



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

HEDELYN MAX ARAÚJO DE CHICO

**DESENVOLVIMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE ACIONAMENTO E
CONTROLE DO MOVIMENTO ANGULAR DE MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Guaratinguetá – SP

2013

HEDELYN MAX ARAÚJO DE CHICO

**DESENVOLVIMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE ACIONAMENTO E
CONTROLE DO MOVIMENTO ANGULAR DE MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá

2013

C533d Chico, Hedelyn Max Araujo de
Desenvolvimento de Experiências de Acionamento e Controle do
Movimento Angular de Motores de Indução Trifásico / Hedelyn Max
Araujo de Chico – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
75 f : il.

Bibliografia: f. 63-64

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

1. Motores elétricos de indução
 2. Controladores programáveis
 3. Inversores elétricos
- I. Título

CDU 621.313.333

HEDELYN MAX ARAÚJO DE CHICO


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELLO MAROTTA CASSULA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG


Prof. Ms. FERNANDO RIBEIRO FELADELFO
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

HEDELYN MAX ARAÚJO DE CHICO

NASCIMENTO	18.04.1988 – PINDAMONHANGABA / SP
FILIAÇÃO	Claudio Celso de Chico Berenice Pádua de Araújo
2009/2013	Curso de Graduação Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos que estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de todo o período do curso na universidade, e aos meus companheiros de classe com quem compartilhei momentos de dedicação e esforço até a conclusão do curso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus que me deu vida, sabedoria e saúde para concretizar essa etapa da minha vida.

Um agradecimento muito especial aos meus pais, Berenice e João Antônio, e minha avó Rosa, que sempre me incentivaram e me apoiaram ao decorrer de toda a minha vida, e que sem seus ensinamentos eu não teria finalizado mais essa etapa da minha vida. Aos meus irmãos, Weslyn e Kamily, juntamente com meus amigos Taffarel, Thiago e Luiran que estiveram ao meu lado antes e durante o período da faculdade.

Um agradecimento especial a Marina, e meu colega de classe Diego Felipe que me deram apoio e ajuda em momentos importantes nos quais eu fraquejei. Sem eles não conseguiria dar o melhor de mim para terminar o curso.

E por fim, mas não menos importante, um agradecimento aos meus amigos de classe Gabriel Brandão, Daniel Kendy, André de Faria, André Sato, Gustavo Buzzato, Thomas Albino e aos moradores da república Toa-Toa que me acolheram e dividiram o último ano do curso.

EPÍGRAFE

*“Se você quer ser bem sucedido,
precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite
e dar o melhor de si mesmo.”*

Ayrton Senna da Silva

De Chico, H.M.A. **Desenvolvimento de experiências de acionamento e controle do movimento angular de motores elétricos de indução trifásicos.** – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar experiências práticas e eficazes para as aulas de laboratório de Automação Industrial ministradas no curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Júlio Mesquita Filho – UNESP, campus Guaratinguetá. As experiências desenvolvidas simulam funcionamento de sistemas de controle e acionamento de motores elétricos de indução trifásicos (MIT) amplamente utilizados na indústria. As experiências simulam um ambiente fabril onde existe a necessidade de controlar o acionamento e funcionamento em regime permanente de motores elétricos. Foram desenvolvidas sete experiências que simulam o acionamento de motores elétricos através de um sistema de controle, um *driver* de acionamento juntamente com um simulador de cargas acopladas ao motor elétrico. As experiências utilizam um Controlador Lógico Programável (CLP) como controlador, um Inversor de Frequência, como *driver* de acionamento, e um Freio Magnético, como simulador de cargas do motor. As experiências foram divididas de acordo com o sinal de referência de velocidade utilizado para o acionamento e funcionamento do motor: digitais e analógicos. As cinco primeiras experiências realizam o controle do acionamento e funcionamento do motor elétrico através de sinais digitais. A sexta e sétima experiências utilizam um sinal analógico como referência de velocidade para o motor elétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Elétrico de Indução Trifásico (MIT), Controlador Lógico Programável (CLP), Inversor de Frequência, Controle, Acionamento.

CHICO, H. M. A. Development experiences drive and control of the angular motion of three-phase induction electric motor. - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This paper aims to show practical and effective experiences for lessons Industrial Automation Laboratory taught in undergraduate degree in Electrical Engineering from the University Júlio Mesquita Filho - UNESP, Guaratinguetá. Experiments carried simulate control and drive systems of electric three phase induction motors (MIT) widely used in industries. The experiments simulate a manufacturing environment where there is a need to control the activation and continuous operation of electric motors. Seven experiments that simulate the firing of electrical motors through a control system, a driver along with a simulator loads coupled to the electric motor was developed. Experiments using a Programmable Logic Controller (PLC) as a controller, an inverter frequency as driver, and Magnetic Brake, as simulator engine loads . The experiments were divided according to the speed reference signal used for driving and operating the electric motor: digital and analog. The first five experiments performing the drive control and operation of the electric motor via digital signals. The sixth and seventh experiments using an analog signal as a reference speed for the electric motor.

KEYWORDS: Three-phase induction electric motor (MIT), Programmable Logic Controller (PLC), Frequency Inverter , Control , Drive .

LISTA DE TERMOS E SIGLAS

MIT – Motor Elétrico de indução Trifásico

CLP – Controlador Lógico Programável

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso)

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada)

IHM – Interface Homem Máquina

CPU – *Central Processing Unit* (Unidade Central de Processamento)

RTD – *Resistance Temperature Detector* (Resistência sensor de Temperatura)

DIP – *Dual In Line Package* (Interruptor em grupo)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor Elétrico de Indução Trifásico	17
Figura 2 - Diagrama das etapas de um Inversor de Frequência.....	20
Figura 3 – Inversor de Frequência CFW - 08.....	21
Figura 4 – Gráfico tensão (V) x frequência (Hz) do motor modo controle Escalar V/F linear	22
Figura 5 – Gráfico tensão (V) x frequência (Hz) do motor no modo controle Escalar V/F quadrático.	23
Figura 6 - Estrutura básica do CLP	27
Figura 7 - Ciclo de processamento do CLP.....	28
Figura 8 - CLP Siemens Simatic S7 200 CPU 222.. ..	30
Figura 9 - Kit Freio Magnético.....	32
Figura 10 - Termopar.....	35
Figura 11 - Painel de montagem do PLC.	36
Figura 12 – Módulos adicionais EM223 e EM232	37
Figura 13 – Caixa de montagem do Inversor de Frequência.....	37
Figura 14 - Chave DIP do inversor de frequência	39
Figura 15 - Aceleração e desaceleração do motor linear ou com rampa S.....	43
Figura 16 - Interligação das entradas digitais do Inversor de Frequência com as chaves das entradas digitais do CLP para experiências 1,2 e 3	45
Figura 17 - Ligação do circuito de potência para experiências 1,2 e 3.....	46
Figura 18 - Ligação do circuito de potência para experiências 1,2 e 3.....	47
Figura 19 – Interligação das entradas digitais do Inversor de Frequência com as chaves das entradas digitais do CLP para experiência 4.....	51
Figura 20 - Gráfico frequência de funcionamento do motor x tempo no modo <i>Multispeed</i>	53
Figura 21 - Conexão das entradas digitais de controle e referencia de frequência modo <i>Multispeed</i>	54
Figura 22 - Circuito Amplificador Emissor Comum.....	57
Figura 23 - Conexão das entradas digitais de controle com referencia de frequência/velocidadeanalógica.....	60
Figura 24 - Montagem da experiência 7.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Termopares e faixa de temperatura.....	36
Tabela 2: Configuração dos jumpers de seleção para I/O (entradas e saídas) digitais e analógicas.....	40
Tabela 3: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiências 1, 2 e 3.....	44
Tabela 4: Relação entradas digitais CLP e inversor de frequência.....	45
Tabela 5: Relação entradas digitais CLP para experiência 4	51
Tabela 6: Relação entradas digitais CLP para experiência 5	53
Tabela 7: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiência 5.....	54
Tabela 8: Relação entradas digitais CLP para experiência 7	59
Tabela 9: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiência 7.....	60

SUMÁRIO

1. INTRUDUÇÃO	14
2. DESCRITIVO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS.....	16
2.1 Motor Elétrico de Indução Trifásico (MIT).....	16
2.2 Inversor de Frequência.....	19
2.2.1 Tipos de Controle do Inversor de Frequência	21
2.2.2 Fontes de referência de frequência/velocidade	24
2.3 Controlador Lógico Programável (CLP)	26
2.4 Freio Magnético	31
2.5 Sensores Industriais	33
2.5.1 Sensores Digitais	33
2.5.2 Sensores Analógicos	34
3 DESENVOLVIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS	37
3.1 Acionamento e controle do MIT com Sinais Digitais.....	40
3.1.1 Experiência 1: Controle Acionamento MANUAL	41
3.1.2 Experiência 2: Controle Acionamento MANUAL e AUTOMÁTICO com 1 ciclo.....	47
3.1.3 Experiência 3: MANUAL e AUTOMÁTICO com diversos ciclos	49
3.1.4 Experiência 4: Controlado posicionamento angular do motor	50
3.1.5 Experiência 5: Controle <i>Multispeed</i> de velocidade.....	51
3.2 Acionamento de motores com Sinais Analógicos de Controle.....	55
3.2.1 Controle de velocidade de um Motor Elétrico Universal através de um Sinal analógico	55
3.2.2 Controle de um MIT através de um Sinail Analógico	57
4. CONCLUSÃO	62
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS.....	65

1- INTRODUÇÃO

A Automação Industrial tem buscado nas últimas décadas o aumento da eficiência, produtividade e diminuição de custos dos processos produtivos maximizando a produção com menor consumo de energia, matéria-prima e geração de resíduos juntamente com as melhores condições de segurança, limitando a ação humana em processos fabris com potenciais de risco a segurança do indivíduo.

Indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas, automobilísticas, entre outras possuem processos fabris onde a Automação Industrial é amplamente utilizada na leitura e controle de variáveis físicas presentes nos processos, como temperatura, pressão, fluxo de fluidos e velocidade. Variáveis fisicoquímicas são adquiridas do campo via sensores e transmitidas para um Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) ou Controlador Lógico Programável (CLP) o qual, de acordo com um programa lógico, define o estado e ações dos atuadores do processo, como acionamento de motores, resistências de aquecimento, atuadores pneumáticos e hidráulicos.

Técnicas de acionamento de motores elétricos com a utilização de acionadores, como Inversores de Frequência, são largamente utilizados para a diminuição da corrente de partida e controle de variáveis rotativas, como torque e velocidade angular, exigidas do motor durante seu funcionamento em um processo fabril. Equipamentos de controle, como CLP, são largamente utilizados nos processos de controle fabris, principalmente no acionamento e funcionamento de motores elétricos de indução.

A Automação Industrial também evoluiu em frentes de comunicação com o desenvolvimento de diferentes tipos de barramentos de campo e protocolos, como Foundation Fieldbus, Modbus, Profibus, DeviceNet, entre outros. Esses barramentos de comunicação enviam e recebem sinais do sistema de controle que se comunica com o sistema administrativo da empresa (supervisórios). Os supervisórios permitem o compartilhamento de dados importantes para a operação diária de processos. Este procedimento tem contribuindo para uma maior agilidade do processo decisório com maior confiabilidade dos dados que suportam as decisões dentro da empresa para assim melhorar a produtividade.

Diante da importância da Automação Industrial nos processos fabris tem-se a necessidade do Engenheiro Eletricista possuir conhecimentos teóricos e práticos das principais técnicas e equipamentos utilizados na indústria voltados para Automação

Industrial. Como o motor elétrico de indução trifásico é a principal fonte de torque para maquinários, este é amplamente utilizado na indústria como atuador de processos fabris.

Conhecimentos em técnicas de acionamento e funcionamento em regime permanente desses motores elétricos através de equipamentos de acionamento (Inversor de Frequência e *Softstarter*) e controle (CLP) são de grande importância para um Engenheiro Eletricista.

O CLP fornece sinais de controle de acordo com uma lógica programada via software ao acionador (Inversor de Frequência) através de sinais digitais e analógicos. O Inversor de Frequência por sua vez realiza a partida, funcionamento em regime permanente e desligamento do motor durante um processo fabril. As características acionamento e funcionamento do motor elétrico (corrente, frequência, tensão, velocidade e torque) foram parametrizadas no Inversor de Frequência durante seu comissionamento no *start-up* do processo fabril.

Neste trabalho estão descritas sete experiências onde o aluno do curso Automação Industrial poderá realizar especificações de equipamentos, montagem e configuração do sistema de acionamento e controle de motores elétricos. Essas atividades ilustraram um ambiente fabril, onde a necessidade da correta configuração de um sistema de acionamento e controle de motores poderá ser realizada de maneira prática durante as experiências realizadas no laboratório de Automação Industrial.

O trabalho é composto por um capítulo de Introdução, capítulo 1, seguido da descrição dos equipamentos utilizados no desenvolvimento das experiências, capítulo 2. O capítulo 3 descreve as experiências desenvolvidas detalhadamente e o capítulo 4 encerra o trabalho com uma conclusão geral sobre todo trabalho desenvolvido.

1 DESCRITIVO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS EXPERIÊNCIAS

Neste capítulo são descritos os principais equipamentos utilizados durante o desenvolvimento das experiências abordando suas principais características e funções no sistema desenvolvido das experiências.

As descrições mencionadas nesse capítulo são referentes aos seguintes equipamentos:

- Motor de Indução Trifásico (MIT);
- Inversor de Frequência;
- Controlado Lógico Programável (CLP);
- Freio Magnético;
- Sensores.

1.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)

Os motores elétricos são máquinas capazes de promoverem a transformação de energia elétrica em energia mecânica com algumas perdas de energia. Como essas perdas de energia são pequenas, o motor elétrico apresenta a vantagem de ser uma máquina com um rendimento energético elevado quando comparado com máquinas térmicas, por exemplo.

Os motores elétricos utilizados atualmente apresentam um elevado rendimento, robustez, facilidade de construção, baixo custo, vasta faixa de velocidade, potência, controle a distância e fácil manutenção. Segundo Fellippo (2000), os motores elétricos são os mais importantes atuadores utilizados na indústria atualmente, sendo responsáveis pelo consumo de pouco mais de 50% de toda energia nas indústrias. Constituem ainda, 95% do total de motores instalados nos setores rural, comercial, industrial e residencial no Brasil.

Os motores elétricos possuem grande aplicabilidade na indústria, sendo o motor elétrico de indução trifásico (MIT) utilizado na maioria dos acionamentos de atuadores de processos industriais que necessitam de torque para seu acionamento. A Figura 1 ilustra um MIT utilizado com frequência na indústria.

As indústrias de papel e celulose, químicas e petroquímicas utilizam MIT's em equipamentos como extrusoras, bombas hidráulicas, agitadores e compressores. Em

indústrias siderúrgicas são utilizados nos transportadores do laminador, pontes rolantes, fornos e em sistemas auxiliares de lubrificação e resfriamento.

Dentro da classificação dos motores elétricos, o MIT é classificado como motor assíncrono de corrente alternada. Tal classificação refere-se a seu tipo de alimentação e características de funcionamento. O MIT é alimentado por um sistema elétrico trifásico de corrente alternada, onde três alimentadores (fases R, S e T) estão defasados 120° elétricos uns dos outros. O rotor do MIT não é alimentado pelo estator, e sua rotação não é proporcional à frequência de sua alimentação devido ao escorregamento.

Figura 1: Motor elétrico de indução trifásico (MIT).



Fonte: (Catálogo WEG, 2013)

As principais vantagens da utilização do MIT na indústria são a inversão do sentido de giro, vasta faixa velocidade e a utilização de diferentes torques durante o acionamento de maquinários. Os processos industriais que necessitam de um alto torque na partida e variação da velocidade em regime permanente utilizam MIT's associados a equipamentos de controle de acionamento e velocidade, como Inversores de Frequência e *Softstarts*. A Figura 1 ilustra um motor elétrico de indução trifásico.

O funcionamento de um MIT baseia-se no princípio da formação de um campo magnético rotativo produzido no estator pela passagem de corrente alternada em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, se desloca em volta do rotor, gerando neste correntes induzidas que tendem a se opor ao campo rotativo, sendo no entanto, arrastado por este por uma velocidade determinada pela frequência da tensão aplicada no estator. A velocidade é determinada pela equação (1).

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad [\text{rotação/s ou Hz}] \quad (1)$$

Onde:

n_s : velocidade síncrona do campo girante;

f : frequência da tensão aplicada no estator;

p : número de par de polos da máquina.

De acordo com as leis de indução magnética, lei de Lenz e lei de Faraday, existem dois fenômenos de indução magnética devido a este campo magnético girante. Nos motores em gaiola, surgem forças eletromotrizes alternadas nos condutores do circuito elétrico rotórico, conforme previsto pela lei de Faraday. Estas forças possuem amplitudes e frequências dependentes da relação entre a velocidade do campo girante (n_s) e a velocidade condutores do rotor (n_r). Como o rotor em gaiola é formado por barras elétricas curto-circuitadas, devido ao surgimento das forças eletromotrizes, surgem correntes elétricas no circuito elétrico rotórico. Logo estas correntes estando imersas em um campo magnético, geram forças mecânicas nos condutores do rotor. Estas forças produzem um torque no rotor fazendo com que o mesmo gire. Deste modo, o rotor tende a atingir a velocidade do campo magnético.

Devido ao atrito e a inércia do rotor não se atinge velocidade síncrona do campo n_s e esta diferença de velocidade é chamada de escorregamento, sendo dada pela equação (2).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Onde:

s : escorregamento;

n_s : velocidade síncrona do campo girante;

n_r : velocidade do rotor.

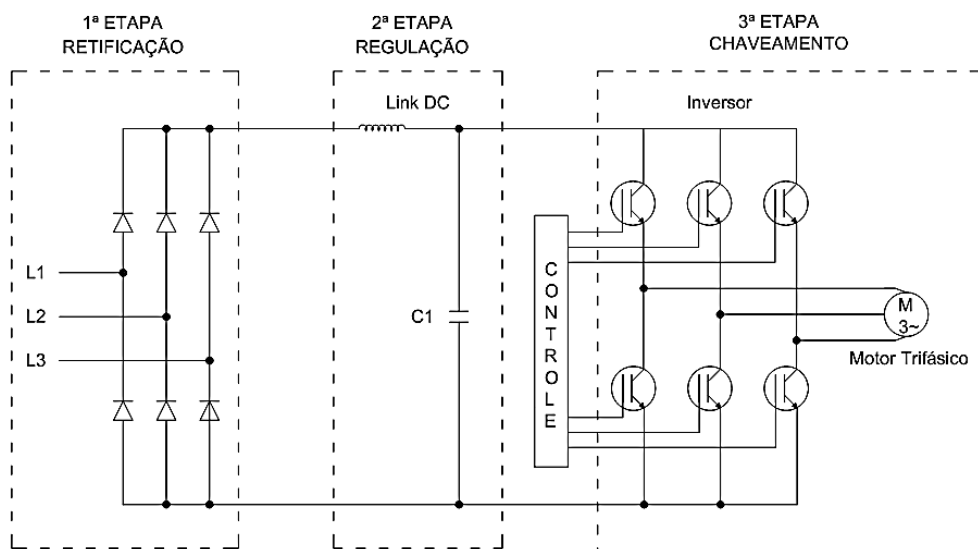
1.2 Inversor de Frequência

A eletrônica de potência, com o passar do tempo, vem tornando mais fácil, e de menor custo, o acionamento e variação da velocidade de motores elétricos. Com isto, sistemas que antes utilizavam motores de corrente contínua, pela facilidade de controle, atualmente utilizam MIT's associados a Inversores de Frequência, também chamados de Conversores de Frequência. Em paralelo ao avanço da eletrônica de potência, a microeletrônica, por meio de microprocessadores e micro controladores, tem auxiliado muito no acionamento dos MIT's, possibilitando a implementação de funções complexas num tempo de processamento cada vez mais curto. Isto tem permitido a implementação de sofisticados algoritmos de controle que realizam o acionamento com alto desempenho dos MIT's.

A título de exemplo, pode-se citar que MIT's acionados por meio de Inversores de Frequência podem substituir com vantagens, os sistemas de controle de fluxo de bombas, ventiladores, esteiras e partidas de máquinas rotativas que necessitam de um alto torque de arranque.

O Inversor de Frequência é ligado na rede elétrica, que pode ser monofásica ou trifásica, e em sua saída há uma carga que necessita de uma frequência diferente daquela da rede. Para tanto, o inversor tem como primeiro estágio, um circuito retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua. Após isso, existe um segundo estágio capaz de realizar o inverso, ou seja, a transformação de uma tensão contínua em uma tensão alternada (conversor), e com a frequência desejada pela carga. A Figura 2 ilustra o diagrama detalhado das etapas do Inversor de Frequência.

Figura 2: Diagrama das etapas de um Inversor de Frequência.



Fonte: (FRANCI, 2008).

Na primeira etapa ocorre a retificação do sinal de entrada, onde a frequência do sinal de entrada é fixa (60 Hz ou 50 Hz), e a tensão é transformada pelo retificador de entrada em tensão contínua pulsada (retificação de onda completa).

A segunda etapa é responsável pela regulação do sinal através do Link DC, que regula a tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores (C1) e filtra as componentes indesejáveis do sinal. A tensão contínua regulada obtida na segunda etapa é conectada ciclicamente aos terminais de saída pelos dispositivos semicondutores do inversor, transistores ou tiristores, que funcionam como chaves estáticas.

O controle dos dispositivos semicondutores é feito pelo sistema de controle, de modo a obter um sistema de tensão pulsada, cujas frequências fundamentais estão defasadas de 120° . A tensão é escolhida de modo que a relação tensão/frequência seja constante, resultando em operação com fluxo constante e, conseqüentemente, manutenção da máxima capacidade de sobrecarga momentânea do motor. Como os transistores trabalham como chaves “liga ou desliga”, a forma de onda de tensão de saída do inversor de frequência é sempre quadrada. Para obter uma tensão de saída mais próxima da senoidal, os transistores chaveiam modulando sua largura de pulso através

de uma técnica chamada PWM (*Pulse Width Modulation*). (FRANCHI, 2008). A alta frequência do chaveamento dos IGBT's controladas pelo sinal PWM gera na saída do inversor um sinal senoidal (terceira etapa).

O Sistema de Controle realiza o controle do inversor, leitura da velocidade e corrente do motor e as interfaces (ajuste de parâmetros, envio de informações de falha a IHM (*Interface Human Machine*), recebimento e envio dos sinais nas entradas e saídas digitais e analógicas). (FRANCHI, 2008)

A Figura 3 ilustra um Inversor de Frequência, CFW - 08 7.0A/220-240 V, o mesmo utilizado no desenvolvimento das experiências.

Figura 3: Inversor de Frequência CFW-08.



Fonte: (Catálogo WEG, 2009).

1.2.1 Tipos de Controles do Inversor de Frequência

O Inversor de Frequência utilizado durante o desenvolvimento das experiências, CFW 08, possibilita o controle do funcionamento do MIT pela variação da frequência elétrica de duas formas distintas de controle: Escalar (V/f) e Vetorial (*Sensorless*).

- a) **Controle Escalar V/f:** Baseia-se no conceito original do conversor de frequência. Impõe ao motor uma determinada tensão/frequência, visando

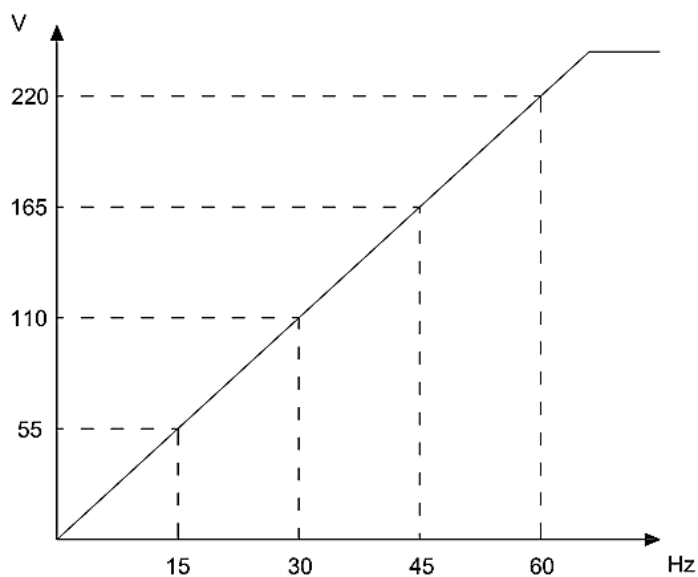
manter a relação V/f constante, ou seja, o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante.

O controle escalar V/f é utilizado em aplicações normais que não requerem elevada dinâmica (grandes acelerações e frenagens), elevada precisão sem controle de torque. Esse tipo de controle é realizado em malha aberta, ou seja, sem a leitura da velocidade do motor através de um sensor, e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga acoplada ao eixo do mesmo. (FRANCHI, 2008)

No Inversor de Frequência utilizado no desenvolvimento das experiências o controle escalar V/f pode ser realizado de maneira linear ou quadrática.

No controle V/f linear consegue-se manter o fluxo no entreferro do motor aproximadamente constante iniciando em torno de 3 Hz até o ponto de enfraquecimento de campo. Consegue-se assim, nesta faixa de variação de velocidade, uma capacidade de torque aproximadamente constante. O modo de controle Escalar V/f linear é recomendado para aplicações em esteiras transportadoras e extrusoras. A Figura 4 ilustra o comportamento da tensão x frequência do motor no modo de controle escalar V/f linear.

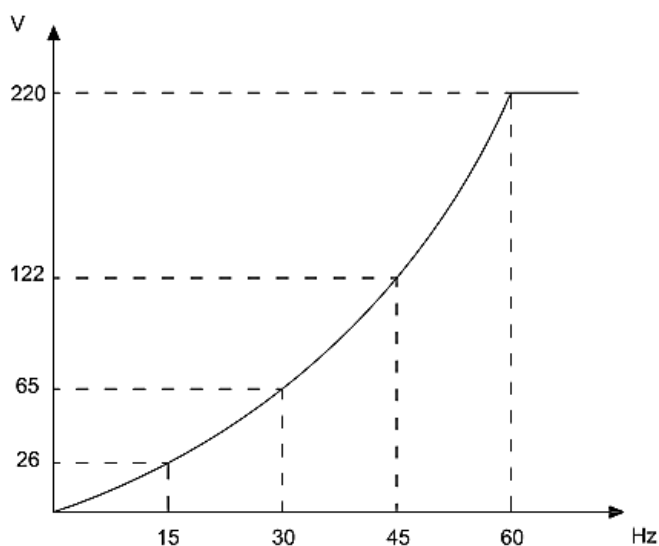
Figura 4: Gráfico tensão (V) x frequência (Hz) do motor modo controle Escalar V/f linear.



Fonte: (FRANCHI, 2008).

No Controle V/f quadrático o fluxo no entreferro do motor é proporcional à frequência de saída até ponto de enfraquecimento de campo. Dessa forma, resulta uma capacidade de torque como uma função quadrática da velocidade. A grande vantagem deste tipo de controle é a capacidade de economia de energia no acionamento de cargas de torque resistente variável, devido à redução das perdas do motor (principalmente magnéticas). O controle escalar quadrático é utilizado em bombas centrífugas, ventiladores e em acionamentos multimotores. A Figura 5 ilustra o comportamento da tensão x frequência do motor no modo de controle escalar V/f quadrático.

Figura 5: Gráfico tensão (V) x frequência (Hz) do motor no modo controle Escalar V/f quadrático.



Fonte: (Catálogo WEG, 2009).

b) Controle Vetorial *Sensorless*:

No controle vetorial *Sensorless* a operação do inversor é otimizada para o motor em uso, obtendo-se um melhor desempenho em termos de torque e regulação de velocidade. O controle vetorial *Sensorless* não necessita de um sinal de realimentação de velocidade (sensor de velocidade como tacogerador ou encoder no eixo do motor).

Para que o fluxo no entreferro do motor, e conseqüentemente, a sua capacidade de torque, se mantenha constante durante toda a faixa de variação de velocidade (de zero até o ponto de enfraquecimento de campo) é utilizado um algoritmo sofisticado de controle que leva em conta o modelo dinâmico do motor de indução. Dessa forma, consegue-se manter o fluxo no entreferro do motor aproximadamente constante para frequências de até aproximadamente 1 Hz.

Trabalhando no modo vetorial consegue-se uma regulação de velocidade na ordem de 0.5 % da rotação nominal. Por exemplo, para um motor de 4 polos e 60 Hz, obtém-se uma variação de velocidade na faixa de 10 rpm. Outra grande vantagem do controle vetorial é a sua inerente facilidade de ajuste. Basta que o usuário entre com as informações relativas ao motor utilizado (dados de placa) nos parâmetros de característica do motor e rode a uma rotina de auto ajuste que o inversor se auto configura para a aplicação em questão e está pronto para funcionar de maneira otimizada. Essa facilidade do auto ajuste não é encontrada em todos os inversores de frequência, porém é presente no inversor CFW-08 utilizado durante o desenvolvimento das experiências.

O controle vetorial é amplamente utilizado em acionamentos que exijam posicionamento como movimentação de cargas, máquinas de empacotamento e bombas dosadoras.

1.2.2 Fontes de referência de frequência/velocidade

O inversor de frequência necessita de um sinal de referência de frequência/velocidade de funcionamento para o controle da rotação do motor. De acordo com essa referência de frequência, o inversor controla a rotação do motor ajustando a frequência e tensão de alimentação do motor, e em conseqüência à rotação. Existem alguns tipos de sinais de referência de frequência/velocidade. A seguir são descritos os mais utilizados:

- a) **Acionamento via Teclas:** Uma das maneiras de realizar o controle de velocidade de um inversor de frequência é o acionamento pelas teclas da IHM

(Interface Homem Máquina). É preciso colocar o inversor no modo local, e pelo teclado incrementar e decrementar a velocidade do motor localmente, bem como inverter o sentido de giro do motor.

b) Acionamento via Entradas Digitais: Em uma aplicação industrial torna-se inviável o acionamento de um inversor localmente pelas teclas da IHM. Assim, a maioria das aplicações com inversor de frequência é realizada por meio de comandos remotos. Para isso deve-se colocar o inversor no modo de acionamento remoto e, por meio de botões externos, acionar ou desativar o motor e ainda inverter seu sentido de giro. Geralmente o fornecimento dos sinais digitais externo é realizado por saídas digitais de um controlador lógico programável (CLP).

c) Acionamento via função *Multispeed*: é utilizado quando se desejam velocidades fixas pré-programadas. Permite o controle da velocidade de saída relacionando os valores definidos por parâmetros, conforme a combinação lógica das entradas digitais programadas para função. É necessário fazer com que a fonte de referência seja dada pela função *multispeed*. Deve-se colocar o inversor no modo remoto e programar uma ou mais entradas digitais como referências de velocidades fixas de frequência/velocidade.

Geralmente o fornecimento dos sinais digitais externos de referência de frequência/velocidade da função *multispeed* é realizado por saídas digitais de um CLP, que combinadas fornecem uma sequência de bits. Cada uma das sequências é referente a uma velocidade pré-programada na função *multispeed* do inversor.

A função *multispeed* tem como vantagem a estabilidade das referências fixas de velocidade pré-programadas que garantem a imunidade contra ruídos elétricos.

d) Acionamento via potenciômetro eletrônico: nesse modo de acionamento pode-se aumentar ou diminuir a velocidade do motor através de pulsos nas entradas digitais do inversor, ou seja, a velocidade pode ser incrementada em uma entrada digital e decrementada em outra. Essa função é muito útil quando queremos fazer o controle de velocidade sem a utilização das entradas analógicas ou através de botoeiras em um painel local.

e) Acionamento via entradas analógicas: em muitas aplicações industriais deseja-se um controle de velocidade do motor de 0 a 100%. Para esse tipo de aplicação utilizam-se sinais de corrente (4 a 20 mA) e tensão (0 a 10V) como

referências de frequência/velocidade. Esses sinais são aplicados nas entradas analógicas do inversor de frequência. Esse tipo de configuração é um dos mais utilizados na indústria quando se deseja controlar um motor através do inversor de frequência remotamente. Geralmente o fornecimento do sinal de corrente ou tensão é realizado por uma saída analógica de um controlador lógico programável (CLP).

1.3 Controlador Lógico Programável (CLP)

O CLP é um equipamento composto de componentes eletrônicos e memória programável. Contêm dados e programas com a finalidade de ler e executar instruções, interagindo com um sistema controlado por dispositivos de entrada e saída de dados do tipo digital ou analógico.

O CLP é considerado um computador que realiza funções de controle em vários níveis de complexibilidade, e é projetado para trabalhar em ambiente industrial com variação de temperatura, umidade, vibrações, distúrbios elétricos e outras variantes que existem no ambiente industrial. (PRUDENTE, 2007).

O primeiro CLP surgiu no final dos anos 1960 na indústria automobilística com a finalidade de encurtar os tempos de paradas das máquinas na produção. Naqueles anos a indústria automobilística suspendia a atividade produtiva toda vez que mudava a produção de um modelo de montagem do mesmo tipo de automóvel. Ou seja, mudar o modelo de peça a ser produzida significava mudar todos os quadros elétricos, o que gerava um custo elevado para a empresa. A utilização dessa nova tecnologia permite que o processo de substituição do quadro elétrico não seja mais necessário, e possa ser agora executado com uma simples programação do dispositivo CLP. (PRUDENTE, 2007).

Com o passar do tempo, o CLP transformou-se em um equipamento mais simples de usar, mais confiável e produtivo. Dos anos 1980 em diante deu-se um enorme desenvolvimento na indústria dos computadores, tornando o CLP um equipamento especializado, e difundindo sua aplicação no mercado. O mercado do CLP

creceu de um volume de cerca de 120 milhões de dólares em 1978 para cerca de 100 bilhões de dólares nos primeiros anos da década de 1990, e ainda hoje esta crescendo devido a constante expansão industrial. (PRUDENTE, 2007).

A estrutura de um CLP pode ser dividida em três partes: entrada, processamento e saída. A Figura 6 ilustra a estrutura básica de um CLP.

Figura 6: Estrutura básica do CLP.



Os sinais obtidos nas entradas do CLP fornecem comandos de acionamento e status dos atuadores do processo. A unidade de processamento é responsável por avaliar as entradas e em seguida tomar uma decisão dos estados das saídas, alterando-as ou não.

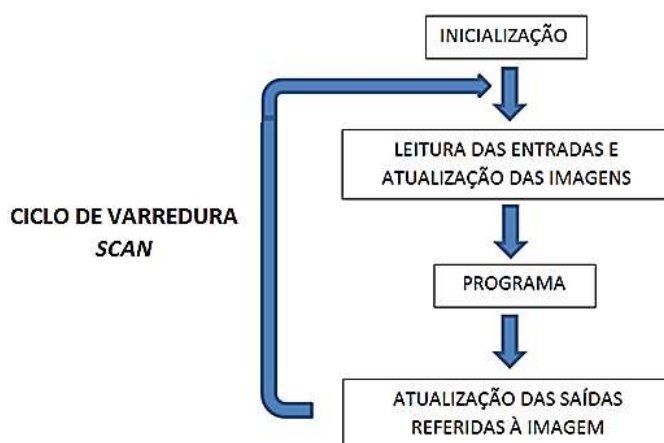
A lógica que avalia a condição dos pontos de entrada e dos estados anteriores do CLP, executando as funções desejadas e acionando as saídas, é chamada de programa aplicativo ou simplesmente programa do CLP. Para isso, o CLP lê ciclicamente as entradas transferindo-as para uma memória imagem, que recebe em cada endereço correspondente a uma entrada o seu valor. Se a entrada é um sinal digital o valor armazenado é 0 ou 1. Se a entrada é um sinal analógico é armazenado um valor numérico.

De posse da memória imagem das entradas e dos estados internos gerados pelos ciclos de execução anteriores, o CLP gera uma memória imagem das saídas conforme as operações definidas no programa. Por fim, a memória imagem das saídas é transferida para as saídas (valor 0 ou 1 causa o desligamento ou acionamento de uma saída digital, já um valor numérico modifica o valor de corrente ou tensão de uma saída analógica).

A leitura, tomada de decisão e escrita é realizada dentro de uma varredura de *Scan*. No *Scan* de programa as instruções são executadas sequencialmente, ou seja, uma instrução depois da outra na sequência direta de como foram carregadas no programa.

A Figura 7 ilustra o processo de leitura na entrada até a escrita nas saídas do CLP.

Figura 7: Ciclo de processamento do CLP.



O CLP é formado por um conjunto de equipamentos eletrônicos que realizam o processamento, aquisição dos dados oriundos dos sensores de campo e que acionam os atuadores do processo. Os itens básicos que compõe um CLP são:

- Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit* - CPU);
- Módulos de Entrada e Saída Digitais e Analógicos;
- *Rack* de montagem e fixação.

A CPU comanda todas as atividades do CLP, sendo formada por três elementos: Fonte de alimentação, Processador e Sistemas de memórias.

A fonte de alimentação é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para os equipamentos eletrônicos presentes no rack de montagem. Geralmente é alimentada com uma tensão contínua de 24 Vdc, a mesma fornecida em sua saída para alimentação dos demais equipamentos eletrônicos presentes no *rack*.

O processador realiza as tomadas de decisão de acordo com a lógica implementada via *software*, recebendo os dados oriundos das memórias de leitura e

devolvendo ao sistema periférico uma resposta aos dados lidos dentro de um ciclo de tomada de decisão de acordo com a lógica implementada.

As memórias são divididas em duas partes: instruções do programa executivo que comanda as atividades da CPU e instruções do programa de aplicação do usuário, esta última parte expansível. A memória de programa é responsável pelo armazenamento do programa aplicativo, desenvolvido pelo usuário para desempenhar determinadas tarefas. A memória de dados é utilizada para armazenamento de dados temporários da CPU.

Os módulos de entrada e saída são responsáveis pela aquisição dos dados de campo e pelos sinais enviados aos atuadores do processo. São classificados de acordo com dois tipos de sinais: digitais e analógicos.

Os módulos de entrada e saídas digitais são compostos de grupos de bits, associados em conjunto de 8 bits (1 byte) ou conjunto de 16 bits, de acordo com o tipo da CPU utilizada. O módulo de entrada digital é utilizado para aquisição dos sinais de acionamentos e desligamento do processo e equipamentos. Também é utilizado na aquisição de sinais referentes aos status (ON/OFF) dos atuadores do processo. O módulo de saída digital é utilizado para acionar os atuadores do sistema, como contadores e válvulas.

Os módulos de entradas analógicas são formado por conversores A/D, que convertem um sinal analógico de entrada de tensão (0 a 10V), ou corrente (4 a 20 mA), em um valor digital, normalmente de 12 bits (4.096 combinações).

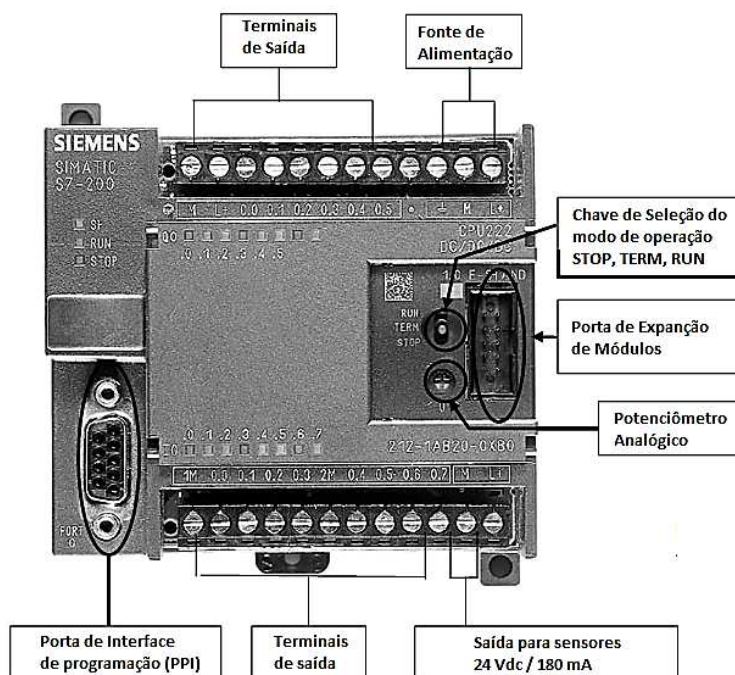
Os módulos de saídas analógicas são formado por conversores D/A, ou seja, um valor binário é transformado em um sinal analógico de tensão (0 a 10V), ou corrente (4 a 20 mA). O módulo de saída analógica é responsável pelo envio de sinal de corrente ou tensão contínua aos atuadores do processo. Geralmente é utilizado como sinal de controle de posicionamento de válvulas, referências de velocidade, para inversores de frequência, ou de pressão, para válvulas de controle de atuadores eletro-hidráulicos.

O *rack* de montagem é basicamente um trilho de fixação onde os componentes eletrônicos do CLP (CPU, Módulos de entrada e saída digitais e analógicos, fonte e

cartões de comunicação) são fixados a fim de se ter um mesmo potencial de referência a terra. .

O CLP utilizado durante o desenvolvimento das experiências foi um Simatic S7-200 CPU 222 que possui a unidade de processamento, 8 entradas e 6 saídas digitais. Um módulo de expansão digital, EM222, que possui 8 entradas e 8 saídas digitais foi inserido ao rack do CLP. Um módulo de expansão analógico, EM 232, também foi inserido ao rack do CLP. O módulo EM 232 possui 4 entradas e 2 saídas analógicas. Neste módulo existem 2 entradas analógicas referentes a corrente (4 a 20 mA), 2 entradas analógicas referentes a tensão (0 a 10V), uma saída analógica referente a corrente (4 a 20 mA) e outra saída analógica referente a tensão (0 a 10 V). A Figura 8 ilustra o CLP utilizado.

Figura 8: CLP Siemens Simatic S7 200 CPU 222.



Fonte: (Catálogo SIEMENS, 2009).

O programa utilizado para programar o CLP é o STEP-7 Micro/Win, este possibilita realizar a programação em três tipos de linguagem, sendo elas: *Ladder*, *Function Block* e *Statement List*. As linguagens *Ladder* e *Function Block* possuem um caráter mais complexo, sendo que algumas de suas funções não são intercambiáveis

entre si. O *Statement List* é uma linguagem mais simples e aceita funções de ambas as outras linguagens. O *Function Block* obedece a um padrão europeu de linguagem, dado por sua respectiva norma, logo esta linguagem é intercambiável com outros fabricantes de controladores lógicos programáveis.

1.4 Freio Eletromagnético

O freio eletromagnético é um dispositivo no qual interações eletromagnéticas provocam uma redução de velocidade num corpo em movimento, sem a necessidade da atuação de forças de atrito. Esse efeito é utilizado em vários tipos de frenagens, entre elas pode-se citar a frenagem de trens, de guinchos de grandes guindastes e até mesmo em carretilhas de pesca.

O freio magnético utilizado neste trabalho é constituído de um disco de material condutor elétrico, dimensionado para suportar as correntes induzidas no mesmo, onde estas correntes são proporcionais à velocidade de giro do disco. O freio também é constituído por um par de empacotamentos de uma liga de ferrosilício, em formato de um cilindro, onde uma de suas extremidades se prende na estrutura física do equipamento, de modo a sustentar a peça perpendicularmente ao disco. Em sua outra extremidade uma sapata centraliza o campo magnético gerado pelas correntes. Ao redor do cilindro se encontra uma bobina formada por espiras de cobre esmaltado, onde o par de bobinas é ligado em série uma a outra, esta ligação é realizada de forma a permitir que as correntes nas duas bobinas tenham o mesmo sentido, assim as duas geram uma força contrária ao movimento do disco.

O *kit* é composto de uma base metálica comportando o dispositivo de frenagem composto por um braço oscilante, onde são dispostas duas bobinas, e por um disco de alumínio, constituindo um sistema de freio por correntes de Foucault. Permite a simulação de cargas no eixo do motor ou de outra máquina em prova possibilitando, inclusive, o travamento de seu eixo. A força aplicada ao eixo do motor é controlada através de uma fonte de tensão contínua, e esta mesma força mecânica é medida por um dinamômetro digital. A Figura 9 ilustra o freio eletromagnético e o leitor de torque utilizados no desenvolvimento das experiências. O leitor de torque possui uma interface

de comunicação serial e um visor digital onde é possível visualizar a medida do torque presente aplicado pelo freio.

Figura 9: *Kit* Freio Magnético



Fonte: (SCHOOLTECH, 2013).

O princípio de funcionamento é baseado em dois tipos de forças, uma sendo uma de natureza dinâmica e outra tendo uma natureza estática em função da atração magnética. (PEREIRA, 2006).

A corrente elétrica fornecida pela fonte de tensão contínua controlada gera um campo magnético que se concentra no entreferro do cilindro, como o entreferro está disposto de forma a fechar o circuito magnético pelo disco, o disco é atingido perpendicularmente por esta densidade de campo magnético. De acordo com a Lei de indução de Faraday, se o fluxo magnético, em uma superfície condutora fechada, variar com o tempo, será produzido por indução uma corrente elétrica e uma força eletromotriz no material condutor. Segundo a Lei de Lenz, o sentido desta corrente induzida é tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe a variação do fluxo magnético que induziu a mesma. Logo, como no sistema proposto o disco se move juntamente com o eixo do motor, mesmo que a corrente não varie, devido a ser uma fonte de alimentação em tensão contínua, o disco ao se mover irá fazer com que o fluxo magnético sobre o mesmo varie com o tempo, induzindo assim correntes no disco fazendo a placa parar de girar em pouco tempo.

1.5 Sensores Industriais

Os sensores tornaram-se vitais na indústria e os fabricantes estão mostrando uma tendência de integração de equipamentos controlados por computador. No passado, os operadores eram os cérebros de um equipamento e fonte de toda informação sobre a operação de um processo. O operador sabia se as peças estavam disponíveis, que peças estavam prontas, se eram boas ou más, se o trabalho feito com ferramentas estava aceitável, se o dispositivo elétrico estava ligado ou não, e assim por diante. O operador podia detectar problemas na operação vendo, ouvindo, sentindo (vibração, etc..) e cheirando problemas. A indústria está usando agora computadores (em muitos casos CLP's) para controlar os movimentos e as sequências das máquinas. Um CLP é muito mais rápido e mais preciso do que um operador nestas tarefas. Um CLP não pode ver ouvir, ter sensações, ou cheirar os processos, mas pode usar sensores industriais para substituir estas capacidades. O CLP pode usar sensores simples para verificar se peças estão presentes ou ausentes, para medir peças, e mesmo para verificar se o produto está vazio ou cheio. O uso de sensores para monitorar processos é vital para o sucesso de uma manufatura e para assegurar a segurança do equipamento e do operador. De fato, os sensores executam tarefas simples mais eficiente e preciso do que pessoas. Os sensores são muito mais rápidos e cometem poucos erros.

Os sensores podem ser classificados como digitais ou analógicos. As aplicações industriais necessitam tanto de sensores digitais quanto de analógicos. (VIANNA, 2008).

1.5.1 Sensores Digitais

Um sensor digital tem dois estados: ligado ou desligado. A maioria das aplicações envolve monitorar a presença/ausência de peças e processos de contagem, Para esta aplicação um sensor digital realiza a identificação do objeto de maneira perfeita e com um baixo custo. Os sensores digitais são mais simples e mais fáceis de usar do que os analógicos, o que é um fator para seu largo uso. (VIANNA, 2008).

Os sensores digitais geralmente possuem saídas transistorizadas. Se o sensor detectar um objeto, o transistor é ligado e permite a passagem de uma corrente elétrica. A saída do sensor é conectada geralmente a um módulo de entrada do CLP. Os sensores estão disponíveis com contatos de saída normalmente fechados ou normalmente abertos. Os sensores com contatos normalmente abertos permanecem desligados até que detectem um objeto e então são ligados. Os sensores com contatos normalmente fechados permanecem ligados até que detectem um objeto, quando então se desligam. O valor limite para a corrente elétrica de saída da maioria dos sensores é bastante baixo. Geralmente a corrente de saída deve ser limitada em valores menores que 100 mA. (VIANNA, 2008)

Existem vários tipos de sensores digitais que utilizam técnicas de leituras distintas para enviar sinais de estados para os CLP's e demais equipamentos de controle, são alguns deles:

- Sensores Óticos: reflexão, foto sensor polarizado, retro reflexão, ruptura de feixe, foto sensor de feixe convergente, laser, codificador, contador incremental, tacômetro;
- Sensores Ultrassônicos;
- Sensores Capacitivos;
- Sensores Indutivos;

1.5.2 Sensores Analógicos

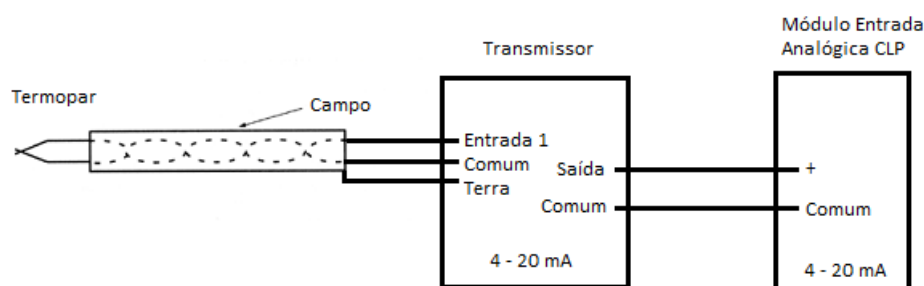
Os sensores analógicos, também chamados de sensores de saída linear, são mais complexos do que os digitais, mas podem fornecer mais informações sobre uma variável medida. Um bom exemplo é a utilização de sensores analógicos é medição de temperatura. Uma temperatura é uma informação analógica variável, e necessita de uma medição constante. Um sensor analógico detecta a temperatura através de suas alterações físicas sofridas com a variação da temperatura. Um transmissor emite uma corrente elétrica (4 a 20 mA) ou uma tensão (0 a 10V) ao CLP. Quanto mais alta a temperatura medida, mais elevada a corrente ou tensão de saída do transmissor que é informada ao CLP.

A saída de um sensor digital está ou ligada ou desligada, por outro lado, a saída de um sensor analógico pode ser qualquer valor dentro da escala de corrente (4 a 20 mA) ou tensão (0 a 10V). Assim, o CLP pode monitorar a temperatura mais preciso e controlar o processo através do acionamento de atuadores. Os sensores de pressão também estão disponíveis como dispositivos analógicos. Fornecem uma tensão ou corrente de saída dependendo da pressão a que estão submetidos. (VIANNA, 2008).

Existem vários tipos de sensores analógicos sendo utilizados na indústria. A escolha do sensor analógico depende da variável físico-química a ser medida, e do range de medição a ser realizado. As medições de temperatura estão entre as variáveis físico-químicas mais medidas na indústria, sendo o termopar e dispositivos de temperatura resistivos (*Resistance Temperature Device* - RTD) os sensores de temperatura mais utilizados.

O termopar é um dispositivo muito simples que possui duas partes de fio de metais diferentes unidas em uma ou ambas as extremidades. O termopar industrial típico é unido em uma extremidade, ilustrado na Figura 10. As outras extremidades do fio são conectadas através de um fio de compensação às entradas analógicas de um dispositivo do controle tais como um CLP. O princípio da operação baseia-se em unir metais diferentes e produzir uma pequena tensão de acordo com a variação da temperatura. A saída da tensão é proporcional à diferença na temperatura entre as partes frias e quentes.

Figura 10: Termopar.



Existem diferentes tipos de termopares com ligas metálicas distintas. Escolhe-se o termopar a ser utilizado de acordo com a faixa de temperatura a ser medida. A Tabela 1 apresenta as faixas e tipos de termopares mais utilizados na indústria.

Tabela 1: Tipos de Termopares e faixa de temperatura.

Tipo	Temperatura (° C)
J	-40 a + 760
K	-80 a + 1240
T	-130 a +350

Fonte: (VIANNA, 2008).

Outro tipo de sensor utilizado para medição de temperaturas é o RTD, que nada mais é que um resistor de precisão cuja resistência se altera com a variação da temperatura. RTD's são mais precisos do que termopares, porém possuem faixas de medição de temperaturas menores quando comparados com os termopares. A resistência mais comum de um RTD é de 100 ohms a 0° C. Outros estão disponíveis na escala de 50 a 100 ohms. A platina é o material mais popular para RTD's. Apresenta um comportamento muito linear na resistência x temperatura, e tem uma escala de operação bastante ampla. (VIANNA, 2008).

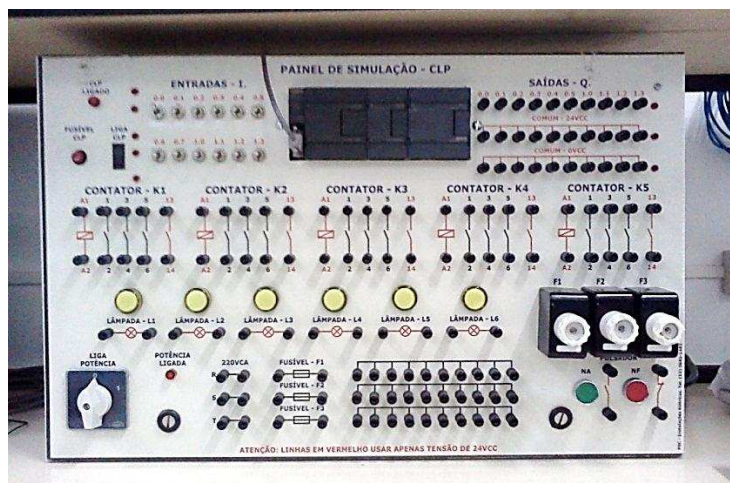
2 DESENVOLVIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

Para a realização dos experimentos primeiramente foi necessário listar e especificar os equipamentos envolvidos. A seguir serão descritas as especificações e quantidade dos equipamentos envolvidos:

- 01 computador para a utilização do software MicroWin STEP7;
- 01 CLP SIMATIC S7-200 CPU 222;
- 01 Módulo de entrada e saída digital EM223;
- 01 Módulo de entrada e saída analógica EM235;
- 01 Inversor de Frequência CFW 08 7.0 A/200-240 V;
- 01 motor elétrico de indução trifásico 220/380 V 0,75 CV;
- 01 Motor Universal 12 V;
- 01 Freio Magnético 7 N.M;
- Cabos e conectores flexíveis de 1,5 mm² e 2,5 mm² com conectores tipo “banana” de 4 mm².

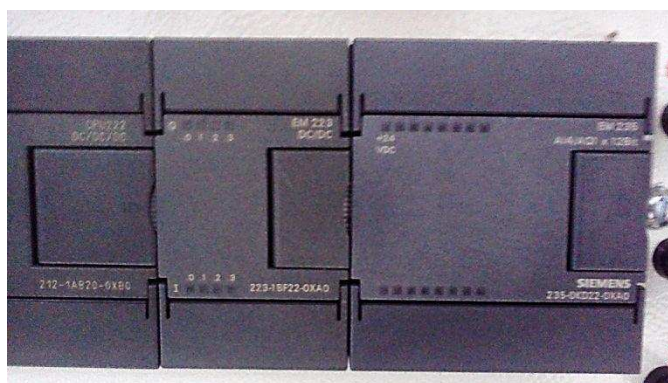
O CLP utilizado está fixado em um painel de montagem, onde suas interfaces de entrada, saída e demais utilitários de controle (contatores, sinaleiros, fusíveis, chaves e botões de acionamento) estão montados na parte frontal do painel. O kit didático foi desenvolvido para que os alunos da disciplina de Automação Industrial possam realizar as experiências tratadas durante o curso de Engenharia Elétrica. Figura 11 ilustra o painel de montagem do CLP com suas conexões frontais.

Figura 11: Painel de montagem do PLC.



Para realização das experiências foi necessário o acréscimo de módulos de entradas/saídas digitais e analógicas. Foi adicionado a cada painel um módulo EM223 que possui 4 entradas e 4 saídas digitais para um aumento do número de I/O digitais. Também foi adicionado um módulo EM235 que possui 4 entradas analógicas, sendo 2 de tensão (0-10 V) e outras 2 de corrente (4 – 20mA). A Figura 12 ilustra os módulos EM223 e EM235 adicionados ao painel.

Figura 12: Módulos adicionais EM223 e EM235.



O Inversor de Frequência foi montado em uma caixa de passagem modelo LIGHT – 300x220x148, fabricada pela STECK. As conexões de potência e sinais de controle foram disponibilizadas na parte frontal da caixa com a finalidade de facilitar as conexões com o painel do CLP e motor. As conexões instaladas na parte frontal da caixa se referem às entradas/saídas digitais e analógicas do inversor utilizadas para referências de velocidade e comandos de acionamento. A Figura 13 ilustra a caixa do Inversor de Frequência com suas conexões frontais.

Figura 13: Caixa de ligação Inversor de Frequência.

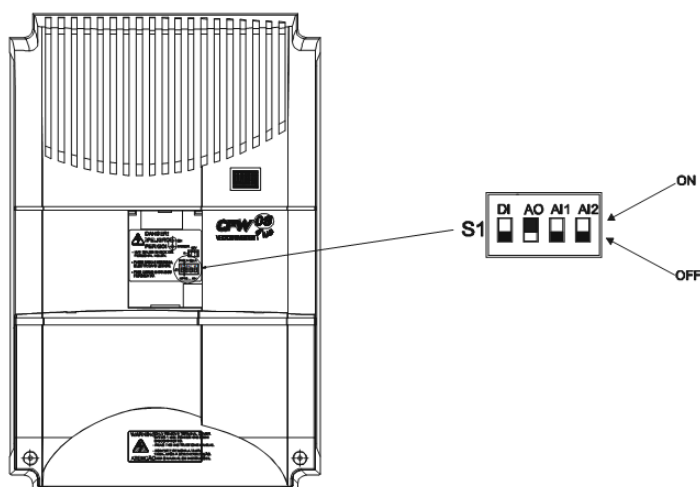


As experiências desenvolvidas estão relacionadas com o acionamento de motores elétricos com a utilização de Inversor de Frequência, CLP e simulação de carga pela ação do Freio Magnético. Inicialmente são abordadas experiências voltadas para o acionamento do motor apenas com sinais digitais de controle. Posteriormente são apresentadas experiências de acionamento do motor com sinais analógicos como referência de velocidade para os motores.

Uma observação importante é a verificação do posicionamento dos mini interruptores da chave DIP (*Dual In-line Package*) que é responsável pela configuração dos sinais de entrada e saída do inversor. A chave DIP seleciona se as entradas digitais do inversor são ativo alto ou baixo, e o tipo de sinal da entrada e saída analógica.

As entradas digitais do inversor podem ser ativo alto NPN, ou seja, um sinal digital de 24 Vdc é interpretado como “1” lógico. Se as entradas digitais forem configuradas para ativo baixo PNP o “1” lógico é interpretado tendo-se 0 Vdc aplicado as entradas digitais. O modelo de inversor utilizado no desenvolvimento das experiências possui 4 entradas digitais (DI1, DI2, DI3 e DI4) e apenas uma entrada analógica (AI1) que pode ser configurada para entrada de sinais de tensão (0 a 10 V) ou corrente (4 a 20 mA). A chave DIP S1 presente no inversor está localizada atrás da IHM, na parte frontal do inversor. A Figura 14 ilustra a chave DIP e seus respectivos mini interruptores.

Figura 14: Chave DIP do inversor de frequência.



Fonte: (Catálogo WEG, 2009).

Essa é uma informação necessária para o correto funcionamento do inversor e a segurança do equipamento. Um sinal externo mal condicionado em uma entrada configurada erroneamente pode ocasionar danos ao equipamento, até mesmo sua queima. O modelo de inversor utilizado no desenvolvimento das experiências não apresenta saída analógica AO e apenas uma entrada analógica (AI1), logo não possui a entrada AI2. Com isso apenas necessitamos configurar a chave DIP S1:1, referente as entradas digitais, e S1:3, referente a entrada analógica AI1. A Tabela 2 ilustra a configuração da chave DIP para os sinais de entrada a serem utilizados.

Tabela 2: Configuração dos jumpers de seleção par I/O (entradas e saídas) digitais e analógicas.

I/O	Chave de Ajuste	Seleção
DI1 a DI4	S1:1	OFF: entradas digitais como ativo baixo (NPN) ON: entradas digitais como ativo alto (PNP)
AI1	S1:3	OFF: (0 a 10) Vcc ou DI5 ON: (4 a 20) mA ou (0 a 20) mA

Fonte: (Catálogo WEG, 2009).

Analisando a Tabela 2, as posições 1 e 3 foram configuradas da seguinte maneira:

- S1:1 = ON, pois as saídas do CLP utilizado são ativo alto (24V em ON);
- S1:3 = OFF, pois os sinais de entrada analógicos são de 0 a 10 V.

2.1 Acionamento e controle de um MIT com Sinais Digitais

As três primeiras experiências simulam um ambiente fabril onde é necessário realizar a automatização do funcionamento de um misturador. A hélice do misturador é acionada por um motor elétrico trifásico, logo, ao controlar o movimento angular desse motor controla-se o misturador. Para simulação serão controladas pelo CLP variáveis como sentido de giro do motor e modos de operação MANUAL e AUTOMÁTICO.

A quarta experiência descreve o acionamento e controle do posicionamento angular do motor. Uma chave de pulsos simula um sensor ótico de posição que identifica um rebaixo no eixo do motor como a posição desejada para sua parada. O sistema interpreta esse pulso e controla o acionamento e sentido de giro do motor afim de buscar a parada completa do motor na posição desejada, que no caso é o rebaixo.

A seguir são apresentadas as quatro experiências brevemente descritas anteriormente, onde o aluno pode aplicar métodos de programação e montagem do equipamento de maneira gradativa.

2.1.1 Experiência 1 : Controle Acionamento MANUAL

Baseia-se na partida controlada de um MIT com auxílio do CLP e Inversor de Frequência simulando o funcionamento de um misturador simples, onde existe uma chave digital que irá ligar o motor (S1), outra chave (S2) que desligará o motor e uma última chave (S3) que irá inverter o sentido de rotação do motor. As chaves digitais serão acionadas manualmente.

Para o funcionamento do projeto é necessário realizar a programação do CLP, parametrização do inversor de frequência, bem como as interligações entre os equipamentos. Esta experiência pode ser dividida em quatro fases sendo elas:

- Levantamento dos dados técnicos do motor;
- Parametrização do Inversor de Frequência;
- Montagem do projeto;
- Programação do CLP;

O motor utilizado no experimento possui as seguintes características:

- Tensão de alimentação: 220/380 V;
- Corrente Nominal: 3,05/1,77 A;
- Fator de Potência: 0,69;
- Potência: 0,56/0,75 HP;

- Fator de serviço: 1,15;
- Auto ventilação: Sim

Parametrizar o inversor de frequência nada mais é que informar o sistema de controle do inversor o comportamento desejado do motor durante sua partida, funcionamento em regime permanente e parada através da configuração de parâmetros de funcionamento. A parametrização do inversor de frequência é realizada via teclas da IHM, presente na parte frontal do equipamento.

O tipo de controle é um item muito importante a ser definido, pois interfere diretamente na resposta do motor quando sujeito a cargas mecânicas. Nas experiências é utilizado o Controle Vetorial *Sensoreless*, onde o sistema de controle do inversor detecta a diferença de frequência de funcionamento do motor e a frequência de referência parametrizada realizando um ajuste de corrente de saída nos bornes de alimentação do motor, conseqüentemente ajustando sua velocidade para a frequência parametrizada. O parâmetro utilizado para definir o tipo de controle é o P202.

As informações do motor a ser acionado pelo inversor de frequência também são necessárias serem parametrizadas. Os parâmetros P399 a P407 são referentes às seguintes informações nominais do motor: tensão, corrente, velocidade, frequência, potência, e fator de potência. Essas informações podem ser visualizadas na placa dados do motor.

O modo de operação, remoto ou local, também deve ser informado ao inversor. O modo local é utilizado quando desejamos acionar o motor localmente via teclas da IHM. O modo remoto possibilita o acionamento do motor através de suas entradas digitais. O parâmetro P220 é o responsável por essa configuração. O parâmetro P222 refere-se ao sinal de referência de velocidade, que no caso é o das teclas da IHM do inversor sendo P222 parametrizado como 0. O parâmetro P121 refere-se a frequência de referência no modo remoto pelas teclas, sendo no caso parametrizado como 60.

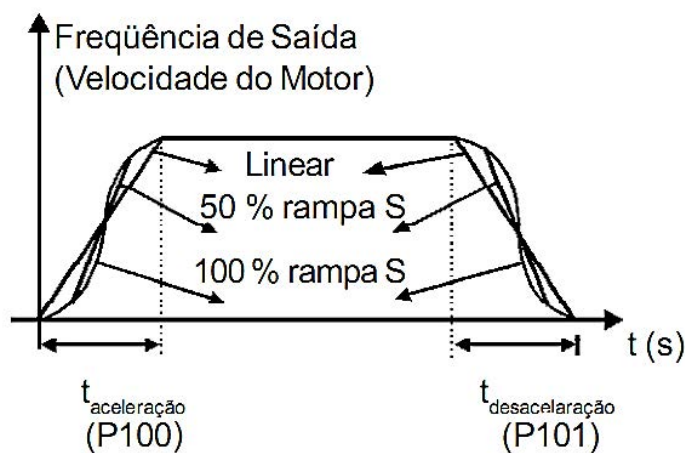
O parâmetro P230 é referente à origem dos comandos de controle do inversor de frequência. Para todas as experiências a origem dos comandos de controle são via entradas digitais presentes na borneira XC,1 na parte inferior do inversor. As conexões das entradas digitais do inversor estão disponíveis no frontal da caixa de montagem do inversor corretamente identificadas podendo ser visualizadas na Figura 14.

Os parâmetros P263 a P266 referem-se à configuração da função de comando de cada entrada digital. Essa configuração dos parâmetros P263 a P266. Para as experiências 1,2,3 e 4 as chaves digitais DI1 a DI4 possuem respectivamente as seguintes funções de controle: habilita geral (DI1), sentido de giro (DI2), liga (DI3) e desliga (DI4).

Os parâmetros P100 e P101 definem respectivamente o tempo de aceleração e de desaceleração do motor, controlando o torque do motor na partida até seu regime permanente. A aceleração e desaceleração do motor podem ser realizadas de maneira linear ou não linear (Curva S - 50 ou 100%) através do parâmetro P104.

A Curva S (não-linear) suaviza a aceleração e desaceleração do motor, reduzindo os choques mecânicos. É muito utilizada na indústria, principalmente na partida de motores de alta potência, pois minimizam os picos de corrente, que normalmente atingem em uma partida direta 5 a 7 vezes a corrente nominal do motor elétrico. A Figura 15 ilustra o funcionamento do motor de acordo com os parâmetros de aceleração e desaceleração citados.

Figura 15 – Aceleração e desaceleração do motor linear ou com rampa S.



Fonte: (Catálogo WEG, 2013).

Os parâmetros utilizados na configuração do inversor de frequência para experiência 1, 2 e 3 podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiências 1, 2 e 3.

Parâmetro	Valor	Descrição
100	3	Tempo de aceleração
101	3	Tempo de desaceleração
104	1	Ativar Curva S
121	60	Referência de velocidade pelas teclas
202	2	Tipo de Controle (Vetorial = 2)
399	0,69	Rendimento do motor
400	220	Tensão Nominal do motor
401	3,05	Corrente nominal do motor
402	1780	Velocidade nominal do motor
403	60	Frequência nominal do motor
404	4	Potência Nominal do motor
407	0,69	Fator de Potência
408	1	Rotina de auto ajuste
220	1	Modo Remoto constante
222	0	Referência de frequência via teclas IHM
121	60	Referência de frequência
230	1	Origem dos comandos de controle em XCI
263	1	DI1 = Habilita Geral
264	0	DI2 = Sentido de Giro
265	10	DI3 = Liga
266	11	DI4 = Desliga

Com o Inversor parametrizado foi realizada programação do CLP. Para tal foi necessário relacionar as chaves de acionamento digital do inversor com as entradas e saídas digitais do CLP.

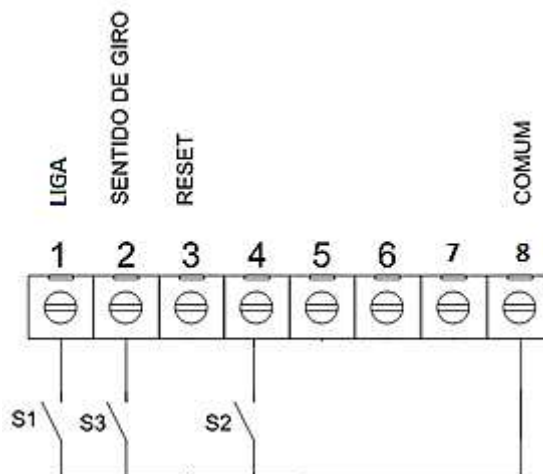
A entrada digital DI1 tem a função de Habilita Geral e é ativada diretamente pela alimentação de 24 Vdc disponibilizada pelo inversor no borne 9 da borneira XC1, logo não é utilizada uma entrada digital do CLP para acioná-la. As chaves S1, S2 e S3 referem-se as demais entradas digitais do CLP, que quando acionadas dentro da lógica programada no software, realizam as funções de controle estabelecidas pelas respectivas entradas digitais de controle do inversor de frequência. A Tabela 4 informa as relação entre as chaves digitais do inversor de frequência com as entradas digitais do CLP.

Tabela 4: Relação entradas digitais CLP e inversor de frequência

Entrada Digital Inversor	Entrada Digital do CLP	Função
DI1	-	Habilita geral
DI2 – S3	I0.3 – S3	Sentido de giro
DI3 – S1	I0.1 – S1	Liga
DI4 – S2	I0.2 – S2	Desliga

Após a programação do *software* do CLP foi realizada a interligação dos equipamentos envolvidos na experiência. A Figura 16 ilustra a ligação das entradas digitais de controle do inversor de frequência.

Figura 16 – Interligação das entradas digitais do Inversor de Frequência com as chaves das entradas digitais do CLP para experiências 1,2 e 3.



As ligações das conexões digitais entre o CLP e as entradas digitais de controle do inversor de frequência foram realizadas com cabo de 2,5 mm².

Após a interligação dos sinais de controle foi realizada a interligação do circuito de potência, ilustrado na Figura 17. Pode ser observado o barramento de alimentação trifásica 220 VCA, o Inversor de Frequência, Freio Magnético, dispositivos de proteção (fusíveis e disjuntor) e o MIT. Foi necessário atentar ao tipo de fechamento de enrolamentos do estator do MIT que foi fechado na configuração delta (Δ) 220 Vca. A montagem e interligação dos equipamentos referentes à experiência 1 podem ser visualizadas na Figura 18. O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 1**.

Figura 17: Ligação do circuito de potência para experiências 1,2 e 3.

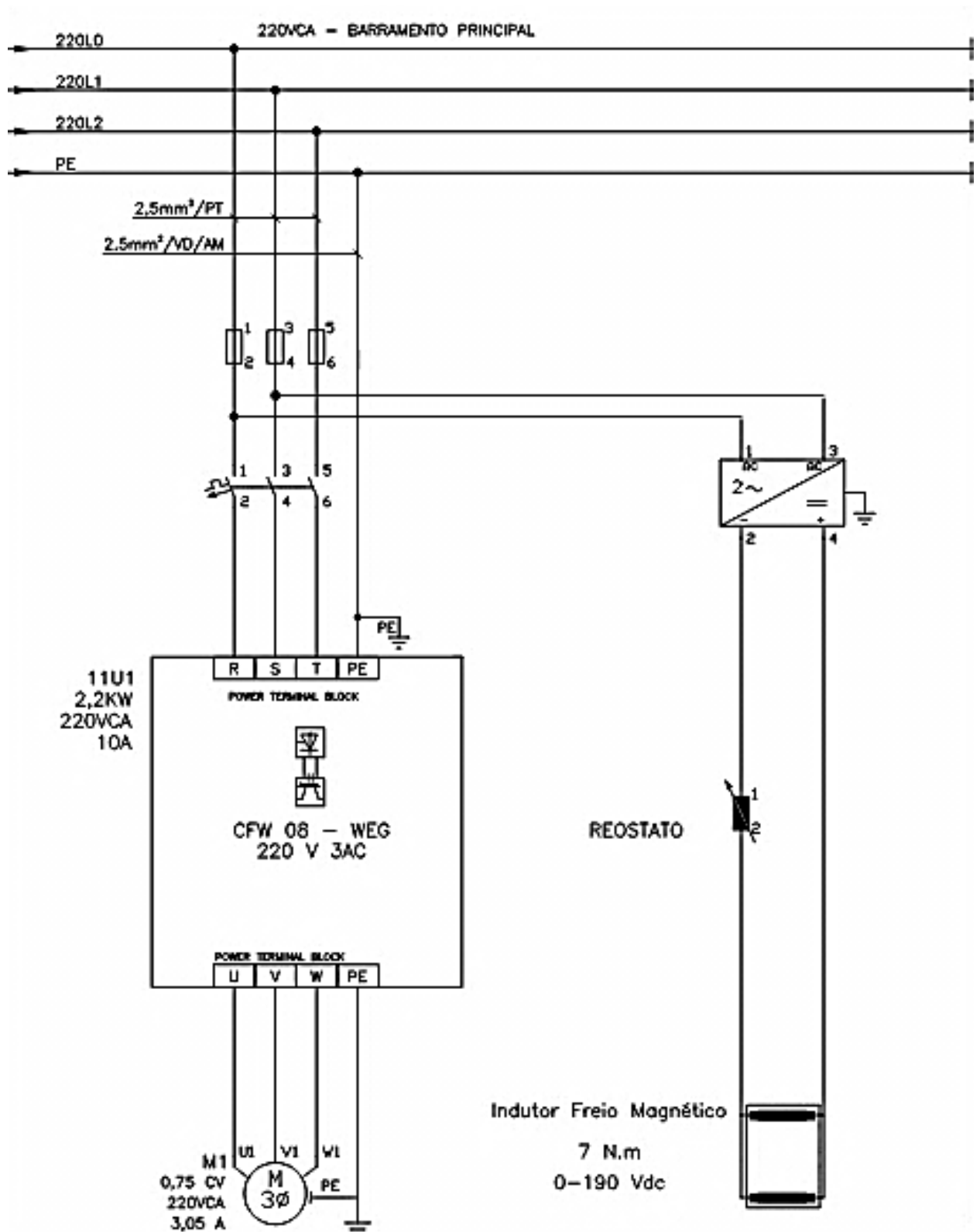
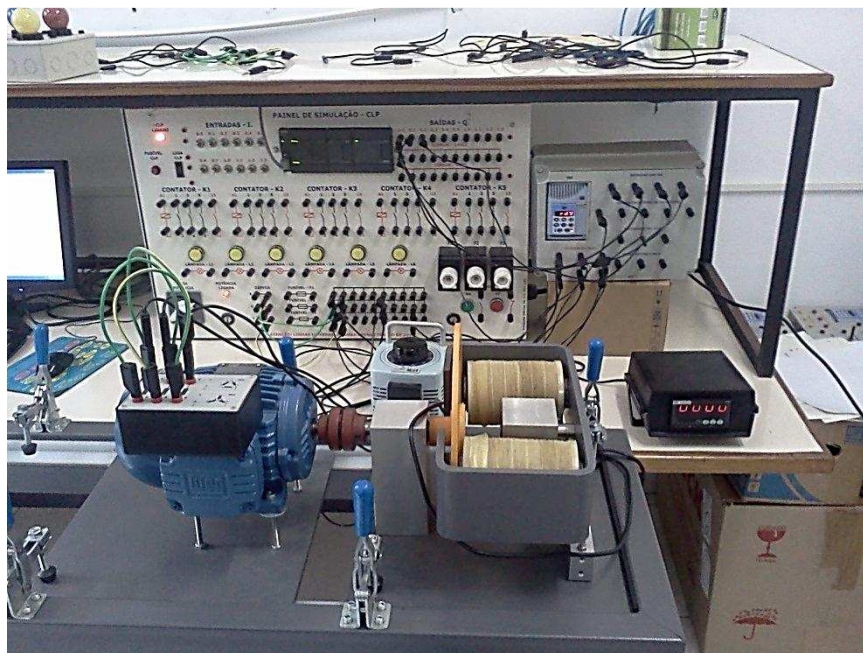


Figura 18: Montagem da experiência 1,2 e 3.



2.1.2 Experiência 2 : Controle Acionamento MANUAL e AUTOMÁTICO com 1 ciclo

Para esta experiência foi utilizado o mesmo motor e o mesmo Inversor de Frequência da Experiência 1 e, portanto, manteve-se a parametrização do inversor, conforme a Tabela 3. As interligações dos equipamentos e alimentação foram mantidas as mesmas da experiência 1, como ilustrado nas Figuras 16, 17 e 18. Apenas a programação do CLP foi modificada, para que o acionamento do motor seja executado de forma automática.

A Experiência 2 sugere uma melhora em relação à automação do sistema quando comparado ao sistema da Experiência 1, que necessita do operador para ligar, desligar e inverter o sentido de giro do motor. Nesta experiência o sistema possui tanto a característica manual quanto a automática, e a seleção é realizada através de uma chave de entrada digital do CLP. A chave I0.4 aciona o sistema automático e a chave I0.6 aciona o sistema manual.

O sistema manual possui o mesmo modo de funcionamento da Experiência 1, mantendo os endereçamentos das chaves liga (S1 – I0.1), desliga (S2 – I0.2) e inverte o sentido (S3 – I0.3).

O sistema automático é mais completo e necessita de menos ações do operador para acionar, desligar e mudar o sentido de rotação do motor. O motor é acionado ao se inserir um pulso na entrada digital I0.1, através da chave S1, onde inicia seu funcionamento no sentido horário. Após 5 segundos (tempo especificado na parametrização do Inversor de Frequência) o motor atinge sua rotação nominal. O motor funciona neste regime por mais 30 segundos (tempo especificado na programação do CLP), então o motor inicia sua desaceleração até sua parada total, que corresponde a um tempo de 10 segundos (tempo especificado na parametrização do Inversor de Frequência). Logo após sua parada, o motor volta a ser acionado, porém no sentido contrário (anti-horário). Os tempos de aceleração, funcionamento em regime permanente e desaceleração são mantidos os mesmos que no sentido horário, podendo ser alterado via software apenas o tempo de funcionamento em regime permanente. Após o término de um ciclo completo, com a desaceleração do motor no sentido anti-horário, o processo é finalizado. Todos esses passos simulam um misturador de substâncias que atua em dois sentidos de giro, para obter uma melhor homogeneidade na mistura final.

A chave digital I0.2 - S2 tem a função de parada, e quando acionada interrompe o processo, voltando para o estado inicial. A chave S2 também funciona como um botão de emergência, conceito de segurança utilizado nas indústrias. A chave I0.3 - S3 (sentido de giro H/AH) se encontra sem função no sistema automático, sendo utilizada apenas no sistema manual.

Para se iniciar o processo, com o acionamento do motor, o operador deve, obrigatoriamente, selecionar se o sistema irá funcionar de forma manual (I0.4) ou automática (I0.6). Caso nenhuma das opções seja selecionada, ou se ambas as chaves estejam ligadas, o sistema de intertravamento programado no software do CLP não permite o acionamento do motor e, portanto, não permite que o processo seja iniciado.

O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 2**.

2.1.3 Experiência 3 : MANUAL e AUTOMÁTICO com diversos ciclos

Também na Experiência 3 são utilizados os mesmos equipamentos, montagens e interligações das duas experiências anteriores, como ilustrado nas Figuras 16, 17 e 18. Portanto, pode-se manter a mesma parametrização do inversor, descrita na Tabela 3, as funções das chaves digitais DI 1 a DI4 , descritas na Tabela 4, e as interligações dos sinais de controle e potência (Figuras 16, 17 e 18). Apenas a programação do CLP modificada.

Na Experiência 3 o processo não é interrompido ao término do primeiro ciclo. Após a desaceleração do motor no sentido anti-horário, o processo é interrompido por 15 segundos (tempo programado no CLP) e depois reiniciado automaticamente no sentido horário, repetindo o ciclo anterior caracterizando um reinício automático.

Este procedimento é contínuo, com sucessivos ciclos se iniciando de maneira automática. Para interromper o processo o operador deve acionar o botão de parada S2 – I0.2.

Na Experiência 3 o operador pode executar o funcionamento do motor de forma manual e automática e, portanto, também neste caso foi utilizado o sistema de intertravamento. Quando não é selecionado nenhum dos estados manual ou automático, ou quando ambos estes estados são selecionados simultaneamente a lógica implementada não permite o acionamento do motor.

A experiência 3 retrata o funcionamento ideal de um misturador na indústria, onde o tempo com as operações passa a ser reduzido e o processo mais flexível e de alta produtividade. O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 3**.

2.1.4 Experiência 4 – Controle do Posicionamento Angular do Motor

Esta experiência possibilita fornecer um controle do posicionamento angular de um MIT, onde um sensor de posicionamento ótico realiza a leitura da posição do eixo do motor e o CLP realiza o acionamento do Inversor de Frequência, que por sua vez controla as funções liga/desliga e sentido de giro do motor a fim de parar o motor na posição angular desejada.

Nesta experiência o MIT inicia seu movimento de giro, com a velocidade controlada pelo inversor de frequência, de maneira suave. Um sensor ótico de posicionamento (ótico) verifica a posição angular do eixo motor, através da medição da distância do rebaixo do eixo do motor.

O sensor ótico ativa um contato NA (normalmente aberto) conectado a uma entrada digital do CLP (I0.1) ao identificar uma distância do objeto medido maior do que 16 mm. Para a identificação do rebaixo do eixo do motor como ponto de parada, o sensor foi fixado a um suporte a uma distância de 16 mm da borda do eixo, possibilitando a identificação de uma distância maior que 16 mm durante a passagem do rebaixo do eixo do motor.

Ao identificar a posição do rebaixo do eixo do motor o CLP envia comandos para o inversor de frequência para a frenagem do motor até sua parada completa. Pela ação da inércia do eixo, o motor não para exatamente na posição onde está o rebaixo. Então o inversor aciona o motor novamente, mas com sentido de giro contrário, e repete os passos anteriores até que o sinal de identificação do rebaixo pelo sensor seja constante, identificando a completa parada do motor na posição desejada. Após a identificação a parada completa do motor para se reiniciar um novo posicionamento angular é necessário acionar manualmente a partida do motor, iniciando novamente o processo de posicionamento.

Para esta experiência foram utilizados o mesmo MIT e Inversor de Frequência das experiências 1, 2 e 3, logo, manteve-se a parametrização do inversor, Tabela 3, e a montagem em partes do projeto, com a adição do sensor ótico de posição sob o eixo do motor e a retirada do freio magnético. Nesta experiência não foi utilizado o Freio

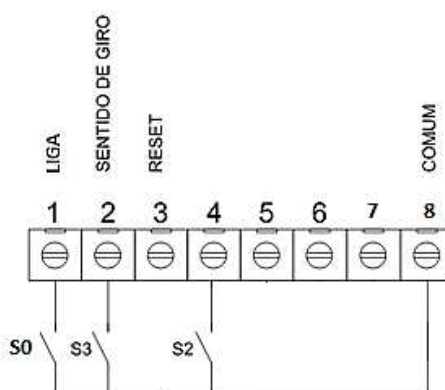
magnético para simulação de cargas, já que o rebaixo do motor era necessário para identificação do posicionamento através do sensor ótico.

Apesar de se manter a mesma parametrização para o inversor de frequência, para uma melhor referência no software e utilização do CLP, os endereços lógicos de algumas chaves digitais foram alterados, conforme a Tabela 5. A Figura 19 ilustra a ligação das entradas digitais de controle do inversor de frequência.

Tabela 5: Relação entradas digitais CLP para experiência 4 .

Entrada Digital do CLP	Função
I0.0 – S0	Liga
I0.1 – S1	Posicionamento sensor ótico
I0.2 – S2	Desliga
I0.3 – S3	Sentido de giro

Figura 19 – Interligação das entradas digitais do Inversor de Frequência com as chaves das entradas digitais do CLP para experiência 4.



O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 4**.

2.1.5 Experiência 5 – Controle *Multispeed* de Velocidade

A experiência 5 trata de um acionamento do MIT através de uma referência digital de frequência/velocidade. Tal referência de velocidade é fornecida por três saídas

digitais do CLP, totalizando 8 diferentes frequências/velocidades de funcionamento do MIT. Cada palavra de 3 bits geradas pelas entradas digitais do CLP referenciam uma frequência/velocidade distinta de funcionamento do motor pré-programada no Inversor de Frequência.

A parametrização do Inversor de Frequência necessitou ser alterada e a configuração de parâmetros, antes não vistos, necessitaram ser realizadas. Apenas a alimentação dos equipamentos foi mantida em relação as outras experiências, inclusive o freio magnético (Figura 17). Os parâmetros referentes ao tipo de controle (P202), origem dos comandos de controle (P230) e dados do MIT (P400 a P407) foram mantidos os mesmos das experiências anteriores.

Utilizou-se o parâmetro P408 com a função de auto ajuste para a aquisição da resistência elétrica real do estator do MIT utilizado. Essa informação é utilizada para ajustes no controle vetorial do inversor.

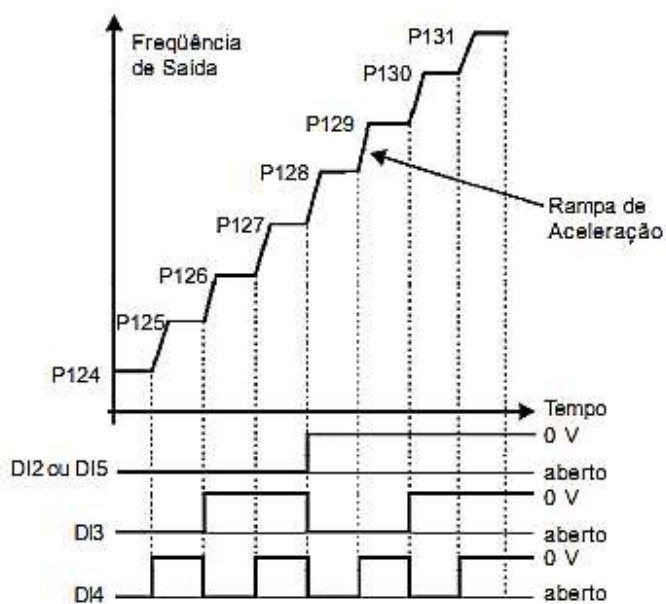
Os parâmetros P133 e P134 referentes às frequências de funcionamento mínima e máxima foram configuradas a fim de se ter uma faixa de funcionamento de frequência do motor de 0 a 66 Hz.

O parâmetro P222 foi alterado para 6 configurando a função *Multispeed* como nova referência de velocidade.

Foi necessário configurar as chaves digitais de controle do inversor (DI1 a DI4) para um sinal de habilita geral e outros três sinais de identificação da sequência de 3 bits relativos a 8 referências de frequência/velocidade distintas . O parâmetro P263 foi configurado com a função de habilita geral para entrada DI1. As entradas DI2 a DI4 foram configuradas, através dos parâmetro P264 a P266 respectivamente, com a função de bits de referências de frequência/velocidade.

Os parâmetros P124 a P131 foram configurados cada um correspondente a um valor de referência de frequência de funcionamento do motor. A Figura 20 ilustra o funcionamento do MIT nas frequências de operação do motor configuradas nos parâmetros P124 a P131 em função do tempo no modo *Multispeed*.

Figura 20: Gráfico frequência de funcionamento do motor x tempo no modo *Multispeed*.



Fonte: (Catálogo WEG, 2009).

Além da alteração da parametrização do inversor de frequência, foram alterados os endereços lógicos no CLP das chaves digitais do inversor (DI1 a DI4), conforme a Tabela 6. A Figura 21 ilustra a ligação das entradas digitais de controle do inversor de frequência com as chaves digitais de entrada do CLP. A Tabela 7 informa a parametrização do Inversor para a Experiência 5.

Tabela 6: Relação entradas digitais CLP para experiência 5 .

Entrada Digital do CLP	Função
I0.0 – S0	DI1 - Habilita geral
I0.1 – S1	DI2 - Referência de velocidade (Bit 1)
I0.2 – S2	DI3 - Referência de velocidade (Bit 2)
I0.3 – S3	DI4 - Referência de velocidade (Bit 3)

Figura 21: Conexão das entradas digitais de controle e referencia de frequência modo *Multispeed* do Inversor.

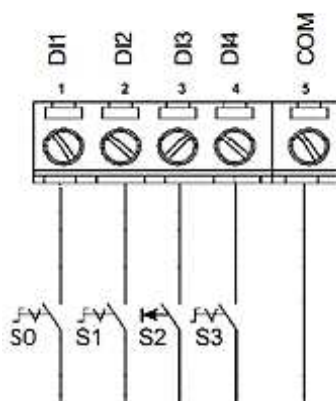


Tabela 7: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiência 5.

Parâmetro	Valor	Descrição
202	2	Tipo de Controle (Vetorial = 2)
399	69	Rendimento do motor
400	220	Tensão Nominal do motor
401	3,05	Corrente nominal do motor
402	1780	Velocidade nominal do motor
403	60	Frequência nominal do motor
404	4	Potência Nominal do motor
407	0,69	Fator de Potência
408	1	Rotina de auto ajuste
220	1	Modo Remoto constante
222	6	Referência de frequência função <i>Multispeed</i>
230	1	Origem dos comandos de controle em XCI
263	1	DI1 = Habilita Geral
264	7	DI2 = bit 1 referência frequência <i>Multispeed</i>
265	7	DI3 = bit 2 referência frequência <i>Multispeed</i>
266	7	DI4 = bit 3 referência frequência <i>Multispeed</i>
133	0	Frequência Mínima
134	66	Frequência Máxima
124	0	Referência de frequência combinação bit's (000)
125	5	Referência de frequência combinação bit's (001)
126	10	Referência de frequência combinação bit's (010)
127	20	Referência de frequência combinação bit's (011)
128	30	Referência de frequência combinação bit's (100)
129	40	Referência de frequência combinação bit's (101)
130	50	Referência de frequência combinação bit's (110)
131	60	Referência de frequência combinação bit's (111)

O programa utilizado para realizar o correto funcionamento do motor pode ser visualizado no **Anexo 5**.

2.2 Acionamento de motores com Sinais Analógicos de Controle

As experiências envolvendo sinais analógicos foram desenvolvidas acionando-se um motor universal e um MIT. A experiência 6 apresenta uma introdução ao sinal analógico lido pelo CLP e sua utilização como referência de corrente para um circuito amplificador onde um motor universal é acionado. A experiência 7 é voltada para o controle do MIT envolvendo um sinal analógico com o referência de velocidade para o inversor de frequência.

2.2.1 Controle de velocidade de um Motor Elétrico Universal através de um Sinal Analógico

A experiência 6 baseia-se em um sistema de controle onde um sinal analógico de tensão (0 a 10 V) é utilizado como referência de velocidade para um motor universal. Foi utilizada uma fonte variável de tensão contínua (0 – 10 V) conectada a uma entrada analógica do CLP simulando a ação de um conjunto sensor-transmissor utilizado para medições de variáveis físico-químicas, como temperatura e pressão, em processos industriais.

Uma saída analógica de tensão do CLP (0 a 10 V) fornece uma referência de tensão a um circuito eletrônico amplificador de corrente, que alimenta um motor elétrico universal utilizado em coolers de resfriamento de fontes.

O motor universal tem como característica a variação de sua velocidade de acordo com a variação da corrente de alimentação. Logo variando-se a tensão de referência do circuito amplificador de corrente varia-se a corrente de alimentação do motor universal ligado em sua saída variando a velocidade do motor universal.

Para a realização da experiência foi necessário obter as características elétricas do motor universal a ser ligado. Foi necessária saber a corrente máxima de funcionamento do motor para a correta projeção do circuito amplificador, que necessita ter em sua saída uma corrente suficiente para atender a consumo máximo de potência do motor universal. As características elétricas necessárias do motor que estão descritas a seguir:

- Tensão máxima: 12 V
- Corrente máxima: 1 A

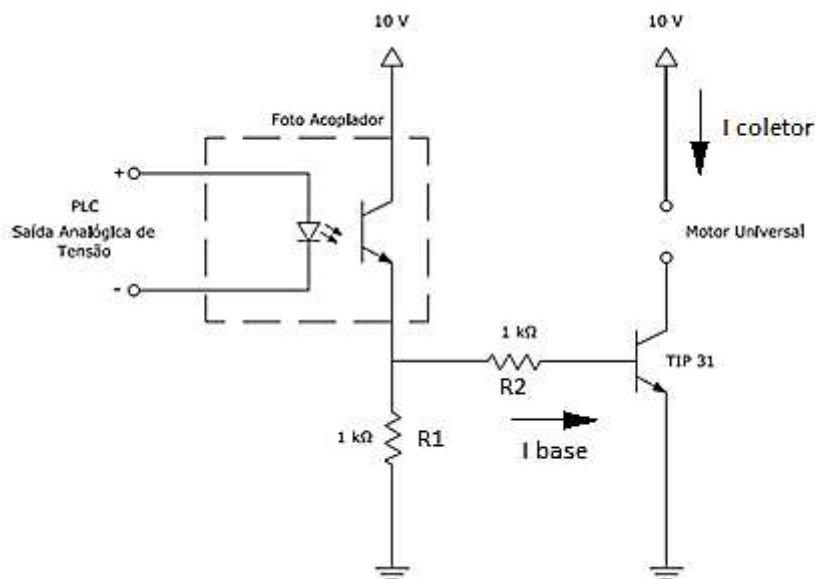
Foi necessário determinar o tipo de circuito amplificador a ser utilizado e projetar os componentes do circuito. O circuito amplificador escolhido é de simples aplicação e montagem, sendo ele um circuito amplificador Emissor Comum. Para a montagem do circuito foram necessários os seguintes componentes:

- 1 Fonte de tensão contínua de 10V;
- 1 Foto acoplador 4N25;
- 2 Resistor 1k Ω ;
- 1 Transistor de Potência TIP 31, parâmetro $\beta = 100$.

Foi utilizado um dispositivo semiconductor foto acoplador ligado a saída analógica de tensão do CLP, que isola a saída analógica do CLP do circuito amplificador evitando sua queima caso ocorra um curto-circuito no amplificador ou motor universal. O foto acoplador é um transistor que permite a passagem de corrente elétrica suficiente para polarizar o transistor de potência TIP 31 que alimenta o motor universal.

Projetando o circuito para uma tensão de 10 V no resistor R1 (1 k Ω), ou seja, uma tensão de 10 V na saída analógica do CLP, a corrente circulante em R1 e R2 (1 k Ω) é praticamente 0,01 A. Sendo β do TIP 31 igual a 100, e levando em consideração que $I_{coletor} = \beta \times I_{base}$, logo a corrente máxima circulante no motor universal ligado ao coletor do TIP ($I_{coletor}$) é de 1A. Essa corrente reflete a máxima velocidade do motor universal. A Figura 22 ilustra o circuito utilizado para o amplificador.

Figura 22 – Circuito amplificador Emissor Comum.



O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 6**.

2.2.2 Controle de um MIT através de um Sinal Analógico

A experiência 7 trata do mesmo acionamento do MIT abordado na experiência 5, porém com uma referência externa de velocidade analógica oriunda de um sensor de campo simulado por uma fonte variável de tensão contínua. Essa referência analógica é um sinal de 0 a 10 V lido, interpretado por uma lógica de programação e acondicionado pelo CLP em uma saída analógica de 0 a 10V. Esse sinal é a referência de velocidade do MIT acionado pelo Inversor de Frequência. Essa experiência simula como as variáveis de campo analógicas são adquiridas pelo sistema de controle, no caso o CLP. Essas variáveis adquiridas são tratadas dentro de uma lógica de controle e disponibilizadas em uma saída analógica, que é referência para o funcionamento de demais equipamentos atuadores do sistema, como motores e acionadores hidráulicos, atuando diretamente no controle variáveis de processos industriais

A experiência 7 é voltada para o acionamento e controle em regime permanente de um MIT através da leitura de um sinal analógico oriundo de um transmissor em campo. O sinal analógico de tensão do transmissor foi simulado por uma fonte de

alimentação externa, que fornece 0 a 10 V para uma entrada analógica de tensão do CLP.

Os equipamentos utilizados nessa experiência foram os mesmos utilizados nas experiências 1,2 e 3, porém com a adição da fonte variável de tensão contínua já utilizada na experiência 6 também como simulação de um transmissor. A ligação de potência dos equipamentos foi mantida das experiências 1, 2 e 3 (Figura 17).

Um sinal analógico de tensão (0 a 10 V), fornecido pela fonte, simula um range de leitura um instrumento de medição de temperatura com faixa de medição de 0 a 1000 °C. Esse valor de tensão é lido pelo CLP através de uma entrada analógica, e convertido em uma codificação binária de 14 bits por um conversor A/D, resultando em 32000 palavras correspondentes ao range de temperatura lido.

Para um melhor tratamento das palavras binárias convertidas pelo conversor A/D dentro da lógica de controle de um processo, a faixa de 32000 palavras é convertida em uma escala de 0 a 100%.

A palavra é lida durante o *scan* do CLP, e armazenada em um endereço de memória, que por sua vez é convertido, dentro de uma escala de 0 a 100%, em um valor numérico. Esse valor numérico pode ser utilizado dentro da lógica de controle de diversas maneiras, afim de se obter na saída do CLP um sinal utilizado para o acerto da estabilidade de um sistema.

Na experiência desenvolvida o sinal convertido em um valor numérico é disponibilizado em uma saída analógica de tensão do CLP diretamente, onde um conversor D/A o converte em um sinal de tensão (0 a 10 V). Esse sinal disponibilizado na saída analógica é interligado a uma entrada analógica do inversor de frequência e utilizada como referência de frequência/velocidade para o funcionamento de um MIT. Logo de acordo com a variação da temperatura (simulada pela fonte) o MIT aumenta ou diminui sua velocidade.

Com a lógica de funcionamento e programação do CLP definidas, realizou-se a parametrização do inversor de frequência. Os parâmetros referentes ao tipo de controle (P202), origem dos comandos de controle (P230), modo de acionamento remoto (P220), frequências mínima e máxima de operação (P133 e P134) e dados do MIT (P400 a

P407) foram mantidos os mesmos das experiências anteriores. Não utilizou-se a curva S para partida do motor, já que este será acionado de acordo com uma referência de frequência/velocidade.

Foi necessário configurar as chaves digitais de controle do inversor (DI1 a DI4) para os sinais de gira/para, sentido de giro e reset. O parâmetro P263 foi configurado com a função de gira/para para entrada DI1. As entradas DI2 foi configurada com a função sentido de giro através do parâmetro P264. O parâmetro P265 foi configurado a fim da entrada digital DI3 ter a função de reset. A entrada digital DI4 foi configurada sem função através do parâmetro P266.

O parâmetro P222 foi alterado para 1 configurando a entrada analógica AI1 como nova referência de velocidade. O parâmetro P235 foi configurado para um sinal de tensão de 0 a 10 V como referência de frequência/velocidade do MIT para a entrada analógica AI1. A entrada analógica do inversor de frequência AI1 pertence à borneira XC1 e pode ser acessada através da parte frontal da caixa de montagem do inversor.

Além da alteração da parametrização do inversor de frequência, foram alterados os endereços lógicos no CLP das chaves digitais do inversor (DI1 a DI4), conforme a Tabela 8. A Figura 23 ilustra a ligação das entradas digitais de controle do inversor de frequência com as chaves digitais de entrada do CLP. A Tabela 9 informa a parametrização do Inversor para a Experiência 7. A montagem do sistema pode ser visualizada na Figura 24.

Tabela 8: Relação entradas digitais CLP para experiência 7 .

Entrada Digital do CLP	Função
I0.1 – S1	DI1 – gira/para
I0.2 – S2	DI2 – sentido de giro
I0.3 – S3	DI3 - Reset

Figura 23: Conexão das entradas digitais de controle com referência de frequência/velocidade analógica.

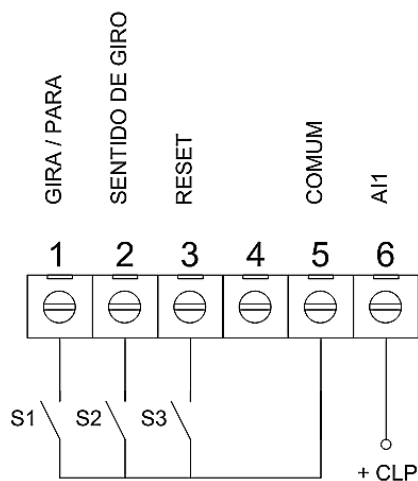
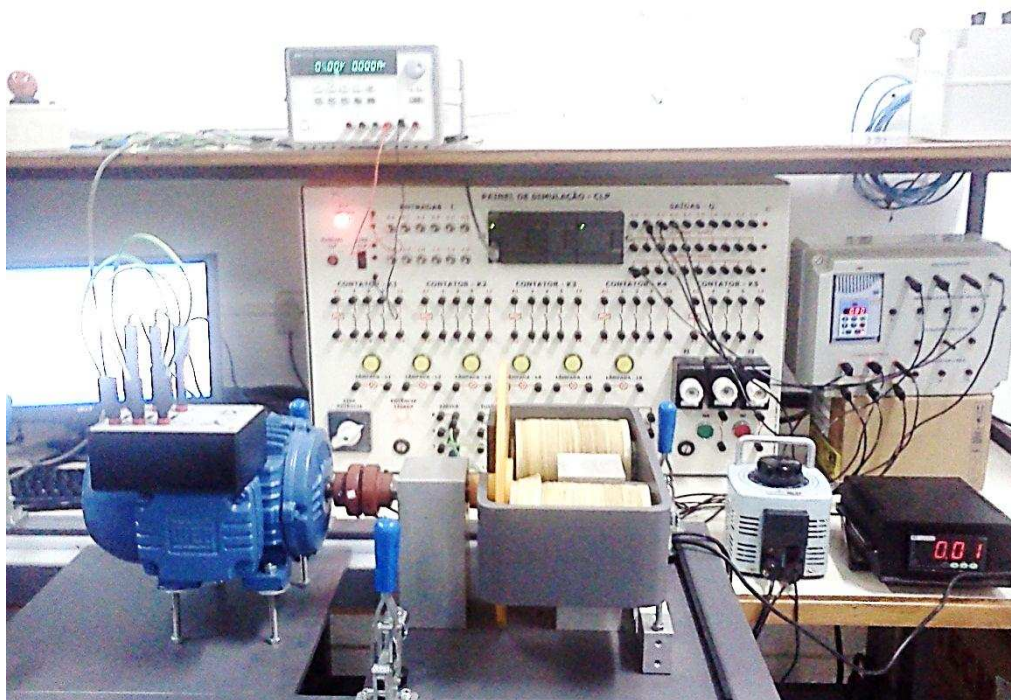


Tabela 9: Descrição dos Parâmetros do Inversor de Frequência CFW 08 para experiência 7.

Parâmetro	Valor	Descrição
202	2	Tipo de Controle (Vetorial = 2)
399	69	Rendimento do motor
400	220	Tensão Nominal do motor
401	3,05	Corrente nominal do motor
402	1780	Velocidade nominal do motor
403	60	Frequência nominal do motor
404	4	Potência Nominal do motor
407	0,69	Fator de Potência
220	1	Modo Remoto constante
230	1	Origem dos comandos de controle em XCI
222	6	Referência de frequência entrada analógica A11
235	0	Tipo de excursão do sinal de referência analógica de frequência (0 a 10 V)
263	1	DI1 = Habilita geral / gira para
264	0	DI2 = Sentido de giro
265	10	DI3 = reset
266	11	DI4 = sem função

Figura 24: Montagem da experiência 7.



O programa computacional desenvolvido no software STEP 7 Micro-Win para o CLP S7-200 da Siemens, que corresponde a esta experiência se encontra no **Anexo 7**.

3 CONCLUSÃO

A automação é um processo em constante formação e procura sempre a flexibilidade nos processos industriais, buscando uma produção em larga escala com um menor tempo. Porém, sempre prioriza a segurança das pessoas que atuam nos seus processos.

A maior dificuldade encontrada foi na elaboração do programa computacional para o acionamento adequado do Inversor de Frequência e a programação das entradas e saídas analógicas do CLP. Outra dificuldade foi a correta interpretação do Manual do fabricante do Inversor de Frequência. A linguagem de programação utilizada no CLP foi a Ladder, pois é a mais difundida no ambiente fabril. Portanto, inicialmente houve o empenho para aprender a lógica de programação, através do auxílio do orientador e da interpretação dos manuais dos equipamentos. Superada esta dificuldade, a realização, montagem e testes dos experimentos, se desenvolveram de uma forma natural.

Com a elaboração das experiências é possível conhecer mais profundamente equipamentos de extrema importância para a área da automação, pois são muito utilizados nos processos industriais.

As experiências buscam apresentar problemas práticos comuns em um ambiente fabril, como é o caso do controle da velocidade angular de um motor trifásico através de Inversor de Frequência e CLP (Controle Lógico Programável). Estas experiências podem simular, por exemplo, um misturador de substâncias, onde o processo pode ser operado de forma manual ou automática. As experiências voltadas para condicionamento de sinais externos ao CLP e a correta referência desses sinais aos dispositivos de acionamento (Inversor de Frequência) são técnicas muito utilizadas na indústria. As realizações das experiências possibilitam abranger de maneira prática controles simples, porém de grande utilização na automação Industrial.

Por fim, o projeto foi realizado dentro do cronograma inicialmente proposto e proporcionou ao aluno enriquecer seus conhecimentos, ao mesmo tempo que colaborou para a instituição de ensino aprimorar as aulas de laboratório em automação industrial.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLUFF, **Sensores Óticos**. Campinas: Balluff, 2013.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 6 ed. 1977. Editora LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

FILIPPO, G. F. **Motor de Indução**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2000. v. 1.

FRANCHI, C. M. **Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos**. São Paulo, 1ª ed., Érica, 2008.

Freio Magnético aplicado a discos e anéis metálicos. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/vie/F809/F609_2011_sem2/ViniciusL-Mauro_RF1.pdf>. Acesso em: 22 de Outubro de 2013

GARCÍA, A. F. **Corrientes de Foucault**. Disponível em: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/inducccion/foucault/foucault.htm>>. Acessado em: 22 Outubro de 2013

Grupo de Ensino de Física UNB – **Freio Magnético**. Disponível em: <http://www.fis.unb.br/gefis/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=215&lang=pt>. Acesso em: 20 de Outubro de 2011

PRUDENTE, F. **Automação Industrial. PLC, teoria e aplicações: Curso Básico**. Rio de Janeiro, 1ª ed., LTC, 2007.

Schooltech Equipamentos e Soluções Didáticas Ltda – Disponível em: <http://www.schooltech.com.br/prod_eletrotecnica_painel_ca.html>. Acesso em: 21 de Outubro de 2013.

SIEMENS. Simatic: S7-200 **Programmable Controller System Manual**. Nuernberg: Siemens, 2008.

TORO, V. D. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro, LTC, 1994.

UFSM - **Inversores de Frequência** Disponível em:
<<http://coral.ufsm.br/desp/luizcarlos/aula2of2.pdf>>. Acesso em: 21 de Outubro de 2013.

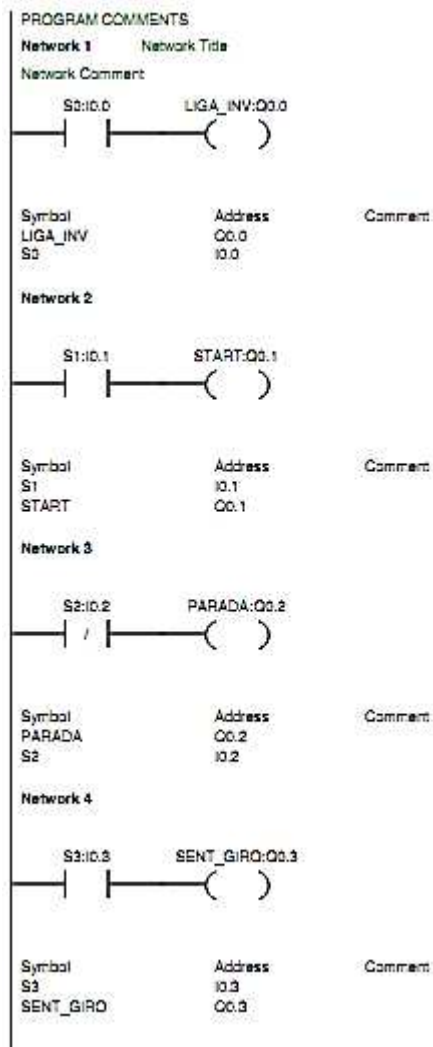
VIANNA, W. S. - **Teoria dos sensores industriais** – Disponível em:
<http://www.professor.iff.edu.br/professores/wvianna/transdutores/sensores-industriais/Teoria_Sensores.pdf/view>.
Acesso em: 22 de Outubro de 2013.

WEG (Santa Catarina). **Manual do inversor de frequência**. Jaguará do Sul: Weg, 2006.

ANEXO 1

Programação em diagrama Ladder da Experiência 1 - Manual.

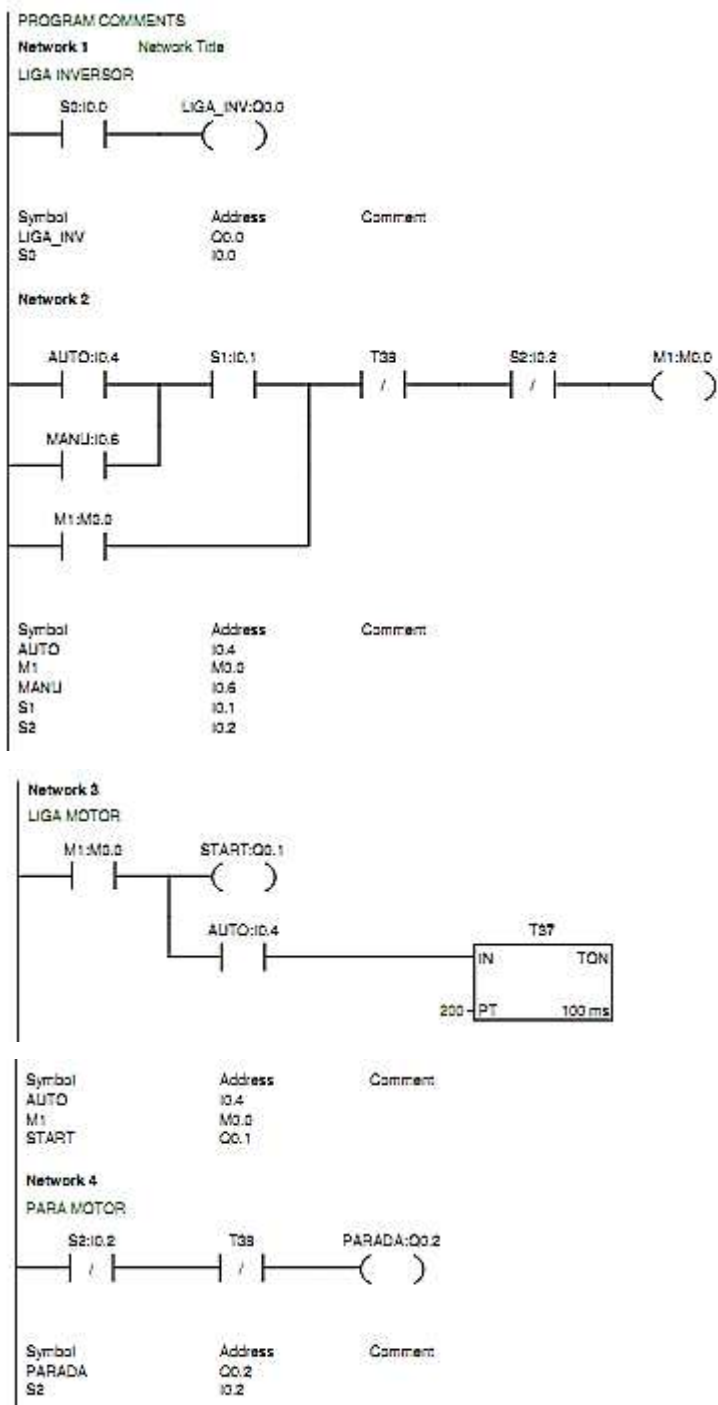
EXPERIÊNCIA 1

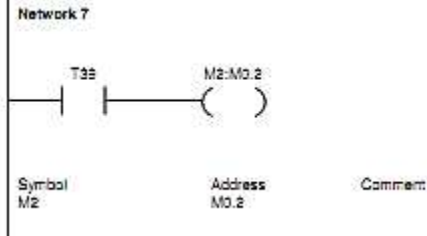
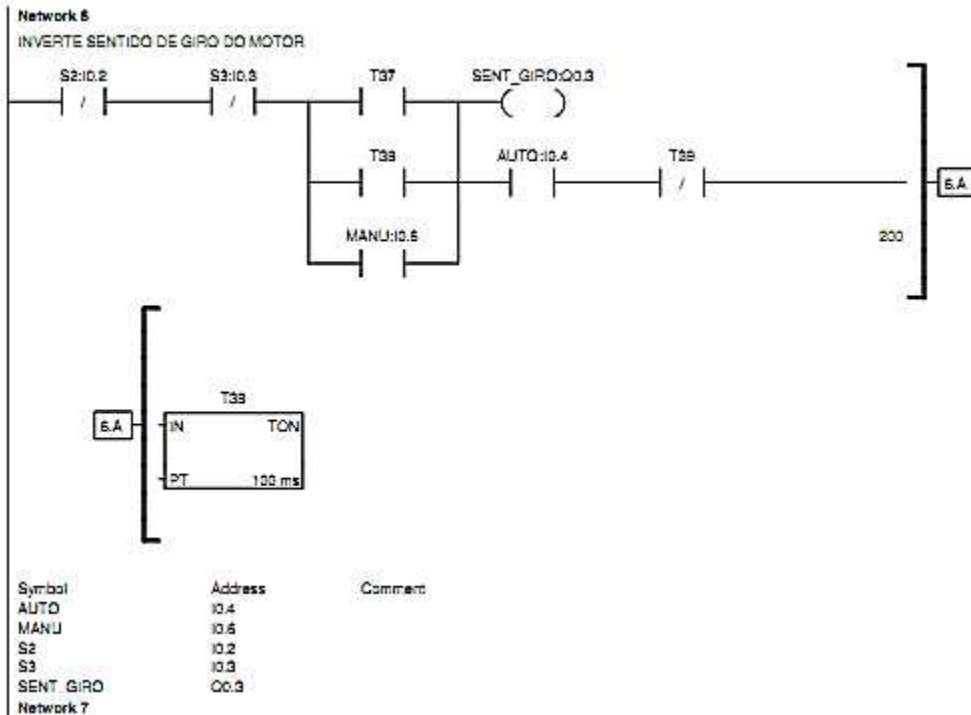
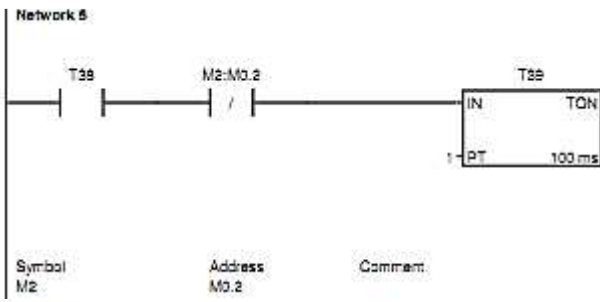


ANEXO 2

Programação em diagrama Ladder da Experiência 2 - Manual e Automático com 1 ciclo.

EXPERIÊNCIA 2

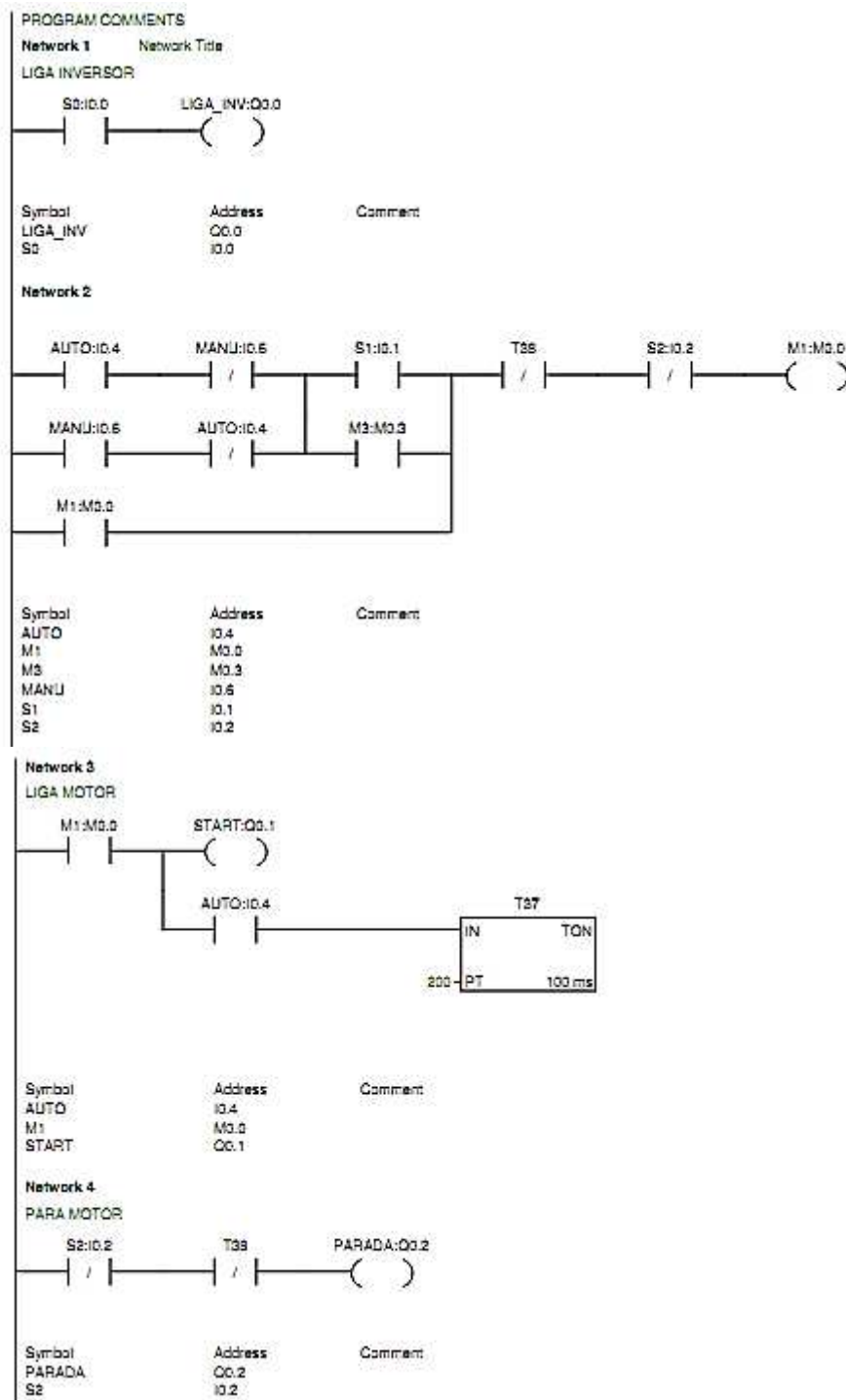


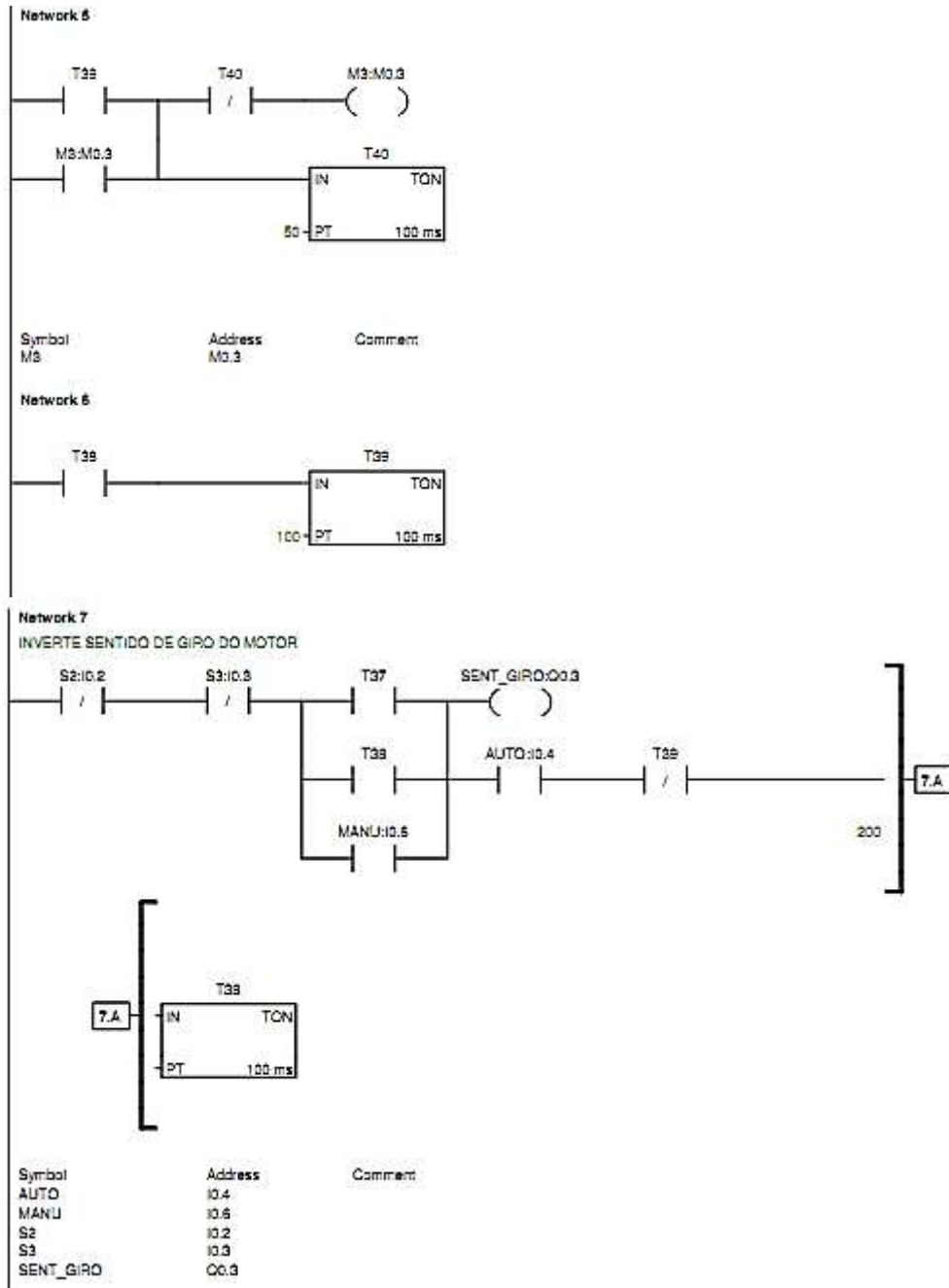


ANEXO 3

Programação em diagrama Ladder da Experiência 3 - Manual e Automático com número de ciclos controlado.

EXPERIÊNCIA 3

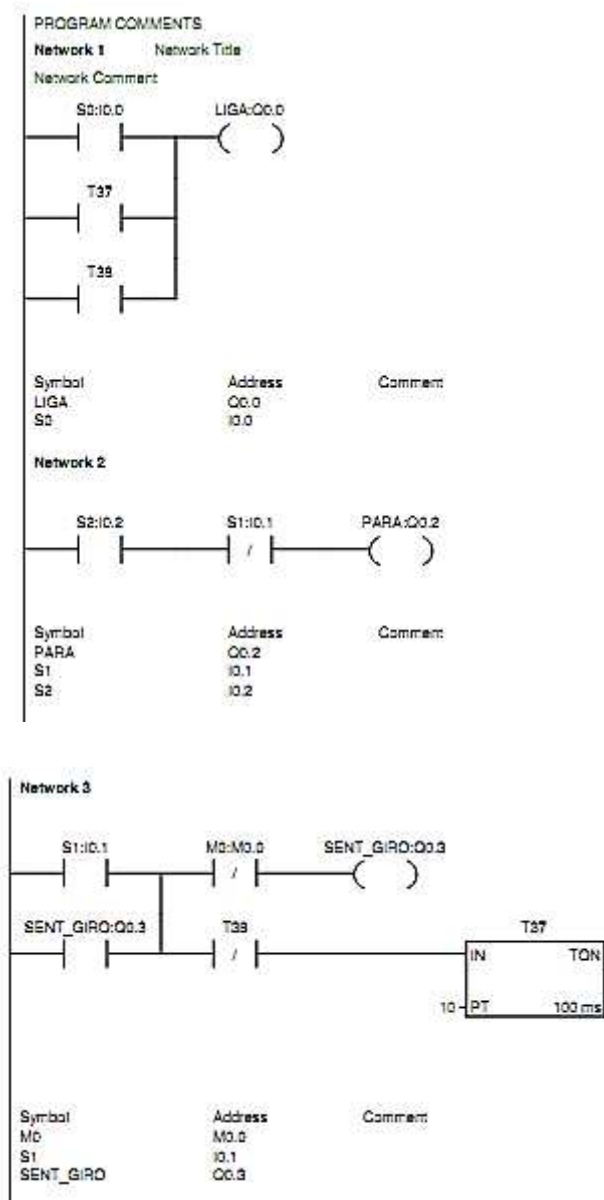


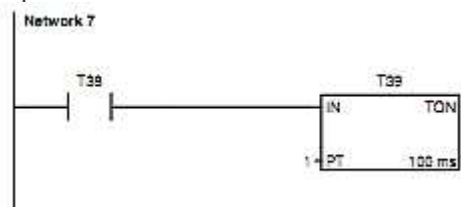
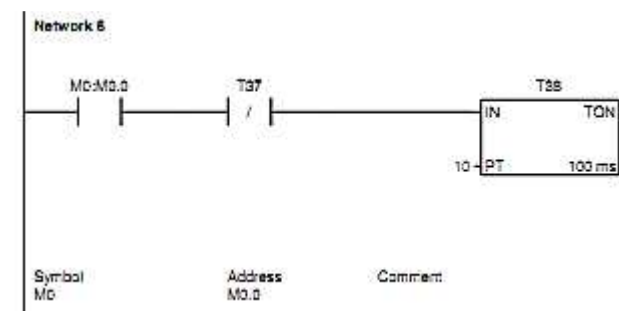
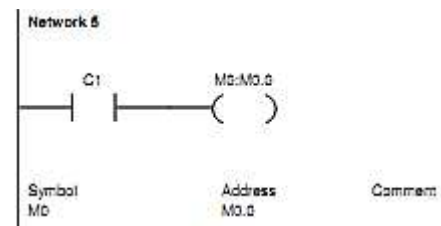
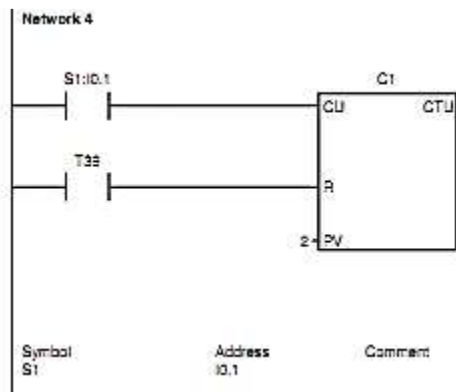


ANEXO 4

Programação em diagrama Ladder da Experiência 4 - Controle do Posicionamento Angular do Motor.

EXPERIÊNCIA 4

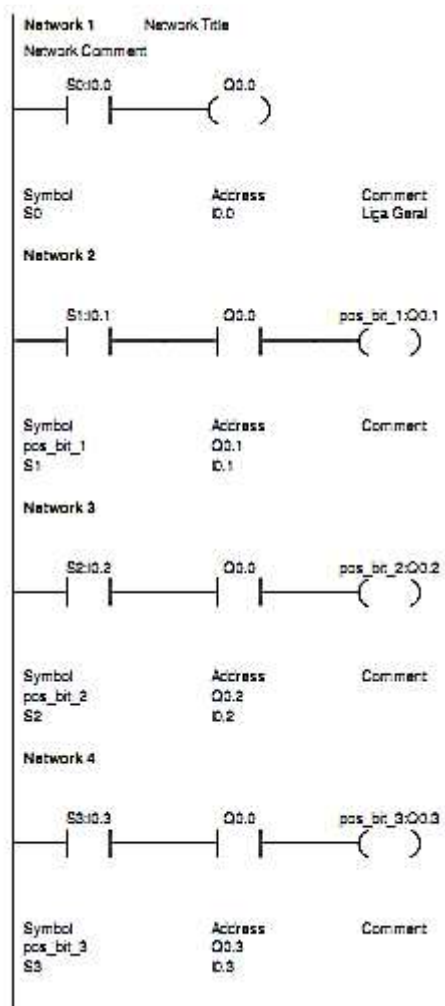




ANEXO 5

Programação em diagrama Ladder da Experiência 6 - Controle *Multispeed* de Velocidade

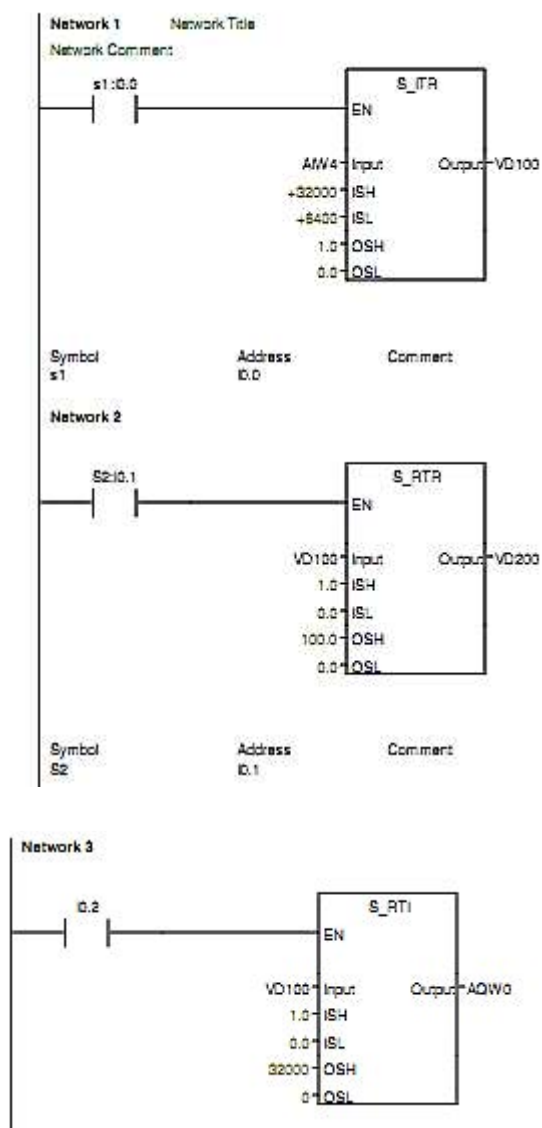
EXPERIÊNCIA 5



ANEXO 6

Programação em diagrama Ladder da Experiência 6 - Controle da Rotação do Motor Universal com sinal Analógico.

EXPERIÊNCIA 6



ANEXO 7

4.1.1 Programação em diagrama Ladder da Experiência 7 - Controle MIT através sinal analógico

EXPERIÊNCIA 7

