltímetro) o nível de tensão da rede;
 - ✓ Efetue a montagem de acordo com o diagrama elétrico da Figura 20;
 - ✓ Verifique se o esquema de ligação da placa do motor confere com esquema de ligação apresentado na Figura 20, caso não, efetue a ligação do motor conforme a placa;
 - ✓ Verifique a placa de dados do motor, nela devem estar contidos todos os parâmetros necessários ao funcionamento perfeito do motor.
 - ✓ Ligue o circuito e libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;
 - ✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;
 - ✓ Acione o inversor através da tecla  da IHM;
 - ✓ Verificar se é possível alterar a velocidade do motor através das teclas  da IHM;
 - ✓ Verificar se é possível inverter o sentido de giro do motor através da tecla  da IHM;
 - ✓ Desligar o motor através da tecla  da IHM;
 - ✓ Manter a tecla  da IHM pressionada e verificar o que acontece.
 - ✓ Verifique a velocidade de referência do motor (MENU – TODOS OS PARÂMETROS – P0121).

APÊNDICE 2 - DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE VELOCIDADE

- **Objetivos**

- ✓ Efetuar a montagem do circuito da Figura 20 de maneira correta;
- ✓ Permitir ao usuário saber que os limites de velocidade do motor podem ser definidos pelo próprio, e que apesar de qualquer alteração acima da velocidade máxima e abaixo da velocidade mínima não são permitidas;
- ✓ Verificar que as frequências apresentadas em relação às velocidades mínimas e máxima estão de acordo com a teoria.

- **Material necessário à realização da tarefa**

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ cabos ou fios.

- **Procedimentos**

- ✓ Efetue a montagem de acordo com o diagrama elétrico da Figura 20;
- ✓ Verifique se o esquema de ligação da placa do motor confere com esquema de ligação apresentado na Figura 20, caso não, efetue a ligação do motor conforme a placa;
- ✓ Verifique a placa de dados do motor, nela devem estar contidos todos os parâmetros necessários ao funcionamento perfeito do motor.
 - ✓ Ligue o circuito e libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;
 - ✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;
 - ✓ Entre no MENU, selecione TODOS OS PARÂMETROS e limite a velocidade mínima e máxima do motor, P0133 = 300rpm e P0134=2000rpm, respectivamente;
 - ✓ Acione o inversor através da tecla  da IHM;

✓ Incremente e decmente a velocidade a velocidade do motor através das teclas  da IHM;

✓ Perceba o que acontece ao incrementar e/ou decrementar a quando se ultrapassa os limites máximo e mínimo de velocidade;

✓ Observe a variação de frequência entre a velocidade mínima e máxima, anotando-as.

✓ Sabendo que a equação para o cálculo de velocidade é:

$$n = \frac{120 * f}{p} * (1 - s)$$

Calcule as frequências para cada velocidade e confira-as com as frequências mostradas pela IHM do inversor. a, veja se os valores obtidos de frequência no inversor são iguais aos obtidos na teoria.

✓ Desligar o motor através da tecla  da IHM;

APÊNDICE 3- DEFINIÇÃO DAS RAMPAS DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO

Uma das funções comuns aos modos de controle (V/F, VVW, *Sensorless*, *Encoder*) do inversor de frequência são as RAMPAS, as quais permitem que o motor acelere e desacelere lentamente ou rapidamente.

• Objetivos

- ✓ Permitir ao usuário saber que pode impor tempos diferentes para a aceleração e desaceleração do motor;
- ✓ Verificar que os tempos pra atingir a velocidade máxima e para o motor parar totalmente são comprovados quando se cronometra o tempo.

• Material necessário à realização da tarefa

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ cabos ou fios.

• Procedimentos

Após a montagem do diagrama elétrico da Figura 20, proceda da seguinte forma com relação ao inversor:

- ✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;
- ✓ Entre no MENU, selecione TODOS OS PARÂMETROS e limite a velocidade mínima e máxima do motor, P0133 = 90rpm e P0134=1800rpm, respectivamente;
- ✓ Entre no MENU, selecione APLICAÇÃO BÁSICA e defina os tempos de aceleração e desaceleração do motor, P0100 = 12s e P0101=6s, respectivamente;
- ✓ Acione o inversor através da tecla  da IHM;

- ✓ Incremente a velocidade a velocidade do motor através das teclas  da IHM até o limite imposto;
- ✓ Desligue o motor através da tecla  da IHM cronometrando o tempo que o motor leva para parar totalmente;
- ✓ Religue o motor e cronometre o tempo que o motor leva para chegar até a velocidade nominal;
- ✓ Verifique se ao inverter o sentido de rotação do motor o tempo de aceleração e desaceleração ainda é respeitado.

APÊNDICE 4 - COMANDOS VIA BORNES

Uma das formas de comando permitido pelo inversor é o comando remoto, ou seja, o comando do motor é realizado através de chaves conectadas a bornes, os quais, no caso estudado do CFW11, possuem +24V.

Percebe-se que comandos desta categoria são utilizados em diversas situações industriais nas quais o conjunto motor mais inversor se encontra em um ambiente de difícil acesso, ou que o operador não possa descer várias vezes e operar diretamente na IHM do inversor.

• **Objetivos**

- ✓ Efetuar a montagem do circuito das Figuras 20 e 21 de maneira correta;
- ✓ Conhecer outra maneira de comando do inversor;
- ✓ Possibilitar o usuário conhecer como se parametriza o inversor para operar remotamente;
- ✓ Permitir ao usuário verificar que o controle de velocidade pode ser realizado de forma analógica através do potenciômetro e perceber qual a diferença entre ajustar a velocidade através de tal e da IHM.

• **Material necessário à realização da tarefa**

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ 03 chaves seletoras (placa de identificação P011);
- ✓ cabos ou fios.

• **Procedimentos**

Após a montagem dos diagramas elétricos das Figuras 20 e 21, proceda da seguinte forma:

- ✓ Verifique se o esquema de ligação da placa do motor confere com esquema de ligação apresentado na Figura 20, caso não, efetue a ligação do motor conforme a placa;

✓ Verifique a placa de dados do motor, nela devem estar contidos todos os parâmetros necessários ao funcionamento perfeito do motor.

✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;

✓ Entre no MENU, selecione TODOS OS PARÂMETROS e parametrize o inversor para operar remotamente através de S1, S2 e S3 ou seja, faça:

Tabela 2. Parametrização do inversor para operar no modo remoto.

Parâmetro	Função
P0220	1
P0222	1
P0226	4
P0227	1
P0228	0
P0263	1
P0264	8
P0265	0
P0266	2
P0267	0
P0268	0

Observação: O significado de cada parâmetro se encontra no Anexo 1.

✓ Acione o motor através de S1 e S3, verificando quais as funções de ambas as chaves seletoras;

✓ Acione a chave S2 e observe o que acontece;

✓ Ajuste a velocidade do motor em 1000 rpm através do potenciômetro e compare com o ajuste através da IHM;

✓ Faça as leituras do motor através da IHM;

✓ Proceda da seguinte forma para desligar o motor: acione a chave S3, posteriormente a chave S1 e desenergize a bancada.

APÊNDICE 5 - PARAMETRIZAÇÃO DO MULTI-SPEED

A função MULTISPEED é utilizada em aplicações nas quais se desejam até 8 velocidades fixas pré-programadas. Esta funcionalidade é acionada através das entradas digitais (DI4, DI5 e DI6); apresentam como vantagens a estabilidade das referências fixas pré-programadas, e a imunidade contra ruídos elétricos (entradas digitais DIx isoladas) (MANUAL DE PROGRAMAÇÃO DA WEG).

• Objetivos

- ✓ Efetuar a montagem dos circuitos das Figuras 20 e 22 de maneira correta;
- ✓ Possibilitar o usuário conhecer como se parametriza o inversor para operar remotamente em conjunto com o controle *multi-speed*;
- ✓ Permitir ao usuário conhecer a lógica de controle de velocidade *multi-speed*;
- ✓ Permitir ao usuário a verificação do funcionamento da parametrização realizada através de suas próprias conclusões.

• Material necessário à realização da tarefa

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ 03 chaves seletoras (placa de identificação P011);
- ✓ cabos ou fios.

• Procedimentos

- ✓ Efetue a montagem de acordo com o diagrama elétrico das Figuras 20 e 22;
- ✓ Verifique se o esquema de ligação da placa do motor confere com esquema de ligação apresentado na Figura 20, caso não, efetue a ligação do motor conforme a placa;
- ✓ Verifique a placa de dados do motor, nela devem estar contidos todos os parâmetros necessários ao funcionamento perfeito do motor.

✓ Ligue o circuito e carregue os parâmetros de fábrica do inversor, ou seja, faça P0204=5, observe que o inversor será carregado com parâmetros para 60 Hz, de acordo com a frequência do motor;

✓ Libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;

✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, e então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;

✓ Tendo a funcionalidade MULTI-SPEED em mente, entre no MENU selecione TODOS OS PARÂMETROS e parametrize o inversor da seguinte forma:

Tabela 3. Parametrização para a função MULTI-SPEED.

Parâmetro	Função
P0220	0
P0221	8
P0223	2
P0224	1
P0124	500
P0125	200
P0126	600
P0127	400
P0263	2
P0266	13
P0267	13

Observação: O significado de cada parâmetro se encontra no Anexo 1.

✓ Acione o motor através da chave S1 (Habilita Geral);

✓ Faça combinações entre as chaves S2 e S3 e com as velocidades obtidas construa uma tabela.

APÊNDICE 6 - PARAMETRIZAÇÃO DO POTENCIÔMETRO ELETRÔNICO

Para aplicações corriqueiras e uma variação rápida de velocidade, faz-se necessário que o usuário saiba que a velocidade do motor pode ser controlada através do conjunto inversor de frequência mais potenciômetro, sem que seja necessária a alteração dos valores de velocidade através dos próprios parâmetros do inversor.

• **Objetivos**

- ✓ Efetuar a montagem dos circuitos das Figuras 20 e 22 de maneira correta;
- ✓ Possibilitar o usuário conhecer como se parametriza o inversor para operar com uma entrada digital para acelerar o motor e outra para desacelerar o motor ao invés de operar diretamente com o potenciômetro;
- ✓ Comprovar o funcionamento da parametrização realizada;
- ✓ Possibilitar ao usuário a percepção da diferença entre o ajuste de velocidade através da IHM, do potenciômetro e das chaves seletoras.

• **Material necessário à realização da tarefa**

- ✓ 01 motor trifásico (placa P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa P009);
- ✓ 03 chaves seletoras (placa P011);
- ✓ cabos ou fios.

• **Procedimentos**

Após a montagem dos diagramas elétricos das Figuras 20 e 22, proceda da seguinte forma:

- ✓ Ligue o circuito e carregue os parâmetros de fábrica do inversor, ou seja, faça P0204=5, observe que o inversor será carregado com parâmetros para 60 Hz, de acordo com a frequência do motor;

- ✓ Libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;
- ✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, e então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;
- ✓ Parametrize o inversor para que as entradas digitais DI4, DI5 e DI1 para “acelera EP”, “desacelera EP” e “habilita geral”, respectivamente, ou seja, faça:

Tabela 4. Parametrização do potenciômetro eletrônico.

Parâmetro	Função
P0220	0
P0221	8
P0223	2
P0224	0
P0263	2
P0266	12
P0267	11

Observação: O significado de cada parâmetro se encontra no Anexo 1.

- ✓ Acione o motor através da chave S1 (Habilita Geral);
- ✓ Através de um pulso em S3, por alguns instantes, observe o que acontece com a velocidade;
- ✓ Através de um pulso em S2, por alguns instantes, observe o que acontece com a velocidade;
- ✓ Proceda da seguinte forma para desligar o motor: acione a chave S1 e desenergize a bancada.

APÊNDICE 7 - PARAMETRIZAÇÃO DO COMANDO A TRÊS FIOS

Na maioria das indústrias o funcionamento de motores/máquinas se dá de forma contínua, logo, é de fundamental importância que o usuário saiba como parametrizar o inversor para funcionar a partir da lógica “start/stop”, ou seja, colocar o motor em funcionamento com três botoeiras (habilita geral, *start*, *stop*).

• Objetivos

- ✓ Efetuar a montagem dos circuitos das Figuras 20 e 22 de maneira correta;
- ✓ Possibilitar o usuário conhecer como se parametriza o inversor para operar através da lógica start/stop;
- ✓ Comprovar o funcionamento da parametrização realizada;
- ✓ Possibilitar ao usuário a percepção de que o motor pode ser acionado e desligado através de apenas um pulso;
- ✓ Possibilitar ao usuário a percepção da diferença entre o ajuste de velocidade através da IHM, do potenciômetro e das chaves seletoras.

• Material necessário à realização da tarefa

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ 03 chaves seletoras (placa de identificação P011);
- ✓ cabos ou fios.

• Procedimentos

- ✓ Após a montagem dos diagramas elétricos das Figuras 20 e 22, proceda da seguinte forma:
- ✓ Ligue o circuito e carregue os parâmetros de fábrica do inversor, ou seja, faça P0204=5, observe que o inversor será carregado com parâmetros para 60 Hz, de acordo com a frequência do motor;
- ✓ Libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;

✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, e então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;

✓ Parametrize o inversor para que as entradas digitais DI4, DI5 e DI1 para “start”, “stop” e “habilita geral”, respectivamente, ou seja, faça:

Tabela 5. Parametrização para a lógica start/stop.

Parâmetro	Função
P0220	0
P0221	0
P0223	2
P0224	1
P0263	2
P0266	7
P0267	6

Observação: O significado de cada parâmetro se encontra no Anexo 1.

- ✓ Acione o motor através da chave S1 (Habilita Geral);
- ✓ Através de um pulso em S3, por alguns instantes, acione o motor e observe a velocidade que o motor atinge;
- ✓ Observe a velocidade de referência de velocidade através da IHM;
- ✓ Através de um pulso em S2, por alguns instantes, desligue;
- ✓ Proceda da seguinte forma para desligar o motor: acione a chave S1 e desenergize a bancada.

APÊNDICE 8 - AUTO AJUSTE PARA CONTROLE VETORIAL

Para o funcionamento do controle vetorial com *encoder* ou *sensorless*, é necessário o conhecimento de parâmetros do motor que não estão disponíveis em sua placa. Tais dados, podem ser obtidos através da rotina de auto ajuste, a qual é capaz de estimá-los, a partir da aplicação de tensões e correntes no motor.

São eles: resistência e indutância de dispersão de fluxo do estator, constante de tempo do rotor (T_r), a corrente de magnetização nominal do motor e a constante de tempo mecânica do motor. A partir de então, os parâmetros de controle são ajustados automaticamente.

• Objetivos

- ✓ Efetuar a montagem dos circuitos da Figura 20 de maneira correta;
- ✓ Possibilitar ao usuário o discernir entre os tipos de controle;
- ✓ Comprovar o funcionamento da parametrização realizada;
- ✓ Possibilitar ao usuário entender que os parâmetros estimados são inerentes ao motor, porém não estão disponíveis em sua placa.

• Material necessário à realização da tarefa

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ Cabos ou fios.

• Procedimentos

- ✓ Após a montagem do diagrama elétrico da Figura 20, proceda da seguinte forma:
- ✓ Ligue o circuito e carregue os parâmetros de fábrica do inversor, ou seja, faça P0204=5, observe que o inversor será carregado com parâmetros para 60 Hz, de acordo com a frequência do motor;
- ✓ Libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;

✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça P0317 = 1, e então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;

✓ Parametrize o inversor para operar com controle vetorial *sensorless*, ou seja, faça P002=3;

✓ Confira a lista de parâmetros que o inversor fornecerá com os dados de placa do motor, caso eles difiram, altere-os;

✓ Faça P0408=2, para entrar na rotina de auto ajuste, estimando a corrente de magnetização, com o motor girando;

✓ Importante: Aguarde até a conclusão da operação;

✓ Anote os parâmetros estimados.

APÊNDICE 9 - SIMULAÇÃO DE CARGA COM FREIO DE FOUCAULT

Em diversas situações é possível que o usuário se depare com uma carga acoplada ao eixo do motor. Tal carga ou aumento de carga acarretará solicitações mais severas ao motor, haja vista, que haverá um aumento de corrente mesmo com o inversor fornecendo a mesma tensão. Para simular esta situação, este guia traz o freio de Foucault como carga e possibilita o usuário a parametrizá-lo de forma otimizada.

• **Objetivos**

- ✓ Efetuar a montagem do circuito da Figura 23 de maneira correta;
- ✓ Comprovar o funcionamento da parametrização realizada;
- ✓ Permitir ao usuário entender o princípio de funcionamento do freio de Foucault e a possibilidade de variação de carga do motor;
- ✓ Permitir ao usuário saber que o inversor protege o motor, no caso de uma sobrecarga.

• **Material necessário à realização da tarefa**

- ✓ 01 motor trifásico (placa de identificação P003);
- ✓ 01 freio de Foucault (placa de identificação P004);
- ✓ 01 módulo de frenagem (placa de identificação P014);
- ✓ 03 fusíveis de 16A (placa de identificação P012);
- ✓ 01 inversor de frequência (placa de identificação P009);
- ✓ Cabos ou fios.

• **Procedimentos**

- ✓ Efetue a montagem de acordo com o diagrama elétrico da Figura 23;
- ✓ Verifique se o esquema de ligação da placa do motor confere com esquema de ligação apresentado na Figura 23, caso não, efetue a ligação do motor conforme a placa;
- ✓ Verifique a placa de dados do motor, nela devem estar contidos todos os parâmetros necessários ao funcionamento perfeito do motor.
- ✓ Ligue o circuito e carregue os parâmetros de fábrica do inversor, ou seja, faça P0204=5, observe que o inversor será carregado com parâmetros para 60 Hz, de acordo com a frequência do motor;
- ✓ Libere o acesso para alteração dos parâmetros (P0000 = 5) e salve a alteração;

- ✓ Entre no MENU, selecione START-UP ORIENTADO e faça $P0317 = 1$, e então parametrize o inversor de frequência conforme os dados de placa do motor, após isso, salve a alteração;
- ✓ Ajuste o parâmetro P156 (corrente de sobrecarga nominal do motor) para o valor da corrente nominal do motor mais 5%;
- ✓ Acione o inversor através da tecla  da IHM;
- ✓ Incremente a velocidade do motor através das teclas  da IHM e coloque-o na velocidade nominal;
- ✓ Observando o valor de corrente na IHM, aumente a carga através do módulo de frenagem, até $1,5 * I_{nominal}$;
- ✓ Observe que enquanto se varia a carga, a velocidade do motor permanece constante,
- ✓ Observe que ocorrem perdas devido ao efeito Joule.
- ✓ Observe que o inversor leva um tempo para ativar a proteção de sobrecarga.

ANEXO

ANEXO 1 – PRINCIPAIS PARÂMETROS UTILIZADOS

Tabela 6. Parâmetros utilizados.

Parâmetro	Funcionalidade
P0000	Este parâmetro funciona como uma senha, ou seja, permite o usuário alterar o conteúdo de quaisquer parâmetros.
P0100	Este parâmetro permite ao usuário modificar o tempo de aceleração do motor conforme desejado.
P0124	Permite a alteração de uma das velocidades da função MULTISPEED, podendo variar de 0 a 1800 rpm. Os parâmetros P0125, P0126 e P0127 também apresentam a mesma função.
P0133	Este parâmetro permite ao usuário modificar a velocidade mínima do motor conforme desejado. O parâmetro P134 apresenta mesma função só que para a velocidade máxima do motor.
P0154	É um dos parâmetros gerais do inversor e representa o resistor de frenagem, o qual deve ser regulado conforme os dados do motor, ou seja, apresenta conteúdo igual a 39R, e este R deve estar em conformidade com a resistência do resistor de frenagem utilizado.
P0155	É um parâmetro geral do inversor, que represente a potência permitida no resistor de frenagem. É responsável por ajustar a proteção de sobrecarga no resistor de frenagem. Deve-se ajustá-lo de acordo com a potência nominal do resistor de frenagem (kW), caso utilizado.
P0156	Indica a corrente de sobrecarga do motor com velocidade igual a 100%. Este parâmetro deve ser ajustado em 5% acima da corrente nominal do motor, ou seja, $1.05 * I_{nom ND}$. Quando a corrente do motor se iguala a corrente que está neste parâmetro, o inversor entende que o motor está operando em condições de sobrecarga.
P0157	Indica a corrente de sobrecarga do motor com velocidade igual a 50%. Este parâmetro deve ser ajustado em 90% da corrente nominal do motor, ou seja, $0.9 * I_{nom ND}$. Quando a corrente do motor se iguala a corrente que está neste parâmetro, o inversor entende que o motor está operando em condições de sobrecarga.
P0158	Indica a corrente de sobrecarga do motor com velocidade igual a 5%. Este parâmetro deve ser ajustado em 65% da corrente nominal do motor, ou seja, $0.65 * I_{nom ND}$. Quando a corrente do motor se iguala a corrente que está neste parâmetro, o inversor entende que o motor está operando em condições de sobrecarga.
P0169	Expressado em percentual, este parâmetro indica a máxima corrente de torque “+”, ou seja, limita o valor da componente da corrente do motor quando o mesmo aciona a carga no sentido horário. O ajuste deve ser feito cautelosamente, pois se for muito baixo, poderá não haver torque suficiente para o motor acionar a carga e se for muito alto pode ocasionar uma falha de sobrecarga ou sobre corrente.
P0220	Indica o modo de operação do inversor, então o usuário pode selecionar entre as situações local e remoto.

Parâmetro	Funcionalidade
P0221	Indica fonte da referência dos parâmetros, caso a situação LOCAL esteja selecionada pelo parâmetro P0220.
P0222	Indica fonte da referência dos parâmetros, caso a situação REMOTO esteja selecionada pelo parâmetro P0220.
P0223	Este parâmetro é responsável por controlar o sentido de rotação do motor (horário ou anti-horário), para a situação LOCAL definida pelo parâmetro P0220.
P0224	Parâmetro responsável selecionar a fonte de origem de comando para execução da função Gira/Pára, para a situação LOCAL definida pelo parâmetro P0220.
P0226	Este parâmetro é responsável por controlar o sentido de rotação do motor (horário ou anti-horário) para a situação REMOTO definida pelo parâmetro P0220.
P0227	Este parâmetro é responsável por selecionar a fonte de origem para o comando Gira / Pára, na situação REMOTO definida pelo parâmetro P0220.
P0228	Responsável por selecionar a fonte de origem para o comando JOG na situação REMOTO definida pelo parâmetro P0220.
P0263	Responsável por atribuir uma função a entrada digital DI1, como por exemplo, 0 = Sem Função; 1 = Gira/Para; 2 = Habilita Geral; 3 = Parada Rápida; entre outras). Os parâmetros P0264, P0265, P0266, P0267, P0268 apresentam a mesma função para as entradas DI2, DI3, DI4 e DI5, respectivamente.
P0264	Responsável por atribuir uma função a entrada digital DI2, como por exemplo, 0 = Sem Função; 1 = Gira/Para; 2 = Habilita Geral; 3 = Parada Rápida; entre outras).
P0295	Indica a corrente nominal ND e HD do inversor. ND é a corrente nominal do inversor para regime de sobrecarga normal, já a sigla HD significa regime de sobrecarga pesada do inversor. Como a corrente deste conversor de frequência é 6A, ajusta-se este parâmetro para a opção dois, cujo conteúdo é 6A.
P0296	Indica a tensão de rede, devendo ser ajustada de acordo com o modelo do inversor. No caso dos experimentos deste estudo, a tensão da bancada era de 220V, então, verificou-se que este parâmetro poderia continuar de acordo com o padrão de fábrica, o qual é zero (220V/240V).
P0317	Responsável por selecionar se o usuário deseja que a função Start-up Orientado seja utilizada, nesta função o valor de P0401 altera automaticamente os parâmetros relacionados à proteção de sobrecarga no motor.
P0401	Indica a corrente nominal do motor. Este parâmetro deve ser ajustado conforme a corrente nominal indicada na placa do motor, considerando o valor de tensão utilizado.
P0404	Indica a potência nominal do motor. Este parâmetro deve ser ajustado conforme a potência nominal indicada na placa do motor.