



**SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO BASEADO EM  
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E BOMBAS CENTRÍFUGAS  
COMERCIAIS UTILIZANDO CONTROLE FUZZY EXTERNO  
COM TENSÃO FIXA**

**Wanderley Sena dos Santos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - Mestrado Profissional do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, PPGEP/ITEC/UFPA, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientadores: Wilson Negrão Macêdo  
Alaan Ubaiara Brito

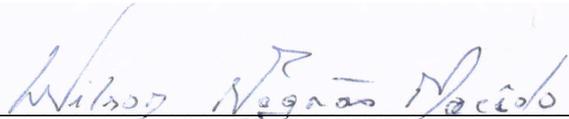
Belém  
Março de 2016

**SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBAMENTO BASEADO EM  
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E BOMBAS CENTRÍFUGAS  
COMERCIAIS UTILIZANDO CONTROLE FUZZY EXTERNO COM TENSÃO  
FIXA**

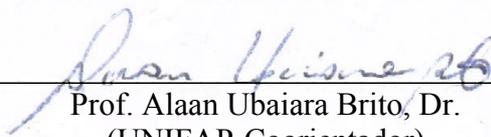
Wanderley Sena dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS - MESTRADO  
PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ,  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



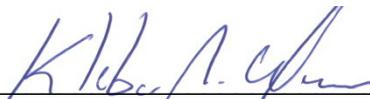
Prof. Wilson Negrão Macêdo, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



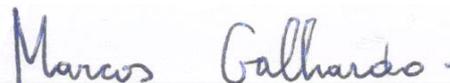
Prof. Alaán Ubaiara Brito, Dr.  
(UNIFAP-Coorientador)



Prof. Clauderino da Silva Batista, D.Eng.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. Kleber Bittencourt Oliveira, D.Eng.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. Marcos André Barros Galhardo, Dr.  
(FEE/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL  
MARÇO DE 2016

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Santos, Wanderley Sena dos, 1967-

Sistema fotovoltaico de bombeamento baseado em conversores de frequência e bombas centrífugas comerciais utilizando controle fuzzy externo com tensão fixa / Wanderley Sena dos Santos. - 2016.

Orientador: Wilson Negrão Macêdo;  
Coorientador: Alaan Ubaiara Brito.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2016.

1. Energia solar-Testes. 2. Lógica fuzzy. 3. Geração de energia fotovoltaica-Testes. 4. Controladores programáveis-Testes. I. Título.

CDD 22. ed. 621.47

---

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Andréa e à minha filha Bruna pela paciência, atenção e apoio.

Ao professor Dr. Emanuel Negrão Macêdo pela oportunidade.

Ao meu orientador professor Dr. Wilson Negrão Macêdo pelo incentivo, estímulo e parceria em todos os momentos.

Ao amigo Francisco José Rio Barbosa - chefe do Departamento de Informática/Div. Apoio ao Usuário do Ministério Público do Estado, pela compreensão.

Aos colegas do GEDAE pelo acolhimento e ajuda, em especial a Jéssica Fonseca e aos professores Marcos Galhardo e Hallan Souza pela inestimável colaboração.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

**SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO BASEADO EM  
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E BOMBAS CENTRÍFUGAS  
COMERCIAIS UTILIZANDO CONTROLE FUZZY EXTERNO COM TENSÃO  
FIXA**

**Wanderley Sena dos Santos**

Março/2016

Orientadores: Wilson Negrão Macêdo

Alaan Ubaiara Brito

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Este trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de um controlador baseado em lógica *fuzzy* capaz de manter estável o nível de tensão do barramento CC de um conversor de frequência (CF) de uso comercial usado para acoplar geradores fotovoltaicos a motobombas centrífugas comerciais para fins de bombeamento de água. O sistema opera em malha fechada e a regulação da tensão do barramento CC é feita indiretamente através da variação da velocidade da motobomba de acordo com a potência disponibilizada pelo gerador fotovoltaico. O objetivo é fazer com que o gerador trabalhe em uma tensão fixa, correspondente a tensão do ponto de máxima potência ou bem próxima, a fim de maximizar a eficiência e prevenir desarmes do sistema por erros de subtensão no circuito intermediário do CF. O algoritmo de controle foi embarcado em um microcontrolador PIC de uso geral e avaliações do desempenho do controlador foram efetuadas através de ensaios experimentais realizados em uma bancada que permite simular poços de diferentes profundidades. Os resultados experimentais mostraram que o controlador teve o comportamento esperado, pois manteve a tensão do barramento CC estável, próximo a tensão do ponto de máxima potência, durante todo o ciclo de bombeamento mesmo ocorrendo mudanças drásticas na disponibilidade de potência fornecida pelo gerador fotovoltaico.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

**SYSTEM PHOTOVOLTAIC PUMPING BASED VARIABLE-SPEED DRIVE  
AND CENTRIFUGAL PUMPS COMERCIAL USING EXTERNAL CONTROL  
FUZZY WITH FIXED VOLTAGE**

Wanderley Sena dos Santos

March/2016

Advisors: Wilson Negrão Macêdo

Alaan Ubaiara Brito

Research Area: Process Engineering

This work proposes the development and implementation of a controller based on fuzzy logic, capable of maintain stable the voltage level at the dc bus of a commercial variable-speed drive (VSD) used to couple photovoltaic generators to commercial centrifugal motor pumps for water pumping purposes. The system operates in closed loop and the dc bus voltage regulation is made indirectly through the variation of the motor pump speed according to the power available from the photovoltaic generator. The goal is to get the generator to work on a fixed voltage corresponding to the maximum power point voltage level, or very close to it, in order to maximize efficiency and prevent the disarming of the system by under voltage errors in the intermediate circuit of the FC. The control algorithm was embedded in a general use PIC microcontroller and performance evaluations were performed by experimental tests on a bench that simulates water wells with different depths. The experimental results showed that the controller presented an expected behave since it maintained a stable voltage at the dc bus, close to the maximum power point voltage, throughout the entire pumping cycle even under drastic changes in the power available from the photovoltaic generator.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO.....	3
1.2 - PROBLEMA E HIPÓTESE DE PESQUISA.....	4
1.3 - OBJETIVOS.....	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
2.1 - SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO BASEADOS EM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E MOTOBOMBAS CONVENCIONAIS.....	6
2.1.1 - Configuração Básica.....	6
2.1.2 - Caracterização Elétrica de Módulos e Geradores Fotovoltaicos.....	8
2.1.2.1 - Célula, Módulo e Gerador Fotovoltaico.....	8
2.1.2.2 - Curva Característica I-V.....	12
2.1.2.3 - Influência da Temperatura e Irradiância.....	14
2.1.2.4 - Característica da Carga e Acoplamento Direto.....	15
2.1.3 - Conversor de Frequência.....	19
2.1.3.1 - Conversores de Frequência Monofásicos.....	20
2.1.4 - Bomba Centrífuga.....	22
2.2 - CONTROLE <i>FUZZY</i> .....	26
2.2.1 - Metodologia de Modelagem Convencional Comparada ao Controle <i>Fuzzy</i> .....	26
2.2.2 - Controlador <i>Fuzzy</i> Baseado em Regras.....	27
2.2.3 - Projeto de Controladores <i>Fuzzy</i> .....	28
2.2.4 - Lógica <i>Fuzzy</i> .....	29
2.2.4.1 - Pertinência <i>Fuzzy</i> .....	29
2.2.4.2 - Variáveis Linguísticas.....	32
2.2.4.3 - Operações entre Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	33
2.2.4.3.1 - Intersecção de Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	33
2.2.4.3.2 - União de Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	34
2.2.4.4 - Fuzzificação.....	34

2.2.4.5 - Regras de Produção Fuzzy.....	35
2.2.4.6 - Método de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	36
2.2.4.7 - Defuzzificação.....	38
2.2.4.8 - Vantagens e Desvantagens.....	39
2.2.4.8.1 - Vantagens.....	39
2.2.4.8.2 - Desvantagens.....	39
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE SOLUÇÃO.....</b>	<b>40</b>
3.1 - INTRODUÇÃO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> NA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOBEAMENTO.....	40
3.2 - ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS.....	41
3.2.1 - Escolha da Motobomba.....	41
3.2.2 - Escolha do Conversor de Frequência Monofásico.....	41
3.2.3 - Potência do Gerador.....	42
3.3 - PARAMETRIZAÇÃO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	44
3.4 - CONTROLADOR <i>FUZZY</i> PROPOSTO.....	46
3.4.1 - Concepção.....	46
3.4.2 - Projeto.....	49
3.4.2.1 - A Base de Regras de Inferência.....	53
3.4.2.2 - Método de Defuzzificação.....	56
3.5 - O SISTEMA EMBARCADO.....	57
3.5.1 - Tratamento de Erros por Subtensão no Circuito Intermediário do CF.....	58
3.6 - FERRAMENTAS PARA O TESTE OPERACIONAL.....	61
3.6.1 - Maleta de Testes.....	61
3.6.1.1 - Placas de Desenvolvimento.....	62
3.6.1.2 - Placa de Aquisição de Dados.....	63
3.6.1.3 - Placas de <i>Buffers</i> .....	63
3.6.1.4 - Fonte de Alimentação.....	63
3.6.1.5 - Gravador de Microcontrolador PIC.....	65
3.6.1.6 - Sensor de Tensão.....	65
3.6.2 - Pacote de <i>Software</i> .....	66
3.6.3 - Bancada de Ensaio.....	66

<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>68</b>
4.1 - AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> EM RELAÇÃO AO PID..	75
4.2 - ESTRATÉGIAS PARA DIMINUIR A OPERAÇÃO DESNECESSÁRIA DA MOTOBOMBA.....	82
4.2.1 - Condição Mínima de Tensão FV para a Motobomba entrar em Operação.....	82
4.2.2 - Parada da Moto bomba quando não for Detectado Fluxo de Bombeamento.....	84
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>87</b>
5.1 - CONCLUSÕES.....	87
5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Bombeamento fotovoltaico utilizando CF.....	6
<b>Figura 2.2</b>	(a) Diagrama de blocos de um controlador PID em malha fechada; (b) Aplicação para o inversor (CFW-10) com regulador PID em malha fechada.....	7
<b>Figura 2.3</b>	Célula, módulo e gerador fotovoltaico.....	9
<b>Figura 2.4</b>	Modelo com um diodo de um dispositivo fotovoltaico.....	9
<b>Figura 2.5</b>	Curva $I \times V$ característica de um dispositivo fotovoltaico e seus pontos mais usuais.....	12
<b>Figura 2.6</b>	Curvas corrente tensão para o módulo fotovoltaico policristalino S55P, fabricante Solares (a) para temperatura constante (25 °C) e diversos níveis de irradiância; (b) para irradiância constante (1000 W/m <sup>2</sup> ) e diversas condições de temperatura.....	14
<b>Figura 2.7</b>	Curvas potência tensão para o módulo fotovoltaico policristalino S55P, fabricante Solares (a) para temperatura constante (25 oC) e diversos níveis de irradiância; (b) para irradiância constante (1000 W/m <sup>2</sup> ) e diversas condições de temperatura.....	15
<b>Figura 2.8</b>	Gerador fotovoltaico conectado diretamente a uma carga resistiva.....	16
<b>Figura 2.9</b>	Curvas I-V para o gerador fotovoltaico e várias cargas resistivas.....	17
<b>Figura 2.10</b>	Curvas tensão corrente para o módulo fotovoltaico S55P e seus respectivos pontos de máxima potência: (a) para temperatura constante (25 °C) e vários níveis de irradiância; (b) para irradiância constante (1000 W/m <sup>2</sup> ) e diversas condições de temperatura.....	17
<b>Figura 2.11</b>	Diagrama de blocos de um conversor de frequência.....	19
<b>Figura 2.12</b>	Diagrama de blocos do circuito de potência do inversor CFW-10, monofásico, modelo 110-127 V, com um dobrador de tensão na entrada.....	21

<b>Figura 2.13</b>	Diagrama de blocos do circuito de potência do inversor CFW-10, monofásico, modelo 200-240 V, com um retificador na entrada.....	21
<b>Figura 2.14</b>	Curva altura manométrica versus vazão e eficiência versus vazão para a motobomba Schneider SUB 15 -0,5 cv.....	24
<b>Figura 2.15</b>	Exemplo de curvas H-Q (nas frequências de 60 Hz e 50 Hz) e curvas de iso-rendimento (parábolas) para a bomba centrífuga Schneider modelo SUB 15-0,5 cv a partir de dados do fabricante, aplicando as leis de semelhança.....	24
<b>Figura 2.16</b>	Curvas H-Q para diferentes frequências (50 Hz, 56 Hz e 60 Hz); curva de rendimento para a frequência de 60 Hz; parábolas de iso-rendimento para diversos rendimentos (18,8 %, 38 % e 54 %) e linha pontilhada, para altura manométrica de 31 mca, indicando os pontos de operação.....	25
<b>Figura 2.17</b>	Identificação da dinâmica do processo ou planta.....	26
<b>Figura 2.18</b>	Identificação do comportamento do operador de controles.....	27
<b>Figura 2.19</b>	Arquitetura de um controlador <i>fuzzy</i> .....	27
<b>Figura 2.20</b>	Conjuntos idade: (a) abordagem booleana; (b) abordagem <i>fuzzy</i> .....	30
<b>Figura 2.21</b>	Função de pertinência triangular.....	31
<b>Figura 2.22</b>	Função de pertinência trapezoidal.....	31
<b>Figura 2.23</b>	Função de pertinência <i>singleton</i> .....	32
<b>Figura 2.24</b>	Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas.....	32
<b>Figura 2.25</b>	Variável temperatura e suas respectivas funções de pertinência no seu universo de discurso (0 a 100 °C).....	33
<b>Figura 2.26</b>	Exemplo de intersecção de conjuntos <i>fuzzy</i> .....	34
<b>Figura 2.27</b>	Exemplo de união de conjuntos <i>fuzzy</i> .....	34
<b>Figura 2.28</b>	Exemplo de fuzzificação do número discreto +12.....	35
<b>Figura 2.29</b>	Sistema usando inferência máx-mín.....	37
<b>Figura 2.30</b>	Defuzzificação pelo Centro-do-Máximo.....	38

<b>Figura 3.1</b>	Bombeamento fotovoltaico utilizando CF e controlador <i>fuzzy</i> externo.....	40
<b>Figura 3.2</b>	Exemplo de curvas teóricas obtidas utilizando modelo simplificado descrito em ALONSO-ABELA <i>et al.</i> (2002) para a motobomba Schneider modelo SUB 15-0,5 cv para altura manométrica de 35 mca.....	43
<b>Figura 3.3</b>	Curvas I-V e P-V para o módulo modelo S 55P, fabricante Solares obtidas de ensaio no laboratório do GEDAE/UFPA.....	44
<b>Figura 3.4</b>	Controle humano no sistema de bombeamento.....	47
<b>Figura 3.5</b>	Gerador fotovoltaico alimentando carga resistiva.....	47
<b>Figura 3.6</b>	Deslocamento do ponto de operação com a mudança da irradiância e variação da carga.....	48
<b>Figura 3.7</b>	Regiões de subtensão, erro positivo, erro negativo e faixa de operação do sistema.....	49
<b>Figura 3.8</b>	Distribuição das funções de pertinência no universo de discurso do variável erro.....	51
<b>Figura 3.9</b>	Distribuição das funções de pertinência no universo de discurso da variável variação do erro.....	52
<b>Figura 3.10</b>	Funções de pertinência para a variável de saída.....	53
<b>Figura 3.11</b>	Deslocamento do ponto de operação nas regiões de erro negativo e erro positivo.....	54
<b>Figura 3.12</b>	Configuração do sistema embarcado.....	57
<b>Figura 3.13</b>	Conector XC1 do inversor de frequência CFW-10.....	58
<b>Figura 3.14</b>	Esquema de ligação do filtro RC passa-baixas.....	58
<b>Figura 3.15</b>	Sinalização de erros de subtensão através de um resistor conectado ao relé interno do CF.....	59
<b>Figura 3.16</b>	Circuito para acionar as entradas digitais DI1 e DI4 programadas para ligar e resetar o CF.....	61
<b>Figura 3.17</b>	Maleta utilizada para os testes.....	62
<b>Figura 3.18</b>	Esquema elétrico da fonte de alimentação para alimentar o microcontrolador.....	64
<b>Figura 3.19</b>	Alimentação para o micro controlador com o CI 7805, exemplo com o conector do modelo ACS55 do fabricante ABB.....	65

<b>Figura 3.20</b>	Divisor de tensão utilizado como sensor para monitorar a tensão do gerador fotovoltaico.....	65
<b>Figura 3.21</b>	Bancada de ensaios: (a) Diagrama esquemático; (b) Sistema real pertencente ao laboratório do GEDAE/UFPA.....	67
<b>Figura 4.1</b>	Tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV) e irradiância.....	68
<b>Figura 4.2</b>	Tensão gerada pelo controlador <i>fuzzy</i> (T <sub>fuzzy</sub> ), tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV) e irradiância.....	69
<b>Figura 4.3</b>	Dinâmica da pressão na tubulação, vazão, potência, irradiância e tensão do gerador fotovoltaico, para as alturas manométricas de 35 e 31 mca.....	70
<b>Figura 4.4</b>	Curva da vazão versus irradiância.....	71
<b>Figura 4.5</b>	Curva da vazão versus a potência produzida pelo gerador fotovoltaico.....	72
<b>Figura 4.6</b>	Curva da eficiência versus a potência produzida pelo gerador fotovoltaico. ....	73
<b>Figura 4.7</b>	Volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo gerador fotovoltaico.....	74
<b>Figura 4.8</b>	Tensão medida do gerador fotovoltaico (Tensão FV), tensão de máxima potência calculada (Tensão MP - Calculada), potência medida do gerador fotovoltaico (Potência FV) e máxima potência calculada (MP - Calculada).....	75
<b>Figura 4.9</b>	Nível de tensão do gerador fotovoltaico (tensão FV) com muitas variações bruscas, indicando bloqueio do CF por erros de subtensão.....	76
<b>Figura 4.10</b>	Tempos de resposta para o sistema com os controladores fuzzy e PID.....	77
<b>Figura 4.11</b>	Avaliação experimental entre as dinâmicas do SFB com PID e <i>fuzzy</i> : perfis de irradiância, geração FV, vazão e eficiência do conjunto motobomba mais CF.....	78
<b>Figura 4.12</b>	Avaliação experimental entre as dinâmicas do SFB com PID e fuzzy: comparação entre os valores de Tensão e Potência medidos (Tensão FV e Potência FV) e teóricos (Tensão MP Calculada e MP calculada) .....	79

<b>Figura 4.13</b>	Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador <i>fuzzy</i> : períodos da manhã e tarde.....	80
<b>Figura 4.14</b>	Efeitos do nível de tensão DC de entrada no CF. Quando a tensão decresce de 220 V para 207 V os efeitos de sobremodulação causam diminuição da vazão. Dados para altura manométrica de 30,2 mca.....	81
<b>Figura 4.15</b>	Períodos onde a motobomba permanece em repouso para o sistema com o procedimento de tensão mínima ativado.....	83
<b>Figura 4.16</b>	Início da operação para o sistema com o procedimento de tensão mínima desativado.....	83
<b>Figura 4.17</b>	Efeitos decorrentes da parada da motobomba quando não há bombeamento.....	85
<b>Figura 4.18</b>	Dinâmica da irradiância, vazão e tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV).....	86
<b>Figura 4.19</b>	Gráficos para vazão e eficiência com as estratégias para diminuir o desgaste do equipamento ativadas.....	86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Características nominais extraídas da folha de dados do fabricante.....	11
<b>Tabela 2.2</b>	Coefficientes de variação de parâmetros elétricos em função da temperatura para os módulos comerciais.....	18
<b>Tabela 3.1</b>	Parâmetros do módulo (extraídos da folha de dados do fabricante) e gerador fotovoltaico.....	43
<b>Tabela 3.2</b>	Parametrização para o inversor.....	45
<b>Tabela 3.3</b>	Base de regras.....	56
<b>Tabela 3.4</b>	Características (extraídas da folha de dados do fabricante) dos microcontroladores PIC 18F4550 e 18F2550.....	63
<b>Tabela 3.5</b>	Relação de fabricantes e seus modelos de CFs com suas fontes de alimentação auxiliares (informações extraídas da folha de dados dos fabricantes).....	64
<b>Tabela 3.6</b>	Dispositivos utilizados para aquisição de dados.....	67

## NOMENCLATURA

$a$	Fator de idealidade modificado
AC	<i>Alternating current</i> (Corrente alternada)
AII	Entrada analógica
B	Bomba
CC	Corrente contínua
CF	Conversor de frequência
CI	Circuito integrado
C-o-A	Centro-da-Área
C-o-M	Centro-do-Máximo
CPU	Unidade Central de Processamento
DC	<i>Direct current</i> (Corrente contínua)
dD	Incremento do ciclo de trabalho
de	Variação do erro
DI	Entrada digital
e	Erro
E(S)	Sinal de erro
$E_g$	Energia da banda proibida
$f_T$	Frequência
FF	Fator de forma
G(S)	Planta de controle
G	Irradiância
$g$	Aceleração da gravidade
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GFV	Gerador fotovoltaico
H(S)	Elemento de realimentação
H	Altura manométrica
HSP	horas de sol pleno
I	Corrente
$I_c$	Irradiância crítica
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)

IHM	Interface Homem Máquina
$I_L$	Corrente de iluminação, ou fotogerada
$I_0$	Corrente de saturação reversa do diodo
$I_{MP}$	Corrente de máxima potência
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito
k	Constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
$K_I$	Coefficiente de temperatura da corrente
Kp	Ganho proporcional
M	Motor
mca	Metros de coluna d'água
M-o-M	Média-do-Máximo
MPP	<i>Maximum power point</i> (Ponto de máxima potência)
n	Fator de idealidade do diodo
N	Velocidade de rotação da bomba
Ns	Número de células em série
NB	<i>Negative Big</i> (Negativo Grande)
NM	<i>Negative Medium</i> (Negativo Médio)
NOCT	<i>Nominal Operation Cell Temperature</i> (Temperatura Nominal de Operação da Célula)
NS	<i>Negative Small</i> (Negativo Pequeno)
P	Potência
$P_B$	Potência da bomba
$P_m$	Potência do motor
$P_{MP}$	Máxima potência de pico
PB	<i>Positive Big</i> (Positivo Grande)
PID	Proporcional Integral e Derivativo
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador Lógico Programável)
PM	<i>Positive Medium</i> (Positivo Médio)
PS	<i>Positive Small</i> (Positivo Pequeno)
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
q	Carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$ coulomb)
Q	Vazão
r	Referência

$R_L$	Resistencia de carga
$R_S$	Resistência em série
$R_{Sh}$	Resistência em paralelo (ou shunt)
RC	Resistor capacitor
RL1	Relé do conversor de frequência
SFB	Sistema fotovoltaico de bombeamento
SPMP	Seguimento do ponto de máxima potência
T	Temperatura
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_c$	Temperatura da célula
Td	Ganho derivativo
Ti	Ganho integral
UFPA	Universidade Federal do Pará
V	Tensão
V <sub>cc</sub>	Tensão em corrente contínua
$V_{FV}, V_{FV}(k)$	Tensão fotovoltaica
$V_{MP}$	Tensão de máxima potência
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
$V_{SP}(k)$	Tensão de set-point
$V_{ST}$	Tensão mínima permitida para o barramento do Conversor de Frequência
$V_{BCC}$	Tensão de barramento CC do CF
W	Watt
$W_P$	Watt pico
X(S)	Sinal de referência
XC1	Conector do conversor de frequência
Y(S)	Sinal de saída
ZE	<i>Zero</i>
$z^{-1}$	Operador de atraso unitário
$\alpha, K_I$	Coefficiente de temperatura de $I_{SC}$
$\beta, K_V$	Coefficiente de temperatura de $V_{OC}$
$\gamma_{MP}$	Coefficiente de temperatura do ponto de máxima potência
$\Delta_T$	Diferença de temperatura
$\Delta I_{SC}$	Variação da corrente de curto-circuito

$\Delta V_{OC}$	Varição da tensão de circuito aberto
$\eta_B$	Rendimento da bomba
$\eta_m$	Rendimento do motor
$\rho$	Massa específica da água.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A água está no centro do desenvolvimento sustentável. Os recursos hídricos, e a gama de serviços providos por esses recursos, contribuem para a redução da pobreza, para o crescimento econômico e para a sustentabilidade ambiental. O acesso ao abastecimento de água de uso doméstico é fundamental para a saúde familiar e a dignidade social (UNESCO, 2015). No entanto, de acordo com o Relatório das Nações Unidas em 2015, 748 milhões de pessoas ainda não têm acesso a fontes de água potável de qualidade (UNESCO, 2015).

Os problemas relacionados ao acesso à água potável não ocorrem somente nas zonas com reduzido recurso hídrico. Um dos principais problemas das populações ribeirinhas da Amazônia, por exemplo, é a baixa qualidade de suas águas para consumo humano, tendo consequência direta na saúde de sua população, principalmente da população infantil e idosa. Além da qualidade do recurso hídrico, essas populações dedicam significativa parte de seu tempo ao transporte de água para consumo e uso doméstico. O acesso à energia de outras fontes que não a tração humana é muito restrito, principalmente nas regiões de várzea, onde nem animais de montaria podem ser utilizados, devido às características de alagamento do solo por vários meses do ano (FEDRIZZI, 2003).

Por se tratar de regiões remotas em que a energia elétrica convencional tem baixa penetração e reduzida probabilidade de chegar, e onde os combustíveis fósseis são caros e de difícil acesso, alternativas tecnológicas como a opção solar fotovoltaica se tornam uma realidade viável (FEDRIZZI, 2003).

A energia solar fotovoltaica (FV) é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (GTES, 2014).

O aproveitamento da energia solar para produção direta de eletricidade teve início há pouco mais de 160 anos quando, em 1839, o cientista francês Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico ao observar, em um experimento com uma

célula eletrolítica (dois eletrodos metálicos dispostos em uma solução condutora), que a geração de eletricidade aumentava quando a célula era exposta à luz. A partir daí, foram estudados os comportamentos de diversos materiais expostos à luz até que, no ano de 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson desenvolveram a primeira célula fotovoltaica de silício, com eficiência de 6%, capaz de converter energia solar em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos. No ano de 1958, iniciou-se a utilização de células fotovoltaicas em aplicações espaciais e até hoje essa fonte é reconhecida como a mais adequada para essas aplicações, evidenciando sua confiabilidade (PINHO *et al.*, 2008).

O custo das células fotovoltaicas é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, em razão, tanto dos seus custos decrescentes, quanto dos custos crescentes das demais formas de produção de energia, inclusive em função da internalização de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais (GTES, 2014).

Diferentemente das aplicações de energia solar para fornecimento de eletricidade para domicílios isolados da rede elétrica convencional, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento não necessitam de baterias eletrolíticas para períodos de baixa radiação solar, ao invés das baterias utilizam-se os reservatórios de água que, se bem dimensionados, suprem as necessidades em condições de baixa radiação solar durante determinado período (FEDRIZZI, 2003).

Existem poucos fabricantes de sistemas de bombeamento projetados especificamente para aplicações fotovoltaicas (MELO, 2004), esses sistemas são obtidos em forma de *kits* no mercado internacional, o que implica em sistemas constituídos por componentes importados e de difícil aquisição no mercado nacional, tornando assim a reposição das partes defeituosas um processo árduo e oneroso (BRITO, 2006).

A utilização de conversores de frequência (CF) de uso industrial, como unidade de condicionamento de potência para a operação de motores de indução trifásicos acoplados a bombas centrífugas de vários estágios é uma alternativa viável aos equipamentos desenhados especificamente para o bombeamento fotovoltaico (BRITO,

2006; BRITO e ZILLES, 2006; MELÉNDEZ, 2009; ALONSO-ABELA *et al.*, 2003) e tem como atrativo um mercado bem consolidado, elevado grau de confiabilidade, facilidade de aquisição e ampla gama de fabricantes e potências.

Fazer o conversor de frequência operar em malha fechada e sintonizar seu controlador proporcional integral derivativo (PID) interno, tendo como variável de controle a tensão do painel fotovoltaico, são pontos cruciais para otimizar a operação deste tipo de sistema (BRITO, 2006).

## 1.1 - JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO

Sistemas fotovoltaicos apresentam características não lineares e variantes com o tempo, e controladores PID são controladores automáticos que tem seu desempenho comprometido ao trabalharem com sistemas que possuem essas características, não apresentando respostas satisfatórias para condições de operação distintas das de sintonia.

Neste cenário, a utilização de controladores inteligentes baseados na lógica *fuzzy* torna-se atraente em virtude de sua capacidade em lidar com sistemas não lineares e variantes com o tempo, além de dispensarem o conhecimento do modelo matemático do sistema.

Ainda que seja mais um elemento na configuração do sistema de bombeamento, um controlador externo possibilita a utilização de alguns conversores de frequência monofásicos que não possuem controlador PID em seu *software*.

Em MARANHÃO (2015), é proposto um controlador *fuzzy* externo, que funciona em malha aberta, cuja ação de controle se baseia na obtenção do comportamento dinâmico da irradiância<sup>1</sup> por meio de duas diferentes metodologias de sensoriamento: Primeiramente utilizando um LDR (*Light Dependent Resistor* - Resistor cuja resistência varia conforme a intensidade da luz) e posteriormente um módulo fotovoltaico de baixa potência como módulo sensor. O valor da referência (*set-point*) nestas estratégias, portanto, é variável e depende da irradiância. As dificuldades mais relevantes no desenvolvimento deste controlador estão relacionadas à formulação da base de regras do sistema e seus valores de saída. Diversos testes necessitaram ser realizados com as duas metodologias para alcançar o melhor desempenho.

---

<sup>1</sup> *Irradiância* refere-se à energia solar incidente por unidade de tempo e por área, expressa em [W/m<sup>2</sup>]

Este trabalho propõe o desenvolvimento e implementação de um controlador *fuzzy* que opere em malha fechada, tendo uma tensão fixa como referência. Essa tensão deve ser escolhida próxima da tensão de máxima potência do gerador fotovoltaico no período em que o bombeamento é mais significativo. A base de regras é obtida de forma intuitiva, apenas analisando a curva I-V do gerador fotovoltaico, e o universo de discurso das variáveis do sistema são estimados com facilidade de acordo com a potência do gerador fotovoltaico utilizado.

## 1.2 - PROBLEMA E HIPÓTESE DE PESQUISA

O objetivo do controlador é manter estável o nível de tensão de excitação do barramento CC do CF na referência especificada, através da variação da velocidade da motobomba de acordo com a energia solar disponível visando responder as seguintes perguntas: Um controlador *fuzzy* externo baseado em tensão fixa é capaz de promover a operação adequada do sistema fotovoltaico de bombeamento (SFB)? Sua utilização em conjunto com CF monofásico que não possua o controlador PID é uma alternativa confiável? Quais funcionalidades são possíveis agregar ao sistema? A redução do número de módulos fotovoltaicos é significativa? É possível a utilização de CFs monofásicos com tensão de 127 V objetivando reduzir o número de módulos em série?

Com base nas perguntas do parágrafo anterior, formulou-se a hipótese de que um sistema fotovoltaico de bombeamento, formado por um conversor de frequência monofásico e motobomba centrífuga comerciais e substituindo-se o controlador PID do CF por um controlador *fuzzy* externo, não só representa uma alternativa para incremento do desempenho do sistema como também possibilita uma redução significativa do número de módulos fotovoltaicos em série, importante para a configuração de sistemas de baixa potência.

## 1.3 - OBJETIVOS

Para estudo e análise da hipótese formulada, os objetivos deste trabalho são:

- Projetar um controlador *fuzzy* baseado em regras – tipo Mamdani<sup>2</sup> cuja função é determinar a frequência trifásica de saída de um conversor de frequência modelo CFW-10 (fabricante WEG) com o intuito de manter estável o nível de

---

<sup>2</sup> Professor Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, implementou o controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica fuzzy.

tensão de excitação de seu barramento CC. O conversor de frequência é alimentado por um gerador fotovoltaico e é responsável pelo acionamento de uma motobomba centrífuga multiestágio de 0,5 cv modelo SUB 15 (fabricante Schneider);

- Embarcar o controlador projetado em um microcontrolador comercial de baixo custo da família PIC<sup>3</sup>;
- Avaliar o desempenho do controlador aplicado ao sistema fotovoltaico de bombeamento através de ensaios experimentais utilizando uma bancada que permite simular poços de até 100 m de profundidade.

#### **1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho é composto por quatro capítulos, além deste capítulo introdutório. No Capítulo 2 se faz uma revisão da literatura onde é apresentada a configuração básica de um sistema fotovoltaico de bombeamento baseado em CF e motobomba convencionais. O Capítulo 3 é voltado ao projeto do controlador *Fuzzy* e apresenta as ferramentas utilizadas para a realização dos testes operacionais. No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais bem como as discussões em cima desses resultados, cujo objetivo é a comprovação da hipótese formulada. Finalmente, consolidando o trabalho, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões, onde são relatadas as contribuições da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

---

<sup>3</sup> Microcontroladores PIC são uma família de microcontroladores fabricados pela Microchip Technology, que processam dados de 8 bits, de 16 bits e 32 bits. Seu nome é oriundo de *Programmable Interface Controller*. Contam com extensa variedade de modelos e periféricos internos.

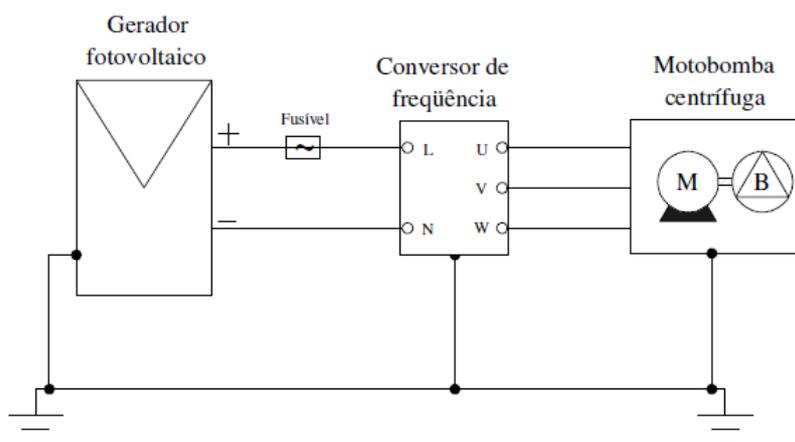
## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO BASEADOS EM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E MOTOBOMBAS CONVENCIONAIS

##### 2.1.1 - Configuração Básica

Um sistema fotovoltaico de bombeamento (SFB) baseado em conversores de frequência e motobombas convencionais é composto pelos seguintes componentes: Gerador Fotovoltaico; Sistema de acoplamento gerador-carga (CF industrial) e Motobomba convencional (normalmente centrífuga de múltiplos estágios) (MELO, 2004; MARANHÃO, 2015). Na Figura 2.1 é mostrada a configuração básica.

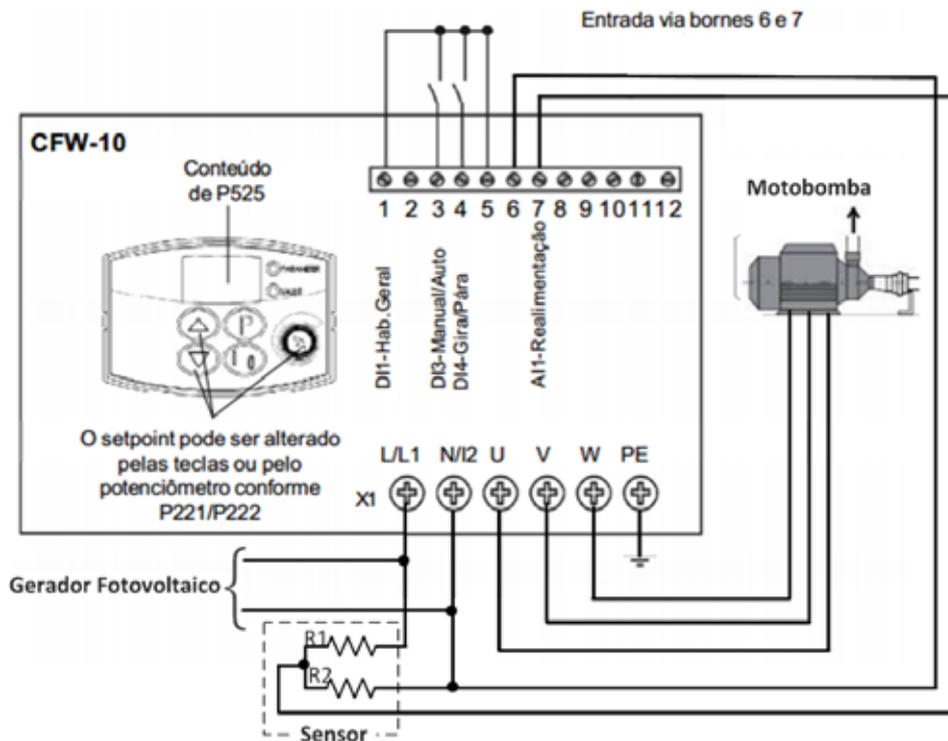
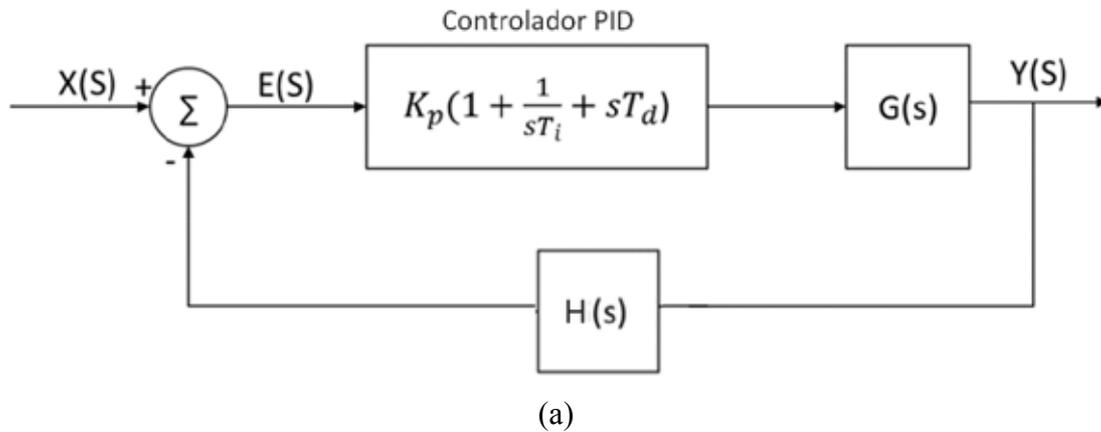


**Figura 2.1** - Bombeamento fotovoltaico utilizando CF.  
Fonte: BRITO (2006).

Para que o sistema funcione a contento, o CF-elemento condicionador de potência, responsável pelo acoplamento entre o gerador FV e a motobomba, deve ser adequadamente parametrizado (programado). Seu controlador PID, interno, deve ser sintonizado (programar os ganhos proporcional, integral e derivativo) e um *set-point* (ponto de operação, tensão de trabalho para o gerador FV) deve ser estabelecido (BRITO, 2006).

O PID, também, deve receber um sinal de realimentação de um sensor de medição da variável do processo, formando desta forma uma malha fechada. O controle

da variável do processo (tensão do gerador fotovoltaico) é feito indiretamente pela variação da velocidade da motobomba (BRITO, 2006; BRITO e ZILLES, 2006), Figura 2.2.



**Figura 2.2** - (a) Diagrama de blocos de um controlador PID em malha fechada; (b) Aplicação para o inversor (CFW-10) com regulador PID em malha fechada. Fonte: (a) Adaptado de MARANHÃO(2015); (b) Adaptado de CFW-10 – Manual do Usuário (WEG S/A, s.d.).

A grande disponibilidade de equipamentos desta natureza representa, para a aplicação do bombeamento fotovoltaico, custos mais baixos e aumento da confiabilidade no emprego da tecnologia (MARANHÃO, 2015), se tornando uma

alternativa aos equipamentos dedicados. Em BRITO (2006), é comprovado que este tipo de configuração é confiável e economicamente viável, podendo ser adotada como uma solução universal para sistemas de bombeamento de água que utilizam moto bombas com potência igual ou superior a 0,5 cv. Também é apresentado, com detalhes, todo o processo de sintonia do controlador PID de forma a otimizar o desempenho do sistema.

## **2.1.2 - Caracterização Elétrica de Módulos e Geradores Fotovoltaicos**

Compreender o comportamento do gerador fotovoltaico é importante para a concepção e entendimento da base de regras do controlador *fuzzy* como também para a escolha da variável que será controlada. Para este propósito, é suficiente conhecer as características elétricas da célula ou dispositivo fotovoltaico, sob vários níveis de irradiância e em várias temperaturas, dispensando o estudo detalhado do fenômeno físico da conversão fotovoltaica.

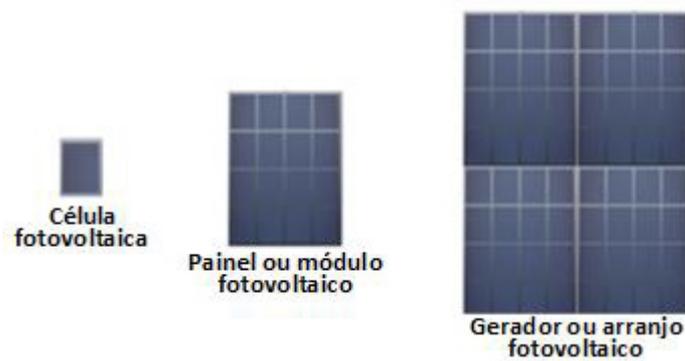
### **2.1.2.1 - Célula, Módulo e Gerador Fotovoltaico**

A unidade básica que compõe os módulos fotovoltaicos é a célula fotovoltaica, responsável pela conversão direta da energia luminosa - radiação solar - em energia elétrica. Agrupam-se várias células (formando um módulo) para que se obtenham tensões e correntes úteis na prática (PINHO *et al.*, 2008).

O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série e/ou em paralelo. Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes, ao conectar as células em série, somam-se as tensões (PINHO *et al.*, 2008).

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série, em geral em números de 30, 33, 36, 60 e 72. Os módulos fotovoltaicos proporcionam proteção mecânica às células e permite a sua utilização exposta às intempéries (AZEVEDO, 2007).

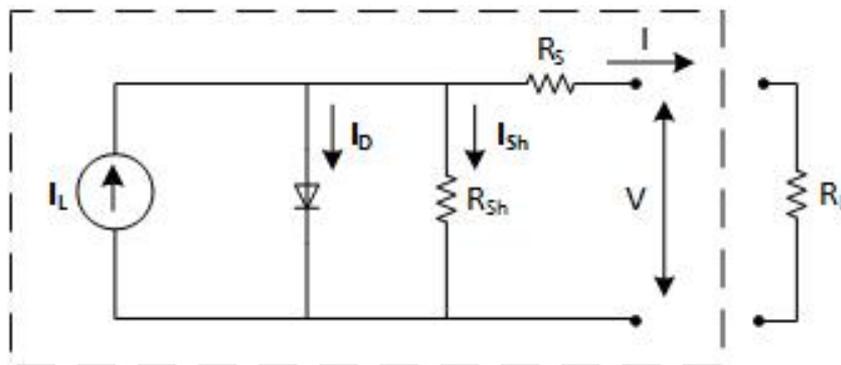
Para garantir maiores níveis de potência, corrente e/ou tensão, os módulos podem ser associados em série e/ou paralelo, dependendo dos valores desejados. Uma associação de módulos dá origem a um gerador fotovoltaico ou arranjo fotovoltaico (PINHO *et al.*, 2008), Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Célula, módulo e gerador fotovoltaico.

A Figura 2.4 mostra um dentre os vários modelos encontrados na literatura para o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. Essa representação pode ser utilizada para modelar e simular células, módulos ou geradores fotovoltaicos utilizando *softwares* como, por exemplo, o MATLAB e o SIMULINK. Exemplos detalhados de modelagem e simulação são encontrados em VILLALVA (2010) e OI (2005).

Este circuito requer que cinco parâmetros sejam conhecidos: a corrente de iluminação, ou fotogerada,  $I_L$ , a corrente de saturação reversa do diodo,  $I_0$ , a resistência em série,  $R_S$ , a resistência em paralelo (ou shunt),  $R_{sh}$ , e o parâmetro aqui chamado de fator de idealidade modificado que está relacionado com as constantes físicas e o parâmetro  $n$  (fator de idealidade do diodo) calculado pela relação  $a = nkTN_S/q$ , onde o único parâmetro desconhecido é o fator de idealidade  $n$  (igual a 1 para um diodo ideal e, tipicamente, entre 1 e 2 para diodos reais),  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  é a temperatura da célula em kelvin,  $N_s$  é o número de células em série, e  $q$  é a carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  coulomb) (DUFFIE e BECKMAN, 2013).



**Figura 2.4** - Modelo com um diodo de um dispositivo fotovoltaico.  
Fonte: GTES (2014).

Na condição de temperatura e irradiância fixas, a característica de corrente e tensão (I-V) desse modelo é dada pela Equação (2.1):

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_S}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

E a potência pela Equação (2.2).

$$P = IV \quad (2.2)$$

A corrente fotogerada é diretamente proporcional ao nível de irradiância  $G$  (em  $W/m^2$ ) e varia linearmente com a temperatura, de acordo com a Equação (2.3) (DUFFIE e BECKMAN, 2013; Driesse *et al.*, 2007):

$$I_L = (I_{L,n} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (2.3)$$

Em que  $I_{L,n}$  é a corrente fotogerada nas condições nominais ( $T_n = 25^\circ C$  e  $G_n = 1000 W/m^2$ ),  $\Delta_T = T - T_n$  ( $T$  e  $T_n$  são, respectivamente, a temperatura de operação e a temperatura nominal),  $G$  é a irradiância na superfície do dispositivo,  $G_n$  é a irradiância nominal e  $K_I$  é a constante que relaciona a variação da corrente em função da temperatura (coeficiente de temperatura da corrente).

A corrente de saturação reversa do diodo ( $I_0$ ) é dependente da temperatura de acordo com a Equação (2.4) (VILLALVA, 2010)

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.4)$$

Sendo  $E_g$  a energia de banda proibida do semiconductor ( $E_g = 1,12eV$  no silício policristalino a  $25^\circ C$ ) (DUFFIE e BECKMAN, 2013; SOTO *et al.*, 2006) e  $I_{0,n}$  é a corrente de saturação reversa nominal da pela Equação (2.5):

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{a_n}\right) - 1} \quad (2.5)$$

Os fabricantes de painéis fotovoltaicos não fornecem os parâmetros da Equação (2.1), da curva I-V característica. As folhas de dados dos painéis trazem normalmente as seguintes informações nas condições nominais (VILLAVA, 2010):

- Tensão de circuito aberto -  $V_{OC}$
- Corrente de curto-circuito -  $I_{SC}$
- Tensão de máxima potência -  $V_{MP}$
- Corrente de máxima potência -  $I_{MP}$
- Coeficiente de temperatura de  $V_{OC}$  -  $\beta$  ou  $K_V$
- Coeficiente de temperatura de  $I_{SC}$  -  $\alpha$  ou  $K_I$
- Máxima potência de pico -  $P_{MP}$

Para fins de exemplo, a Tabela 2.1 lista os parâmetros extraídos da folha de dados do módulo fotovoltaico KB260-6BCA/6BPA (fabricante Kyocera).

**Tabela 2.1** - Características nominais extraídas da folha de dados do fabricante.

$I_{MP}$	8,39 A
$V_{MP}$	31,0 V
$P_{MAX}$	260 W
$I_{SC}$	9,09 A
$V_{OC}$	38,3 V
$K_V$	-0,36 %/°C
$K_I$	0,06 %/°C
$N_S$	60

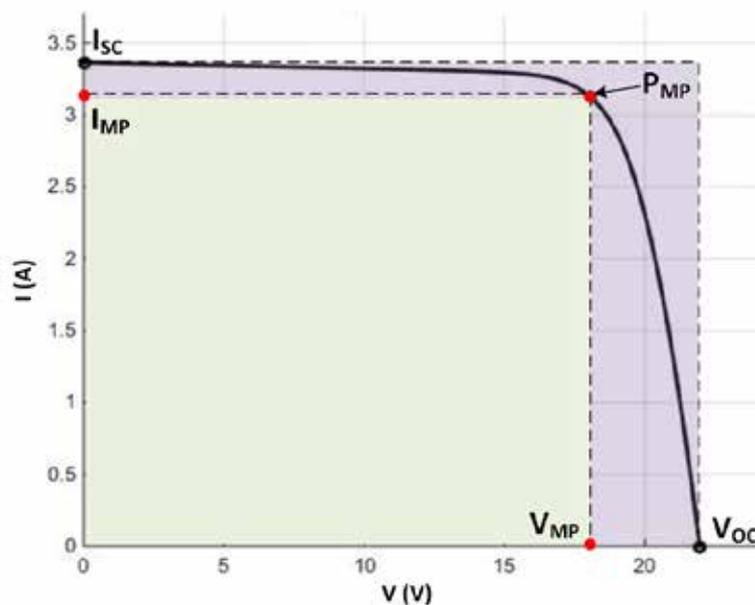
Há procedimentos (DUFFIE e BECKMAN, 2013) para encontrar os cinco parâmetros da equação característica utilizando as informações constantes na folha de dados dos painéis.

### 2.1.2.2 - Curva Característica I-V

Na Figura 2.5 apresenta-se a curva I-V típica de uma célula fotovoltaica, onde três pontos de interesse estão destacados: curto-circuito ( $0, I_{SC}$ ), máxima potência ( $V_{MP}, I_{MP}$ ) e circuito aberto ( $V_{OC}, 0$ ). O gráfico representativo da curva I-V pode ser dividido em duas regiões principais de operação. A esquerda do ponto de máxima potência (*MPP - Maximum power point*) o dispositivo comporta-se predominantemente como fonte de corrente, enquanto à direita do ponto de máxima potência seu comportamento é mais parecido com o de uma fonte de tensão (VILLAVA, 2010).

O valor máximo de potência ( $P_{MP}$ ) é obtido pelo produto entre os valores de corrente e tensão de máxima potência ( $I_{MP}$  e  $V_{MP}$ ), portanto, quando o retângulo formado pelas linhas pontilhadas da Figura 2.5 apresenta área máxima (PINHO, *et al.*, 2008).

Outra maneira de se analisar os parâmetros de máxima potência da célula é através de seu fator de forma (*FF*) que é definido pela razão entre o produto  $I_{MP} \times V_{MP}$  pelo produto  $I_{SC} \times V_{OC}$ . Quanto maior o fator de forma, mais próximo de um retângulo a curva será e, conseqüentemente, maior será a sua área. O fator de forma assume valores sempre menores que a unidade (GTES, 2014).



**Figura 2.5** - Curva  $I \times V$  característica de um dispositivo fotovoltaico e seus pontos mais usuais.

Fonte: GTES (2014).

Utilizando-se as Equações (2.1) e (2.2), o ponto de máxima potência pode ser calculado pela solução da Equação (2.6):

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.6)$$

Métodos iterativos são necessários para a resolução da Equação (2.6), o que acaba tornando os cálculos um pouco mais trabalhosos. Como alternativa ao uso da Equação (2.6), apresenta-se a Equação (2.7), que, apesar de não determinar o ponto de máxima potência em si, ou seja, os valores de  $V_{MP}$  e  $I_{MP}$  permitem calcular, com boa relação entre praticidade e confiabilidade, o valor da potência máxima em uma determinada condição de operação, temperatura ambiente ( $T_a$ ) e irradiância no plano do gerador fotovoltaico ( $G$ ) (PINHO *et al.*, 2008).

$$P_{MP} = P_{MP,n} \frac{G}{G_n} [1 - \gamma_{MP}(T_c - T_n)] \quad (2.7)$$

Sendo os valores de  $P_{MP,n}$ ,  $G_n$  e  $T_n$  associados às condições padrão de teste,  $\gamma_{MP}$  é o coeficiente de temperatura do ponto de máxima potência e  $T_c$  é a temperatura equivalente de operação das células.

O coeficiente  $\gamma_{MP}$  assume valores entre 0,4 a 0,5  $\% ^\circ C^{-1}$  para módulos de silício mono e policristalino e entre 0,1 a 0,2  $\% ^\circ C^{-1}$  para módulos de silício amorfo (MARTÍN, 1998).

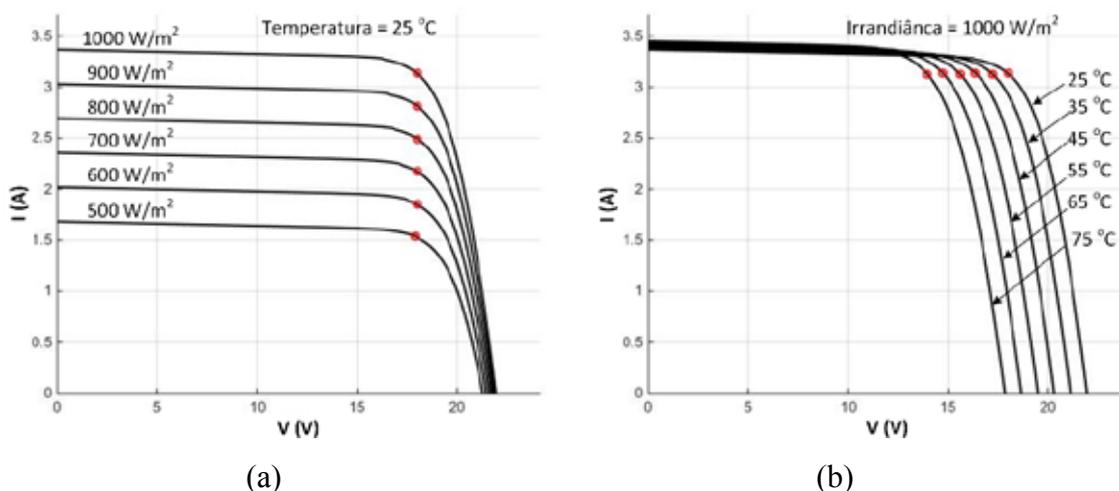
No que diz respeito à determinação da temperatura equivalente de operação das células ( $T_c$ ), a Equação (2.8), representa uma boa relação de compromisso entre facilidade de cálculo e precisão (MARTÍN, 1998).

$$T_c = T_a + G \left( \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800} \right) \quad (2.8)$$

Sendo  $T_a$  a temperatura ambiente do local em que gerador fotovoltaico está operando.

### 2.1.2.3 - Influência da Temperatura e Irradiância

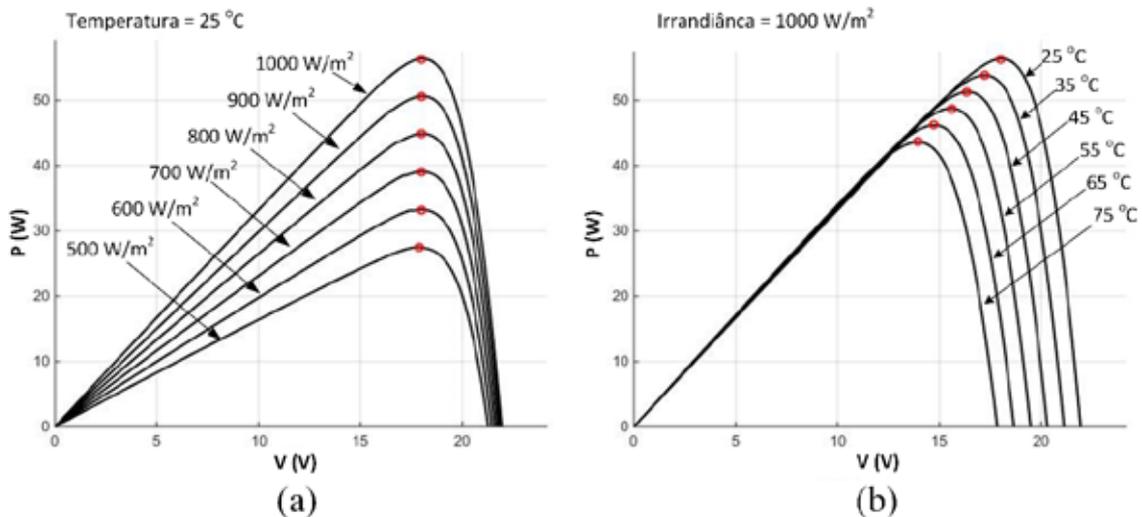
Dentre os fatores que influenciam as características da I-V de uma célula fotovoltaica, a irradiância e a temperatura são os mais importantes. Para uma mesma temperatura da célula, uma redução no nível da irradiância até certos limites ( $200 \text{ W/m}^2$ , por exemplo) reduzem a corrente gerada sem causar variações consideráveis na tensão. Por outro lado, considerando-se um mesmo nível de irradiância, aumentos nos valores de temperatura da célula reduzem a tensão em proporções muito mais significativas que aumentam a corrente, deslocando assim o ponto de máxima potência para a esquerda. A Figura 2.6 ilustra o comportamento das curvas I-V com a variação desses dois parâmetros (PINHO *et al.*, 2008).



**Figura 2.6** - Curvas corrente tensão para o módulo fotovoltaico policristalino S55P, fabricante Solares (a) para temperatura constante ( $25 \text{ °C}$ ) e diversos níveis de irradiância; (b) para irradiância constante ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) e diversas condições de temperatura.

Fonte: Adaptado de VILLALVA (2010).

A Figura 2.7 mostra o comportamento das curvas potência versus tensão, P-V, com a variação dos parâmetros anteriormente citados.



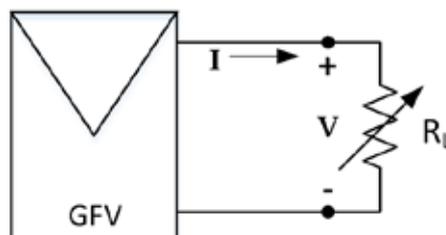
**Figura 2.7** - Curvas potência tensão para o módulo fotovoltaico policristalino S55P, fabricante Solares (a) para temperatura constante (25 °C) e diversos níveis de irradiância; (b) para irradiância constante (1000 W/m<sup>2</sup>) e diversas condições de temperatura.

Fonte: Adaptado de VILLALVA (2010).

Idealmente, os geradores fotovoltaicos deveriam sempre operar no ponto de máxima potência, porém, na prática, eles operam em um ponto sobre a curva I-V correspondente às características I-V da carga (GTES, 2014).

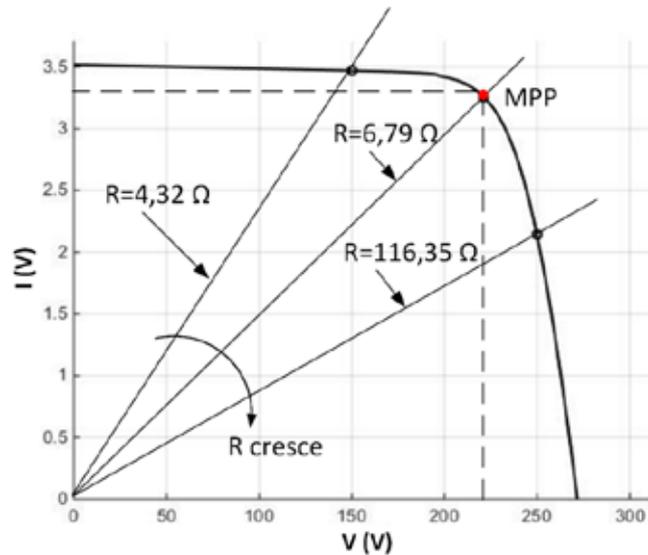
#### 2.1.2.4 - Característica da Carga e Acoplamento Direto

Quando um módulo fotovoltaico está diretamente acoplado a uma carga, seu ponto de operação será a intersecção da sua curva  $I - V$  com a curva característica da carga. Por exemplo, na Figura 2.8, para uma carga resistiva sua característica  $I - V$  é uma reta com inclinação de  $1/R_L$  como mostrado na Figura 2.9. Em geral, este ponto de operação raramente é igual ou está próximo ao ponto de máxima potência (MPP) do módulo (OI, 2005).



**Figura 2.8** - Gerador fotovoltaico conectado diretamente a uma carga resistiva.

Fonte: OI (2005).

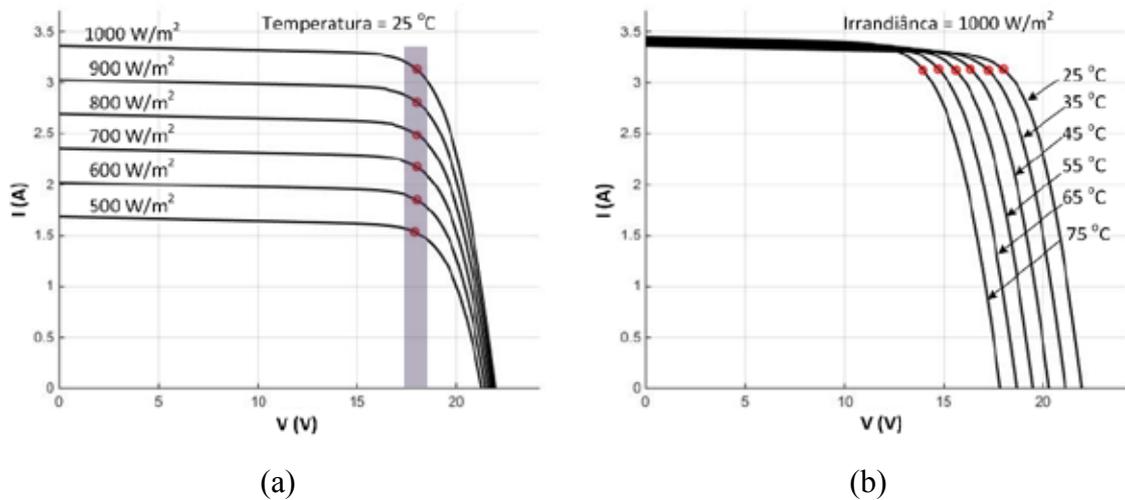


**Figura 2.9** - Curvas I-V para o gerador fotovoltaico e várias cargas resistivas.  
 Fonte: Adaptado de OI (2005).

Um grande problema em sistemas fotovoltaicos é o casamento adequado do gerador às cargas eletromecânicas. Isto se deve às não-linearidades, dinâmica do nível de irradiância, dependência da tensão e corrente em relação à temperatura da célula solar, etc. (FRANKLIN, 2009).

O uso de um condicionador de potência entre o gerador fotovoltaico e a carga dotado de um sistema de controle que permita manter o ponto de operação no ponto de máxima potência (*MPP*) ou próximo deste, torna a operação do sistema mais eficiente.

A Figura 2.10 (a) mostra que o ponto de máxima potência permanece dentro de uma zona estreita de tensão. Ou seja, independentemente da condição de irradiância, a tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ) pouco varia quando a temperatura do dispositivo é constante. Quando a temperatura varia, com irradiância solar constante, a corrente do dispositivo fotovoltaico é aproximadamente constante e a tensão de máxima potência é alterada. Todavia, mesmo nesta situação a tensão  $V_{MP}$  permanece dentro de uma faixa relativamente pequena de valores, tal como mostra a Figura 2.10 (b) (VILLAVA, 2010), tendo em vista que valores máximos de temperatura tipicamente atingidos ficam mais próximos aos 55°C.



**Figura 2.10** - Curvas tensão corrente para o módulo fotovoltaico S55P e seus respectivos pontos de máxima potência: (a) para temperatura constante (25 °C) e vários níveis de irradiância; (b) para irradiância constante (1000 W/m<sup>2</sup>) e diversas condições de temperatura.

Fonte: Adaptado de VILLALVA(2010).

O fato de a tensão de máxima potência do dispositivo fotovoltaico manter-se relativamente constante dentro de uma ampla faixa de variação da irradiância favorece a escolha da tensão como a variável a ser controlada. É por esta razão que o controle da tensão do dispositivo fotovoltaico é preferível ao controle da corrente. Mesmo considerando que a tensão varia com mudanças de temperatura, estas são menos bruscas e menos frequentes do que as variações da irradiância (VILLAVA, 2010). Para representar o efeito da temperatura nas características dos módulos utilizam-se os coeficientes de temperatura definidos na sequência (GTES, 2014).

O coeficiente ( $\beta$ ) de variação da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) com a temperatura (em %/°C) é calculado pela Equação (2.9):

$$\beta = \frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T} \frac{1}{V_{OC}} \quad (2.9)$$

Em que  $\Delta V_{OC}$  é a variação da tensão de circuito aberto para uma variação de temperatura de célula  $\Delta T$ . O cálculo de  $V_{OC}$  em determinada temperatura, com o uso do coeficiente  $\beta$  é feito por meio da Equação (2.10).

$$V_{OC} = V_{OC,n}(1 + \beta(T - 25)) \quad (2.10)$$

Este coeficiente  $\beta$  é geralmente negativo e, para os módulos de silício mono e policristalino, um valor típico de  $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  por cada célula que constitui o módulo é frequentemente utilizado. Isso significa que, para um módulo de 36 células cuja tensão de circuito aberto é de aproximadamente  $22,4 \text{ V}$  o valor normalizado necessário para a Equação (2.10) é  $-0,37 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ .

O coeficiente ( $\alpha$ ) de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é dado pela Equação (2.11).

$$\alpha = \frac{\Delta I_{SC}}{\Delta T} \frac{1}{I_{SC}} \quad (2.11)$$

Sendo  $\Delta I_{SC}$  a variação da corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) para uma variação de temperatura de célula  $\Delta T$ , sendo, este coeficiente aplicado a uma equação idêntica à Equação (2.10). Este coeficiente  $\alpha$  é positivo, e um valor típico para os módulos de silício mono e policristalino é de  $+0,004 \text{ mA}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  ou  $+0,01 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ . Os dados de placa de todos os coeficientes de alguns módulos comerciais estão apresentados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Coeficientes de variação de parâmetros elétricos em função da temperatura para os módulos comerciais.

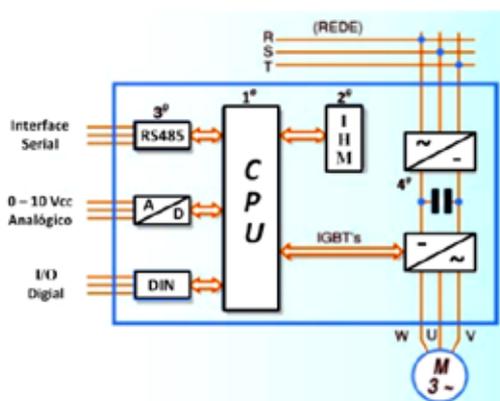
Modelo	$\alpha$ [ $\%/^\circ\text{C}$ ]	$\beta$ [ $\%/^\circ\text{C}$ ]	$\gamma$ [ $\%/^\circ\text{C}$ ]	$\alpha$ [ $\text{A}/^\circ\text{C}$ ]	$\beta$ [ $\text{V}/^\circ\text{C}$ ]	$\gamma$ [ $\text{W}/^\circ\text{C}$ ]
S_19	0,04	-0,31	-0,44	0,003	-0,12	-0,74
SW230	0,034	-0,34	-0,48	0,003	-0,13	-1,13
60MCI	0,03	-0,27	-0,44	0,003	-0,10	-1,04
YL185	0,06	-0,37	-0,45	0,005	-0,11	-0,83
HIT235	0,03	-0,25	-0,30	0,002	-0,13	-0,71
HIT205	0,03	-0,25	-0,30	0,002	-0,13	-0,62
X120	0,07	-0,30	-0,25	0,001	-0,48	-0,30
120FB	0,03	-0,36	-0,45	0,001	-0,21	-0,54
FS380	0,04	-0,27	-0,25	0,001	-0,16	-0,20
E070	0,05	-0,29	-0,36	0,001	-0,12	-0,25

Fonte: JÚNIOR(2014).

### 2.1.3 - Conversor de Frequência

Um inversor ou conversor de frequência (CF) é um equipamento capaz de gerar tensões trifásicas com amplitude e frequência ajustáveis, e tem como finalidade controlar a velocidade de um motor de indução trifásico mantendo o torque nominal do motor. Uma das formas de manter o torque nominal do motor é preservar a proporção tensão-frequência para altas e baixas velocidades.

A Figura 2.11 mostra um diagrama de blocos de um inversor de frequência típico. Esse modelo abrange uma grande parte dos inversores encontrados no mercado atual (CAPELLI, 2002).



**Figura 2.11** - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.  
Fonte: CAPELLI (2002).

#### 1º bloco - CPU

A CPU (Unidade Central de Processamento) de um inversor de frequência pode ser formada por um microprocessador ou por um microcontrolador (como o PLC). Isso depende apenas do fabricante. De qualquer forma, é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a esse conjunto. A CPU não apenas armazena os dados e parâmetros relativos ao equipamento, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor: geração dos pulsos de disparo, através de uma lógica de controle coerente, para os IGBTs (CAPELLI, 2002).

#### 2º bloco - IHM

O 2º bloco é o IHM (Interface Homem Máquina). É através desse dispositivo que é possível visualizar o que está ocorrendo no inversor (*display*), e parametrizá-lo de acordo com a aplicação.

### 3º bloco - Interfaces

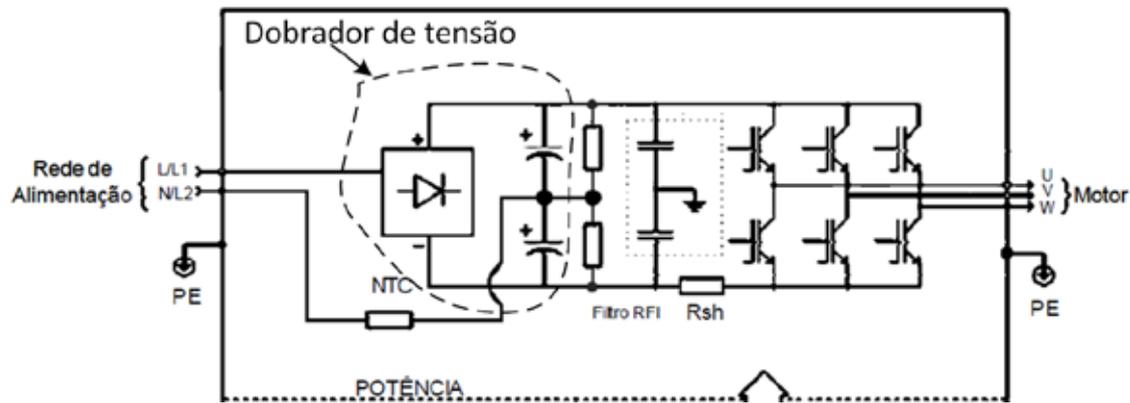
A maioria dos inversores pode ser comandada através de dois tipos de sinais: analógicos ou digitais. Normalmente, quando o objetivo é controlar a velocidade de rotação de um motor AC, utiliza-se uma tensão analógica de comando. Essa tensão se situa entre 0 a 10 Vcc. A velocidade de rotação (rpm) será proporcional ao seu valor, por exemplo: 1 Vcc = 1000 rpm, 2 Vcc = 2000 rpm, etc. Para inverter o sentido de rotação, basta inverter a polaridade do sinal analógico (ex: 0 a 10 Vcc sentido horário, e -10V a 0 anti-horário). Além da interface analógica, o CF possui entradas digitais. Através de um parâmetro de programação, é possível selecionar qual entrada é válida (analógica ou digital) (CAPELLI, 2002).

### 4º bloco - Etapa de potência

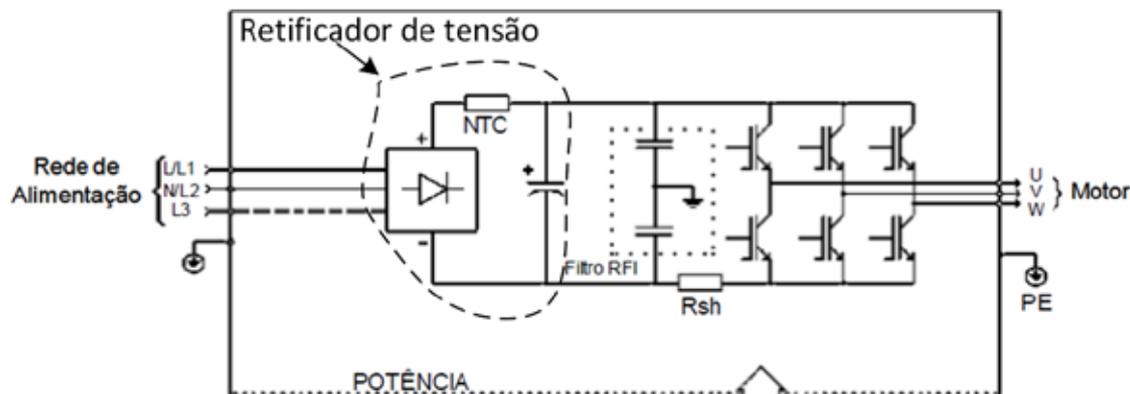
A etapa de potência é constituída por um circuito retificador, que alimenta (através de um circuito intermediário chamado barramento DC ou barramento CC) o circuito de saída inversor (módulo IGBT) (CAPELLI, 2002).

#### **2.1.3.1 - Conversores de Frequência Monofásicos**

CFs monofásicos estão disponíveis em modelos 110-127 V e 200-240 V e utilizam circuitos de entrada distintos para sintetizarem a tensão em seus barramentos CC. Os modelos que trabalham com tensão 110-127 V possuem em sua entrada um circuito dobrador de tensão já os modelos 200-240 V utilizam um circuito retificador, tal como pode ser observado nas Figura 2.12 e 2.13 (informação extraída dos manuais dos fabricantes).



**Figura 2.12** - Diagrama de blocos do circuito de potência do inversor CFW-10, monofásico, modelo 110-127 V, com um dobrador de tensão na entrada.  
 Fonte: CFW-10 - Manual do Usuário (WEG S/A, s.d.).



**Figura 2.13** - Diagrama de blocos do circuito de potência do inversor CFW-10, monofásico, modelo 200-240 V, com um retificador na entrada.  
 Fonte: CFW-10 - Manual do Usuário (WEG S/A, s.d.).

CFs industriais monitoram a tensão em seu barramento CC e bloqueiam seu funcionamento quando a tensão no circuito intermediário estiver abaixo de um valor mínimo ou acima de um valor máximo. Estes valores variam de acordo com o CF escolhido e podem ser consultados em seus manuais. Para o CFW-10 (fabricante WEG), modelos 200-240 V, uma tensão no barramento CC abaixo de 200 V e acima de 410 V provocarão erros denominados *erro de subtensão* e *erro de sobretensão*, respectivamente. Para os modelos 110-127 V os valores são de 250 V e 460 V (WEG S/A, s.d.), portanto, valores maiores que os do modelo 200-240 V.

Dentre os principais fabricantes disponíveis no mercado nacional estão ABB, WEG, Yaskawa, Allen Bradley, Siemens Schneider e Metaltex. Os modelos monofásicos ACS55 (fabricante ABB), J1000 (fabricante YASKAWA), powerflex 4m (fabricante Allen Bradley) não possuem controlador PID incorporado.

### 2.1.4 - Bomba Centrífuga

As bombas hidráulicas são máquinas capazes de converter a energia mecânica oriunda de um motor elétrico, por exemplo, em energia cinética e de pressão do fluido bombeado (BARBOSA, 2006).

Em sistemas fotovoltaicos de bombeamento a bomba centrífuga trabalhará em diferentes velocidades de acordo com a energia solar disponível. Sua operação em velocidade variável obedece ao princípio da semelhança que relaciona a potência mecânica de entrada da bomba ( $P_B$ ), a vazão ( $Q$ ), a altura manométrica ( $H$ ) e a velocidade ( $N$ ) (ALONSO-ABELA *et al.*, 2003).

Considerando uma bomba com rotação  $N_1$ , em um ponto de operação,  $H_1$  e  $Q_1$ , alterando-se a velocidade dessa bomba para  $N_2$ , o novo ponto de operação, com rendimento igual ao anterior, será  $H_2$  e  $Q_2$ , tal que (BARBOSA, 2006):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.12)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{P_{B1}}{P_{B2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2.14)$$

A eficiência da bomba  $\eta_B$  é definida como a razão entre a potência hidráulica e a potência mecânica de entrada da bomba, dada pela Equação (2.15) (ALONSO-ABELA, 2003).

$$\eta_B = \frac{\rho g H Q}{P_B} \quad (2.15)$$

Em que  $\rho$  e  $g$ , são, respectivamente, a densidade da água e a aceleração devida à gravidade.

Estas Equações (2.12) a (2.15) permitem facilmente a tradução a partir de um ponto ( $Q_N, H_N$ ) particular da curva nominal (fornecida pelos fabricantes) a outro ponto

de operação ( $Q_T, H_T$ ) de mesma eficiência, mas que corresponde à altura particular  $H_T$ . A partir delas, as Equações (2.16) a (2.19) são facilmente obtidas (ALONSO-ABELA, 2003).

$$Q_T = Q_N \sqrt{\frac{H_T}{H_N}} \quad (2.16)$$

$$P_{B,T} = \rho g H_T \frac{Q_N}{\eta_B} \sqrt{\frac{H_T}{H_N}} \quad (2.17)$$

$$f_T = f_N \sqrt{\frac{H_T}{H_N}} \quad (2.18)$$

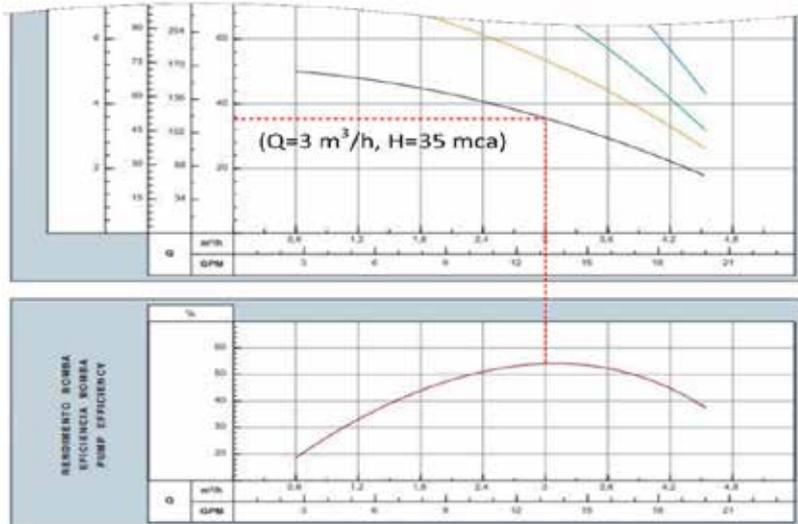
$$Q_T = Q_N \frac{f_T}{f_N} \quad (2.19)$$

Nesta notação, o sub-índice 'N' significa operação na velocidade nominal, enquanto que o sub-índice 'T' significa operação na altura  $H_T$  real. Já o parâmetro  $f$  é a frequência de rotação da bomba.

A potência absorvida pelo motor da bomba pode ser obtida a partir do rendimento do motor ( $\eta_m$ ) e da potência mecânica de entrada da bomba, Equação (2.20).

$$P_m = \frac{P_B}{\eta_m} \quad (2.20)$$

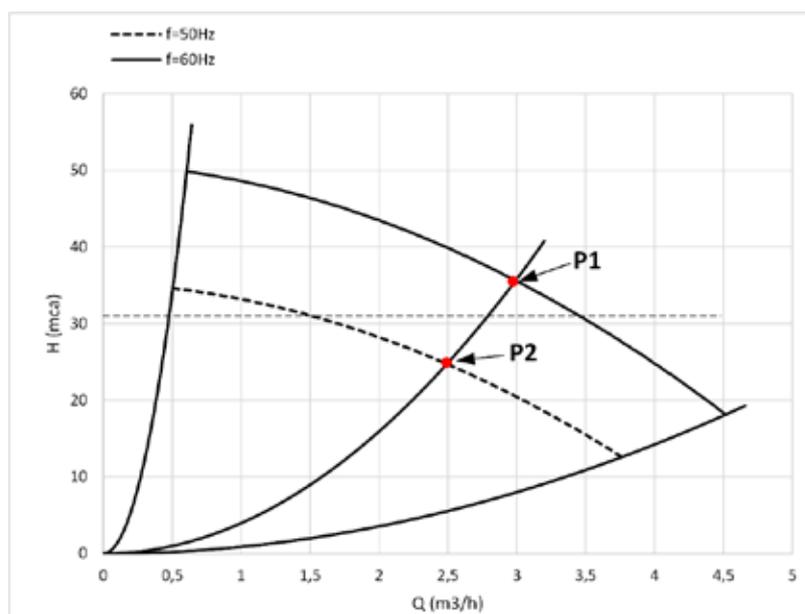
Normalmente, os fabricantes fornecem a curva H-Q da bomba para a velocidade nominal – frequência de 60 Hz (ALONSO-ABELA, 2003). Para a bomba escolhida o ponto H-Q de trabalho ideal, considerando o bombeamento convencional, é mostrado no gráfico e corresponde a vazão  $Q$  igual a 3 m<sup>3</sup>/h e altura manométrica  $H$  igual a 35 mca. Neste ponto, o rendimento é máximo, tal como pode ser observado na Figura 2.14.



**Figura 2.14** - Curva altura manométrica versus vazão e eficiência versus vazão para a motobomba Schneider SUB 15 -0,5 cv.

Fonte: Adaptado de Curva SUB-15 (schneider motobombas, s.d.).

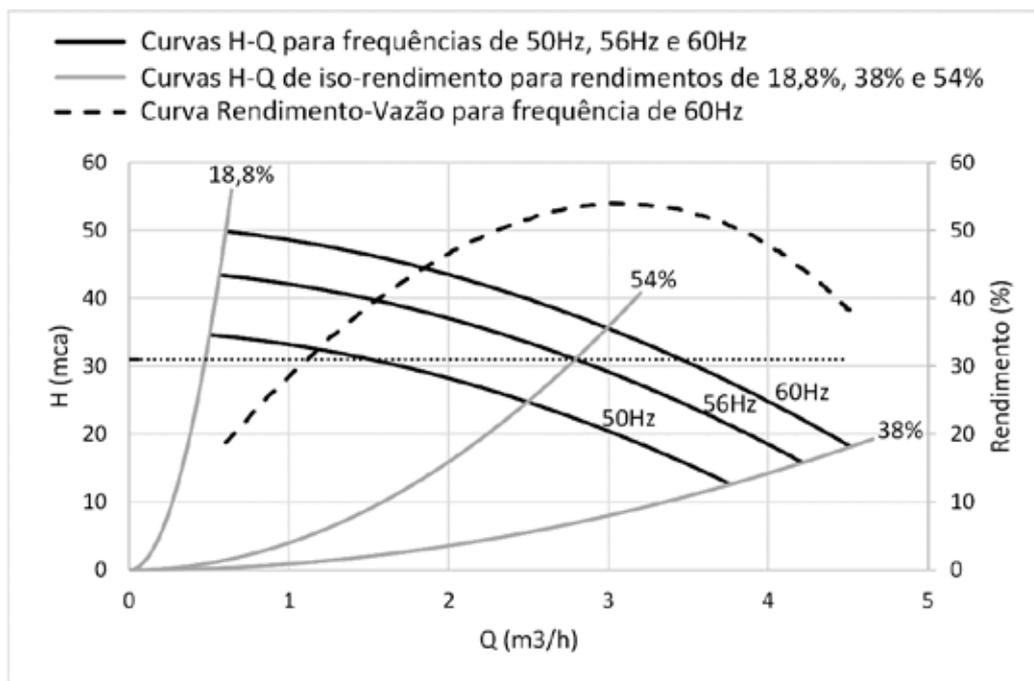
Usando-se as Equações (2.12) a (2.20) e as curvas da Figura 2.14, é possível obter as curvas de altura manométrica versus vazão (H-Q) para diferentes frequências, como também as curvas H-Q de mesmo rendimento (ALONSO-ABELA, 2003; ALONSO-ABELA *et al.*, 2002), tal como mostrado nas Figuras 2.15 e 2.16. Os pontos P1 - na frequência de 60 Hz e P2 - na frequência de 50 Hz possuem o mesmo rendimento (Figura 2.15).



**Figura 2.15** - Exemplo de curvas H-Q (nas frequências de 60 Hz e 50 Hz) e curvas de iso-rendimento (parábolas) para a bomba centrífuga Schneider modelo SUB 15 - 0,5 cv a partir de dados do fabricante, aplicando as leis de semelhança.

Fonte: Adaptado de ALONSO-ABELA *et al.* (2003).

Uma regra prática, que pode auxiliar na especificação de sistemas fotovoltaicos para o bombeamento de água, se baseia no fato da motobomba operar, em quase a totalidade do tempo, em frequências inferiores a frequência nominal de operação fornecida pelo fabricante. Isso significa que, para uma dada altura manométrica  $H$ , recomenda-se selecionar uma bomba cujo ponto de operação na curva  $H$ - $Q$  na frequência nominal esteja posicionado à direita do ponto de melhor eficiência. Ao operar em pontos cujos rendimentos são menores na frequência nominal e maiores em frequências inferiores a nominal, se consegue incrementar o rendimento médio diário do sistema fotovoltaico de bombeamento (ALONSO-ABELA *et al.*, 2002). Para a bomba escolhida, a altura manométrica ideal de trabalho seria em torno de 31 mca – Figura 2.16. Nesta altura, para a bomba trabalhando na frequência de 56 Hz, estaria em seu rendimento máximo.



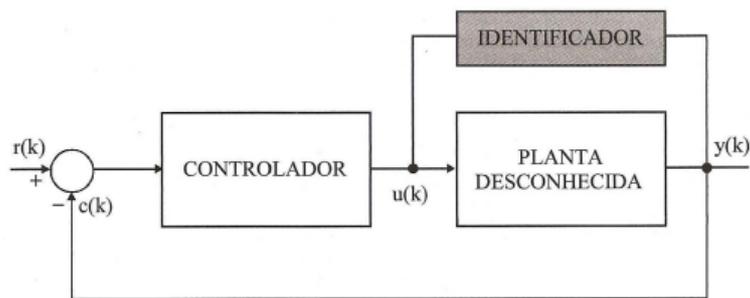
**Figura 2.16** - Curvas  $H$ - $Q$  para diferentes frequências (50 Hz, 56 Hz e 60 Hz); curva de rendimento para a frequência de 60 Hz; parábolas de iso-rendimento para diversos rendimentos (18,8 %, 38 % e 54 %) e linha pontilhada, para altura manométrica de 31 mca, indicando os pontos de operação.

Fonte: Adaptado de ALONSO-ABELA *et al.* (2003).

## 2.2 - CONTROLE FUZZY

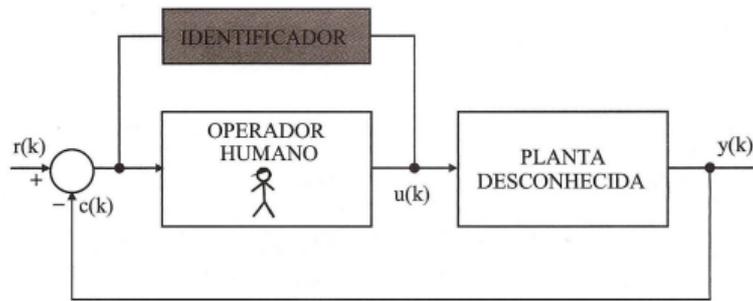
### 2.2.1 - Metodologia de Modelagem Convencional Comparada ao Controle Fuzzy

Segundo SIMÕES e SHAW(2007), na metodologia convencional de projeto de sistemas de controle, o que é modelado é a planta-processo que está sendo controlado, tal como ilustra a Figura 2.17. Esse procedimento é conhecido por identificação de sistemas, onde o sistema é assumido como linear, ou aproximadamente linear caracterizado por um conjunto de equações diferenciais, cuja solução indicaria ao controlador como os parâmetros deveriam ser ajustados para um determinado comportamento do sistema (tais como: amortecimento, sobressinal, velocidade de resposta, tempo de acomodação e erro em regime permanente).



**Figura 2.17** - Identificação da dinâmica do processo ou planta.  
Fonte: SIMÕES e SHAW (2007).

Porém, em muitos sistemas não afeitos ao controle automático, operadores humanos estão sendo ainda empregados, e a metodologia de projeto está focalizada no comportamento dos operadores, isto é, como eles ajustariam os parâmetros de controle para um determinado conjunto de circunstâncias. Por exemplo, em metodologia *fuzzy* é o operador cujo modelo está sendo identificado; enquanto ele está controlando o sistema, conforme mostra a Figura 2.18. Assim, o controlador *fuzzy*, baseado no modelo identificado do operador humano, torna-se um modelo lógico da forma com que o operador raciocina ao manipular o sistema. Esse deslocamento de ponto de vista de modelagem do sistema físico para o operador humano muda o enfoque dos problemas de controle automático.

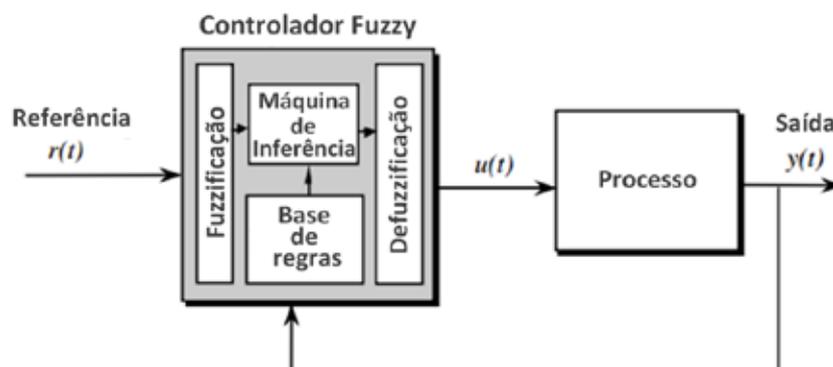


**Figura 2.18** - Identificação do comportamento do operador de controles.  
 Fonte: SIMÕES e SHAW (2007).

### 2.2.2 - Controlador *Fuzzy* Baseado em Regras

Um diagrama de blocos de um controlador *Fuzzy* é mostrado na Figura 2.19. Sua composição consiste de quatro elementos (PASSINO e YURKOVICH, 1998):

1. A Interface de Fuzzificação, que converte os sinais de entrada do controlador em informações que o mecanismo de inferência pode facilmente manipular para ativar e aplicar regras.
2. Base de Regras, que corresponde a um conjunto de regras que são expressas por declarações condicionais do tipo *SE ... ENTÃO*. Uma base de regras deve ser criada a partir do conhecimento do sistema (pela experiência de um especialista na operação ou através de leis físicas).
3. Um mecanismo de inferência (também chamado de "máquina de inferência" ou módulo de "inferência *fuzzy*"), que emula a tomada de decisão de um especialista sobre a melhor forma de controlar o Processo (Planta).
4. Interface de defuzzificação, que converte as conclusões do Mecanismo de inferência em entradas reais para o processo.



**Figura 2.19** - Arquitetura de um controlador *fuzzy*.  
 Fonte: PASSINO e YURKOVICH (1998).

### 2.2.3 - Projeto de Controladores *Fuzzy*

O projeto de sistemas de controle *fuzzy* corresponde essencialmente de três etapas (PASSINO e YURKOVICH, 1998):

1. Escolher as entradas e saídas do controlador *fuzzy*.
2. Escolher o pré-processamento que é necessário para as entradas do controlador e, possivelmente, de pós-processamento que é necessário para as saídas.
3. Concepção de cada um dos quatro componentes do controlador *fuzzy* mostrados na Figura 2.19.

Existem opções padrão para as interfaces de fuzzificação e defuzzificação, o que facilita significativamente a etapa de projeto. Além disso, na maioria das vezes, o projetista estabelece um mecanismo de inferência e pode usá-lo em muitos processos diversos. Assim, a parte principal do controlador *fuzzy* que se deve focar é à base de regras (PASSINO e YURKOVICH, 1998).

A base de regras é construída de modo que ela represente o comportamento de como um operador especialista na área reage a distúrbios no processo como se o mesmo estivesse operando manualmente. O especialista pode ser entrevistado para ajudar a formular o conjunto de regras *fuzzy* e pode articular associações de entrada/saída linguísticas (SIMÕES e SHAW, 2007). Em outras situações não há nenhum especialista humano, e o engenheiro de controle irá simplesmente estudar a dinâmica da planta (por exemplo, usando leis físicas, modelagem e simulação) e conceber um conjunto de regras de controle que seja coerente para controlar o processo (PASSINO e YURKOVICH, 1998).

Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *SE ... ENTÃO*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser desenvolvido. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos *fuzzy* e a Lógica *fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas (TANSCHKEIT, 2004).

Nas seções seguintes são apresentados, sucintamente, conceitos fundamentais de Conjuntos *fuzzy* e de Lógica *fuzzy*, que servem de base para implementação do controlador proposto. Alguns exemplos são utilizados na tentativa de ajudar no entendimento de todo arcabouço teórico utilizado para o desenvolvimento do controlador aqui proposto.

#### 2.2.4 - Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* também conhecida como Lógica Nebulosa ou Lógica Difusa foi introduzida no contexto científico em 1965 pelo professor Lotfi Zadeh, através da publicação do artigo *Fuzzy Sets* (ZADEH, 1965) no *Journal Information and Control*. Semelhante a lógica clássica que é baseada na teoria dos conjuntos clássicos, a lógica *fuzzy* é a lógica baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*. Permite inferências entre o falso e o verdadeiro diferentemente da lógica clássica bivalente. Sua principal característica é a capacidade de manipular informações imprecisas, vagas, típicas do raciocínio humano, transformando-as em valores numéricos, que podem ser tratados em computadores (BARROS, 2009).

##### 2.2.4.1 - Pertinência *Fuzzy*

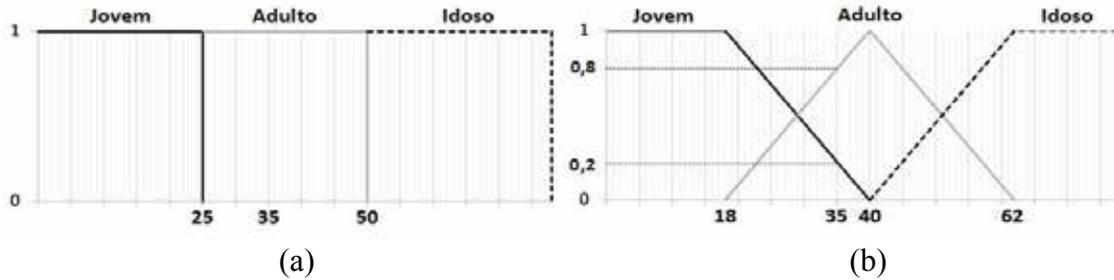
Uma noção básica da teoria de conjuntos clássicos é a pertinência de um elemento  $x$  em um conjunto  $A$ , indicada por  $x \in A$  (SIMÕES e SHAW, 2007).

Uma forma alternativa de se indicar essa pertinência pode ser através de uma função de pertinência  $\mu_A(x)$ , cujo valor indica se o elemento  $x$  pertence ou não ao conjunto  $A$ . Por exemplo, no seguinte caso,  $\mu_A(x)$ , é uma função bivalente (SIMÕES e SHAW, 2007):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.21)$$

Portanto, a propriedade fundamental da lógica convencional ou booleana, é que a função de pertinência é bivalente (SIMÕES e SHAW, 2007).

Na lógica *fuzzy* a propriedade fundamental é que a função de pertinência,  $\mu_A(x)$ , tem todos os valores dentro do intervalo  $[0,1]$ . Isso significa que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicado por um valor fracionário dentro do intervalo numérico de  $[0,1]$  (SIMÕES e SHAW, 2007). Por exemplo, considerando a Figura 2.20, uma pessoa de 35 anos seria adulta na abordagem booleana, mas 0,2 jovem e 0,8 adulta na abordagem *fuzzy*.



**Figura 2.20** - Conjuntos idade: (a) abordagem booleana; (b) abordagem *fuzzy*.  
 Fonte: Adaptado de GOMES(2010).

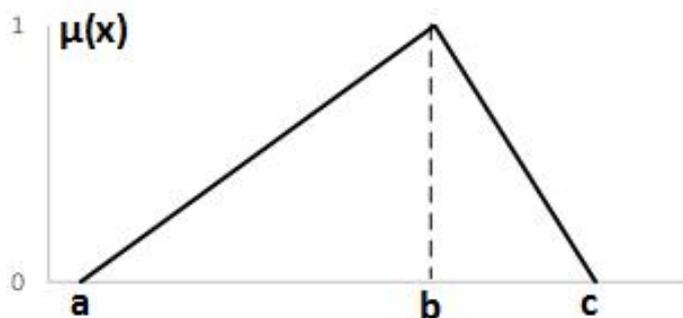
Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. O universo de discurso de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir (SIMÕES e SHAW, 2007). Os formatos mais utilizados para funções de pertinência são triângulos e trapezoides por serem gerados com facilidade (GOMES, 2010), Figuras 2.21 e 2.22.

A função *singleton* (*Fuzzy-tons*) é usada em conjunto com certos métodos de defuzzificação, onde se simplificam os cálculos, Figura 2.23 (SIMÕES e SHAW, 2007).

A Função triangular é definida pelos parâmetros  $a, b$  e  $c$ , Figura 2.21, com  $a \leq b \leq c$ , e pode ser gerada através das expressões contidas nas Equações (2.22) e (2.23) (THE MATHWORKS INC., s.d.):

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.22)$$

$$f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x - a}{b - a}, \frac{c - x}{c - b}\right), 0\right) \quad (2.23)$$

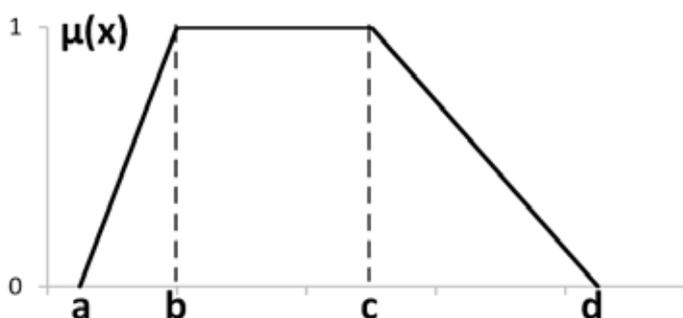


**Figura 2.21** - Função de pertinência triangular.  
 Fonte: Adaptado de CAMBOIM (2008).

A Função trapezoidal é definida pelos parâmetros  $a, b, c$  e  $d$ , Figura 2.22, com  $a \leq b < c \leq d$ , e pode ser gerada pelas expressões contidas nas Equações (2.24) e (2.25) (THE MATHWORKS INC., s.d.):

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.24)$$

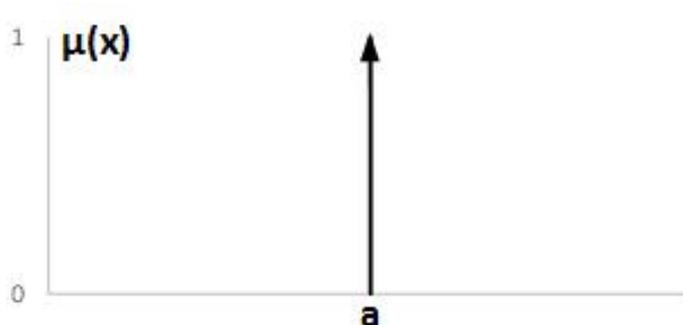
$$f(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (2.25)$$



**Figura 2.22** - Função de pertinência trapezoidal.  
 Fonte: Adaptado de CAMBOIM (2008).

A Função *singleton* é definida pela Equação (2.26) (PASSINO e YURKOVICH, 1998):

$$f(x, a) = \begin{cases} 0, & x \neq a \\ 1, & x = a \end{cases} \quad (2.26)$$

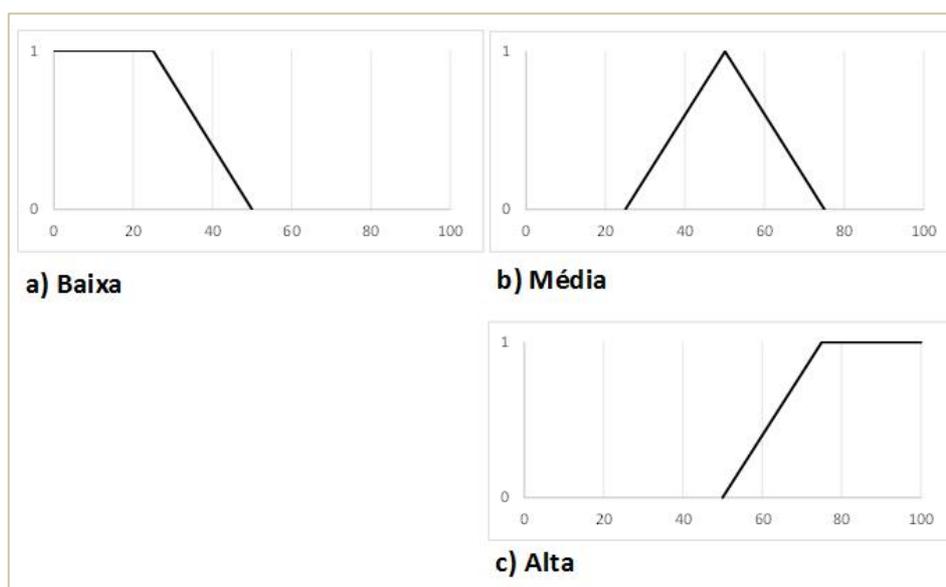


**Figura 2.23** - Função de pertinência *singleton*.  
 Fonte: Adaptado de CAMBOIM (2008).

#### 2.2.4.2 - Variáveis Linguísticas

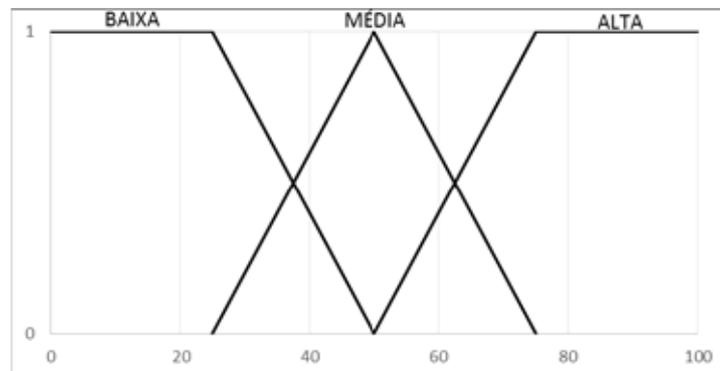
Diferentemente das variáveis numéricas cujos valores assumidos são números, as variáveis linguísticas admitem como valores apenas expressões linguísticas como *frio*, *quente*, *muito quente*, etc. (ALMEIDA e EVSUKOFF, 2005), e essas expressões são representadas por conjuntos *fuzzy* existentes no universo de discurso onde a variável está definida.

Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores *baixa*, *média* e *alta*. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 2.24 (TANSCHKEIT, 2004):



**Figura 2.24** - Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas.  
 Fonte: Adaptado de AGUADO e CANTANHEDE (2016).

É bastante comum este tipo de representação ser apresentada em um único gráfico, conforme se pode verificar na Figura 2.25.



**Figura 2.25** - Variável temperatura e suas respectivas funções de pertinência no seu universo de discurso (0 a 100 °C).

Fonte: Adaptado de AGUADO e CANTANHEDE (2016).

O conjunto de funções de pertinência associado a uma variável específica deve cobrir todo o universo de discurso desta variável (SIMÕES e SHAW, 2007).

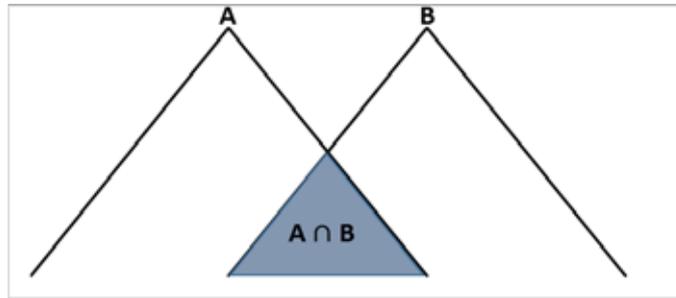
### 2.2.4.3 - Operações entre Conjuntos *Fuzzy*

A exemplo do que ocorre com conjuntos ordinários, há uma série de definições e operações envolvendo conjuntos *fuzzy* (SIMÕES e SHAW, 2007). Apresentam-se aqui, apenas, as operações de união e intersecção *fuzzy*.

#### 2.2.4.3.1 - Intersecção de Conjuntos *Fuzzy*

Semelhante a intersecção de conjuntos clássicos a intersecção de conjuntos *fuzzy* é a parte comum dos conjuntos A e B e, como resultado, é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais A e B, ver Figura 2.26 (SIMÕES e SHAW, 2007). Assim a intersecção de conjuntos *fuzzy* pode ser definida pelo operador *min*, tal como indicado na Equação (2.27):

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.27)$$

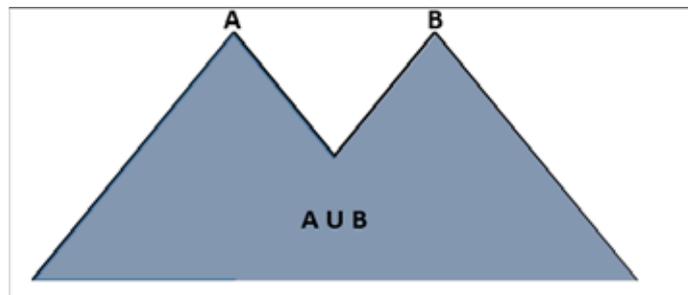


**Figura 2.26** - Exemplo de intersecção de conjuntos *fuzzy*.  
 Fonte: SIMÕES e SHAW (2007).

#### 2.2.4.3.2 - União de Conjuntos *Fuzzy*

A união é o contorno que inclui ambos os conjuntos *fuzzy* A e B, e, portanto, é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais A e B, tal como sugere a Figura 2.27 (SIMÕES e SHAW, 2007). Assim a união de conjuntos *fuzzy* pode ser definida pelo operador *max* tal como indicado na Equação (2.28):

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.28)$$

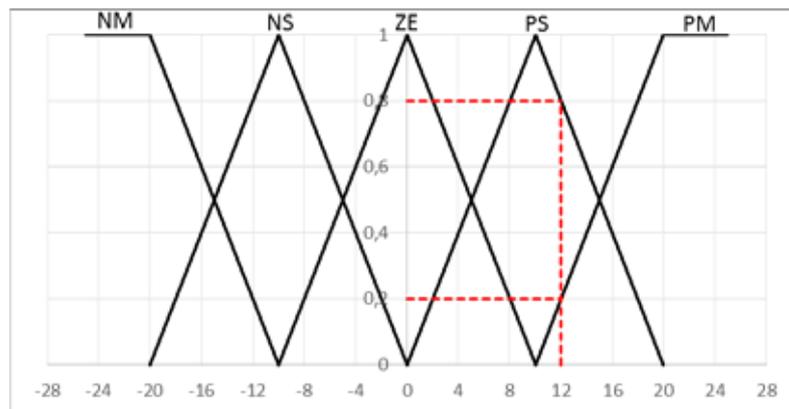


**Figura 2.27** - Exemplo de união de conjuntos *fuzzy*.  
 Fonte: SIMÕES e SHAW (2007).

#### 2.2.4.4 - Fuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio *fuzzy* (SIMÕES e SHAW, 2007). Consiste na tradução de valores numéricos em variáveis linguísticas ou nebulosas. Este procedimento é executado utilizando-se as funções de pertinência que definem cada conjunto nebuloso. O que a etapa de fuzzificação faz, em resumo, é gerar um vetor de pertinências para cada variável de entrada, vetores estes que serão entregues posteriormente à etapa de inferência onde serão avaliados para que alguma decisão seja tomada (NETTO, 2005).

A Figura 2.28 mostra um conjunto de cinco funções de pertinência, com rótulos linguísticos *NM*, *NS*, *ZE*, *PS* e *PM* (*Negative Medium*, *Negative Small*, *Zero*, *Positive Small*, *Positive Medium*). Para fuzzificar o valor discreto +12, uma linha vertical é traçada no ponto +12 e ela corta apenas as funções de pertinência *PM* e *PS*, sem interceptar nenhuma outra. O equivalente fuzzificado do valor discreto +12, pertence à função de pertinência *fuzzy PM* com grau 0,2 e a função de pertinência *fuzzy PS* com grau 0,8 e à todas as outras funções de pertinência *fuzzy* com grau 0; assim, o vetor *fuzzy* equivalente ao número discreto +12 é {0; 0; 0; 0,8; 0,2}.



**Figura 2.28** - Exemplo de fuzzificação do número discreto +12.  
 Fonte: Adaptado de SIMÕES e SHAW (2007).

#### 2.2.4.5 - Regras de Produção *Fuzzy*

A maneira mais comum de se armazenar informações em uma Base de Conhecimento *fuzzy* é a representação através de regras de produção *fuzzy*. Uma regra de produção normalmente é formada de duas partes principais:

$$SE < antecedente > ENTÃO < consequente >$$

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência *fuzzy*. O processo acima descrito denomina-se disparo de uma regra (ALMEIDA e EVSUKOFF, 2005). Em geral o conectivo lógico *E* é usado para combinar as variáveis da parte antecedente da regra. Um exemplo do uso do conectivo *E* usado para conectar duas variáveis diferentes em uma sentença do tipo *SE ... ENTÃO* seria:

$$SE \text{ pressão } = < \text{baixa} > \text{ E } \text{ temperatura } = < \text{média} > \text{ ENTÃO } \text{ válvula } = < \text{abrir um pouco} >.$$

#### 2.2.4.6 - Método de Inferência *Fuzzy*

A escolha do método para combinar conjuntos associados às variáveis do sistema tem grande importância na estrutura do controlador (SIMÕES e SHAW, 2007). A seguir o método *MAX-MIN* ou inferência *MAX-MIN*, proposto por Mamdani, é exposto através de um exemplo simples. Este método utiliza as operações de união e de interseção entre conjuntos da mesma forma apresentada anteriormente, através dos operadores de máximo (*max*) e de mínimo (*min*), respectivamente.

Considere um controlador *fuzzy* de apenas 2 entradas e 1 saída, consistindo de apenas duas regras. As variáveis de entrada serão:  $Var1_{IN}$  e  $Var2_{IN}$  e a variável de saída será  $Var_{OUT}$ . Cada variável possui três valores linguísticos representados pelos conjuntos *fuzzy* *NS*, *ZE* e *PS* (*Negative Small*, *Zero*, *Positive Small*).

Regra 1: ***SE***  $Var1_{IN}$  = ***PS*** ***E***  $Var2_{IN}$  = ***ZE*** ***ENTÃO***  $Var_{OUT}$  = ***NS***

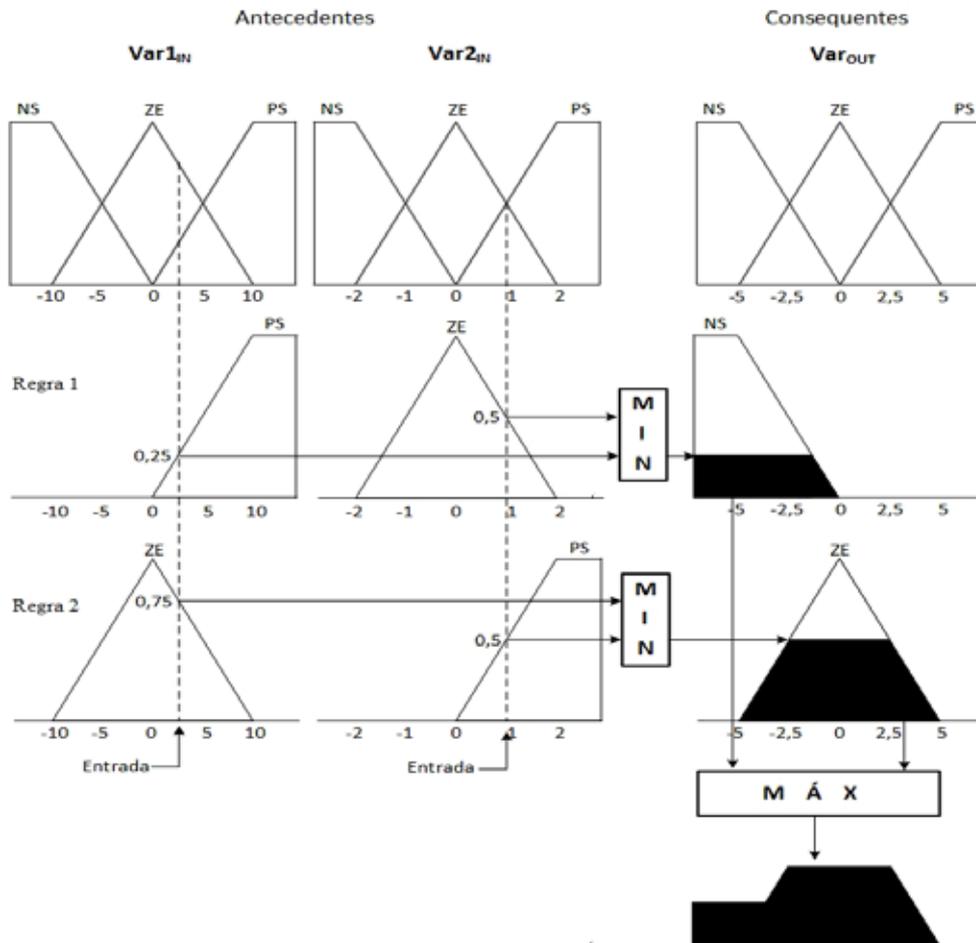
Regra 2: ***SE***  $Var1_{IN}$  = ***ZE*** ***E***  $Var2_{IN}$  = ***PS*** ***ENTÃO***  $Var_{OUT}$  = ***ZE***

O primeiro passo é o processamento do antecedente das regras. Os conjuntos *fuzzy* de pertinência *PS* e *ZE* para a Regra1 e *ZE* e *PS* para a Regra2 são combinados usando o operador *min* que corresponde ao conectivo ***E*** de acordo com as regras da intersecção *fuzzy*. Esta operação é chamada agregação.

As entradas do sistema ( $Var1_{IN}$  e  $Var2_{IN}$ ) são plotadas no eixo horizontal, tal como mostra a Figura 2.29. Considere a Regra 1, para  $Var1_{IN} = 2,5$  e  $Var2_{IN} = 1$ , linhas verticais construídas sobre estes valores cruzam os conjuntos antecedentes *PS* e *ZE* em 0,25 e 0,5, respectivamente, ver Figura 2.29. Esses valores são combinados usando o conectivo ***E*** que corresponde ao operador *min*, resultando, portanto em 0,25. O conjunto *fuzzy* consequente será ceifado (truncado) por este valor. Gráficamente uma linha horizontal é projetada sobre o conjunto *fuzzy* consequente *NS*. Assim, a operação *min* trunca o conjunto *fuzzy* consequente.

O segundo passo é o processamento da contribuição de cada regra. Nesta operação, chamada composição, os conjuntos *fuzzy* truncados resultantes da agregação são combinados usando o operador *max*, que corresponde ao conectivo ***OU*** de acordo com as regras da união *fuzzy*. O operador *max* cria o contorno ou envelope comum aos dois conjuntos *fuzzy*, tal como ilustrado na Figura 2.29.

Para um sistema com  $n$  regras, o procedimento é o mesmo que o descrito, com contribuições de cada regra individualmente de forma a se obter a saída (SIMÕES e SHAW, 2007).



**Figura 2.29** - Sistema usando inferência max-mín.  
Fonte: Adaptado de SIMÕES e SHAW (2007).

No processamento dos antecedentes, tanto a regra 1 quanto a regra 2 geraram graus de pertinência não nulos (0,25 e 0,5, respectivamente), diz-se então, que as regras 1 e 2 foram disparadas ou ativadas para as entradas ( $Var1_{IN} = 2,5$  e  $Var2_{IN} = 1$ ).

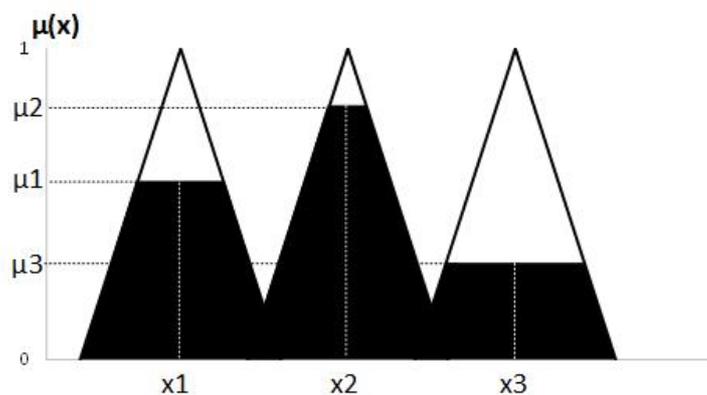
Se pelo menos um grau de pertinência for zero entre as variáveis conectadas pelo conectivo **E**, parte antecedente das regras, resultará em grau de pertinência nulo. Diz-se então que a regra não foi ativada e não contribuirá para a saída.

### 2.2.4.7 - Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto. O objetivo é obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos, e que possa ser utilizado numa ação de controle concreta no mundo real (SIMÕES e SHAW, 2007).

Os métodos de defuzzificação mais utilizados são: Centro da Área (CA), Centro do Máximo (CM), e Média-do-Máximo (MM) (SIMÕES e SHAW, 2007). A seguir o método Centro do Máximo, utilizado neste trabalho, será apresentado. Este método tem como vantagem principal o menor esforço computacional no cálculo da saída.

No método Centro do Máximo a saída é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são o resultado da inferência. A Figura 2.30 dá um exemplo de defuzzificação usando o método Centro do Máximo, onde o valor defuzzificado é calculado pela seguinte Equação (2.29) (NATIONAL INSTRUMENTS, s.d.).



**Figura 2.30** - Defuzzificação pelo Centro-do-Máximo.  
Fonte: Adaptado de NATIONAL INSTRUMENTS.

$$x_{\text{final}} = \frac{x_1\mu_1 + x_2\mu_2 + x_3\mu_3}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3} \quad (2.29)$$

Generalizando para  $n$  funções obtém-se a Equação (2.30).

$$x_{\text{final}} = \frac{x_1\mu_1 + x_2\mu_2 + x_3\mu_3 + \dots + x_n\mu_n}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n} \quad (2.30)$$

Assim, as áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel e apenas os máximos (pertinências *Singleton*) são usados (SIMÕES e SHAW, 2007).

### 2.2.4.8 - Vantagens e Desvantagens

Dentre as principais vantagens e desvantagens do sistema *fuzzy* encontrados na literatura podem-se destacar (SANCHES, 2009):

#### 2.2.4.8.1 - Vantagens

- A capacidade de controlar sistemas com muitas variáveis de saída utilizando um só controlador *fuzzy*, com um bom desempenho;
- A facilidade de utilizar expressões utilizadas na linguagem natural na elaboração das proposições linguísticas;
- A habilidade de controlar processos com característica não-linear e de alta ordem, na qual a determinação do modelo matemático e o controle clássico do sistema são muito complexos;
- A facilidade de implementação de técnicas de controle baseadas na experiência de um especialista e em aspectos intuitivos, utilizando proposições linguísticas (regras) e entradas imprecisas;
- Simplicidade e velocidade do algoritmo;
- Possibilidade de implementação em sistemas digitais de baixo custo.

#### 2.2.4.8.2 - Desvantagens

- A dificuldade de análise de aspectos de estabilidade e robustez;
- A influência da grande quantidade de parâmetros na configuração geralmente feita pelo usuário, algumas das quais são: número de funções de pertinência de cada variável, número de regras, seleção dos métodos de implicação e agregação, método de defuzzificação, assim como os parâmetros de cada função de pertinência;
- Geralmente a precisão do sistema *fuzzy* é limitada pela experiência do especialista na configuração dos parâmetros, a qual é determinada pelo conhecimento do processo pelo especialista;
- Dificuldade maior em sintonizar e ajustar o controlador ao problema específico.

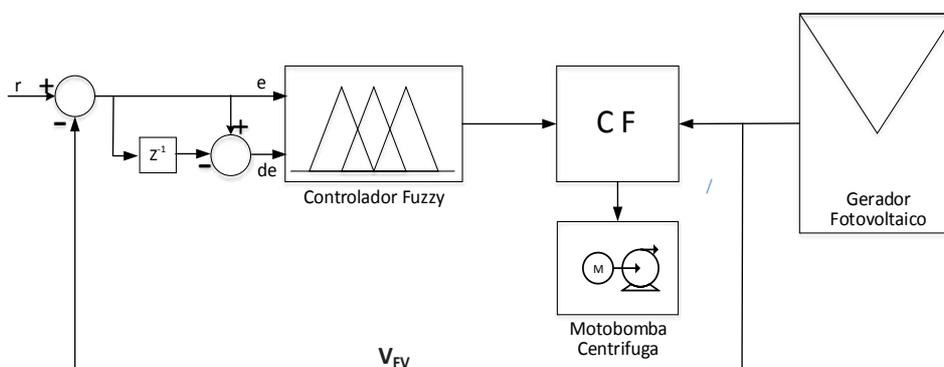
## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

#### 3.1 - INTRODUÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* NA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOBEAMENTO

Quando o processo a ser controlado apresenta características não lineares e variantes com o tempo, o desempenho do controlador PID fica comprometido e pode necessitar de repetidos ajustes de sintonia. Geradores FVs possuem características não lineares e variantes com o tempo (XIAO e PALMER, 2007), o que torna conveniente o uso de estratégias de controle mais apropriadas para trabalhar com as não linearidades impostas pelo sistema. Neste cenário, propõe-se uma nova configuração, tal como ilustrado na Figura 3.1, onde o controlador PID é substituído por um controlador *fuzzy* baseado em regras. O controlador *fuzzy* proposto tem a capacidade de lidar com as não linearidades e as variações com o tempo, intrínsecas desse tipo aplicação. Esta nova configuração possibilita, ainda, o uso de CFs que não possuem controlador incorporado ao seu *software*.

O projeto de controladores *fuzzy* não segue o mesmo padrão adotado pelos controladores clássicos. Eles não necessitam da modelagem matemática do processo a ser controlado (planta), porém, algum conhecimento do comportamento do sistema se faz necessário. Caso este conhecimento não esteja disponível, alguns experimentos ou simulações poderão fornecer um mínimo de conhecimento de modo que o projeto seja viabilizado.



**Figura 3.1** - Bombeamento fotovoltaico utilizando CF e controlador *fuzzy* externo.

## **3.2 - ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS**

As escolhas da motobomba, do CF e da potência do gerador fotovoltaico estão ligadas ao projeto de sistemas de bombeamento. Através do projeto, pretende-se adequar essas escolhas às necessidades definidas pela demanda de água requerida. Em GTES(2014) é possível consultar procedimentos para o projeto de sistemas fotovoltaicos dedicados ao bombeamento de água.

Em ALONSO-ABELA *et al.* (2002) é apresentado um procedimento simplificado para o projeto de sistemas fotovoltaico de bombeamento usando CFs e bombas centrífugas convencionais. O problema do projeto consiste basicamente na determinação da curva Potência CC versus Vazão para uma determinada altura manométrica H, partindo dos dados fornecidos pelo fabricante da motobomba que são normalmente as seguintes curvas: Altura Manométrica versus Vazão e Rendimento versus Vazão.

### **3.2.1 - Escolha da Motobomba**

Neste trabalho é utilizada a motobomba centrífuga multiestagio de 0,5 cv de potência, modelo SUB 15, fabricante Schneider. A escolha da motobomba está diretamente ligada a estimativa do consumo diário de água (GTES, 2014). As curvas fornecidas pelo fabricante para a motobomba escolhida foram apresentadas no subitem 2.1.4, Figura 2.15.

### **3.2.2 - Escolha do Conversor de Frequência Monofásico**

Obviamente o primeiro critério para a escolha do CF é que ele seja capaz de acionar a motobomba selecionada evitando o sobredimensionamento e consequentemente o encarecimento do produto.

No subitem 0 foi mostrado que os CFs monofásicos possuem circuitos de entrada distintos, de acordo com o modelo. É importante observar que quando alimentados por geradores fotovoltaicos os circuitos de entrada ficam sem função. Os

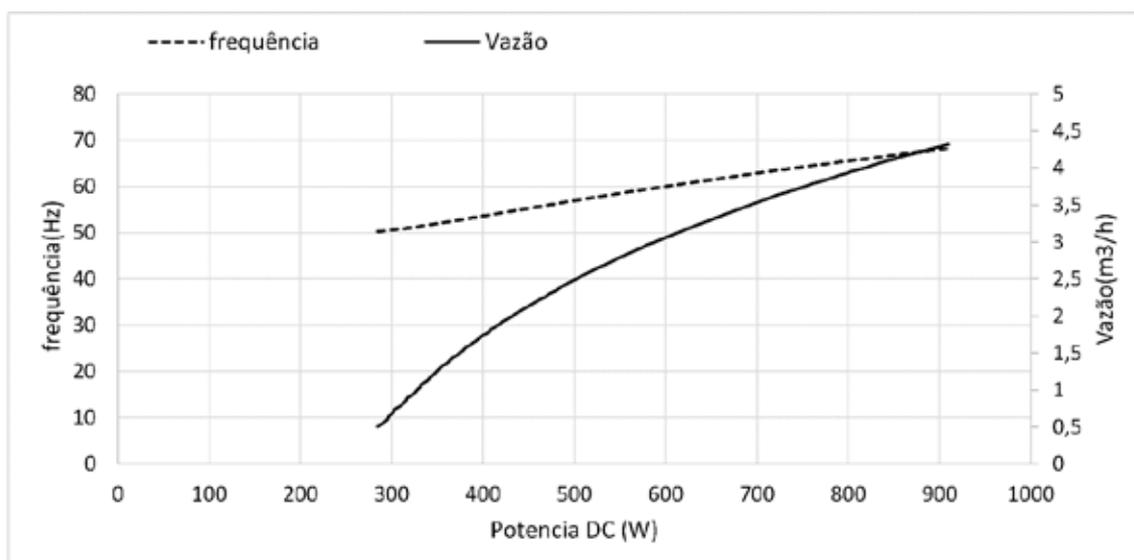
efeitos de retificar e dobrar a tensão não acontecem, uma vez que a alimentação do CF é proveniente de uma fonte contínua, portanto, a tensão do barramento CC do CF, será a tensão do gerador fotovoltaico menos a queda de tensão nos diodos do circuito de entrada.

Naturalmente, utilizar o menor número de módulos é importante para a redução de custos, então, para os sistemas fotovoltaicos de bombeamento utilizando CFs monofásicos, ao contrário do que poderia se imaginar em um primeiro momento, a escolha recai nos modelos 200-240 V por necessitarem de uma tensão mínima em seu barramento CC menor que os modelos 110-127 V (ver subitem 0). O CF escolhido para os testes é o conversor de frequência monofásico série CFW-10, modelo 7,3 A/200-240 V-fabricante WEG.

O ponto de operação ótimo para sistemas fotovoltaicos é o ponto de máxima potência e para que não aconteça bloqueio do CF por erro de subtensão a tensão de operação deve ser maior que a tensão mínima permitida para o barramento CC do CF (200 V para o CF-10, modelo 200-240).

### **3.2.3 - Potência do Gerador**

Partindo dos dados fornecidos pelo fabricante da motobomba centrífuga multiestagio de 0,5 cv de potência, modelo SUB 15 (fabricante Schneider) e de posse das Equações (2.12) a (2.20), utilizando o procedimento descrito em ALONSO-ABELA *et al.* (2002), é possível determinar as curvas Vazão versus Potência CC e Frequência versus Potência CC que permitem estimar a potência do gerador fotovoltaico necessária para acionar o conjunto CF + Motobomba. A Figura 3.2 mostra as referidas curvas para o sistema, considerando a altura manométrica de 35 mca.



**Figura 3.2** - Exemplo de curvas teóricas obtidas utilizando modelo simplificado descrito em ALONSO-ABELA *et al.* (2002) para a motobomba Schneider modelo SUB 15-0,5 cv para altura manométrica de 35 mca.

Fonte: Adaptado de ALONSO-ABELA *et al.* (2002).

Segundo ALONSO-ABELA e BLANCO (2002), a potência máxima nominal do gerador fotovoltaico deve ser 1,15 vezes o valor da potência estimada na frequência nominal de operação da motobomba (60 Hz). Pelo gráfico da Figura 3.2, para uma frequência de 60 Hz, o valor estimado para a potência é de aproximadamente 600 W, portanto, a potência máxima nominal do gerador fotovoltaico deve ser de aproximadamente 690 Wp ( $1,15 \times 600$  W).

Neste trabalho é utilizado o módulo modelo S 55P, 36 células do fabricante Solares cuja potência máxima nominal é de 55 Wp<sup>4</sup>, dessa maneira, para que se alcance a potência exigida para o gerador são necessários 13 (treze) destes módulos conectados em série. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros característicos para o módulo e o gerador fotovoltaico e a Figura 3.3 apresenta as curvas característica para o módulo obtidas através de ensaio realizado no laboratório do GEDAE/UFPA.

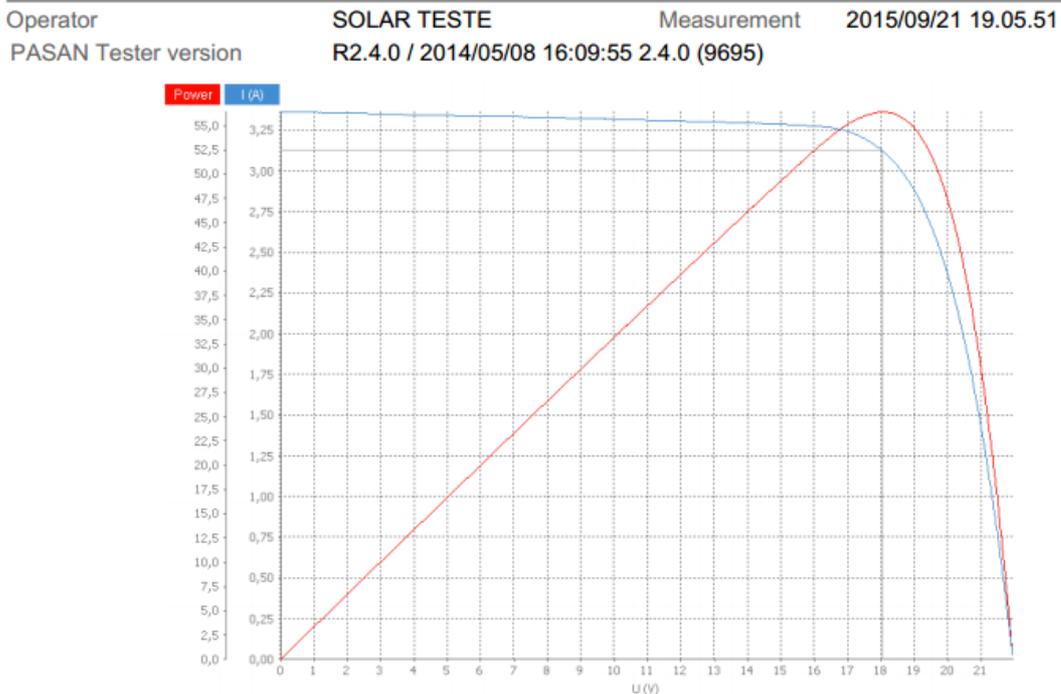
**Tabela 3.1** - Parâmetros do módulo (extraídos da folha de dados do fabricante) e gerador fotovoltaico.

PARÂMETRO	MÓDULO	GERADOR
Pmax	55 Wp	715 Wp
Imp	3,04 A	3,04 A

<sup>4</sup> Wp (Watt-pico) unidade de potência de saída de uma célula, módulo ou gerador fotovoltaico, considerando as condições padrão de teste.

**Tabela 3.1 - Continuação.**

Vmp	18,20 V	236,60 W
Isc	3,24 A	3,24 A
50Voc	21,85 V	284,05 W
NOCT	47 °C	47 °C



**Figura 3.3 -** Curvas I-V e P-V para o módulo modelo S 55P, fabricante Solares obtidas de ensaio no laboratório do GEDAE/UFPA.

### 3.3 - PARAMETRIZAÇÃO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

Na configuração proposta na Figura 3.1, o controlador *fuzzy* é responsável por manter o sistema operando no ponto estabelecido (*set-point*) e para que se obtenha o desempenho esperado, é necessário programar alguns parâmetros do CF. Este procedimento chama-se parametrização do CF e é detalhado a seguir para o conversor de frequência monofásico série CFW-10, modelo 7,3 A/200-240 V- fabricante WEG, que é o equipamento utilizado para os testes.

Parametrizar um inversor é instruí-lo (programá-lo) em quais condições ele irá operar, para que funcione corretamente. O número de parâmetros disponibilizados para programação depende principalmente da quantidade de recursos oferecida pelo equipamento. Para que o controlador *fuzzy* possa desempenhar sua função de maneira correta, os seguintes parâmetros devem ser alterados para os valores indicados na coluna *Ajuste do Usuário*, de acordo com a Tabela 3.2. Nos parágrafos subsequentes,

são apresentadas algumas observações sobre os ajustes realizados. Essas observações tem o objetivo de melhorar entendimento sobre a funcionalidade dos principais parâmetros ajustados.

**Tabela 3.2 - Parametrização para o inversor.**

Parâmetro	Função	Faixa de Valores	Ajuste de Fábrica	Unidade	Ajuste do Usuário
P100	Tempo de Aceleração	0,1 a 999	5,0	s	0,1
P101	Tempo de Desaceleração	0,1 a 999	10,0	s	0,1
P133	Frequência Mínima (F <sub>min</sub> )	0,00 a P134	3,0	Hz	0,0
P202	Tipo de Controle	0=Controle V/F Linear 1=Controle V/F Quadrático	0	-	1
P229	Seleção de Comandos – Situação	0=Teclas HMI 1=Bornes	0	-	1
P234	Ganho da Entrada Analógica	0,0 a 999	100	%	210
P248	Constante de Tempo do Filtro da Função da Entrada Digital DI1	0 a 200	200	ms	0
P263	Função da Entrada Digital DI1	0=Sem Função 1=Sem Função ou Habilita Geral 2=Habilita Geral 3=JOG 4=Gira/Para 5=Sentido de Giro 6=Local/Remoto 7=Multispeed 8=Multispeed com 2ª rampa 9=Avanço 10=Retorno 11=Avanço com 2ª rampa 12=Retorno com 2ª rampa 13=Liga 14=Desliga 15=Ativa 2ª rampa 16=Acelera E.P. 17=Desacelera E.P. 18=Acelera E.P. com 2ª rampa 19=Desacelera E.P. com 2ª rampa 20=Sem Erro Externo 21=Reset de Erro 22=Liga/Acelera E.P. 23=Desacelera E.P. / Desliga 24=Parar 25=Chave de Segurança 26=Entrada em frequência 27=Manual/Automático(PID)	1	-	13
P264	Função da Entrada Digital DI2		5	-	14
P266	Função da Entrada Digital DI4		4	-	21

Fonte: CFW-10 - Manual do Usuário (WEG S/A).

A decisão de acelerar/desacelerar rapidamente ou lentamente de acordo com a necessidade é do controlador *fuzzy*, por isso, os tempos de aceleração e desaceleração (P100 e P101) devem ser mínimos, de maneira a não interferir na ação de controle. O mesmo raciocínio pode ser estendido para o parâmetro P133.

O ajuste do parâmetro P202 está relacionado com o tipo de carga acionada pelo CF. Bombas centrífugas são cargas com característica torque-velocidade quadrática.

Toda operação do CF será comandada via bornes, por isso o ajuste do parâmetro P229.

A faixa de variação do sinal de controle é de 0 a 5 volts<sup>5</sup> e o sinal de comando para a Entrada Analógica AI1 do CF varia de 0 a 10 volts, portanto, o ganho da entrada analógica deve ser 2 (para o CFW-10 este valor está em porcentagem - P234). O ajuste do parâmetro fixado em 210 estabelece uma pequena folga na excursão do sinal de controle (0 a 4.76 volts) prevendo possíveis variações no sinal de alimentação do microcontrolador.

Como mencionado, o CF é comandado via bornes, ao Programar as Entradas Digitais DI1, DI2 e DI4 (P263, P264 e P266 respectivamente) é possível Ligar, Desligar e *Resetar* o CF via sinais de comando vindos do microcontrolador PIC<sup>6</sup>.

Os demais parâmetros não citados na tabela devem permanecer com seus ajustes de fábrica.

### **3.4 - CONTROLADOR *FUZZY* PROPOSTO**

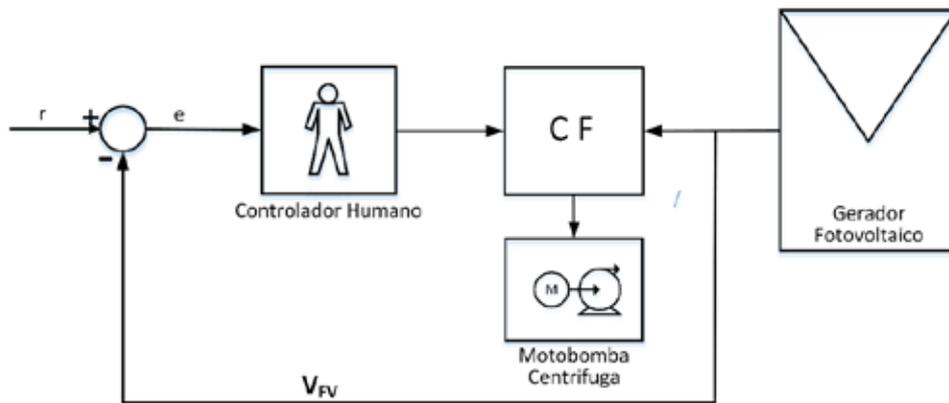
#### **3.4.1 - Concepção**

Considere um humano dentro da malha de controle cuja responsabilidade é controlar a velocidade da motobomba através de um CF alimentado por um gerador fotovoltaico, como mostrado na Figura 3.4. O controlador *fuzzy* deve ser projetado para automatizar a forma como um especialista humano, que é bem sucedido nesta tarefa, iria controlar o sistema. Em primeiro lugar, o perito (o projetista do controlador *fuzzy*) escolhe quais informações ele vai usar como entradas para o processo de tomada de decisão. Normalmente, utiliza-se uma função erro e a variação da função erro como as variáveis em que se baseiam as decisões.

---

<sup>5</sup> 0 a 5V é a faixa de tensão que o microcontrolador pode fornecer.

<sup>6</sup> Microcontrolador PIC é o dispositivo utilizado para embarcar o controlador *fuzzy*.

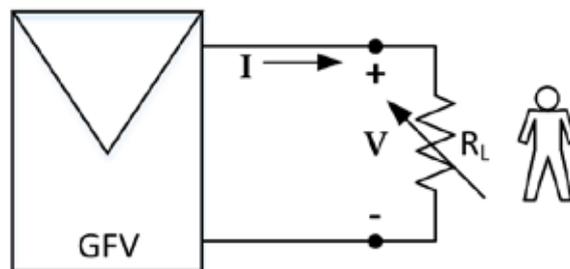


**Figura 3.4** - Controle humano no sistema de bombeamento.

Em seguida, identifica-se a variável controlada. Por motivos já expostos, a escolha recai na tensão de barramento CC do CF que é também a tensão do gerador fotovoltaico. A variável de controle - saída do controlador - será o incremento da tensão aplicada na entrada analógica do CF<sup>7</sup>. Ao incrementar (ou decrementar) a tensão aplicada nesta entrada é possível acelerar ou desacelerar a motobomba.

Uma vez que as entradas e saídas do controlador *fuzzy* foram escolhidas, deve-se determinar a referência de entrada – o ponto de operação desejado. Para o sistema de bombeamento fotovoltaico a escolha óbvia é a tensão de máxima potência.

Depois que todas as entradas e saídas são definidas, é necessário procurar obter uma descrição de como controlar o processo. Por exemplo, considere um gerador fotovoltaico alimentando uma carga resistiva ( $R_L$ ) cuja resistência pode ser controlada, Figura 3.5.

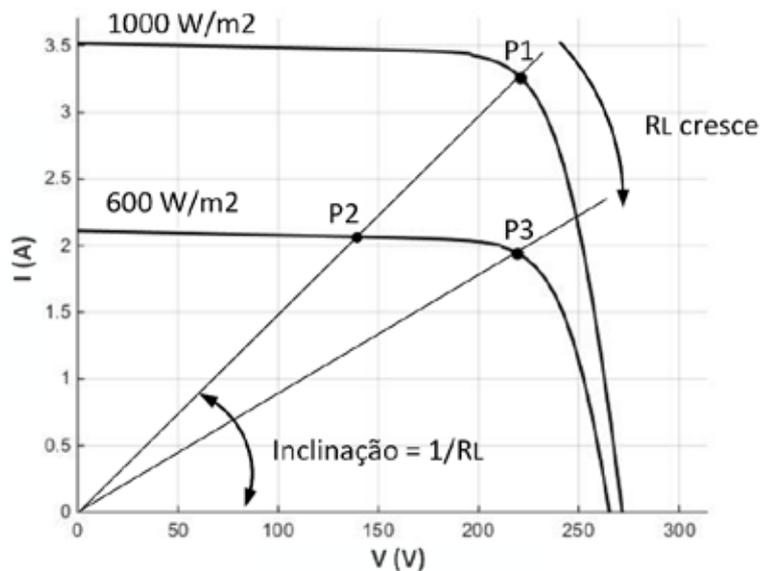


**Figura 3.5** - Gerador fotovoltaico alimentando carga resistiva.

Fonte: Adaptado de OI (2005).

<sup>7</sup> O microcontrolador não possui saída analógica, o que será incrementado é o ciclo de trabalho (duty cycle) de um sinal digital PWM que posteriormente será filtrado, obtendo dessa maneira, um sinal analógico proporcional a este ciclo.

Agora, observando o gráfico da Figura 3.6, suponha que o sistema esteja operando no ponto de máxima potência P1 e que uma queda repentina da irradiância, de  $1000 \text{ W/m}^2$  para  $600 \text{ W/m}^2$ , ocorresse. Isto acarretaria o deslocamento do ponto de operação para P2, fazendo com que o sistema passe a operar na região de fonte de corrente. Percebe-se que houve uma grande queda na tensão do ponto de operação. Neste caso, o que se esperaria de uma ação de controle é que a resistência de carga fosse incrementada a fim de que o sistema passe a operar no ponto P3.



**Figura 3.6** - Deslocamento do ponto de operação com a mudança da irradiância e variação da carga.

Essencialmente, é este comportamento que se espera do controlador *fuzzy* para o sistema de bombeamento, ele deve ser capaz de reduzir a frequência do CF (a frequência do CF pode ser reduzida, reduzindo-se a tensão em sua entrada analógica) sempre que houver uma queda repentina da irradiância. Reduzindo-se a frequência do CF, haverá redução da velocidade da motobomba, que ao fazer esta redução faz com que o motor da bomba entre na operação geradora, transferido parte da energia armazenada nas massas girantes para os capacitores do barramento do CF (CORRÊA, 2008), ajudando a evitar erros de subtensão.

Obviamente o mesmo raciocínio pode ser usado quando o sistema estiver operando com baixa irradiância (normalmente devido a passagem de nuvens) e houver aumento da irradiância. Neste caso, o sistema passa a operar na região de fonte de tensão e a ação de controle deve aumentar a velocidade da motobomba a fim de levar o sistema a operar no ponto de máxima potência.

### 3.4.2 - Projeto

As variáveis de entrada que são as funções erro e variação do erro são definidas, no domínio discreto, pelas Equações (3.1) e (3.2):

$$e(k) = V_{SP}(k) - V_{FV}(k) \quad (3.1)$$

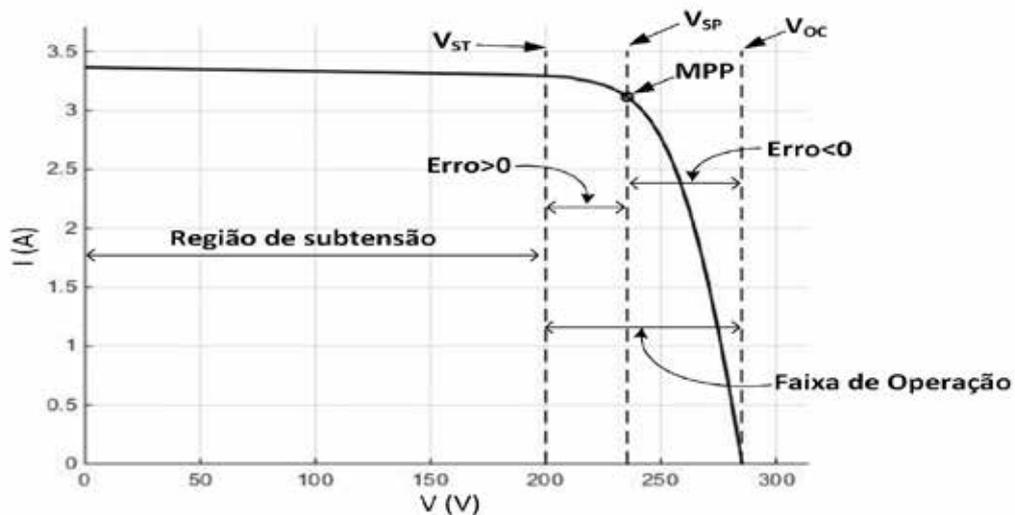
$$de(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (3.2)$$

Sendo  $V_{SP}(k)$  a tensão de referência (*set-point*), que deve ser a tensão do ponto de máxima potência ( $V_{MPP}$ ) e  $V_{FV}(k)$  é a tensão do gerador fotovoltaico. A faixa de operação para o sistema é limitada a esquerda pela tensão mínima permitida para o barramento do CF, que neste texto é chamado de  $V_{ST}$  e a direita pela tensão de circuito aberto do gerador  $V_{OC}$ . Dessa maneira, o erro assume seu valor mínimo quando a tensão do gerador fotovoltaico for máxima ( $V_{FV} = V_{OC}$ ) e seu valor máximo quando a tensão do gerador assumir seu valor mínimo possível ( $V_{FV} = V_{ST}$ ). Portanto, o universo de discurso da variável erro será o intervalo  $[e_{MIN}, e_{MAX}]$ , onde:

$$e_{MIN} = V_{SP} - V_{OC} \quad (3.3)$$

$$e_{MAX} = V_{SP} - V_{ST} \quad (3.4)$$

Na região compreendida entre  $V_{ST}$  e  $V_{SP}$  o erro é positivo e para a região entre  $V_{SP}$  e  $V_{OC}$  o erro é negativo. A Figura 3.7 ajuda na interpretação da variável erro.



**Figura 3.7** - Regiões de subtensão, erro positivo, erro negativo e faixa de operação do sistema.

Um número de conjuntos *fuzzy* linguísticos (funções de pertinência) situa-se tipicamente entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa. Por exemplo, experiências mostraram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em tomo de 15%, a partir de valores maiores não há melhorias extremamente significativas (SIMÕES e SHAW, 2007).

Neste trabalho as variáveis de entrada assumirão cinco valores linguísticos (*NB*, *NS*, *ZE*, *PS*, *PB*) representados por funções de pertinência triangulares e trapezoidais e a variável de saída assumirá sete valores do tipo *Singleton* (*NB*, *NM*, *NS*, *ZE*, *PS*, *PM*, *PB*).

Conforme visto no subitem 2.2.4.2, a função de pertinência triangular é especificada por três parâmetros (*a*, *b*, *c*) e a função trapezoidal por quatro parâmetros (*a*, *b*, *c*, *d*). As codificações em *linguagem C* para as referidas funções são apresentadas a seguir.

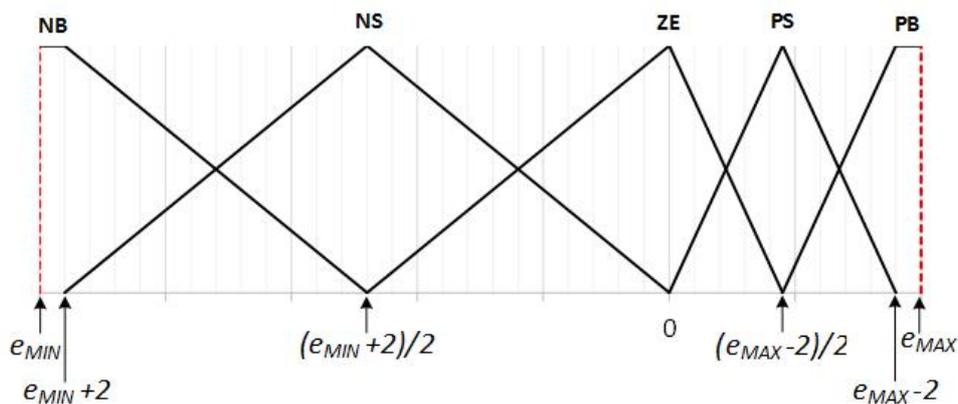
Código para a função de pertinência triangular:

```
float fptri (float x,float a,float b,float c){
float fp=0.0;
if ((x<=a) || (x>=c)){
    fp=0.0;
}
else{
    if (x>=a && x<=b){
        fp=(x-a)/(b-a);
    }
    else{
        fp=(c-x)/(c-b);
    }
}
return fp;
}
```

Código para a função de pertinência trapezoidal:

```
float fptra (float x,float a,float b,float c,float d){
float fp=0.0;
if ((x<=a) || (x>=d)){
    fp=0.0;
}
else{
    if (x>=a && x<=b){
        fp=(x-a)/(b-a);
    }
    else{
        if (x>=b && x<=c){
            fp=1.0;
        }else{fp=(d-x)/(d-c);}
    }
}
return fp;
}
```

A Figura 3.8 mostra como as funções de pertinência *NB* (*Negative Big*), *NS* (*Negative Small*), *ZE* (*Zero*), *PS* (*Positive Small*) e *PB* (*Positive Big*) foram distribuídas no universo de discurso da variável erro.



**Figura 3.8** - Distribuição das funções de pertinência no universo de discurso da variável erro.

Levando em consideração os efeitos da temperatura para os horários de maior irradiância, é possível obter os valores de tensão referentes a máxima potência e ao circuito aberto do gerador fotovoltaico empregado. Assim, considerando a temperatura

da célula em torno de 52 °C e usando a Equação (2.10), os seguintes valores para a tensão de circuito aberto e tensão de máxima potência podem ser calculados:

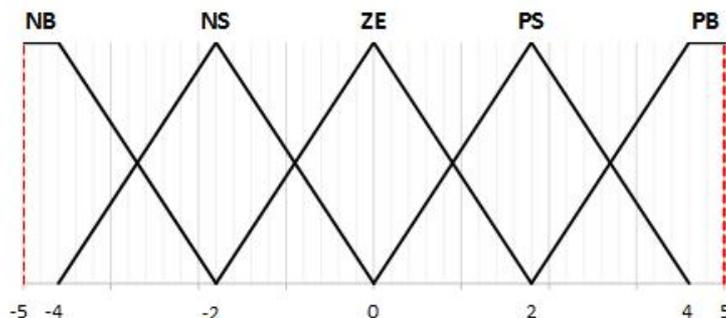
$$\begin{aligned} V_{OC} &= 255 \text{ V} \\ V_{MP} &= 207 \text{ V} \end{aligned}$$

Utilizando as Equações (3.3) e (3.4), os valores para o erro máximo e mínimo são:

$$\begin{aligned} e_{MIN} &= V_{SP} - V_{OC} = 207 - 255 = -48 \text{ V} \\ e_{MAX} &= V_{SP} - V_{ST} = 207 - 200 = 7 \text{ V} \end{aligned}$$

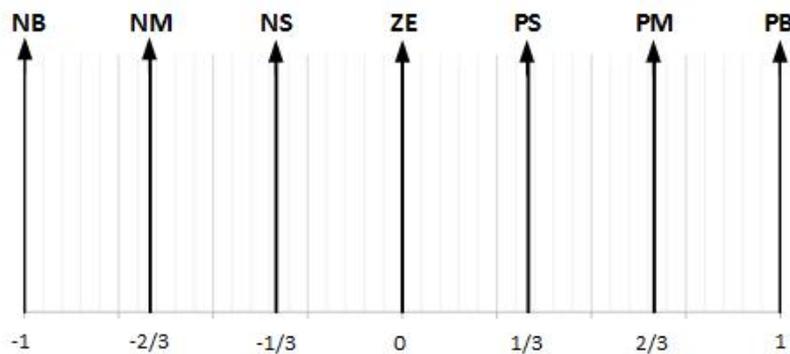
Os conjuntos são mais estreitos quando o erro é positivo e, portanto, mais sensíveis. Isto faz com que o sistema seja mais reativo a variações quando opera nesta região o que é desejável, pois esta é a zona de operação mais próxima da região que deve ser evitada (região de subtensão).

O universo de discurso para a variação do erro foi estabelecido por tentativa e observação. Partindo inicialmente do intervalo [-1,1], então, para cada tentativa incrementava-se os limites do intervalo em uma unidade ([-2,2], [-3,3], [-4,4], etc.). Essa escolha não é crítica, pois alguns dos intervalos experimentados apresentaram bom desempenho. O intervalo escolhido foi de [-5,5]. A Figura 3.9 mostra como as funções de pertinência para a variação do erro foram distribuídas no universo de discurso adotado.



**Figura 3.9** - Distribuição das funções de pertinência no universo de discurso da variável variação do erro.

A variável de saída será o incremento (ou decremento) do ciclo de trabalho de um sinal modulado por largura de pulso - PWM ( $dD$ ). Para esta variável o seu universo de discurso será normalizado no intervalo de  $[-1,1]$ , tal como indicado na Figura 3.10. O intuito de se normalizar a variável de saída é que pela simples multiplicação de uma constante podemos ajustar o seu universo de discurso de maneira a obter uma resposta satisfatória do sistema.

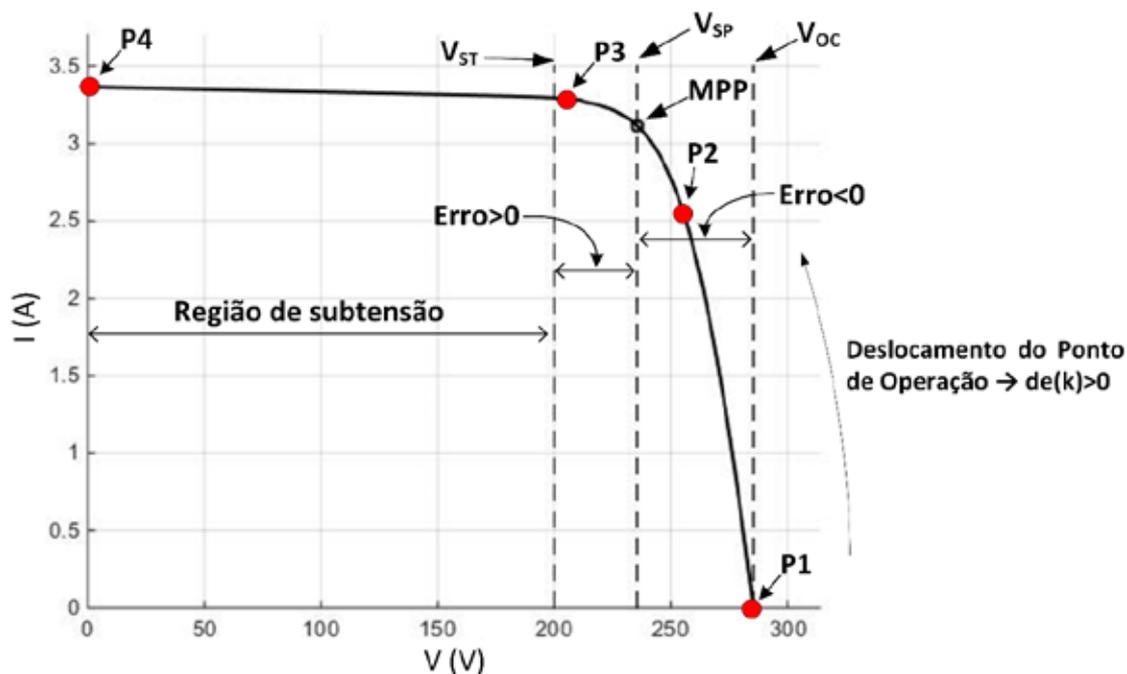


**Figura 3.10** - Funções de pertinência para a variável de saída.

### 3.4.2.1 - A Base de Regras de Inferência

Como mencionado anteriormente, basicamente o que diferencia um controlador *fuzzy* de outro controlador *fuzzy* é sua base de regras. É nela que está contido o conhecimento do especialista. As regras relacionam as entradas com a saída e a quantidade delas depende do número de conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada. Para o sistema em questão, são vinte e cinco regras.

Para a formulação das regras, algumas informações sobre as variáveis do controlador *fuzzy* precisam ser obtidas e para isso, o comportamento do sistema para diferentes pontos de operação será analisado com a ajuda da Figura 3.11. Sabe-se que na região limitada a esquerda pela tensão de subtensão ( $V_{ST}$ ) e a direita pela tensão de *set-point* ( $V_{SP}$ ) o erro é positivo e na região limitada a esquerda pela tensão de *set-point* ( $V_{SP}$ ) e a direita pela tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) o erro é negativo. Sabe-se, também, que aumentando e diminuindo o *duty cycle* (ciclo de trabalho) a motobomba acelera e desacelera, respectivamente.



**Figura 3.11** - Deslocamento do ponto de operação nas regiões de erro negativo e erro positivo.

Agora é preciso conhecer como o erro varia em função do deslocamento do ponto de operação do sistema. Inicialmente, considera-se que o sistema esteja operando no ponto P1. Nesse ponto, a motobomba está parada (não há potência consumida do gerador fotovoltaico), o erro é negativo e seu módulo é máximo (em linguagem *fuzzy*, tem-se um erro negativo grande - *NB*). Quando a motobomba é acelerada (incrementando o *duty cycle*) o ponto de operação se desloca em direção ao ponto P2. Neste ponto, o erro ainda é negativo, porém, menor em módulo que o do ponto anterior (em linguagem *fuzzy*, tem-se um erro negativo pequeno - *NS*), portanto, entre estes dois instantes, a variação do erro é positiva, o que leva à seguinte conclusão: se o ponto de operação se desloca em direção ao ponto P4 (ponto de curto circuito) a variação do erro é positiva, caso o deslocamento vá ao encontro do ponto de circuito aberto (P1) a variação do erro é negativa.

O ponto de operação pode se deslocar em diferentes velocidades dependendo, por exemplo, da aceleração da motobomba. Essa característica é expressa pelo módulo da variação do erro. O deslocamento rápido do ponto de operação em direção ao ponto de curto-circuito seria expresso em linguagem *fuzzy* por uma variação do erro ( $de(k)$ ) positivo grande (*PB*).

O que se espera da ação de controle quando o sistema estiver operando próximo ao ponto P1 (erro negativo grande - *NB*) e esteja este ponto se deslocando em direção ao ponto de circuito aberto rapidamente (variação do erro negativo grande - *NB*) é que se tenha uma ação forte e positiva no *duty cycle* acelerando a motobomba, fazendo com que o ponto de operação se desloque em direção ao ponto de máxima potência, isso se traduz na regra:

$$\mathbf{SE\ e = NB\ E\ de = NB\ ENT\tilde{A}O\ dD = PB}$$

Outro trecho que pode ser analisado está em torno do ponto P3 com o ponto de operação se deslocando em direção ao ponto de curto circuito rapidamente. Nesta situação o erro é positivo grande (*PB*) e sua variação também é positivo grande (*PB*), portanto, o ponto caminha rapidamente para a zona de subtensão, logo, esta situação necessita de uma resposta forte e negativa no *duty cycle* provocando a redução da velocidade da motobomba, levando a regra:

$$\mathbf{SE\ e = PB\ E\ de = PB\ ENT\tilde{A}O\ dD = NB}$$

Para finalizar, considerando que o ponto de operação esteja próximo a P2, onde o erro é negativo pequeno (*NS*), e que o mesmo se desloca em direção ao ponto de máxima potência rapidamente (variação do erro é positivo grande - *PB*), neste caso um pequeno acréscimo do *duty cycle* é suficiente, traduzindo-se na regra:

$$\mathbf{SE\ e = NS\ E\ de = PB\ ENT\tilde{A}O\ dD = PS}$$

As demais regras são estabelecidas procedendo de maneira semelhante e estão mostradas a seguir.

- R1 - **SE** e=NB E de=NB **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PB
- R2 - **SE** e=NB E de=NS **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PB
- R3 - **SE** e=NB E de=ZE **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PB
- R4 - **SE** e=NB E de=PS **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PM
- R5 - **SE** e=NB E de=PB **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PS
- R6 - **SE** e=NS E de=NB **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PB
- R7 - **SE** e=NS E de=NS **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PM
- R8 - **SE** e=NS E de=ZE **ENT** $\tilde{A}$ **O** dD=PS

- R9 - **SE** e=NS E de=PS **ENTÃO** dD=PM
- R10 - **SE** e=NS E de=PB **ENTÃO** dD=PS
- R11 - **SE** e=ZE E de=NB **ENTÃO** dD=PM
- R12 - **SE** e=ZE E de=NS **ENTÃO** dD=PS
- R13 - **SE** e=ZE E de=ZE **ENTÃO** dD=Z
- R14 - **SE** e=ZE E de=PS **ENTÃO** dD=NS
- R15 - **SE** e=ZE E de=PB **ENTÃO** dD=NM
- R16 - **SE** e=PS E de=NB **ENTÃO** dD=NS
- R17 - **SE** e=PS E de=NS **ENTÃO** dD=NM
- R18 - **SE** e=PS E de=ZE **ENTÃO** dD=NS
- R19 - **SE** e=PS E de=PS **ENTÃO** dD=NM
- R20 - **SE** e=PS E de=PB **ENTÃO** dD=NB
- R21 - **SE** e=PB E de=NB **ENTÃO** dD=NS
- R22 - **SE** e=PB E de=NS **ENTÃO** dD=NM
- R23 - **SE** e=PB E de=ZE **ENTÃO** dD=NB
- R24 - **SE** e=PB E de=PS **ENTÃO** dD=NB
- R25 - **SE** e=PB E de=PB **ENTÃO** dD=NB

Outra forma de apresentação é na forma de tabela. As vinte cinco regras estabelecidas para o controlador estão dispostas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** - Base de regras.

		Variação do erro (de)				
		NB	NS	ZE	PS	PB
Erro (e)	NB	PB	PB	PB	PM	PS
	NS	PB	PM	PS	PM	PS
	ZE	PM	PS	ZE	NS	NM
	PS	NS	NM	NS	NM	NB
	PB	NS	NM	NB	NB	NB

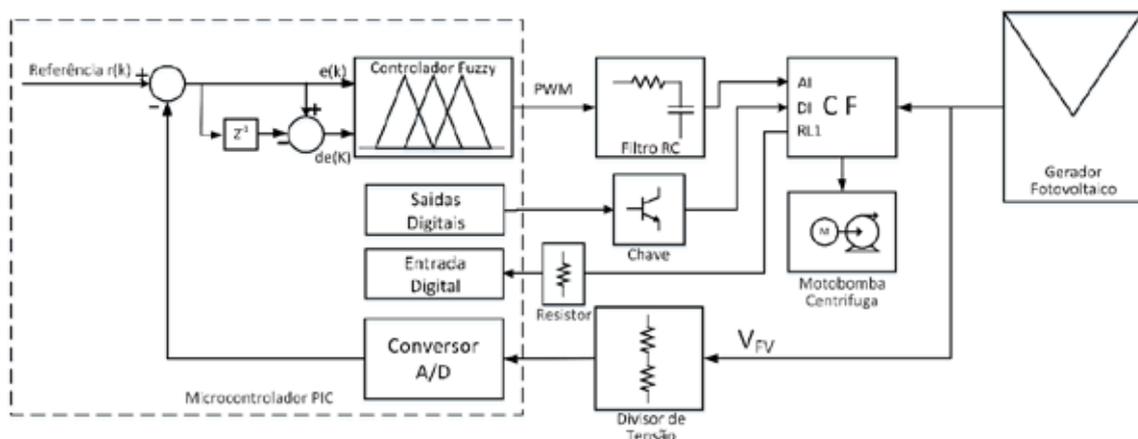
### 3.4.2.2 - Método de Defuzzificação

O método de defuzzificação utilizado é o centro do máximo apresentado com detalhe no subitem 2.2.4.7.

### 3.5 - O SISTEMA EMBARCADO

A Figura 3.12, apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle onde um microcontrolador de uso geral representa o bloco de controle responsável por atuar sobre a entrada do processo – no caso a entrada analógica, AI, do CF. A referência, ou *set-point*, é ajustada internamente ao microcontrolador. O divisor de tensão é o circuito que adéqua a tensão de saída do gerador fotovoltaico,  $V_{PV}$  (sinal de realimentação), a um nível que possa ser tratado pelo microcontrolador (0 a 5 V). O sinal proveniente da saída do divisor de tensão é um sinal analógico que é convertido para digital por meio do conversor A/D, interno ao microcontrolador.

O valor do erro,  $e(k)$ , e sua variação,  $de(k)$ , são calculados internamente e então processados pelo algoritmo *fuzzy*, gerando uma saída PWM cuja frequência é de aproximadamente 300 kHz. O sinal PWM digital é convertido para a forma analógica por meio de um filtro RC passa-baixas (com frequência de corte em torno de 15 Hz) e posteriormente usado para o comando do CF via entrada analógica. A saída a relé (RL1) do CF sinaliza, através de um resistor, ao microcontrolador erros de subtensão. Esses erros são resolvidos através de sinais de comando do microcontrolador PIC para as entradas digitais, DI, do CF via chave a transistor. A ação de controle é realizada a cada 10 ms (período de amostragem)



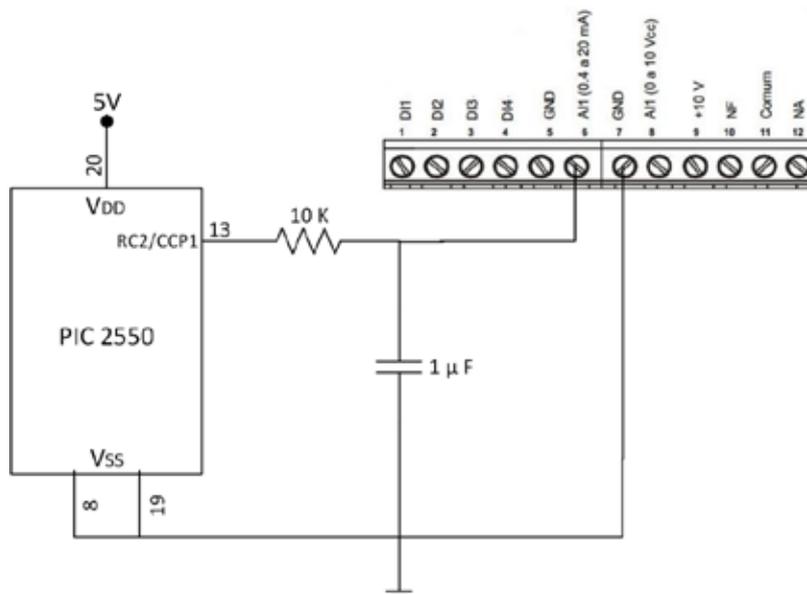
**Figura 3.12** - Configuração do sistema embarcado.

As conexões de sinal (entrada analógica) e controle (entradas digitais e saídas a relé) são feitas no conector XC1 do cartão eletrônico de controle para o inversor CFW-10 (WEG S/A, s.d.), ver Figura 3.13.



**Figura 3.13** - Conector XC1 do inversor de frequência CFW-10.  
Fonte: CFW-10 - Manual do Usuário (WEG S/A, s.d.).

A Figura 3.14 mostra o esquema de ligação do filtro RC passa-baixas utilizado para realizar a conversão do sinal PWM digital, presente no pino 13 do microcontrolador PIC, para o sinal analógico que comanda o CF.

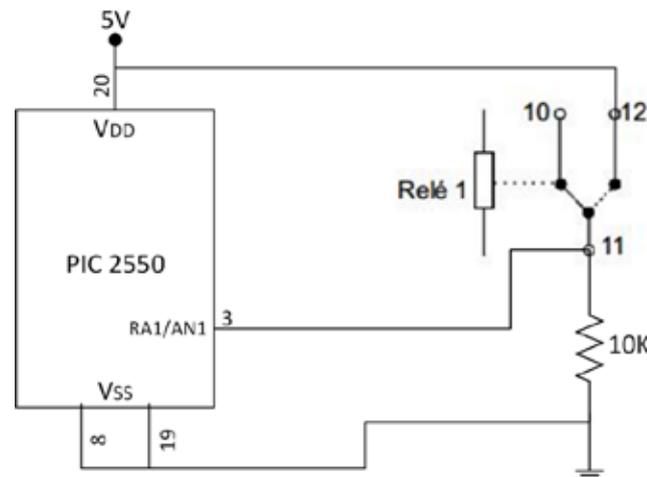


**Figura 3.14** - Esquema de ligação do filtro RC passa-baixas.

### 3.5.1 - Tratamento de Erros por Subtensão no Circuito Intermediário do CF

A principal causa de desarme, para sistemas fotovoltaicos de bombeamento que utilizam CFs industriais, é o bloqueio do CF por erro de subtensão, ocorrendo sempre que a tensão em seu barramento CC fica abaixo do mínimo permitido. É uma condição que deve ser tratada como uma situação excepcional, desde que existam condições para que o sistema volte a operar normalmente, sendo necessária uma ação específica e imediata para reestabelecer a normalidade. Para isto, o CF precisa sinalizar ao microcontrolador PIC que ocorreu um erro de subtensão, então o algoritmo embarcado reiniciará o microcontrolador e o CF, fazendo com que todas as condições iniciais sejam restabelecidas e o sistema consiga iniciar do “zero” novamente.

Para realizar essa tarefa, pode-se utilizar o relé interno do CF para sinalizar ao PIC os erros de subtensão. Este relé arma sempre que um erro de subtensão ocorre. Essa característica utilizada em conjunto com um simples resistor (Figura 3.12) é o suficiente para sinalizar erros de subtensão ao PIC, conforme esquema da Figura 3.15. Note que a tensão na entrada digital do PIC será 5 volts (nível lógico 1) sempre que o relé armar, ou seja, ocorrer erro de subtensão, caso contrário 0 volts (nível lógico 0).



**Figura 3.15** - Sinalização de erros de subtensão através de um resistor conectado ao relé interno do CF.

A codificação de uma possível função que detecta erro de subtensão é mostrada a seguir. Neste código, se em três leituras consecutivas o nível de tensão no pino 3 estiver alto, a função “eSub()” retorna o valor “1” indicando que houve erro de subtensão.

```
int eSub(){
    int aux=0;
    if (input(PIN_A1)==1){
        contsub++;
        if (contsub>3){
            aux=1;
        }
    }else{contsub=0;}
    return aux;
}
```

Detectado o erro de subtensão, para que o sistema volte a operar é necessário primeiramente “zerar” o sinal PWM que comanda a velocidade da motobomba. Este sinal estabelece a frequência do sinal de saída do CF via entrada analógica AI. Isto é necessário porque se o CF for *resetado* e logo depois ligado (serão os próximos passos) sem que a tensão na entrada analógica AI esteja em zero volts, a motobomba volta a operar com uma velocidade que pode necessitar de potência que não esteja disponível no momento, levando o equipamento a um novo erro de subtensão.

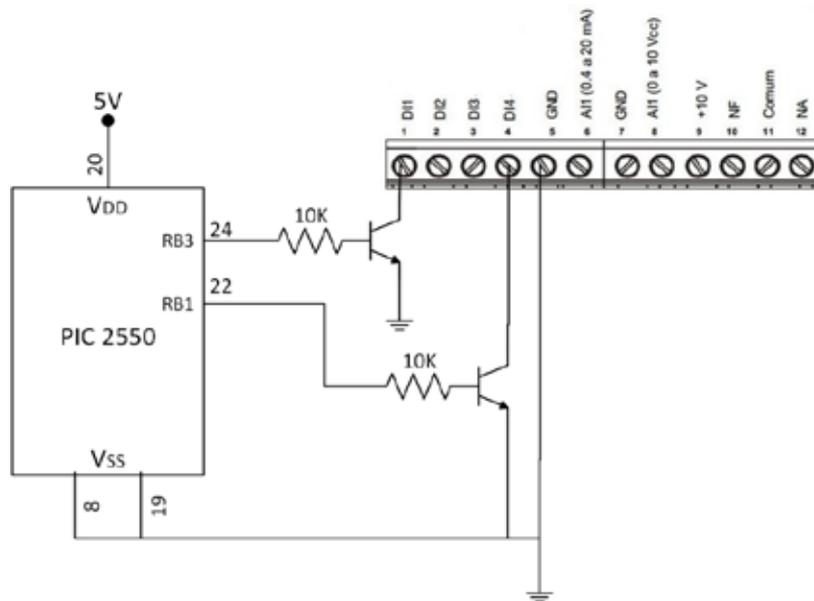
Como mencionado os próximos passos são *resetar* o CF (eliminando seu erro de subtensão) e logo depois liga-lo (fazer com que o equipamento fique pronto a operar).

Finalmente o microcontrolador deverá ser *resetado* (*reset* via *software*), restabelecendo, desta forma, todas as condições para que o sistema volte a operar.

O CF pode ser *resetado* colocando sua entrada digital DI4, previamente programada para esta função, em nível lógico baixo. É possível realizar tal procedimento, aplicando um pulso, através de uma saída digital (pino 22) do PIC, na chave eletrônica a transistor, tal como mostra a Figura 3.16. Analogamente, o CF pode ser ligado utilizando o mesmo procedimento com a entrada DI1 em outra saída digital do PIC (pino 24). Exemplos de código são mostrados a seguir.

```
void ligaCF(){
    output_high(PIN_B1);
    espera(0.01);
    output_low(PIN_B1);
}
```

```
void resetaCF(){
    output_high(PIN_B3);
    espera(0.01);
    output_low(PIN_B3);
}
```



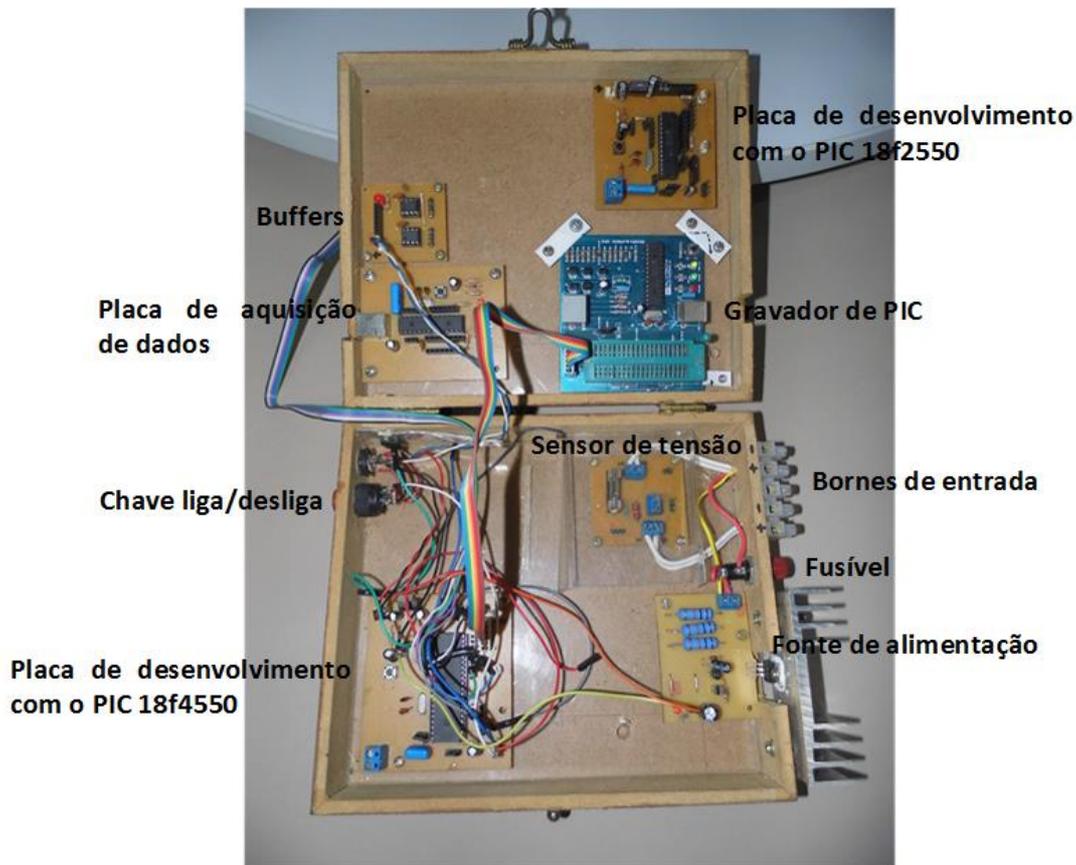
**Figura 3.16** - Circuito para acionar as entradas digitais DI1 e DI4 programadas para ligar e *resetar* o CF.

O código fonte completo, para o sistema embarcado, escrito em linguagem C, utilizando o compilador CCS, pode ser consultado no Apêndice.

### 3.6 - FERRAMENTAS PARA O TESTE OPERACIONAL

#### 3.6.1 - Maleta de Testes

Com o objetivo de possibilitar diversos ensaios e experimentos para o desenvolvimento do controlador embarcado, foi desenvolvida uma maleta para atender necessidades específicas relacionadas a implementação e avaliação do controle desenvolvido, obtendo um conjunto mais compacto, de fácil manuseio e transporte. Essa maleta é formada por um conjunto de placas fixadas em uma caixa de madeira, Figura 3.17, com as funcionalidades detalhadas nos subitens que seguem.



**Figura 3.17** - Maleta utilizada para os testes.

### 3.6.1.1 - Placas de Desenvolvimento

Possuem as mesmas funcionalidades cuja diferença principal é que uma usa o microcontrolador PIC 18F2550 e a outra usa o PIC 18F4550. Os referidos *chips* são fabricados pela Microchip e suas principais características estão mostradas na Tabela 3.4. A diferença mais importante entre os modelos é que o PIC 18F4550 possui mais portas que o PIC18F2550.

As placas têm como objetivo principal disponibilizar a pinagem do microcontrolador através de conectores para facilitar o seu uso. Incorporam, também, algumas facilidades:

- Alimentação de 5 volts proveniente de um regulador 7805 que pode ser usada para alimentar outros circuitos;
- Clock de 20 MHz;
- Filtro RC passa-baixas, cuja frequência de corte é de 15 Hz;
- Chave de *reset*;
- Pode ser programada *in circuit* – É possível programar o PIC sem retirá-lo da placa.

**Tabela 3.4** - Características (extraídas da folha de dados do fabricante) dos microcontroladores PIC 18F4550 e 18F2550.

<b>PIC18F4550</b>	<b>PIC18F2550</b>
USB 2.0	USB 2.0
<i>Clock</i> variável de 8 a 48 MHz	<i>Clock</i> variável de 8 a 48 MHz
Conversor analógico/digital de 10-bits	Conversor analógico/digital de 10-bits
Programação “ <i>in circuit</i> ”	Programação “ <i>in circuit</i> ”
2 canais capture/compare/PWM - módulo CCP	2 canais capture/compare/PWM - módulo CCP
32 kbytes de memória <i>FLASH</i>	32 kbytes de memória <i>FLASH</i>
2048 bytes de memória SRAM	2048 bytes de memória SRAM
256 bytes de memória EEPROM	256 bytes de memória EEPROM
35 portas de entrada/saída	24 portas de entrada/saída
Encapsulamentos PDIP de 40 pinos e TQFP e QFN de 44 pinos	Encapsulamentos PDIP e SOIC de 28 pinos

### 3.6.1.2 - Placa de Aquisição de Dados

Tem o microcontrolador PIC 18F2550 como componente principal. Possui comunicação USB e trabalha em conjunto com um *software* supervisor desenvolvido na plataforma *LabVIEW*.

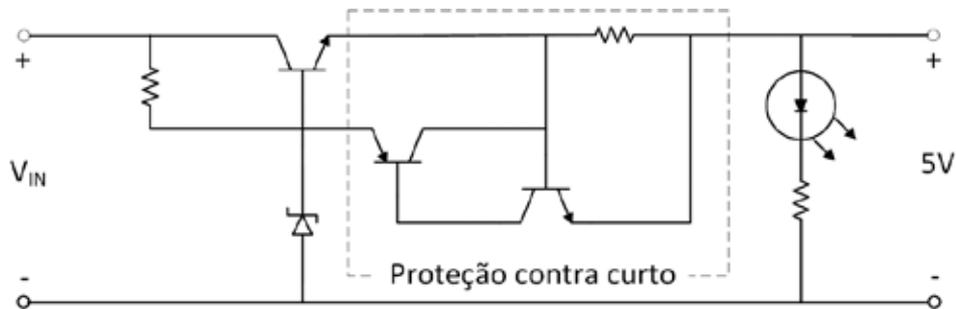
### 3.6.1.3 - Placas de *Buffers*

Utiliza o amplificador operacional TL072, e tem como objetivo proporcionar o isolamento dos sinais monitorados.

### 3.6.1.4 - Fonte de Alimentação

Fonte de alimentação linear tipo regulador série. Sua entrada é a própria tensão do gerador fotovoltaico e fornece na saída uma tensão de 5 volts e corrente máxima de

40 mA, a Figura 3.18 mostra o seu esquema elétrico. A importância da implementação dessa fonte de alimentação se apoia no fato de que ela evita a utilização de um módulo fotovoltaico, ou qualquer outro dispositivo externo, dedicado para alimentar o microcontrolador.

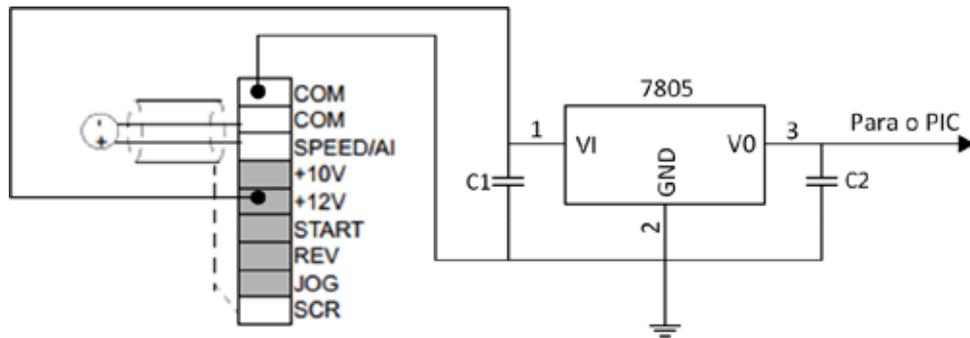


**Figura 3.18** - Esquema elétrico da fonte de alimentação para alimentar o microcontrolador.

Uma alternativa a fonte de alimentação apresentada anteriormente paira sobre a especificação de CFs com saídas de sinais analógicos passíveis de serem utilizadas para alimentação do microcontrolador. Alguns fabricantes de CFs possuem modelos que apresentam uma referência de tensão com potência suficiente para alimentar um microcontrolador. Um equipamento como este simplificaria o dispositivo de alimentação que poderia ser composto basicamente de um simples CI regulador de tensão 7805. A Tabela 3.5 relaciona alguns modelos que poderiam usar a referida configuração mostrada na Figura 3.19.

**Tabela 3.5** - Relação de fabricantes e seus modelos de CFs com suas fontes de alimentação auxiliares (informações extraídas da folha de dados dos fabricantes).

FABRICANTE	MODELO	TENSÃO AUXILIAR
ABB	ACS55 e ACS310	24V – 200 mA
Novus	Driver 10	24V – 50 mA
Allen Bradley	PowerFlex 520-Series	24V – 100 mA
Schmersal	Praxi 10	24V – 50 mA
Schneider Electric	Altivar 12	24V – 100 mA
Yaskawa	Drive - J1000	10V – 20 mA



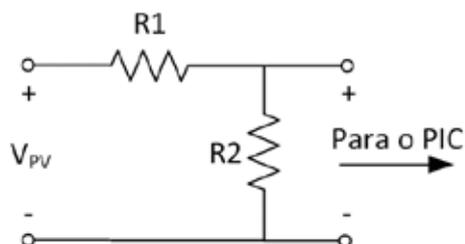
**Figura 3.19** - Alimentação para o microcontrolador com o CI 7805, exemplo com o conector do modelo ACS55 do fabricante ABB.

### 3.6.1.5 - Gravador de Microcontrolador PIC

O gravador de microcontroladores da linha microchip possui as seguintes características: conexão USB, é compatível com os *softwares* mplab e pickit2, grava microcontroladores de 8, 18, 28 e 40 pinos no soquete *zif* e possui conector *icsp* para gravação *in-circuit* (permite a gravação do microcontrolador PIC sem retirá-lo da placa).

### 3.6.1.6 - Sensor de Tensão

Um circuito divisor de tensão, tal como o mostrado na Figura 3.20, foi utilizado como sensor para monitorar a tensão do gerador fotovoltaico. Sua tensão de saída máxima é de aproximadamente 5 volts (compatível com as entradas analógicas do PIC) quando a tensão do gerador for cerca de 280 volts (que é aproximadamente a tensão nominal de circuito aberto do gerador utilizado).



**Figura 3.20** - Divisor de tensão utilizado como sensor para monitorar a tensão do gerador fotovoltaico.

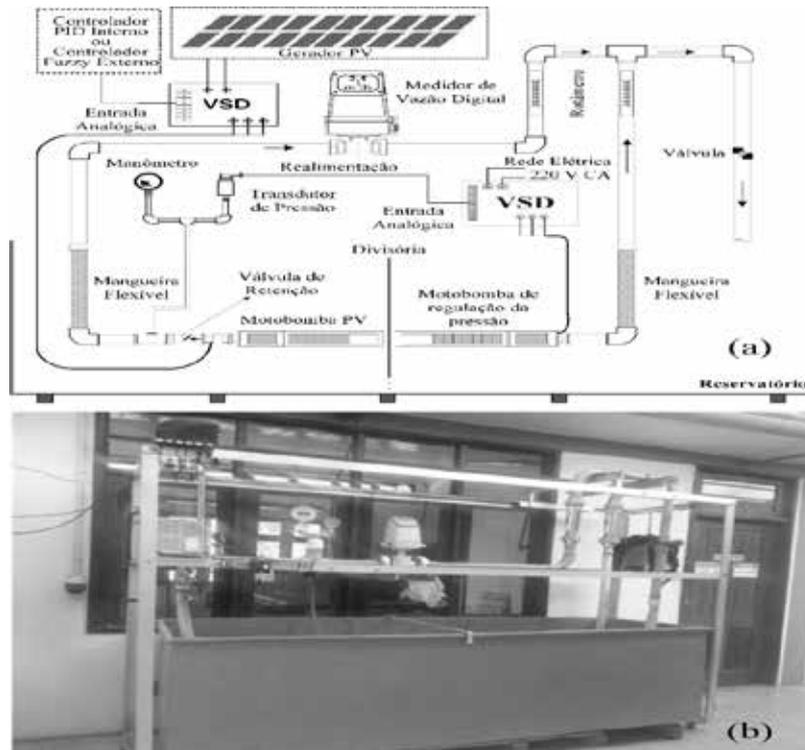
### **3.6.2 - Pacote de *Software***

O algoritmo de controle foi implementado em linguagem C usando o pacote de *software* IDE PCWHD do fabricante CCS (*Custom Computer Services, inc*). Esse pacote consiste de uma completa suíte de ferramentas integradas para o desenvolvimento e depuração de aplicações embarcadas e em execução no PIC (Microchip® MCUs e dsPIC® DSCs). Esta suíte inclui uma IDE para gerenciamento de projetos, um editor C sensível a contexto, ferramentas para desenvolvimento e depurador em tempo real, que ajudam os desenvolvedores a criar, analisar e depurar o código do projeto de documento (pcwh-ide-compiler, s.d.).

### **3.6.3 - Bancada de Ensaios**

Os ensaios para a verificação do desempenho do controlador foram realizados em uma bancada de teste concebida por BRITO *et al.* (2006) que está, também, implementada no laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA). A estrutura é capaz de simular alturas manométricas de até 100 mca e possui um sistema de monitoração e coleta de dados onde seis grandezas são monitoradas: irradiância no plano do gerador fotovoltaico, temperatura do gerador fotovoltaico, tensão e corrente do gerador fotovoltaico, pressão na tubulação de saída da motobomba de teste e vazão da mesma.

A bancada funciona com duas bombas que trabalham confrontadas uma com a outra, submersas em um mesmo reservatório, conforme diagrama esquemático da Figura 3.21. O princípio de funcionamento da bancada baseia-se na utilização de uma motobomba ligada na rede elétrica convencional, que varia sua vazão de modo a manter a pressão na tubulação aproximadamente constante. Na medida em que a motobomba que está sendo testada aumenta sua capacidade de bombeamento, devido ao aumento da irradiância, a pressão na tubulação tenderá a aumentar também. Nessa situação, para a estabilização da pressão interna, a outra motobomba reduz sua capacidade de bombeamento. Da mesma forma, quando a motobomba que está sendo testada reduzir sua capacidade de bombeamento, devido a redução da irradiância, a outra bomba aumentará sua capacidade de bombeamento, de forma a manter a pressão em torno do valor pré-estabelecido (BRITO *et al.*, 2006).



**Figura 3.21** - Bancada de ensaios: (a) Diagrama esquemático; (b) Sistema real pertencente ao laboratório do GEDAE/UFPA.

A Tabela 3.6 lista os equipamentos utilizados na aquisição de dados da bancada.

**Tabela 3.6** - Dispositivos utilizados para aquisição de dados.

EQUIPAMENTO	FABRICANTE	MODELO
Transdutor de tensão c.c.	SECON	500V010VDC-127AC
Transdutor de corrente c.c.	Minipa	HR30
Transdutor de vazão	SIEMENS	SITRANS F M MAG 5000
Transdutor de pressão	RÜCKEN	RMD-420
Sensor de temperatura	SOL.Connect	T PT1000 B
Sensor de irradiância	TRITEC	Spektron 210
Datalogger	NOVUS	FieldLogger

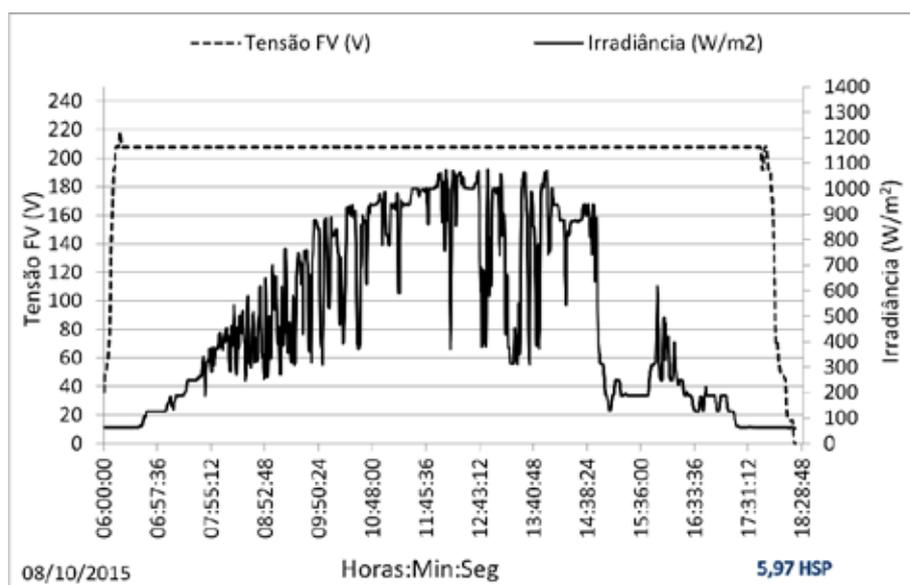
Fonte: MARANHÃO (2015).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

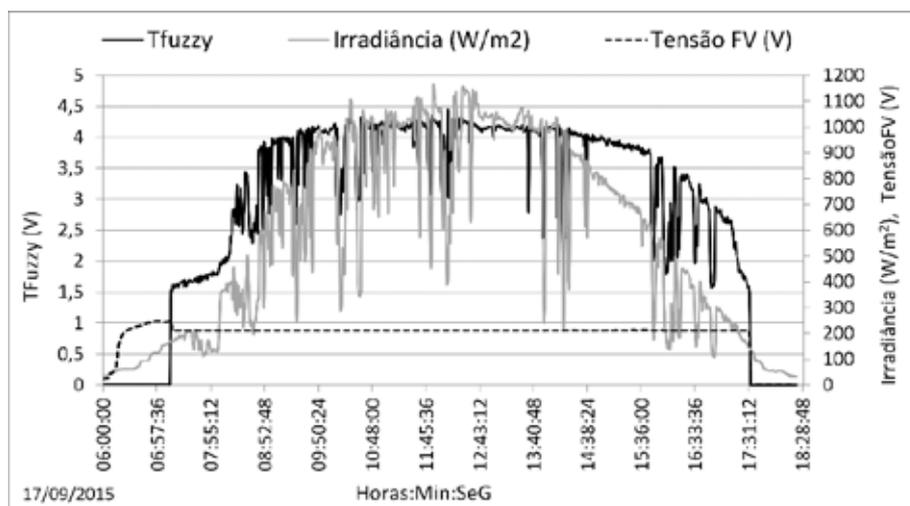
Para os testes realizados com a bancada, seis grandezas são monitoradas: Irradiância, temperatura, vazão, pressão na tubulação, tensão e corrente do gerador fotovoltaico. Essas grandezas são coletadas e acumuladas individualmente a cada segundo, no fim de um minuto uma média é calculada e armazenada. No momento do armazenamento da média o último valor lido para cada grandeza, também é armazenado. Inicialmente foram feitos testes para 35 mca e posteriormente para 31 mca de altura manométrica.

O principal objetivo do controlador é manter a tensão do gerador fotovoltaico na referência (*set-point*) especificada mesmo havendo variações bruscas na irradiância. A Figura 4.1 mostra a tensão do gerador fotovoltaico e irradiância incidente em seu plano para um turno completo de bombeamento no dia 08 de outubro de 2015, correspondente a um dia de 5,97 horas de sol pleno (HSP). Observa-se que o controlador tem um comportamento esperado, a tensão permanece estável em torno de 207 volts durante todo o ciclo, mesmo ocorrendo mudanças drásticas na irradiância, evitando dessa forma, erros de subtensão.



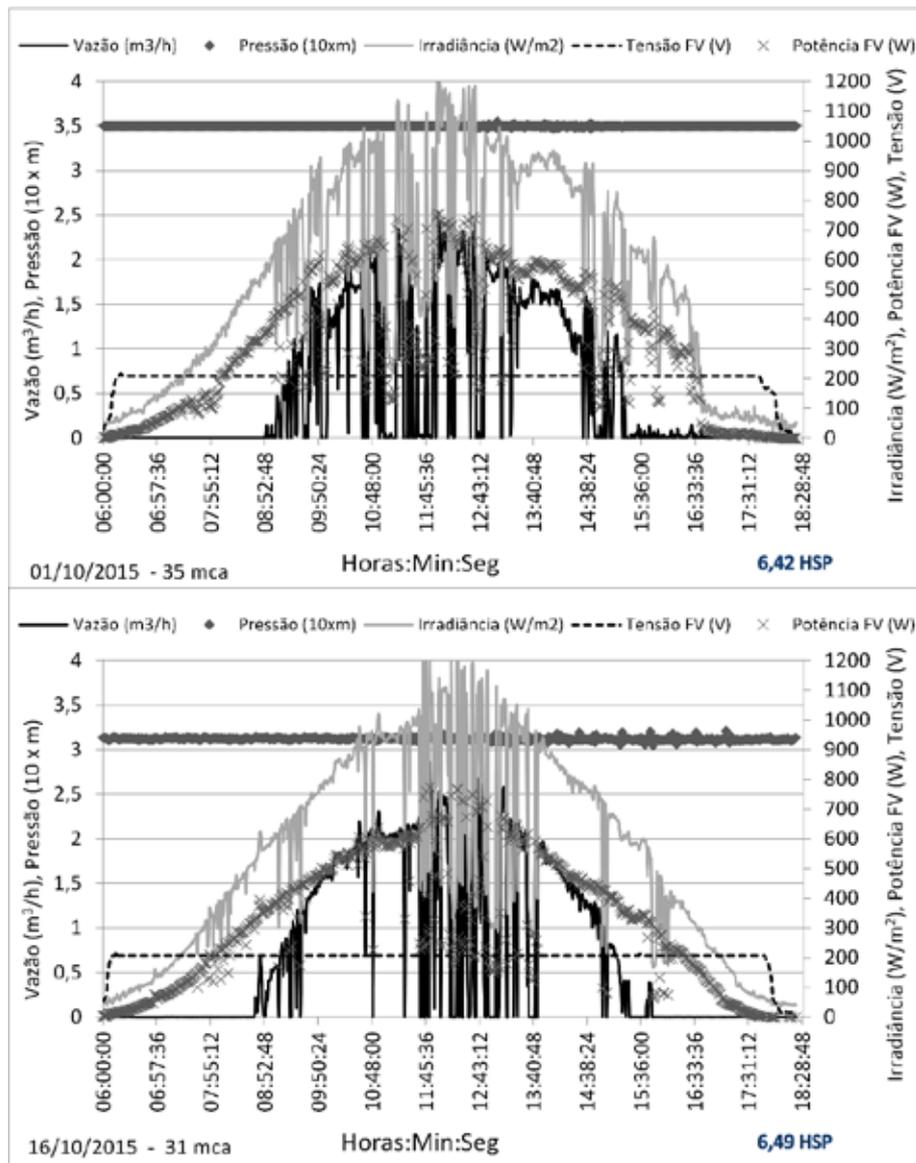
**Figura 4.1** - Tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV) e irradiância.

Para que tensão de barramento permaneça estável, o sinal de comando do CF deve refletir as variações que ocorrem na irradiância. O gráfico da Figura 4.2 mostra que o sinal de comando ( $T_{fuzzy}$ ) do CF, gerado pelo controlador *fuzzy*, acompanha satisfatoriamente as variações da irradiância.



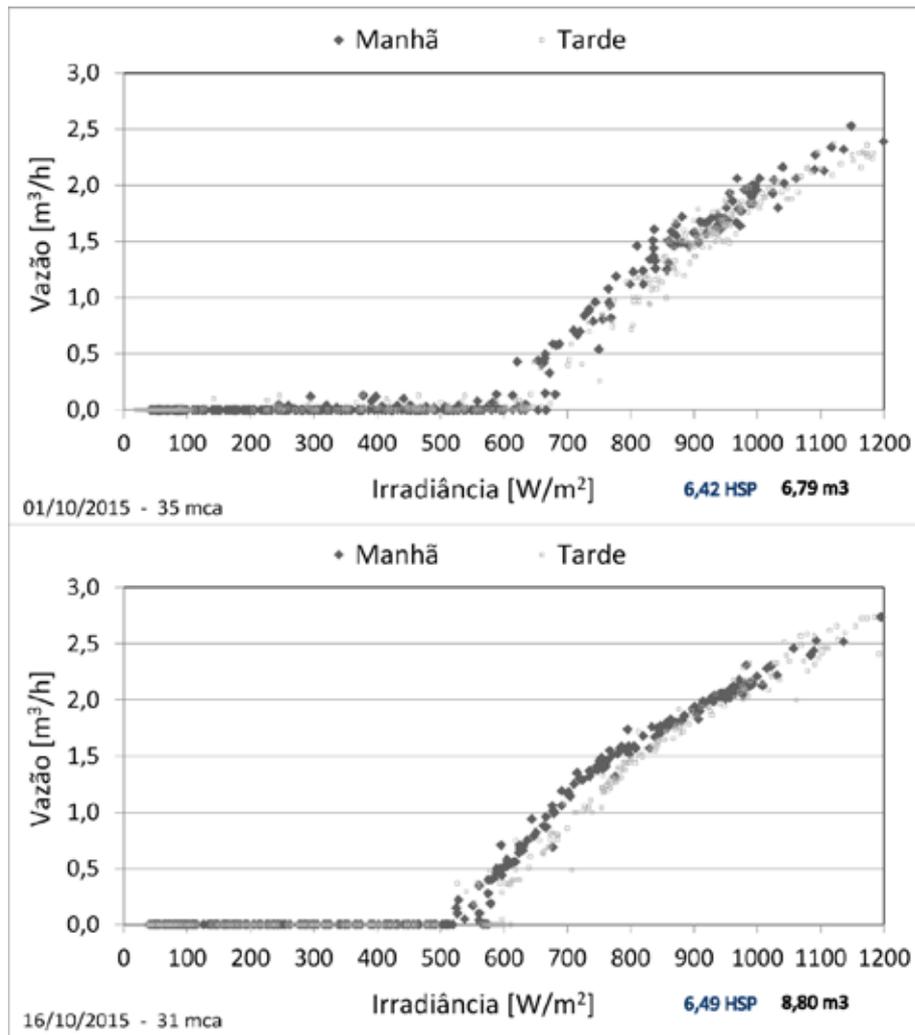
**Figura 4.2** - Tensão gerada pelo controlador *fuzzy* ( $T_{fuzzy}$ ), tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV) e irradiância.

A Figura 4.3 exibe os dados coletados para dois dias que possuem perfis de irradiância semelhantes e duas alturas manométricas de interesse: 35 mca, que é a altura ideal de operação considerando o bombeamento convencional (gráfico superior) e 31 mca, que segundo a regra qualitativa apresentada anteriormente (subitem 0), é o ponto mais adequado para o bombeamento fotovoltaico (gráfico inferior). Na Figura 4.3 é possível observar os comportamentos da irradiância, potência gerada, vazão, pressão na tubulação e da tensão no gerador fotovoltaico. A visualização desses parâmetros permite identificar que o controlador desempenha sua função adequadamente, mantendo a tensão de operação no valor de *set-point*, próximo a 207 V, mesmo havendo variações significativas na irradiância. Nota-se, também, que a pressão na tubulação da bancada de ensaios permanece estável tanto para a altura manométrica de 35 mca como 31 mca, o que comprova sua praticidade para realização dos testes.



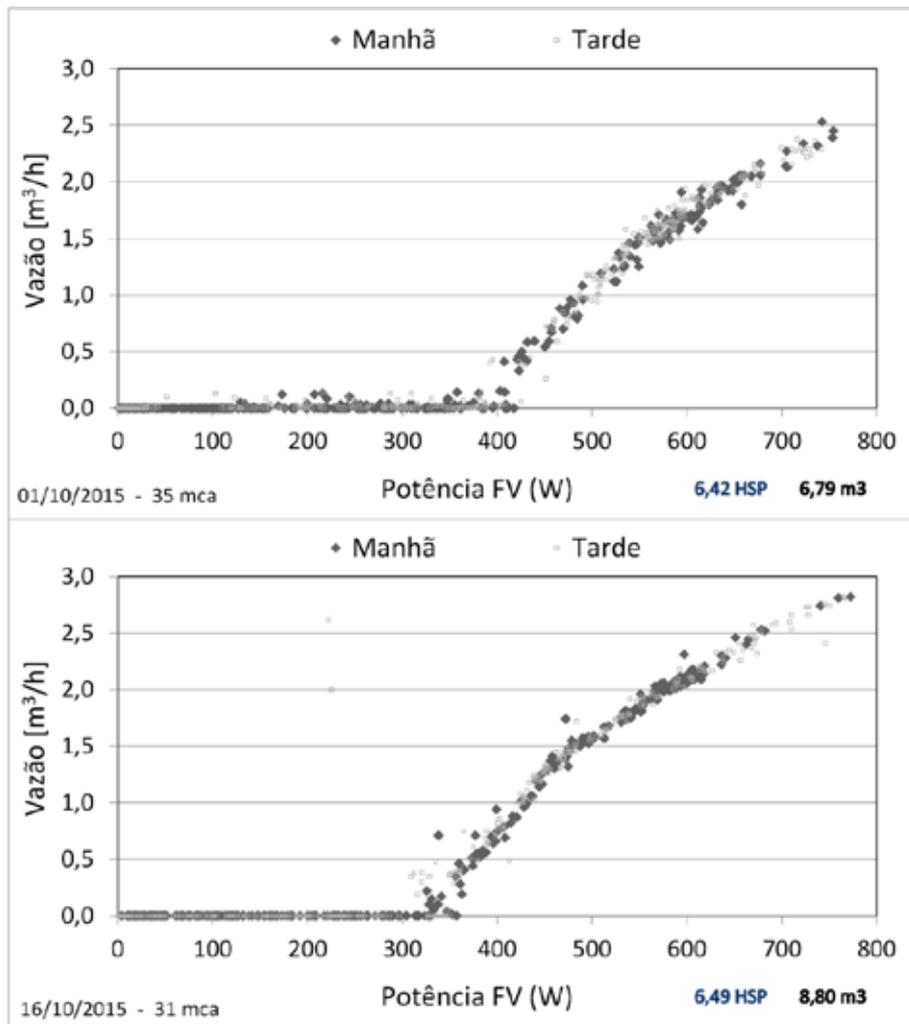
**Figura 4.3** - Dinâmica da pressão na tubulação, vazão, potência, irradiância e tensão do gerador fotovoltaico, para as alturas manométricas de 35 e 31 mca.

A Figura 4.4 mostra a curva da vazão em função da irradiância, nos períodos da manhã e tarde. É possível constatar que para a altura manométrica de 35 mca, o valor da irradiância crítica está em torno de  $600 \text{ W/m}^2$  e que a vazão máxima fica em torno de  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$  para uma irradiância de aproximadamente  $1.150 \text{ W/m}^2$ . Para a altura de 31 mca o valor da irradiância crítica fica em torno de  $524 \text{ W/m}^2$  e a vazão máxima é de aproximadamente  $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$ , para uma irradiância de aproximadamente de  $1.200 \text{ W/m}^2$ . É possível também notar, para os dois pontos de operação, que para um mesmo valor de irradiância a vazão tende a ser menor no período da tarde, isso se deve basicamente aos efeitos da temperatura sobre a tensão de operação do gerador fotovoltaico.



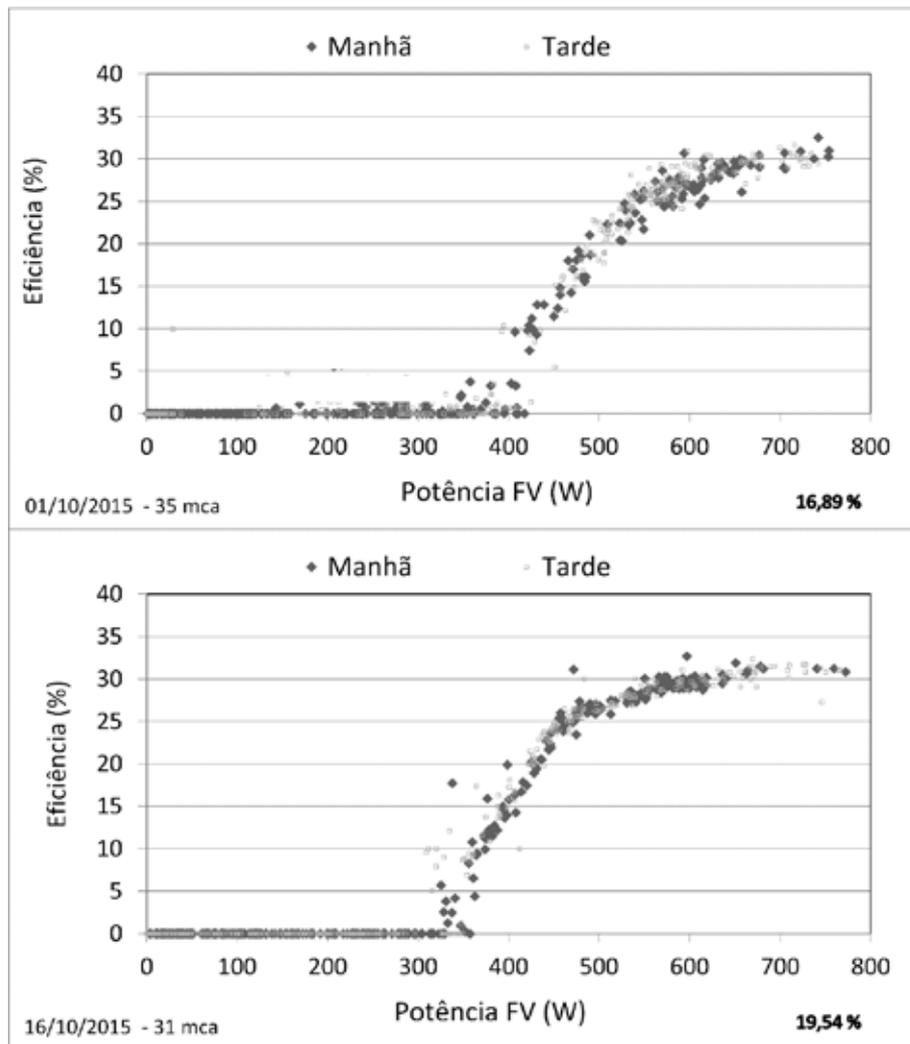
**Figura 4.4** - Curva da vazão versus irradiância.

A Figura 4.5 mostra o gráfico da vazão em função da potência gerada, percebe-se que para começar o bombeamento, para a altura de 35 mca, é necessário uma potência em torno de 400 W e que para se alcançar a vazão máxima (em torno de 2,5 m<sup>3</sup>/h) é necessário uma potência em torno de 750 W. Para a altura de 31 mca a potência necessária para começar o bombeamento está em torno de 330 W e que para alcançar a vazão máxima (aproximadamente 2,8 m<sup>3</sup>/h) é necessário uma potência de aproximadamente 770 W.



**Figura 4.5** - Curva da vazão versus a potência produzida pelo gerador fotovoltaico.

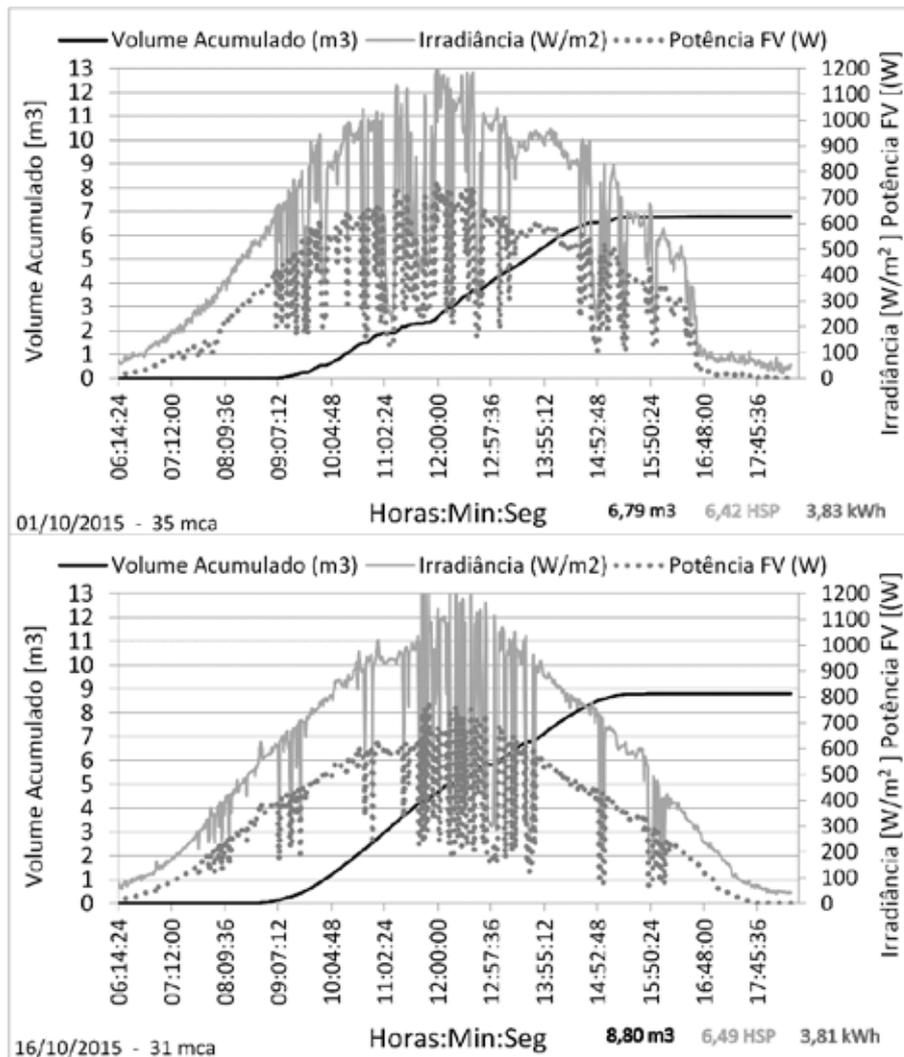
Outro parâmetro importante na avaliação do desempenho do sistema é a eficiência do conjunto CF+motobomba, a Figura 4.6 mostra esse parâmetro em função da potência do gerador fotovoltaico. O sistema apresentou eficiência máxima em torno de 32% para as duas alturas manométricas avaliadas. A eficiência média ficou em 16,89% para a altura manométrica de 35 mca e 19,54% para 31 mca, portanto, confirmando a regra prática de escolha do ponto de operação apresentada anteriormente (subitem 0).



**Figura 4.6** - Curva da eficiência versus a potência produzida pelo gerador fotovoltaico.

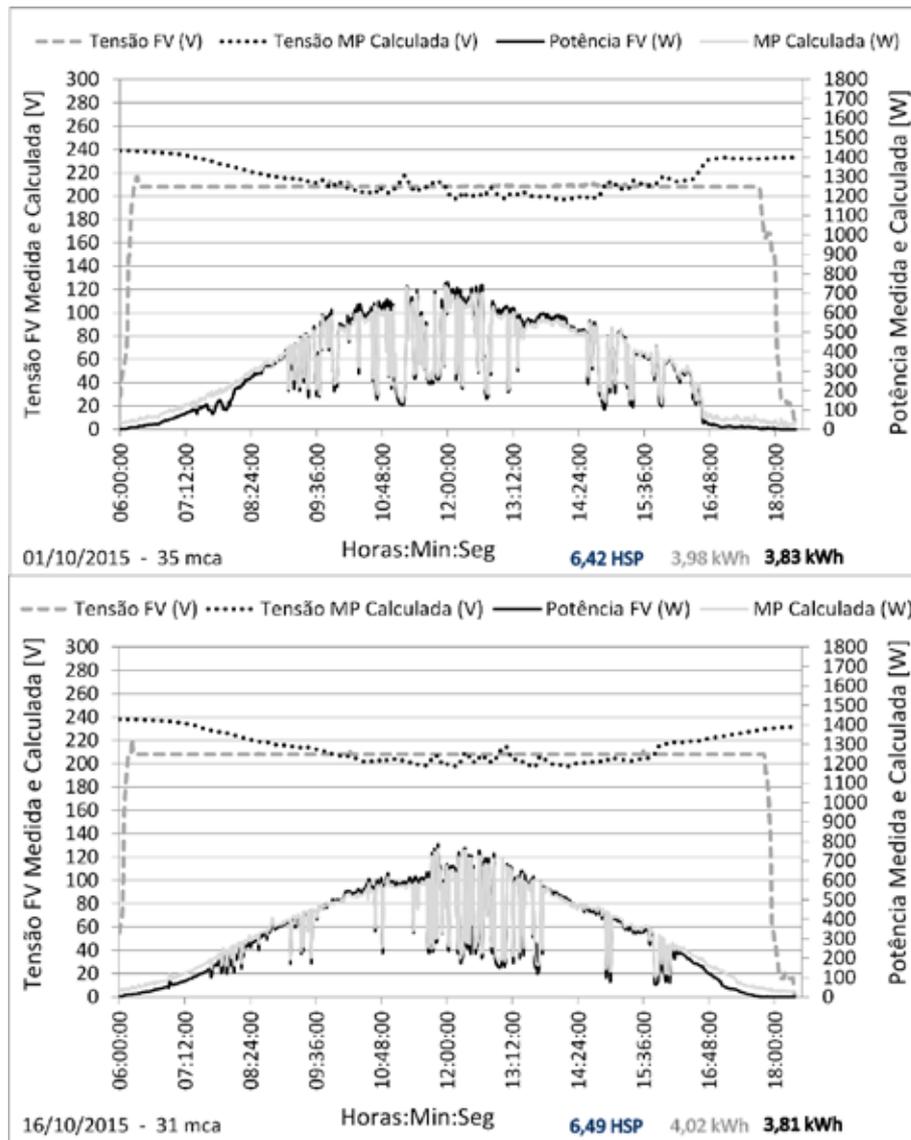
O período de bombeamento se limita ao intervalo que vai de 9h07 às 15h00 para 35 mca e 08h43 às 15h40 para 31 mca, tal como pode ser observado na Figura 4.7, portanto, para 31 mca tem-se em torno de 1 h a mais de bombeamento.

Para 35 mca, o tempo de bombeamento é de aproximadamente 6 h e 70 % do volume bombeado ocorre no intervalo de 10h30 às 14h00. Para 31 mca, o tempo de bombeamento é de aproximadamente 7 h, e 70% do volume bombeado ocorre no intervalo de 10h22 às 14h23. A presença de muitas nuvens nesses períodos compromete bastante a quantidade de água bombeada.



**Figura 4.7 -** Volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo gerador fotovoltaico.

Na Figura 4.8 pode-se observar que a tensão de operação do gerador fotovoltaico (Tensão FV) imposta pelo controlador (valor fixo de referência escolhido de 207 V) é muito próxima da tensão ideal de trabalho calculada (Tensão MP calculada) no período mais importante para o bombeamento. Os gráficos da potência medida disponibilizada pelo gerador (Potência FV) e a máxima potência calculada (MP Calculada) corroboram com esta afirmação. Nota-se que estes dois parâmetros estão muito próximos, praticamente sobrepostos no período em que ocorre o bombeamento, indicando que o gerador fotovoltaico disponibiliza ao sistema uma potência bem próxima à máxima potência disponível.

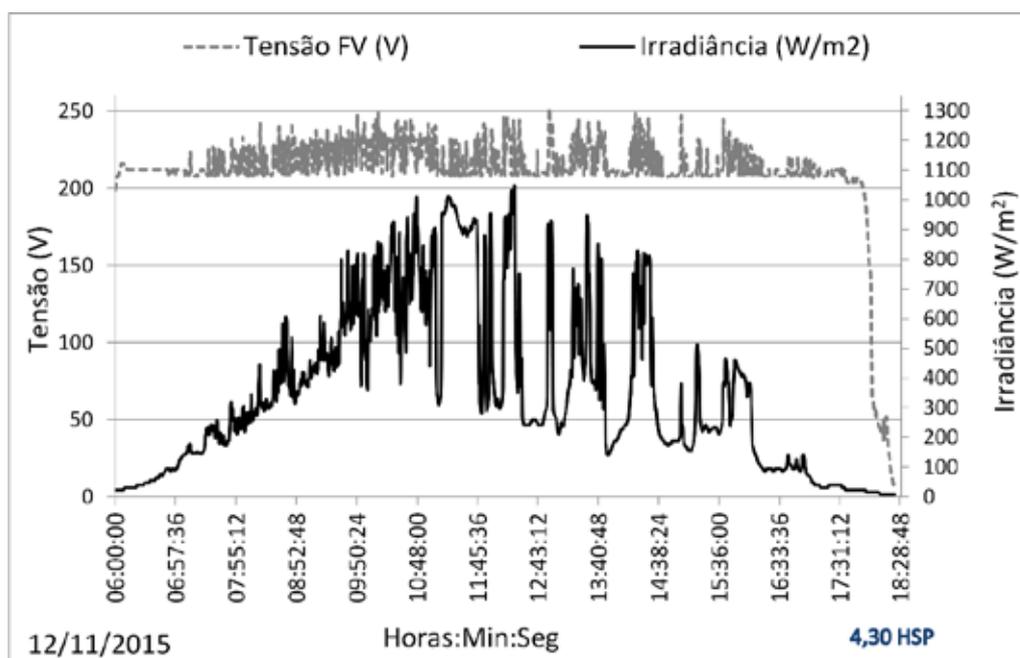


**Figura 4.8** - Tensão medida do gerador fotovoltaico (Tensão FV), tensão de máxima potência calculada (Tensão MP - Calculada), potência medida do gerador fotovoltaico (Potência FV) e máxima potência calculada (MP - Calculada).

#### 4.1 - AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* EM RELAÇÃO AO PID

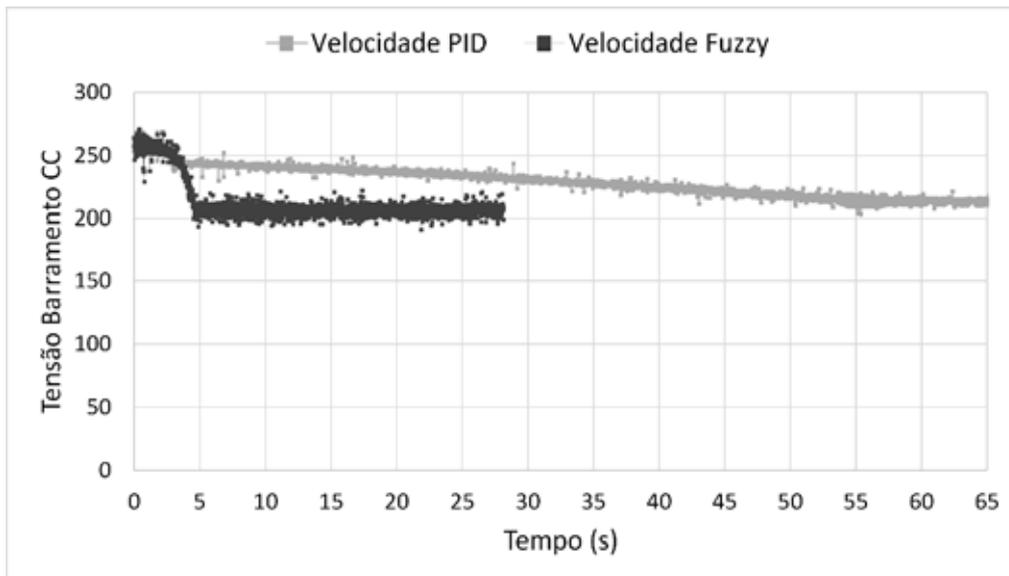
Para uma comparação rigorosa entre os controladores PID e *fuzzy* seria necessário que os referidos controladores fossem submetidos simultaneamente as mesmas condições de operação com duas bancadas de ensaio idênticas, o que tornaria o processo bastante oneroso. Diante disso, são apresentadas neste trabalho apenas algumas avaliações em relação a regulação da tensão de barramento CC, tempo de resposta do sistema e quantidade de água bombeada para dias com perfis de irradiância e horas de sol pleno semelhantes.

A Figura 4.9 mostra, com a atuação do controlador PID interno, o gráfico da tensão do gerador fotovoltaico e irradiância para um turno completo de bombeamento no dia 12 de novembro de 2015. Para a mesma referência utilizada no controlador *fuzzy* durante os testes apresentados anteriormente (207 V), o controlador PID embarcado no CF, sintonizado utilizando o método da curva de reação proposto por BRITO (2006), não conseguiu o desempenho esperado. Desarmes excessivos do equipamento por erros de subtensão podem ser observados.



**Figura 4.9** - Nível de tensão do gerador fotovoltaico (tensão FV) com muitas variações bruscas, indicando bloqueio do CF por erros de subtensão.

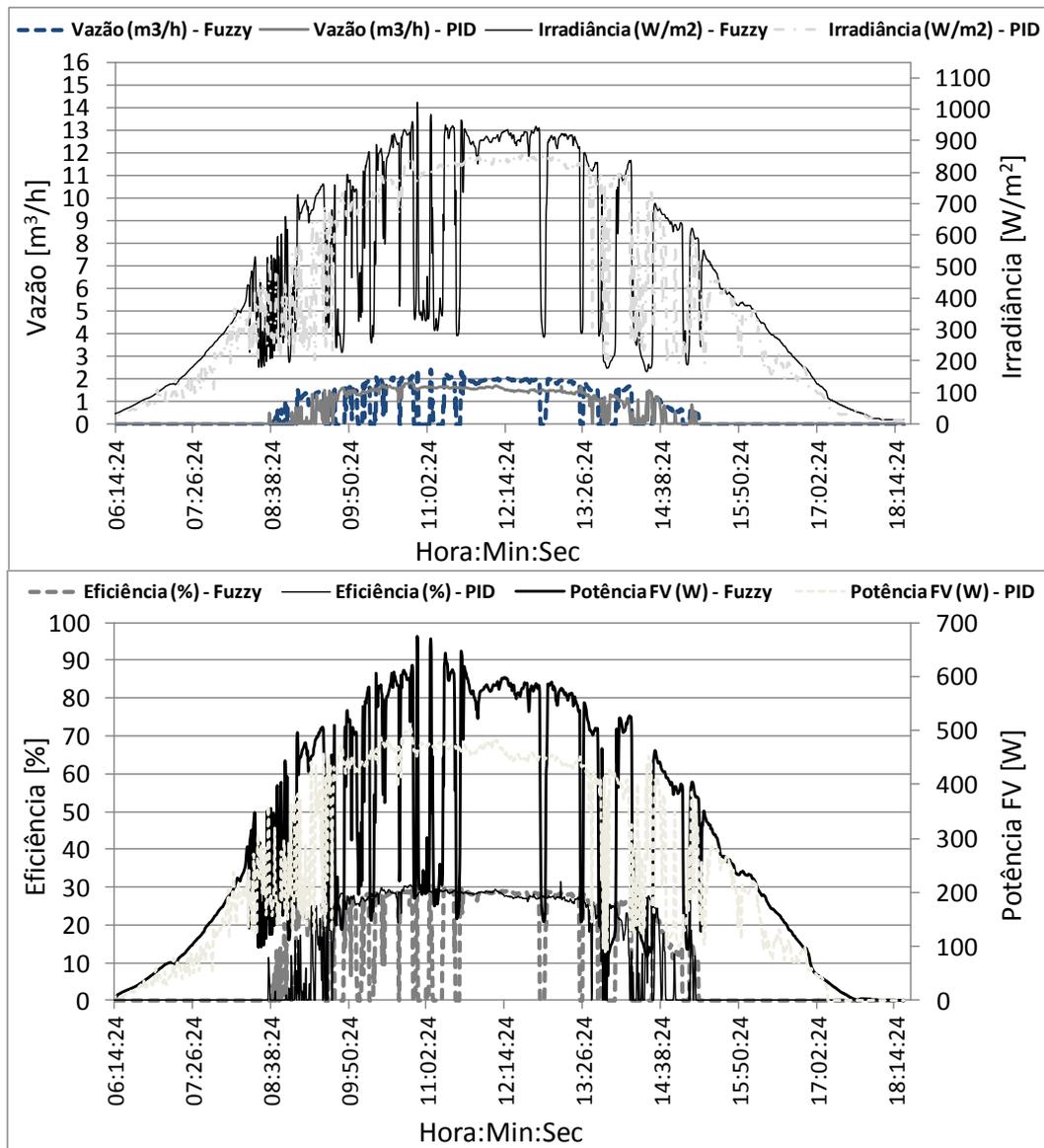
Na Figura 4.10 é mostrado os tempos de resposta para o sistema com os controladores *fuzzy* e PID. Por tempo de resposta considera-se que: estando o sistema desativado, ao ativá-lo é o tempo que o sistema leva para atingir a tensão de referência (em torno de 207 V). Para o controlador *fuzzy* o tempo é de aproximadamente 5 (cinco) segundos enquanto para o controlador PID este tempo é de aproximadamente 55 (cinquenta e cinco) segundos. A reação muito mais lenta do sistema controlado pelo PID é fator determinante que o leva a apresentar desarmes excessivos por erros de subtensão sempre que ocorrem variações bruscas na irradiância.



**Figura 4.10** - Tempos de resposta para o sistema com os controladores *fuzzy* e PID.

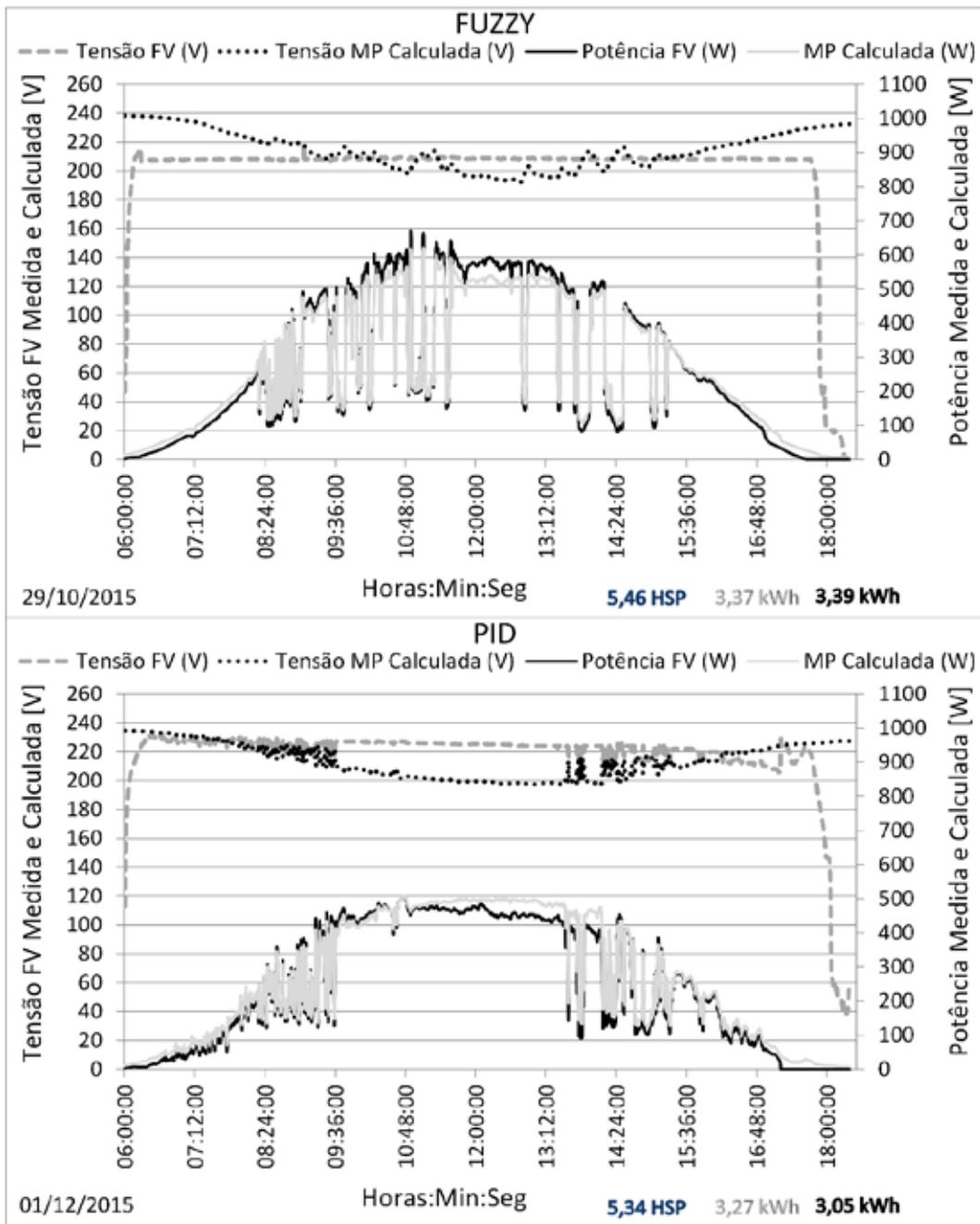
A Figura 4.11 mostra, para os controles *fuzzy* e PID, a variação da irradiância ao longo do dia e a sua respectiva dinâmica de bombeamento, bem como a evolução da geração fotovoltaica e da eficiência do conjunto motobomba mais CF. Os resultados obtidos indicam que os desempenhos de ambos os controladores são semelhantes, culminando em eficiências diárias aproximadas, com um desempenho global ligeiramente maior para o controlador PID (19,61% contra 18,19% do controle *fuzzy*).

Embora a eficiência do conjunto CF+motobomba obtida pelo sistema com o controlador PID seja um pouco superior ao do sistema com o controle *fuzzy*, nesta avaliação em particular, percebe-se que o perfil de irradiância ao qual o sistema com o controlador *fuzzy* foi submetido apresenta uma maior influência das nuvens, principalmente no período de 10h00 às 11h30 da manhã. Nesse período têm-se uma significativa contribuição para o volume total bombeado durante um dia de operação. Apesar deste fato, percebe-se que o volume bombeado pelo sistema contendo o controle *fuzzy* externo é ligeiramente superior ao volume bombeado com o sistema PID. Isso pode ser explicado principalmente pelo fato de o controle *fuzzy* possibilitar a operação do sistema em uma tensão mais baixa que o controle PID, aproximando a tensão de operação do ponto de máxima potência tal como pode ser observado na Figura 4.12.



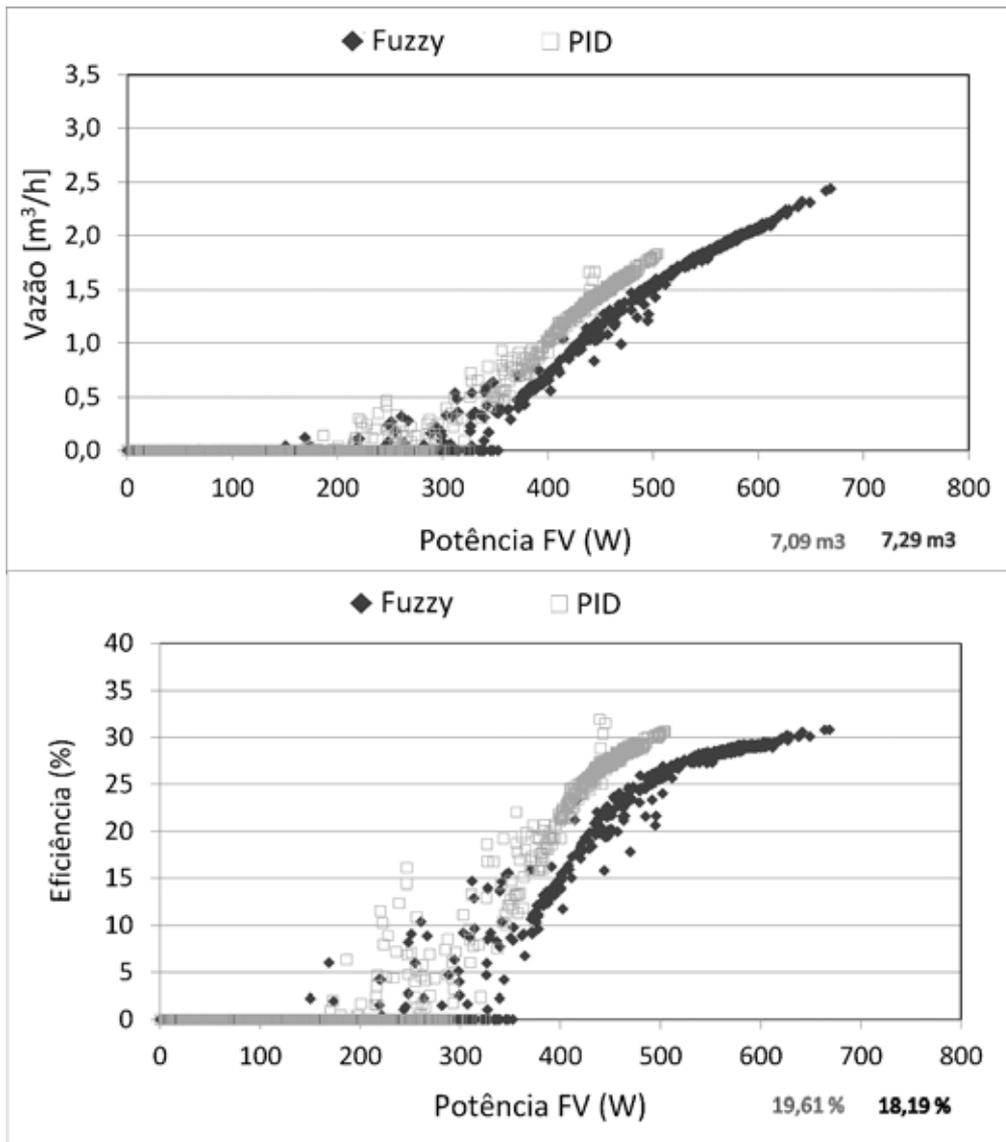
**Figura 4.11** - Avaliação experimental entre as dinâmicas do SFB com PID e *fuzzy*: perfis de irradiância, geração FV, vazão e eficiência do conjunto motobomba mais CF.

Pode-se observar, por meio de comparação entre os valores de tensão medidos e calculados, que a escolha adequada da tensão de operação respeitando o limite de subtensão do CF e a dinâmica do controle empregado, conduz ao aproveitamento significativo da capacidade da geração FV. Isso se reflete numa eficiência de SPMP (seguimento do ponto de máxima potência) média diária superiores a 90%. Obtida da relação entre os valores integrados ao longo do dia da potência medida e teórica, a eficiência de SPMP encontradas ficaram em 95% para o sistema com o controle *fuzzy* e 91% para o sistema com o controlador PID.



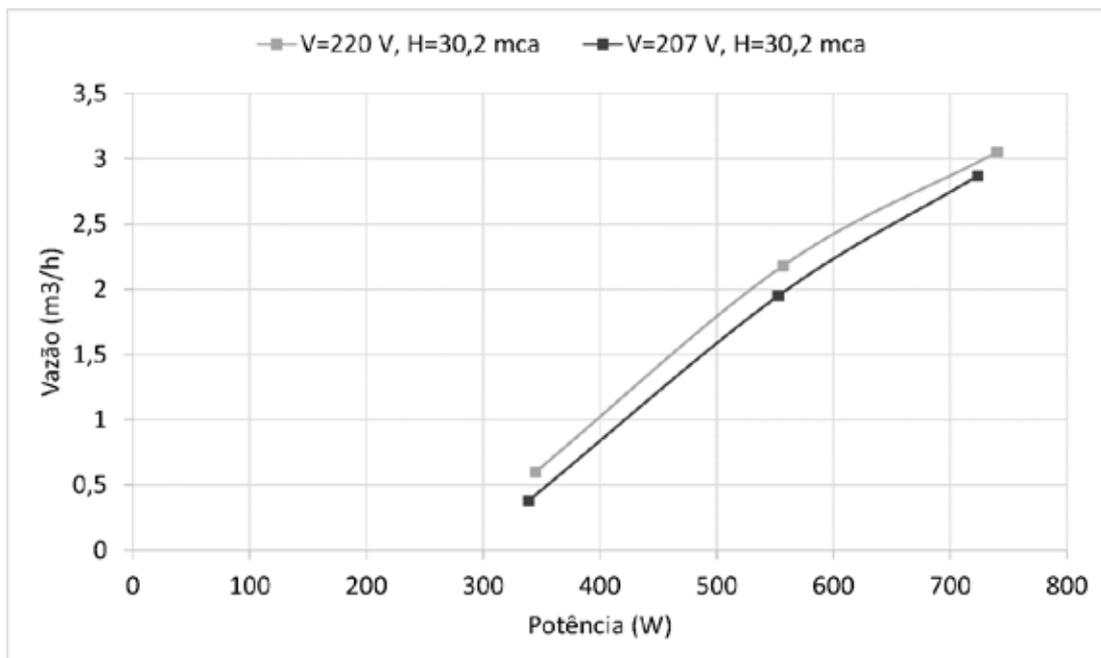
**Figura 4.12** - Avaliação experimental entre as dinâmicas do SFB com PID e *fuzzy*: comparação entre os valores de Tensão e Potência medidos (Tensão FV e Potência FV) e teóricos (Tensão MP Calculada e MP calculada).

Nota-se a partir da Figura 4.13 que o valor máximo obtido para rendimento tanto com o controle *fuzzy* quanto o PID é próximo de 30%. Percebe-se ainda que para um mesmo valor de potência FV, o controle PID apresenta fluxo de bombeamento maior (Vazão) que o *fuzzy*. Este melhor desempenho está diretamente ligado a tensão de operação do sistema (referência).



**Figura 4.13** - Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador *fuzzy*: períodos da manhã e tarde.

A Figura 4.12 mostra que o controlador *fuzzy* trabalha com uma tensão de operação (Tensão FV = 207 V – gráfico superior) menor em relação ao PID (Tensão FV = 225 V – gráfico inferior). Embora isso seja vantajoso do ponto de vista de SPMP, a redução da tensão de operação (tensão do barramento CC) do CF causa diminuição no fluxo de bombeamento, ou seja, a curva Potência FV versus Vazão sofre um deslocamento vertical para baixo. A Figura 4.14 apresenta valores experimentais para o CF operando com tensão de barramento em 220 V CC e 207 V CC. Observa-se claramente a diminuição da vazão para a mesma potência. A causa deste efeito está no fato de que o valor máximo eficaz da tensão de saída de um CF ( $(V_{AC})_{MAX}$ ) está relacionado com a tensão de barramento CC de entrada ( $V_{BCC}$ ), tal como demonstra a Equação (4.1):



**Figura 4.14** - Efeitos do nível de tensão DC de entrada no CF. Quando a tensão decresce de 220 V para 207 V os efeitos de sobremodulação causam diminuição da vazão. Dados para altura manométrica de 30,2 mca.

$$(V_{AC})_{MAX} \approx 1,1 \frac{V_{BCC}}{\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

Pela Equação (4.1), para um valor de entrada 207 V DC, o valor de saída máximo está em torno de 161 V AC. Esta limitação da tensão de entrada da motobomba também limita o torque e, portanto, o fluxo de água (vazão), causando perdas na eficiência, principalmente em torno da operação nominal. Este efeito é normalmente referenciado como sobremodulação (ALONSO-ABELA *et al.*, 2003).

Para a máxima eficiência, CFs devem operar com tensão de entrada em torno de 300 V DC (ALONSO-ABELA *et al.*, 2003), pois, pela Equação (4.1), para este valor o CF poderia fornecer em sua saída uma tensão máxima em torno de 233 V AC, suficiente para alimentar a motobomba com sua tensão nominal.

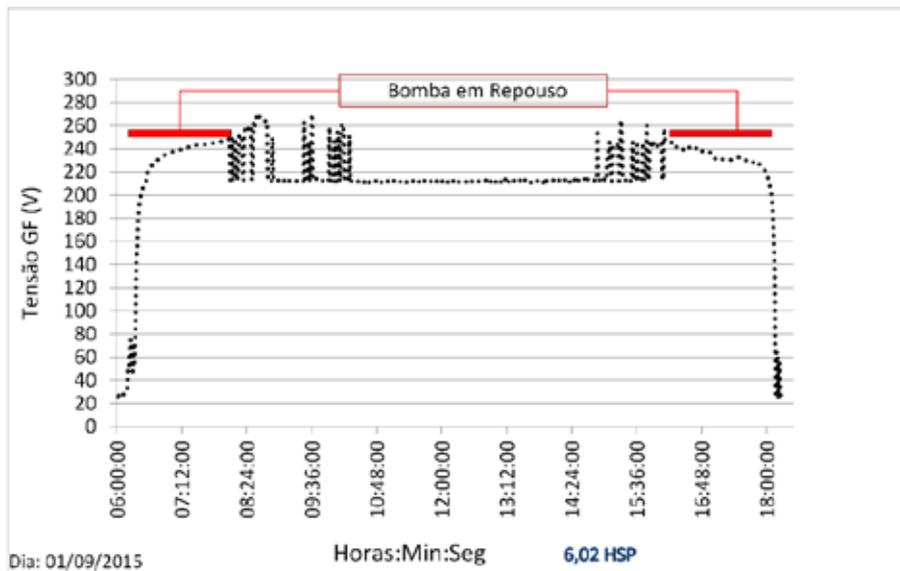
## **4.2 - ESTRATÉGIAS PARA DIMINUIR A OPERAÇÃO DESNECESSÁRIA DA MOTOBOMBA**

Em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, durante um ciclo completo de operação, situado no período de aproximadamente 06h00 às 18h00, existem vários momentos em que apesar da motobomba estar operando, a sua velocidade de rotação não é suficiente para que se tenha fluxo de água na tubulação. Obviamente isso acontece porque a irradiância disponível não é suficiente para que a motobomba desenvolva velocidades maiores. Seria interessante que nesses casos a motobomba ficasse em repouso (parada), evitando desgaste do equipamento. Detectar precisamente as situações citadas não é possível, pois seriam necessários sensores de vazão e irradiância o que tornaria o sistema mais complexo e oneroso. Porém, utilizando duas estratégias a seguir é possível obter, em parte, os objetivos.

### **4.2.1 - Condição Mínima de Tensão FV para a Motobomba entrar em Operação**

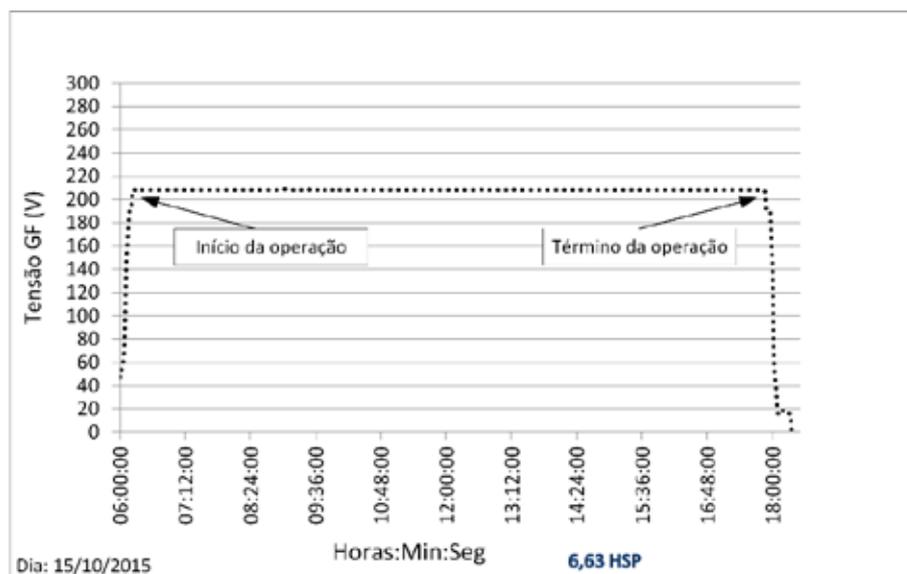
Há um valor de irradiância mínima requerida para que o sistema comece a bombear. Este valor é denominado de valor crítico ( $I_c$ ). Variações no nível de irradiância causam grande variação na corrente gerada sem causar consideráveis variações à tensão, porém, é possível identificar uma faixa de tensões de circuito aberto que correspondem a irradiâncias que estão abaixo da irradiância crítica. Para o sistema em questão, estes valores estão abaixo de aproximadamente 248 V (para altura manométrica 35 mca).

A estratégia consiste no seguinte: estando o sistema em repouso (motobomba parada), este só mudará o seu estado se uma tensão de circuito aberto superior a 248 V for detectada. Durante os testes, frequentemente, períodos no início da manhã e final da tarde apresentaram níveis de tensão abaixo de 248 V. Nestes períodos, a motobomba permanecerá em repouso, diminuindo, portanto, o desgaste do equipamento. A Figura 4.15 mostra as faixas em vermelho correspondendo as janelas, 06h14 às 08h04 e 16h15 às 18h00, onde a motobomba permanece em repouso.



**Figura 4.15** - Períodos onde a motobomba permanece em repouso para o sistema com o procedimento de tensão mínima ativado.

A Figura 4.16 mostra o gráfico para o sistema com o procedimento de tensão mínima desativado, onde é possível observar que a motobomba começa a operar por volta de 6h17 (o sistema com tensão mínima ativado começa a operar por volta de 08h04) e termina aproximadamente em 17h50 (o sistema com tensão mínima ativado termina a operação por volta de 16h15), portanto, no sistema desativado, para os dias considerados, a motobomba operou aproximadamente 3,5 h (três horas e meia) a mais, sem necessidade.



**Figura 4.16** - Início da operação para o sistema com o procedimento de tensão mínima desativado.

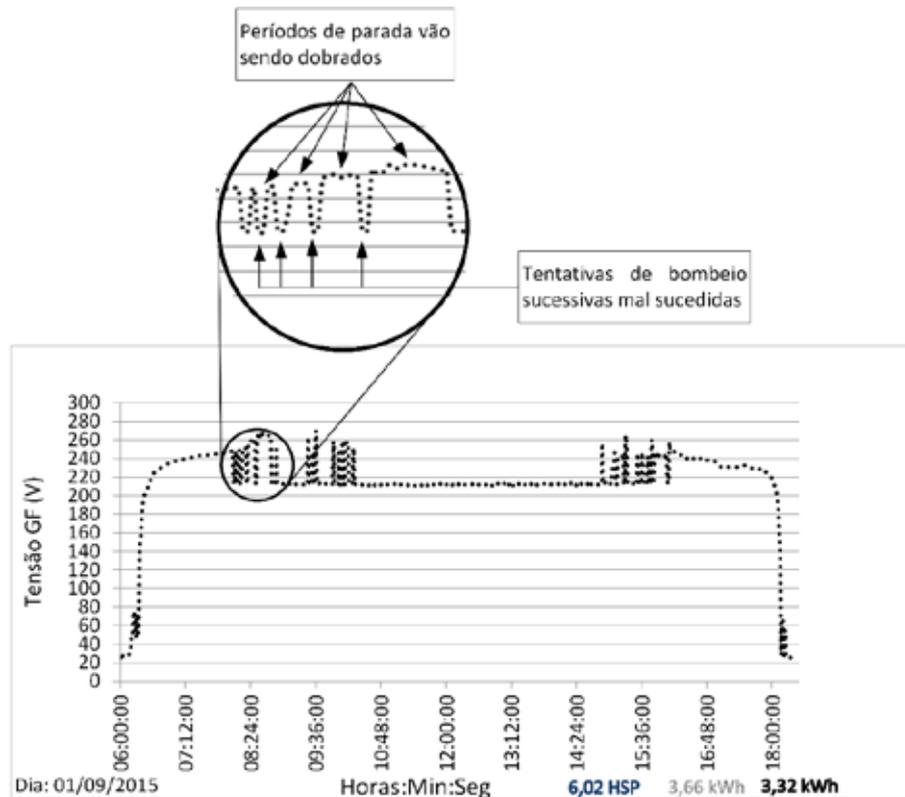
#### 4.2.2 - Parada da Motobomba Quando não for Detectado Fluxo de Bombeamento

Considerando que a velocidade com que a motobomba opera, depende do valor da irradiância disponível e que existe um valor mínimo de irradiância que proporciona ao sistema iniciar um ciclo de bombeamento, logo, também existe uma frequência mínima na qual o sistema começa o bombeamento, o valor observado para a altura manométrica de 35 mca está em torno de 51 Hz.

Quem estabelece a velocidade da motobomba (frequência de operação) é o sinal PWM, gerado pelo controlador *fuzzy* (aplicado ao CF através do filtro RC passa-baixas), então, pode-se concluir que existe um ciclo de trabalho mínimo do sinal PWM para o qual o sistema consiga estabelecer um fluxo de bombeamento. A estratégia de levar a motobomba ao repouso quando o sistema não está bombeando consiste no seguinte:

- O algoritmo monitora o ciclo de trabalho do sinal PWM e se o mesmo permanecer por um determinado intervalo de tempo (nos testes este período foi estabelecido em 2 minutos) abaixo do valor mínimo, o que significa que o sistema não bombeou no referido intervalo, a motobomba é desacelerada suavemente (desacelerada em rampa) até parar, então, o sistema aguardará inicialmente 2 minutos, passado esse tempo, nova tentativa de bombeio será iniciada, sendo esta nova tentativa malsucedida durante o período estabelecido, novamente a motobomba será levada ao repouso e aguardará, desta vez, o dobro do tempo que aguardou na tentativa anterior. O tempo que a motobomba ficará em repouso é dobrado a cada tentativa sucessiva e malsucedida até o limite de 30 minutos, que é o tempo máximo de parada estabelecido.

- As duas estratégias trabalham em conjunto, portanto, o sistema só sai do repouso se as condições de tensão mínima estabelecidas no item anterior forem verificadas. Vale salientar que estudos mais detalhados com relação aos parâmetros (tempos de: tentativa de bombeio e espera em repouso) para essa rotina, precisam ser melhor estabelecidos. A Figura 4.17 mostra, na parte expandida, os efeitos decorrentes do tipo de estratégia descrita.



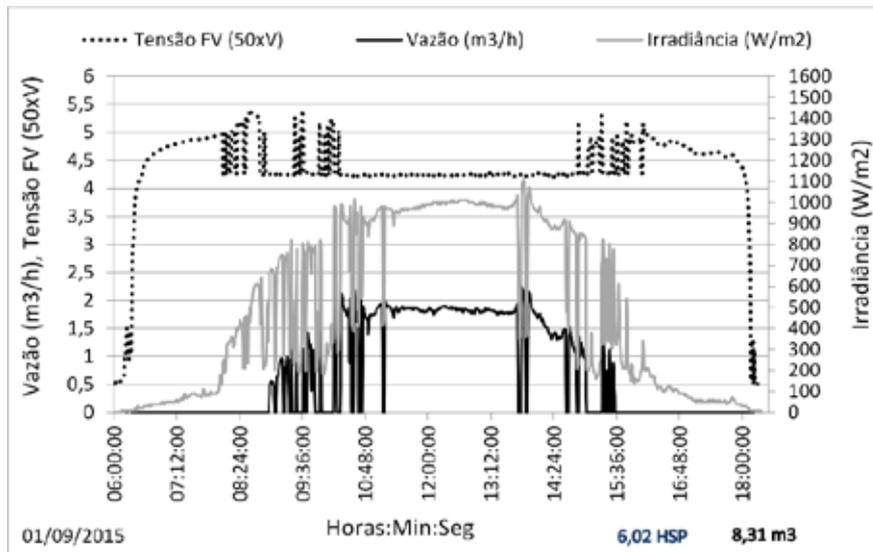
**Figura 4.17** - Efeitos decorrentes da parada da motobomba quando não há bombeamento.

Na sequência, o desempenho do sistema, com as rotinas descritas incorporadas, será analisado para um dia completo de bombeamento.

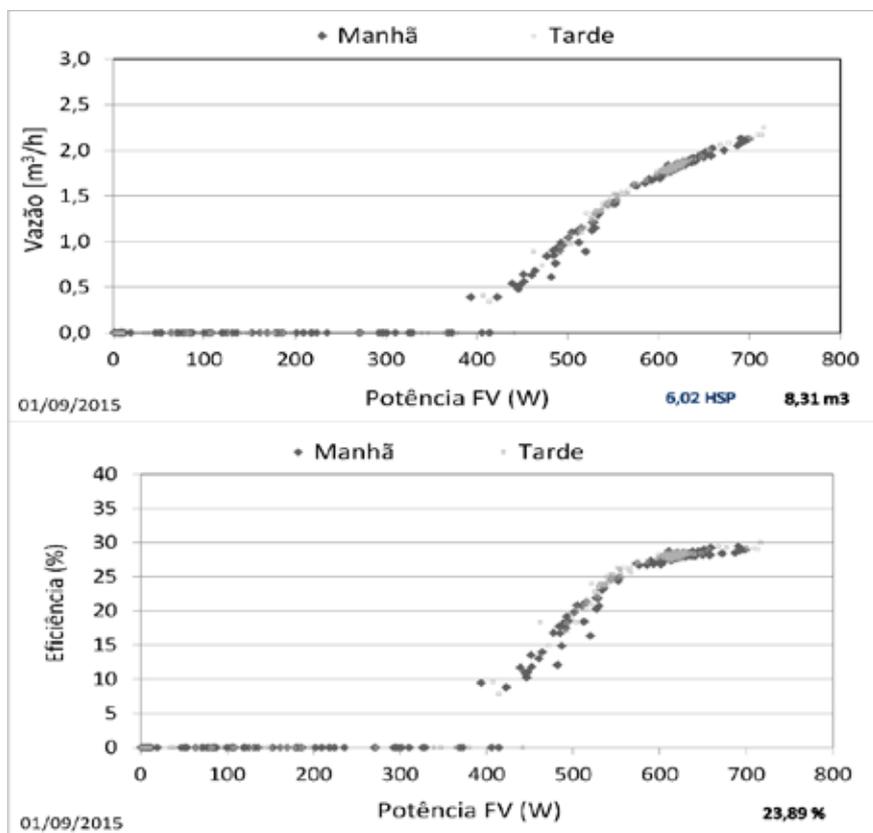
A Figura 4.18 mostra os comportamentos da irradiância e da tensão do gerador FV ao longo do dia. É possível constatar que a motobomba entra em operação por volta das 08h04 e encerra sua operação por volta das 16h14. Nos períodos de 08h04 às 10h25 e 14h54 às 16h14 observa-se que há diversas tentativas de bombeamento e paradas frequentes da motobomba. Nota-se, também, que o perfil de irradiância, nesses períodos, sofre muita influência das nuvens, o que explica esse comportamento, pois, as rotinas do programa identificam condições adversas para o bombeio e levam a motobomba a condição de parada. No período de 10h26 às 14h53 não há paradas da motobomba. Percebe-se pouca influência de nuvens nesse período, portanto, o sistema dispõe de recurso solar suficiente para o bombeamento. As rotinas do programa detectam essa condição e a motobomba funciona livre de paradas.

A Figura 4.19 mostra gráficos para vazão e eficiência. Nota-se que a vazão máxima ficou em torno de  $2,25 \text{ m}^3/\text{h}$ , enquanto o rendimento máximo está em torno de

30%, sendo que o rendimento médio foi de 23%, demonstrando que as funcionalidades agregadas não interferem no desempenho do sistema.



**Figura 4.18** - Dinâmica da irradiância, vazão e tensão do gerador fotovoltaico (Tensão FV).



**Figura 4.19** - Gráficos para vazão e eficiência com as estratégias para diminuir o desgaste do equipamento ativadas.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo o projeto de um controlador baseado em lógica *fuzzy* para controle da tensão de barramento CC de um CF industrial usado para acoplar geradores fotovoltaicos a motobombas centrífugas comerciais para uso em sistema fotovoltaico de bombeamento.

Nos testes experimentais realizados, o controlador apresentou desempenho robusto contra variações de intensidade solar e temperatura. A variável controlada (tensão do gerador fotovoltaico) seguiu a referência especificada com ótima regulação, durante todo o ciclo de bombeamento, mesmo ocorrendo variações bruscas da irradiância, evitando o bloqueio do CF por erros de subtensão.

O controlador *fuzzy* proposto foi implementado em um microcontrolador comercial de baixo custo e não utiliza sensor externo para a medição da irradiância. Apenas um divisor de tensão resistivo é usado para medir a variável do processo e fornecer a realimentação para o sistema de controle em malha fechada. Sua base de regras (parte fundamental do projeto) é obtida de forma intuitiva, analisando o comportamento do ponto de operação do sistema em diferentes regiões da curva I-V do gerador fotovoltaico e os universos de discursos das variáveis consideradas são estimados com facilidade. Estes aspectos de projeto, representam vantagem em relação ao projeto de um controlador PID, que para proporcionar a operação estável do sistema, necessita que seus parâmetros de sintonia sejam determinados, o que envolve maiores dificuldades uma vez que é necessário a utilização de algum método de identificação de sistemas para obtenção da função de transferência do sistema fotovoltaico de bombeamento, além, da necessidade de repetidos ajustes em seus parâmetros.

O controlador conseguiu trabalhar com bom desempenho em um ponto de operação muito próximo da tensão mínima de bloqueio para CF, onde o controlador PID embarcado não obteve êxito. Essa característica possibilita a redução do número de módulos, porém, o efeito de sobremodulação, inerente aos CFs industriais quando

trabalham com tensão de barramento inferior a 300 V CC, causa perdas de eficiência do sistema de bombeamento. Tomando como base o módulo fotovoltaico usado nos testes, para uma tensão de trabalho em torno de 300 V CC, levando em conta os efeitos da temperatura, seria necessário 19 (dezenove) módulos. Para a tensão de trabalho usada nos experimentos (207 V CC) foi necessário 13 (treze) módulos, isto é, uma redução de 30% no número de módulos.

A recuperação do sistema, quase de imediato, sempre que ocorre erros de subtensão e a manutenção do equipamento em repouso nos períodos que não há fluxo de bombeamento foram funcionalidades, agregadas ao algoritmo, que mostraram bom comportamento, apesar desta última necessitar de testes em longo prazo, tanto para ajustes dos seus parâmetros como para verificação do desgaste da motobomba. Contudo, é importante frisar que essas funcionalidades podem se tornar importantes tanto do ponto de vista de prolongar a vida útil da motobomba como também do CF, sem afetar o desempenho global do conjunto CF+motobomba.

Embora seja possível a utilização de CFs monofásicos com tensão de 127 V, deve-se dar preferência aos modelos 200-240 V CA, pois necessitam de um nível de tensão no barramento CC que evita o seu bloqueio menor que aqueles projetados para a tensão de 127 V CA. Esta característica leva a possibilidade de utilização de um menor número de módulos em série. Outra característica importante, que deve-se observar na escolha de CFs que serão acoplados a um controle externo, está associada a disponibilidade de uma referência de tensão auxiliar, simplificando demasiadamente a fonte de alimentação para o dispositivo que embarca o controlador.

Ainda que, nos testes experimentais, tenha-se usado o CF monofásico, o controlador está apto a operar com CFs trifásicos. Sua base de regras será a mesma e apenas o ajuste do universo de discurso da variável erro será necessário, uma vez que a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico e a tensão de subtensão do CF, provavelmente, serão diferentes.

## **5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão de trabalhos futuros destacam-se os seguintes temas:

- A avaliação do sistema em uma instalação real com o objetivo de identificar possíveis falhas em condições reais de operação e em um longo período de tempo;
- Avaliar de forma mais significativa, em períodos mais longos, a estratégia para diminuir desgaste do equipamento;
- Promover avaliações de desempenho, para diferentes fabricantes de CFs e motobombas, utilizando a mesma referência de tensão para os controladores *fuzzy* e PID;
- Avaliar o controlador operando em sistemas de maior potência que utilizam CFs trifásicos;
- Avaliar de forma mais aprofundada os efeitos da sobremodulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado, A. G., & Cantanhede, M. A. (s.d.). *Lógica Fuzzy*. Acesso em 25/03/2016, disponível em: [http://www.ftunicamp.br/liag/wp/monografias/monografias/2010\\_IA\\_FT\\_UNICAMP\\_logiaFuzzi.pdf](http://www.ftunicamp.br/liag/wp/monografias/monografias/2010_IA_FT_UNICAMP_logiaFuzzi.pdf).
- Almeida, P. E., & Evsukoff, A. G. (2005). Sistemas Fuzzy. Em S. O. Rezende, *Sistemas Inteligentes- Fundamentos e Aplicações* (pp. 169-201). Barueri, SP: Manole.
- Alonso-Abela, M., Chenlo, F., & Blanco, J. (2002). Optimización del Uso de Convertidores de Frecuencia con Bombas Centrífugas y Motores Trifásicos en Sistemas de Bombeo Fotovoltaico. *Era Solar: Energías Renovables*(2), 14-35.
- Alonso-Abela, M., Lorenzo, M., & Chenlo, F. (2003). PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converters. *Progress in Photovoltaics. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19, 179-191.
- Azevedo, G. M. (s.d.). *Sistema de Conversão de Energia Fotovoltaica com Compensação Baseada em Corrente e Tensão*. Recife, 2007: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPE.
- Barbosa, B. H. (s.d.). *Instrumentação, Modelagem, Controle e Supervisão de um Sistema de Bombeamento de Água e Módulo Turbina–Gerador*. Belo Horizonte, 2006: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG.
- BARROS, A. C. (s.d.). *Detecção e Classificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas Elétricos de Potência Usando Lógica Fuzzy*. Ilha Solteira-SP, 2009: Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação.
- Brito, A. U. (s.d.). *Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrífugas*. São Paulo, 2006: Tese (Doutorado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, PIPGE, USP.

Brito, A. U., & Zilles, R. (2006). Systematized Procedure for Parameter Characterization of a Variable-speed Drive Used in Photovoltaic Pumping Applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14, 249-260.

BRITO, A. U., FEDRIZZI, M. C., & ZILLES, R. (2006). *Bancada de Ensaio para Averiguação Operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento*. In: 6º Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas.

Camboim, W. L. (s.d.). *Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água*. João Pessoa, 2008: Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB.

CAPELLI, A. (02 de 2002). Inversores de Frequência. *Mecatrônica Atual*.

Corrêa, T. P. (s.d.). *Desenvolvimento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Maximização das Eficiências do Arranjo Fotovoltaico e do Motor Elétrico*. Belo Horizonte, 2008: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG.

Driesse, A., Harrison, S., & Jain, P. (07 de 2007). Evaluating the Effectiveness of Maximum Power Point Tracking Methods in Photovoltaic Power Systems using Array Performance Models. *IEEE annual power electronics specialists conference*.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4ª ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

FEDRIZZI, M. C. (s.d.). *Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão*. São Paulo, 2003: Tese (Doutorado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, PIPGE, USP.

Franklin, T. S. (s.d.). *Simulação de um Sistema de Bombeamento D'água Empregando Energia Solar Fotovoltaica*. Salvador, 2009: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFBA.

Gomes, H. P. (2010). *Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética* (1ª ed.). Editora Universitária/UFPB.

Grupo de Trabalho em Energia Solar - GTES - CEPEL - DTE. (s.d.). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 2014. Fonte: [http://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)

JÚNIOR, W. B. (s.d.). *Monitoramento do Desempenho de Diferentes Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos*. Belém, 2014: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE, UFPA.

MARANHÃO, G. N. (s.d.). *Controlador Fuzzy Para Uso em Conversores de Freqüência Aplicado à Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento*. Belém, 2015: Tese (Doutorado) - Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica, UFPA.

MARTÍN, E. C. (s.d.). *Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica: Caracterización y Análisi*. Madri, 1998: Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.

Meléndez, T. A. (s.d.). *Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento*. São Paulo, 2009: Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, PIPGE, USP.

Melo, R. O. (s.d.). *Condicionamento de Potência de uma Motobomba em um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico Através de um Conversor de Freqüência*. Recife, 2004: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, DEN, UFPE.

National Instruments. (s.d.). *Defuzzification Methods (PID and Fuzzy Logic Toolkit)*. Acesso em 24/03/2016, disponível em [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370401G-01/lvpid/defuzzification\\_methods/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370401G-01/lvpid/defuzzification_methods/)

Netto, J. C. (s.d.). *Controladores Nebulosos Aplicados a Processos Industriais: Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia*. Juiz de Fora, 2005: Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFJF.

Oi, A. (s.d.). *Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System*. San Luis Obispo, 2005: Master's Thesis, California Polytechnic State University.

Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley Longman, Inc.

*pcwh-ide-compiler*. (s.d.). Acesso em 12 de março de 2016, disponível em <http://www.software.com.br/p/pcwh-ide-compiler>

PINHO, J. T., BARBOSA, C. F., PEREIRA, E. J., SOUZA, H. M., BLASQUES, L. C., GALHARDO, M. A., & MACÊDO, W. N. (2008). *Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia 1ª Edição*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Sanches, E. C. (s.d.). *Controle por Aprendizado Acelerado e Neuro-Fuzzy de Sistemas Servo – Hidráulicos de Alta Frequência*. Rio de Janeiro, 2009: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica, PUC Rio.

schneider motobombas. (s.d.). *Curva SUB-15*. Acesso em 18/02/2016, disponível em <http://www.schneider.ind.br/media/203891/Curvas-SUB-15.pdf>

Simões, M. G., & Shaw, I. S. (2007). *Controle e Modelagem Fuzzy* (2ª ed.). São Paulo: Blucher.

Soto, W. D., Klein, S., & Beckman, W. (2006). Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. *Solar Energy*, 78-88.

Tanscheit, R. (2004). *Sistemas Fuzzy*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio.

The MathWorks, Inc. (s.d.). *Fuzzy Logic Toolbox - User's Guide*. Acesso em 10/03/2016, disponível em [http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/fuzzy/fuzzy.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf)

UNESCO. (2015). *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos-Água para um Mundo Sustentável*. Colombella, Perugia - Itália.

UNESCO. (2015). *WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris.

Villalva, M. G. (s.d.). *Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica*. Campinas, 2010: Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

WEG S/A. (s.d.). *CFW10 - Manual do Usuário*. Acesso em 25/01/2016, disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw10-manual-do-usuario-0899.5860-2.xx-manual-portugues-br.pdf>

Xiao, W., & Palmer, P. R. (06 de 2007). Regulation of Photovoltaic Voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54, 1365-1374.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338-353.

## APÊNDICE A

### CÓDIGO UTILIZADO NA PROGRAMAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY

O código foi escrito em linguagem C padrão CCS

```
#include <18F4550.h>
#device ADC=10
#FUSES HS
#FUSES WDT //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT128 //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES PUT //Power Up Timer
#FUSES NOBROWNOUT //No brownout reset
#FUSES NOVREGEN //USB voltage regulator disabled
#FUSES MCLR //Master Clear pin used for I/O
#FUSES NOLVP //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#FUSES NOXINST //Extended set extension and Indexed Addressing mode disabled (Legacy mode)

#use delay(crystal=20000000)
.

#INCLUDE <math.h>

float R1=110.0; //valor do resistor R1 do sensor de tensão
float R2=1.8; //valor do resistor R2 do sensor de tensão
float RVs=R2/(R1+R2); //resolução do sensor de Tensão - R1/(R1+R2)

float GF=3.0; //ganho fuzzy

float setpoint=207; //set point em volts
float Vst=200.0; //tensão de subtensão
float Vsp=setpoint;

float Voc=255.0;
float Emax=Vsp-Vst;
float Emin=Vsp-Voc;

float dEmax=5.0;
float dEmin=-5.0;

float Smax=1.0;
float Smin=-1.0;

float eNG_a=(3.0*Emin+2)/2; float eNG_b=Emin; float eNG_c=Emin+2; float eNG_d=(Emin+2)/2.0;
float eNS_a=Emin+2; float eNS_b=(Emin+2)/2.0; float eNS_c=0.0;
float eZE_a=(Emin+2)/2.0; float eZE_b=0.0; float eZE_c=(Emax-2)/2.0;
float ePS_a=0.0; float ePS_b=(Emax-2)/2.0; float ePS_c=Emax-2;
float ePG_a=(Emax-2)/2.0; float ePG_b=Emax-2; float ePG_c=Emax; float ePG_d=(3.0*Emax-2)/2.0;

float ceNG_a=(3.0*dEmin+1)/2.0; float ceNG_b=dEmin; float ceNG_c=dEmin+1; float ceNG_d=(dEmin+1)/2.0; //a, b e c da fp NG da variavel variação do erro(ce)
float ceNS_a=dEmin+1; float ceNS_b=(dEmin+1)/2.0; float ceNS_c=0.0; //a, b e c da fp NS da variavel variação do erro(ce)
float ceZE_a=(dEmin+1)/2.0; float ceZE_b=0.0; float ceZE_c=(dEmax-1)/2.0; //a, b e c da fp ZE da variavel variação do erro(ce)
float cePS_a=0.0; float cePS_b=(dEmax-1)/2.0; float cePS_c=dEmax-1; //a, b e c da fp PS da variavel variação do erro(ce)
float cePG_a=(dEmax-1)/2.0; float cePG_b=dEmax-1; float cePG_c=dEmax; float cePG_d=(3.0*dEmax-1)/2.0; //a, b e c da fp PG da variavel variação do erro(ce)

float s_NG=Smin;
float s_NM=2.0*(Smin/3.0);
```

```

float s_NS=Smin/3.0;
float s_Z=0.0;
float s_PS=Smax/3.0;
float s_PM=2.0*(Smax/3.0);
float s_PG=Smax;

int16 cont=0;
int16 Ncont=10; //ação de controle a cada 10ms
int16 contaux=0;
int contsub=0;
int periodo=1; //periodo de inatividade do fuzzy
int tempoEspera=0;
int16 contespera=0;
unsigned int32 contTempo=0;
unsigned int32 contm=0;
int32 contCR=0;
int CF=0; //indica que o CF está ligado
int CT=0; //contagem de tempo
int FA=0; //fuzzy acionado
int ST;

int T0=100;
int p2=239; //carga do timer2
float e=0.0;
float e_=0.0;
float sp=0.0; //set point em escala
float vc=0.0; //variável controlada
float ce=0.0;

int valor;
float Vo;
float dVo;

#INT_RTCC
void RTCC_isr(void)
{
    set_timer0(T0+get_timer0()); //To = 100
    cont++;
    contCR++;
    contespera++;
    contTempo++;
    contm++;
    contaux++;
    if(contaux==500)
    {
        output_toggle(pin_b0); //indicador
        contaux=0;
    }
}

#INT_TIMER2
void TIMER2_isr(void)
{
}

float minimo(float x,float y){
    if (x<y){
        return x;
    }
    else{
        return y;
    }
}

```

```
}
```

```
float fptri(float x,float a,float b,float c){  
float fp=0.0;  
if ((x<=a)|| (x>=c)){  
    fp=0.0;  
}  
else{  
    if (x>=a && x<=b){  
        fp=(x-a)/(b-a);  
    }  
    else{  
        fp=(c-x)/(c-b);  
    }  
}  
return fp;  
}
```

```
float fptra(float x,float a,float b,float c,float d){  
float fp=0.0;  
if ((x<=a)|| (x>=d)){  
    fp=0.0;  
}  
else{  
    if (x>=a && x<=b){  
        fp=(x-a)/(b-a);  
    }  
    else{  
        if (x>=b && x<=c){  
            fp=1.0;  
        }else{fp=(d-x)/(d-c);}  
    }  
}  
return fp;  
}
```

```
float fuzzy(float e,float ce){ //recebe o erro (e) e a variação do erro (ce)
```

```
float erro_NG, erro_NS, erro_Z, erro_PS, erro_PG;  
float cerro_NG, cerro_NS, cerro_Z, cerro_PS, cerro_PG;  
float R;  
float SP, SR;  
SP = 0.0;  
SR = 0.0;  
erro_NG = fptra (e, eNG_a, eNG_b, eNG_c, eNG_d) ;  
erro_NS = fptri (e, eNS_a, eNS_b, eNS_c) ;  
erro_Z = fptri (e, eZE_a, eZE_b, eZE_c) ;  
erro_PS = fptri (e, ePS_a, ePS_b, ePS_c) ;  
erro_PG = fptra (e, ePG_a, ePG_b, ePG_c, ePG_d) ;  
cerro_NG = fptra (ce, ceNG_a, ceNG_b, ceNG_c, ceNG_d) ;  
cerro_NS = fptri (ce, ceNS_a, ceNS_b, ceNS_c) ;  
cerro_Z = fptri (ce, ceZE_a, ceZE_b, ceZE_c) ;  
cerro_PS = fptri (ce, cePS_a, cePS_b, cePS_c) ;  
cerro_PG = fptra (ce, cePG_a, cePG_b, cePG_c, cePG_d) ;  
//R1 - se e=NG e ce=NG entao dD=PG  
R=minimo(erro_NG,cerro_NG);  
SR=R;  
SP=R*s_PG;  
//R2 - se e=NG e ce=NS entao dD=PG  
R=minimo(erro_NG,cerro_NS);  
SR=SR+R;  
SP=SP+R*s_PG;  
//R3 - se e=NG e ce=ZE entao dD=PG  
R=minimo(erro_NG,cerro_Z);
```

```

SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PG;
//R4 - se e=NG e ce=PS entao dD=PM
R=minimo(erro_NG,cerro_PS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PM;
//R5 - se e=NG e ce=PG entao dD=PS
R=minimo(erro_NG,cerro_PG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R6 - se e=NS e ce=NG entao dD=PG
R=minimo(erro_NS,cerro_NG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PM;
//R7 - se e=NS e ce=NS entao dD=PM
R=minimo(erro_NS,cerro_NS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R8 - se e=NS e ce=ZE entao dD=PS
R=minimo(erro_NS,cerro_Z);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R9 - se e=NS e ce=PS entao dD=PM
R=minimo(erro_NS,cerro_PS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R10 - se e=NS e ce=PG entao dD=PS
R=minimo(erro_NS,cerro_PG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R11 - se e=ZE e ce=NG entao dD=PM
R=minimo(erro_Z,cerro_NG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R12 - se e=ZE e ce=NS entao dD=PS
R=minimo(erro_Z,cerro_NS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_PS;
//R13 - se e=ZE e ce=ZE entao dD=Z
R=minimo(erro_Z,cerro_Z);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_Z;
//R14 - se e=ZE e ce=PS entao dD=NS
R=minimo(erro_Z,cerro_PS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NS;
//R15 - se e=ZE e ce=PG entao dD=NM
R=minimo(erro_Z,cerro_PG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NM;
//R16 - se e=PS e ce=NG entao dD=NS
R=minimo(erro_PS,cerro_NG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NS;
//R17 - se e=PS e ce=NS entao dD=NM
R=minimo(erro_PS,cerro_NS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NM;
//R18 - se e=PS e ce=ZE entao dD=NS
R=minimo(erro_PS,cerro_Z);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
//R19 - se e=PS e ce=PS entao dD=NM
R=minimo(erro_PS,cerro_PS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NM;
//R20 - se e=PS e ce=PG entao dD=NG

```

```

R=minimo(erro_PS,cerro_PG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
//R21 - se e=PG e ce=NG entao dD=NS
R=minimo(erro_PG,cerro_NG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NM;
//R22 - se e=PG e ce=NS entao dD=NM
R=minimo(erro_PG,cerro_NS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
//R23 - se e=PG e ce=ZE entao dD=NG
R=minimo(erro_PG,cerro_Z);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
//R24 - se e=PG e ce=PS entao dD=NG
R=minimo(erro_PG,cerro_PS);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
//R25 - se e=PG e ce=PG entao dD=NG
R=minimo(erro_PG,cerro_PG);
SR=SR+R;
SP=SP+R*s_NG;
RETURN SP/SR; //defuzificação centro do máximo
}

```

// Funções auxiliaresII

```

void esperam(int32 x){ //x em minutos
contm=0;
while(contm<60000*x){restart_wdt();}
cont=0;
contaux=0;
}

```

```

void zeraFuzzy(){ //zera a tensão fuzzy em rampa
cont=0;
while(Vo!=0.0){
restart_wdt();
if(cont==40){ //cada passo e de 40ms - de 100% a 0% o tempo e de aproximadamente 10s
cont=0;
Vo=Vo-1;
if(Vo<0.0){Vo=0.0;}
valor=Vo;
set_pwm1_duty(valor);
}
}
}

```

// Funções auxiliaresI

```

void espera(float x){
contespera=0;
while(contespera<1000*x){restart_wdt();}
cont=0;
contaux=0;
}

```

```

void resetFuzzy(){
Vo=0;
e=0.0;
valor=Vo;
}

```

```

void ligaCF(){
output_high(PIN_B1);
}

```

```

    espera(0.01);
    output_low(PIN_B1);
}

void resetaCF(){
    output_high(PIN_B3);
    espera(0.01);
    output_low(PIN_B3);
}

void Ler_adc(){ // faz o valor medio de dez amostras de corrente e tensão
    int cont_ler=0;
    vc=0;
    while (cont_ler<10){
        restart_wdt();
        set_adc_channel(0);
        delay_us(40);
        vc=vc+read_adc();
        cont_ler++;
    }
    vc=vc/cont_ler;
}

void Ler_adc2(){ // faz o valor medio quadratico de dez amostras de corrente e tensão
    int cont_ler=0;
    float Vt=0.0;
    float Vc_2;
    vc=0;
    while (cont_ler<10){
        restart_wdt();
        set_adc_channel(0);
        delay_us(40); //revisar esse tempo
        vc=read_adc();
        Vc_2=(float)vc*vc;
        Vt=Vt+Vc_2;
        cont_ler++;
    }
    vc=sqrt(Vt/cont_ler);
}

int tmin(){ //tensão mínima para ligar o cf
    int aux=0;
    if(vc>(240*RVs)){ //240 V
        aux=1;
    }
    return aux;
}

int eSub(){
    int aux=0;
    if(input(PIN_A1)==1){
        consub++;
        if(consub>3){
            aux=1;
        }
    }else{consub=0;}

    return aux;
}

void main()
{

```

```

setup_wdt(WDT_2S);
setup_adc_ports(AN0);
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_32|RTCC_8_bit);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,p2,1);

setup_ccp1(CCP_PWM);

Vo=0.0;

set_pwm1_duty(Vo);

enable_interrupts(INT_RTCC);
enable_interrupts(INT_TIMER2);
enable_interrupts(GLOBAL);
disable_interrupts(INT_TIMER1);

output_high(pin_b0); //indicador led

while(TRUE)
{
  restart_wdt();
  if(cont==Ncont)
  {
    cont=0;
    set_adc_channel(0);
    delay_us(40); //revisar esse tempo
    Ler_adc();
    vc=vc*0.004887585532746823069403714565; //10 bits 5/1023(1024-1)
    sp=setpoint;
    e=sp-(vc/RVs); //calculo do erro

    if (e<Emin)
    {
      e=Emin;
    }
    if (e>Emax)
    {
      e=Emax;
    }

    ce=e-e_; //calculo da variação do erro

    if (ce<dEmin)
    {
      ce=dEmin;
    }
    if (ce>dEmax)
    {
      ce=dEmax;
    }

    dVo=fuzzy(e,ce);

    dVo=GF*dVo; //GF= 2(duty_c de 1%)
                //GF= 12(duty_c de 5%)

    Vo=Vo+dVo;

    if (Vo>p2)
    {
      Vo=p2;
    }
  }
  if (Vo<0)
  {
    Vo=0.0;
  }
}

```

```

}

//---Rotina detecta erro de subtensão-----

ST=eSub();
if(ST==1){
  resetFuzzy();
  // output_low(PIN_B4); //indica CF ressetado
  resetaCF();
  reset_cpu();
  CF=0;

}

if(tmin()==1){
  // output_high(PIN_B4); //indica CF ligado
  // resetaCF();
  ligaCF();
  CF=1;
}

if(CF==0){Vo=0.0;}

//----inicio rotina espera-----

if(FA==1 && ST==0){
  if(Vo<175.0){ //o valor correto é de 175 - nesse valor o CF não bombeia
    if(CT==0){
      CT=1; //conta o tempo
      contTempo=0;
    }
    else{
      if(contTempo>120000){ //tempo maior que 2min
        zeraFuzzy();
        FA=0; //indica fuzy em zero
        CT=0;
        contTempo=0;
        output_high(pin_b4);
        esperam(periodo);
        output_low(pin_b4);
        periodo=2*periodo;

        //tempoEspera=1*(2^(ntentativa-1));
        if(periodo>30){periodo=30;}
      }
    }
  }else{CT=0;contTempo=0; periodo=1;tempoEspera=0;}
}

if(FA==0){
  if(tmin()==0){
    Vo=0;
    output_low(pin_b7);
    CT=0;
  }else{FA=1;output_high(pin_b7);}
}

//-----Fim Rrotina Espera-----
valor=(int)Vo;
set_pwm1_duty(valor);

e_=e;
}
}
}

```