



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



RICARDO MASIEL

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE
PROTEÇÃO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Canoas, Dezembro de 2010



RICARDO MASIEL

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE
PROTEÇÃO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da ULBRA como um
dos requisitos obrigatórios para a obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Proteção e controle

Professor Orientador:

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira – CREA-RS: 50.909-D

Canoas

2010



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Ricardo Masiel

Matrícula: 051018235-6

Título: Projeto e Construção de um Dispositivo de Proteção para Motores de Indução Trifásicos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira

CREA-RS: 50.909-D

Banca Avaliadora:

MSc. Eng. Eletr. André Luis Bianchi

CREA-RS: 89.197

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Luis Fernando Espinosa Cocian

CREA-RS: 88.866-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor
Ricardo Masiel

Orientador
Marília Amaral da Silveira

Avaliador
André Luis Bianchi

Avaliador
Luis Fernando Espinosa Cocian

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Pedro e Edi e minhas irmãs Ester, Anita e Marta, por serem a minha base durante todos estes anos.



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu a vida, saúde e capacidade para chegar até aqui.

A professora orientadora Marília Amaral da Silveira pelo apoio e dedicação durante a elaboração deste trabalho com suas valiosas observações, sugestões e disposição em sempre ajudar.

Ao professor André Luis Bianchi pelo seu auxílio nas inúmeras dúvidas surgidas durante a implementação do protótipo e suas observações para a elaboração deste trabalho.

Ao professor Luis Fernando Espinosa Cocian pelas observações e sugestões realizadas no decorrer deste trabalho.

Aos engenheiros eletricitas Marco Antônio Auad e Rafael Mosmann Cunha pelo grande auxílio no desenvolvimento do protótipo, realização dos ensaios finais, levantamento dos resultados e sugestões para a elaboração deste trabalho.

A empresa CEL Engenharia por ceder suas instalações e o equipamento utilizado para a realização dos ensaios para caracterização do trabalho.

Aos colegas do curso de Engenharia Elétrica André Martins Oliveira, Carlos Alberto Alves e Gilmar Zwirtes pela parceria e apoio no decorrer da graduação.

A minha família e amigos por compreenderem a minha ausência durante muitos momentos no decorrer deste curso.



EPIGRAFE

"Lutar sempre, cair talvez, desistir jamais!"



RESUMO

MASIEL, Ricardo. **Projeto e Construção de um Dispositivo de Proteção para Motores de Indução Trifásicos**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2010.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico de proteção para motores elétricos de indução trifásicos, que tem por objetivo proteger os motores de distúrbios elétricos, sejam eles por problemas ou características do sistema elétrico, sejam por falhas mecânicas. O objetivo destas proteções, que são contra sobrecorrente, sobretensão, subtensão, sobrefreqüência e subfreqüência, é evitar danos aos motores e às instalações, e, conseqüentemente, manter a vida útil destes e aumentar a confiabilidade do processo nas indústrias que os utilizam. Assim, o trabalho envolveu o projeto de um *hardware* composto por circuitos eletrônicos para monitoramento de tensão, corrente, freqüência, acionamentos, com a utilização de um micro-controlador PIC18F4550 e elaboração de um *firmware* para controle e atuação do sistema, utilizando linguagem de programação C. Os testes efetuados demonstraram que o protótipo é capaz de atuar , com tempo de atuação inferior a 300 ms para sobrecorrente, 150 ms para sobretensão e subtensão, 300 ms para sobrefreqüência e 400 ms para subfreqüência. Utilizando como referência os tempos de atuação do dispositivo de proteção para motores de média e alta tensão da GE, 469 Motor Protection System, que especifica o tempo de atuação de 100 ms para as proteções contidas neste trabalho, constatou-se que as proteções para sobretensão e subtensão se aproximam dos valores de referência.

Palavras chave: Motor trifásico de Indução, dispositivo eletrônico de proteção, micro-controlador.



ABSTRACT

MASIEL, Ricardo. **Project and Construction of a Protective Device for Induction Motors**. Conclusion Work of Electrical Engineering Course - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2010.

This work presents the design and the development of an electronic device for protecting three-phase induction motors, which aims to protect the motors from electrical disturbances produced by electrical problems or characteristics of the electrical system as well as mechanical failures. The purpose of these protections (overcurrent, overvoltage, undervoltage, underfrequency and overfrequency) is to prevent damage to motors and consequently, maintain the standard life and also increase the reliability of the process industries that use this kind of equipment. The work involved an electronic board with the function of monitoring voltage, current, frequency, drives, using a PIC18F4550 microcontroller that actuates in case of protection needs. A firmware implemented in C programming language was created for an elaboration of control and actuation system. The tests performed showed that the prototype can act, having an actuation time less than 300 ms for overcurrent, 150 ms for overvoltage and undervoltage, 300 ms for overfrequency and 400 ms for underfrequency. As reference, it was used the time of operation of a protection device for medium and high voltage motors, 469 Motor Protection System, which specifies 100 ms to the protections actuation time. It was found that only the protections for overvoltage and undervoltage approach the reference values.

Keywords: Three-phase Induction Motor, electronic device protection, microcontroller.



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 - Tipos de motores elétricos. | 16 |
| Figura 2-2 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico, por fase..... | 19 |
| Figura 2-3 - Curva do torque em função do escorregamento e da corrente em função do escorregamento..... | 20 |
| Figura 2- 4 - Tipo de ranhura para motores de indução classe A. | 20 |
| Figura 2-5 - Tipo de ranhura para motores de indução classe B. | 21 |
| Figura 2-6 - Tipo de ranhura para motores de indução classe C. | 21 |
| Figura 2-7 - Tipo de ranhura para motores de indução classe D..... | 22 |
| Figura 2-8 - Vista em corte do motor de indução trifásico. | 22 |
| Figura 2-9 - Vista explodida de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola. | 24 |
| Figura 2-10 - Placa de identificação de um motor. | 24 |
| Figura 3-1 - Diagrama em blocos do sistema. | 35 |
| Figura 3-2 - Hardware desenvolvido para o dispositivo de proteção para motores. | 36 |
| Figura 3-3 - Diagrama de pinos PIC18F4550 | 37 |
| Figura 3-4 - Circuito de gravação para o PIC18F4550. | 38 |
| Figura 3-5 - Diagrama do circuito elétrico dos periféricos..... | 38 |
| Figura 3-6 - Circuito para medição de tensão. | 39 |
| Figura 3-7 - Circuito para medição de corrente..... | 39 |
| Figura 3-8 - Circuito para medição de frequência..... | 40 |
| Figura 3-9 - Ambiente de desenvolvimento do software PIC C Compiler. | 41 |
| Figura 3-10 - Tela do software Win PIC Programmer. | 41 |
| Figura 3-11 - Ambiente de simulação do software Proteus. | 42 |
| Figura 3-12 - Fluxograma do firmware desenvolvido para o projeto. | 43 |
| Figura 3-13 - Bloco A do fluxograma da figura 3-12. | 44 |
| Figura 4-1 - Testador Universal e Analisador de Energia CE-6000..... | 47 |
| Figura 4-2 - Estrutura utilizada para realização dos ensaios. | 47 |
| Figura 4-3 - Imagem da tela para ensaio de sobrecorrente. | 49 |
| Figura 4-4 - Gráfico dos valores de corrente para ensaio de sobrecorrente..... | 50 |
| Figura 4-5 - Imagem da tela para ensaio de sobretensão. | 51 |
| Figura 4-6 - Gráfico dos valores de tensão para ensaio de sobretensão. | 52 |
| Figura 4-7 - Imagem da tela para ensaio de subtensão..... | 53 |
| Figura 4-8 - Gráfico dos valores de tensão para ensaio de subtensão..... | 54 |
| Figura 4-9 - Imagem da tela para ensaio de sobrefrequência. | 55 |
| Figura 4-10 - Imagem da tela para ensaio de subfrequência..... | 57 |



LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 4-1- Resultados obtidos para ensaios de sobrecorrente. | 49 |
| Tabela 4-2 - Resultados obtidos para ensaios de sobretensão..... | 51 |
| Tabela 4-3 - Resultados obtidos para ensaios de subtensão. | 54 |
| Tabela 4-4 - Resultados obtidos para ensaios de sobrefreqüência..... | 56 |
| Tabela 4-5 - Resultados obtidos para ensaios de subfreqüência. | 57 |



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CV: Cavalo Vapor.

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora.

LCD: *Liquid Cristal Display*.

CC: Corrente Contínua.

CA: Corrente Alternada.

NEMA: *National Electrical Manufacturers Assossiation*.

INMETRO: Instituto Nacional de Normalização, Metrologia e Qualidade Industrial.

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

ANSI: *American National Standards Institute*.

RPM: Rotações Por Minuto.



LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| f_e : | Frequência elétrica. |
| n_s : | Velocidade do campo girante do estator. |
| s : | Escorregamento. |
| V : | Tensão elétrica. |
| I : | Corrente elétrica. |
| n_r : | Velocidade do campo magnético girante do rotor. |
| X_d : | Reatância de dispersão. |
| X_m : | Reatância de magnetização. |
| R_p : | Resistência de perdas. |
| I_{exc} : | Corrente de excitação. |
| I_p : | Corrente de perda do ferro. |
| I_m : | Corrente de magnetização. |
| T_o : | Torque eletromagnético. |
| m : | Número de fases do motor. |
| ω_s : | Velocidade angular do campo magnético girante estatórico. |
| Hz: | Hertz. |
| W: | Watt. |
| k: | Quilo. |
| K: | Kelvin. |
| C: | Celsius. |
| kg: | Quilograma. |
| s: | Segundos. |
| ms: | Milissegundos. |



SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. Definição do Escopo do Projeto..... | 14 |
| 1.2. Estrutura do Documento..... | 15 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO..... | 16 |
| 2.1 Motores Elétricos..... | 16 |
| 2.2 Motor Elétrico de Indução Trifásico..... | 17 |
| 2.3 Proteção e Coordenação..... | 27 |
| 2.4 Proteção de Sistemas de Baixa Tensão..... | 28 |
| 2.5 Proteção de Motores Elétricos..... | 29 |
| 2.6 Seletividade..... | 32 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 35 |
| 3.1 Descrição Geral do Sistema..... | 35 |
| 3.2 Hardware..... | 36 |
| 3.3 Sistemas Computacionais..... | 40 |
| 3.4 Firmware..... | 42 |
| 3.5 Descrição de Funcionamento do Dispositivo..... | 44 |
| 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 46 |
| 4.1. Ensaio de Sobrecorrente (ANSI 50)..... | 48 |
| 4.2. Ensaio de Sobretensão (ANSI 59)..... | 50 |
| 4.3. Ensaio de Subtensão (ANSI 27)..... | 52 |
| 4.4. Ensaio de Sobrefrequência (ANSI 81)..... | 54 |
| 4.5. Ensaio de Subfrequência (ANSI 81)..... | 56 |
| 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 58 |
| 5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 59 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 60 |
| OBRAS CONSULTADAS..... | 61 |
| ANEXO A – TABELA NUMÉRICA ANSI/IEEE STD. C37.2I..... | 62 |
| APÊNDICE A – FIRMWARE..... | 66 |
| APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO..... | 74 |



1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são os responsáveis pela maior parte da demanda da carga elétrica no setor industrial brasileiro. Segundo o PROCEL, em levantamento realizado em 2007, representavam 64% da carga (PROCEL, 2007). Portanto, o desempenho do setor industrial depende em grande parte da confiabilidade desses motores. No entanto, os motores elétricos estão submetidos aos mais variados fenômenos de alteração da qualidade de energia, que podem levá-los ao mau funcionamento e à redução de sua vida útil (DUGAN, 2003).

De acordo com a norma NBR 7094:2000, os motores devem operar dentro das faixas especificadas de tensão e frequência e a não operação dentro desta pode levar o motor a uma redução da sua vida útil, devido ao superaquecimento e conseqüente deterioração do isolamento. Para isso são utilizados os dispositivos de proteção (ABNT NBR 7094, 2003).

Atualmente na indústria segue-se o seguinte padrão, motores elétricos de indução trifásicos com potências maiores que 150 CV são protegidos através de relés digitais multifunção, com diversos parâmetros programáveis como, por exemplo, sobrecorrente, podendo ser de fase, neutro e/ou terra, sobretensão, subtensão, desbalanço de fase, diferencial de corrente, falta de fase, entre outros. Já os motores com potências menores que 150 CV são protegidos, em geral, apenas por fusíveis e relés térmicos, este para sobrecorrentes, justificado pelo custo do motor e do relé térmico, o que não justifica a utilização de relés digitais multifunção com um alto custo se comparado ao de um motor de até 150 CV.

1.1. Definição do Escopo do Projeto

1.1.1. Objetivos Gerais

Este projeto teve por objetivo desenvolver um dispositivo de proteção para um motor de indução trifásico com potência de $\frac{1}{2}$ CV com proteção contra sobrecorrente, sobretensão, subtensão, sobrefrequência e subfrequência,

fornecendo assim uma maior vida útil e maior confiabilidade aos sistemas das empresas que os utilizam.

1.1.2. Objetivos específicos

O trabalho teve por objetivos específicos:

- Projetar e implementar um *hardware* para medição das grandezas elétricas de tensão, corrente e frequência, para através destes dados executar a proteção de um motor. Este hardware deverá ser constituído por um microcontrolador, com teclado e *display* de LCD como periféricos para parametrização e visualização dos parâmetros de trabalho e atuação do motor.
- Desenvolver um *firmware*, com a finalidade de realizar a medição e comparação das grandezas elétricas, parametrização dos valores de atuação do dispositivo pelo usuário e atuação da proteção e histerese de 50 ms, entre a detecção das falhas e a atuação do seccionamento da alimentação dispositivo.

1.2. Estrutura do Documento

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo um apresenta a introdução do trabalho. O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos sobre motores de indução, proteção, seletividade, proteções de motores elétricos e relés térmicos de sobrecarga para balizar os princípios estabelecidos no decorrer deste trabalho.

O capítulo três apresenta uma descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados no decorrer deste trabalho como seleção de componentes, *softwares* para desenvolvimento e simulação e do funcionamento do sistema.

No capítulo quatro serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios e testes realizados no decorrer deste projeto, analisando seus valores para o sistema proposto.

E por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões finais deste trabalho baseado no embasamento teórico apresentado no capítulo dois juntamente com os resultados obtidos no capítulo quatro. Neste capítulo também são apresentadas as sugestões para futuros trabalhos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Motores Elétricos

Motores elétricos são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando - com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Os tipos mais comuns de motores elétricos são o de corrente contínua (C.C.) e o de corrente alternada (C.A.). Estes motores podem ser melhor expressos pela figura 2-1 (WEG, 2009).

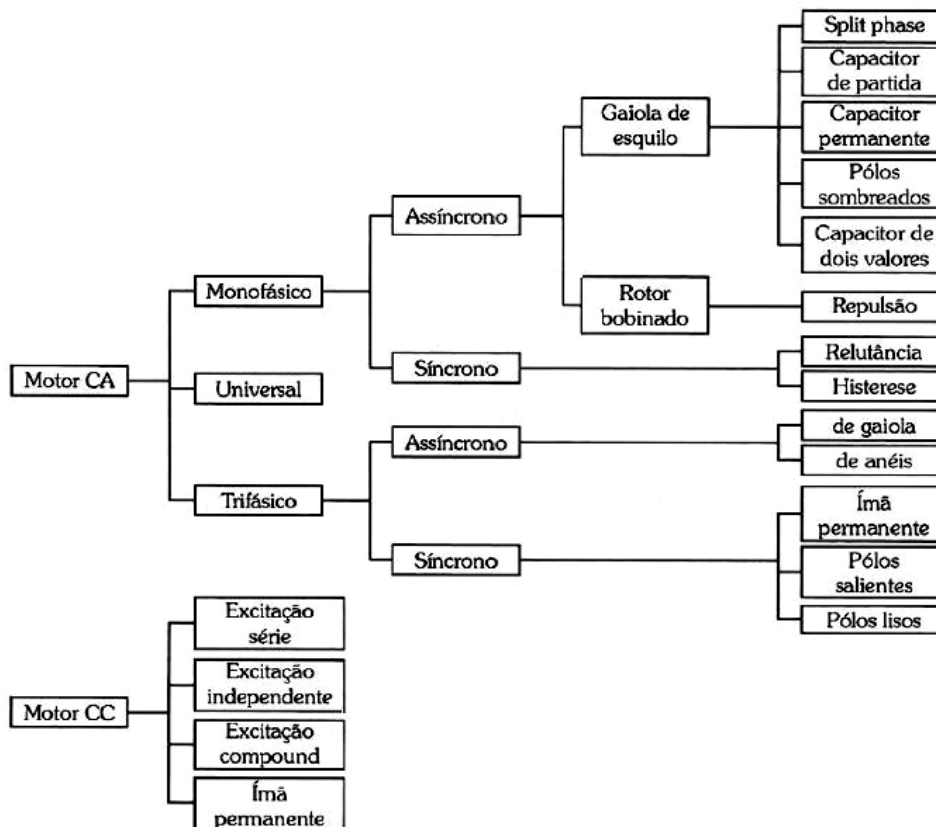


Figura 2-1 - Tipos de motores elétricos.
Fonte: (MAMEDE, 2007)

2.2 Motor Elétrico de Indução Trifásico

Nos motores elétricos de indução, em funcionamento, existem correntes alternadas tanto no enrolamento do estator, como no enrolamento do rotor. Neste tipo de motor, a corrente alternada é fornecida diretamente ao enrolamento do estator e por indução, ou seja, por ação de transformação, ao enrolamento rotórico. Esta máquina pode ser considerada um transformador generalizado. Por analogia aos transformadores, o enrolamento estatórico é denominado de enrolamento primário, e o enrolamento rotórico, de secundário (FITZGERALD, 2006).

Os núcleos do estator e do rotor são formados por chapas laminadas, com ranhuras estampadas em cada uma delas. O material utilizado na construção dos núcleos é o ferro-silício. Há dois tipos de motor de indução quanto ao enrolamento rotórico: (a) rotor em gaiola de esquilo ou em barras e (b) rotor bobinado ou rotor de anéis. No motor em gaiola, o enrolamento é formado por barras de alumínio ou cobre, entre outros. Essas barras estão permanentemente curto-circuitadas em suas extremidades por meio de anéis. Este tipo de enrolamento não é acessível externamente. No rotor bobinado, o enrolamento trifásico é distribuído em ranhuras. O acesso externo ao enrolamento é feito através de anéis. Normalmente o enrolamento rotórico é conectado internamente em estrela e cada um dos três terminais do enrolamento é levado a anéis coletores. Em operação, este enrolamento deve ser curto-circuitado, ou fechado através de resistências (FITZGERALD, 2006).

O enrolamento estatórico é trifásico. Quando esse enrolamento é conectado a uma fonte de tensão trifásica, a circulação de correntes trifásicas simétricas produzirá um campo magnético no entreferro, que gira à velocidade síncrona, de acordo com o número de pólos e a frequência das correntes aplicadas ao enrolamento do estator. O número de rotações do campo girante é obtido através da equação 1:

$$n_s = \frac{120f_e}{n^\circ \text{ pólos}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: f_e é igual à frequência da rede, ou frequência.

n_s é o número de rotações por minuto do campo magnético girante.

Quando o enrolamento estatórico é energizado, com o rotor em repouso, o enrolamento rotórico experimentará a máxima variação de campo magnético e a tensão induzida nesse enrolamento será máxima, com frequência igual à frequência

da rede. Assim, na partida, as correntes que circularão pelo enrolamento rotórico e estatórico atingirão valores máximos. O campo magnético produzido pelas correntes induzidas no rotor girará em sincronismo com o campo produzido pelo estator, produzindo um conjugado que tende a girar o rotor. Se o conjugado for suficiente para vencer a oposição à rotação criada pela carga no eixo, o motor chegará à sua velocidade normal de funcionamento, que será sempre inferior à velocidade síncrona. À medida que o rotor acelera, o escorregamento diminui e a frequência e o módulo das tensões induzidas no enrolamento rotórico diminuem. O campo magnético produzido pelo rotor girará com uma velocidade que é resultante da diferença entre a velocidade do campo síncrono, n_s , e a velocidade de giro do rotor, n_r . A diferença de velocidade entre o campo magnético girante do estator e o rotor é denominada de escorregamento. O escorregamento é calculado pela equação 2:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad \text{Equação (2)}$$

O motor de indução trifásico pode ser representado por um equivalente elétrico (figura 2-2). A resistência por fase do enrolamento estatórico é representada por R_1 e sua reatância de dispersão, por X_{d1} . A reatância de magnetização é representada por X_m e a resistência de perdas no ferro do motor é representada por R_p . Comparativamente aos transformadores, a reatância de magnetização do motor de indução não pode ser desprezada, pois é necessária uma força magnetomotriz maior para vencer a relutância de seu entreferro. A resistência do enrolamento secundário é representada por R_2 e sua reatância de dispersão, por X_{d2} . A corrente que flui pelo circuito primário é composta de uma componente de excitação e por uma componente de carga. A componente de excitação, \dot{I}_{exc} tem uma componente ativa de perdas no núcleo do ferro do motor, \dot{I}_p e uma componente magnetizante, \dot{I}_m . O circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico é apresentado na figura 2-2. O resistor $R_2'(\frac{1-s}{s})$ é equivalente à condição de carga do motor (FITZGERALD, 2006).

Na partida, com o rotor em repouso, a corrente secundária é calculada através da equação 3:

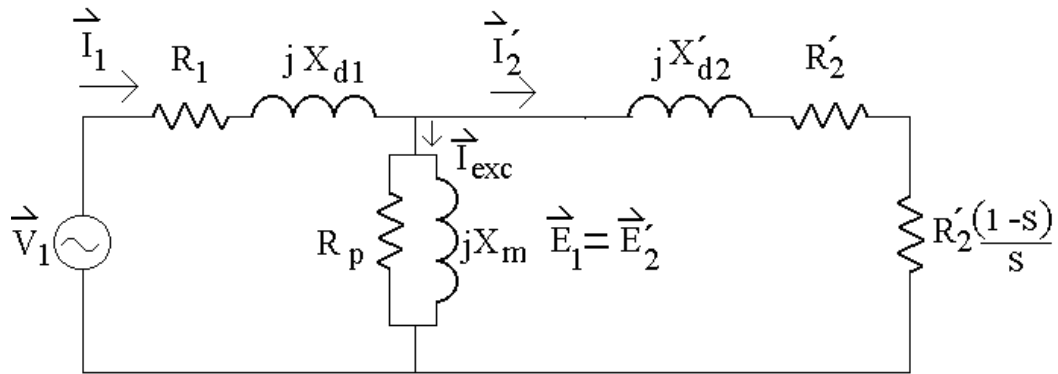


Figura 2-2 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico, por fase.

$$\vec{I}'_{2p} = \frac{\vec{E}'_2}{(R'_2 + jX'_2)} \quad \text{Equação (3)}$$

À medida que o rotor desenvolve rotação e assume certo valor de escorregamento, que é função da carga mecânica a ele acoplada, a corrente secundária é calculada através da equação 4:

$$\vec{I}'_2 = \frac{\vec{E}'_2}{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2\right)} \quad \text{Equação (4)}$$

O torque eletromagnético, T_o , desenvolvido, ou seja, o torque interno, é calculado através da equação 5:

$$T_o = m \frac{I_2'^2 R_2}{s \omega_s} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde: m é o número de fases do motor

ω_s é a velocidade angular do campo magnético girante estático

O torque da equação 5 difere do torque no eixo do motor devido às perdas rotacionais. Uma curva característica do comportamento do torque em função do escorregamento de um motor de indução trifásico é mostrada na figura 2-3. O comportamento da corrente também é mostrado. No momento da partida, se o torque desenvolvido é superior ao torque da carga, o motor acelera até uma velocidade em que o torque desenvolvido é igual ao torque da carga e que corresponde a um determinado valor de escorregamento. O motor operará em algum ponto da curva com escorregamento, s , menor do que 1,0 e maior do que zero, conforme o valor da carga conectada ao seu eixo. Se a carga for muito elevada, o motor operará com uma rotação muito baixa, podendo estar em situação de

sobrecarga. Se a carga no eixo do motor diminuir, o motor acelerará até atingir uma velocidade em que o torque desenvolvido seja igual ao torque da carga (ele passa a absorver menos corrente). Se a carga aumenta, ele desacelera até atingir uma velocidade menor, que resulte num torque desenvolvido igual ao da carga (FITZGERALD, 2006).

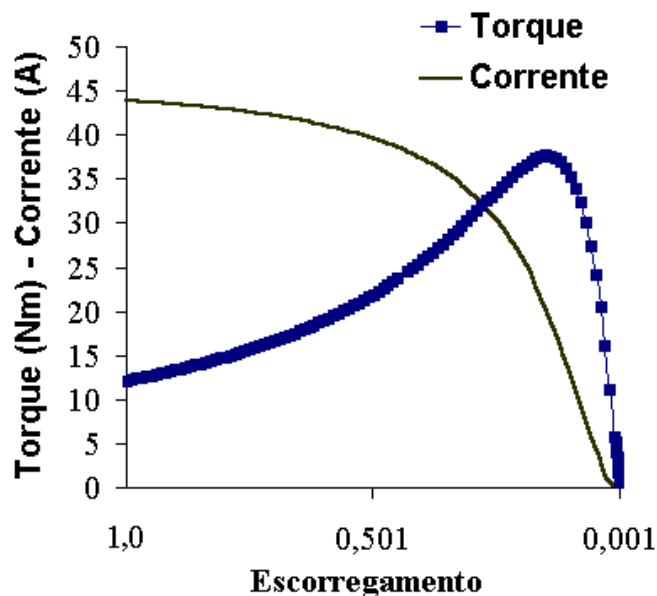


Figura 2-3 - Curva do torque em função do escorregamento e da corrente em função do escorregamento.

Os motores de indução trifásicos são classificados quanto ao formato de suas gaiolas. Eles são normalizados pela *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA). Esta classificação é apresentada a seguir, com base na figura 2-4, figura 2-5, figura 2-6 e figura 2-7, que apresentam os principais tipos de gaiolas:

Motor: classe A: O efeito pelicular é limitado pelo uso de barras de profundidade média. A gaiola tem baixa resistência. O motor apresenta alto rendimento e alto fator de potência para carga nominal. A corrente de partida é elevada.

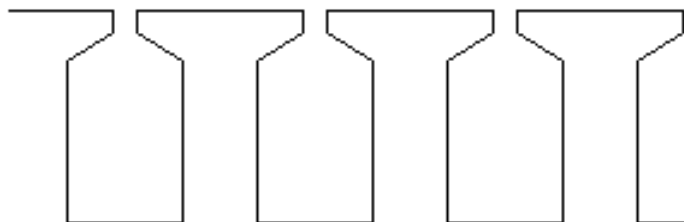


Figura 2- 4 - Tipo de ranhura para motores de indução classe A.

Motor classe B: A gaiola apresenta barras profundas ou dupla gaiola, praticamente iguais, sendo a superior com seção um pouco maior. Na partida, como a frequência das correntes nas barras é maior, o efeito pelicular é maior. Como a parte inferior da ranhura envolve um circuito magnético com menor relutância magnética, o fluxo magnético de dispersão produzido pela corrente secundária será maior nesta região (aumento do efeito pelicular). A fem induzida na parte inferior da barra é maior do que aquela induzida na parte superior, fazendo com que a corrente circule mais na parte superior. Assim, a parte superior da gaiola tem menor resistência em relação à parte inferior. Desta forma, na partida, o torque é elevado, a corrente secundária é menor, e o fator de potência do motor é pequeno. Quando o escorregamento é pequeno, a gaiola tem uma resistência menor, porque o efeito pelicular diminui.

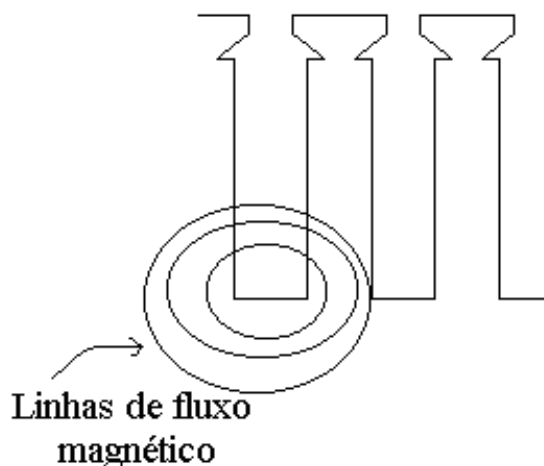


Figura 2-5 - Tipo de ranhura para motores de indução classe B.

Motor classe C: possui duas gaiolas (motor de dupla gaiola), diferentes entre si. A impedância da gaiola inferior é muito maior do que a impedância da gaiola superior. A gaiola superior possui R_2 elevada e X_{d2} pequena e a gaiola inferior possui R_2 pequena e X_{d2} alta. Na partida, o efeito da gaiola superior é dominante e o motor desenvolve elevado torque de partida. Em operação normal, o efeito da gaiola inferior é dominante.

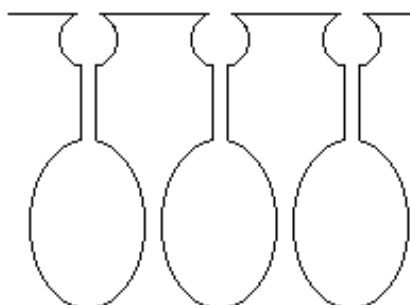


Figura 2-6 - Tipo de ranhura para motores de indução classe C.

Motor classe D: possui uma gaiola pouco profunda e de pequena seção. A gaiola possui elevada resistência e o motor opera com rendimento baixo e elevado escorregamento (FITZGERALD, 2006).

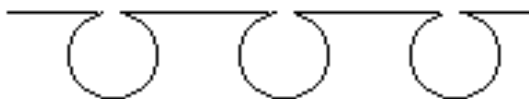


Figura 2-7 - Tipo de ranhura para motores de indução classe D.

A seguir, tem-se a descrição e função de cada uma das partes do motor de indução trifásico, que pode ser visualizado na figura 2-9.

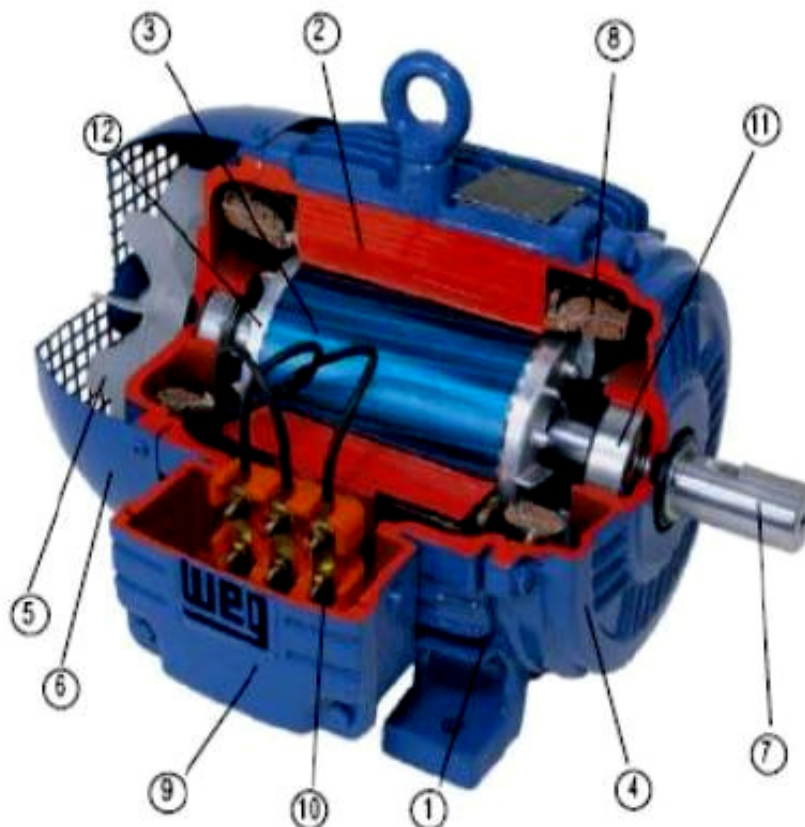


Figura 2-8- Vista em corte do motor de indução trifásico.
Fonte: (WEG, 2009)

1 Carcaça - É a estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas.

2 Núcleo de chapas - As chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro.



3 Enrolamento trifásico - Três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

4 Tampa - Tem por função proteger a parte interna do motor além de alojar o suporte dos mancais, que centralizam o eixo.

5 Ventilador - Fornece o ar para o resfriamento do rotor e estator através dos orifícios da tampa do ventilador. São fabricadas em plástico ou alumínio.

6 Tampa defletora - Assim como a tampa dianteira, serve de proteção e apoio ao mancal do eixo.

7 Eixo - Transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga.

8 Núcleo de chapas - As chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.

9 Caixa de ligação - É o local por onde é realizada a conexão elétrica dos enrolamentos do estator a fonte de energia externa.

10 Terminais - Parte metálica onde são realizadas as conexões dos cabos aos enrolamentos do motor, na caixa de ligação.

11 Rolamentos - Elementos girantes de máquina que suportam o eixo do rotor dando a ele o menor atrito possível ao seu movimento. Podem ser blindados, que não necessitam de lubrificação ou abertos, onde um sistema através de graxas externas se faz necessário.

12 Barras e anéis de curto-circuito - São de alumínio injetado sob pressão numa única peça (WEG, 2009).

A figura 2-9 apresenta uma vista explodida de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola.

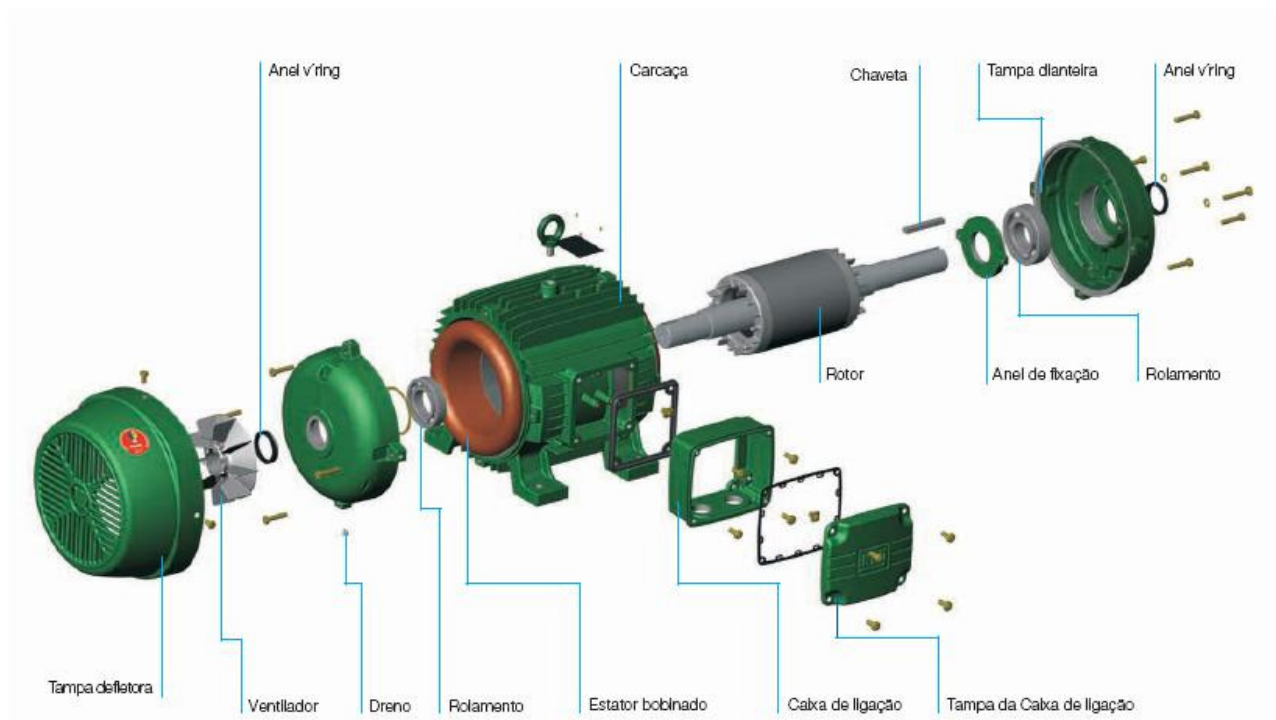


Figura 2-9 - Vista explodida de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola.
Fonte: (WEG, 2009)

2.2.1 Placa de identificação:

A placa de identificação (figura 2-10) contém as informações que determinam as características construtivas e de desempenho dos motores; que são definidas pela NBR-7094.

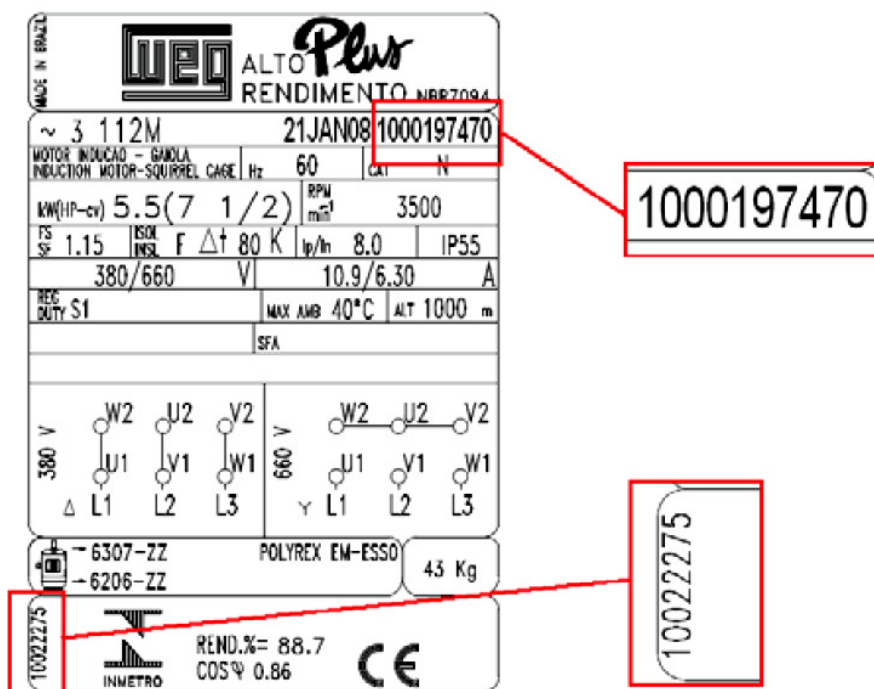


Figura 2-10 - Placa de identificação de um motor.
Fonte: (WEG, 2009)



Os dados apresentados na figura 2-10 estão descritos abaixo conforme a linha em que aparecem:

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| Linha 1: | ~ | Alternado |
| | 3 | Trifásico |
| | 132S | Modelo da carcaça |
| | 25MAR04 | Data de fabricação |
| | BM20035 | Nº de série do motor |
| Linha 2: | Motor de Indução - Gaiola | Tipo de motor |
| | Hz 60 | Frequência de 60 Hz |
| | CAT N | Categoria de Conjugado N |
| Linha 3: | kW(CV) 7,5(10) | Potência nominal do motor: 7,5 kW (10 CV) |
| | RPM 1760 | Rotação nominal do motor: 1760 RPM |
| Linha 4: | FS 1.15 | Fator de serviço: 1,15 |
| | ISOL B | Classe de isolamento: B |
| | Δt K | Elevação de temperatura * |
| | Ip/In 7,8 | Relação de corrente de partida pela nominal: 7,8 |
| | IP55 | Grau de proteção |
| * Quando não houver marcação, a elevação de temperatura é a normalizada. Para classe de isolamento B, a elevação de temperatura é 80K. | | |
| Linha 5: | 220/380/440 V | Tensões nominais de operação: 220V, 380V ou 440V |
| | 26,4/15,3/13,2 A | Correntes nominais de operação: 26,4A em 220V, 15,3A em 380V e 13,2A em 440V |
| Linha 6: | REG S1 | Regime de serviço S1: Contínuo |
| | MÁX AMB | Máxima temperatura ambiente ** |
| | ALT m | Altitude máxima ** |
| ** Quando não houver marcação, a temperatura ambiente máxima é 40°C e a altitude máxima é 1000m. | | |
| Linha 7: | REND.% | Rendimento do motor em condições nominais |
| | cos J | Fator de potência do motor em condição nominal |
| | SFA | Corrente no fator serviço, quando maior que 1,15. |
| Linha 8: | ΔΔ | Esquema de ligação para tensão nominal de 220V |
| | YY | Esquema de ligação para tensão nominal de 380V |



| | | |
|-----------------|-------------------------|--|
| | Δ | Esquema de ligação para tensão nominal de 440V |
| Linha 9: | 6308-ZZ | Tipo de rolamento dianteiro |
| | 6207-ZZ | Tipo de rolamento traseiro |
| | MOBIL POLYREX EM | Tipo de graxa utilizada nos rolamentos |
| | 64 kg | Peso do motor |

Linha 10: Caracteriza a participação do produto no Programa Brasileiro de Etiquetagem, coordenado pelo INMETRO e PROCEL.

Nota: A Placa de Identificação dos motores monofásicos podem ser diferentes, porém as informações constantes na mesma são basicamente as mesmas (WEG, 2009).

2.2.2 Fator de Serviço

Fator de serviço pode ser definido como o fator multiplicador (por exemplo, 1.00, 1.05, 1.10 ou 1.15) que, quando aplicado à potência nominal do motor de indução, indica a carga que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais, dentro do limite permitido de elevação de temperatura do enrolamento.

Durante a operação do motor utilizando fator de serviço, os valores de rendimento, fator de potência e velocidade podem diferir dos valores nominais, porém o conjugado, a corrente de rotor bloqueado e o conjugado máximo permanecem inalterados. O fator de serviço representa uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma “reserva” de potência que possibilita ao motor uma capacidade de suportar melhor a operação em condições desfavoráveis de sobrecarga.

A utilização do fator de serviço implica em uma vida útil inferior àquela do motor sob carga nominal. O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea que o motor pode suportar, geralmente da ordem de alguns minutos.

A norma NBR 7094 – Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução e NEMA MG 1 – Motors and Generators, especificam os fatores de serviço usuais em função de classes de potência. Fator de serviço 1.0 significa que o motor não foi projetado para operar continuamente acima de sua potência nominal, entretanto, não muda sua capacidade para sobrecargas ocasionais. Para o caso de fator de serviço 1.0, os motores trifásicos com potência nominal inferior ou igual a 315 kW e

com tensão nominal inferior ou igual a 1 kV devem ser capazes de suportar uma corrente de sobrecarga ocasional igual a 1,5 vezes a corrente nominal durante um mínimo de 2 minutos. Para motores trifásicos com potência nominal superior a 315kW, nenhuma sobrecorrente ocasional é especificada para motores com fator de serviço 1.0. Este motores devem, entretanto, serem capazes de suportar durante 15s, sem parada ou mudança brusca de velocidade, um excesso de 60% do seu conjugado nominal, sob tensão e frequência nominais (BULGARELLI, 2006).

2.3 Proteção e Coordenação

A elaboração de um esquema completo de proteção para uma instalação elétrica industrial envolve várias etapas, desde o estabelecimento de uma estratégia de proteção, selecionando os respectivos dispositivos de atuação, até a determinação dos valores adequados para a calibração destes dispositivos. Para que o sistema de proteção atinja a finalidade que se propõe, deve responder os seguintes requisitos básicos.

a) Seletividade. Que é a capacidade que possui o sistema de proteção de selecionar a parte danificada da rede e retirá-la de serviço sem afetar os circuitos não danificados.

b) Exatidão e segurança. Que garante ao sistema uma alta confiabilidade operativa.

c) Sensibilidade. Que representa a faixa de operação e não-operação do dispositivo de proteção (MAMEDE, 2007).

Todo projeto de proteção de uma instalação deve ser feito globalmente e não setorialmente. Projetos setoriais implicam uma descoordenação do sistema de proteção, trazendo como consequência interrupções desnecessárias de setores de produção, cuja rede depende da parte afetada do sistema (MAMEDE, 2007).

Basicamente, um projeto de proteção pode ser feito com dois dispositivos: fusíveis e relés. E para que os mesmos sejam selecionados adequadamente é necessário se proceder à determinação das correntes de curto-circuito nos vários pontos do sistema elétrico. Os dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito devem ser sensibilizados pelo valor mínimo dessa corrente (MAMEDE, 2007).

A proteção é considerada ideal quando reproduz a imagem fiel das condições do circuito para o qual foi projetada, isto é, atua dentro das limitações de corrente, tensão, frequência e tempo para as quais foram dimensionados os equipamentos e materiais da instalação.

A capacidade de um determinado circuito ou equipamento deve ficar limitada ao valor do seu dispositivo de proteção, mesmo que isso represente a subutilização da capacidade dos condutores ou da potência nominal do equipamento (MAMEDE, 2007).

Os dispositivos de proteção devem ser localizados e ligados adequadamente aos circuitos segundo regras gerais e estabelecidas por normas.

Os dispositivos de proteção são comumente referidos através da sua numeração conforme a tabela ANSI, conhecida como proteção numérica. As funções de proteção relativas aos motores de indução trifásicos são apresentadas na tabela 2-1 (ANSI/IEEE STD. 37.2, 1996). A tabela completa pode ser visualizada no anexo A.

2.4 Proteção de Sistemas de Baixa Tensão

Os condutores e equipamentos, de maneira geral, componentes de um sistema industrial de baixa tensão, são freqüentemente solicitados por correntes e tensões acima dos valores previstos para operação em regime para os quais foram projetados. Essas solicitações ocorrem normalmente em forma de sobrecarga de corrente de curto-circuito, de sobretensões e de subtensões. Todas essas grandezas anormais devem ser limitadas no tempo de duração e no módulo (MAMEDE, 2007).

Tabela 2-1 Funções de proteção indicadas na Norma ANSI/IEEE C37.2, aplicáveis a motores de indução trifásicos.

| Função de proteção | Descrição da função de proteção aplicável a motores de indução trifásicos industriais |
|---------------------------|--|
| 27 | Relé de subtensão |
| 37 | Relé de subcorrente ou subpotência |
| 38 | Dispositivo de proteção de mancal |
| 46 | Relé de desbalanceamento de corrente de fase ou de fase reversa |
| 47 | Relé de seqüência de fase de tensão ou de desbalanço de tensão |
| 48 | Relé de seqüência incompleta / partida longa |
| 49 | Relé térmico de máquina ou transformador |

| | |
|-----------|--|
| 50 | Relé de sobrecorrente instantâneo |
| 51 | Relé de sobrecorrente temporizado |
| 59 | Relé de sobretensão |
| 66 | Relé de supervisão do número de partidas |
| 81 | Relé de Subfrequência e Sobre frequência |
| 86 | Relé auxiliar de bloqueio |
| 87 | Relé de proteção diferencial |

Portanto, dispositivos de proteção encontrados nas instalações elétricas industriais devem permitir o desligamento do circuito quando este está submetido às condições adversas anteriormente previstas. Na prática, os principais dispositivos utilizados são os fusíveis, dos tipos diazed e NH, os disjuntores e os relés térmicos (MAMEDE, 2007).

2.5 Proteção de Motores Elétricos

Os motores elétricos, peças fundamentais de um projeto de instalação elétrica industrial, devem merecer cuidados especiais quanto à proteção individual ou em grupo a eles aplicada.

Os motores elétricos, quando submetidos a condições anormais durante o período de funcionamento, devem ser imediatamente separados do circuito de alimentação. Assim, essas anormalidades podem ser divididas em diferentes tipos, sendo cada uma delas prejudicial à máquina, conforme o tempo de duração (MAMEDE, 2007)(CARVALHO, 2006):

- Sobrecarga contínua;
- Sobrecarga intermitente;
- Redução da tensão de alimentação;
- Tensão de alimentação elevada;
- Rotor bloqueado;
- Temperatura ambiente elevada;
- Circulação deficiente do meio refrigerante;
- Variação da frequência da rede;

- Funcionamento com correntes desequilibradas;
- Funcionamento com ausência de uma fase.

2.5.1 Sobrecarga contínua

Nos motores elétricos, geralmente o estado de aquecimento estacionário é atingido depois de algumas horas de funcionamento contínuo, o que lhes garante uma vida útil de pelo menos 20 anos. Para 10% de aquecimento adicional, a vida útil do motor pode cair pela metade, 10 anos.

A proteção com relés térmicos de sobrecarga é apropriada para esse tipo de comportamento operacional dos motores, desde que a temperatura ambiente seja a mesma para o relé térmico e o motor (MAMEDE, 2007).

2.5.2 Sobrecarga intermitente

Caracteriza-se por partidas e frenagens com frequência demasiada, como no caso dos guindastes.

A proteção através de relés térmicos torna-se adequada à medida que se conheça exatamente o regime de sobrecarga do motor, ajustando-se o seu valor de atuação de forma a não interferir na atuação da máquina, observando-se que a temperatura do enrolamento do motor não seja excedida pela sobrecarga que o relé térmico permitiria.

Se não há informações seguras do regime de operação do motor, o uso da proteção térmica tenderia a prejudicar operacionalmente a máquina, sendo, neste caso, mais conveniente suprimir a referida proteção, evitando-se, assim, desligamentos intempestivos (MAMEDE, 2007).

2.5.3 Redução da tensão de alimentação

Considerando a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está abaixo das condições nominais previstas, as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- o conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada;
- a corrente de partida cai proporcionalmente à redução de tensão;
- a corrente a plena carga aumenta;
- a corrente rotórica aumenta na mesma proporção;
- o fator de potência aumenta;



- as perdas estatóricas e rotóricas, em geral, também aumentam, aquecendo o enrolamento;

- a velocidade diminui, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação.

Devido ao aumento da corrente de carga, o relé térmico pode ser sensibilizado e proteger adequadamente o motor desde que não haja interferência da temperatura do meio ambiente. A proteção com sonda térmica e termistor é também eficaz. Uma alternativa recomendada é o uso de relés de subtensão comandando o dispositivo de abertura do motor (MAMEDE, 2007).

2.5.4 Tensão de alimentação elevada

Considerando a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está acima das condições nominais previstas, as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- o conjugado de partida aumenta com o quadrado da tensão;
- a corrente a plena carga diminui;
- o conjugado máximo aumenta com o quadrado da tensão;
- o fator de potência diminui;
- as perdas rotóricas, em geral, e as perdas estatóricas diminuem;
- a velocidade aumenta ligeiramente, melhorando as condições de troca de calor.

Os esquemas de proteção convencionais não são suficientes para desligar o motor da rede. Neste caso, é utilizado freqüentemente o relé de sobretensão, o que só se justifica em motores de potência elevada (MAMEDE, 2007).

2.5.5 Rotor bloqueado

Embora o fusível do tipo limitador de corrente (diazed e NH) não seja designado para essa tarefa, pode oferecer a proteção desejada. Os relés térmicos são bastante eficientes condicionados à temperatura ambiente, como anteriormente mencionado. As sondas térmicas e os termistores não são proteções seguras para o rotor (MAMEDE, 2007).

2.5.6 Temperatura ambiente elevada

A proteção que oferece mais segurança são as sondas térmicas e os termistores. A proteção através de relés térmicos depende da localização destes, isto é, se estão no mesmo ambiente do motor ou em outro ambiente (MAMEDE, 2007).



2.5.7 Circulação deficiente do meio refrigerante

Caracteriza-se, normalmente, pela falta de ventilação natural ou forçada do ambiente onde o motor está operando. A proteção adequada é dada por meio de sondas térmicas e termistores (MAMEDE, 2007).

2.5.8 Variação da frequência da rede

Apesar de pouco comum nos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica em regime normal de operação, as variações de frequência originam as seguintes alterações nas características dos motores:

- a potência praticamente não varia;
- o conjugado varia inversamente com a frequência;
- a velocidade angular e as perdas variam na mesma proporção.

Se o motor for submetido a uma frequência inferior à sua nominal, como a velocidade diminui, conseqüentemente diminui a taxa de dissipação de calor, sobreaquecendo os enrolamentos durante carga nominal. Nestas condições, podem ser empregados às sondas térmicas e termistores. Se a frequência for superior à nominal, então nenhum prejuízo de ordem térmica sofrerá o motor (MAMEDE, 2007).

2.5.9 Funcionamento com ausência de uma fase

A ausência de uma fase nas instalações elétricas industriais pode trazer sérias conseqüências aos motores em operação, desde que os dispositivos de proteção não atuem adequadamente. Embora alguns tipos de relés bimetálicos sejam responsáveis pela proteção dos motores submetidos a esta condição, em algumas circunstâncias a proteção é falha, não oferecendo a segurança necessária. Em geral a falta de fase afeta consideravelmente os enrolamentos, não importando se os motores estejam ligados em estrela ou triângulo (MAMEDE, 2007).

2.6 Seletividade

O objetivo da proteção do sistema elétrico deve ser minimizar danos aos equipamentos, isolar somente o circuito defeituoso, causar o mínimo distúrbio ao restante do sistema, além de isolar o sistema elétrico interno de distúrbios externos. Este critério sugere que as calibrações e ajustes dos dispositivos de proteção dependem tanto do julgamento sob o ponto de vista de engenharia como também das condições reais de operação do sistema e da experiência pessoal. Além do mais,



qualquer ajuste de proteção que não seja baseado na experiência de operação, estará sujeito a erros que levem a atuações não desejadas ou até a não atuação da proteção.

O estudo de seletividade tem como objetivo determinar os ajustes dos elementos de proteção do sistema elétrico de tal forma que, no caso de uma condição de defeito no sistema, a parte afetada seja isolada o mais rapidamente possível e que a mínima área da instalação seja desativada, evitando que a condição de defeito se alastre para outras áreas e permitindo que o restante da planta continue em operação.

Nos estudos de seletividade, além da importância dada à proteção de equipamentos de forma individual, também pode se considerar os efeitos sobre o sistema elétrico como um todo, buscando garantir a continuidade operacional, tendo em mente que os custos de uma parada não desejada do processo podem ser muito maiores que o custo do equipamento a ser protegido.

Para atingir estes objetivos, há várias maneiras de se obter a seletividade entre as proteções, a saber (CARVALHO, 2006):

- Seletividade cronométrica (usando o tempo);
- Seletividade amperimétrica;
- Seletividade lógica (usando a troca de informações entre relés).

2.6.1 Seletividade cronométrica

A seletividade cronométrica é baseada na definição de temporizações intencionais no sistema de proteção, que consiste em retardar a atuação de uma proteção a montante para que a proteção a jusante tenha tempo suficiente para isolar a falta. Desta forma, ao se retardarem de forma crescente as proteções à medida que se aproxima da fonte de alimentação, obtém-se uma proteção total, sendo que quanto mais perto da fonte for a proteção, maior será o tempo de atuação da mesma (CARVALHO, 2006).

2.6.2 Seletividade amperimétrica

A seletividade amperimétrica está baseada no fato de que a intensidade do curto-circuito no sistema elétrico é mais elevada à medida que o ponto de defeito se aproxima da fonte e vice-versa. Esta modalidade de seletividade é normalmente utilizada em redes onde os valores de impedâncias dos componentes são significativos, pois nestes casos, os valores das correntes de curto-circuito se



alteram a medida que o local da falta muda de posição. Caso contrário, isto é, se os valores de corrente de curto forem aproximadamente iguais para os pontos distintos da rede, fica extremamente difícil definir os ajustes de duas proteções em cascata e ao mesmo tempo garantir a seletividade. Portanto, isto representa uma das principais limitações da seletividade amperimétrica (CARVALHO, 2006).

2.6.3 Seletividade lógica

Conforme já abordado nos itens anteriores, tanto a seletividade amperimétrica como a cronométrica apresentam limitações. Resumindo, a seletividade amperimétrica apresenta restrições quanto a localização de defeito em sistemas onde o nível de curto sofre pequenas alterações em função da posição da falta; e a seletividade cronométrica apresenta tempos de atuação elevados a medida que as proteções se aproximam da fonte de alimentação.

Neste contexto, a seletividade lógica foi concebida com o intuito de eliminar tais desvantagens, ou seja, apresenta recursos efetivos para a discriminação do local de defeito e com tempos de atuação extremamente rápidos.

Vale ressaltar que com o advento da proteção numérica, a seletividade lógica representa um dos ganhos substanciais disponibilizados para o sistema de proteção.

Em termos gerais, a seletividade lógica pode ser amplamente aplicada em circuitos radiais, tipicamente de distribuição, onde a corrente de curto-circuito percorre todo o trecho compreendido entre a fonte e o ponto de defeito.

Adicionalmente, as seguintes premissas devem ser atendidas:

- todas as proteções a montante do defeito serão sensibilizadas;
- todas as proteções a jusante do defeito não serão solicitadas;
- somente a primeira proteção a montante do defeito deverá atuar e abrir o respectivo disjuntor;
- cada elemento da proteção deverá estar apto a, além de comandar a abertura do respectivo disjuntor, receber um sinal de bloqueio da proteção a jusante e enviar um sinal de bloqueio para a proteção a montante;
- todas as proteções serão ajustadas com temporização entre 50 e 100 ms (CARVALHO, 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição Geral do Sistema

O projeto desenvolvido consiste em um dispositivo de proteção para motores de indução trifásicos, implementado com o micro-controlador PIC 18F4550, no qual os canais A/D lêem as grandezas elétricas de tensão, corrente e frequência do motor para, de acordo com a parametrização do usuário, atuar no seccionamento da alimentação deste, caso a medida exceda o valor escolhido. A figura 3-1 apresenta o diagrama em blocos do sistema implementado.

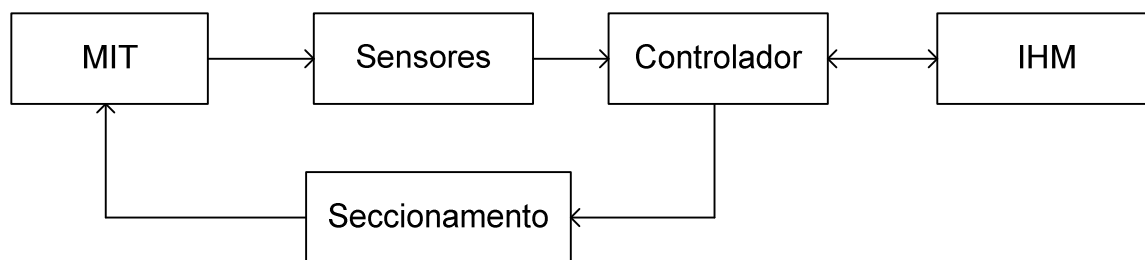


Figura 3-1 - Diagrama em blocos do sistema.

O bloco do motor de indução trifásico, MIT, consiste de um motor com potência de $\frac{1}{2}$ CV, ligado em delta, com tensão de 220 V por fase e com uma corrente nominal de 1,9 A.

O bloco dos sensores é formado por circuitos de medição de tensão, corrente e frequência, construídos por transformadores de potencial, resistor *shunt*, circuitos amplificadores integrados e circuito integrado de conversão de frequência em tensão.

O bloco do controlador é formado por um circuito utilizando o micro-controlador PIC18F4550 e seu *firmware*, responsável pelo tratamento dos sinais e controle do processo.

O bloco da interface homem máquina, IHM, é formado por um display LCD duas linhas e dezesseis colunas, para visualização das informações e

parametrização. E por um teclado de quatro botões, para entrada dos dados de parametrização do dispositivo.

O bloco do seccionamento é constituído por 3 relés de estado sólido com capacidade de condução de corrente de até 10 A, e entrada de sinal de baixa potência para ser conectada a saída do micro-controlador para desligamento do motor.

3.2 Hardware

O *hardware* do dispositivo é composto por três partes principais, que são: micro-controlador e circuito de gravação para este, periféricos para interface com o usuário (teclado e display) e circuitos para medição de tensão, corrente e frequência. Este hardware pode ser visualizado na figura 3-2.

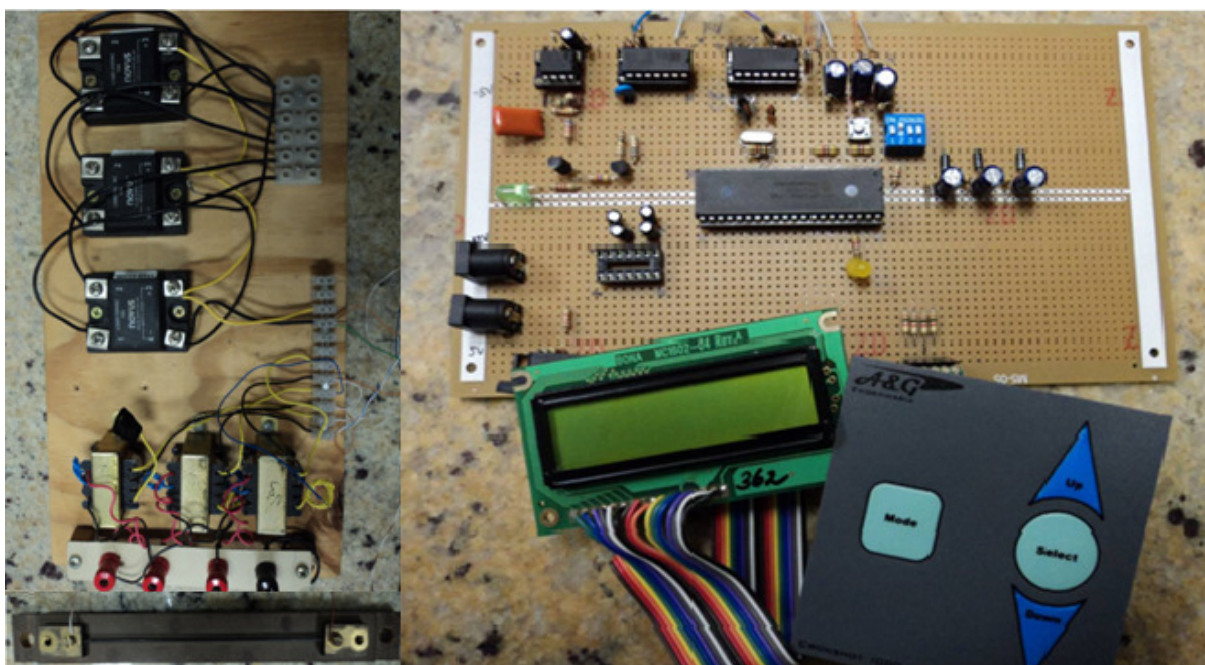


Figura 3-2 - Hardware desenvolvido para o dispositivo de proteção para motores.

3.2.1 Micro-controlador PIC18F4550

Para o controle do sistema foi utilizado o micro-controlador PIC da família 18F, o PIC18F4550, do fabricante Microchip. Este micro-controlador foi escolhido devido a simplicidade na sua programação em linguagem C, capacidade de memória e disponibilidade de canais de conversão A/D.

A seguir, alguns recursos de hardware do PIC18F4550:

- *clock* de até 20MHz;
- encapsulamento PDIP 40 pinos;

- 32 kB de memória de programa (memória flash);
- 256 *bytes* de memória ROM;
- 35 pinos de entrada e saída independentes;
- 13 canais A/D com resolução de 10 *bits*;
- comparador analógico;
- USART;
- 1 *timer* de 8 *bits*;
- 3 *timers* de 16 *bits* (MICROCHIP, 2007).

A figura 3-3 apresenta o diagrama de pinos do micro-controlador PIC18F4550.

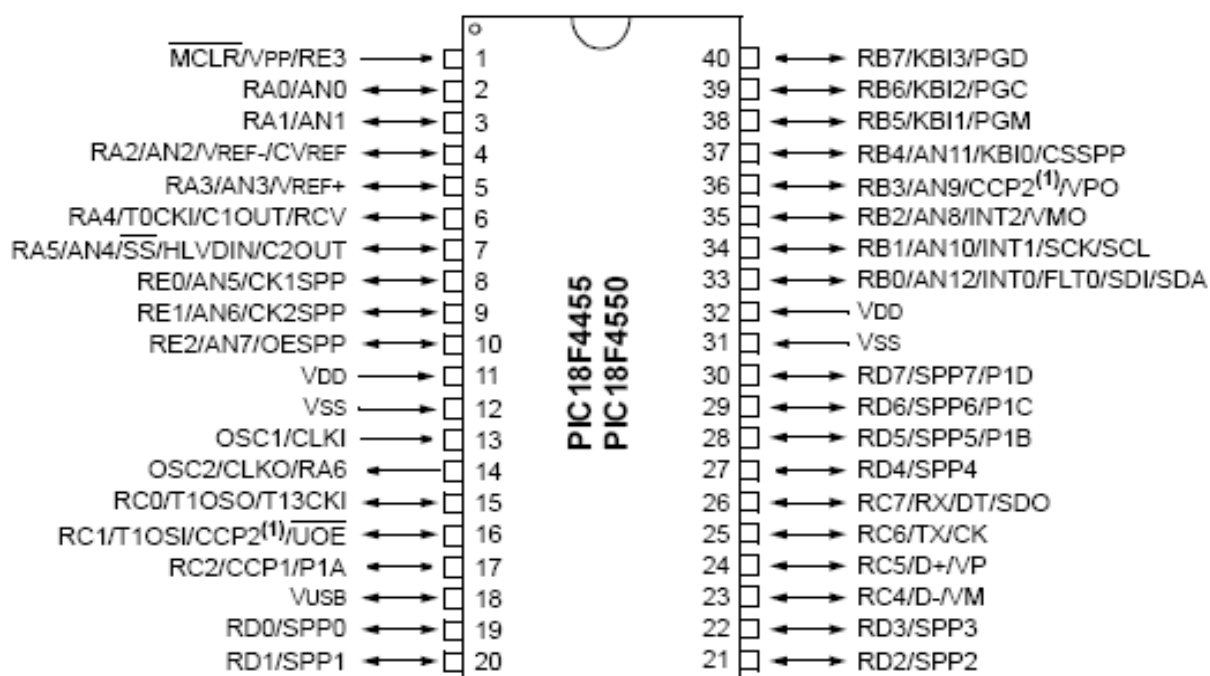


Figura 3-3 - Diagrama de pinos PIC18F4550

Fonte: (MICROCHIP, 2007)

3.2.2 Circuito de gravação para o PIC18F4550

O circuito de gravação para o micro-controlador foi implementado juntamente na placa do circuito do protótipo. Seu funcionamento está baseado nos dados que são enviados através da porta serial do microcomputador aos pinos PGC e PGD do micro-controlador PIC18F4550, e para que estes sinais sejam recebidos pelo micro-controlador é necessário que o pino 1 deste, MCLR negado, esteja alimentado por 12 V, e após a gravação dos dados este pino deve ser alimentado por 5 V. Na figura 3-4 é apresentado o circuito de gravação implementado.

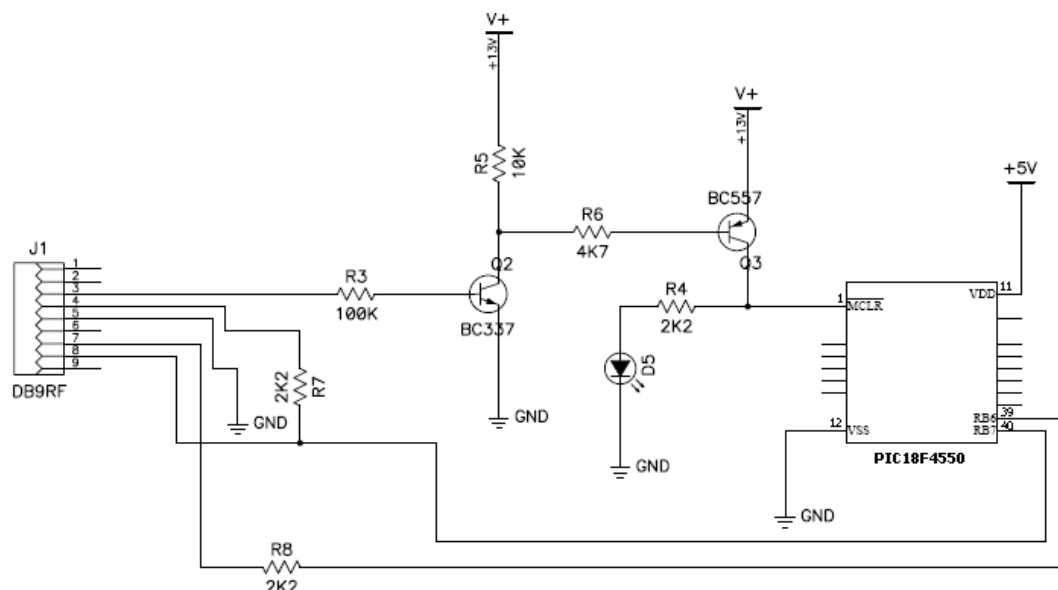


Figura 3-4 - Circuito de gravação para o PIC18F4550.

3.2.3 Periféricos

Para a realização da parametrização pelo usuário foi necessária a utilização de uma interface, através de um teclado para entrada dos parâmetros e um display para sua visualização. Na figura 3-5 é apresentado o diagrama elétrico do circuito contendo estes periféricos.

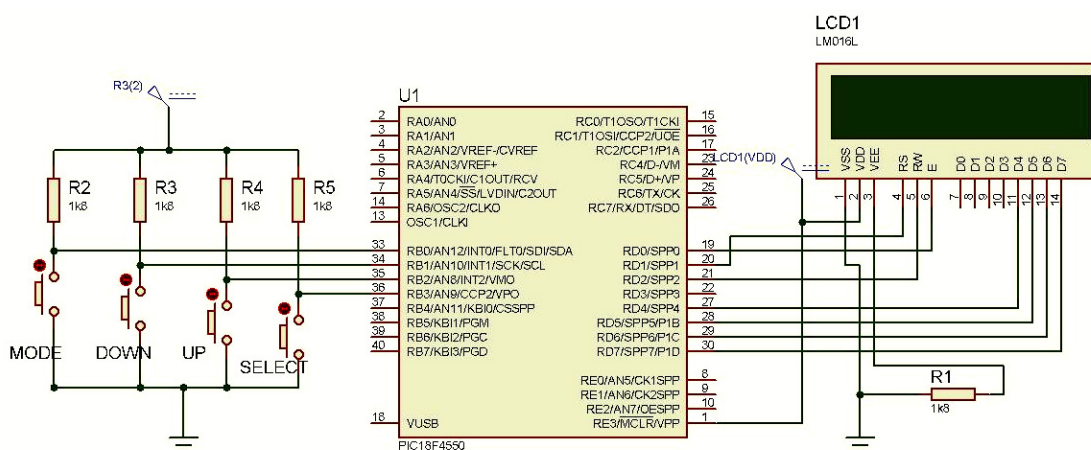


Figura 3-5 - Diagrama do circuito elétrico dos periféricos.

3.2.4 Circuito para medição de tensão

Para a realização da medição de tensão foi utilizado um transformador de potencial rebaixador de 220 V para 3 V para cada fase do motor. Após cada transformador foi utilizado um retificador de meia onda, com um filtro RC para eliminação da tensão de *ripple*. Após os filtros a tensão resultante é contínua, e é

aplicada na entrada de um canal A/D do PIC. A figura 3-6 apresenta o circuito utilizado para medição de tensão.

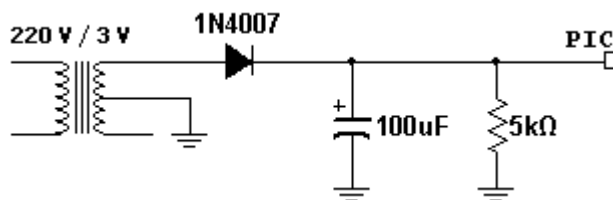


Figura 3-6 - Circuito para medição de tensão.

3.2.5 Circuito para medição de corrente

Para a realização da medição de corrente foi utilizado um resistor *shunt* em série com o motor e um circuito subtrator para amplificação do sinal de tensão do *shunt*. Na saída do circuito subtrator foi utilizado um retificador de meia onda com filtro RC de saída para eliminação da tensão de *ripple*. Após os filtros a tensão resultante é contínua, e é aplicada na entrada de um canal A/D do PIC. A figura 3-7 apresenta o circuito utilizado para medição de corrente.

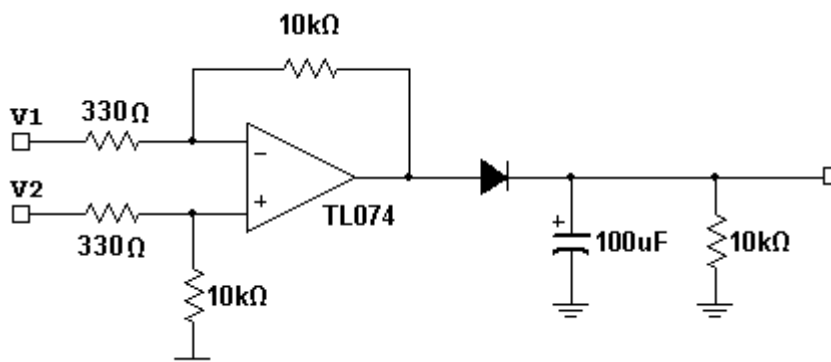


Figura 3-7 - Circuito para medição de corrente.

3.2.6 Circuito para medição de frequência

Para a realização da medição de frequência foi utilizado o sinal de tensão de um dos transformadores de medição de tensão que passa por um comparador, o qual converte a onda senoidal em onda quadrada, que é o requisito para o funcionamento do circuito integrado de conversão de frequência para tensão utilizado, LM331. Na saída do LM331 é utilizado um circuito amplificador não inversor para aumentar a amplitude do sinal contínuo que é aplicado na entrada de um canal A/D do PIC. A figura 3-8 apresenta o circuito utilizado para medição de frequência.

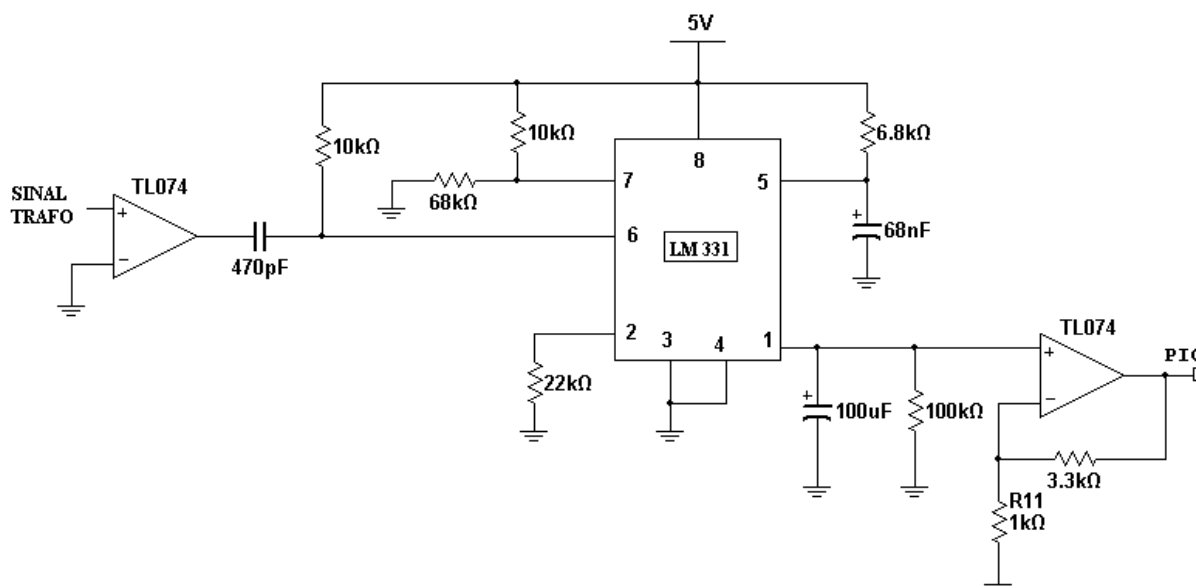


Figura 3-8 - Circuito para medição de frequência.

3.3 Sistemas Computacionais

Para o desenvolvimento deste projeto foram utilizados três *softwares*, com a finalidade do desenvolvimento do *firmware* para operação do dispositivo, gravação deste no micro-controlador e *software* para simulações.

3.3.1 Ambiente de desenvolvimento do firmware

Para o desenvolvimento do *software* do micro-controlador PIC18F4550, foi utilizada a ferramenta da CCS, PIC C Compiler, através de programação em linguagem C. A figura 3-9 apresenta o ambiente de programação do *software* PIC C Compiler.

3.3.2 Software de gravação

Para realização da gravação do *firmware* desenvolvido para o dispositivo, foi utilizado o *software* Win PIC Programmer, que pode ser utilizado nas famílias 18F e 12F, e apesar de estar em fase experimental se mostrou eficaz. Uma observação a ser feita é que para o funcionamento deste software para gravação dos dispositivos da família 18F é necessário selecionar a opção de gravação em *slow mode*, conforme pode ser visualizado na figura 3-10, juntamente com a imagem da tela do *software* Win PIC Programmer.

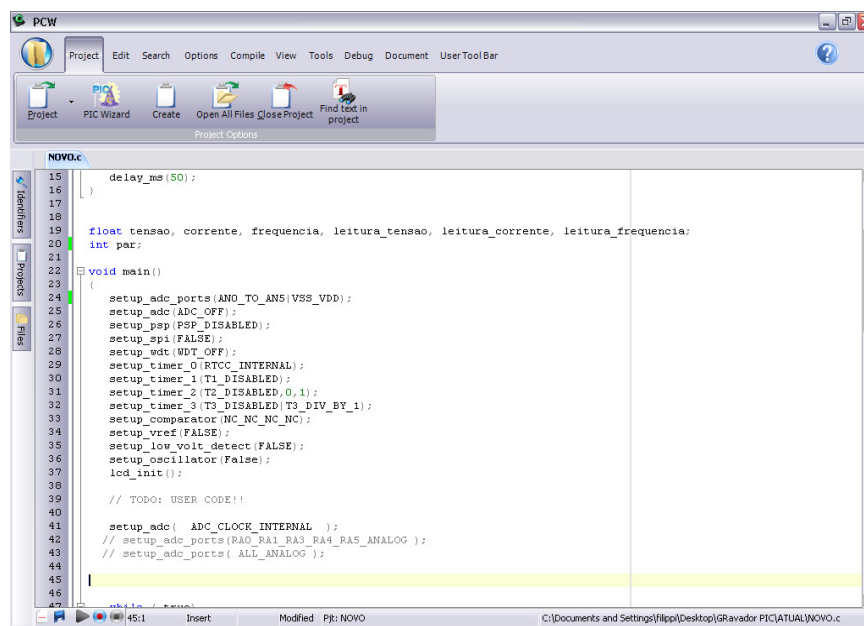


Figura 3-9 - Ambiente de desenvolvimento do software PIC C Compiler.

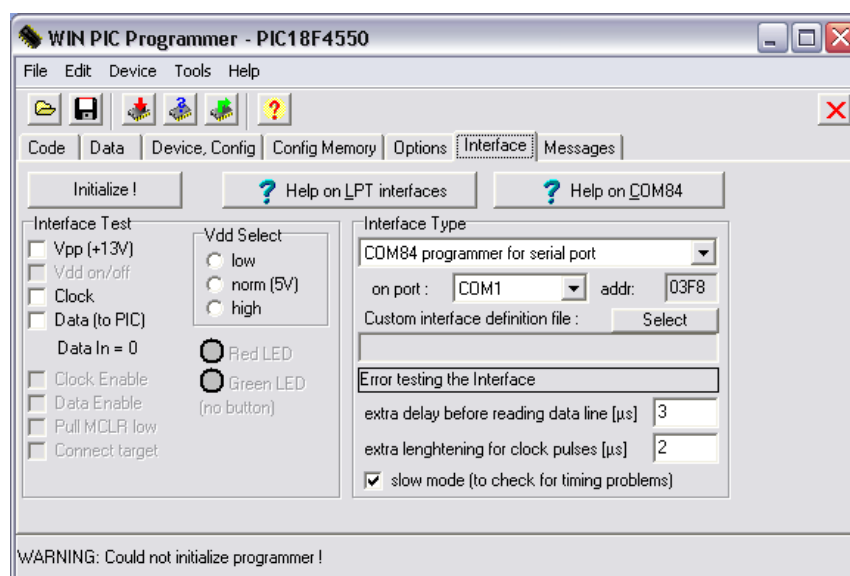


Figura 3-10 - Tela do software Win PIC Programmer.

3.3.3 Software de simulação

Para simulação do firmware juntamente com o circuito implementado, primeiramente foi utilizado o software Proteus que permite utilizar o *firmware* desenvolvido no ambiente de programação do PIC C Compiler. Através da criação de um circuito virtual neste *software*, pode-se verificar o funcionamento do sistema através de simulação, que permite avaliar se a lógica desenvolvida está correta, antes de carregar o *firmware* no *hardware* desenvolvido. Evitando, assim, que se

dependa tempo analisando o *firmware* em casos onde se observa que o funcionamento não está de acordo com o esperado. Ou seja, uma vez observado o correto funcionamento na simulação, ao carregar o *firmware* no *hardware* desenvolvido, este funcionará corretamente, caso contrário, sabe-se que existe algum problema no *hardware*. A figura 3-11 apresenta o ambiente de simulação do *software* Proteus.

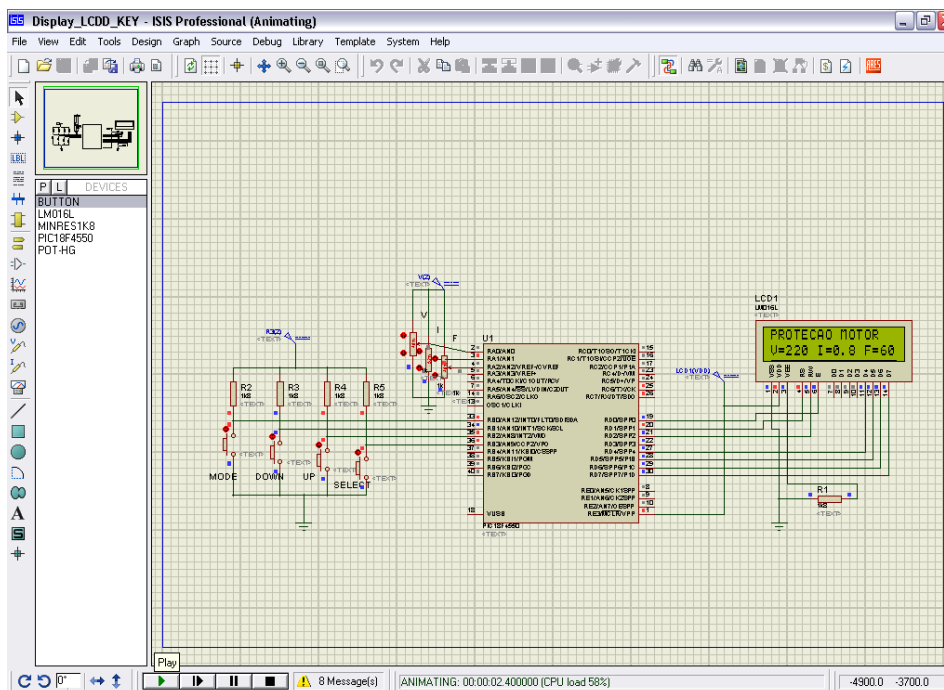


Figura 3-11 - Ambiente de simulação do software Proteus.

3.4 Firmware

O *firmware* foi desenvolvido através da ferramenta PIC C Compiler e tem a finalidade de controlar o sistema de proteção para o motor. Para isso foi necessário a utilização de periféricos como display LCD de duas linhas, dezesseis colunas e teclado de quatro teclas, sendo elas: “MODE”, “UP”, “DOWN” e “SELECT”. O fluxograma do *firmware* desenvolvido é apresentado na figura 3-12.

Neste *firmware* não foi desenvolvida a histerese de 50 ms, equivalente a 3 ciclos da rede, onde a falha é monitorada durante este período e a carga é seccionada caso a falha persista, permitindo o melhor desempenho do dispositivo, para que a sua alimentação não seja seccionada indevidamente, apenas com o subtransitórios. Porém este projeto poderá sofrer customizações para implementação desta especificação.

Também poderia ser utilizado o *Watchdog Timer* para desenvolvimento do dispositivo. *Watchdog Timer* é temporizador que dispara um *reset* caso o programa

principal, por alguma razão, tenha seu funcionamento interrompido, fazendo que o dispositivo retorne ao seu funcionamento normal, evitando que deixe de atuar quando necessário.

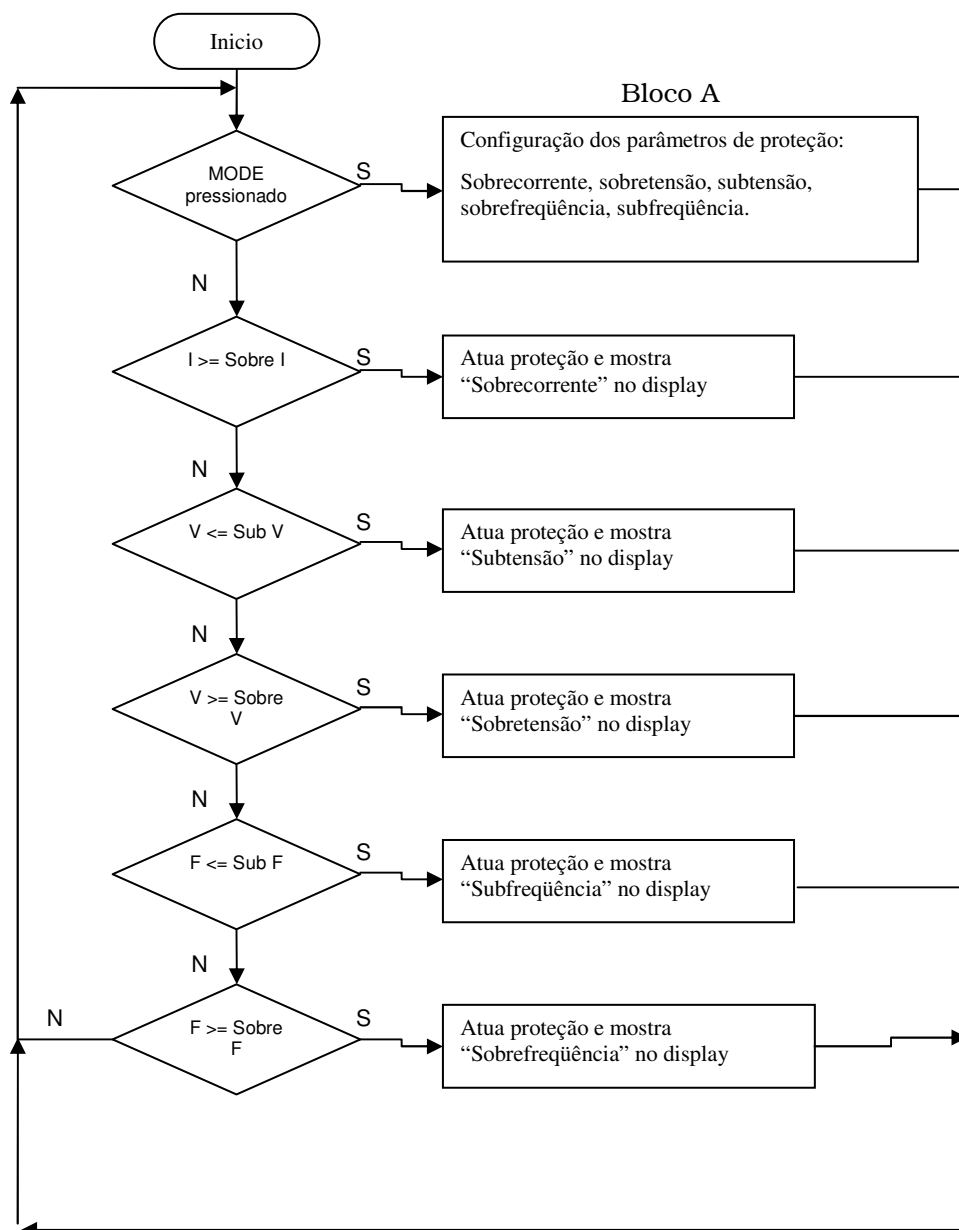


Figura 3-12 - Fluxograma do firmware desenvolvido para o projeto.

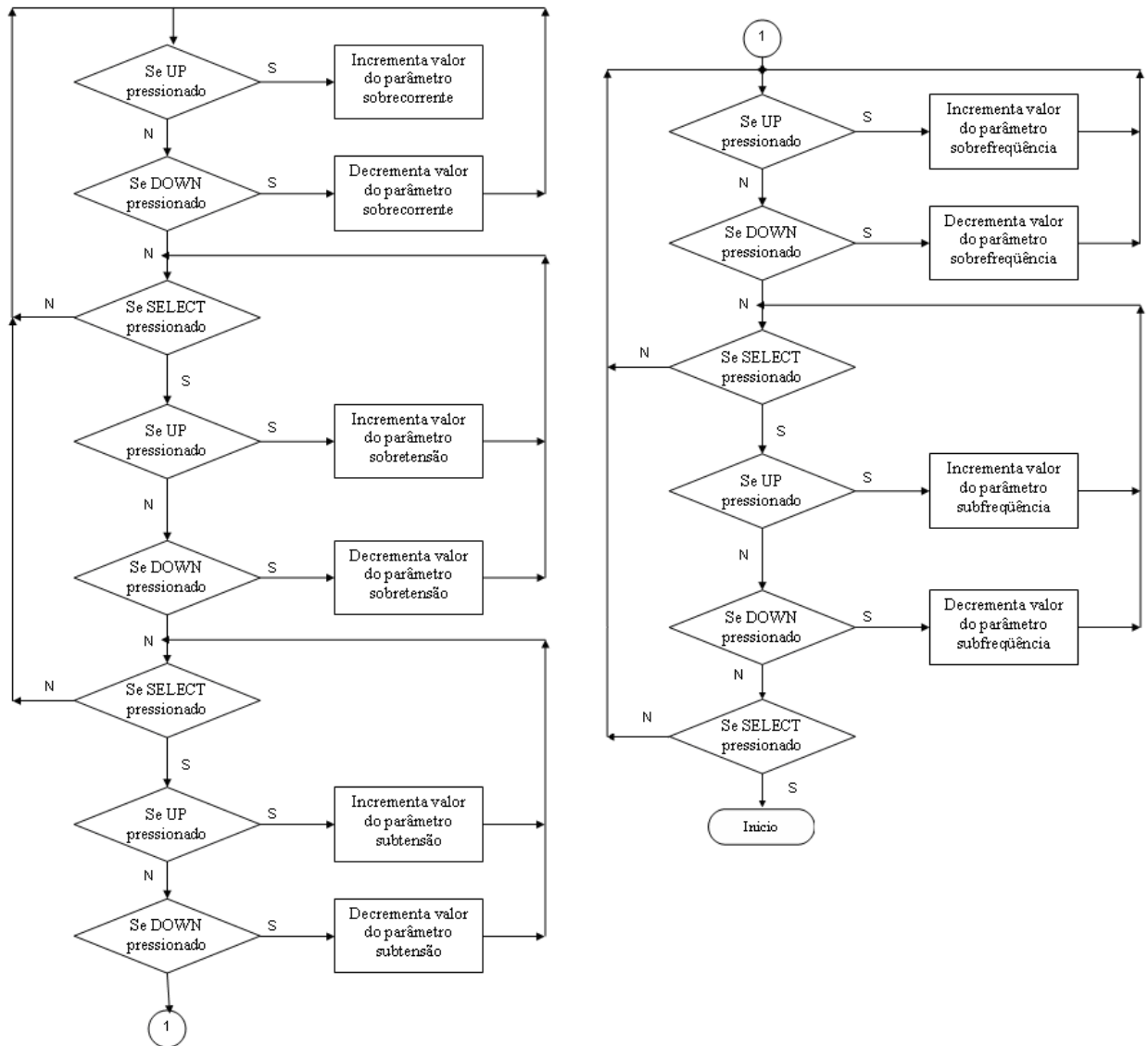


Figura 3-13 - Bloco A do fluxograma da figura 3-12.

3.5 Descrição de Funcionamento do Dispositivo

O dispositivo, durante sua atividade de proteção, apresenta no display os valores de tensão, corrente e frequência medidos instantaneamente.

Para parametrização das proteções é necessário pressionar o botão “MODE”, o que faz com que seja apresentada a opção de parametrização para sobrecorrente, e, através das teclas “UP” e “DOWN”, é possível selecionar o valor. O botão “SELECT” permite que esses valores sejam salvos e possibilita a parametrização para sobretensão, subtensão, sobrefrequência e subfrequência, realizadas da mesma forma descrita anteriormente a parametrização de sobrecorrente.



Com o dispositivo em funcionamento, os valores armazenados durante a parametrização são continuamente comparados com os valores instantâneos medidos, e quando as condições de proteção forem atingidas, o circuito de seccionamento da alimentação do motor é acionado e o dispositivo apresenta no display o evento que causou esta interrupção.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para verificação do funcionamento do dispositivo de proteção desenvolvido foi utilizado o Testador Universal e Analisador de Energia CE-6000, do fabricante Conprove Indústria e Comércio LTDA. Quando este equipamento é conectado a um computador equipado com o *software* Manual e o Freqgera, é possível simular os distúrbios de tensão, corrente e frequência da rede elétrica. Assim, pode-se analisar o funcionamento de dispositivos de proteção.

Nos ensaios realizados, considerou-se que o dispositivo desenvolvido está protegendo um motor de indução trifásico, que possui as seguintes características:

- Tensão nominal de 220 V, com ligação em delta;
- Corrente nominal de 1,9 A;
- I_p/I_n igual a 5 vezes;
- Rotação de 1700 RPM;
- Fator de serviço igual a 1;
- Categoria N.

Os valores de falta parametrizados foram escolhidos meramente para a realização dos ensaios para verificação do funcionamento do dispositivo, considerando uma variação de aproximadamente 10% a partir da tensão nominal, aproximadamente 60% a partir da corrente nominal e em torno de 8% para frequência nominal, porém, pode-se considerar os valores parametrizados para corrente e tensão como aplicáveis para casos reais, lembrando que as parametrizações dependem das características do sistema elétrico aplicado e do estudo de seletividade realizado. A figura 4-1 apresenta o equipamento utilizado para a realização dos ensaios e a figura 4-2 apresenta a estrutura utilizada para realização dos ensaios.



Figura 4-1 - Testador Universal e Analisador de Energia CE-6000.

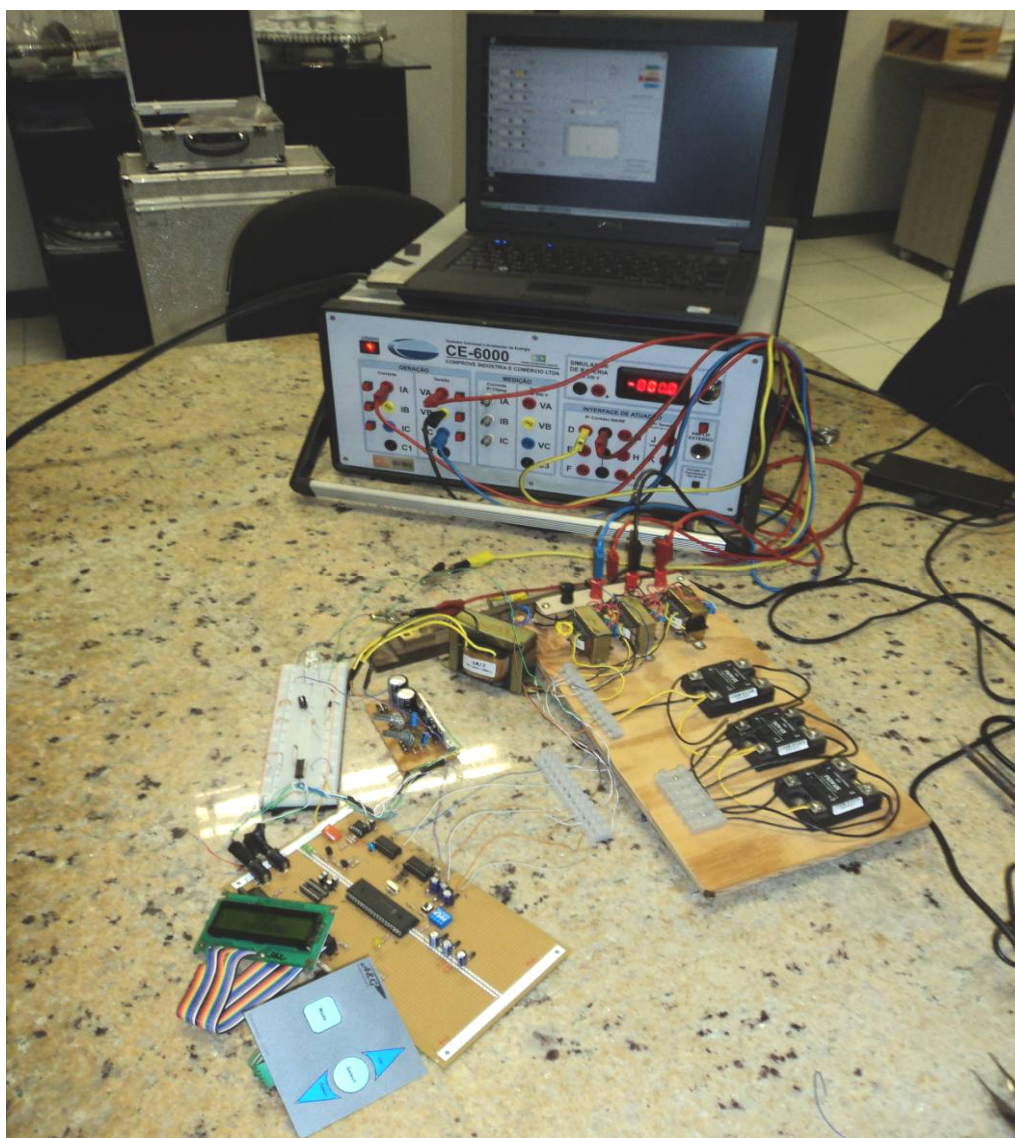


Figura 4-2 - Estrutura utilizada para realização dos ensaios.

4.1. Ensaio de Sobrecorrente (ANSI 50)

Para a realização do teste de atuação do dispositivo para sobrecorrente instantânea, foi utilizado o equipamento CE-6000 juntamente com o *software* Manual. As etapas desta simulação estão listadas a seguir, considerando que o parâmetro de atuação escolhido foi de 3 A.

A proteção de sobrecorrente monitora apenas uma fase do motor, porém o projeto, através de customizações, pode monitorar as três fases do motor.

- Os terminais de corrente do CE-6000 foram conectados através de cabos ao resistor *shunt* do circuito utilizado para medição de corrente, e o relé eletromecânico de acionamento do seccionamento da alimentação (para a realização dos ensaios foi necessário utilizar este relé, devido ao CE-6000 não ser compatível com os relés de estado sólido, utilizados no circuito para seccionamento, quando da operação do motor), foi conectado aos terminais de retorno do CE-6000, que recebem o sinal para término da contagem do tempo, e determinação da corrente de atuação do dispositivo de proteção;

- No *software* Manual foi configurada a corrente nominal do motor de indução, 1,9 A. A seguir, foi simulado o funcionamento do dispositivo de proteção, tendo sido verificado que o dispositivo não atuou para esta corrente, ou seja, não atuou para a corrente nominal;

- Após 10 segundos de funcionamento em regime normal, tempo escolhido aleatoriamente, foi aplicado no dispositivo uma corrente de 3 A (corrente de atuação do dispositivo de proteção) e verificado no *software* a resposta no tempo para essa corrente. A tela deste ensaio pode ser visualizada na figura 4-3.

Para verificação dos valores e tempos de atuação do dispositivo para proteção contra sobrecorrente, o ensaio foi repetido 5 vezes, para o mesmo valor de atuação, para que desta forma possibilitasse uma análise de erro destes valores. Estes tempos de atuação devem se repetir para qualquer valor parametrizado. Os resultados deste ensaio são apresentados na tabela 4-1 e a figura 4-4 apresenta o gráfico para os valores de corrente

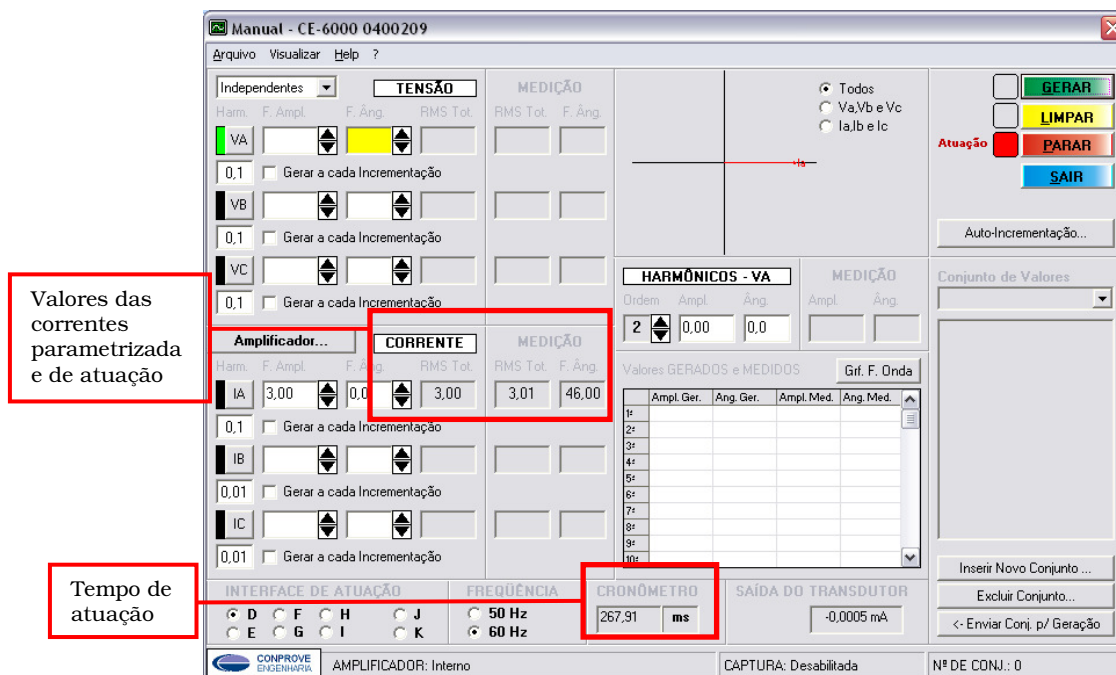


Figura 4-3 - Imagem da tela para ensaio de sobrecorrente.

Tabela 4-1- Resultados obtidos para ensaios de sobrecorrente.

| Número do Teste | Corrente parametrizada (A) | Corrente de atuação (A) | Erro (%) | Tempo de atuação (ms) |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 3 | 3,01 | 0,33 | 267,91 |
| 2 | 3 | 3,01 | 0,33 | 289,55 |
| 3 | 3 | 3,01 | 0,33 | 256,45 |
| 4 | 3 | 3,02 | 0,67 | 290,93 |
| 5 | 3 | 3,01 | 0,33 | 273,51 |
| Média | | 3,012 | 0,40 | 275,67 |

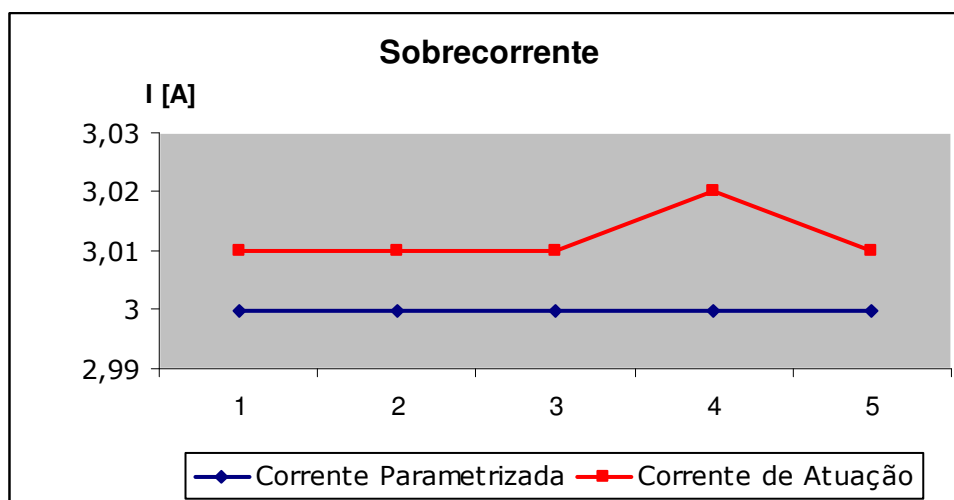


Figura 4-4 – Gráfico dos valores de corrente para ensaio de sobrecorrente.

Para o ensaio da proteção de sobrecorrente instantânea, o tempo médio de atuação foi de 275,67 ms, tendo um tempo máximo de atuação de 290,93 ms. Quanto aos valores dessa corrente, teve um erro médio de 0,40 %, sendo o erro máximo de 0,67 %.

4.2. Ensaio de Sobretensão (ANSI 59)

Para a realização do teste de atuação do dispositivo para sobretensão, contemplando o sistema trifásico, foi utilizado o equipamento CE-6000 juntamente com o *software* Manual. Devido ao equipamento trabalhar em uma configuração estrela e o dispositivo trabalhar com um motor ligado na configuração delta, os valores configurados no equipamento devem ser multiplicados por $\sqrt{3}$. Essa simulação seguiu as seguintes etapas, considerando que o parâmetro de atuação escolhido foi de $138,7\sqrt{3}$ V (240 V).

- Os terminais de tensão do CE-6000 foram conectados através de cabos aos transformadores do circuito utilizado para medição de tensão, e o relé eletromecânico de acionamento do seccionamento da alimentação foi conectado aos terminais de retorno do CE-6000, que recebem o sinal para término da contagem do tempo, e determinação da tensão de atuação do dispositivo de proteção;

- No *software* Manual foi configurada a tensão nominal do motor de indução, $127\sqrt{3}$ V (220 V). A seguir, foi simulado o funcionamento do dispositivo de proteção, tendo sido verificado que o dispositivo não atuou para esta tensão, ou seja, não atuou para a tensão nominal;

• Após 10 segundos de funcionamento em regime normal, tempo escolhido aleatoriamente, foi aplicado no dispositivo uma tensão de $138,7\sqrt{3}$ V (240 V), (tensão de atuação do dispositivo de proteção) e verificado no *software* a resposta no tempo para essa tensão. A tela deste ensaio pode ser visualizada na figura 4-5.

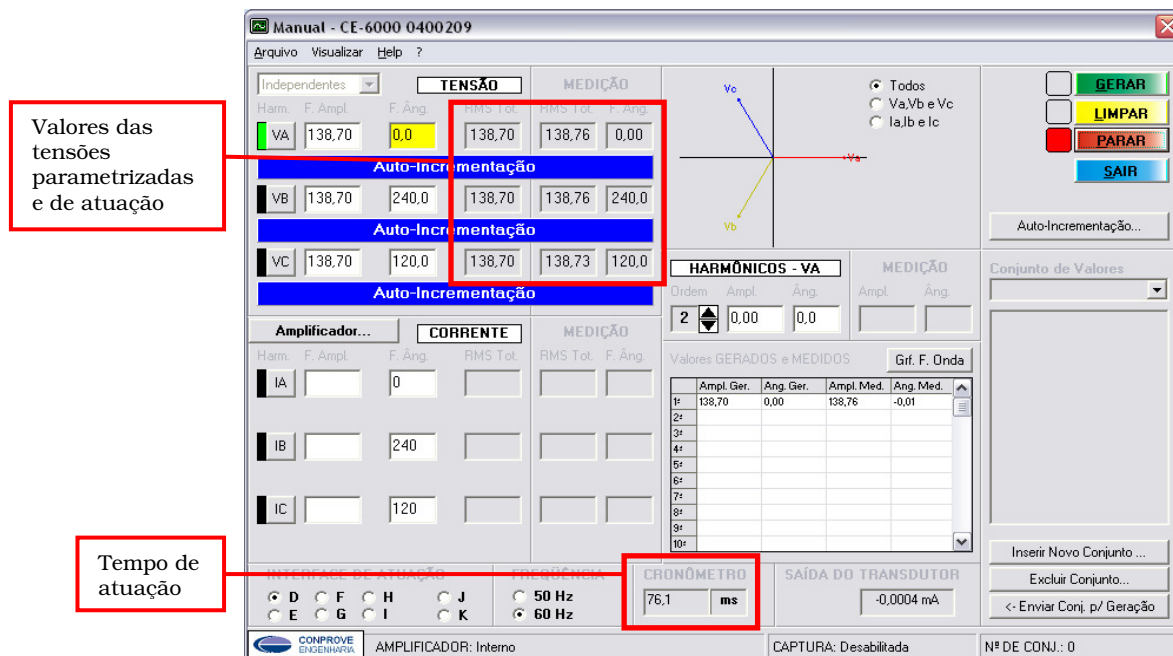


Figura 4-5 - Imagem da tela para ensaio de sobretensão.

Para verificação dos valores e tempos de atuação do dispositivo para proteção contra sobretensão, o ensaio foi repetido 5 vezes, para o mesmo valor de atuação, para que desta forma possibilitasse uma análise de erro destes valores. Estes tempos de atuação devem se repetir para qualquer valor parametrizado. Os resultados deste ensaio são apresentados na tabela 4-2 e a figura 4-6 apresenta o gráfico para os valores de tensão.

Tabela 4-2 - Resultados obtidos para ensaios de sobretensão.

| Número do Teste | Tensão parametrizada (V) | Tensão de atuação (V) | Erro (%) | Tempo de atuação (ms) |
|-----------------|--------------------------|---|-------------|-----------------------|
| 1 | $138,7\sqrt{3}$ (240) | $138,73\sqrt{3}$ (240,28) | 0,02 | 68,34 |
| 2 | $138,7\sqrt{3}$ (240) | $138,73\sqrt{3}$ (240,28) | 0,02 | 118,17 |
| 3 | $138,7\sqrt{3}$ (240) | $138,76\sqrt{3}$ (240,34) | 0,04 | 76,1 |
| 4 | $138,7\sqrt{3}$ (240) | $138,75\sqrt{3}$ (240,32) | 0,04 | 78,84 |
| 5 | $138,7\sqrt{3}$ (240) | $138,75\sqrt{3}$ (240,32) | 0,04 | 102,47 |
| Média | | $138,74\sqrt{3}$ (240,31) | 0,03 | 88,78 |

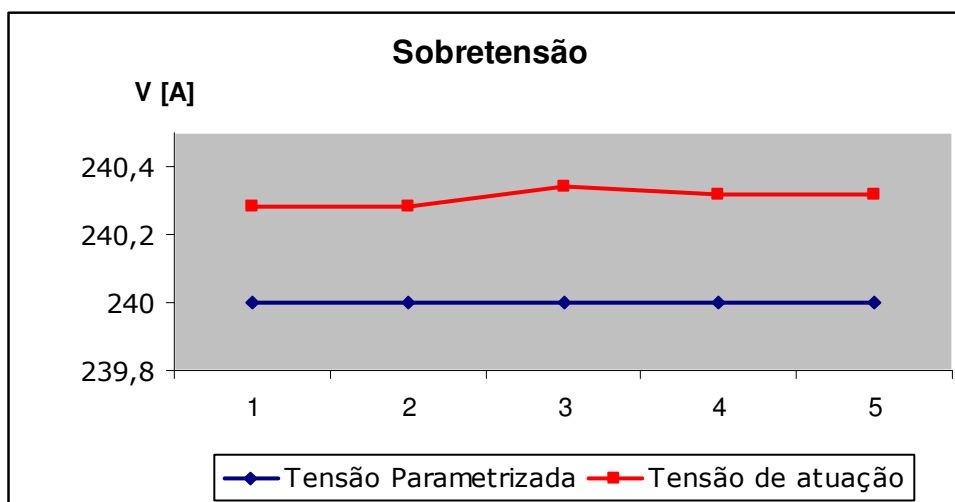


Figura 4-6 - Gráfico dos valores de tensão para ensaio de sobretensão.

Para o ensaio da proteção de sobretensão, o tempo médio de atuação foi de 88,78 ms, tendo um tempo máximo de 118,17 ms. Quanto aos valores da tensão de atuação, teve um erro médio de 0,03 %, sendo o erro máximo de 0,04 %. Esta diferença considerável entre os tempos de atuação para o mesmo ensaio, talvez possa ser atribuída a alguma falha no circuito, devido a este ter sido o primeiro a ser ensaiado. Instantes antes da realização deste ensaio, foram realizados testes para definir os incrementos de tensão a serem aplicados pelo CE-6000 a cada segundo, durante o ensaio de verificação da proteção contra sobretensão. Com o objetivo de se encontrar a melhor forma para levantar e apresentar os resultados. Portanto, pode não ter sido realizada a carga ou descarga completa dos capacitores dos circuitos nestes testes realizados previamente, acarretando diferenças no tempo de atuação da proteção contra sobretensão. Não foi possível a realização de novos testes devido a dificuldade da disponibilidade do equipamento CE-6000.

4.3. Ensaio de Subtensão (ANSI 27)

Para a realização do teste de atuação do dispositivo para subtensão, contemplando o sistema trifásico, foi utilizado o equipamento CE-6000 juntamente com o *software* Manual. Essa simulação seguiu as seguintes etapas, considerando que o parâmetro de atuação escolhido foi de $115\sqrt{3}$ V (200 V).

- Os terminais de tensão do CE-6000 foram conectados através de cabos aos transformadores do circuito utilizado para medição de tensão, e o relé eletromecânico de acionamento do seccionamento da alimentação foi conectado aos

terminais de retorno do CE-6000, que recebem o sinal para término da contagem do tempo, e determinação da tensão de atuação do dispositivo de proteção;

- No *software* Manual foi configurada a tensão nominal do motor de indução, $127\sqrt{3}$ V (220 V). A seguir, foi simulado o funcionamento do dispositivo de proteção, tendo sido verificado que o dispositivo não atuou para essa tensão, ou seja, não atuou para a tensão nominal;

- Após 10 segundos de funcionamento em regime normal, tempo escolhido aleatoriamente, foi aplicado no dispositivo uma tensão de $115\sqrt{3}$ V (200 V), (tensão de atuação do dispositivo de proteção) e verificado no *software* a resposta no tempo para essa tensão. A tela deste ensaio pode ser visualizada na figura 4-7.

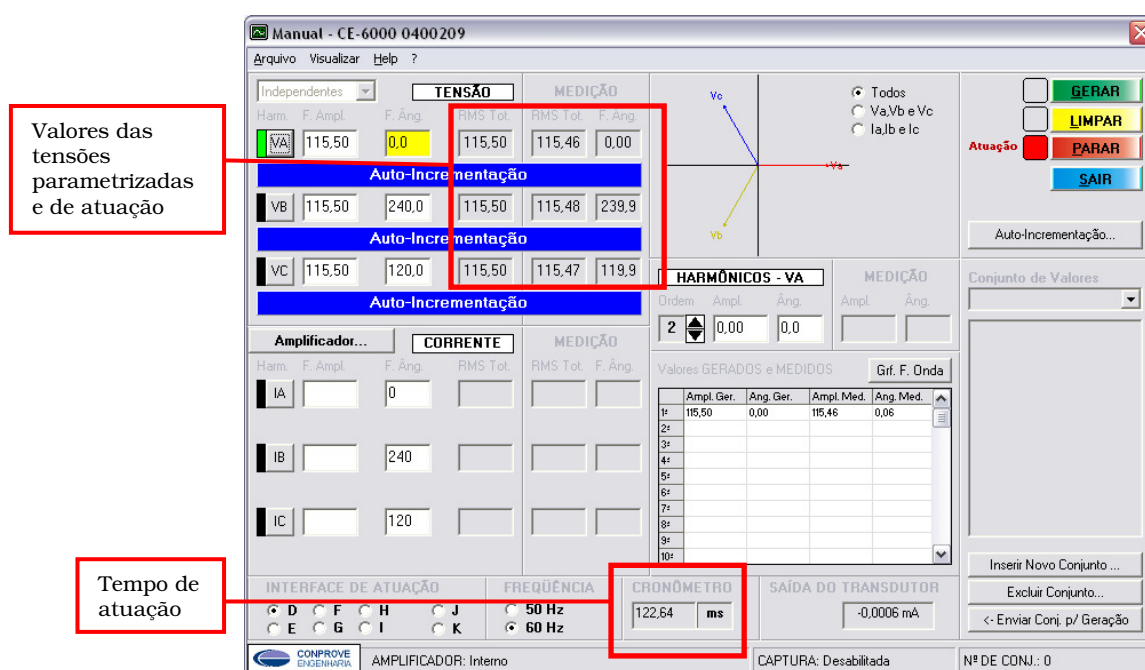


Figura 4-7 - Imagem da tela para ensaio de subtensão.

Para verificação dos valores e tempos de atuação do dispositivo para proteção contra subtensão, o ensaio foi repetido 5 vezes, para o mesmo valor de atuação, para que desta forma possibilitasse uma análise de erro destes valores. Estes tempos de atuação devem se repetir para qualquer valor parametrizado. Os resultados deste ensaio são apresentados na tabela 4-3 e a figura 4-8 apresenta o gráfico para os valores de tensão.

Tabela 4-3 - Resultados obtidos para ensaios de subtensão.

| Número do Teste | Tensão parametrizada (V) | Tensão de atuação (V) | Erro (%) | Tempo de atuação (ms) |
|-----------------|--------------------------|---|-------------|-----------------------|
| 1 | $115\sqrt{3}$ (200) | $115,46\sqrt{3}$ (199,98) | 0,40 | 122,64 |
| 2 | $115\sqrt{3}$ (200) | $115,47\sqrt{3}$ (199,99) | 0,41 | 126,55 |
| 3 | $115\sqrt{3}$ (200) | $115,45\sqrt{3}$ (199,96) | 0,39 | 119,17 |
| 4 | $115\sqrt{3}$ (200) | $115,43\sqrt{3}$ (199,93) | 0,37 | 120,79 |
| 5 | $115\sqrt{3}$ (200) | $115,46\sqrt{3}$ (199,98) | 0,40 | 123,23 |
| Média | | $115,45\sqrt{3}$ (199,97) | 0,39 | 122,47 |

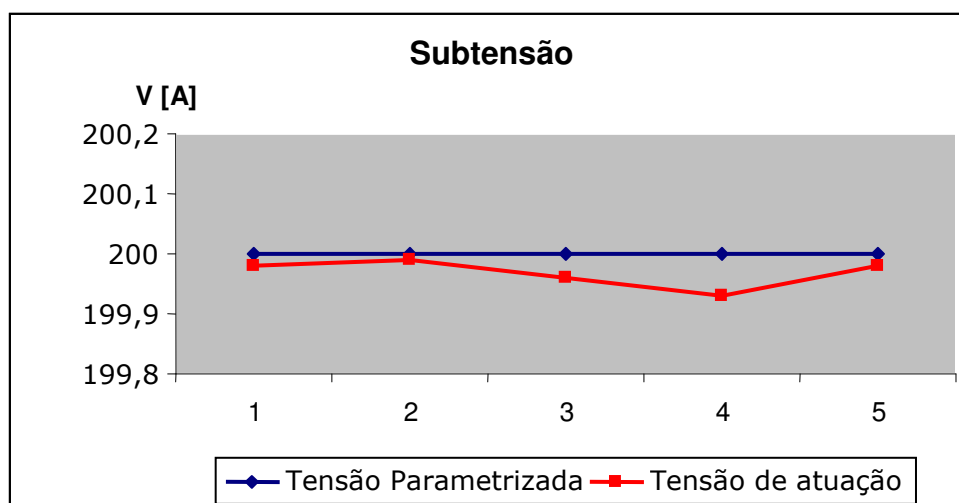


Figura 4-8 - Gráfico dos valores de tensão para ensaio de subtensão.

Para o ensaio da proteção de subtensão, o tempo médio de atuação foi de 122,47 ms, tendo um tempo máximo de 126,55 ms. Quanto aos valores da tensão de atuação, teve um erro médio de 0,39 %, sendo o erro máximo de 0,41 %.

4.4. Ensaio de Sobrefrequência (ANSI 81)

Para a realização do teste de atuação do dispositivo para sobrefrequência, utilizando como referência a frequência de uma das fases, foi utilizado o equipamento CE-6000 juntamente com o *software* Freqgera. Essa simulação seguiu as seguintes etapas, considerando que o parâmetro de atuação escolhido foi de 65 Hz.

- Os terminais de tensão do CE-6000 foram conectados através de cabos aos transformadores do circuito utilizado para medição de frequência, e o relé eletromecânico de acionamento do seccionamento da alimentação foi conectado aos terminais de retorno do CE-6000, que recebem o sinal para término da contagem do tempo de atuação do dispositivo de proteção;

- No *software* FreqGera foi configurada a frequência nominal do motor de indução, 60 Hz. A seguir, foi simulado o funcionamento do dispositivo de proteção, tendo sido verificado que o dispositivo não atuou para essa frequência, ou seja, não atuou para a frequência nominal;

- Após 10 segundos de funcionamento em regime normal, tempo escolhido aleatoriamente, foi aplicado no dispositivo uma frequência de 65 Hz, (frequência de atuação do dispositivo de proteção) e verificado no *software* a resposta no tempo para essa frequência. A tela deste ensaio pode ser visualizada na figura 4-6

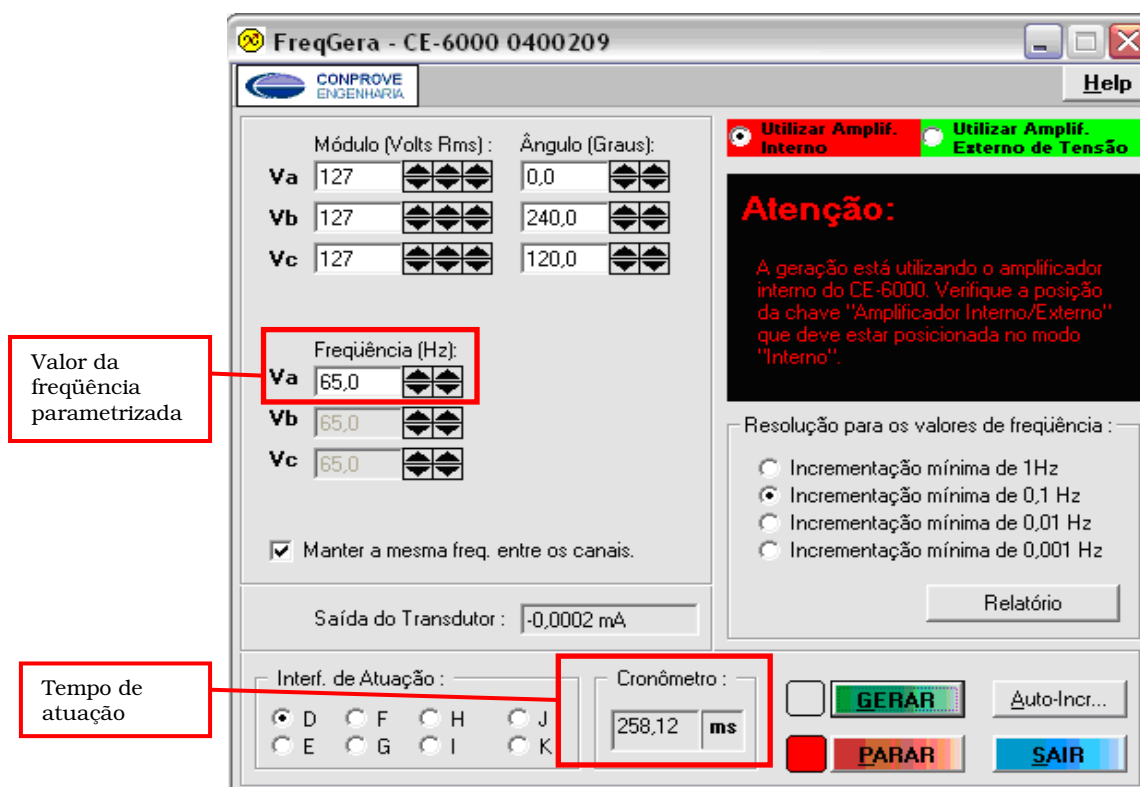


Figura 4-9 - Imagem da tela para ensaio de sobrefrequência.

Para verificação dos tempos de atuação do dispositivo para proteção contra sobrefrequência, o ensaio foi repetido 5 vezes, para o mesmo valor de atuação, para que desta forma possibilitasse uma análise dentre estes valores. Estes tempos de atuação devem se repetir para qualquer valor parametrizado. Os resultados deste ensaio são apresentados na tabela 4-4.

Tabela 4- 4- Resultados obtidos para ensaios de sobrefreqüência.

| Número do Teste | Freqüência parametrizada (Hz) | Tempo de atuação (ms) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 65 | 258,12 |
| 2 | 65 | 262,72 |
| 3 | 65 | 245,56 |
| 4 | 65 | 256,98 |
| 5 | 65 | 270,26 |
| Média | | 258,73 |

Para o ensaio da proteção de sobrefreqüência, o tempo médio de atuação foi de 258,73 ms, tendo um tempo máximo de 270,26 ms.

4.5. Ensaio de Subfreqüência (ANSI 81)

Para a realização do teste de atuação do dispositivo para subfreqüência, utilizando como referência a freqüência de uma das fases, foi utilizado o equipamento CE-6000 juntamente com o *software* Freqgera. Essa simulação seguiu as seguintes etapas, considerando que o parâmetro de atuação escolhido foi de 55 Hz.

- Os terminais de tensão do CE-6000 foram conectados através de cabos aos transformadores do circuito utilizado para medição de freqüência, e o relé eletromecânico de acionamento do seccionamento da alimentação foi conectado aos terminais de retorno do CE-6000, que recebem o sinal para término da contagem do tempo de atuação do dispositivo de proteção;

- No *software* Freqgera foi configurada a freqüência nominal do motor de indução, 60 Hz. A seguir, foi simulado o funcionamento do dispositivo de proteção, tendo sido verificado que o dispositivo não atuou para essa freqüência, ou seja, não atuou para a freqüência nominal;

- Após 10 segundos de funcionamento em regime normal, tempo escolhido aleatoriamente, foi aplicado no dispositivo uma freqüência de 55 Hz, (freqüência de atuação do dispositivo de proteção) e verificado no *software* a resposta no tempo para essa freqüência. A tela deste ensaio pode ser visualizada na figura 4-10.

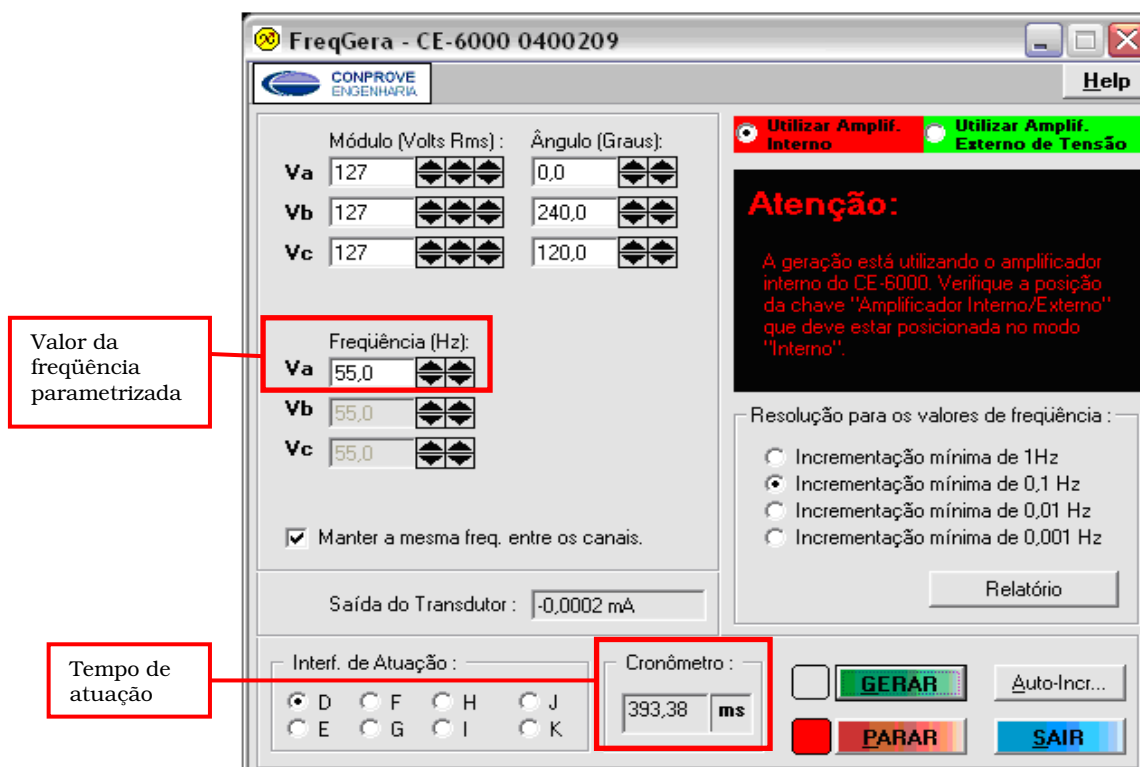


Figura 4-10 - Imagem da tela para ensaio de subfrequência.

Para verificação dos tempos de atuação do dispositivo para proteção contra subfrequência, o ensaio foi repetido 5 vezes, para o mesmo valor de atuação, para que desta forma possibilitasse uma análise dentre estes valores. Estes tempos de atuação devem se repetir para qualquer valor parametrizado. Os resultados para este ensaio são apresentados na tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Resultados obtidos para ensaios de subfrequência.

| Número do Teste | Frequência parametrizada (Hz) | Tempo de atuação (ms) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 55 | 393,38 |
| 2 | 55 | 389,15 |
| 3 | 55 | 356,65 |
| 4 | 55 | 390,91 |
| 5 | 55 | 372,55 |
| Média | | 380,53 |

Para o ensaio da proteção de subfrequência, o tempo médio de atuação foi de 380,53 ms, tendo um tempo máximo de 393,38 ms.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho, que foi o de desenvolver um dispositivo de proteção contra sobrecorrente, sobretensão, subtensão, sobrefreqüência e subfreqüência, para motores de indução trifásicos, foi atingido.

O dispositivo foi projetado, simulado, implementado e testado, para verificação de suas funções de proteção. Nos ensaios realizados com o dispositivo de proteção conectado ao motor de indução trifásico, pode-se observar que todas as funções de proteção implementadas atuaram no seccionamento da alimentação do motor, quando atingidos os valores parametrizados, protegendo o mesmo dos possíveis danos causados devido às variações aplicadas.

A histerese de 50 ms, equivalente a 3 ciclos da rede, para o seccionamento da alimentação não foi implementado neste projeto, portanto, o dispositivo atua instantaneamente quando atingido a valor parametrizado para a proteção.

As diferenças encontradas para o tempo de atuação entre as proteções de sobretensão e subtensão, sobrefreqüência e subfreqüência, devem-se ao tempo de resposta para carga e descarga dos capacitores utilizados nos filtros dos circuitos de medição de tensão e freqüência, onde o tempo de resposta para descarga é maior que o para carga, nas situações testadas, tornando a resposta para subtensão e subfreqüência mais lenta em relação a sobretensão e sobrefreqüência.

O tempo de atuação do dispositivo, se comparado aos dispositivos comerciais, para motores com potências maiores do que 150 CV, é maior. Utilizando como referência os tempos de atuação do dispositivo de proteção para motores de média e alta tensão da GE, 469 Motor Protection System (GE DIGITAL ENERGY, 2010), que especifica o tempo de atuação de até 100 ms para as proteções contidas neste trabalho, constatou-se que as proteção para sobretensão e subtensão se aproximam dos valores de referência.

Como o dispositivo de proteção desenvolvido tem a função de substituir as proteções convencionais, para motores menores do que 150 CV, como relés térmicos, fusíveis e disjuntores, faz-se uma comparação com o disjuntor do fabricante GE, Série GE-60, modelo G63C02, um disjuntor de três pólos para uma corrente nominal de 2 A, o qual seria aplicável ao motor utilizado no decorrer deste projeto. Este disjuntor apresenta, para uma corrente cinco vezes maior que a nominal, um tempo de atuação de até 15 s. Então, observa-se o tempo de até 300 ms para atuação do dispositivo de proteção desenvolvido, que pode substituir o disjuntor referido, apresentando um tempo de atuação muito menor.

Estes tempos de atuação maiores, se comparados aos dispositivos de proteção para motores maiores que 150 CV comerciais, devem-se a forma utilizada para medição dos parâmetros de corrente, tensão e frequência do dispositivo, utilizando filtros para eliminação da tensão de *ripple*, atrasando o tempo de resposta dos circuitos.

De acordo com os resultados observados, conclui-se que, com a realização de um maior número de testes, um estudo mais aprofundado e algumas customizações, o dispositivo de proteção desenvolvido pode ser utilizado em aplicações práticas e até mesmo ser produzido em escala comercial.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como melhoria para o trabalho pode-se citar o método escolhido para medição dos parâmetros de corrente, tensão e frequência, sugerindo um estudo mais aprofundado para a realização da medição sem a utilização de filtros, diminuindo este tempo de resposta. Uma alternativa seria apenas retificar os sinais e amostrar esta tensão AC, elaborando uma conversão por *software*, o que tornaria o tempo de resposta do valor medido menor.

Pode-se considerar para trabalhos futuros a opção de sobrecorrente temporizada (função 51 norma ANSI), que pode ser implementada através de curvas por tempo ou por tempo definido.

Devido às características dos estudos de seletividade, também pode-se considerar a opção da definição do tempo de atuação pelo usuário através da parametrização, para sobretensão e subtensão.

Outra sugestão é a elaboração de um *software* para parametrização através de um microcomputador, facilitando assim as opções de parametrização para o usuário.



6. REFERÊNCIAS

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.eletrabras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={FBFB8D50-65B6-4135-9477-B0B2711D7AD8}>. Acesso em 24/11/2010.

DUGAN, R. C., SANTOSO, S. MCGRANAGHAN, M. F. and BEATY, H. W. – Electrical Power Systems Quality - 2a. Ed. – McGraw – Hill, 2003.

ABNT NBR 7094. Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução – Especificação, ABNT, 2003.

MAMEDE Filho, João – Instalações Elétricas Industriais - 7a. Ed. – Rio de Janeiro:LTC, 2007.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, JR; UMANS, STEPHEN – Máquinas Elétricas – 6ª Ed. – RS: Bookman, 2006.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores Elétricos de Corrente Alternada – WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2009.

BULGARELLI, R., Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais, 08/2006. Disponível no banco digital de teses e dissertações da USP: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-01122006-134918/>

ANSI/IEEE Std. C37.2 - Standard electrical power system device function numbers and contact designations- Description, IEEE, 1996.

ANSI/IEEE Std. 37.96, IEEE Standard, Guide for AC motor protection, 2000.

CARVALHO Filho, José Maria de – Seletividade e Coordenação da Proteção em Sistemas Industriais - Itajubá – MG: Fupai, 2006.

GE Digital Energy. 469 Motor Protection System. Instruction Manual. GE Digital Energy, 2010.

MICROCHIP. PIC18F4550 Data Sheet. Microchip Technology, 2007.



OBRAS CONSULTADAS

CAMINHA, Amadeu Casal - Introdução a proteção dos sistemas elétricos - São Paulo: Edgar Blucher, 1977.

PEREIRA, Fábio - Microcontroladores PIC: Programação em C - São Paulo: Érica, 2003.

GIBELLI, G. B. ; BARBOSA, D. ; OLESKOVICZ, M. ; COURY, D. V. . Efeitos sobre a Resposta Dinâmica dos Motores de Indução Trifásicos quando da Ocorrência de Afundamentos de Tensão na Rede de Alimentação. In: VIII Conferência internacional de Aplicações Industriais, 2008, Poços de Caldas. INDUSCON 2008,

NISKIER, Julio; MACINTYRE, Archibald joseh - Instalações Elétricas - 4a. Ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CREDER, Hélio - Instalações Elétricas - 14a. Ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2000

SOARES, Itamar Fernandes. Análise das proteções de motores e proposta de um dispositivo baseado em microprocessador para proteção de motores. Jaraguá do Sul: Weg Indústrias S.A, 2000.

FILHO, Guilherme Filippo. Motor de indução. São Paulo: Érica, 2000.

DE MARROS, F. M. Estudo de Caso de Coordenação e Seletividade da Proteção Contra Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Industrial. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010

SCHNEIDER ELECTRIC. Proteção de Redes Elétricas - Guia de proteção. São Paulo - SP, 2008

SIPROTEC Multifunction Overcurrent and Motor Protection Relay 7SJ602 V 4.61 C53000-G1176-C125 Directions for Use, SIEMENS, 2000.

IEC 60255-24. Electrical Relays - Part 24. Common format for transient data Exchange (COMTRADE) for Power systems. IEC, 2001.

GE Industrial Systems - GE Multilin. 369 Motor Management Relay. Instruction Manual. Ontário - Canadá. GE Industrial Systems, 2006.

ABB. SPAM 150 C - Proteção de Motor. Manual de Utilização. ABB Relays, 1992.

NATIONAL, LM331 Precision Voltage-to-Frequency Converters Datasheet. National Semiconductors, 1997.

ST, TL074 - Low Noise J-FET Quad Operational Amplifiers Datasheet. ST Electronics - Italy, 2001.



ANEXO A – TABELA NUMÉRICA ANSI/IEEE STD. C37.2I

| Número | Descrição |
|--------|--|
| 1 | Elemento Principal |
| 2 | Função de partida / fechamento temporizado |
| 3 | Função de verificação ou interbloqueio |
| 4 | Contator principal |
| 5 | Dispositivo de interrupção |
| 6 | Disjuntor de partida |
| 7 | Relé de taxa de variação |
| 8 | Dispositivo de desconexão de energia de controle |
| 9 | Dispositivo de reversão |
| 10 | Chave de seqüência das unidades |
| 11 | Dispositivo multifunção |
| 12 | Dispositivo de sobrevelocidade |
| 13 | Dispositivo de rotação síncrona |
| 14 | Dispositivo de subvelocidade |
| 15 | Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade ou freqüência |
| 16 | Dispositivo de comunicação de dados |
| 17 | Chave de derivação ou descarga |
| 18 | Dispositivo de aceleração ou desaceleração |
| 19 | Contador de transição partida-marcha |
| 20 | Válvula operada eletricamente |
| 21 | Relé de distância |
| 22 | Disjuntor equalizador |
| 23 | Dispositivo de controle de temperatura |
| 24 | Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz |
| 25 | Relé de verificação de sincronismo ou sincronização |
| 26 | Dispositivo térmico do equipamento |
| 27 | Relé de subtensão |
| 28 | Detector de chamas |
| 29 | Contator ou chave de isolamento |
| 30 | Relé anunciador |
| 31 | Separação de excitação |
| 32 | Relé direcional de potência |
| 33 | Chave de posicionamento |
| 34 | Chave de seqüência operada por motor |
| 35 | Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores |
| 36 | Dispositivo de polaridade |
| 37 | Relé de subcorrente ou subpotência |



| | |
|----|---|
| 38 | Dispositivo de proteção de mancal |
| 39 | Monitor de condição mecânica |
| 40 | Dispositivo de proteção de mancal |
| 41 | Disjuntor de campo |
| 42 | Disjuntor de operação normal |
| 43 | Dispositivo de transferência manual |
| 44 | Relé de seqüência de partida |
| 45 | Monitor de condição atmosférica anormal |
| 46 | Relé de desbalanceamento de corrente de fase ou de fase reversa |
| 47 | Relé de seqüência de fase de tensão ou de desbalanço de tensão |
| 48 | Relé de seqüência incompleta / partida longa |
| 49 | Relé térmico de máquina ou transformador |
| 50 | Relé de sobrecorrente instantâneo |
| 51 | Relé de sobrecorrente temporizado |
| 52 | Disjuntor de corrente alternada |
| 53 | Relé para excitação de campo |
| 54 | Dispositivo para engate |
| 55 | Relé de fator de potência |
| 56 | Relé de aplicação de campo |
| 57 | Dispositivo de aterramento ou curto-circuito |
| 58 | Relé de falha de retificação |
| 59 | Relé de sobretensão |
| 60 | Relé de desbalanço de corrente ou tensão |
| 61 | Sensor ou chave de densidade |
| 62 | Relé temporizador |
| 63 | Relé de pressão de gás (Buchholz) |
| 64 | Relé de proteção de terra |
| 65 | Regulador |
| 66 | Relé de supervisão do número de partidas |
| 67 | Relé direcional de sobrecorrente |
| 68 | Relé de bloqueio por oscilação de potência |
| 69 | Dispositivo de controle permissivo |
| 70 | Reostato |
| 71 | Dispositivo de detecção de nível de líquidos |
| 72 | Disjuntor de corrente contínua |
| 73 | Contator de resistência de carga |
| 74 | Relé de alarme |
| 75 | Mecanismo de mudança de posição |
| 76 | Relé de sobrecorrente CC |
| 77 | Dispositivo de telemetria |



| | |
|---------|--|
| 78 | Relé de medição de ângulo de fase |
| 79 | Relé de religamento |
| 80 | Chave de fluxo |
| 81 | Relé de sub/sobrefrequência |
| 82 | Relé de religamento CC |
| 83 | Relé de seleção / Transferência automática |
| 84 | Mecanismo de operação |
| 85 | Relé receptor de sinal de telecomunicação/ relé a fio-piloto |
| 86 | Relé auxiliar de bloqueio |
| 87 | Relé de proteção diferencial |
| 88 | Motor auxiliar ou motor gerador |
| 89 | Chave seccionadora |
| 90 | Dispositivo de regulação |
| 91 | Relé direcional de tensão |
| 92 | Relé direcional de tensão e potência |
| 93 | Contator de variação de campo |
| 94 | Relé de desligamento |
| 95 a 99 | - usado para aplicações específicas |



APÊNDICE A – FIRMWARE



```
#include <18F4550.h>
#include <math.h>
#include <lcd.c>
#device adc=8
#FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT128 //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES HS //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#FUSES BROWNOUT_NOSL //Brownout enabled during operation,
disabled during SLEEP
#FUSES BROWNOUT //Reset when brownout detected
#FUSES BORV20 //Brownout reset at 2.0V
#FUSES NOPUT //No Power Up Timer
#FUSES NOCPD //No EE protection
#FUSES STVREN //Stack full/underflow will cause reset
#FUSES NODEBUG //No Debug mode for ICD
#FUSES LVP //Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18)
#FUSES NOWRT //Program memory not write protected
#FUSES NOWRTD //Data EEPROM not write protected
#FUSES IESO //Internal External Switch Over mode enabled
#FUSES FCMEN //Fail-safe clock monitor enabled
#FUSES PBADEN //PORTB pins are configured as analog input
channels on RESET
#FUSES NOWRTC //configuration not registers write protected
#FUSES NOWRTB //Boot block not write protected
#FUSES NOEBTR //Memory not protected from table reads
#FUSES NOEBTRB //Boot block not protected from table reads
#FUSES NOCPB //No Boot Block code protection
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES LPT1OSC //Timer1 configured for low-power operation
#FUSES NOXINST //Extended set extension and Indexed Addressing
mode disabled (Legacy mode)
#FUSES PLL1 //No PLL PreScaler
#use delay(clock=8000000)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)

#define MODE PIN_B0
#define DOWN PIN_B1
#define UP PIN_B2
#define SELECT PIN_B3

float t,
tensao1,
corrente1,
tensao2,
corrente2,
tensao3,
corrente3,
frequencia,
leitura_tensao1,
leitura_corrente1,
leitura_tensao2,
leitura_corrente2,
leitura_tensao3,
```



```
leitura_corrente3,
leitura_frequencia,
sobretensao_parametrizada=240,
subtensao_parametrizada=00,
corrente_parametrizada=1,
sobrefrequencia_parametrizada=200,
subfrequencia_parametrizada=0;

void main()
{
    int ten;
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN7|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_OFF);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(FALSE);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    setup_low_volt_detect(FALSE);
    setup_oscillator(False);
    lcd_init();

    setup_adc( ADC_CLOCK_INTERNAL );

    while ( true)
    {
        printf(lcd_putc,"\fPROTECAO MOTOR");
        set_adc_channel(0); //lê canal 0 do AD - tensão V1
        delay_us(10);
        leitura_tensao1 = read_adc(); //joga valor do AD para variável tensao1
        tensao1=leitura_tensao1*1.222222222;

        set_adc_channel(1); //lê canal 1 do AD - tensão V2
        delay_us(10);
        leitura_tensao2 = read_adc(); //joga valor do AD para variável tensao2
        tensao2=leitura_tensao2*1.222222222;

        set_adc_channel(2); //lê canal 2 do AD - tensão V3
        delay_us(10);
        leitura_tensao3 = read_adc(); //joga valor do AD para variável tensao3
        tensao3=leitura_tensao3*1.222222222;

        set_adc_channel(3); //lê canal 3 do AD - corrente I1
        delay_us(10);
        leitura_corrente1 = read_adc(); //joga valor do AD para variável corrente1
        corrente1= leitura_corrente1*0.01947;

        set_adc_channel(4); //lê canal 4 do AD - corrente I2
        delay_us(10);
        leitura_corrente2 = read_adc(); //joga valor do AD para variável corrente2
        corrente2= leitura_corrente2*0.00153;
```



```
set_adc_channel(5); //lê canal 5 do AD - corrente I3
delay_us(10);
leitura_corrente3 = read_adc(); //joga valor do AD para variável corrente2
corrente3= leitura_corrente3*0.00153;

set_adc_channel(6); //lê canal 6 do AD - frequência
delay_us(10);
leitura_frequencia = read_adc(); //joga valor do AD para variável frequencia
frequencia=leitura_frequencia*1.137;

printf(lcd_putc,"\nV=%1.0fI=%1.1fF=%1.0f ", tensao1, corrente1, frequencia);
delay_ms(100);

////COMPARAÇÃO VALORES SETADOS E VALORES MEDIDOS PARA DESLIGAMENTO//

if(corrente1>=corrente_parametrizada) //Atuação Sobrecorrente
{
    t=(0.14/((corrente1/0.1)*exp(0.02)-1))*0.1*1000;
    delay_ms(t);
    set_adc_channel(3); //lê canal 3 do AD - corrente I1
    delay_us(10);
    leitura_corrente1 = read_adc(); //joga valor do AD para variável corrente1
    corrente1= leitura_corrente1*0.01947;

    if(corrente1>=corrente_parametrizada) //Atuação Sobrecorrente
    {
        printf(lcd_putc,"\f TRIP\n SOBRECORRENTE");
        output_high(PIN_B4); //aciona circuito de desligamento
        delay_ms(50);
        while(input(MODE)==1)
        {

        }
    }
}
else
{
    if(tensao1>=sobretensao_parametrizada)
    {
        printf(lcd_putc,"\f TRIP\n SOBRETENSAO");
        output_high(PIN_B4); //aciona circuito de desligamento
        delay_ms(50);
        while(input(MODE)==1)
        {

        }
    }
}
else
{
    if(tensao1<=subtensao_parametrizada)
    {
        printf(lcd_putc,"\f TRIP\n SUBTENSAO");
        output_high(PIN_B4); //aciona circuito de desligamento
```



```
    delay_ms(50);
    while(input(MODE)==1)
    {

    }
}
else
{
if(frequencia>=sobrefrequencia_parametrizada)
{
    printf(lcd_putc, "\f   TRIP\nSOBREFREQUENCIA");
    output_high(PIN_B4);           //aciona contactora
    delay_ms(50);
    while(input(MODE)==1)
    {

    }
}
else
{
if(frequencia<=subfrequencia_parametrizada)
{
    printf(lcd_putc, "\f   TRIP\n SUBFREQUENCIA");
    output_high(PIN_B4);           //aciona contactora
    delay_ms(50);
    while(input(MODE)==1)
    {

    }
}
}
}
}

//////////LÓGICA DE AJUSTE DOS PARÂMETROS//////////

if(input(MODE)==0)
{
    ten=1;
    while(ten==1)
    {
        printf(lcd_putc, "\fSOBRECORRENTE");
        printf(lcd_putc, "\nI=%1.1f", corrente_parametrizada);
        delay_ms(50);

        if(input(UP)==0)           //se tecla UP pressionada incrementa 1 volt
        {
            corrente_parametrizada= corrente_parametrizada+0.05;
            printf(lcd_putc, "\fSOBRECORRENTE");
            printf(lcd_putc, "\nI=%1.1f", corrente_parametrizada);
            delay_ms(50);
        }
        else
        {
```



```
    if (input(DOWN)==0)    //se tecla DOWN pressionada decrementa 1 volt
    {
        corrente_parametrizada= corrente_parametrizada-0.05;
        printf(lcd_putc,"\fSOBRECORRENTE");
        printf(lcd_putc,"\nI=%1.1f", corrente_parametrizada);
        delay_ms(50);
    }
}
        if(input(SELECT)==0) //Se tecla SELECT pressionada entra na
                                parametrização de SOBRETENSÃO
{
    delay_ms(50);
    ten=2;
    delay_ms(50);
}
}
while(ten==2)
{
    printf(lcd_putc,"\fSOBRETENSAO");
    printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", sobretensao_parametrizada);
    delay_ms(50);

    if(input(UP)==0)    //se tecla UP pressionada incrementa 1 volt
    {
        sobretensao_parametrizada= sobretensao_parametrizada+1;
        printf(lcd_putc,"\fSOBRETENSAO");
        printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", sobretensao_parametrizada);
        delay_ms(50);
    }
    else
    {
        if (input(DOWN)==0)    //se tecla DOWN pressionada decrementa 1 volt
        {
            sobretensao_parametrizada= sobretensao_parametrizada-1;
            printf(lcd_putc,"\fSOBRETENSAO");
            printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", sobretensao_parametrizada);
            delay_ms(50);
        }
    }
}
if(input(SELECT)==0) //Se tecla SELECT pressionada entra na
                        parametrização de SUBTENSÃO
{
    delay_ms(50);
    ten=3;
    delay_ms(50);
}
}
while(ten==3)
{

    printf(lcd_putc,"\fSUBTENSAO");
    printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", subtensao_parametrizada);
    delay_ms(50);
```



```
if(input(UP)==0) //se tecla UP pressionada incrementa 1 volt
{
    subtensao_parametrizada= subtensao_parametrizada+1;
    printf(lcd_putc,"\fSUBTENSÃO");
    printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", subtensao_parametrizada);
    delay_ms(50);
}
else
{
    if (input(DOWN)==0) //se tecla DOWN pressionada decrementa 1 volt
    {
        subtensao_parametrizada= subtensao_parametrizada-1;
        printf(lcd_putc,"\fSOBRETENSÃO");
        printf(lcd_putc,"\nV=%1.0f", subtensao_parametrizada);
        delay_ms(50);
    }
}

if(input(SELECT)==0) //Se tecla SELECT pressionada entra na
                    parametrização de SOBREFREQUENCIA
{
    delay_ms(50);
    ten=4;
    delay_ms(50);
}
}
while(ten==4)
{
    printf(lcd_putc,"\fSOBREFREQUENCIA");
    printf(lcd_putc,"\nF=%1.0f", sobrefrequencia_parametrizada);
    delay_ms(50);

    if(input(UP)==0) //se tecla UP pressionada incrementa 1 volt
    {
        sobrefrequencia_parametrizada= sobrefrequencia_parametrizada+0.5;
        printf(lcd_putc,"\fSOBREFREQUENCIA");
        printf(lcd_putc,"\nF=%1.0f", sobrefrequencia_parametrizada);
        delay_ms(50);
    }
    else
    {
        if (input(DOWN)==0) //se tecla DOWN pressionada decrementa 1 volt
        {
            sobrefrequencia_parametrizada= sobrefrequencia_parametrizada-0.5;
            printf(lcd_putc,"\fSOBREFREQUENCIA");
            printf(lcd_putc,"\nF=%1.0f", sobrefrequencia_parametrizada);
            delay_ms(50);
        }
    }
    if(input(SELECT)==0) //Se tecla SELECT pressionada entra na
    parametrização de SOBREFREQUENCIA
    {
        ten=5;
        delay_ms(50);
    }
}
```




```
    }
  }
  while(ten==5)
  {
    printf(lcd_putc, "\fSUBFREQUENCIA");
    printf(lcd_putc, "\nF=%1.0f", subfrequencia_parametrizada);
    delay_ms(50);

    if(input(UP)==0) //se tecla UP pressionada incrementa 1 volt
    {
      subfrequencia_parametrizada= subfrequencia_parametrizada+0.5;
      printf(lcd_putc, "\fSUBFREQUENCIA");
      printf(lcd_putc, "\nF=%1.0f", subfrequencia_parametrizada);
      delay_ms(50);
    }
    else
    {
      if (input(DOWN)==0) //se tecla DOWN pressionada decrementa 1 volt
      {
        subfrequencia_parametrizada= subfrequencia_parametrizada-0.5;
        printf(lcd_putc, "\fSUBFREQUENCIA");
        printf(lcd_putc, "\nF=%1.0f", subfrequencia_parametrizada);
        delay_ms(50);
      }
    }
  }
  if(input(SELECT)==0) //Se tecla SELECT pressionada sai do modo de
                        configuração
  {
    ten=0;
    delay_ms(50);
    while(corrente1<=0.2)
    {
      output_high(PIN_B4);
      printf(lcd_putc, "\fSTANDBY");
      delay_ms(50);
      set_adc_channel(3); //lê canal 3 do AD - corrente I1
      delay_us(10);
      leitura_corrente1 = read_adc(); //joga valor do AD para corrente1
      corrente1= leitura_corrente1*0.02147;
    }
    delay_ms(2000);
  }
}
}
}
```



APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO

