

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLADOR *FUZZY* PARA USO EM CONVERSORES DE  
FREQUÊNCIA APLICADO À SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE  
BOMBEAMENTO

GERALDO NEVES DE ALBUQUERQUE MARANHÃO

TD 15/2015

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GERALDO NEVES DE ALBUQUERQUE MARANHÃO

CONTROLADOR *FUZZY* PARA USO EM CONVERSORES DE  
FREQUÊNCIA APLICADO À SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE  
BOMBEAMENTO

TD 15/2015

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GERALDO NEVES DE ALBUQUERQUE MARANHÃO

CONTROLADOR *FUZZY* PARA USO EM CONVERSORES DE  
FREQUÊNCIA APLICADO À SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
DE BOMBEAMENTO

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2015**

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

---

Maranhão, Geraldo Neves de Albuquerque , 1982-  
Controlador fuzzy para uso em conversores de  
frequencia aplicado sistemas fotovoltaicos de  
bombeamento / Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão. -  
2015.

Orientador: Wilson Negrão Macedo;

Coorientador: Alaam Ubaiara Brito.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2015.

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

CDD 22. ed. 621.47

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“CONTROLADOR *FUZZY* PARA USO EM CONVERSORES DE FREQUÊN-  
CIA APLICADO À SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO”**

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGI-  
ADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA,  
SENDO JULGADA AEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉ-  
TRICA.

APROVADA EM: 06/11/2015

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Alaán Ubaiara Brito**  
(Coorientador – UNIFAP)

---

**Prof. Dr. João Tavares Pinho**  
(Avaliador do Programa – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo**  
(Avaliador Externo ao Programa – FEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Roberto Zilles**  
(Avaliador Externo – USP)

---

**Prof. Dr. João Batista Dias**  
(Avaliador Externo – UNISINOS)

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho às pessoas que sempre estiveram ao meu lado  
nas derrotas e nas vitórias, nas alegrias e tristezas,  
nos desafios e na superação:*

*À minha esposa, Lorena,*

*À minha mãe, Yvone,*

*À minha irmã, Julie,*

*E ao meu pai, Geraldo (em memória),  
que nunca deixou de estar comigo.*

## AGRADECIMENTOS

A vida, em especial a acadêmica, pode ser vista como uma experiência de “nãos” à espera de um “sim”, que pode demorar a vir, mas quando vem, tem o poder de mudar tudo.

Com este foco, gostaria de iniciar agradecendo a Deus. Foi n’Ele que eu encontrei forças para não desistir, para enfrentar os “nãos” em busca de “sims”. Estou certo que foi Ele também que colocou pessoas no meu caminho, que fizeram ser possível a finalização desse trabalho.

Agradeço à minha família, minha esposa, que agora espera nosso (a) filho (a) tão amado (a), minha mãe e irmã, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, dando força, tendo paciência e encorajando.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo e Prof. Dr. Alaan Ubaiara Brito. Vocês são responsáveis pelo resgate desse doutorado; a vocês minha mais sincera gratidão.

Ao coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes e sua equipe pela solicitude e apoio.

Aos amigos do Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP e aos amigos do GEDAE, pelo suporte dado pela amizade de todas as horas.

Aos amigos Maro Ciro e Erick Rocha pela torcida.

A todos os que contribuíram nos experimentos, bem como no desenvolvimento deste trabalho, em especial a Andreza, Salatiel, Jéssica, Anderson e Otávio.

E a todos (as) os (as) amigos (as) que torceram e rezaram para que houvesse êxito nesse trabalho; muito obrigado mesmo.

*“Dai graças ao Senhor, porque Ele é Bom,  
eterna é a sua misericórdia” – Salmo 117.*

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	20
1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO DE CONEXÃO DIRETA .....	24
1.1. Componentes de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento de Conexão Direta .....	24
1.1.1. Gerador Fotovoltaico .....	25
1.1.1.1. Características Gerais.....	25
1.1.1.2. Influência da irradiância e da temperatura na curva I-V.....	28
1.1.1.3. Associação de Células Fotovoltaicas. ....	30
1.1.1.4. Efeito do Sombreamento em Arranjos Fotovoltaicos. ....	31
1.1.2. Conversor de Frequência.....	33
1.1.2.1. Características Gerais.....	33
1.1.2.2. Características Mínimas para a Aplicação de CF's em SFB's.....	35
1.1.2.3. Metodologia de Controle de Tensão por Frequência. ....	36
1.1.2.4. Controle Dinâmico da Velocidade Angular Utilizando Controlador PID. .....	39
1.1.2.5. Desafios da Utilização do Controlador PID em SFB.....	39
1.1.2.6. Unidade Interna de Processamento de Dados do CF. ....	40
1.1.2.7. Limites de Tensão do Barramento c.c.....	42
1.1.2.8. Entradas e Saídas Auxiliares. ....	43
1.1.3. Motobombas Fotovoltaicas. ....	44
2. LÓGICA <i>FUZZY</i> PARA O CONTROLE APLICADO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO .....	52
2. 1 Estrutura de um Sistema Lógico <i>Fuzzy</i> .....	53
2. 2 Fuzzificadores .....	54
2. 3 Base de Regras e Máquina de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	55
2. 4 Defuzzificadores .....	56
2. 5 Controlador <i>Fuzzy</i> Baseado em Regras.....	57
2. 6 Programação de Controladores <i>Fuzzy</i> .....	58
2. 7 Modelagem do Controlador <i>Fuzzy</i> para o SFB.....	60

3. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS OBTIDOS .....	61
3. 1 Bancada de Ensaio em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.....	61
3. 1.1 Bancada de Ensaio da Universidade Federal do Amapá.....	63
3. 1.2 Bancada de Ensaio da Universidade Federal do Pará.....	64
3. 2 Dispositivo Utilizado para Embarcar o Controlador <i>Fuzzy</i> . ....	65
3. 3 Controlador <i>Fuzzy</i> para CF's Aplicados em SFB's Utilizando um LDR como Sensor. ....	68
3. 3.1 Light-Dependent Resistance. ....	68
3. 3.2 Controlador <i>Fuzzy</i> . ....	73
3. 3.3 Resultados Obtidos. ....	75
3. 4 Controlador <i>Fuzzy</i> para CF's Aplicados em SFB's Utilizando um Módulo FV de Baixa Potência como Sensor. ....	78
3. 4.1 Módulo Sensor. ....	78
3. 4.2 Testes Preliminares com um Controlador PID.....	80
3. 4.3 Metodologia de Controle <i>Fuzzy</i> . ....	86
3. 4.4 Resultados Obtidos. ....	89
CONCLUSÕES .....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99
ARTIGOS DESENVOLVIDOS DURANTE O DOUTORADO .....	102
ANEXOS .....	103
Anexo A – Conjuntos e Operadores <i>Fuzzy</i> .....	103
APÊNDICES .....	106
Apêndice A – Código Utilizado na Programação do Controlador <i>Fuzzy</i> Utilizando o LDR .....	106
Apêndice B – Código Utilizado na Programação do FLC Utilizando o Módulo Sensor .....	109

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico de bombeamento de conexão direta.....	24
Figura 1.2 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal. ....	26
Figura 1.3 – Curva característica de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 1.4 – Circuito equivalente de uma célula não-ideal. ....	27
Figura 1.5 – Efeito da inserção da resistência série na curva I-V. ....	28
Figura 1.6 – Efeito da inserção da resistência paralela na curva I-V. ....	28
Figura 1.7 – Curva I-V representativa de uma célula, módulo ou gerador fotovoltaico para diferentes valores de irradiância. ....	29
Figura 1.8 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura. ....	29
Figura 1.9 – Variação do ponto de máxima potência de uma célula fotovoltaica considerando variações na irradiância e na temperatura. ....	29
Figura 1.10 – Curva I-V para um arranjo de células fotovoltaicas.....	30
Figura 1.11 – Circuito de um conjunto de células considerando o efeito do sombreamento. ....	31
Figura 1.12 – Efeito do sombreamento em um arranjo fotovoltaico; (a) diagrama esquemático; (b) curva I-V; (c) curva P-V. ....	32
Figura 1.13 – Diagrama elétrico básico de um conversor de frequência convencional. ....	33
Figura 1.14 – Diagrama de blocos de um conversor de Frequência (Capelli, 2002). ....	34
Figura 1.15 – Diferentes Tipos de Torque (a) Torque Linear (b) Torque Quadrático. ...	37
Figura 1.16 – Parametrização da Curva V/f para uma Bomba Centrífuga de Característica de Torque Quadrático. ....	38
Figura 1.17 – Diagrama de Blocos de um Controlador PID. ....	39
Figura 1.18 – Diagrama Geral de um CF Comercial.....	41
Figura 1.19 – Diagrama do Uso de Controle Externo ao CF. ....	44
Figura 1.20 – Conjunto submersível composto por conversor + bomba + motor (PRACTICAL ACTION, 2015). ....	45
Figura 1.21 – Característica de vazão em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em $H_T = 15$ m. ....	49

Figura 1.22 – Característica de eficiência em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em $H_T = 15$ m.....	50
Figura 1.23 – Característica de eficiência em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em $H_T = 35$ m.....	51
Figura 2.1 – Representação geral de um sistema <i>fuzzy</i> .....	53
Figura 2.2 – Obtenção das Pertinências. ....	58
Figura 2.3 – Exemplificação de um fluxograma para um controlador <i>fuzzy</i> de duas entradas. ....	59
Figura 2.4 – Configuração do controlador <i>fuzzy</i> para o SFB.....	60
Figura 3.1 – Bancada de ensaios de motobombas: (a) Diagrama esquemático; (b) Sistema real montado no laboratório do GEDAE/UFPA.....	61
Figura 3.2 – Exemplo de teste operacional realizado com a bancada de ensaios de motobombas .....	63
Figura 3.3 – Dispositivo para Programação de Controladores. (a) Foto da placa e (b) Diagrama de blocos. ....	67
Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um SFB com controle externo utilizando LDR como sensor. ....	68
Figura 3.5 – Circuito utilizando o LDR ligado ao controlador <i>fuzzy</i> . ....	68
Figura 3.6 – Faixa de operação linear do LDR.....	69
Figura 3.7 – Resposta do circuito série do LDR e irradiância durante um dia (a) de céu claro e (b) parcialmente nublado. ....	70
Figura 3.8 – Resposta normalizada do LDR em um dia (a) de céu claro e (b) parcialmente nublado. ....	70
Figura 3.9 – a) Resposta espectral do LDR e do silício amorfo. (b) Espectro da irradiação solar e de um piranômetro. ....	72
Figura 3.10 – Conjuntos <i>fuzzy</i> de entrada.....	73
Figura 3.11 – Sinal de entrada do controlador <i>fuzzy</i> . (a) Resposta do circuito série do LDR e (b) Variação da resposta de circuito série do LDR.....	75
Figura 3.12 – Comportamento detalhado do parâmetro G. ....	76
Figura 3.13 – Desempenho controlador <i>fuzzy</i> em relação ao comportamento da tensão do barramento c.c. ....	77
Figura 3.14 – Exemplo de Tensão no barramento c.c. do CF com a atuação do controlador PID (Brito, 2006). ....	78

Figura 3.15 – Tensão e irradiância obtidos com o módulo sensor e irradiância obtida com a célula calibrada. ....	79
Figura 3.16 – Eficiência em função da altura manométrica da motobomba de teste. ....	80
Figura 3.17 – Distribuição da energia produzida pelo GFV para a cidade de Belém/PA. ....	81
Figura 3.18 – Dinâmica ao longo de um dia de teste: Irradiância incidente no plano do GFV, produção de eletricidade do GFV, vazão, tensão do barramento c.c. do CF com a atuação do controle PID e pressão na tubulação equivalente a 35 m de altura manométrica. ....	82
Figura 3.19 – Curva de capacidade instantânea da motobomba em função da potência produzida pelo GFV e da irradiância.....	83
Figura 3.20 – Dinâmica de redução da vazão no período da tarde.....	83
Figura 3.21 – Evolução do volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo GFV para o dia de teste referente à Figura 3.18.....	84
Figura 3.22 – Valores medidos e calculados para a máxima transferência de potência. 85	
Figura 3.23 – Perfil da geração e da vazão, supondo a estratégia de seguimento embarcada junto ao CF utilizado no sistema de bombeamento.....	85
Figura 3.24 – Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador PID: Períodos da manhã e tarde. ....	86
Figura 3.25 – Célula calibrada e módulo sensor, ambos instalados no mesmo plano do gerador FV.....	87
Figura 3.26 – Conjuntos <i>fuzzy</i> de entrada G.....	88
Figura 3.27 – Conjuntos <i>fuzzy</i> de entrada dG.....	88
Figura 3.28 – Dinâmica ao longo de um dia de teste: Irradiância incidente no plano do GFV, produção de eletricidade do GFV, vazão, tensão do barramento c.c. do CF com a atuação do controle tipo <i>fuzzy</i> e pressão na tubulação equivalente a 35 m de altura manométrica. ....	89
Figura 3.29 – Curva de capacidade instantânea da motobomba em função da potência produzida pelo GFV e da irradiância.....	90
Figura 3.30 – Evolução do volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo GFV considerando a atuação do controlador <i>fuzzy</i> . ....	91
Figura 3.31 – Valores medidos e calculados para a máxima transferência de potência. 91	

- Figura 3.32 – Comparação entre as dinâmicas do SFB com PID e *fuzzy*: perfis de irradiância, geração, vazão e eficiência do conjunto motobomba mais CF. .... 92
- Figura 3.33 – Comparação entre as estratégias de controle *fuzzy* e PID: Vazão e eficiência do conjunto (motobomba + CF) em função da potência desenvolvida pelo GFV. .... 93
- Figura 3.34 – Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador *fuzzy*: Períodos da manhã e tarde..... 94
- Figura 3.35 – Comparação entre eficiências médias de forma estratificada do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) ..... 94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Especificação do sistema de bombeamento modelado em Yaichi e Fellah (2013). .....	46
Tabela 1.2 – Resultados experimentais obtidos por Yaichi e Fellah (2013) para a motobomba SP5A7 ( $Q=0$ indica que a válvula está completamente fechada.....	48
Tabela 1.3 – Vazão de uma motobomba centrífuga comercial para diferentes valores de altura manométrica. ....	50
Tabela 2.1 – Exemplo da Base de Regras para detectar risco de incêndio florestal. ....	56
Tabela 3.1 – Características do módulo FV utilizado. ....	63
Tabela 3.2 – Características do módulo FV utilizado considerando os efeitos da degradação. ....	64
Tabela 3.3 – Características físicas e elétricas da motobomba testada com o GFV.....	64
Tabela 3.4 – Dispositivos usados para aquisição de dados. ....	65
Tabela 3.5 – Valores das incertezas máximas combinadas para as grandezas medidas. 65	
Tabela 3.6 – Dados técnicos de um microcontrolador Atmega328.....	66
Tabela 3.7 – Dados técnicos do DPC. ....	67
Tabela 3.8 – Níveis máximos absolutos. ....	72
Tabela 3.9 – Base de regras do controlador <i>fuzzy</i> usando o LDR. ....	74
Tabela 3.10 – Dados de Placa do Módulo Sensor de Silício Monocristalino .....	79
Tabela 3.11 – Base de Regras.....	88

**LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

- $\rho$  - Densidade da água  
 $\omega$  - Velocidade de rotação da bomba  
 $\eta_{mb}$  - Eficiência  
A/D - Analógico/digital  
AI - *Analogical Input*  
c.a. - Corrente alternada  
c.c. - Corrente contínua  
CF - Conversor de frequência  
C-O-M - *Center of Maximum*  
DPC - Dispositivo para programação de controladores  
E(S) - Sinal e erro  
 $f$  - Frequência fundamental da tensão de alimentação  
FLC - *Fuzzy Logic Control*  
FLS - *Fuzzy Logic System*  
 $f_s$  - Frequência fundamental da tensão estatórica  
FV - Fotovoltaico  
 $g$  - Aceleração da gravidade  
G(S) - Planta de controle  
GEDAE - Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas  
GFV - Gerador fotovoltaico  
H - *High*  
HSP - Horas de Sol Pleno  
 $H_T$  - Altura manométrica total  
I/O - *Input/output*  
 $I_0$  - Corrente de saturação de diodo  
IDSME - Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá  
IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*  
 $I_{mp}$  - Corrente de máxima potência  
 $I_{ph}$  - Corrente fotogerada  
 $I_r$  - Corrente rotórica  
 $I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito  
 $k$  - Constante  
 $K_B$  - Constante de Boltzmann  
 $K_p$  - Ganho proporcional  
LDR - *Light-dependent resistor*  
LED - *Light Emissor Diode*  
L - *Low*  
LN - *Large negative*  
LP - *Large positive*

MF – *Membership Function*  
MISO - *Multiple Input Single Output*  
M—*Moderate*  
 $n$  - Velocidade de rotação mecânica do motor de indução  
 $p$  - Número de polos  
PD – proporcional-derivativo  
 $P_e$  - Potência elétrica  
 $P_h$  - Potência hidráulica  
PID – Proporcional, integral e derivativo  
 $P_{\max}$  - Potência máxima gerada pela célula  
PWM – Modulação por largura de pulso (do inglês *Pulse-Width Modulation*)  
 $q$  - Carga do elétron  
 $Q$  - Vazão volumétrica  
 $Q_I$  - vazão volumétrica  
RC – Resistor-capacitor  
 $s$  – Escorregamento  
SFB – Sistema fotovoltaico de bombeamento  
SN—*Small negative*  
SPMP – Seguidor do ponto de máxima potência  
SP—*Small positive*  
T - Temperatura absoluta  
 $T$  - Torque disponível na ponta de eixo  
 $T_d$  - Ganho derivativo  
 $T_i$  - Ganho integral  
UFPA – Universidade Federal do Pará  
V - Tensão nos terminais da célula  
Vampe – Tensão no Ponto de Máxima Potência  
Vca – Tensão em Corrente Alternada  
Vcc – Tensão em Corrente Contínua  
VH - *Very high*  
VL—*Very low*  
 $V_{mp}$  – Tensão de máxima potência  
 $V_{oc}$  - Tensão de circuito aberto  
Voc – Tensão de circuito aberto  
 $V_s$  - Tensão estatórica  
Wp – Watt pico  
Y(S) - Saída realimentada do sistema  
Z—Zero

## RESUMO

Este trabalho propõe um controlador *fuzzy* aplicado a um conversor de frequência (CF) comercial para uso em sistemas fotovoltaicos de bombeamento (SFB) do tipo conexão direta. O sistema lógico *fuzzy* utilizado é embarcado em um dispositivo para programação de controladores (DPC) ligado à entrada auxiliar do CF para o controle da velocidade de giro da motobomba de acordo com a potência disponibilizada pelo gerador fotovoltaico (GFV). Objetiva-se evitar comportamentos indesejados do nível de tensão no barramento c.c. do CF, bem como fazer com que o sistema opere na proximidade do seu ponto de maior eficiência. A metodologia de controle utilizada baseia-se na obtenção do comportamento dinâmico da irradiância à qual o SFB está submetido por meio de duas diferentes metodologias de sensoriamento de baixo custo, a saber: utilizando um resistor com resistência dependente da iluminação (*Light Dependent Resistor – LDR*) e utilizando um módulo de baixa potência como módulo sensor. Testes experimentais foram realizados utilizando duas bancadas de ensaios de motobombas capaz de simular poços de várias alturas manométricas. Os resultados obtidos atestam a viabilidade de utilização do controlador *fuzzy* com ambas metodologias de sensoriamento. Utilizando o LDR foi possível garantir a disponibilidade do SFB, uma vez que se pôde suprimir os erros de subtensão indesejados, já com a metodologia utilizando o módulo sensor, além de garantir a disponibilidade do sistema, obteve-se, também, rendimento satisfatório do conjunto CF mais motobomba, com uma eficiência média diária de aproximadamente 23%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, Conversor de Frequência, Controlador *Fuzzy*, Sensores.

## ABSTRACT

This work proposes a fuzzy controller applied to a commercial variable-speed drive (VSD) for use in direct-coupled photovoltaic pumping systems (PVPS). The *fuzzy* logic system used is embedded in a controlling programming device (CPD) connected to the auxiliary input of the VSD for controlling the pump's working speed according to the power provided by photovoltaic generator (PVG). The objective is to avoid unintended behaviors in the d.c. bus voltage level VSD and cause the system to operate near the point of maximum efficiency. The control methodology is based on achieving the dynamic behavior of the irradiance with which the PVPS is subjected via two different methods of low cost sensing, namely: using a light-dependent resistor (LDR) and using a low power sensor module. Experimental tests were performed using two tests bench for motor pumps able to simulate several-head wells. The results confirm the feasibility of using *fuzzy* controller with both sensing methods. Using LDR it possible to ensure the availability of PVPS, since it could suppress the undesired undervoltage errors, as with the methodology using the sensor module, and ensure availability of the system was obtained also satisfactory yield assembly VSD + motor pump, with a daily average efficiency of approximately 23 %.

**KEYWORDS:** Photovoltaic Pumping Systems, Variable-speed Drive, *Fuzzy* Controller, Sensors.

## INTRODUÇÃO

Sistemas para bombeamento de água, do tipo fotovoltaico (FV), possuem crescente relevância no que tange ao atendimento de populações em localidades não eletrificadas e onde o processo de eletrificação é difícil e oneroso. Nessas localidades, a aplicação dos sistemas FV de bombeamento com acoplamento direto, ou seja, sem acumuladores eletroquímicos, torna-se um tema de interesse para o seu desenvolvimento. Dentro desse tema, o uso de dispositivos comerciais disponíveis no mercado nacional, tais como conversores de frequência e motobombas, tornam-se objeto de estudos para melhorar a confiabilidade e o desempenho do sistema, por meio da aplicação de técnicas avançadas de controle para garantir maior eficiência do sistema (Periasamy et al, 2015; Rehman et al, 2015; Brito, 2006; Gopal et al, 2013; Ishaque e Salam, 2013).

A geração de energia elétrica por meio de geradores fotovoltaicos (GFV) possui característica intermitente no que se refere ao despacho de potência do gerador e, no caso de sistemas de bombeamento de água de conexão direta (que não utilizam acumuladores de energia elétrica, a exemplo de banco de baterias), necessita de controlador capaz de garantir a operação adequada do sistema (Rehman et al, 2015; Brito, 2006). Variações no potencial de geração do GFV são ocasionadas basicamente por mudanças na irradiância e na temperatura de operação, tanto ao longo do dia quanto ao longo dos meses do ano. Variações bruscas na irradiância, por exemplo, são responsáveis por condições inadequadas de operação do sistema fotovoltaico de bombeamento representando perda de eficiência ou, até mesmo, ocasionando interrupções no fornecimento de água (Brito, 2006).

Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB's) de conexão direta consistem basicamente de: GFV, dispositivo para acionamento e controle de motores elétricos e motobomba. Este tipo de sistema tem sido utilizado, de modo geral, em comunidades remotas que necessitem do abastecimento de água para os mais diversos usos finais, tal como é possível observar nas pesquisas sobre a otimização do desempenho de SFB's que datam os anos 90 (Koner, 1995; Eskander e Zaki, 1997; Altas e Sharaf, 1996).

Koner (1995) propõe metodologias de otimização para um SFB compostas por motor c.c. e circuito de potência para o acionamento do motor ainda sem metodologia de controle dinâmica aplicada. Os métodos de otimização são: o ajuste de constantes características do mo-

tor c.c., a reconfiguração do arranjo dos módulos fotovoltaicos para melhor adequação ao problema e mudanças na pressão interna do sistema. Os resultados obtidos são relativos à comparação entre dois motores distintos utilizando as metodologias citadas.

Eskander (1997) apresenta duas metodologias distintas para o controle dinâmico do sistema. A primeira metodologia consiste na otimização da potência disponibilizada pelo GFV considerando vazão variável, e a segunda considerando o melhor desempenho de um motor c.a. Nesse trabalho já se pode observar o acionamento de múltiplos estados composto de um *chopper* (regulador de tensão c.c.), para o controle da tensão, aliado a um inversor de frequência para o acionamento do motor c.a.

Pode-se encontrar diversas pesquisas que utilizam o *chopper* como dispositivo de acionamento de motores c.c., a exemplo de Altas e Sharaf (1996) e Benlarbi et al (2004). Altas e Sharaf (1996) propõem a utilização de técnicas baseadas em inteligência computacional, a exemplo de sistemas *fuzzy*, em SFB's de conexão direta. Nessa pesquisa foi proposto um controlador *fuzzy* proporcional-integral para o seguimento do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico de conexão direta. Um dispositivo digital efetua o cálculo do ponto de máxima potência e o sistema *fuzzy* realiza o ajuste do ponto de operação do sistema.

Benlarbi et al (2004) apresentam uma metodologia de otimização da eficiência global de um SFB de conexão direta utilizando lógica *fuzzy* e um *chopper* para conexão c.c. – c.c. e/ou inversor de frequência, para conversão c.c. – c.a., ligado ao *chopper*. Simulações foram realizadas com três tipos diferentes de máquinas motrizes ligadas a uma bomba centrífuga, um motor c.c. de excitação separada, um motor síncrono de ímã permanente e um motor de indução. O controlador *fuzzy* realizou o ajuste do valor de ganho do *chopper* para mudança do ponto de operação do sistema e seguimento do ponto de máxima eficiência global.

Sistemas para o seguimento do ponto de máxima potência são propostos por Corrêa et al (2012), Moulay-Idriss e Mohamed (2013) e Kassem (2012). Corrêa et al (2012) propõe um algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracker*) aliado ao seguimento do ponto de mínima perda (MLPT - *Minimum Losses Point Tracking*) em um motor de indução de um SFB de conexão direta. O MPPT utiliza uma metodologia híbrida de controle que consiste no ajuste do *set-point* de um controlador PD para o controle da tensão do barramento c.c. do inversor. O MLPT utiliza o modelo linearizado para pequenas variações e efetua o controle juntamente com o MPPT.

Moulay-Idriss e Mohamed (2013) apresentam MPPT de um GFV ligado à um motor de indução. A metodologia de controle de torque direto (DTC) foi a que obteve melhor desempenho quanto ao seguimento do ponto de máxima potência. Kassem (2012) apresenta um MPPT

para motor c.c., utilizando Redes Neurais Artificiais do tipo Adaptativo Não-Linear Autorregressivo de Média Móvel.

Diversas metodologias de seguimento do ponto de máxima potência utilizando técnicas de inteligência computacional podem ser encontradas na literatura a exemplo de Vinifa e Kavitha (2013), Bendiba et al (2014) e Kamal e Aitouche (2014). Outros tipos de controle em SFB's são apresentadas por Andoulssi et al (2013) e Betka (2010). Andoulssi et al (2013) utiliza o controle não-linear e Betka (2010) o controle ótimo multivariável.

Nota-se que diversas metodologias de controle têm sido pesquisadas para aplicação em SFB's de conexão direta, sendo a maioria delas associada ao MPPT. Alonso-abella et al (2003) e Brito e Zilles (2006) apresentam um SFB de conexão direta utilizando Conversor de Frequência (CF) comercial. O CF é um dispositivo, desenvolvido para o meio industrial, capaz de acionar motor c.a. ligado à rede elétrica convencional. Neste trabalho foi utilizado CF comercial com fabricação nacional a fim de se aproveitar a aplicabilidade existente neste tipo de equipamento. O CF efetua o controle da frequência de giro de motores de indução e possui, basicamente, dois estágios: um retificador c.a. – c.c. e um inversor c.c. – c.a aliado à metodologia de controle.

Alonso-abella et al (2003) apresenta uma metodologia de controle, aplicada em CF, utilizando um sensor de temperatura do tipo LM35 para o ajuste do ponto de operação da motobomba. Os testes levaram em consideração diversos tipos de motobombas e de alturas manométricas de poços. Para uma bomba de 1,5 cv, por exemplo, operando com altura manométrica de 40m foi obtida uma eficiência diária média de 25% aproximadamente.

Bruto (2006) apresenta o desempenho de um controlador PID com ajuste de ganhos utilizando método de Ziegler-Nichols. A variável de controle utilizada foi a tensão no barramento c.c. do CF. Buscou-se manter o nível da tensão próximo ao mais adequado considerando metodologias de controle de *set-point* fixo, bem como que ela (tensão) estivesse dentro dos limites de tensão impostos pelo sistema de proteção do CF. Neste caso, o controlador utilizado foi o PID embarcado no próprio CF e pré-programado de fábrica. Neste tipo de CF apenas os parâmetros dos ganhos do controlador PID estão disponíveis para alterações. Diversos tipos de motobomba foram testadas, aquelas que mais se aproximam às utilizadas neste trabalho obtiveram rendimento em uma faixa de valores de 19% a 30% aproximadamente.

Ressalta-se, no entanto, que, o controlador PID embarcado no CF não está presente em todos os CF's disponíveis comercialmente. Este tipo de controle pode ser encontrado atualmente, na maioria dos casos, em CF's de potência superior a 1 cv. Isto significa que é possível

existir casos de utilização do CF de forma sobre-estimada, uma vez que CF's de potência inferior a 1 cv, tem grande probabilidade de não possuir o controlador PID embarcado.

Atualmente, pode-se constatar uma relevante lacuna no que se refere às pesquisas de novas metodologias de controle capazes de ampliar a utilização de CF's de menor potência, bem como de obter melhoria no desempenho do SFB que utilize esses equipamentos. Em Brito (2006), Alonso-abella et al (2003) e Brito e Zilles (2006), podem ser encontradas as mais relevantes pesquisas sobre o tema.

A pesquisa presente neste trabalho busca responder a seguinte pergunta: É tecnicamente viável a utilização de controle externo ao CF baseado em técnicas avançadas de controle intervalar, em substituição ao controlador PID, de forma a garantir a utilização eficiente de CF's em SFB's?

A hipótese é que uma metodologia de controle baseada em lógica *fuzzy* é uma opção para substituição do controlador PID embarcado nos CF's. Controladores *fuzzy* são sistemas intervalares que consideram as incertezas e não-linearidades do processo em sua parametrização. Esse tipo de sistema não necessita de treinamento e modela o conhecimento de especialistas em regras do tipo SE ou ENTÃO, relacionadas entre si de forma qualitativa. São capazes, também, de gerar sinal de controle conveniente ao problema em questão.

Assim, propõe-se neste trabalho, um controlador *fuzzy* para aplicação em SFB's que utilizem CF's comerciais e em substituição ao controlador PID existente. O controlador *fuzzy* proposto é capaz de modelar a dinâmica de aceleração e desaceleração de uma motobomba em um SFB considerando os instantes de maior ou menor potencial de geração do GFV. O controlador *fuzzy* tem como objetivo, primeiramente, manter a tensão no barramento c.c. do CF dentro da faixa operacional e, posteriormente, garantir o maior desempenho possível do sistema.

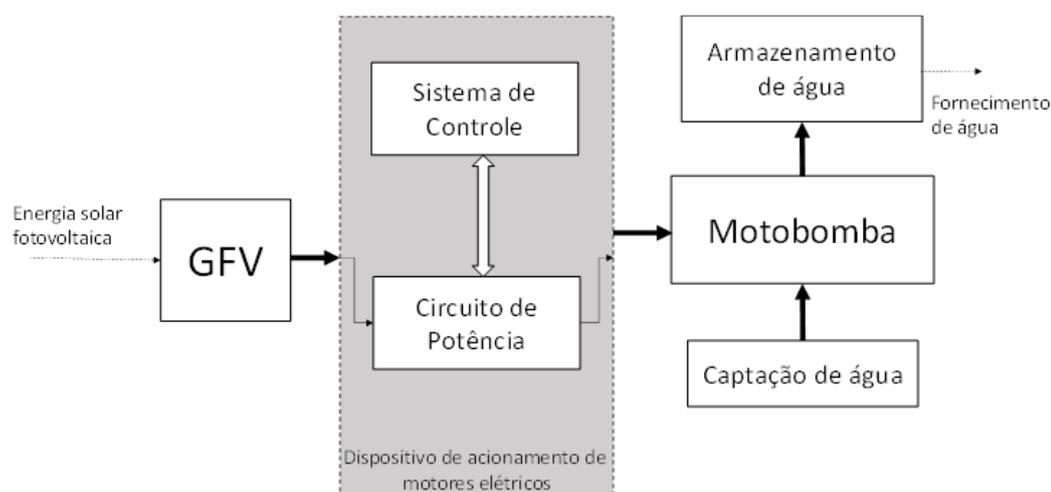
Este trabalho está dividido em três capítulos. O primeiro capítulo apresenta o sistema fotovoltaico de bombeamento de conexão direta utilizando conversor de frequência, o segundo capítulo apresenta a lógica *fuzzy* para controle aplicado em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, no terceiro capítulo são apresentados os materiais, métodos e resultados obtidos e, por fim, são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

# 1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO DE CONEXÃO DIRETA

## 1.1. Componentes de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento de Conexão Direta

O sistema fotovoltaico de bombeamento de conexão direta é constituído basicamente de três componentes, que são: gerador fotovoltaico; dispositivo de acionamento de motores elétricos; e motobomba. Para que o dispositivo de acionamento de motores funcione adequadamente dentro dessa aplicação um sistema de controle dinâmico se faz necessário. A Figura 1.1 ilustra de maneira simplificada a configuração básica de um SFB, aonde um sistema de controle dinâmico vem embarcado no dispositivo de acionamento.

Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico de bombeamento de conexão direta.



A produção de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica possui característica intermitente, ou seja, a incidência de variações meteorológicas no meio ambiente no qual o sistema está inserido, aliado à ausência de componentes acumuladores de energia, alteram o ponto de operação do sistema de forma a exigir a utilização de sistemas de controle dinâmicos para maximização da eficiência do sistema, bem como para garantir a disponibilidade do mesmo (Brito, 2006; Alonso-abella et al, 2003; Brito e Zilles, 2006). Nessa aplicação a variação controlada do bombeamento se dá basicamente pela variação controlada da velocidade de giro da motobomba de acordo com a disponibilidade de potência proveniente do GFV (Villalva e Gazoli, 2013; EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE, 2004; WEG S/A, 2010; WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015).

A velocidade de giro de uma motobomba em um SFB de conexão direta, corresponde à uma função do potencial de geração do GFV e isso exige a escolha de estratégias de controle

que melhor consigam modelar essa relação utilizando as variáveis e indicadores adequados. Uma alternativa é modelar essa relação utilizando controlador *fuzzy* aliado a diferentes estratégias de sensoriamento para a obtenção da variação do potencial de geração do GFV em função da taxa de variação da irradiância.

Outro aspecto importante a ser considerado neste tipo de sistema está relacionado à natureza dos dispositivos utilizados. Tanto os dispositivos de acionamento de motores elétricos quanto as motobombas, são equipamentos que, de modo geral, têm sido amplamente utilizados em aplicações convencionais, ligados à rede elétrica de distribuição. Isso implica em avanços significativos na indústria ligada à produção desses equipamentos, dentre elas a indústria nacional, originando diversas linhas de equipamentos comerciais relacionados tanto ao acionamento de motores elétricos quanto ao bombeamento de água.

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, facilitando o treinamento de pessoal para a utilização dos mesmos, uma vez que já existe mão de obra pré-qualificada para trabalhar com os equipamentos de forma individualizada. Vale ressaltar que já existe um mercado voltado à produção de equipamentos específicos para a utilização em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, porém é desejável que SFB's sejam capazes de usufruir dos benefícios que os equipamentos mais difundidos comercialmente possam trazer para difusão da utilização da tecnologia de fontes fotovoltaicas de geração de energia elétrica.

Dentro desse tema, o uso de dispositivo de acionamento de motores elétricos do tipo conversor de frequência comercial e motobomba centrífuga comercial acionada em corrente alternada c.a., tornaram-se uma configuração competitiva e confiável, quando comparadas aos SFB's fabricados especificamente para a aplicação (Brito, 2006; Alonso-abella et al, 2003; Brito e Zilles, 2006). Nessa configuração, o CF, que é um dispositivo projetado para ser suprido pela rede elétrica será o responsável pela conversão c.c.-c.a. necessária para o acionamento controlado da motobomba a partir da geração fotovoltaica.

## **1. 1.1. Gerador Fotovoltaico**

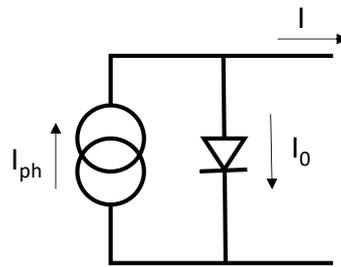
### **1.1.1.1. Características Gerais**

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal pode ser definido como sendo uma fonte de corrente ligada em paralelo a um diodo, onde a Equação representativa é descrita pela

Equação de Shockley (Equação 1.1). A Figura 1.2 apresenta o circuito da célula onde:  $K_B$  representa a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta,  $q$  é a carga do elétron,  $V$  é a tensão nos terminais da célula,  $I_0$  é a corrente de saturação de diodo e  $I_{ph}$  é a corrente foto gerada, de acordo com Villalva e Gazoli (2013).

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{K_B T}} - 1 \right) \quad (\text{Equação 1.1})$$

**Figura 1.2 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.**

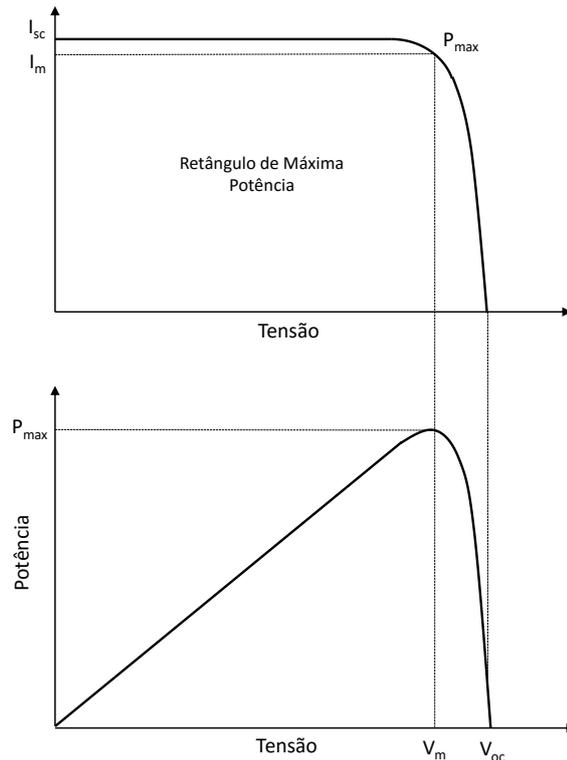


A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é descrita pela Equação 1.2 obtida a partir da Equação 1.1 fazendo  $I = 0$ . Neste caso, a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) é equivalente a  $I_{ph}$ . A Figura 1.3 apresenta a curva característica I-V de uma célula fotovoltaica ideal para um dado ponto de operação, onde  $P_{max}$  corresponde a potência máxima gerada pela célula e  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  a tensão e a corrente de máxima potência respectivamente.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{Equação 1.2})$$

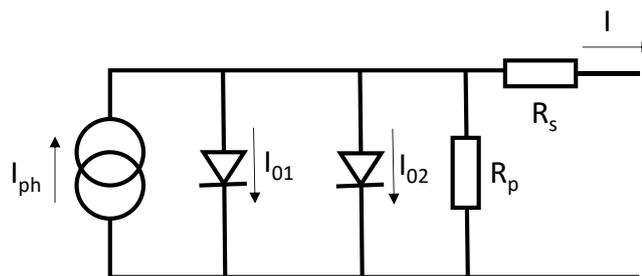
A Equação 1.3 apresenta a modelagem do comportamento de uma célula fotovoltaica não-ideal considerando um modelo com dois diodos, resistência paralelo e resistência série. A Figura 1.4 apresenta o circuito equivalente para esta célula não-ideal.

**Figura 1.3 – Curva característica de uma célula fotovoltaica.**



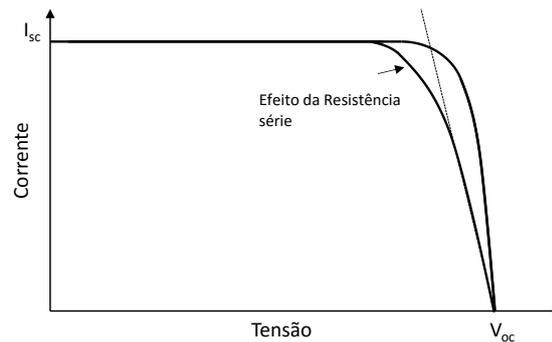
$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left( \frac{V + IR_s}{k_B T} \right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left( \frac{V + IR_s}{2k_B T} \right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{Equação 1.3})$$

**Figura 1.4 – Circuito equivalente de uma célula não-ideal.**

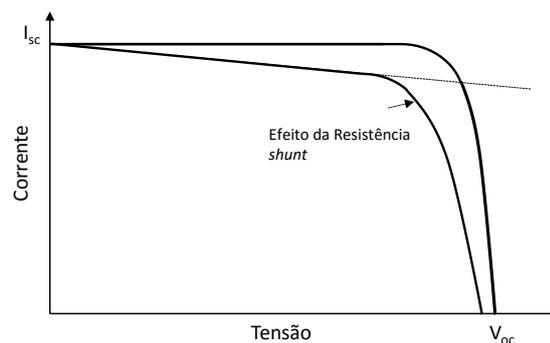


As Figuras 1.5 e 1.6 apresentam o efeito da inserção das resistências série e paralelo, respectivamente, na curva característica I-V. A resistência série está relacionada com a resistência própria do semiconductor, suas junções e contatos metálicos. A resistência em paralelo está relacionada com impurezas e defeitos infraestruturais.

**Figura 1.5 – Efeito da inserção da resistência série na curva I-V.**



**Figura 1.6 – Efeito da inserção da resistência paralela na curva I-V.**

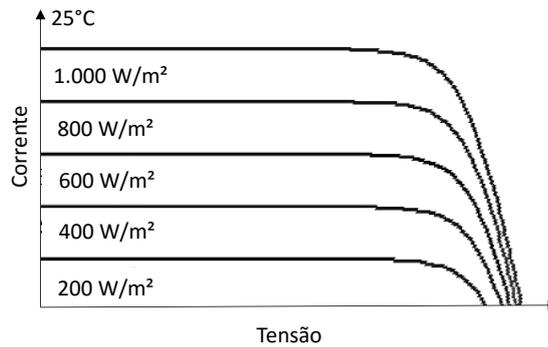


### 1.1.1.2. Influência da irradiância e da temperatura na curva I-V

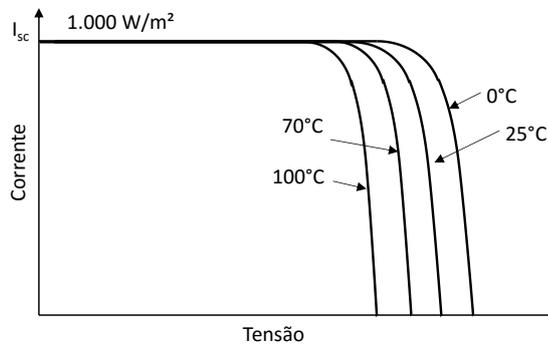
A principal característica da influência da irradiância em células fotovoltaicas é que o acréscimo/decrécimo sofrido na tensão de circuito aberto e na corrente de curto-circuito são de ordens diferentes. A corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) varia de forma linear com a variação da irradiância, porém a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) varia de forma logarítmica. Este último comportamento é modelado de forma indireta pela Equação 1.2. Na Figura 1.7 apresenta-se a curva I-V representativa de uma célula, módulo ou gerador fotovoltaico para diferentes valores de irradiância considerando o valor de temperatura constante e igual a 25 °C.

A influência da temperatura, por sua vez, tem a característica de alterar de forma mais significativa os valores de tensão da célula. Os valores de corrente sofrem variações com a temperatura que, na maioria das vezes, são desprezadas. A Figura 1.8 apresenta a curva I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura (0°C, 25°C, 70°C e 100°C), porém considerando a irradiância constante (1.000 W/m<sup>2</sup>).

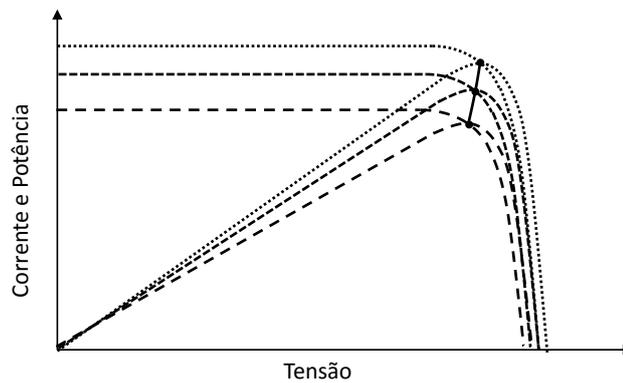
**Figura 1.7 – Curva I-V representativa de uma célula, módulo ou gerador fotovoltaico para diferentes valores de irradiância.**



**Figura 1.8 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura.**



**Figura 1.9 – Variação do ponto de máxima potência de uma célula fotovoltaica considerando variações na irradiância e na temperatura.**



Considerando a influência da irradiância e da temperatura nos valores da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto, pode-se dizer que existe uma significativa variação do rendimento da célula e por sua vez uma variação no ponto de máxima potência da célula. A Figura 1.9 apresenta a variação do ponto de máxima potência de uma célula fotovoltaica devido a influência da irradiância e da temperatura.

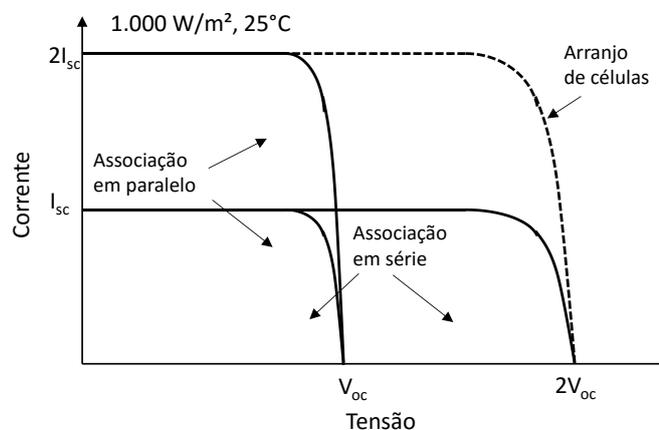
Sistemas fotovoltaicos, de modo geral, devem buscar estes pontos de operação (pontos de máxima potência) para maior aproveitamento da potência gerada pelo GFV. De acordo com Brito (2006), Alonso-abella et al (2003) e Brito e Zilles (2006), o problema do seguimento do ponto de máxima potência em SFB's de conexão direta necessitam de especial atenção uma vez que a aproximação deste ponto de operação está intimamente relacionada com a velocidade de giro da motobomba. Os SFB's de conexão direta que se utilizam de CF como dispositivo para o acionamento da motobomba devem observar, também, que os limites operacionais impostos pelo CF (ressaltando que o dispositivo foi projetado para uso à rede elétrica) devem comportar a variação do ponto de máxima potência na maior parte do tempo de operação, principalmente nas horas de maior irradiância.

### 1.1.1.3. Associação de Células Fotovoltaicas.

Para o atendimento de cargas de potência superior à potência de pico de células ou módulos fotovoltaicos, bem como para o atendimento destas cargas com o nível de tensão adequado é que se recorre a associações entre células fotovoltaicas ou entre módulos fotovoltaicos formando módulos e arranjos de módulos. Para isso geralmente se utilizam duas disposições possíveis, em série e em paralelo.

Na disposição em série é possível elevar o nível de tensão do arranjo por valores múltiplos ao entregue pelas células, e no arranjo em paralelo é possível aumentar a capacidade de entrega de corrente por valores múltiplos da corrente de curto-circuito da célula. A Figura 1.10 apresenta a curva I-V para um arranjo de células fotovoltaicas.

Figura 1.10 – Curva I-V para um arranjo de células fotovoltaicas.



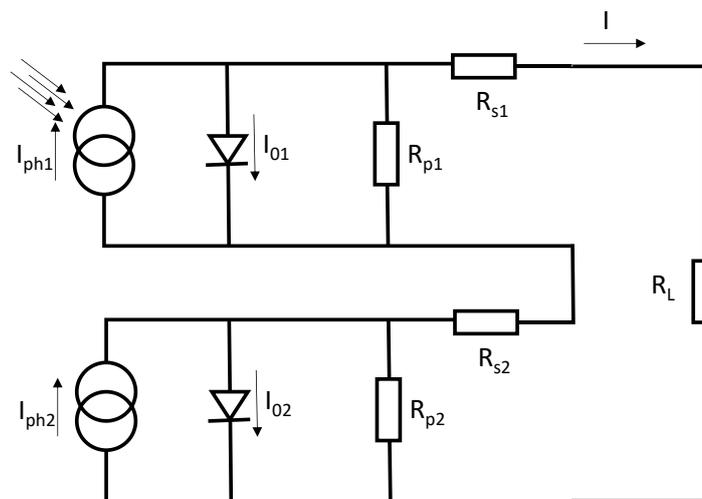
No caso dos SFB's de acoplamento direto com CF's, se faz necessário o uso de um número significativo de módulos em série, algo em torno de 20 módulos com 36 células cada (Brito, 2006), para garantir um nível de tensão mínimo no barramento c.c. do equipamento, de modo a minimizar ao máximo a ocorrência de subtensões, principalmente nos horários de maior irradiância.

#### 1.1.1.4. Efeito do Sombreamento em Arranjos Fotovoltaicos.

O sombreamento em arranjos fotovoltaicos gera perdas para o sistema, tanto pelo aspecto da redução da geração de energia, bem como do aumento das perdas existentes nas células sombreadas. Quando ocorre o efeito de sombreamento das células fotovoltaicas, as células sombreadas atuam como cargas adicionais ao arranjo. Este fenômeno é responsável por um aquecimento diferenciado da célula sombreada, o que é um reflexo da dissipação de energia pelo efeito joule, podendo causar ainda efeitos de polarização inversa na célula. Esses eventos ocorrendo de forma sistemática e sem as devidas proteções, podem causar danos irreversíveis à mesma.

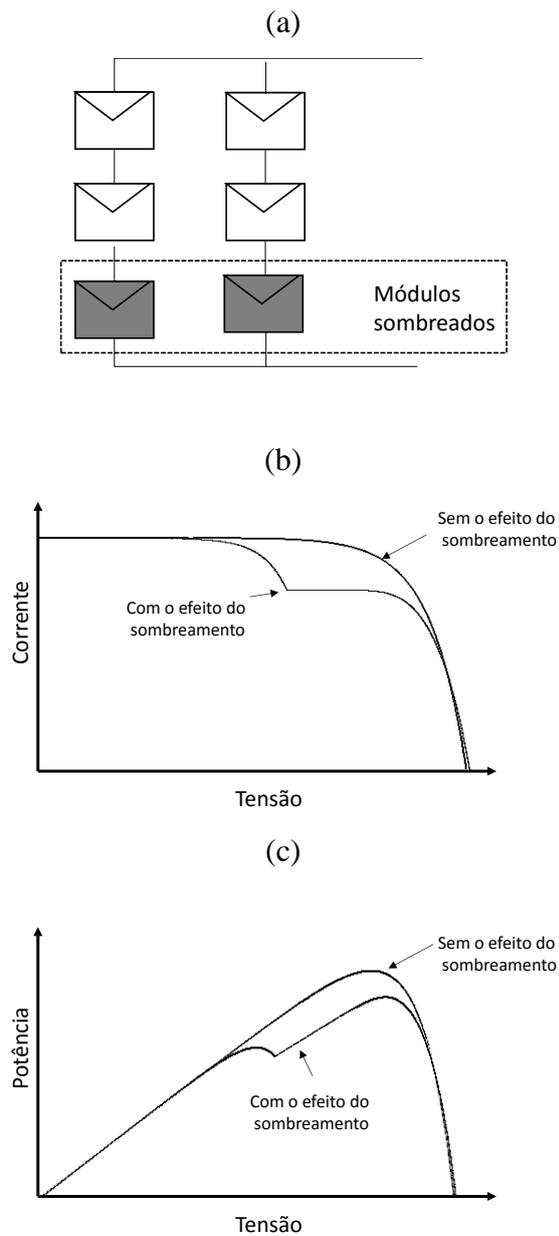
A Figura 1.11 apresenta o circuito de um conjunto de células considerando o efeito do sombreamento. Neste caso, o efeito do sombreamento pode ser observado na célula 2. Considerando que no diodo 2, a corrente  $I_{02}$ , no instante do sombreamento, representa a corrente de polarização do diodo, caso a corrente  $I$  tenha magnitude superior a esta existirá uma polarização reversa no diodo 2, o que pode gerar danos à célula 2.

Figura 1.11 – Circuito de um conjunto de células considerando o efeito do sombreamento.



De acordo com Lopes (2013), de modo geral, o efeito do sombreamento, em algumas células/módulos de um arranjo fotovoltaico, atua na curva I-V causando “degraus” indesejados. Este efeito pode ser observado na Figura 1.12, tanto na curva I-V, quanto na curva P-V. Em algumas técnicas de seguimento do ponto de máxima potência este efeito pode representar o seguimento de um máximo local da potência, e isto ocasiona o mal aproveitamento da potência gerada pelo arranjo.

**Figura 1.12 – Efeito do sombreamento em um arranjo fotovoltaico; (a) diagrama esquemático; (b) curva I-V; (c) curva P-V.**

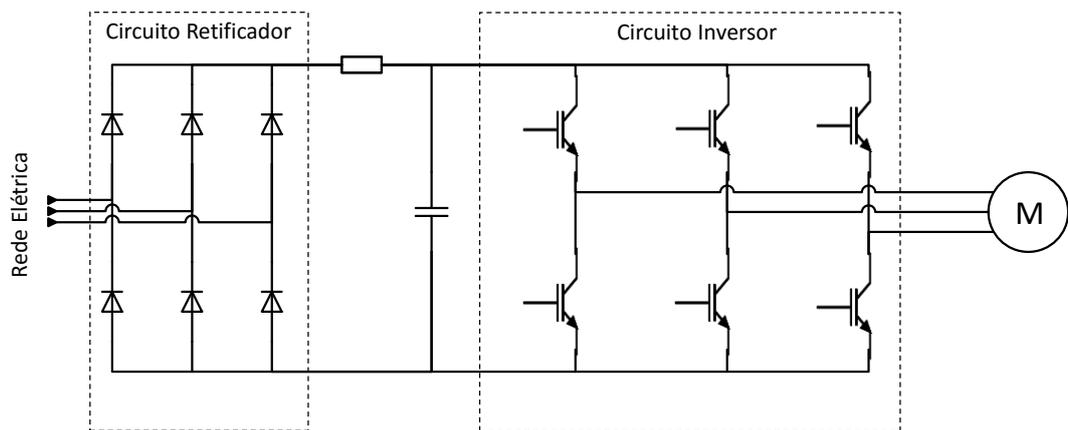


## 1. 1.2. Conversor de Frequência

### 1.1.2.1. Características Gerais

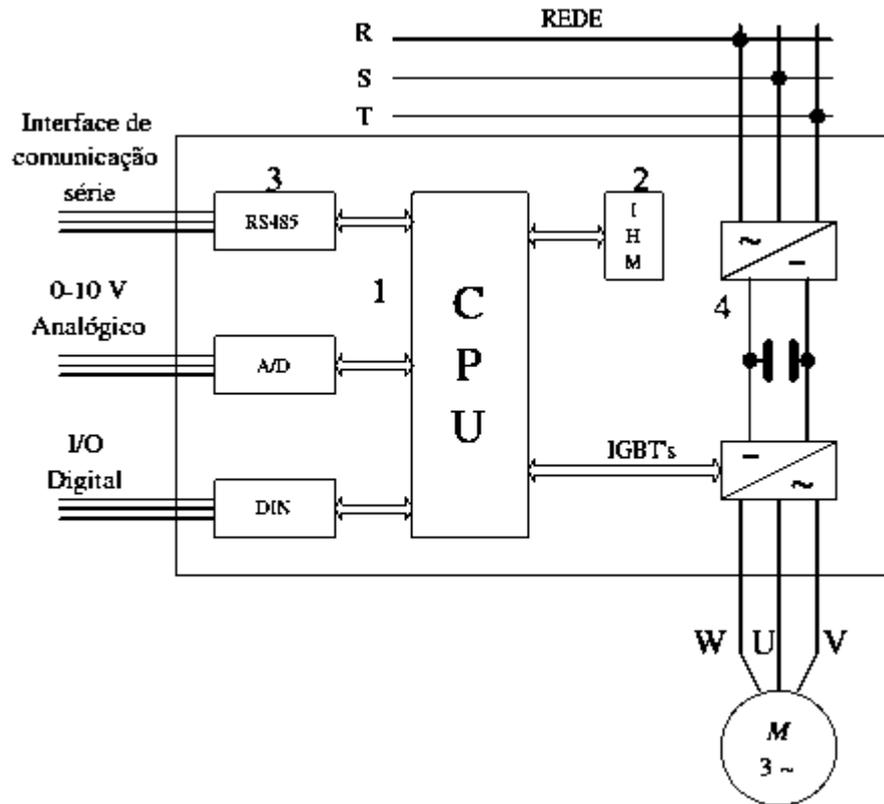
O conversor de frequência é um dispositivo de potência para o acionamento de motores elétricos de indução. Este tipo de equipamento é utilizado comumente no meio industrial para o acionamento e controle de motores de indução que sejam alimentados pela rede elétrica convencional. Existem vários tipos de CF's comerciais no que se refere à potência que eles suportam, metodologias de controle, tecnologia de programação e/ou parametrização, etc. Neste trabalho, serão abordados equipamentos com arquitetura básica semelhantes a apresentada na Figura 1.13 (Capelli, 2002).

**Figura 1.13 – Diagrama elétrico básico de um conversor de frequência convencional.**



De modo geral, CF's comerciais são compostos por quatro principais partes, a saber: Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit- CPU*), Interface Homem Máquina (IHM) e etapa de potência (circuitos retificador e inversor), onde pode ser observado em WEG S/A (2003), WEG S/A (2010) e WEG S/A (2015). De acordo com WEG S/A (2010), é realizado, primeiramente, a retificação da tensão fornecida pela rede elétrica. Após a retificação, a tensão c.c. é disponibilizada no barramento c.c. (também conhecido como link c.c.) é filtrada e posteriormente invertida pelo circuito inversor. Um sistema microprocessado é interligado a esses circuitos para fins de controle, proteção, parametrização, programação, interface, diagnóstico, etc. (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015). Apesar de cada fabricante utilizar sua própria tecnologia, o diagrama de blocos ilustrado na Figura 1.14 descreve bem grande parte dos CF's encontrados atualmente no mercado (Brito, 2006).

Figura 1.14 – Diagrama de blocos de um conversor de Frequência (Capelli, 2002).



**1. CPU:** pode ser formada por um microprocessador ou por um microcontrolador. 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 este conjunto.

**2. IHM:** é através desse dispositivo que se pode visualizar o que ocorre no CF, e parametriza-lo de acordo com a aplicação.

**3. Interface:** é composta por entradas analógicas ou digitais, que podem ser utilizadas para receber ou fornecer sinais de comando ao CF.

**4. Etapa de potência:** a etapa de potência é constituída por um circuito retificador, que alimenta (através de um circuito intermediário chamado barramento c.c.) o circuito de saída do CF (Capelli, 2002). Esta funcionalidade de retificar a tensão de alimentação é que permite que este dispositivo seja acoplado diretamente a uma fonte de corrente contínua, como por exemplo um gerador fotovoltaico. O circuito inversor é composto por um conjunto de Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Os IGBT's são alimentados pela tensão do barramento c.c e no terminal de *gate* recebem um sinal modulado em largura

de pulso (PWM – *Pulse-width Modulation*) gerado pelo sistema microprocessado. Este sinal PWM é responsável pela defasagem, amplitude e pela frequência da tensão de excitação do motor.

#### 1.1.2.2. Características Mínimas para a Aplicação de CF's em SFB's.

Como mencionado anteriormente, o emprego de CF's em SFB's deve observar as características peculiares da produção fotovoltaica de modo que o equipamento consiga ser inserido adequadamente como parte integrante da aplicação. Dentre os requisitos importantes para viabilizar tal cenário encontram-se:

- **Disponibilidade de acesso ao barramento c.c. de alimentação do CF:** A disponibilização do acesso ao barramento c.c. é uma alternativa encontrada em alguns CF's comerciais. A ausência desse barramento não impede a utilização do CF, uma vez que o GFV pode ser conectado na entrada correspondente a rede elétrica convencional, porém, essa alternativa aumenta as perdas no sistema.
- **Oferecer a possibilidade da inserção de controle de velocidade (externo ou embarcado).** Diversos CF's possuem metodologia de controle de velocidade embarcadas no CF, de modo geral a metodologia mais encontrada é o controlador PID. Nos CF's que não possuem controle de velocidade embarcado, deve ser disponibilizado ao usuário pelo menos uma entrada configurável que conecte um sinal externo ao sistema microprocessado do CF de modo a possibilitar a inserção de um sinal externo como referência do PWM gerado pelo CF. Aplicações que necessitam de técnicas avançadas de controle devem utilizar a mesma entrada configurável.
- **Possuir controle de torque para melhor eficiência de operação da motobomba.** Motobombas comerciais possuem diversas características de torque (linear, quadrático, etc.), neste sentido, o CF deve ter a possibilidade de inserção de metodologias de controle de toque (controle escalar, controle V/f, etc.). Alguns CF's comerciais possuem metodologias de controle de torque embarcados, porém nos casos de um CF não possuir metodologia de controle de torque adequada à aplicação que se deseja, ele deve disponibilizar uma entrada configurável ao sistema microprocessado do CF de forma a possibilitar alterações na referência do PWM gerado pelo CF.

- **Possuir sistema de proteção que não impeça a operação adequada do GFV.** Os CF's comerciais possuem diversos tipos de proteção, a saber: sobrecarga, sobretensão, subtensão, sobreaquecimento, etc. Esses mecanismos de proteção não devem impedir a operação do SFB, bem como restringir a maior eficiência dele, por exemplo, um CF que não suporta a tensão de máxima potência de um GFV não deve ser utilizado.

### 1.1.2.3. Metodologia de Controle de Tensão por Frequência.

O CF é um dispositivo que utiliza a tensão da rede elétrica de amplitude e frequência fixas para gerar tensão PWM de amplitude e frequência variáveis para o controle da velocidade de motores de indução (WEG S/A, 2010). Tendo em vista que a velocidade mecânica de um motor de indução é função direta da frequência fundamental da tensão de alimentação, pode-se variar a velocidade mecânica da motobomba, variando-se a frequência de alimentação no estator do motor de indução (Anderson e Fouad, 1977). A Equação 1.4 apresenta a relação entre a velocidade mecânica de um motor de indução e a frequência da tensão no estator.

$$n = \frac{120f}{p}(1 - s) \quad (\text{Equação 1.4})$$

Onde  $n$  corresponde à velocidade de rotação mecânica (rpm);  $f$  a frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);  $p$  o número de polos; e  $s$  escorregamento. O escorregamento relaciona a velocidade do rotor com a velocidade síncrona, ele é função do carregamento do motor elétrico e tende a aumentar com o acréscimo da carga no eixo do motor, ou seja, tende a se afastar da velocidade síncrona.

A variação da amplitude da tensão no estator de um motor de indução também interfere no torque proporcionado ao motor (Anderson e Fouad, 1977). A Equação 1.5 calcula o torque de um motor de indução em função da relação entre o nível de tensão e frequência da tensão de excitação da máquina, desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos (WEG S/A, 2010):

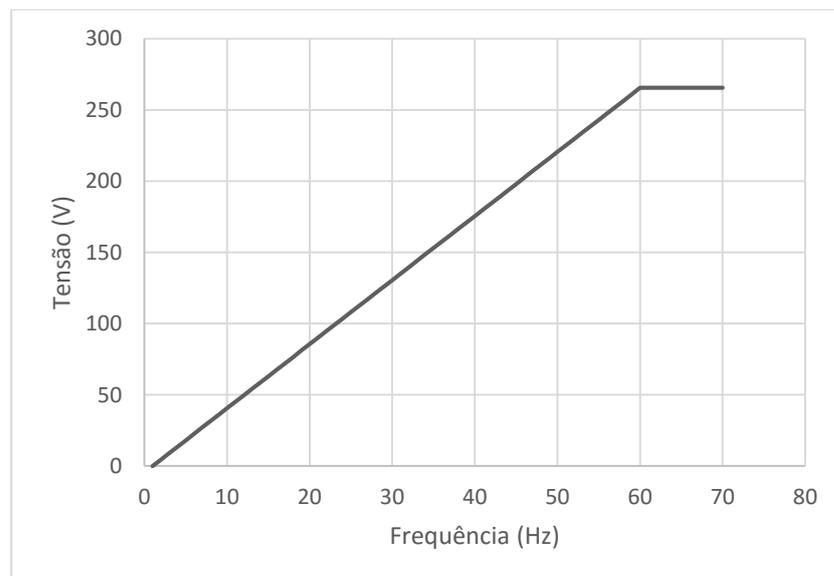
$$T = k \frac{V_s}{f_s} I_r, \quad (\text{Equação 1.5})$$

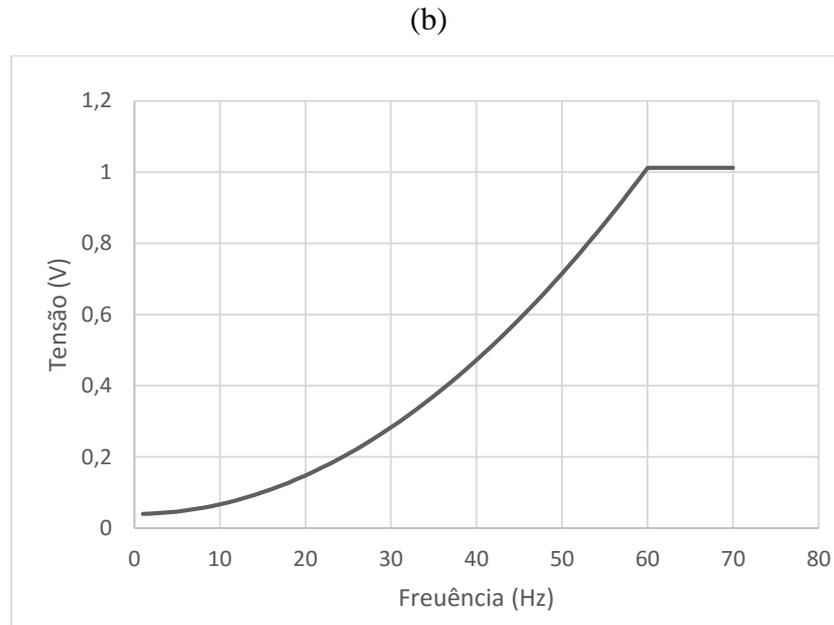
onde  $T$  corresponde ao torque disponível na ponta de eixo (N.m);  $I_r$  a corrente rotórica (A);  $V_s$  a tensão estatórica (V);  $k$  a constante que depende do material e do projeto da máquina; e  $f_s$  a frequência fundamental da tensão estatórica (Hz).

Motobombas possuem diferentes características de torque que estão relacionados com o tipo da bomba, aspectos construtivos, aplicação, etc. (Brito, 2006). Os CF's, nestes casos, devem possuir sistemática coordenada de ajuste da amplitude e da frequência fundamental da tensão gerada para que possa ser gerado o torque adequado à bomba utilizada (WEG S/A, 2010). É comum encontrar CF's comerciais com sistemas de controle embarcados do tipo Tensão por Frequência (V/f) (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015). Este tipo de controle possibilita a utilização de diferentes tipos motobombas considerando o torque necessário para seu funcionamento. A Figura 1.15 apresenta dois tipos de torque diferentes para motobombas, linear (a) e o quadrático (b).

**Figura 1.15 – Diferentes Tipos de Torque (a) Torque Linear (b) Torque Quadrático.**

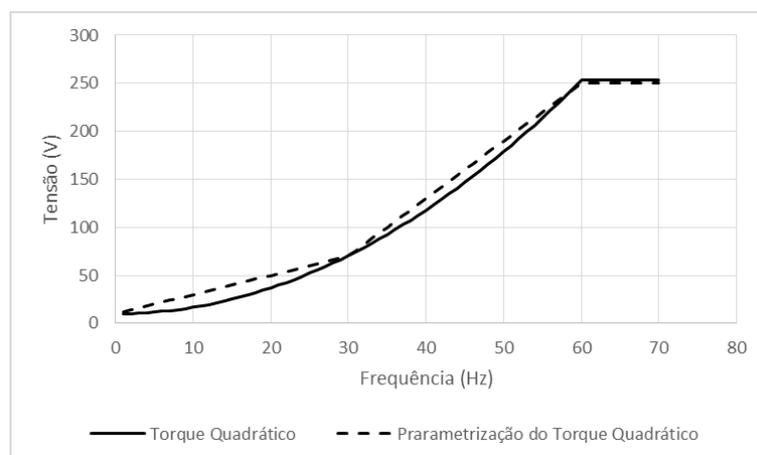
(a)





São comumente utilizados dois tipos de controle V/f, o escalar e o vetorial. O controle V/f escalar é indicado para motobombas de torque constante e de torque variável que não necessitem de alto desempenho nas aplicações, já o controle V/f vetorial é indicado para motobombas de torque constante e que necessitem de alto desempenho. O controle V/f deve ser devidamente parametrizado no CF para maior adequação do uso do dispositivo como acionador de motobombas. A Figura 1.16 apresenta a parametrização da curva V/f para uma bomba centrífuga de característica de torque quadrático.

**Figura 1.16 – Parametrização da Curva V/f para uma Bomba Centrífuga de Característica de Torque Quadrático.**



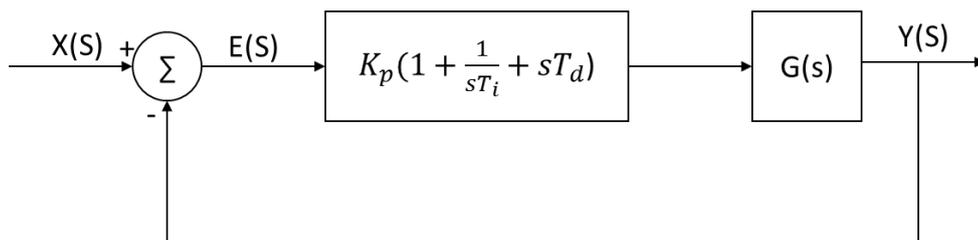
#### 1.1.2.4. Controle Dinâmico da Velocidade Angular Utilizando Controlador PID.

Além do circuito de potência supracitado, os CF's comerciais possuem também sistema microprocessado responsável pela geração do sinal PWM de referência para os IGBT's (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2010; WEG S/A, 2015). O sinal PWM é utilizado para defasagem entre as tensões de saída do CF, bem como para o controle da velocidade da motobomba (WEG S/A, 2010). Estratégia de controle digital baseada no controle PID também é embarcada neste sistema para aplicação do controle da velocidade de motores.

Esta metodologia permite que a velocidade do motor seja controlada tendo em vista diferentes variáveis de controle. Esta metodologia está relacionada com aplicações específicas, as quais o conjunto CF + motobomba estão submetidos. De modo geral, é necessária a utilização de uma entrada auxiliar do CF para a realimentação do sinal de controle. Transdutores compatíveis com o CF devem ser utilizados para obtenção da informação da dinâmica da variável de controle em questão.

A Figura 1.17 apresenta o diagrama de blocos de um controlador PID padrão, onde  $X(S)$  corresponde ao *set-point* do sistema de controle,  $Y(S)$  é a saída realimentada do sistema,  $E(S)$  o sinal e erro,  $G(S)$  a planta de controle,  $K_p$  corresponde ao ganho proporcional,  $T_d$  é o ganho derivativo e  $T_i$  é o ganho integral (Ogata, 1990). Estes ganhos podem ser ajustados no CF conforme necessita a aplicação.

Figura 1.17 – Diagrama de Blocos de um Controlador PID.



#### 1.1.2.5. Desafios da Utilização do Controlador PID em SFB.

Tendo em vista, que o CF é um dispositivo para utilização ligada à rede e que foi projetado para atender o meio industrial de modo geral, a metodologia de controle embarcada nele também possui esse foco. O controlador PID embarcado no CF consiste em um modelo consagrado na literatura, porém que apresenta bom funcionamento para sistemas não-adaptativos.

A dinâmica do ponto de máxima potência do GFV, considerando as variações na irradiância e na temperatura, não permitem que o maior rendimento do sistema esteja relacionado

a um controle de parâmetros fixos, ou seja, a metodologia de controle PID apresenta certa dificuldade quanto à operação em SFB quando se observa o melhor aproveitamento da potência disponibilizada pelo GFV.

Em Brito (2006), é apresentada a aplicação de uma metodologia de sintonia dos ganhos de um controlador PID embarcado em um CF e aplicado a um SFB. É possível observar que existe certa dificuldade também na aplicação deste método para a sintonia do controlador PID. Este sistema apresentou também chaveamentos indesejados nos instantes de menor irradiância. Isto é melhor abordado no capítulo 3. Estes desafios motivam a utilização de metodologia de controle baseada em diferentes técnicas que considerem o controle linear, adaptativo ou ainda que utilizem set-point variável.

#### **1.1.2.6. Unidade Interna de Processamento de Dados do CF.**

A parametrização de variáveis dos CF's é realizada pela alteração de um conjunto de parâmetros pré-programados que são acessados por uma Interface Homem-Máquina (IHM) (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015). A IHM de CF's comerciais é composta, na maioria dos casos, por um conjunto de botões de navegação aliados à um *display*. Os parâmetros a serem acessados recebem endereçamento na memória interna não-volátil do CF e são indexados para facilitar o acesso do usuário. Os índices de parâmetros são comumente encontrados nos manuais de usuários (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015). Os CF's mais modernos também utilizam interface via microcomputador e conjunto de índices afins (WEG S/A, 2015).

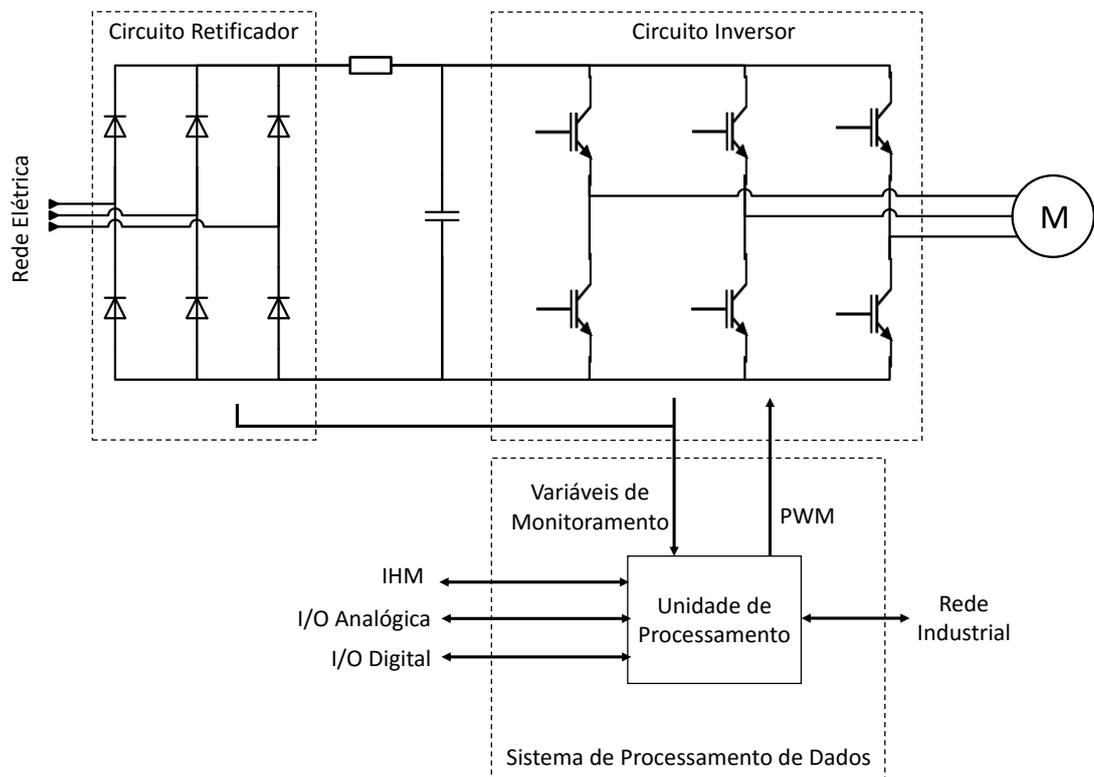
A comunicação entre CF's também é possível ser feita utilizando padrões e redes industriais (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015). O principal objetivo desta funcionalidade é a operação coordenada de diversos motores em uma fábrica submetidos à um sistema supervisório, por exemplo. Os padrões de comunicação usados variam com o modelo do CF (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015).

O processo de parametrização pode gerar parâmetros conflitantes entre si tornando-se necessária a utilização de um sistema de *debug* de parametrização. Este sistema consiste em um conjunto de erros, também pré-programados, que indicam possíveis conflitos em parâmetros. Os erros também são indexados e descritos detalhadamente nos manuais de usuários. Tendo em vista a grande quantidade de parâmetros em alguns CF's, pode-se tornar complexo o processo de identificação dos erros.

Os CF's possuem circuito de proteção de seus componentes elétricos e eletrônicos internos, bem como da carga ligada a ele. As principais variáveis monitoradas para fins de proteção são a tensão de alimentação, tensão no barramento c.c, a corrente de saída, frequência da rede elétrica, velocidade estimada do motor, etc. A Unidade de Processamento de Dados do CF também emite erros quando as variáveis de monitoramento estão fora dos padrões determinados para cada CF. Erros de subtensão e sobretensão do barramento c.c. do CF são exemplos destes tipos de diagnósticos. Os diagnósticos também são indexados e apresentado no manual do usuário do equipamento (WEG S/A, 2003; WEG S/A, 2015).

Entradas e saídas auxiliares também são possíveis de serem encontradas nesses CF's. Entradas e saídas digitais e analógicas são utilizadas tanto para auxiliar o processo de parametrização, quanto para a utilização nos sistemas de controle dinâmico. Para oportunizar a utilização de sensores externos para controle do sistema utilizando diferentes variáveis do processo, são utilizadas entradas analógicas, com determinada faixa de tensão c.c. compatível com o sistema microprocessado interno. Nesses casos, é utilizado conversor A/D das entradas analógicas para o processamento digital dos dados obtidos. A Figura 1.18 apresenta um diagrama geral do CF.

**Figura 1.18 – Diagrama Geral de um CF Comercial.**



### 1.1.2.7. Limites de Tensão do Barramento c.c.

A interligação do CF em um SFB é feita, preferencialmente, por meio do barramento c.c. do CF, pois alguns CF's permitem este tipo de ligação. Para os CF's que não disponibilizam o acesso ao barramento c.c. é possível utilizar a entrada da rede elétrica para a alimentação do GFV, uma vez que a tensão não receberá alterações significativas no circuito retificador. O GFV deve ser ligado nestes terminais obedecendo a respectiva polaridade. Ressalta-se que este tipo de interligação só será possível caso a tensão de saída do GFV possua sua faixa operacional dentro dos limites impostos ao barramento c.c. do CF. Neste caso, a tensão de circuito aberto do GFV não deve ser superior ao limite de sobretensão do CF, bem como a tensão mínima de operação do barramento c.c. não deve ser inferior ao limite de subtensão do CF.

De acordo com WEG S/A (2010), quando o CF está ligado à rede elétrica e o motor acionado está operando à vazio, ou com cargas leves, a tensão no barramento c.c. tende a estabilizar no valor de  $\sqrt{2}V$ , onde  $V$  corresponde à tensão da rede elétrica. Considerando, no entanto, a operação do motor à plena carga, a tensão do barramento c.c. estabiliza em um valor próximo de  $\left(\frac{3}{\pi}\right)\sqrt{2}V$ . Ou seja, os limites de tensão máxima do CF são faixas que devem compreender os valores de  $1,35V$  a  $1,41V$ .

O fabricante WEG, por exemplo, adota o valor de  $1,41V$  como valor de referência por ser o valor mais elevado de tensão (WEG S/A, 2010). Pode-se observar, também, que são estipulados limites de aproximadamente 30% nos limites superior e inferior para a tensão do barramento c.c.. Esses são os limites usados para os erros de sobretensão e de subtensão do CF, respectivamente.

Neste caso, o GFV deve possuir uma tensão de circuito aberto que não ultrapassa o limite superior da tensão do CF (erro de sobretensão), e também, possuir uma tensão de operação que não seja maior que o limite inferior da tensão (erro de subtensão). Este último, caso não seja devidamente calculado, pode interferir na eficiência do SFB uma vez que, nos instantes de operação, a tensão tende a diminuir nos instantes de maior irradiância.

A quantidade de módulos no arranjo do GFV deve ser levada em consideração quando se trata dos limites operacionais da tensão do barramento c.c. do CF. A quantidade de módulos em série deve proporcionar uma tensão que esteja adequada aos limites operacionais do CF, bem como a quantidade de módulos em paralelo quando relacionado à corrente de operação.

### 1.1.2.8. Entradas e Saídas Auxiliares.

Os CF's comerciais, de modo geral, possuem entradas e saídas auxiliares digitais e analógicas para fins de controle e/ou parametrização. As entradas e/ou saídas sendo analógicas ou digitais podem ser habilitadas ou desabilitadas utilizando-se a IHM obedecendo os índices dos parâmetros correspondentes a elas. De acordo com WEG S/A (2003), o modelo CFW08 *Plus* possui, por exemplo: 02 portas de entrada analógicas (AI1 e AI2); 02 entradas digitais isoladas; 02 entradas isoladas programáveis via AI1 e AI2; 02 saídas para relés programáveis 1NA e 1NF; e 01 saída analógica isolada.

As entradas analógicas AI1 e AI2 possuem um conversor A/D para aquisição dos sinais de tensão por parte do sistema microprocessado. As entradas analógicas isoladas operam tensões CC de 0 a 10V e corrente de até 20 mA. Transdutores que sejam ligados à essas portas devem ser compatíveis com esses valores.

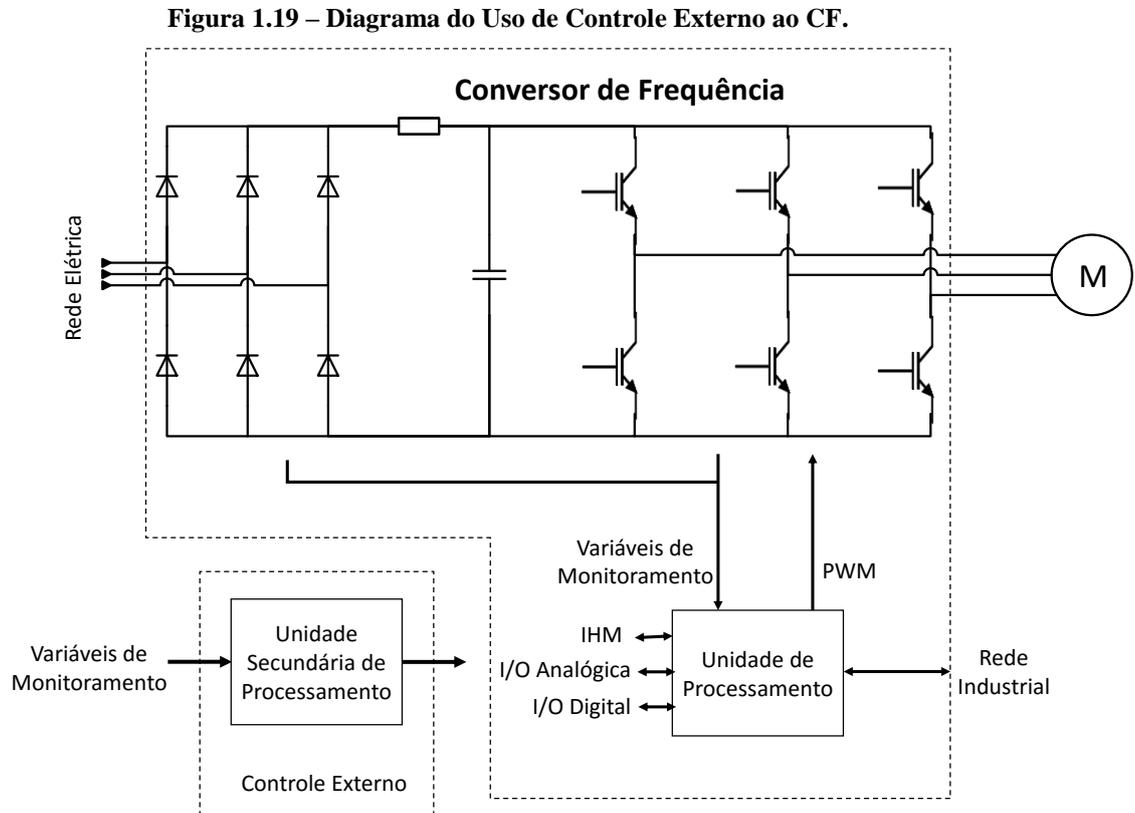
É comum a utilização deste tipo de entradas para fins de controle da velocidade de giro de motores de indução ligado à rede elétrica. Os valores obtidos por meio das entradas analógicas correspondem à realimentação do controlador. Neste caso é necessário que se faça a devida parametrização do CF indicando o valor realimentado pela entrada analógica como variável de controle.

É possível, também, utilizar a entrada analógica para fins de controle externo ao CF. Tendo em vista que este tipo de CF não possibilita a programação de técnicas de controle diversas àquelas já programadas em sua memória interna, é possível utilizar a entrada analógica para fazer o controle de velocidade com metodologia de controle diferente. Esta é uma função relevante uma vez que é observado o crescimento de técnicas de controle dinâmico, a exemplo das metodologias baseadas em inteligência computacional, e que somente dessa forma podem ser aplicadas no controle da velocidade de motores.

Para isso, faz-se necessária a devida parametrização das funções ligadas às entradas analógicas. Uma possibilidade é parametrizar o CF para não utilizar o controle dinâmico pré-programado e inserir a entrada analógica como referência de velocidade de forma direta. Neste caso, as tensões de 0 a 10V das entradas analógicas correspondem à valores de 0 a 100% da velocidade imposta ao motor.

Este tipo de controle pode ser feito por circuito analógico convencional ou, nos casos de técnicas de controle baseadas em inteligência computacional, com circuitos digitais microprocessados. O caso da aplicação de técnicas de controle inteligente necessita de uma Unidade

Secundária de Processamento para fins de controle, bem como sensores e circuitos de condicionamento de sinais de entrada e saída à Unidade Secundária de Processamento. A Figura 1.19 apresenta o diagrama do uso de controle externo ao CF.



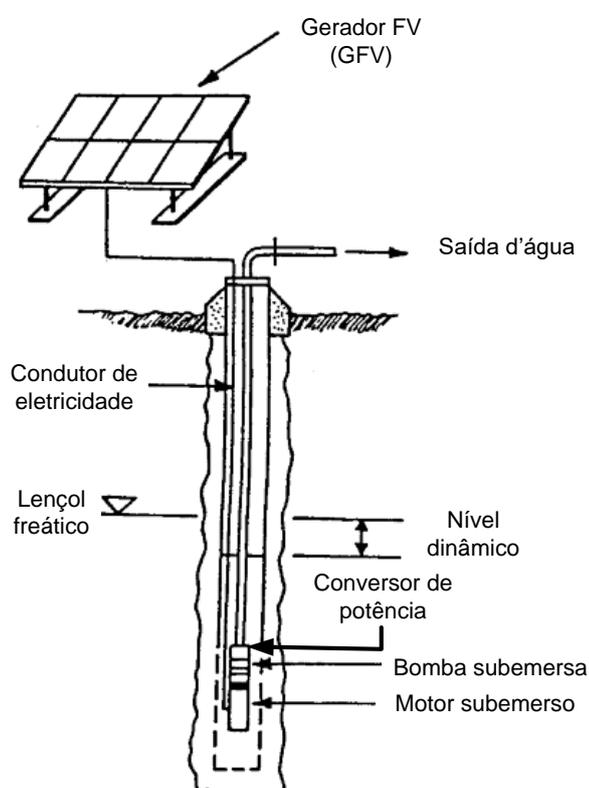
### 1. 1.3. Motobombas Fotovoltaicas.

As principais bombas usadas para o bombeamento de água são as de deslocamento positivo e as centrífugas. A bomba centrífuga é usada em aplicações com alturas manométricas constantes. Um GFV pode ser usado para alimentar um motor síncrono de ímãs permanentes que por sua vez conduz uma bomba sob uma grande variedade de condições de irradiância solar. Motores de indução podem ser usados também para conduzir uma bomba submersa a partir da eletricidade fornecida por um GFV. Em ambos os casos, motores trifásicos são empregados em aplicações de grande porte. Para a aplicação de baixa potência, no entanto, o motor de indução monofásico é empregado por fornecer um torque de partida elevado, necessário para a operação do bombeamento (Shaw e Gaur, 2014). Ressalta-se que foi utilizada nesta pesquisa motobomba submersa do tipo trifásica e acionada por motor de indução.

A Figura 1.20 ilustra um sistema especificamente fabricado para a aplicação solar fotovoltaica onde um conjunto submersível composto por conversor + bomba centrífuga mult-

estágios + motor é tipicamente utilizado para compor o SFB. Segundo Sahw e Gaur (2014) esta configuração provavelmente seja o tipo mais comum de bomba solar usada para o suprimento de vilas. As vantagens desta configuração estão na facilidade de instalação e no fato do conjunto estar submerso e longe de potenciais fontes de avarias. Contudo, as principais desvantagens desses sistemas frente a configuração com CF's comerciais está na indisponibilidade desses produtos no mercado nacional e no fato de que um dano eventual no conversor ou na motobomba invalida todo o conjunto.

**Figura 1.20 – Conjunto submersível composto por conversor + bomba + motor (PRACTICAL ACTION, 2015).**



Tanto motores c.a. quanto c.c. podem ser incorporados no conjunto conversor de potência + motobomba embora um inversor seja necessário no estágio de potência para sistemas em c.a.. Se um motor c.c. com escovas é usado há a necessidade de o equipamento ser retirado (aproximadamente a cada 2 anos) para a troca das escovas. Motores c.c. sem escovas exigem comutação eletrônica. SFB's comumente utilizados em aplicações rurais utilizam bombas de pequeno porte variando entre 200 a 2000 W (Elgendy et al., 2010).

Em SFB aplicado ao bombeamento de água em poços devem-se considerar as perdas ocasionadas pela altura manométrica do poço (perdas estáticas), perdas por fricção, condições

de torque, rendimento, etc. Motobombas possuem diferentes valores de vazão (considerando operação na velocidade nominal de giro) para diferentes valores de altura manométrica. Durante o dia, a velocidade do motor depende da potência fornecida pelo GFV que por sua vez depende basicamente da condição de temperatura e da magnitude da irradiância de operação. Para obter o máximo de energia possível do GFV, ao invés de se utilizar um circuito de SPMP, faz-se um ajuste apropriado da frequência do inversor por meio do aumento ou redução da mesma, proporcionando uma melhoria global da eficiência do sistema. Por outro lado, o fluxo e a eficiência, da motobomba, para uma dada altura manométrica total (H), dependem da velocidade de rotação (considerando-se o diâmetro da tubulação constante) e esta por sua vez depende da frequência da tensão elétrica no estator.

Em Yaichi e Fellah (2013) modelou-se o acoplamento do motor com uma bomba centrífuga do tipo SPA com o objetivo de obter o fluxo e a eficiência em função da frequência da tensão do estator para uma dada altura manométrica. A bomba utilizada foi à modelo SP5A7 cujas características da motobomba são apresentadas na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 – Especificação do sistema de bombeamento modelado em Yaichi e Fellah (2013).**

<b>Subsistema</b>	<b>Especificação</b>	
<b>Motobomba</b>	<b>Tipo</b>	GRUNFOS
	<b>Frequência industrial</b>	50 Hz
	<b>Velocidade</b>	2920 rpm
	<b>Potência</b>	550 W
	<b>Tensão</b>	65 V
<b>GFV</b>	<b>Tipo</b>	Isofotón
	<b>Potência</b>	75 W
	<b>Tensão de mp</b>	17,3 V
	<b>Corrente de mp</b>	4,34 A
	<b>Tensão de circuito aberto</b>	21,6 V
	<b>Corrente de curto-circuito</b>	4,67 A
	<b>Número de módulos</b>	8 Np x 2 Ns

A potência elétrica requerida pelo conjunto (condicionamento de potência + motobomba) é dependente da altura manométrica total e da vazão da água. A Equação 1.6 permite calcular a potência elétrica necessária pelo conjunto:

$$P_e = \frac{Q\rho g H_T}{3.600} \times \frac{1}{\eta_{mb}} \quad (\text{Equação 1.6})$$

onde  $P_e$  é a potência elétrica (W) requerida pelo conjunto,  $Q$  é a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/h),  $\rho$  é a densidade da água (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $H_T$  é a altura manométrica total (m) e  $\eta_{mb}$  é a eficiência do conjunto. Na Equação 1.6 o produto no numerador corresponde à potência hidráulica ( $P_h$ ) necessária para transportar a água sob a influência de uma dada altura manométrica total. Na Tabela 1.2 constam, como exemplo para as frequências de 20 e 38 Hz, resultados obtidos por Yaichi e Fellah (2013). Estes resultados foram obtidos através da lei da razão tensão/frequência constante e medindo-se, para cada frequência, a vazão da bomba versus pressão na tubulação e simultaneamente a potência demandada pelo conjunto.

O objetivo traçado por Yaichi e Fellah (2013) foi desenvolver um modelo matemático, que simule qualquer ponto de operação (ou seja, possibilite calcular a vazão e a eficiência do conjunto) para uma altura manométrica  $H_{T2}$ , de acordo com a frequência da tensão de alimentação de entrada do conjunto motobomba. Para isso empregou-se a lei da similaridade para prever a operação do conjunto motobomba baseando-se nas próprias características de origem, como por exemplo, aquelas geralmente fornecidas pelos fabricantes ou sobre resultados experimentais. Assim, as Equações 1.7 e 1.8 foram utilizadas:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (\text{Equação 1.7})$$

$$\frac{H_{T1}}{H_{T2}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2, \quad (\text{Equação 1.8})$$

onde  $Q_1$  e  $H_{T1}$  são, respectivamente, a vazão volumétrica e a altura manométrica total correspondentes a velocidade de rotação da bomba  $\omega_1$ . Enquanto que  $Q_2$  e  $H_{T2}$  são aqueles correspondentes a velocidade de rotação  $\omega_2$ . Conhecendo-se os dados para uma dada frequência elétrica  $f_1(Q_1, H_{T1})$ , que correspondente a uma velocidade de rotação  $\omega_1$  é possível obter para uma outra altura manométrica ( $H_{T2}$ ) os valores  $f_2$  e  $Q_2$ . Dessa forma a Equação 1.9, referente à frequência do sinal elétrico no estator, e a Equação 1.10, relacionada vazão da motobomba, são facilmente obtidas das Equações 1.7 e 1.8.

$$f_2 = \sqrt{\frac{H_{T2}}{H_{T1}}} f_1 \quad (\text{Equação 1.9})$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{H_{T2}}{H_{T1}}} Q_1 \quad (\text{Equação 1.10})$$

**Tabela 1.2 – Resultados experimentais obtidos por Yaichi e Fella (2013) para a motobomba SP5A7 ( $Q=0$  indica que a válvula está completamente fechada).**

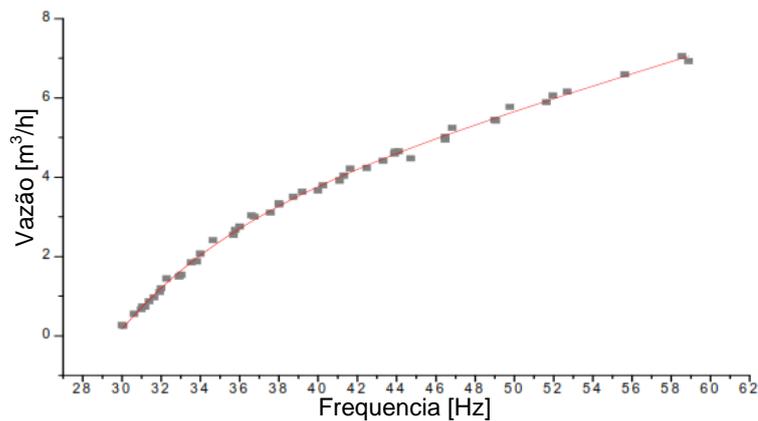
$H_T$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	$P_h$ (W)	$P_e$ (W)	$\eta_{mb}$
<b>20 Hz – 24,5 V</b>				
1,5	2,66	11,07	96	0,11
2	2,40	13,36	96	0,14
4	1,85	20,58	96	0,21
5	1,39	19,30	96	0,20
6	0,61	10,22	88	0,12
7	0	0	80	0
<b>38 Hz – 44,9 V</b>				
2	5,20	28,90	336	0,09
3	4,99	41,61	344	0,12
5	4,94	68,59	344	0,20
7	4,5	87,61	352	0,25
9	4,2	105,14	360	0,29
10	4,1	113,89	360	0,32
12	3,78	126,18	360	0,35
15	3,34	139,40	360	0,39
17	2,71	127,91	352	0,36
20	1,72	95,46	312	0,30
22	1,05	64,52	272	0,234
25	0	0	216	0

Das leis de semelhança se pode inferir também que a potência elétrica absorvida no estator da motobomba a uma altura manométrica  $H_{T2}$  e frequência  $f_2$  pode ser calculada pela Equação 1.11:

$$P_{e2} = P_{e1} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^3 \quad (\text{Equação 1.11})$$

Com essa metodologia, é possível obter os três parâmetros ( $Q$ ,  $P_h$ ,  $\eta_{mb}$ ) para uma dada frequência e altura manométrica total ( $f_2$ ,  $H_{T2}$ ). Como exemplo, com base nos dados da Tabela 1.2 para a frequência de 38 Hz, a qual correspondente à frequência conhecida ( $f_1$ ), é possível observar que para uma altura manométrica total  $H_{T2}=15$  m, o sistema não contribui para a produtividade de bombeamento d'água, a menos que a frequência de alimentação ultrapasse os 30 Hz. A Figura 1.21 mostra os pontos obtidos experimentalmente bem como interpolação obtida usando-se um modelo com duas exponenciais obtida a partir do software “ORIGINELAB” (Yaichi e Fellah, 2013).

**Figura 1.21 – Característica de vazão em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em  $H_T = 15$  m.**



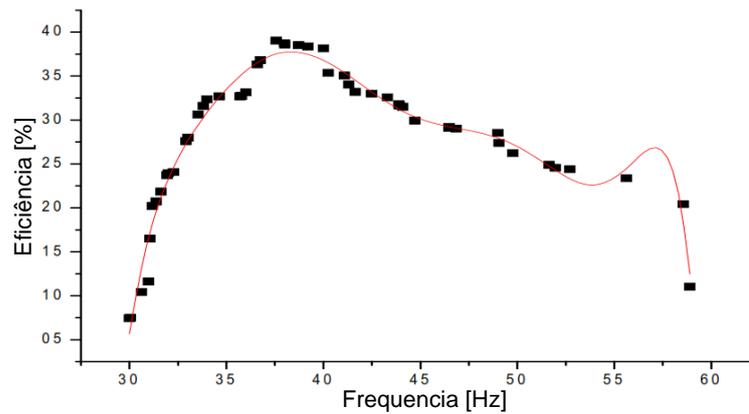
O modelo obtido, e apresentado na Equação 1.12, possibilita calcular diretamente a vazão em função da frequência do sinal elétrico da tensão no estator para uma altura manométrica total igual a 15 m:

$$Q = y_0 + A_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-f}{B_1}\right) \right] + A_2 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-f}{B_2}\right) \right], \quad (\text{Equação 1.12})$$

com  $y_0=-445,65141$ ;  $A_1=90,52122$ ,  $B_1=544,45166$ ;  $A_2=443,4417$ ;  $B_2=5,78246$ .

De maneira análoga, a Figura 1.22 mostra os pontos experimentais obtidos para a eficiência do conjunto (condicionamento de potência+motobomba) tal como a curva de tendência obtida pela interpolação desses dados (Yaichi e Fellah, 2013).

**Figura 1.22 – Característica de eficiência em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em  $H_T = 15$  m.**



A Equação 1.13 representa a eficiência obtida da interpolação dos dados da Figura 1.22:

$$\eta = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + \dots + a_5 f^5, \quad (\text{Equação 1.13})$$

onde  $a_0 = -23,2091$ ;  $a_1 = 1,9562$ ;  $a_2 = -0,05405$ ;  $a_3 = 4,99471 \times 10^{-4}$ ;  $a_4 = 1,67495 \times 10^{-6}$ ;  $a_5 = -3,64613 \times 10^{-8}$ .

De acordo com a Figura 1.22 constata-se que o conjunto funciona com maior eficiência na frequência de aproximadamente 38 Hz. Ressalta-se que os resultados anteriores apresentados em Yaichi e Fellah (2013) foram obtidos para uma  $H_T = 15$  m. Caso se queira avaliar o comportamento do conjunto para outra altura manométrica total diferente de 15 m, todo o procedimento anterior deve ser replicado para a nova altura de interesse.

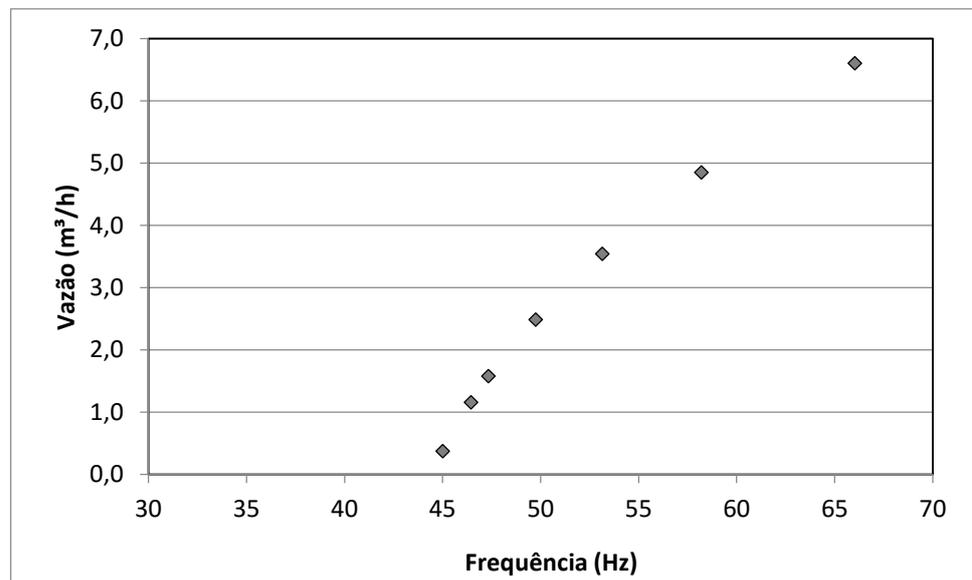
Para ilustrar melhor essa situação utilizou-se outra motobomba centrífuga submersível comercial, que tem as seguintes características: potência nominal igual a 1 CV, número de estágios igual 6, tensão e frequência de operação da rede elétrica 220 V<sub>rms</sub> e 60 Hz, respectivamente. A Tabela 1.3 apresenta os dados, disponibilizados pelo fabricante, da vazão para várias alturas manométrica. Nota-se que estes valores foram obtidos para uma frequência de sinal elétrico do estator igual ao da rede elétrica convencional ( $f_1 = 60$  Hz).

**Tabela 1.3 – Vazão de uma motobomba centrífuga comercial para diferentes valores de altura manométrica.**

$Q_I$ (m <sup>3</sup> /h)	0.5	1.5	2	3	4	5	6
$H_{T1}$ (m)	62,2	58,4	56,2	50,9	44,6	37,2	28,9

Utilizando-se a mesma metodologia anterior, é possível obter a partir dos dados da Tabela 1.3, a curva da vazão em função frequência para o conjunto motobomba, considerando a operação da mesma em uma altura manométrica total igual a  $H_{T2}=35$  m. O resultado desse cálculo é mostrado na Figura 1.23. Nessa situação não foi possível efetuar o cálculo da eficiência em função da frequência, pois não era conhecido o valor da potência elétrica na entrada do conjunto.

**Figura 1.23 – Característica de eficiência em função da frequência e sua correspondente curva de tendência para a motobomba SP5A7 operando em  $H_T = 35$  m.**



Nota-se que neste caso, até uma frequência de aproximadamente 45 Hz, não há contribuição alguma para o volume de água bombeado, considerando os 35 m de altura manométrica.

## 2. LÓGICA FUZZY PARA O CONTROLE APLICADO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

Em processos e sistemas dinâmicos complexos, como um SFB por exemplo, requerem-se mecanismos para lidar com informações imprecisas e procedimentos de raciocínio e processamento aproximado para torná-los tratáveis. Uma estratégia eficaz nestas circunstâncias envolve a aquisição, representação e o processamento de noções descritas linguisticamente, como o raciocínio humano, através de modelagem e controle *fuzzy*. Em sistemas *fuzzy* as noções linguísticas descrevem objetos e grandezas, cujas classes não apresentam fronteiras delineadas de forma precisa. A teoria de sistemas *fuzzy* é uma abordagem formal, cujo propósito é tratar a modelagem, a representação, o raciocínio e o processamento de informações imprecisas como uma estratégia de solução de problemas e controle de sistemas.

No núcleo de sistemas *fuzzy* está a teoria de conjuntos *fuzzy*, que permite traduzir, em termos matemáticos, noções, informações e regras que expressam o conhecimento sobre um sistema de forma linguística. Ela também fornece um mecanismo de inferência que utiliza informação imprecisa representada por variáveis caracterizadas por conjuntos *fuzzy* e um conjunto de regras que representam funções ou relações entre as variáveis de entrada e saída de um sistema, envolvidas para processar informação e tomar decisões de controle.

Desta maneira, um sistema *fuzzy* é capaz de relacionar as variáveis de entrada e saída de um sistema, através das regras de controle, cuja disposição das funções de pertinência (graus linguísticos para valores numéricos de uma variável), bem como da base de regras, permitem que se faça o controle de sistemas com ações de controle e *set-points* adaptáveis as variações da dinâmica do sistema. Esta característica se adequa aos SFB's de conexão direta uma vez que o ponto de máxima potência do GFV é uma função da irradiância e da temperatura que variam durante o dia. O *set-point* da irradiância varia com o tempo e a ação de controle varia com uma proporção desse *set-point* e adicionada a uma dinâmica que vem da parte derivativa, para o caso de um controlador *fuzzy* proporcional-derivativo (PD).

Tendo em vista o exposto no capítulo 1 sobre os desafios de se utilizar o controlador PID em SFB's, o controlador *fuzzy* se apresenta como uma alternativa para suprir as necessidades apresentadas por um SFB de conexão direta. Contudo, para a utilização deste tipo de controle se faz necessário o desenvolvimento de plataforma adequada para programação a ser utilizada como dispositivo de controle externo ao CF, uma vez que CF's comerciais não possuem controladores *fuzzy* embarcados. Neste caso, somente poderá ser utilizado CF que disponibilizarem

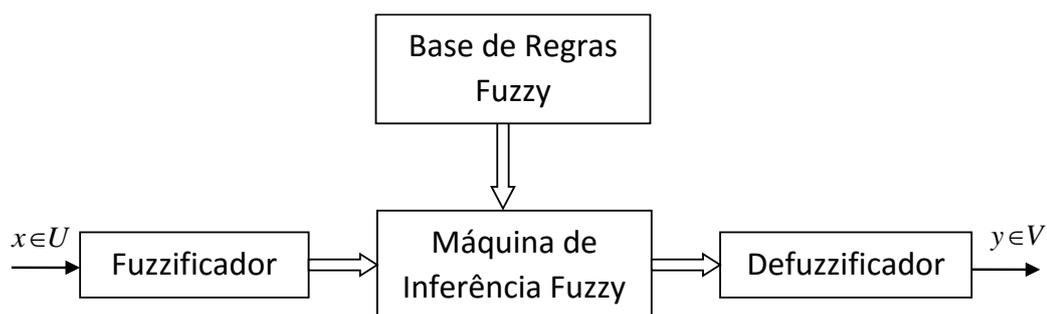
o acesso externo à referência do PWM gerado por ele por meio de entrada analógica configurável.

Outra vantagem do controlador *fuzzy* frente ao controlador PID, está ligada à problemática de sintonia dos ganhos do controlador PID como apresentado em Brito (2006). No caso do controlador *fuzzy*, a necessidade de sintonia dos ganhos se reverte na elaboração da base de regras do controlador *fuzzy*. Isto é, sendo o controlador *fuzzy* um sistema especialista (que modela o conhecimento de um especialista) e que relaciona entradas na base de regras com valores linguísticos de fácil compreensão, estes ajustes apresentam-se como um desafio de menor intensidade.

## 2. 1 Estrutura de um Sistema Lógico Fuzzy

De acordo com Simões e Shaw (2007), são apresentados os sistemas *fuzzy* como sendo sistemas especialistas baseados em regras do tipo SE e ENTÃO. Estes sistemas utilizam na sua entrada conjuntos que consideram um determinado grau de pertinência (função de pertinência) de determinada variável a um conjunto linguístico (mais detalhes no anexo A). A saída do conjunto *fuzzy* é obtida por meio do mapeamento do consequente das regras ativadas pelos conjuntos *fuzzy* de entrada. A Figura 2.1 apresenta a estrutura de um sistema *fuzzy*, onde estão identificados os principais módulos que o compõem e suas funções. Sistemas com esta estrutura podem representar modelos ou controladores de sistemas dinâmicos.

Figura 2.1 – Representação geral de um sistema *fuzzy*.



Em geral, um sistema *fuzzy* faz corresponder a cada entrada *fuzzy* ( $x \in U$ ) uma saída *fuzzy* ( $y \in V$ ). No entanto, espera-se que a cada entrada *crisp* (um número real, ou par de números reais, ou n-upla de números reais) faça corresponder uma saída *crisp*. Os módulos possuem as seguintes funções:

- i. **Fuzzificador:** é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada (considera-se as entradas não *fuzzy*, ou seja, números reais resultantes de medições ou observações na aquisição

de dados) por meio de conjuntos *fuzzy*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados (ou graus) desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência;

- ii. Base de Regras: é o que constitui o núcleo do sistema. É neste módulo onde se guardam as variáveis e suas classificações linguísticas com as regras do tipo “SE-ENTÃO”;
- iii. Máquina de Inferência Fuzzy: é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *fuzzy*; e
- iv. Defuzzificador: que traduz o estado da variável de saída *fuzzy* para um valor real (numérico).

No caso do SFB de conexão direta desenvolvido neste trabalho, o sistema de controle é realizado por um sistema de inferência *fuzzy*, que o caracteriza como um controlador *fuzzy*, este deve fornecer ao SFB dados ou sinais precisos, já que a apresentação de um conjunto nebuloso à entrada do SFB não teria significado. Portanto, defuzzificar, significa escolher, no universo das variáveis de saída, um elemento representativo da informação resultante da inferência, que representa o sinal de controle. As configurações de cada módulo do controlador *fuzzy* do presente trabalho são abordadas a seguir:

## 2.2 Fuzzificadores

Fuzzificação é um mapeamento do domínio dos reais para o domínio *fuzzy*. A fuzzificação de valores reais consiste em atribuir a estes valores um conjunto *fuzzy* que tenha uma variável linguística relacionada a ele. Considerando, portanto, um valor, pode-se atribuir a ele um conjunto *fuzzy* de forma que este conjunto contenha  $x^*$  e este elemento seja o elemento de maior pertinência no conjunto.

Existem vários tipos de fuzzificadores, a exemplo do fuzzificador Gaussiano e do fuzzificador triangular.

- **Fuzzificador Gaussiano:** O fuzzificador Gaussiano mapeia  $x^* \in U$  em um conjunto  $A'$  em  $U$  o qual se atribui uma função de pertinência de acordo com a Equação 2.1 (Wang, 1997):

$$\mu_{A'}(x) = e^{-\left(\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right)^2} * \dots * e^{-\left(\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right)^2} \quad (\text{Equação 2.1})$$

- **Fuzzificador Triangular:** O fuzzificador Triangular também mapeia  $x^* \in U$  em um conjunto  $A'$  em  $U$  o qual se atribui uma função de pertinência de acordo com a Equação 2.2 (Wang, 1997):

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right); & x = |x_i - x_i^*| \leq b_i \\ 0; & x = |x_i - x_i^*| > b_i \end{cases} \quad (\text{Equação 2.2})$$

### 2.3 Base de Regras e Máquina de Inferência *Fuzzy*

A base de regras *fuzzy* consiste em um conjunto de regras SE-ENTÃO definidos pelo conhecimento empírico de especialistas que tem como objetivo relacionar as variáveis linguísticas de entrada e saída. A base de regras é formada para abranger todas as prováveis combinações entre as variáveis linguísticas de entrada e de saída, isto se a regra criada tiver relevância operacional.

A máquina de inferência tem como função agregar valores às regras que compõem a base de regras. Na máquina de inferência *fuzzy*, os princípios da lógica *fuzzy* são usados para combinar as regras SE – ENTÃO em uma base de regras *fuzzy* para o mapeamento de um conjunto *fuzzy*  $A^l$  em  $U$  para um conjunto *fuzzy*  $B^l$  em  $V$ .

Na máquina de inferência produto, são usadas a Inferência Baseada em Regras Individuais tendo como operador de combinação a norma-s para a “união”, a implicação de Mamdani, o produto algébrico para todos os operadores normas-t e *máx* para todos os operadores normas-s. Com isso, obtém-se a Máquina de Inferência Produto descrita pela Equação 2.3 (Wang, 1997).

$$\mu_{B^l}(y) = \max_{t=1}^M \left[ \sup_{x \in U} \left( \mu_{A^l}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \mu_{B^l}(y) \right) \right] \quad (\text{Equação 2.3})$$

O seu núcleo é composto por uma população de regras de inferência do tipo antecedente-consequente (isto é, Se-Então). A parte antecedente é composta por uma condição, a ser satisfeita, e o consequente é formado por uma ação. Todas as regras seguem, então, o seguinte modelo: *SE <condição> ⇒ ENTÃO <ação>*, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Exemplo da Base de Regras para detectar risco de incêndio florestal.

Antecedente	Operadores com atributos antecedentes		Ação
<i>SE</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>ENTÃO</i>
Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Vento	Risco de Incêndio
Quente	Alta	Falso	Não
Quente	Alta	Verdadeiro	Não
Quente	Normal	Falso	Não
Quente	Normal	Verdadeiro	Sim
Quente	Baixa	Falso	Sim
Quente	Baixa	Verdadeiro	Sim
Amena	Alta	Falso	Não
Amena	Alta	Verdadeiro	Não
Amena	Normal	Falso	Não
Amena	Normal	Verdadeiro	Não
Amena	Baixa	Falso	Não
Amena	Baixa	Verdadeiro	Sim

A variável “risco” é um atributo do tipo *ação* escolhido para fazer a classificação que determina a classe de saída das decisões, cujo objetivo é detectar se há (sim) ou não risco de incêndio. As variáveis “Temperatura”, “Umidade” e “Vento” são atributos do tipo *condição*, cujas combinações de suas configurações são feitas por operações lógicas do tipo “E” (& ou *AND*) e resultam no modelo de comportamento ambiental mais suscetível ao risco de incêndio. As classes de cada atributo são definidas da forma: “Quente” e “Amena” são variáveis fuzzificadas que compreendem aos intervalos “33°C a 60°C” e “25°C a 32°C” respectivamente do atributo “Temperatura”; “Alta”, “Normal” e “Baixa” compreendem a “80% a 100%”, “60% a 79%” e “20% a 59%” respectivamente e pertencem ao atributo “umidade”; e por fim “verdadeiro” e “falso” compreendem aos estados de “estar ventando” ou “não estar ventando” e pertencem ao atributo “vento”.

## 2. 4 Defuzzificadores

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 discreto que melhor represente

os valores *fuzzy* inferidos da variável linguística de saída, ou seja, a distribuição de possibilidades.

O método de defuzzificação adotado neste trabalho é o do Centro dos Máximos (C-O-M *Center of Maximum*). Neste método, a saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência. O cálculo do valor defuzzificado é realizado através da Equação 2.4, onde  $\mu_{o,k}(u_i)$  indicam os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída (Wang, 1997).

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)} \quad (\text{Equação 2.4})$$

O C-O-M é o método mais rápido e com menor custo computacional de processamento (importante em sistemas embarcados), pois as áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel e apenas os máximos são usados (pertinências *singleton*).

## 2.5 Controlador *Fuzzy* Baseado em Regras

Um Sistema Lógico *Fuzzy* (FLS – *Fuzzy Logic System*) utilizado como controlador para sistemas dinâmicos deve considerar a dinâmica dominante do sistema a ser controlado, bem como seus principais aspectos de funcionamento. Controladores baseados em Lógica *Fuzzy* (FLC – *Fuzzy Logic Control*) são capazes de modelar o conhecimento especialista e são indicados para sistemas que possuam não-linearidades envolvidas e/ou incertezas. A dinâmica imposta pelo controlador *fuzzy* depende, além das variáveis de entrada em seus respectivos universos de discurso, como da relação qualitativa existente nas regras do FLC. A definição das regras consiste em uma importante etapa no projeto de um controlador *fuzzy*, pois serão modelados a dinâmica e o comportamento do sistema de acordo com a experiência de um especialista.

A definição das variáveis de entrada e saída são, também, relevantes. De modo geral, usam-se FLC do tipo Múltiplas Entradas Única Saída (MISO - *Multiple Input Single Output*) e as variáveis de entrada podem ser os sinais representativos de diversas grandezas físicas, bem como o resultado do processamento dessas entradas, a exemplo da aplicação de metodologias de derivação ou de integração.

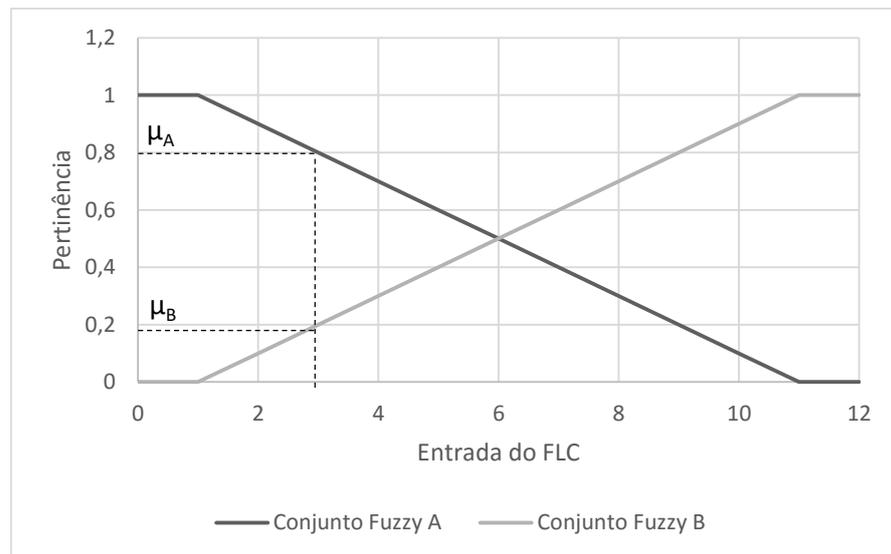
## 2. 6 Programação de Controladores *Fuzzy*

Controladores *fuzzy* comumente são embarcados em dispositivos microprocessados programáveis. Microcontroladores podem ser utilizados para programação de FLC's. A programação de um FLC deve obedecer às seguintes etapas:

1. Obtenção dos valores de entrada do sistema;
2. Obtenção das pertinências, considerando os valores de entrada, para cada conjunto *fuzzy* de cada entrada do controlador;
3. Obtenção do índice de ativação das regras;
4. Utilização dos índices de ativação das regras nos conjuntos *fuzzy* de saída;
5. Obtenção do valor de saída considerando metodologia de defuzzificação;

Após obtenção dos valores de entrada do sistema, o que pode se dar por diversas estratégias de aquisição de dados, deve-se obter as pertinências de cada conjunto *fuzzy* em cada entrada. Em uma entrada, considerando o universo de discurso da variável escolhida, se deve calcular os diversos valores de pertinências considerando a função de pertinência dos referidos conjuntos *fuzzy*. Cada conjunto *fuzzy* deve estar relacionado com uma variável linguística. A Figura 2.2 apresenta o processo de obtenção das pertinências em um conjunto *fuzzy*.

**Figura 2.2 – Obtenção das Pertinências.**

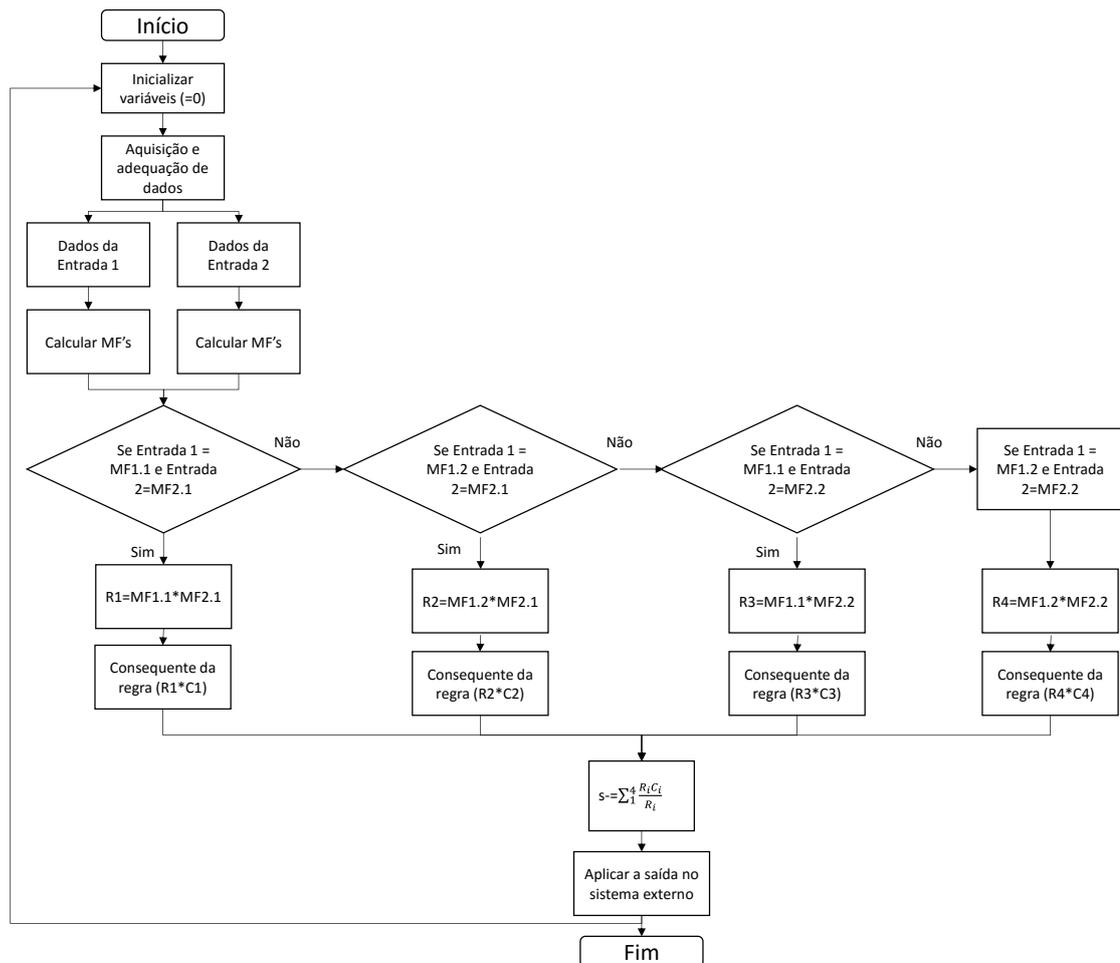


O índice de ativação das regras é obtido aplicando-se a norma-t (neste caso será utilizado o produto algébrico) nos conjuntos *fuzzy* relacionados em determinada regra. Considerando que já se tenha definido as regras se-então do FLC, deve-se fazer o produto entre os

conjuntos das diferentes entradas obedecendo a relação entre eles no antecedente da regra em questão, bem como sua variável linguística associada. Ou seja, caso haja o antecedente da regra “Se A=PEQUENO e B=GRANDE” deve-se realizar o produto algébrico das pertinências obtidas para o conjunto *fuzzy* “PEQUENO” na entrada A e o conjunto *fuzzy* “GRANDE” na entrada B.

De posse do índice de ativação das regras, deve-se aplicar a norma-t entre o índice de ativação da regra e o centro do conjunto *fuzzy* de saída relacionado no consequente da regra em questão. Após aplicação da norma-t deve-se obter o valor de saída do FLC aplicando-se a metodologia de defuzzificação escolhida. A Figura 2.3 apresenta o fluxograma de um exemplo de controlador *fuzzy* com duas entradas e cada entrada duas funções de pertinências (MF – *Membership Function*). A norma-t usada foi o produto algébrico e a defuzzificação a média dos centros. Ressalta-se que R representa a função de ativação das regras e C os valores dos centros do conjunto *fuzzy* de saída.

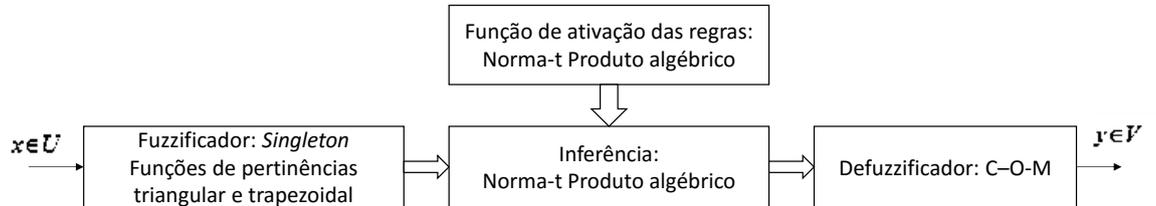
**Figura 2.3 – Exemplificação de um fluxograma para um controlador *fuzzy* de duas entradas.**



## 2.7 Modelagem do Controlador *Fuzzy* para o SFB

A Figura 2.4 apresenta a configuração do controlador *fuzzy* para o SFB de conexão direta desenvolvido neste trabalho:

**Figura 2.4 – Configuração do controlador *fuzzy* para o SFB.**



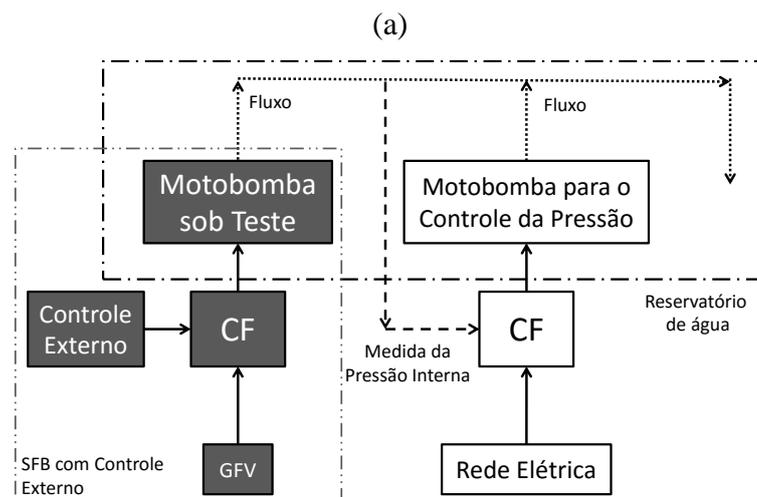
### 3. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentadas as bancadas para ensaios em motobombas, os GFV's e o DPC, todos utilizados para subsidiar as avaliações experimentais expostas nesta pesquisa. Além disso, são apresentadas as análises dos resultados obtidos para os testes com a utilização de um LDR e um módulo FV de baixa potência, ambos utilizados como sensores para inferir a tendência da variação da irradiância (importante para definir a ação de controle), bem como a descrição do controlador *fuzzy* desenvolvido e utilizado nas duas situações de sensoriamento avaliadas.

#### 3.1 Bancada de Ensaio em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento

Utilizou-se duas bancadas de ensaios para realização de testes operacionais tanto em motobombas como em SFB's de conexão direta. Em Brito (2006), pode-se encontrar a proposta e o desenvolvimento deste tipo de bancada que consiste em um sistema hidráulico fechado que simula diferentes valores de altura manométrica. A Figura 3.1 apresenta o diagrama esquemático da bancada e a foto de um sistema real montado no laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA).

**Figura 3.1 – Bancada de ensaios de motobombas: (a) Diagrama esquemático; (b) Sistema real montado no laboratório do GEDAE/UFPA.**



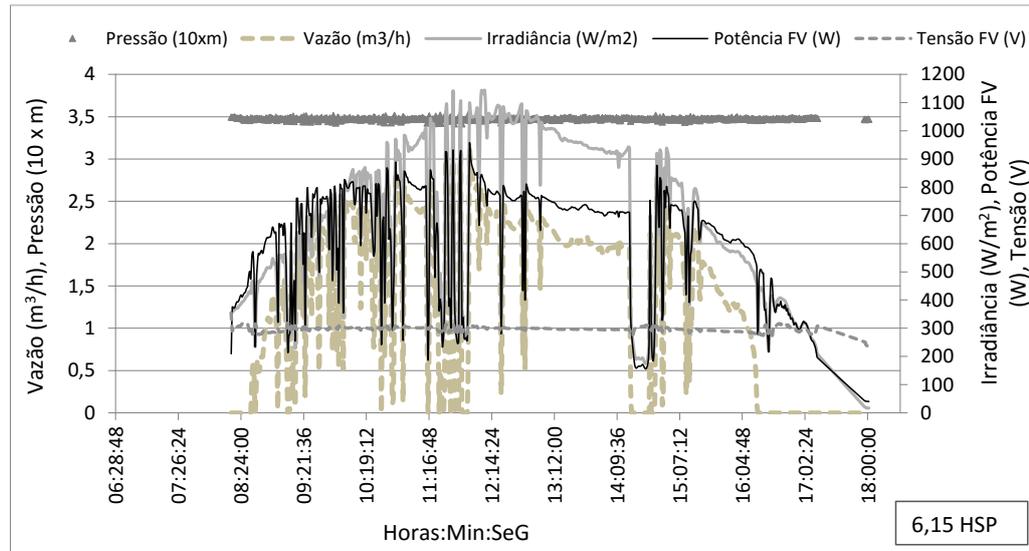
(b)



É importante mencionar que esta bancada foi desenvolvida inicialmente pelo Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da Universidade de São Paulo (Brito, 2006) e depois reproduzida pela Universidade Federal do Amapá e posteriormente pelo GEDAE/UFGA.

Tal como pode ser observado na Figura 3.1(a), a motobomba a ser testada está ligada ao CF alimentado diretamente pelo GFV. É nesta motobomba que os ensaios de controle de velocidade são realizados. A segunda motobomba está ligada diretamente na rede elétrica e será responsável por controlar a pressão na tubulação de saída da motobomba de teste, aumento ou diminuição a vazão de bombeamento. Essa pressão controlada equivale à altura manométrica na qual se deseja avaliar a operação do sistema.

A Figura 3.2 apresenta as principais variáveis de um teste operacional na bancada de ensaios de motobomba. Neste teste foi utilizado um SFB com um CF como dispositivo de condicionamento de potência. A altura manométrica simulada na bancada de ensaio foi de 35 m (3,5 bar). Pode-se observar que a metodologia de controle empregada na bancada para o controle da pressão da água no interior da tubulação é eficaz, uma vez que, mesmo sendo realizada ação de controle na motobomba de teste para se obter uma tensão constante no barramento c.c do CF, o que se traduz como uma vazão variável na saída da bomba de teste, a pressão pouco varia no decorrer do dia de teste.

**Figura 3.2 – Exemplo de teste operacional realizado com a bancada de ensaios de motobombas**

Os testes experimentais deste trabalho foram realizados em duas bancadas diferentes localizadas, uma no laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA), e outra no Laboratório de Energias Renováveis da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). As bancadas possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém com pequenas diferenças nas configurações de alguns dos equipamentos e instrumentos utilizados no condicionamento de sinais e aquisição dos dados.

### 3. 1.1 Bancada de Ensaios da Universidade Federal do Amapá.

A bancada de ensaios do Laboratório de Energias Renováveis/UNIFAP é composta por um GFV constituído de 12 módulos de 45 Wp de silício amorfo, cujos parâmetros característicos constam na Tabela 3.1, dispostos em 3 linhas em paralelo com 4 módulos em série cada uma. O sistema possui, também, duas motobombas submersas do tipo centrífuga, sendo uma de 8 estágios possuindo 0,5 cv (ligada ao GFV) e outra de 2 cv com 13 estágios (ligada à rede elétrica). Os CF's utilizados são de 0,5 cv e de 2 cv do fabricante WEG, modelo CFW08.

**Tabela 3.1 – Características do módulo FV utilizado.**

<b>Potência Nominal (<math>P_{mp}</math>)</b>	45 Wp
<b>Corrente Nominal (<math>I_{mp}</math>)</b>	0,6 A
<b>Tensão Nominal (<math>V_{mp}</math>)</b>	75 V
<b>Corrente de Curto-circuito (<math>I_{sc}</math>)</b>	0,78 A
<b>Tensão de Circuito Aberto (<math>V_{oc}</math>)</b>	101 V

Considerando a degradação dos módulos ao longo do tempo, verificou-se uma redução de aproximadamente 12,5 V na tensão de máxima potência de cada um dos módulos do GFV. Assim, o valor da tensão que mais se aproxima à de máxima potência para o GFV, na condição nominal, é de 250V, ou seja, 4 módulos em série de 62,5V.

### 3. 1.2 Bancada de Ensaio da Universidade Federal do Pará.

O SFB utiliza um GFV composto por 20 módulos SIEMENS SP75 dispostos em série totalizando 1.500 Wp de potência nominal. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros elétricos nominais do referido módulo FV, o qual possui células de silício monocristalino. O CF utilizado corresponde a um WEG CFW11 de 3 cv. Uma motobomba centrífuga, submersível, de 1 cv compõe o SFB, cujas características física e elétrica estão descritas na Tabela 3.3. Para o controle da pressão na tubulação são utilizados uma motobomba de 3 cv e um CF de 12 cv, ligados à rede elétrica.

**Tabela 3.2 – Características do módulo FV utilizado considerando os efeitos da degradação.**

<b>Potência Nominal (<math>P_{mp}</math>)</b>	62,13 Wp
<b>Corrente Nominal (<math>I_{mp}</math>)</b>	3,77 A
<b>Tensão Nominal (<math>V_{mp}</math>)</b>	16,45 V
<b>Corrente de Curto-circuito (<math>I_{sc}</math>)</b>	4,21 A
<b>Tensão de Circuito Aberto (<math>V_{oc}</math>)</b>	21,61 V
<b>Área</b>	0,63 m <sup>2</sup>

**Tabela 3.3 – Características físicas e elétricas da motobomba testada com o GFV.**

<b>Potência Nominal</b>	1 cv (0,736 kW)
<b>Número de Estágios</b>	06
<b>Velocidade</b>	3450 RPM
<b>Tensão (ligada à rede elétrica)</b>	220 V
<b>Corrente (ligada à rede elétrica)</b>	3,4 A
<b>Frequência (ligada à rede elétrica)</b>	60 Hz

A Tabela 3.4 apresenta a lista dos dispositivos utilizados para a aquisição de dados da bancada. A Tabela 3.5 apresenta os valores estimados das incertezas para as grandezas medidas

na bancada. A metodologia utilizada consiste na incerteza combinada proveniente da teoria da propagação de erros (Schenkel, 2015).

**Tabela 3.4 – Dispositivos usados para aquisição de dados.**

<b>Equipamentos</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>
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

**Tabela 3.5 – Valores das incertezas máximas combinadas para as grandezas medidas.**

<b>Grandezas</b>	<b>Máximas Incertezas (%)</b>
Tensão c.c.	$\pm 1\%$
Corrente c.c.	$\pm 5\%$
Potência c.c.	$\pm 5,09\%$
Irradiância	$\pm 5\%$
Temperatura	$\pm 0,1\%$
Vazão	$\pm 0,25\%$
Pressão	$\pm 0,1\%$

### **3. 2 Dispositivo Utilizado para Embarcar o Controlador *Fuzzy*.**

Foi desenvolvido um Dispositivo para Programação de Controladores para embarcar o controlador *fuzzy*. O DPC é baseado em um microcontrolador Atmega328 da fabricante ATmel e é compatível com a aplicação em SFB no que se refere à alimentação do circuito, bem como na conexão com o CF. A Tabela 3.6 apresenta os dados técnicos de um microcontrolador Atmega328.

**Tabela 3.6 – Dados técnicos de um microcontrolador Atmega328.**

<b>Tensão de Alimentação</b>	5 V
<b>Tensão de Entrada (recomendada)</b>	7 – 12 V
<b>Tensão de Entrada (limites)</b>	6 – 20 V
<b>Pinos de Entrada e Saída Digitais</b>	14 (sendo 6 saídas PWM)
<b>Pinos de Entrada Analógica</b>	6
<b>Corrente CC para Pinos de Entrada e Saída</b>	40 Ma
<b>Memória Flash</b>	32 kB sendo 0,5 kB usado para <i>Bootloader</i>
<b>SRAM</b>	2 kB
<b>EEPROM</b>	1 kB
<b>Clock</b>	16 MHz

O ATmega328 possui memória para programação de 32 kB o que é o suficiente para suportar a programação de um controlador *fuzzy* para aplicação em SFB. A quantidade de portas I/O é também satisfatória uma vez que o controlador *fuzzy* não usa uma quantidade superior a 03 (três) destes terminais para o seu funcionamento. Ele possui *clock* de 16 MHz e também se mostra adequado para aplicação em SFB uma vez que as alterações das variáveis meteorológicas que são detectadas pelo controlador *fuzzy* são da ordem de unidades de segundos.

A Figura 3.3 apresenta o DPC, seu diagrama de blocos e seu circuito elétrico. O sinal de saída do DPC utiliza modulação por largura de pulso (PWM). Para utilizar esse tipo de sinal faz-se necessário um circuito resistor-capacitor (RC) para transformar o sinal em uma tensão c.c.. O DPC possui Interface Homem-Máquina própria que utiliza LED's (*Light Emissor Diode*) indicadores cujo funcionamento pode ser programado conforme a necessidade. Um sistema de regulação de tensão também é utilizado para alimentação do DPC por meio do GFV. É disponibilizada, também, interface para programação do DPC. A Tabela 3.7 apresenta os dados técnicos do DPC.

Figura 3.3 – Dispositivo para Programação de Controladores. (a) Foto da placa e (b) Diagrama de blocos.

(a)



(b)

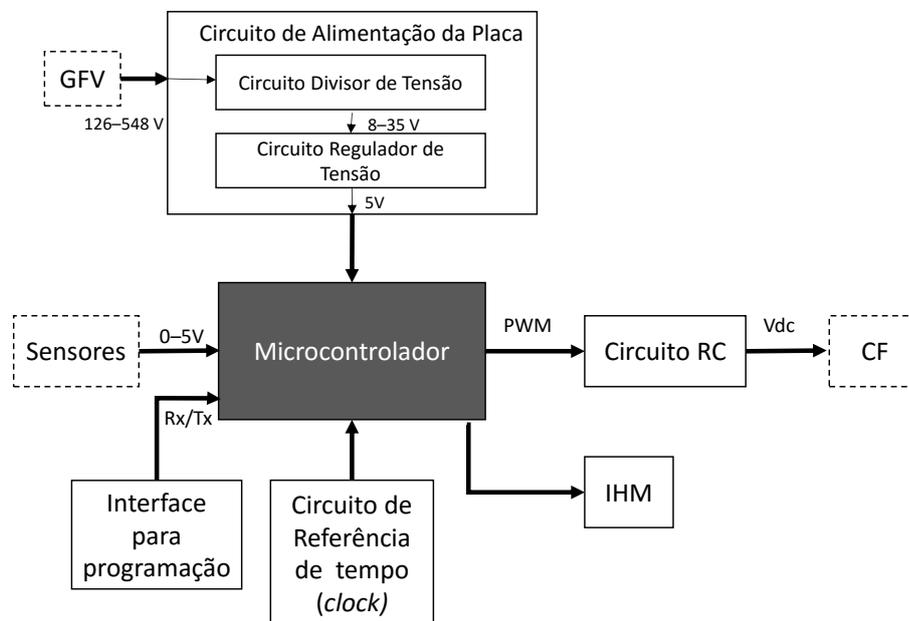


Tabela 3.7 – Dados técnicos do DPC.

<b>Tensão de Alimentação (Gerador FV)</b>	126 – 548 V
<b>Tensão Auxiliar de Alimentação</b>	8 – 35 V
<b>Tensão de Entrada dos Sensores</b>	0 – 5 V
<b>Tensão de Saída do Controlador <i>Fuzzy</i></b>	0 – 5 V
<b>Corrente de Saída do Controlador <i>Fuzzy</i></b>	0 – 40 mA

### 3.3 Controlador *Fuzzy* para CF's Aplicados em SFB's Utilizando um LDR como Sensor.

#### 3.3.1 Light-Dependent Resistance.

Um sensor do tipo *Light – dependent Resistance* (LDR) é usado para obter o valor da taxa de variação da irradiância a que é submetido o GFV. O LDR é uma célula fotocondutora de Sulfeto de Cádmio (CdS), em que a resistência diminui com o aumento da iluminância na célula. Este tipo de sensor é comumente usado em um arranjo resistivo em série, onde ele pode obter um valor de tensão que aumenta com o aumento da iluminação. A Figura 3.4 mostra o diagrama de bloco de um SFB e a Figura 3.5 mostra o circuito resistivo em série do LDR ligado ao bloco representativo de um controlador *fuzzy*.

Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um SFB com controle externo utilizando LDR como sensor.

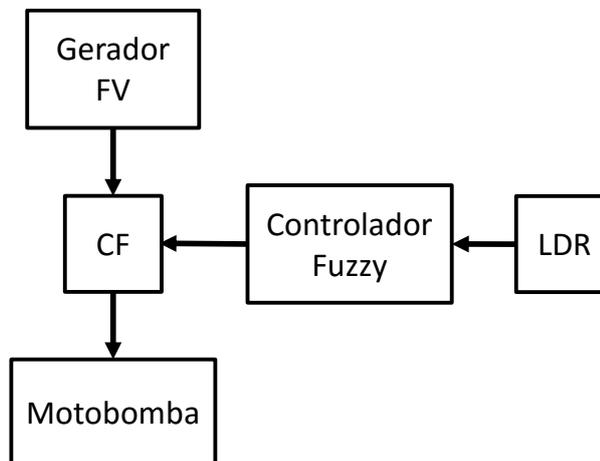
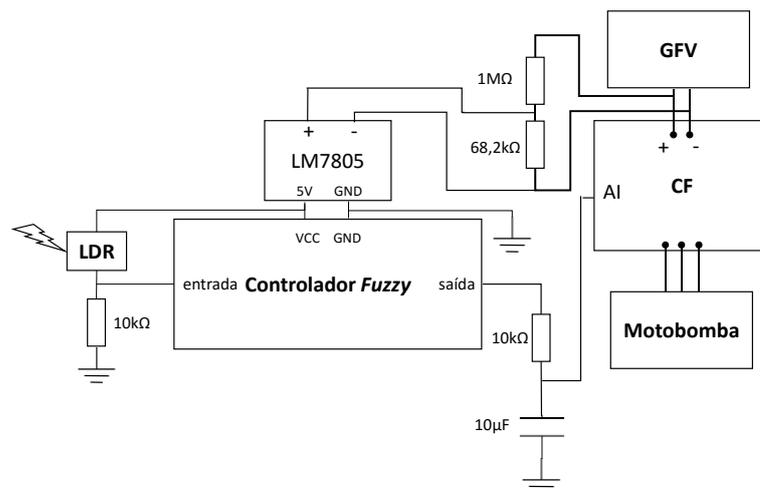


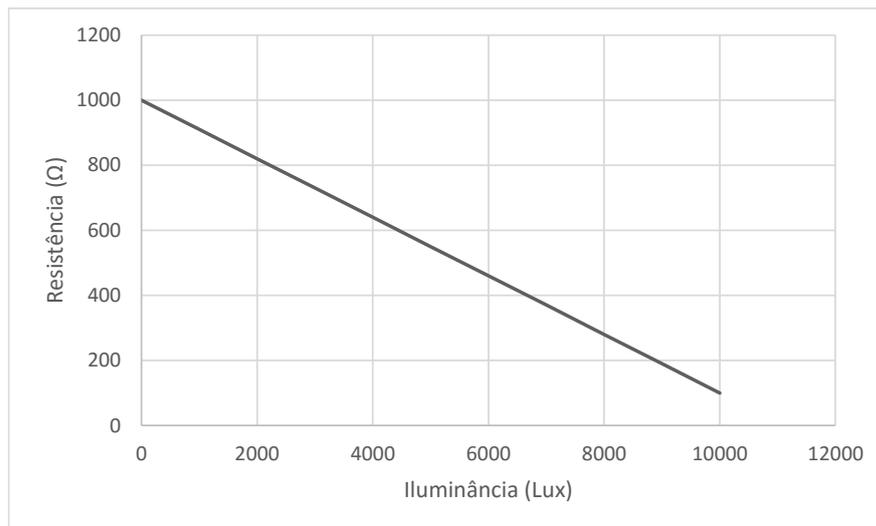
Figura 3.5 – Circuito utilizando o LDR ligado ao controlador *fuzzy*.



O LDR consiste em uma alternativa de baixo custo, que tem boa aplicabilidade para o sistema de bombeamento. Sistemas, tais como células calibradas ou piranômetros comerciais, têm maior precisão na medição, mas por sua vez um custo mais elevado. Por outro lado, mesmo com menos precisão, o LDR satisfatoriamente pode detectar variações na irradiância para fins de análises qualitativas.

A Figura 3.6 apresenta a variação do valor da resistência com a iluminância para o LDR NSL19-M51 RS. Pode-se observar que a faixa fornecida pelo fabricante é de 0 a 10.000 lux com valores de resistências variando linearmente de 1.000  $\Omega$  a 100  $\Omega$ , respectivamente. Para emprego do LDR no controlador *fuzzy* é necessário observar, no entanto, o comportamento do LDR quando submetido a níveis reais de iluminância em um dia ensolarado, uma vez que, para essas condições, a variação da resistência com a iluminância não são fornecidos pelo fabricante (valores superiores a 10.000 lux).

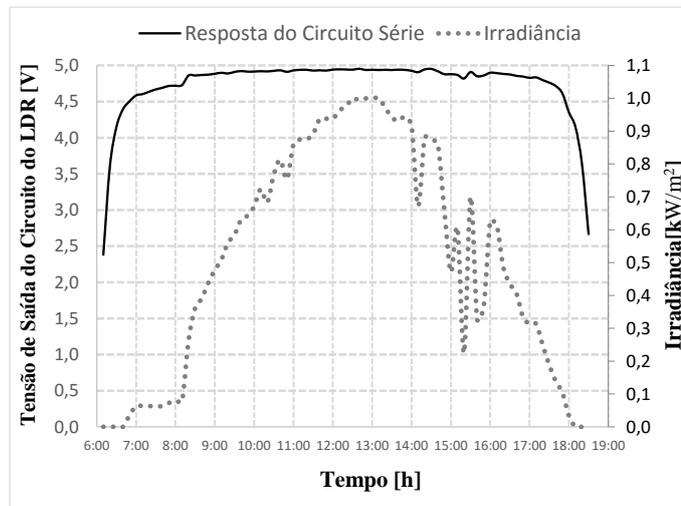
**Figura 3.6 – Faixa de operação linear do LDR.**



A Figura 3.7 mostra o comportamento da tensão medida no circuito série do LDR em dois dias diferentes. O LDR, quando submetido a alta luminosidade, opera fora da região de linearidade fornecido pelo fabricante, ou seja, não é possível adquirir com precisão a relação entre a resistência do LDR e a iluminância. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3.7 no período entre 7:00h e 17:00h. No entanto, é possível observar que, mesmo fora da região de linearidade, a resposta do LDR mostra uma significativa sensibilidade às variações de luminosidade. Isto pode ser observado mais claramente quando são usados valores normalizados, como pode ser visto na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Resposta do circuito série do LDR e irradiância durante um dia (a) de céu claro e (b) parcialmente nublado.

(a)



(b)

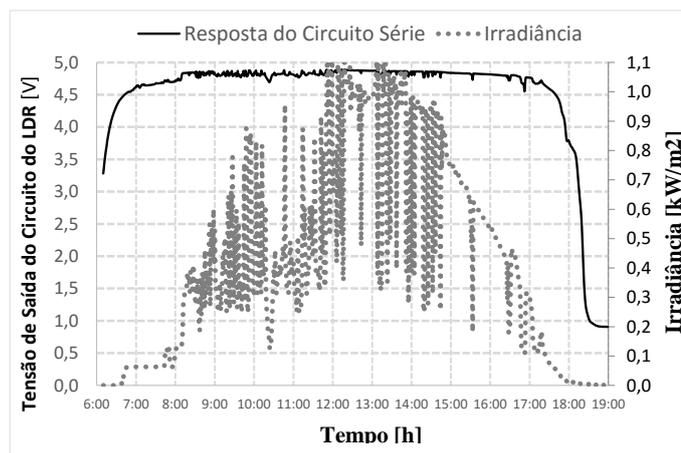
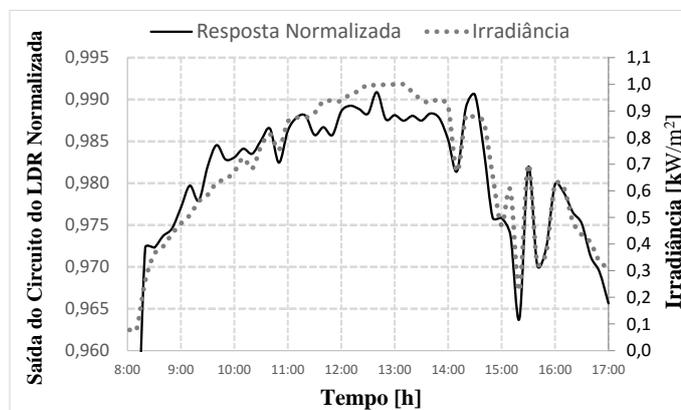
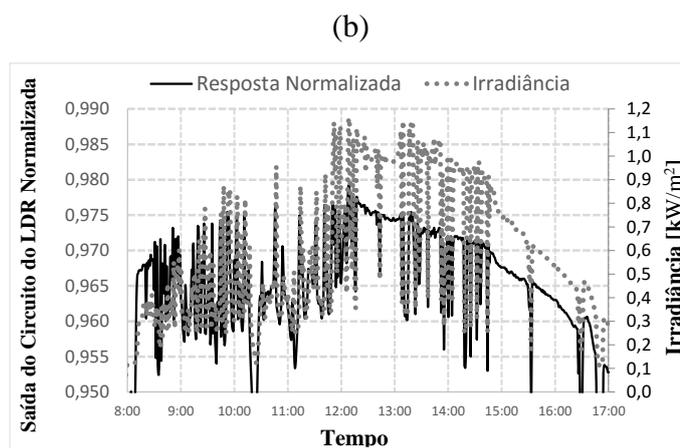


Figura 3.8 – Resposta normalizada do LDR em um dia (a) de céu claro e (b) parcialmente nublado.

(a)





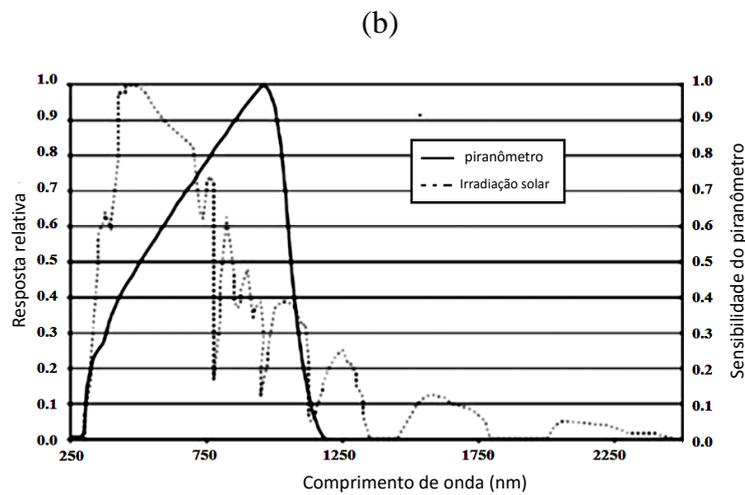
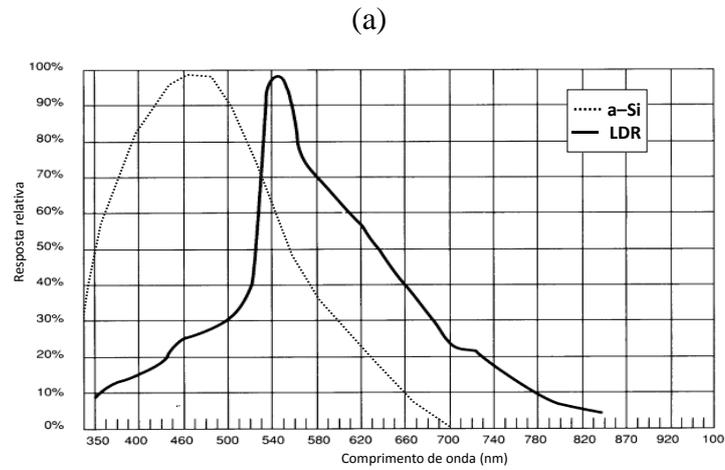
As Figuras 3.8 (a) e (b) mostram os valores normalizados de resposta do LDR para o período de 08:00 às 17:00 h em dois dias diferentes. Ressalta-se que os valores normalizados correspondem à tensão fornecida pelo circuito em série mostrado na Figura 3.5. Neste caso, o valor de base para a normalização é o máximo valor de tensão possível nesta disposição, correspondente ao nível de tensão de entrada do microcontrolador, ou seja, 5V.

Observa-se que o LDR é capaz de fornecer informação sobre o aumento ou diminuição da irradiância, o que é igual ao aumento ou diminuição da potência que pode ser fornecida pelo gerador FV ao longo do dia. Deve-se ressaltar que, os resultados apresentados na Figura 3.8 correspondem ao sinal de saída do circuito série do LDR, onde observa-se que o mesmo responde adequadamente às variações de irradiância.

O LDR não tem como objetivo principal a medição exata da irradiância, mas sim a identificação da tendência de crescimento ou de decréscimo da mesma. A metodologia de controle *fuzzy* é o que possibilita a utilização dessa tendência para o controle de velocidade da motobomba, uma vez que o controlador *fuzzy* relaciona qualitativamente as variáveis linguísticas representativas das entradas de controle.

O controle apenas poderá ser realizado se a resposta espectral do LDR possuir correspondência com o espectro da irradiação solar, que possibilite detectar as variações. A comparação entre o espectro da irradiação solar e da resposta espectral do LDR e da célula fotovoltaica de silício amorfo (material do GFV utilizado nesta etapa experimental) pode ser visto na Figura 3.9. Ressalta-se, que mesmo havendo diferença entre a resposta espectral do LDR e a resposta espectral do silício amorfo, o controle pode ser efetuado utilizando o LDR, pois o mesmo possui uma forte relação com o espectro da irradiação solar. Também pode-se observar, na Figura 3.9, que a resposta espectral do LDR se aproxima de forma significativa à resposta espectral de um piranômetro que é um instrumento de maior precisão na medida da irradiância.

**Figura 3.9 – a) Resposta espectral do LDR e do silício amorfo. (b) Espectro da irradiação solar e de um piranômetro.**



Os limites de tensão e corrente do LDR, fornecidos pelo fabricante, são apresentados na Tabela 3.8. Ressalta-se que os valores de potência dissipada, de acordo com o fabricante, possuem um decréscimo linear quando se considera o aumento da temperatura como, por exemplo, de 25 °C (50 mW) para 75 °C (0 mW).

**Tabela 3.8 – Níveis máximos absolutos.**

<b>Tensão de pico, c.a. ou c.c.</b>	<b>100 V</b>
<b>Corrente</b>	<b>5 mA</b>
<b>Dissipação de potência a 25°C</b>	<b>50 mW</b>
<b>Faixa de temperatura operacional</b>	<b>-25 °C / + 75 °C</b>

### 3.3.2 Controlador *Fuzzy*.

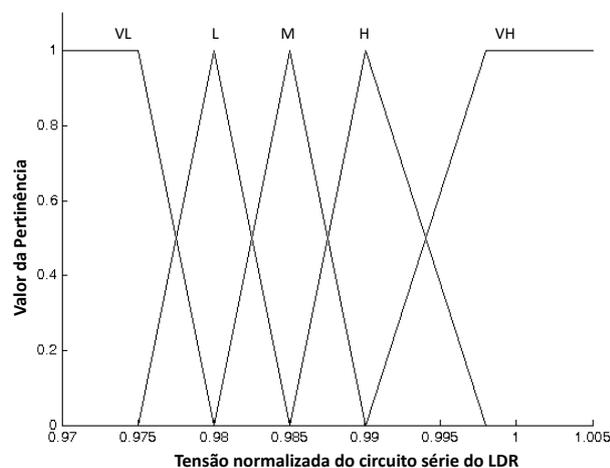
O principal objetivo deste controlador está no ajuste da frequência da motobomba, visando assegurar a disponibilidade do SFB por meio da supressão de erros de subtensão no CF. Quando ocorre uma redução significativa na geração de energia por parte do GFV, é necessário que a motobomba seja desacelerada para que o nível de tensão no barramento c.c. do CF não reduza ao ponto de ultrapassar o limite operacional inferior do CF. Neste escopo é que se utiliza o LDR como indicador de irradiância para que o controlador *fuzzy* detecte o instante de desacelerar a motobomba e o faça adequadamente.

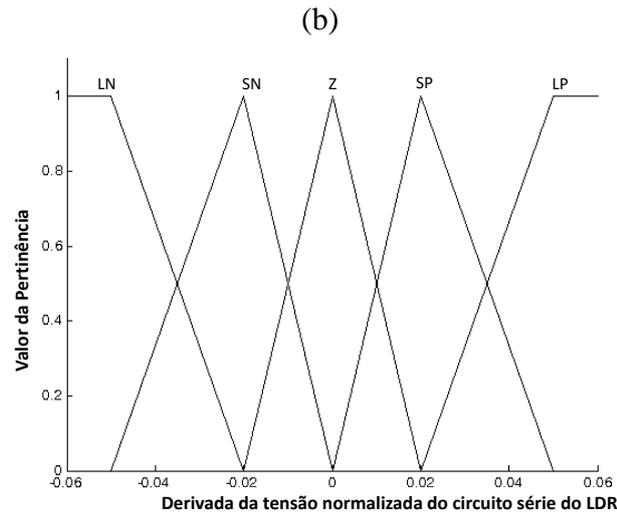
A entrada do controlador *fuzzy* corresponde ao valor normalizado da irradiância a qual o LDR está submetido ( $G$ ). A derivada deste valor normalizado ( $dG$ ) é calculada a fim de detectar a ocorrência de variação relevante na energia gerada pelo GFV.

A Figura 3.10 mostra a entrada dos conjuntos *fuzzy*. O universo de discurso ( $U$ ) dos conjuntos *fuzzy* corresponde à região onde a irradiância é capaz de operar a motobomba sem que haja erro de subtensão. Variáveis linguísticas para  $G$  (VH—*very high*, H—*high*, M—*moderate*, L—*low* e VL—*very low*) e  $dG$  (LP—*large positive*, SP—*small positive*, Z—*zero*, SN—*small negative* e LN—*large negative*) são definidas para utilização na base de regras do sistema. Como pode ser visto na Figura 3.10, as funções de pertinências são do tipo triangular e trapezoidal. Estes tipos de funções de pertinência foram escolhidos, pois apresentam vantagens na programação no que se refere à possibilidade de correção de erros de programação, bem como ao menor esforço computacional empregado.

**Figura 3.10 – Conjuntos *fuzzy* de entrada.**

(a)





Com base em resultados experimentais, bem como nas disposições apresentadas em Brito (2006), pode-se dizer que para o SFB utilizado e considerando a localidade onde os testes foram efetuados, o período de bombeamento é de 8:00 - 17:00 (em dias com céu claro). Assim, o período de acionamento do controlador *fuzzy* (os conjuntos *fuzzy*) é definido para este intervalo de tempo do dia. O valor de 0,98, por exemplo, corresponde ao valor normalizado do LDR por volta de 8:30, o que representa pouca ou nenhuma quantidade de água sendo bombeada, ou seja, pouca atuação do controlador *fuzzy*.

A base de regras do FLS é mostrada na Tabela 3.9. Pode ser observado que todas as variáveis linguísticas, que descrevem o consequente das regras *fuzzy*, correspondem aos valores da tensão na saída do controlador. Estes valores são responsáveis por ajustar a frequência da motobomba, isto é, o valor da tensão apresentada na base de regras igual a 5 V (máximo valor do sinal de saída do microcontrolador) representa a frequência máxima de rotação da motobomba (60 Hz). Como a faixa de tensão da entrada analógica (AI) do CF vai de 0 a 10 V, o ganho da mesma deve ser definido igual a 2 para ajustar o valor de 5V ao limite superior da AI. Os valores iguais a 0V são necessários para assegurar a parada da motobomba. A relação entre as variáveis linguísticas de entrada de G e dG na base de regras *fuzzy* foi obtido por modelagem do conhecimento de um especialista em SFB.

**Tabela 3.9 – Base de regras do controlador *fuzzy* usando o LDR.**

	VH	H	M	L	VL
LP	5,0V	5,0V	2,0V	0,5V	0V
SP	5,0V	4,5V	1,5V	0V	0V
Z	5,0V	4,0V	1,0V	0V	0V
SN	2,5V	1,5V	0,5V	0V	0V
LN	0V	0V	0V	0V	0V

As funções de pertinência usadas na saída dos conjuntos *fuzzy* são *singletons*, com valores de centro correspondentes aos valores de tensão apresentados na base de regras. A implicação Mamdani é usada com norma-t produto e defuzzificação com Centro da Média.

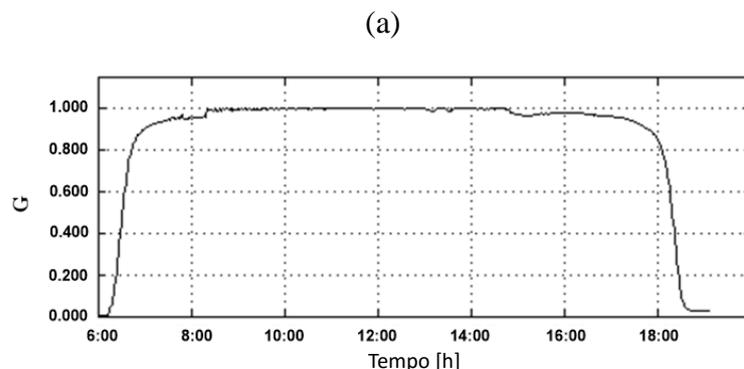
### 3. 3.3 Resultados Obtidos.

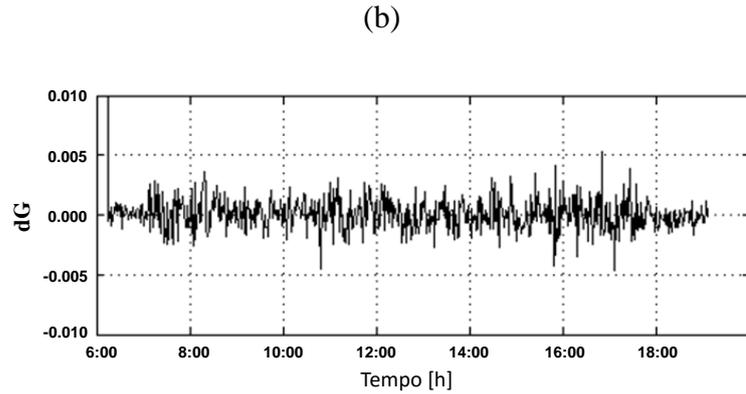
Os ensaios experimentais foram realizados na bancada de ensaios de motobombas do Laboratório de Energias Renováveis/UNIFAP, tal como o proposto por Brito (2006). Estes testes foram realizados para avaliar o desempenho do controlador *fuzzy* com relação ao controle de tensão do barramento c.c. do CF. Durante estes testes foram realizados o monitoramento da tensão do barramento c.c do CF e a resposta normalizada do circuito série do LDR durante todo o dia.

A Figura 3.11 apresenta os sinais de entrada do controlador *fuzzy*, obtidos com uma taxa amostragem de aproximadamente 1 s. Pode-se observar a ocorrência de variações na resposta do circuito série do LDR que podem causar erros de subtensão no CF. A intensidade dessas variações podem ser observadas na Figura 3.12. Também é possível notar que as variações meteorológicas ocorreram de forma lenta uma vez que nenhum comportamento característico de variações abruptas foi observado em dG.

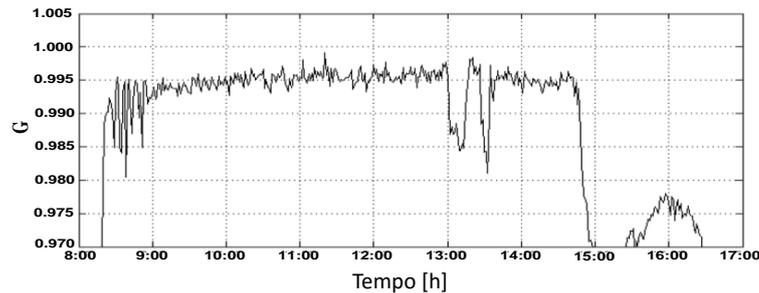
A Figura 3.12 mostra o universo de discurso correspondente à entrada G, isto é, a região a qual o existe a atuação efetiva do controlador *fuzzy*. É possível observar as variações bruscas de irradiância no intervalo de tempo de geração.

**Figura 3.11 – Sinal de entrada do controlador *fuzzy*. (a) Resposta do circuito série do LDR e (b) Variação da resposta de circuito série do LDR.**





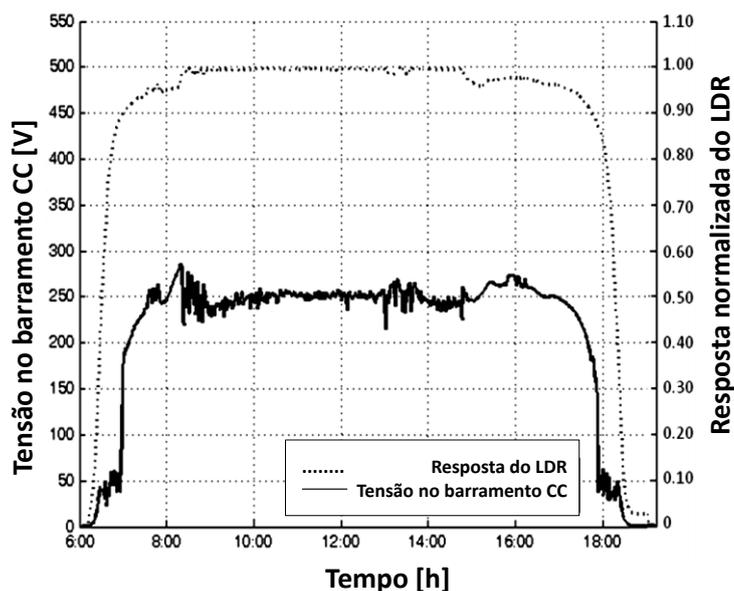
**Figura 3.12 – Comportamento detalhado do parâmetro G.**



A Figura 3.13 apresenta o desempenho do controlador *fuzzy* considerando o comportamento da tensão do barramento c.c. com as mudanças na irradiância durante o dia. Neste caso, como o objetivo era o de visualizar o desempenho global do sistema, os valores foram obtidos com uma taxa amostragem de 1 min. Pode ser observado que, por vezes, quando há uma variação acentuada na radiação, por exemplo às 8:00 h e às 17:00 h, o controlador *fuzzy* opera a desaceleração da motobomba. Isto ocorre para assegurar que o nível de tensão do barramento c.c. não sofra um afundamento súbito, o que resulta em erros de subtensão indesejados no CF. Assim, o controlador *fuzzy* pode garantir a disponibilidade do SFB, mantendo a tensão de funcionamento do barramento c.c. numa região de operação segura, com um valor médio de cerca de 250 V durante as horas do dia em que o GFV fornece potência suficiente para operar a motobomba.

Pode-se observar, também, que o controlador *fuzzy* é capaz de suprimir erros de subtensão, ou seja, manteve-se operacional, mesmo com a incidência de variações de irradiância, a exemplo da variação ocorrida às 15:00h (Figura 3.12). Neste instante, o valor normalizado da irradiância medida pelo LDR reduz para níveis abaixo da região de atuação do controlador *fuzzy*, isto é, o controlador *fuzzy* deixa de atuar no SFB deixando o barramento c.c. do CF livre de carga, a tensão do GFV, então, “flutua” em seu valor de circuito aberto como se pode observar na Figura 3.13.

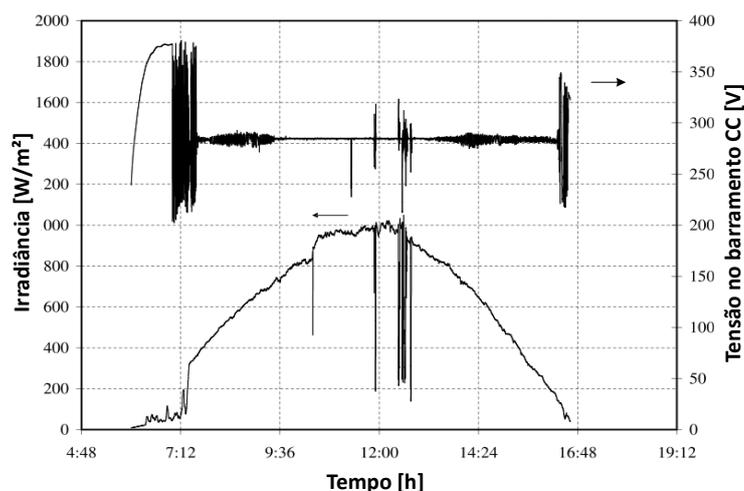
Figura 3.13 – Desempenho controlador *fuzzy* em relação ao comportamento da tensão do barramento c.c.



A utilização de CF's em SFB's podem apresentar ocorrências de comutações sucessivas em seu circuito de alimentação nas horas de menor irradiância, tal como apresentado por Brito (2006) e exemplificado na Figura 3.14. Neste caso específico, foi utilizado um controlador PID e testados diversos arranjos GFV + CF + motobomba nos quais esse comportamento foi recorrente. Isto acontece uma vez que o controlador PID tende a acelerar a motobomba em instantes que o GFV não possui potência suficiente para tal (no início e no final do dia). O afundamento de tensão no barramento c.c. devido à ação do controlador PID, atinge os limites de erro de subtensão desligando a motobomba do barramento. Posteriormente o CF religa a motobomba de forma automática e o comportamento se repete. Estes problemas podem ser solucionados selecionando-se outros equipamentos com margem de segurança diferente, alterando a sintonia dos ganhos do controlador PID (neste caso, porém, pode ser alterado também o rendimento do sistema) ou mudando-se a estratégia de controle utilizada.

O controlador *fuzzy* não apresentou esse problema, tal como se observa na Figura 3.13. Ressalta-se que, a eliminação das comutações sucessivas no CF é uma importante característica do controlador *fuzzy* quando comparado com as características do controlador PID, uma vez que estas oscilações podem causar danos irreversíveis ao CF. As comutações na tensão do barramento c.c do CF representam variações severas na tensão de alimentação dos IGBT's responsáveis pela geração amplificada do sinal PWM do CF. Esse IGBT's possuem certa tolerância a esse tipo de comportamento, porém podem não suportar caso ele perdure.

Figura 3.14 – Exemplo de Tensão no barramento c.c. do CF com a atuação do controlador PID (Brito, 2006).



É importante ressaltar que há a possibilidade de implementar o sistema de controle proposto neste trabalho em CF's que não têm controlador PID embarcado. Existem alguns CF's comercialmente disponíveis no mercado, que não tem o controlador PID incorporado na sua estrutura física.

### 3. 4 Controlador *Fuzzy* para CF's Aplicados em SFB's Utilizando um Módulo FV de Baixa Potência como Sensor.

#### 3. 4.1 Módulo Sensor.

Para melhorar a qualidade da informação da irradiância utilizada pelo controlador *fuzzy*, faz-se necessário aumentar a sensibilidade do sensor utilizado. Pôde-se observar com o LDR que, ainda que ele tenha apresentado sensibilidade quanto à variação da irradiância fora da região de linearidade apresentada pelo fabricante, ainda é necessário aumentar essa sensibilidade caso se queira melhorar o desempenho do controlador *fuzzy*.

Deve-se, portanto, aumentar a faixa de tensão operacional útil do sensor para que, considerando processo de digitalização de sinais que o controlador utiliza e obedecendo aos limites operacionais do microcontrolador, uma faixa maior de tensão sensível à irradiância seja utilizado.

Por esse motivo optou-se por utilizar um módulo FV de baixa potência como sensor de irradiância. A Tabela 3.10 apresenta os dados de placa do módulo utilizado. Esta metodologia de sensoriamento consiste na utilização de um resistor de 20 W de potência e 10  $\Omega$  de resistência, ligado diretamente aos terminais do módulo sensor. O valor da resistência, por não ser demasiadamente pequeno como os valores utilizados em células calibradas, possibilita níveis

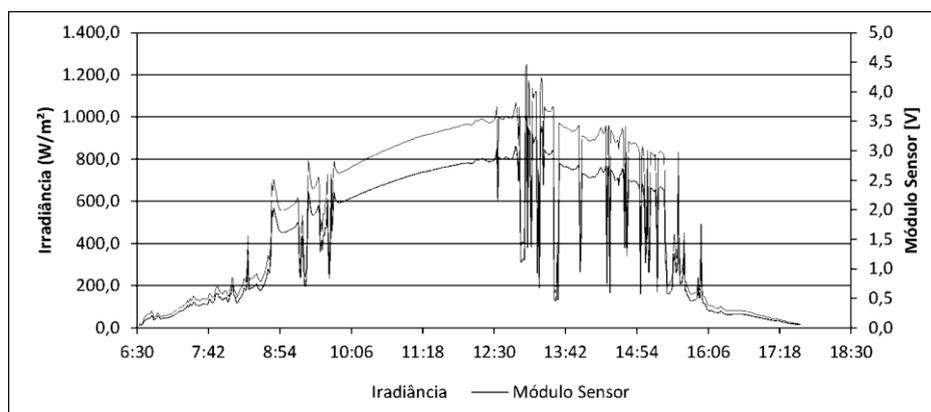
de tensão mais elevados sendo mais adequado para utilização direta por microcontroladores. Este tipo de sensor apresenta nível de tensão representativo da irradiância, semelhante uma célula calibrada, porém não necessita de circuito amplificador de sinal para sua utilização.

**Tabela 3.10 – Dados de Placa do Módulo Sensor de Silício Monocristalino**

Potência Máxima	5 Wp
$I_{sc}$	0,36 A
$V_{oc}$	21,3
$I_{mp}$	0,3 A
$V_{mp}$	17 V

Ressalta-se que os valores de tensão obtidos com o módulo sensor são representativos da irradiância, porém não apresentam precisão nos valores. A Figura 3.15 apresenta os níveis de tensão e seus equivalentes em irradiância obtidos para o módulo sensor, baseando-se no valor da corrente de curto-circuito da Tabela 3.10. Nela consta também, os valores de irradiância obtidos por uma célula calibrada na mesma orientação do módulo sensor. Pode-se observar que existe uma discrepância entre os dois valores, principalmente nos instantes de maior irradiância. Esta discrepância, porém, não inviabiliza a utilização do módulo sensor em sistemas *fuzzy* uma vez que este tipo de sistema necessita apenas da informação relativa das variações na irradiância detectadas pelo módulo sensor.

**Figura 3.15 – Tensão e irradiância obtidos com o módulo sensor e irradiância obtida com a célula calibrada.**



Neste escopo, pode-se afirmar que qualitativamente o módulo sensor possui a informação necessária para utilização em um controlador *fuzzy*, uma vez que o mesmo é sensível às

variações de irradiância e, mesmo com imprecisão do valor absoluto da mesma, possui a informação representativa da variação da irradiância. Tendo em vista que o circuito condicionador de sinais consiste simplesmente em um resistor adequadamente escolhido, esta metodologia de sensoriamento apresenta maior aplicabilidade em testes de campo quando comparado à utilização de células calibradas, devido a simplicidade do circuito utilizado.

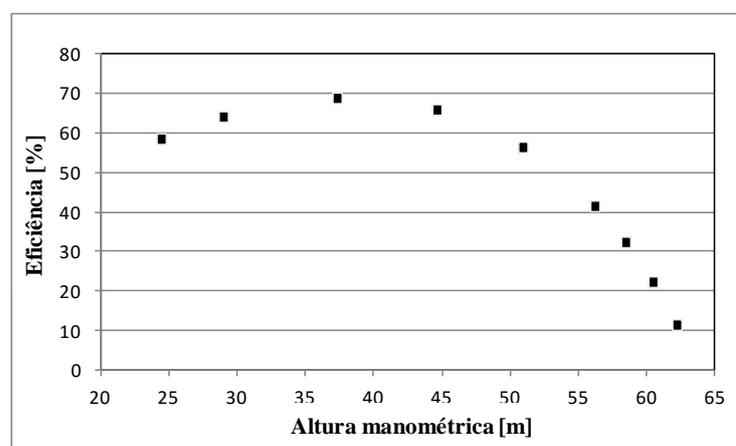
### 3. 4.2 Testes Preliminares com um Controlador PID.

Em Brito e Zilles (2006) é aplicada uma metodologia de controle baseada em um controlador PID para controlar o nível de tensão do barramento c.c. do CF. A tensão do barramento c.c. é realimentada no controlador que ajusta o valor da frequência de giro da motobomba para que seja alcançado o valor de referência. É utilizada metodologia com *set-point* fixo e sintonia de ganhos pelo método de Ziegler-Nichols conforme apresentado em Brito e Zilles (2006).

Testes experimentais foram realizados na bancada de ensaios de motobombas do GE-DAE/UFPA para determinação do desempenho do sistema fotovoltaico de bombeamento com a utilização de um controlador PID. O teste consistiu na operação ininterrupta do sistema em um ciclo diário sob as condições reais as quais o GFV, bem como de todo o sistema, é submetido.

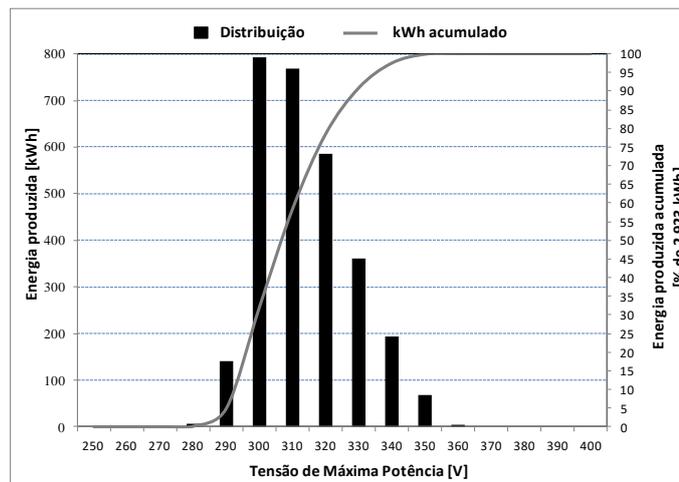
Durante os testes a bancada foi ajustada para operação em altura manométrica referente à 35 m de coluna d'água, que representa, de forma razoável, a média da profundidade de poços na região amazônica, onde estão localizadas as bancadas de teste. Além do mais, esse valor de altura manométrica está próximo da altura na qual a bomba apresenta o melhor desempenho, tal como pode ser observado na Figura 3.16.

**Figura 3.16 – Eficiência em função da altura manométrica da motobomba de teste.**



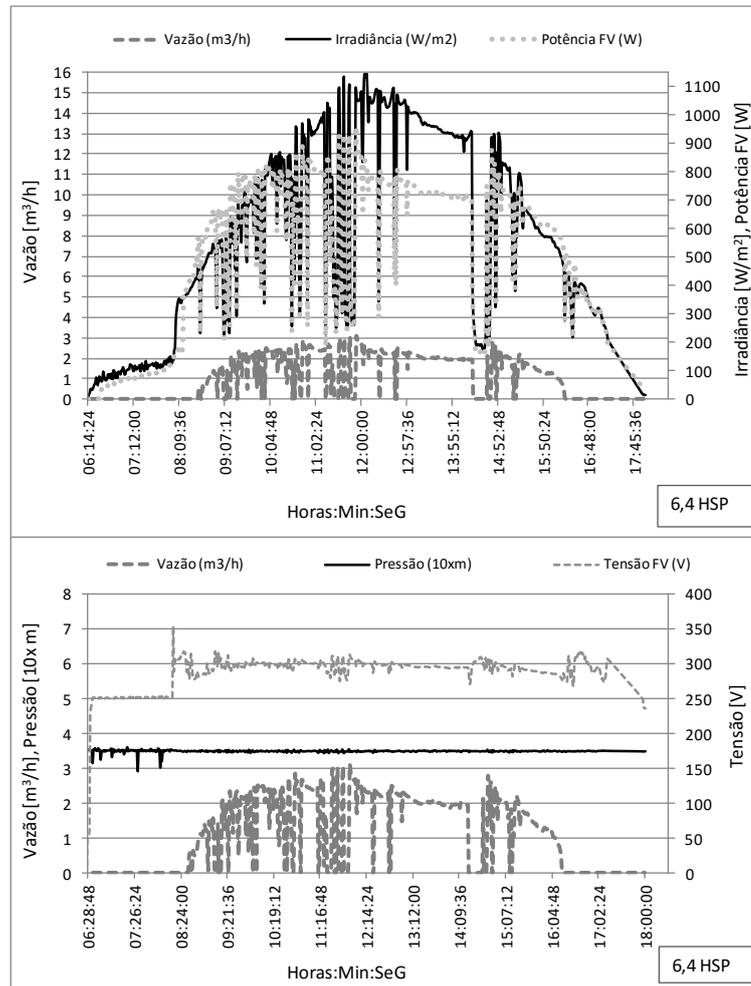
O valor de *set-point* foi obtido com base no gráfico de distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico em função da tensão de máxima potência, tal como proposto por Brito (2006). A Figura 3.17 apresenta o referido gráfico considerando o ano típico de Belém/PA e considerando o GFV utilizado. O valor de referência da tensão no barramento c.c. selecionado foi o de 300V, pois este será o valor que proporcionará o melhor casamento de impedância entre a carga e a fonte geradora de energia elétrica para essa localidade em particular.

**Figura 3.17 – Distribuição da energia produzida pelo GFV para a cidade de Belém/PA.**



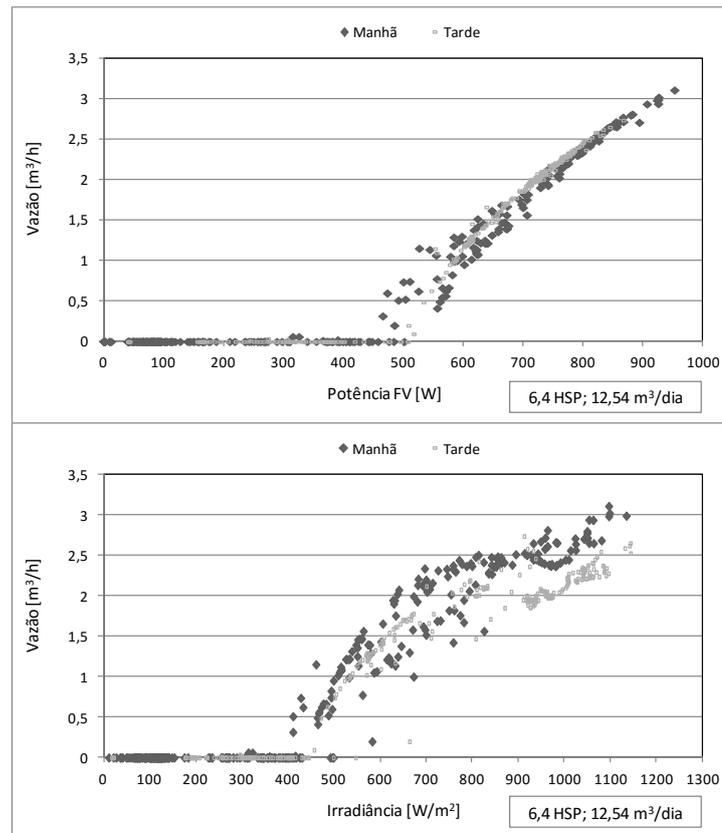
A Figura 3.18 apresenta a irradiância incidente no plano do GFV, bem como o comportamento da geração de eletricidade e da vazão obtida ao longo de um dia de operação do experimento. É possível observar também o comportamento da tensão do barramento c.c. do CF, juntamente com o controle da pressão na tubulação realizado pela bancada. Neste teste, obteve-se 6,4 horas de sol pleno (HSP) para uma produção de eletricidade diária de aproximadamente 5,7 kWh, implicando numa eficiência média do GFV da ordem de 7,1%. Pôde-se observar a capacidade do controlador PID em manter constante o nível de tensão do barramento c.c. do CF e próximo ao valor de *set-point* (300V), mesmo com ocorrência de variações meteorológicas bruscas. Nota-se que a vazão atingiu um valor máximo de aproximadamente 3,1 m<sup>3</sup>/h e que a pressão na tubulação foi mantida próxima ao equivalente a 35 m de coluna d'água, mostrando a eficácia da bancada montada especificamente para testes desse tipo de aplicação.

**Figura 3.18 – Dinâmica ao longo de um dia de teste: Irradiância incidente no plano do GFV, produção de eletricidade do GFV, vazão, tensão do barramento c.c. do CF com a atuação do controle PID e pressão na tubulação equivalente a 35 m de altura manométrica.**

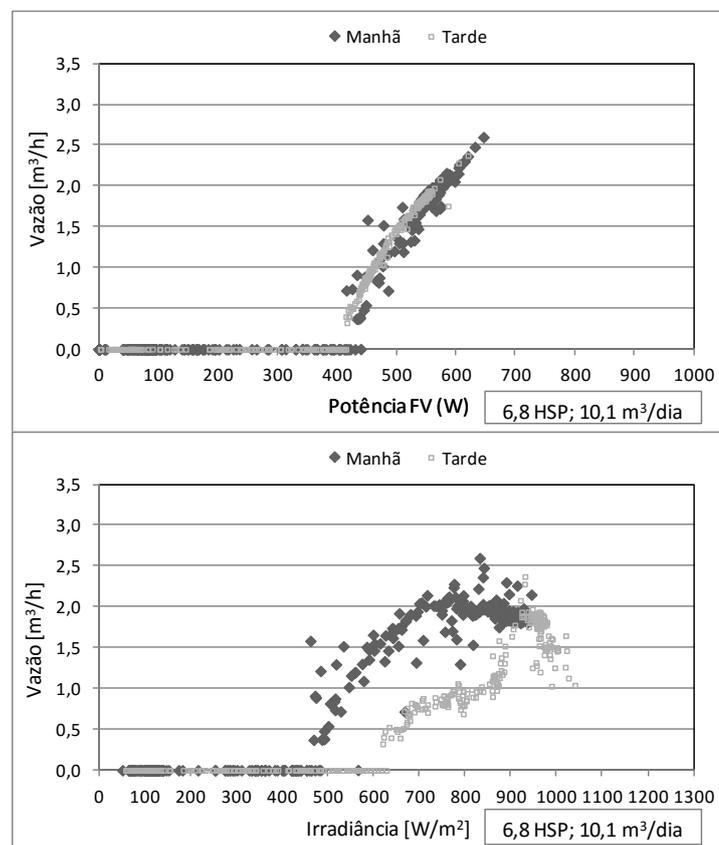


O valor de irradiância crítica está em torno de 470 W/m<sup>2</sup>. Esse valor corresponde ao valor de irradiância capaz de gerar a potência de aproximadamente 500 W (Figura 3.19), que neste caso em particular, corresponde à potência mínima para o início do bombeamento. Nota-se também uma tendência de redução da vazão para um mesmo valor de irradiância no período da tarde. Isso se deve, basicamente, ao efeito da temperatura de operação do GFV e a dinâmica de controle da tensão do barramento c.c.. A Figura 3.20, obtida para outro dia com volume diário bombeado de 10,1 m<sup>3</sup>, torna essa constatação mais evidente.

**Figura 3.19 – Curva de capacidade instantânea da motobomba em função da potência produzida pelo GFV e da irradiância.**



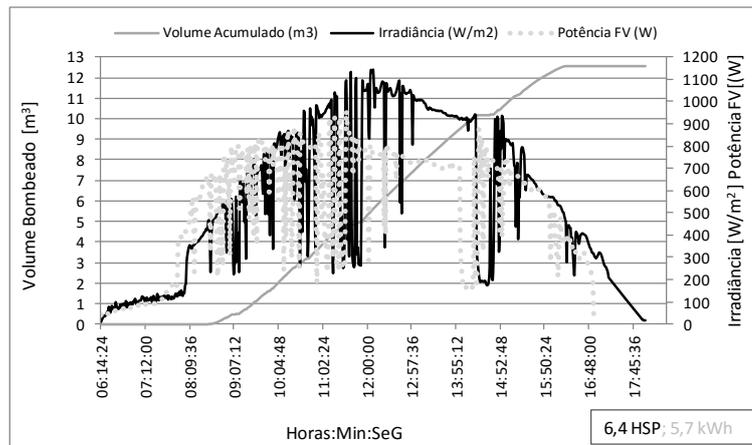
**Figura 3.20 – Dinâmica de redução da vazão no período da tarde.**



É importante enfatizar que as diferenças entre os volumes bombeados têm uma relação muito forte com o perfil diário da irradiância local e com a dinâmica do controlador utilizado para o controle da tensão no barramento c.c.. Isso significa que dias com o mesmo valor global integrado de energia incidente no plano do GFV, não necessariamente terão o mesmo desempenho.

Considerando novamente o teste da Figura 3.19, constata-se que a máxima potência extraída do GFV é de aproximadamente 950 W. Este ponto de operação corresponde a uma vazão de aproximadamente 3,10 m<sup>3</sup>/h, conforme pode se observar na curva de capacidade instantânea da motobomba. A Figura 3.21 apresenta a evolução do volume total de água acumulada durante este dia de teste, bem como a irradiância e a potência produzida pelo GFV. O sistema foi capaz de bombear 12,54 m<sup>3</sup>/dia, o que está de acordo com os valores encontrados na literatura para a quantidade de horas de sol pleno referente ao teste e considerando equipamentos de semelhante tecnologia (Brito, 2006; Brito e Zilles, 2006; Alonso-abella, 2003).

**Figura 3.21 – Evolução do volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo GFV para o dia de teste referente à Figura 3.18.**

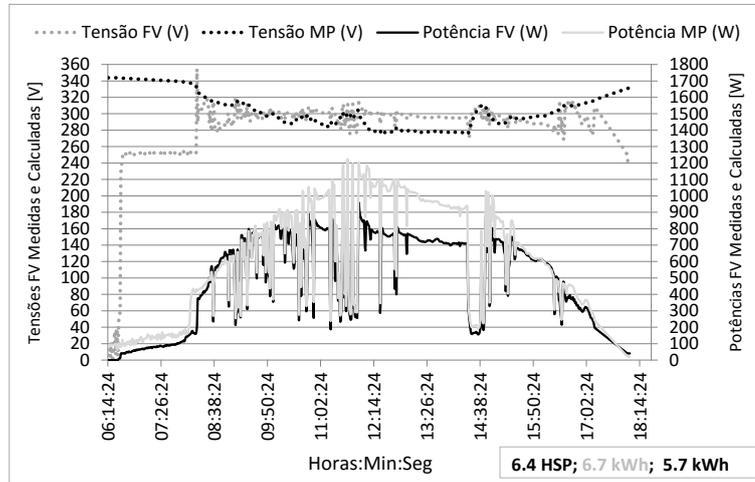


Percebe-se que o período de bombeamento se restringe ao intervalo que vai de 8:10 h às 16:10 h, em função dos valores críticos de irradiância, sendo que a maior parte do volume bombeado ocorre no intervalo de 10:00 às 15:00 h (9,00 m<sup>3</sup> de um total 12,54 m<sup>3</sup>, ou seja, aproximadamente 72% do total bombeado). O valor da irradiância crítica pode ser reduzido com a introdução de estratégias mais apropriadas de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (SPMP) do GFV, que pode aumentar significativamente o volume de água bombeado nos sistemas que utilizam CF's.

A Figura 3.22 apresenta as potências de operação medida e a calculada para a máxima transferência de potência. Adicionalmente, a tensão medida no barramento c.c., estando este

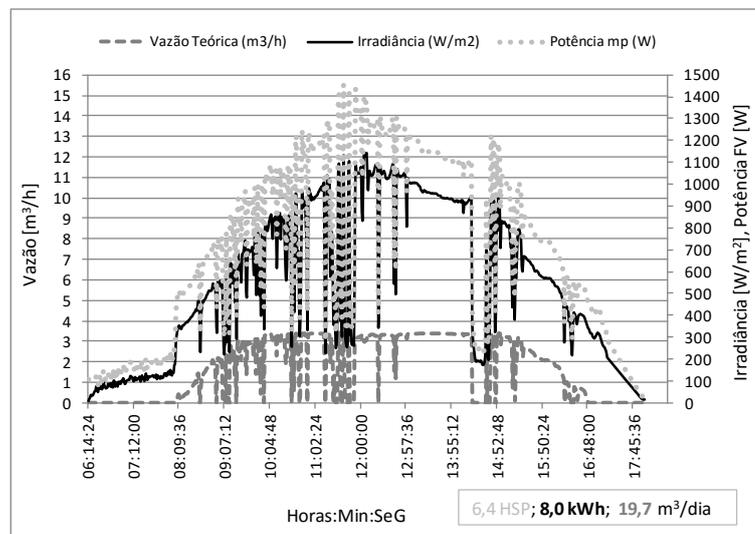
sob influência do controlador PID, e a tensão teórica calculada para a máxima potência ( $V_{mp}$ ), permitem identificar melhor os momentos onde os descasamentos são mais intensos.

**Figura 3.22 – Valores medidos e calculados para a máxima transferência de potência.**



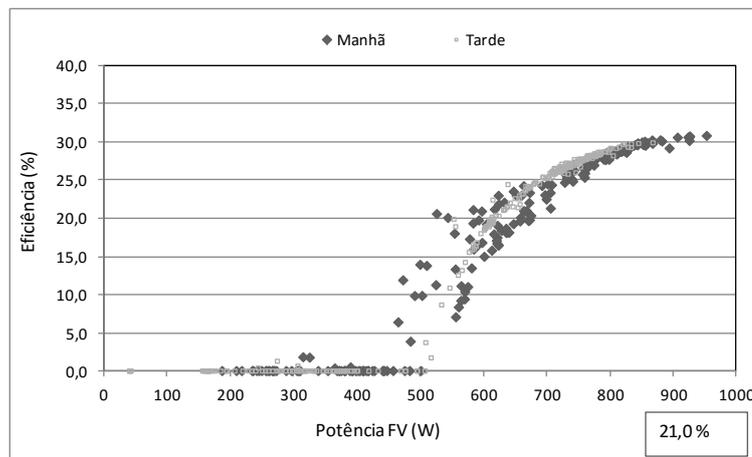
Com base nos resultados experimentais das Figuras 3.19 e 3.21, estima-se que a ausência SPMP causam perdas de volume bombeado de aproximadamente 13% do volume de água originalmente bombeado diariamente pelo sistema. A Figura 3.23 ilustra como ficaria o perfil da vazão ao longo do dia, para o teste referentes a Figura 3.22. Para isso, foi estabelecida uma eficiência de SPMP da ordem de 98%. O resultado obtido indica um aumento de  $1,87 \text{ m}^3$  diários no volume total de  $12,54 \text{ m}^3$  obtido experimentalmente.

**Figura 3.23 – Perfil da geração e da vazão, supondo a estratégia de seguimento embarcada junto ao CF utilizado no sistema de bombeamento.**



A Figura 3.24 apresenta a eficiência do sistema de bombeamento com a atuação do controlador PID. O rendimento geral, correspondente à relação entre a energia hidráulica diária e a energia extraída do GFV no dia, ficou em 21,0 %, aproximadamente, para um dia de 6,4 HSP. É possível observar na Figura 3.24 que o rendimento máximo do sistema é de aproximadamente 30% para os instantes de maior potencial de geração.

**Figura 3.24 – Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador PID: Períodos da manhã e tarde.**



### 3. 4.3 Metodologia de Controle *Fuzzy*.

Um controlador *fuzzy* é proposto para o controle da frequência da motobomba de teste de modo a buscar uma alternativa ao controle PID embarcado nos CF's comerciais usados para compor o SFB, além de tornar possível o aumento da eficiência do sistema. A metodologia de controle baseada em lógica *fuzzy* utiliza valores aproximados da irradiância para o ajuste da frequência da motobomba por meio da atuação na Entrada Analógica do CF. A informação do valor aproximado da irradiância é obtida por método de sensoriamento baseado em um módulo sensor instalado no mesmo plano do GFV, tal como indica a Figura 3.25.

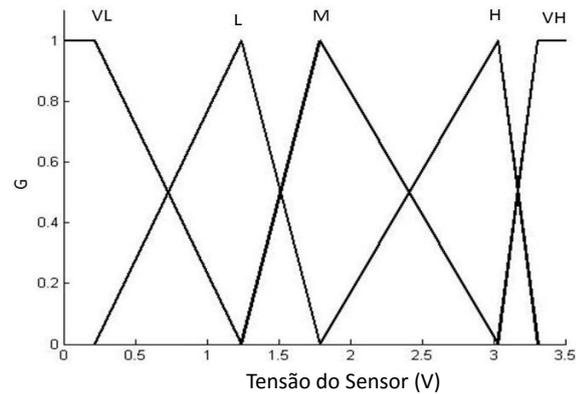
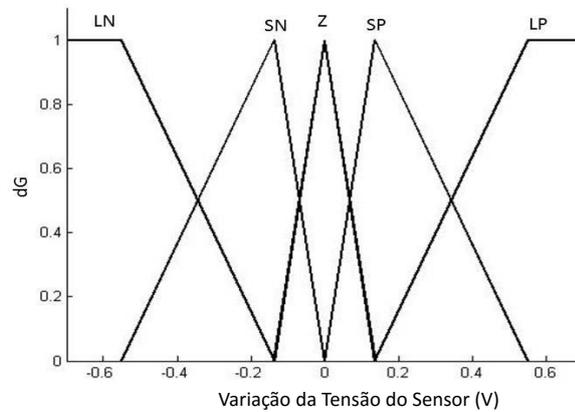
Figura 3.25 – Célula calibrada e módulo sensor, ambos instalados no mesmo plano do gerador FV.



Ressalta-se que alguns modelos comerciais de CF possuem controladores PID embarcados, porém observa-se a ausência, em CF's comerciais, de metodologias de controle baseadas em inteligência computacional, tal como sistemas especialistas. Tendo em vista que os CF's, de modo geral, apresentam a oportunidade de regulação da frequência de operação da motobomba por meio da utilização de entradas auxiliares, se propõe uma metodologia de controle, baseado em inteligência computacional, para atuação em CF por meio da entrada analógica, de forma a se buscar desempenho semelhante à obtida com o controlador PID, porém que seja passível de ser implementado em CF's que não possuam o controlador PID (CF's de menor potência).

O CF CFW-11 da WEG possui AI para o controle da frequência de operação da motobomba. A AI regula o valor da frequência por meio de uma tensão de entrada que varia de 0 a 10 V que corresponde ao valor mínimo e máximo para a frequência de operação da motobomba (0 e 60Hz, respectivamente). O sinal de saída do controlador *fuzzy* é responsável pela regulação da velocidade da motobomba variando os valores dentro dos intervalos estabelecidos pela AI do CF.

As Figuras 3.26 e 3.27 apresentam os conjuntos *fuzzy* de entrada, o valor aproximado da irradiância (G) e a variação deste valor no tempo (dG), respectivamente. Variáveis linguísticas para G (VH – *Very High*, H – *High*, M – *Moderate*, L – *Low* e VL – *Very Low*) e para dG (LP – *Large Positive*, SP – *Small Positive*, Z – *Zero*, SN – *Small Negative* e LN – *Large Negative*) são definidas para utilização na base de regras do sistema.

Figura 3.26 – Conjuntos *fuzzy* de entrada G.Figura 3.27 – Conjuntos *fuzzy* de entrada dG.

A base de regras utilizada pelo controlador *fuzzy* é apresentada na Tabela 3.11. Os valores foram adequados aos níveis de tensão obtidos com o módulo sensor, ou seja, são diferentes aos valores obtidos com o LDR. Os conjuntos *fuzzy* de saída são do tipo *singleton*. A implicação de Mamdani é utilizada com norma-t produto e a defuzzificação corresponde à média dos centros.

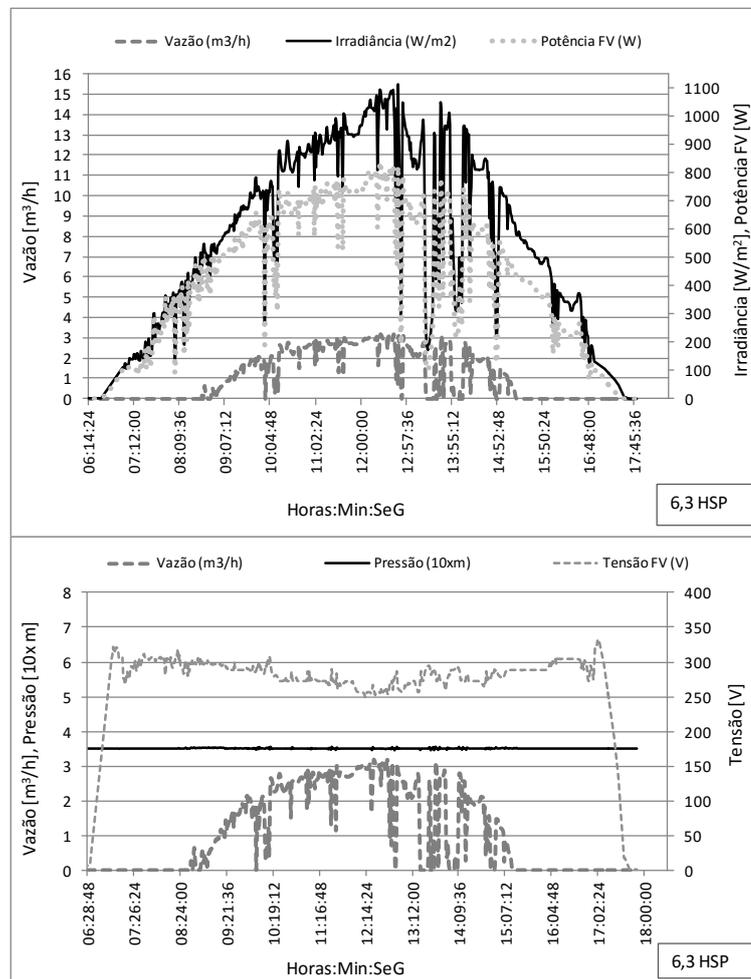
Tabela 3.11 – Base de Regras.

	VH	H	M	L	VL
<b>LP</b>	5,0 V	5,0 V	4,4 V	4,2 V	2,5 V
<b>SP</b>	5,0 V	4,9 V	4,3 V	4,1 V	2,0 V
<b>Z</b>	5,0 V	4,9 V	4,3 V	4,0 V	1,5 V
<b>SN</b>	4,8 V	4,7 V	4,0 V	3,5 V	0,0 V
<b>LN</b>	4,5 V	4,0 V	3,5 V	3,0 V	0,0 V

### 3. 4.4 Resultados Obtidos.

Testes experimentais foram realizados na bancada de ensaios de motobomba do GE-DAE/UFGA (semelhantes aos realizados com o controlador PID) para determinação do desempenho do SFB com a utilização de um controlador *fuzzy*. O teste também consistiu na operação ininterrupta do sistema em um ciclo diário em condições reais de operação do GFV. Foi ajustada a bancada para operação em altura manométrica referente a 35 m de coluna d'água.

**Figura 3.28 – Dinâmica ao longo de um dia de teste: Irradiância incidente no plano do GFV, produção de eletricidade do GFV, vazão, tensão do barramento c.c. do CF com a atuação do controle tipo *fuzzy* e pressão na tubulação equivalente a 35 m de altura manométrica.**

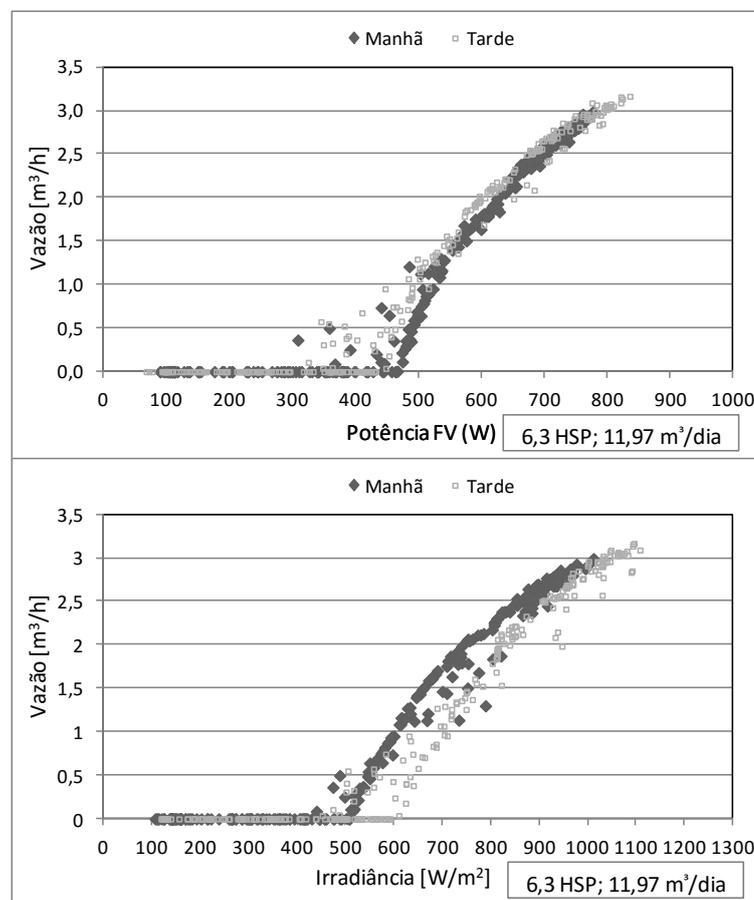


Primeiramente, observou-se que o controlador *fuzzy* foi capaz de suprimir erros de subtensão. A Figura 3.28 apresenta o nível de tensão obtido com a operação do controlador *fuzzy* proposto, bem como a vazão obtida e a irradiância incidente no GFV. Pode-se observar que, mesmo o sistema operando com valor de *set-point* variável, não se observou erros de subtensão

na operação do sistema. No experimento, obteve-se 6,3 HSP, o que é próximo ao valor de 6,4 HSP obtido no experimento com o controlador PID.

É possível observar na Figura 3.28 que a irradiância crítica na manhã é de aproximadamente 500 W/m<sup>2</sup> e de tarde de 600 W/m<sup>2</sup>. Estes valores ficam mais evidentes com a Figura 3.29 e estão próximos daqueles obtidos para o teste de referência com o controlador PID. Observa-se também, um valor de vazão máxima de aproximadamente 3,2 m<sup>3</sup>/h, ligeiramente superior àquela obtida com o controlador PID.

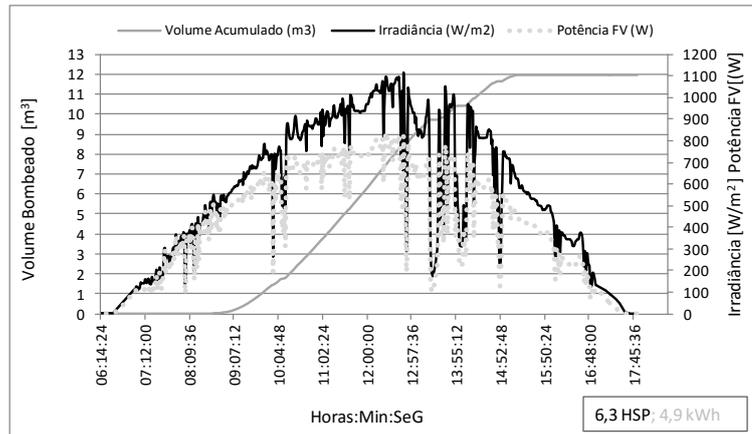
**Figura 3.29 – Curva de capacidade instantânea da motobomba em função da potência produzida pelo GFV e da irradiância.**



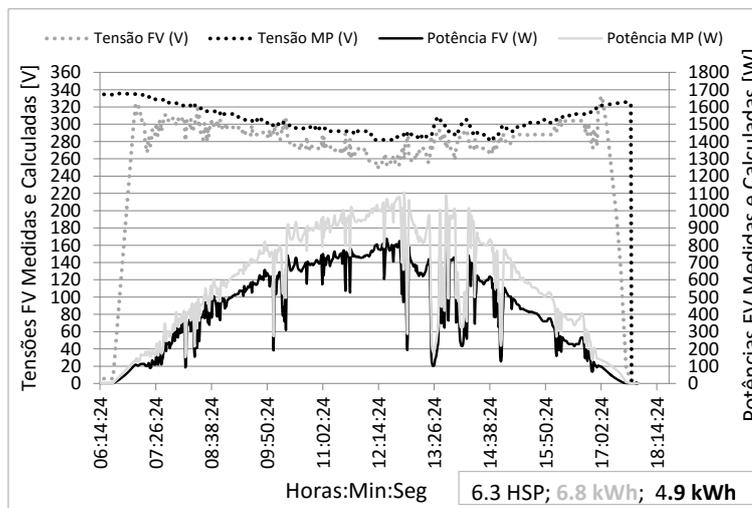
A Figura 3.30 apresenta a evolução do volume de água bombeada no dia do experimento que foi de aproximadamente 11,97 m<sup>3</sup> de água. Este valor foi um pouco inferior ao obtido com o controlador PID que foi de 12,54 m<sup>3</sup> de água para dias com valores semelhantes de HSP. Desta forma, pode-se afirmar que, mesmo o controlador *fuzzy* possuindo valor diário de água

bombeada de aproximadamente  $0,54 \text{ m}^3$  inferior ao bombeado pelo controlador PID, o resultado foi satisfatório tendo em vista os diferentes perfis de variação de irradiância obtido nos dias de teste.

**Figura 3.30 – Evolução do volume acumulado, irradiância e potência produzida pelo GFV considerando a atuação do controlador *fuzzy*.**



**Figura 3.31 – Valores medidos e calculados para a máxima transferência de potência.**

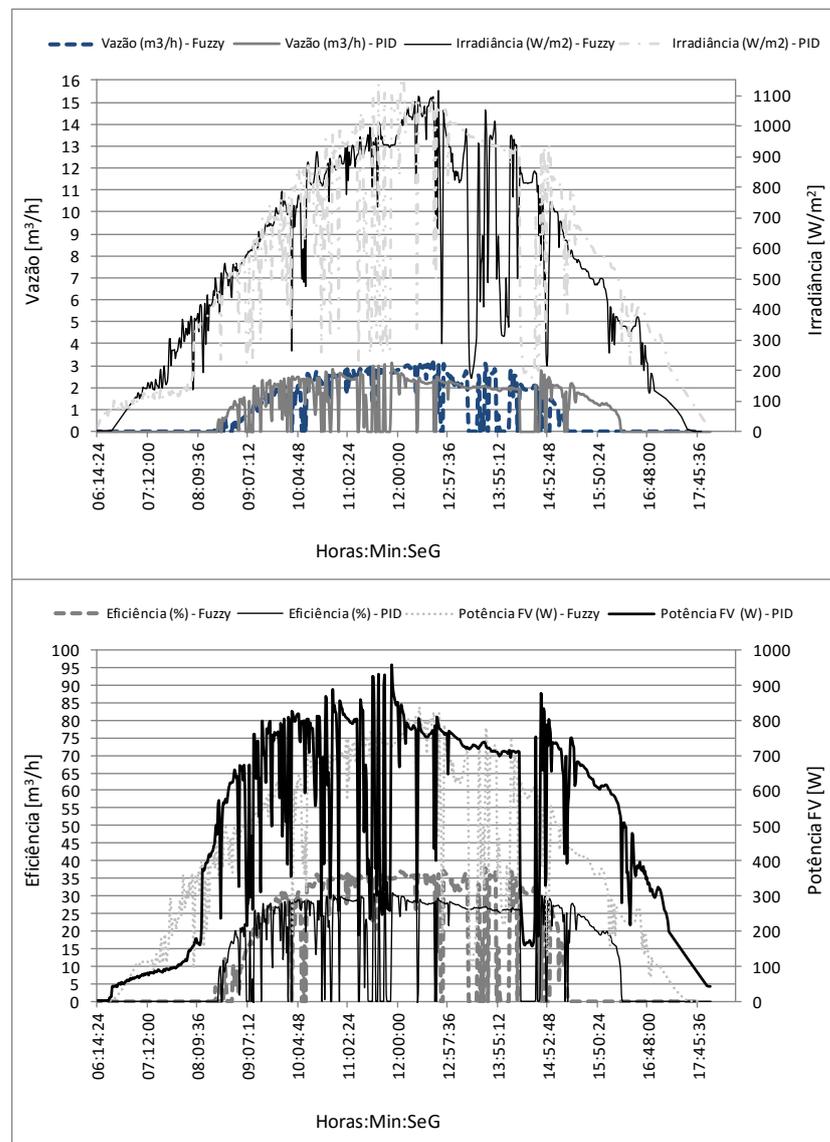


A Figura 3.31 apresenta a potência medida do GFV e a calculada para o máximo despacho de potência, bem como a tensão medida do barramento c.c. juntamente com a tensão de máxima potência calculada. Pode-se observar, por meio de comparação entre os valores de tensão medidos e calculados, que o controlador *fuzzy* proposto tende a afastar-se um pouco mais da máxima potência, quando comparado ao comportamento da dinâmica da tensão no controlador PID. Isso se reflete numa eficiência de SPMP média, relação entre os valores integrados

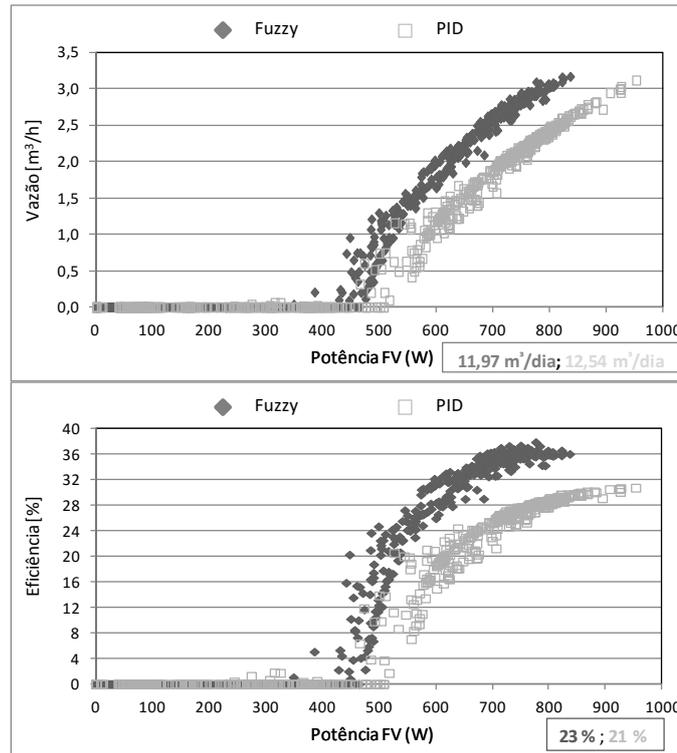
ao longo do dia da potência medida e teórica, da ordem de 72% para o controlador *fuzzy* e 83% para o controlador PID.

A Figura 3.32 mostra comparativamente 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 FV e da eficiência do conjunto motobomba mais CF. O resultado obtido indica um melhor desempenho do controle *fuzzy* nos instantes de maior irradiância. Embora a geração FV do sistema com o controle PID seja superior à do sistema com o controle *fuzzy* em quase a totalidade do tempo, nota-se que o desempenho do conjunto motobomba mais CF é, em quase a totalidade do tempo, superior no sistema de controle *fuzzy*, tal como demonstra a Figura 3.33.

**Figura 3.32 – Comparação entre as dinâmicas do SFB com PID e *fuzzy*: perfis de irradiância, geração, vazão e eficiência do conjunto motobomba mais CF.**



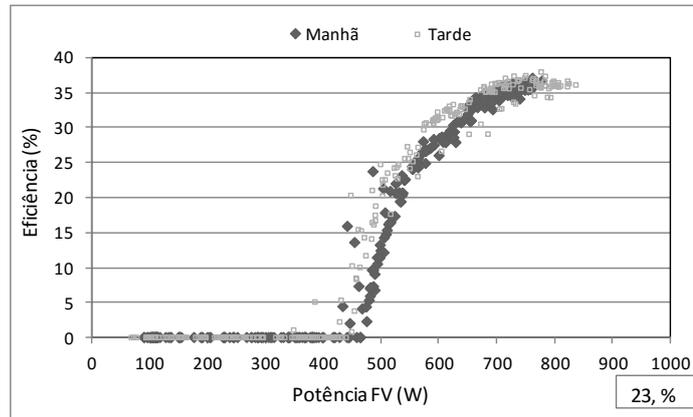
**Figura 3.33 – Comparação entre as estratégias de controle *fuzzy* e PID: Vazão e eficiência do conjunto (motobomba + CF) em função da potência desenvolvida pelo GFV.**



Isso pode estar associado a melhor resposta do *fuzzy* com relação às variações dinâmicas inerentes desse tipo de aplicação. O fato do sistema com o controle *fuzzy* ter bombeado menos água é justificável basicamente por dois fatores: primeiro que o perfil de irradiância diário favorece o controlador PID, principalmente no período que vai de 11:30h às 15:30h, e segundo, o melhor desempenho apresentado pelo controlador PID no SPMP. Contudo, esse último aspecto pode ser significativamente melhorado pelo controle *fuzzy*, por meio da otimização da base de regras e/ou pelo ajuste das funções de pertinência e ganho do controlador.

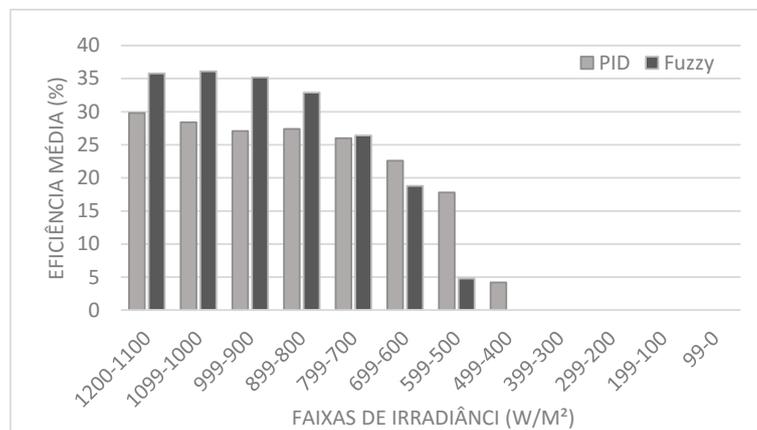
O rendimento geral do conjunto (motobomba + CF) com o controlador *fuzzy* foi aproximadamente 23 % para um dia de 6,3 HSP. A Figura 3.34 apresenta os diferentes valores de rendimento para os respectivos valores de potência fornecido pelo GFV e apresentado na Figura 3.33, porém diferenciando-se os períodos da manhã e tarde. Pode-se observar que o rendimento máximo obtido com o controlador *fuzzy* é de 36% aproximadamente. Este valor é superior ao do controlador PID que foi de 30% aproximadamente.

**Figura 3.34 – Eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF) com atuação do controlador *fuzzy*: Períodos da manhã e tarde.**



A Figura 3.5 apresenta a comparação, de forma estratificada, da eficiência média do conjunto CF + motobomba para ambas metodologias de controle. Pode-se observar o melhor desempenho do controlador *fuzzy*, quando comparado ao controlador PID, nos instantes de maior irradiância (faixas de 1220-1100 W/m<sup>2</sup>, 1099-1000 W/m<sup>2</sup>, 999-900 W/m<sup>2</sup> e 899-800 W/m<sup>2</sup>). Na faixa de irradiâncias compreendida entre 799 W/m<sup>2</sup> e 700 W/m<sup>2</sup>, os dois controladores obtiveram desempenhos semelhantes. Nas faixas de menor irradiância, o controlador PID teve desempenho superior ao controlador *fuzzy* (faixas 699-600 W/m<sup>2</sup>, 599-500 W/m<sup>2</sup> e 499-400 W/m<sup>2</sup>). Os valores de irradiâncias críticas para as duas metodologias de controle foram responsáveis pelo melhor desempenho do controlador PID nos instantes de menor irradiância (faixas de 599-500 W/m<sup>2</sup> e 499-400 W/m<sup>2</sup>).

**Figura 3.35 – Comparação entre eficiências médias de forma estratificada do sistema fotovoltaico de bombeamento (conjunto motobomba mais CF)**



O rendimento geral para o SFB com o controlador PID foi de 21% aproximadamente, valor este próximo ao obtido com o controlador *fuzzy* (23%). Porém é importante ressaltar que para os momentos de maior potencial de geração o controlador *fuzzy* possibilitou um rendimento de até 36,6 %. Avalia-se que as diferenças entre os perfis de irradiância dos diferentes dias de testes com as diferentes estratégias de controle podem ter contribuído para que a diferença de rendimento não fosse ainda maior do que foi apresentado nestes ensaios.

## CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um controlador *fuzzy* para aplicação em SFB's de conexão direta e que utilizem CF's para o acionamento de motobombas, utilizando-se placa de controle externo, de forma a substituir o controlador PID existente em alguns CF's, bem como oferecer a possibilidade de controle aos que não possuem controlador PID embarcado.

A maior motivação consistiu na possibilidade da aplicação, em SFB's, de tecnologia já bastante difundida no meio industrial, de forma a aumentar a aplicabilidade no que se refere à utilização de CF's menores ligados ao controle externo. Trabalhou-se com a hipótese de que o sistema *fuzzy* apresentava-se como relevante alternativa para utilização neste tipo de aplicação.

Neste trabalho foi proposta, portanto, a metodologia de controle *fuzzy* para aplicação em um SFB com a utilização de um CF como dispositivo de acionamento de motores elétricos. Duas diferentes metodologias de sensoriamento foram utilizadas, a primeira baseada na utilização de um LDR e a segunda baseada na utilização de um módulo FV de baixa potência. Em ambos os casos o objetivo da estratégia de sensoriamento era inferir a taxa de variação da irradiância mais do que medir o valor exato da mesma. Foi desenvolvido um DPC para utilização como controlador externo ao CF. Testes experimentais foram realizados em bancadas de testes de motobombas para a avaliação do desempenho do controlador *fuzzy*.

De acordo com os resultados obtidos, o desempenho do controlador *fuzzy* foi satisfatório, pois foi capaz de garantir a disponibilidade do SFB, suprimindo erros de subtensão nos dois casos, tanto utilizando o LDR, quanto utilizando o módulo sensor. Além disso, manteve o nível de tensão do barramento c.c. em uma região apropriada de operação, mesmo com as mudanças bruscas na irradiância as quais o SFB foi submetido.

No caso da utilização do LDR, além de atestar o desempenho do controlador *fuzzy*, os testes realizados apresentaram um potencial de utilização do LDR, ainda pouco explorado, como sensor de irradiância para sistemas submetidos a sol real. O comportamento obtido fora da região de linearidade, ainda que de forma imprecisa, apresentou importante seguimento do perfil de variação da irradiância. Este comportamento possibilitou a aplicação em um sistema *fuzzy* normalizando-se os valores medidos e em seguida fuzzificando-os. Ressalta-se que o LDR é um componente eletrônico produzido em larga escala e de valor comercial significativamente menor (cerca de R\$ 1,00) do que os dispositivos mais utilizados para medição de irradiância, a exemplo de células calibradas e piranômetros (valores superiores à R\$ 100,00 e que podem chegar à R\$ 2.000,00, dependendo da precisão do dispositivo).

Com utilização do módulo sensor realizou-se a análise de eficiência do controlador *fuzzy* comparando-se a um controlador PID. Tendo em vista a utilização de uma faixa de tensão de entrada maior e mais sensível às variações de irradiância quando comparada ao uso do LDR, observou-se que o controlador *fuzzy* pôde proporcionar um perfil da tensão do barramento c.c. muito semelhante ao da tensão teórica, indicando que um pequeno ajuste no ganho do controlador *fuzzy* poderá melhorar significativamente a eficiência de SPMP.

O controlador *fuzzy* alcançou resultados satisfatórios, obtendo um rendimento diário do conjunto motobomba mais CF, um pouco superior (23 %) ao obtido pelo controlador PID (21 %). Apesar de apresentar um rendimento diário do conjunto (motobomba+CF) superior, o controle *fuzzy* apresentou uma maior deficiência no SPMP, culminando numa eficiência de SPMP de aproximadamente 72 %, cerca de 11 % inferior ao obtido pela estratégia de controle com o PID. Isto é possível uma vez que o controlador *fuzzy* aproveitou melhor a potência disponível no GFV nos instantes de maior irradiância, ou seja, obteve melhor desempenho diário quando comparado ao controlador PID. Porém, nos instantes de menor irradiância o controlador *fuzzy* se afastou um pouco mais do SPMP. Contudo, como nesses momentos não há bombeamento de água, devido aos baixos níveis de irradiância, o SFB não é penalizado.

É importante ressaltar, também, a similaridade existente entre o perfil da tensão do barramento c.c. obtida com o controlador *fuzzy* e o perfil da tensão de máxima potência calculada para o GFV, mesmo que não sejam coincidentes. Esta característica mostra o potencial de seguimento de máxima potência apresentado pelo controlador *fuzzy*, porém são necessários ajustes no SFB para que isso aconteça.

As dificuldades mais relevantes para o desenvolvimento do controlador *fuzzy* utilizando o LDR e o módulo sensor 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 considerando os objetivos de cada aplicação, o de realizar o ajuste da tensão do barramento c.c. utilizando componente eletrônico de baixo custo (no caso do LDR), e obter rendimento equivalente ou superior do controlador *fuzzy* quando comparado a um controlador PID (no caso do módulo sensor). Alerta-se que nos testes foram consideradas apenas as características específicas da região amazônica, uma vez que os laboratórios utilizados estão nesta região. Existe, portanto, a necessidade de maiores estudos sobre os valores da base de regras aplicados a outras localidades. Contudo, acredita-se que a mesma base de regras desenvolvida para as condições em que foram realizados os experimentos, funcionará para outras localidades com condições climáticas diferentes.

Ressalta-se que a metodologia de controle proposta, tanto utilizando LDR, quanto utilizando o módulo sensor, apresentou viabilidade de aplicação em sistemas de bombeamento com CF's, possibilitando, também, a utilização em CF's monofásicos que não possuem controladores PID embarcados.

Propõe-se para trabalhos futuros:

- A melhoria do desempenho do sistema *fuzzy* utilizando técnicas e ajustes compatíveis com a capacidade do hardware utilizado, a otimização da base de regras, bem como das funções de pertinência, pode ser citada como alternativa para aumento da eficiência do controlador *fuzzy*;

- Métodos baseados em modelos, a exemplo do sistema *fuzzy* Takagi-sugeno também podem ser citados como alternativa de metodologia para melhoria do desempenho do sistema, uma vez que diversos modelos representativos dos pontos de máxima potência podem ser obtidos se utilizados pelo FLS.

- A utilização da temperatura como entrada no controlador *fuzzy* também pode contribuir para melhoria do desempenho do SFB e a aplicação do sistema em condições reais de operação em campo. Neste caso, pode-se propor a utilização de um dispositivo de controle capaz de efetuar o monitoramento e o armazenamento de suas variáveis, uma vez que sistemas reais geralmente não possuem o monitoramento e estão distantes da sede dos laboratórios onde os mesmos são instalados.

- Avaliação das diferentes estratégias de controle frente à variação do nível dinâmico do poço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso-abella, M.; Lorenzo, E.; Chenlo, F. **PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converters**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 19, pp. 179-191, 2003.

Altas, I. H.; Sharaf, A. M. **A fuzzy logic power tracking controller for a photovoltaic energy conversion scheme**, Electric Power Systems Research, v. 25, pp. 227-238, 1992.

Anderson, P.M.; Fouad, A.A. **Power System Control and Stability**. The Iowa State University Press, U.S.A., 1977.

Andoulssi, R.; Draou, A.; Jerbi, H.; Alghonamy, A.; Khiari, B. **Non linear control of a photovoltaic water pumping system**, Energy Procedia, v. 42, pp. 328 – 336, 2013.

Bendiba, B.; Krimb, F.; Belmilia, H.; Almia, M. F.; Bouloumaa, S. **Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system**, Energy Procedia, vol. 50, pp. 383-392, 2014.

Benlarbi, K.; Mokrani, L.; Nait-Said, M. S. **A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system**, Solar Energy, v. 77, pp. 203–216, 2004.

Betka, A.; Attali, A. **Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory**, Solar Energy, v. 84, pp. 1273–1283, 2010.

Brito, A. U. **Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas**, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2006.

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

Capelli, A. **Inversores de Frequência**. Mecatrônica Atual, v.1, 2002.

Corrêa, T. P.; Seleme Jr, S. I.; Silva, S. R. **Efficiency optimization in stand-alone photovoltaic pumping system**, Renewable Energy, v. 41, pp. 220-226, 2012.

Elgendy, M. A.; Zahawi, B.; Atkinson, D. J. **Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, v. 1, 2010,

Eskander, M. N.; Zaki, A. M. **A maximum efficiency - photovoltaic – induction motor pump system**, Renewable Energy, v. 10(1), pp. 53-60, 1997.

EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE, **Variable Speed Pump – A Guide to Successful Applications**, Elsevier Advanced Technology, New York, 2004.

Gopal, C.; Mohanraj, M.; Chandramohan, P.; Chandrasekar, P. **Renewable energy source water pumping systems—A literature review**, Renewable Sustainable Energy Reviews, vol. 25, pp. 351–370, 2013.

Ishaque, K.; Salam, Z. **A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 19, pp. 475-488, 2013.

Kamal, E.; Aitouche, A. **Design of Maximum Power Fuzzy Controller for PV Systems Based on the LMI-Based Stability**, Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics, Vol. 230, pp. 77-88, 2014.

Kassem, A. M. **MPPT control design and performance improvements of a PV generator powered DC motor-pump system based on artificial neural networks**, Electrical Power and Energy Systems, v. 43, pp. 90–98, 2012.

Koner, P. k. **Optimization techniques for a photovoltaic pumping system**, Renewable Energy. V. 6(1), pp. 53-62, 1995.

Lopes, R. J. C. **Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013

Moulay-Idriss, C.; Mohamed, B. **Application of the DTC control in the photovoltaic pumping system**, Energy Conversion and Management, v. 65, pp. 655–662, 2013.

Ogata, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice-Hall do Brasil, 2ª Edição, 1990.

PRACTICAL ACTION, **Solar (photovoltaic) water pumping**. Disponível em: [http://web.stanford.edu/group/solarbenin/references/solar\\_pv\\_waterpumping.pdf](http://web.stanford.edu/group/solarbenin/references/solar_pv_waterpumping.pdf), 2015. Acesso em: 08 de outubro de 2015.

Periasamy, P.; Jain, N.K.; Singh, I.P. **A review on development of photovoltaic water pumping system**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, pp. 918–925, 2015.

Rehman, S.; Al-Hadhrami, L. M.; Alam, M.; **Pumped hydro energy storage system: A technological review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, pp. 586–598, 2015.

Sahw, P. e Gaur, P. **Photovoltaic Powered Centrifugal Water Pump**. International Journal of Electronic and Electrical Engineering, v. 7, pp. 247-254, 2014

Schenkel, G. **Monitoramento e Análise de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede com Uso de Microinversor**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015.

Simões, M. G.; Shaw, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**, Editora Blucher, 2ª edição, 2007.

Villalva, M. G.; Gazoli, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**, Editora Érica, São Paulo, 2013.

Vinifa, R.; Kavitha, A. **Fuzzy Based Maximum Power Point Tracking on a PV System**, ICEETS (International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability), IEEE 2013.

Wang, L. **A course in fuzzy systems and control**, Prentice-Hall, 1997.

WEG S/A. **CFW08 Inversor de Frequência. Manual do Usuário**. Disponível em: [www.weg.net](http://www.weg.net), 2003. Acesso em: 15 de outubro de 2015.

WEG S/A. **CFW11 Inversor de Frequência. Manual do Usuário**. Disponível em: [www.weg.net](http://www.weg.net), 2015. Acesso em: 19 de outubro de 2015.

WEG S/A. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Guia Técnico. Disponível em: [www.weg.net](http://www.weg.net), 2010. Acesso em: 10 de outubro de 2015.

Yaichi, M. Fellah, M. K. **Centrifugal Motor-Pump System Model intended for the Photovoltaic Pumping applications**. Przegląd Elektrotechniczny, v. 89, pp. 100-105, 2013.

## ARTIGOS DESENVOLVIDOS DURANTE O DOUTORADO

### Artigo Publicado em Revista Internacional

Maranhão, G. N. A.; Brito, A. U.; Leal, A. M.; Fonseca, J. K. S.; Macêdo, W. N. **Using LDR as Sensing Element for an External *Fuzzy* Controller Applied in Photovoltaic Pumping Systems with Variable-Speed Drives**, *Sensors*, v. 15, pp. 24445-24457, 2015.

### Artigo Sob Avaliação em Revista Internacional

Maranhão, G. N. A.; Brito, A. U.; Macêdo, W. N.; Pinho, J. T.; Leal, A. M.; Fonseca, J. K. S. **Experimental Results of a Fuzzy Controller Developed for Use in Variable-Speed Drive Applied to Photovoltaic Pumping Systems**, *IEEE Sensors Journal*, ID Sensors-12948-2015.

#### Experimental Results of a Fuzzy Controller Developed for Use in Variable-Speed Drive Applied to Photovoltaic Pumping Systems

Journal:	<i>IEEE Sensors Journal</i>
Manuscript ID:	Sensors-12948-2015]
Manuscript Type:	Regular Paper
Date Submitted by the Author:	06-Aug-2015
Complete List of Authors:	Maranhão, Geraldo; Universidade Federal do Amapá, Engenharia Elétrica Brito, Alaan; Universidade Federal do Amapá, Engenharia Elétrica Pinho, João; Universidade Federal do Pará, Engenharia Elétrica Fonseca, Jessica; Universidade Federal do Pará, Engenharia Elétrica Leal, Anderson; Universidade Federal do Pará, Engenharia Elétrica Macêdo, Wilson; Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia
Keywords:	SYST

## ANEXOS

### Anexo A – Conjuntos e Operadores *Fuzzy*

Um conjunto *fuzzy*  $A \in U$  pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico ( $x$ ) com os valores da função de pertinência ( $\mu_A$ ) correspondentes a  $x$  (Wang, 1997). A Equação 1 apresenta a definição de um conjunto *fuzzy*.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (1)$$

O conjunto *fuzzy* pode ser apresentado também, de acordo com Wang (1997), como sendo a coleção de todos os pontos  $x \in U$  relacionados à função de pertinência  $\mu_A$ . Esta representação pode ser encontrada nas Equação 2 e 3 para valores contínuos e discretos, respectivamente. Na Equação 2 o uso da integral significa a soma de todos os valores.

$$A = \int_U \mu_A(x) / x \, dx \quad (2)$$

$$A = \sum_U \mu_A(x) / x \quad (3)$$

Por se tratar de funções de pertinência, os conjuntos *fuzzy* precisam de algumas definições quanto a operações básicas entre conjuntos. A definição de algumas funções básicas à lógica de conjuntos torna-se importante nos estudos de sistemas *fuzzy*, visto que operações como “união”, “interseção” e “negação” não podem mais receber a mesma definição do que aquelas dadas a conjuntos convencionais. Uma outra classe de definições também necessárias são as de alguns operadores lógicos como a função “e”, “ou” e a implicação “se-então” (Wang, 1997).

#### NORMA-S

Para a definição de operações entre conjuntos *fuzzy* que signifiquem, tanto a “união” entre conjuntos, quanto o operador lógico “ou”, é que se pode aplicar a norma-s. Para a definição de uma função  $s$  é necessário que no mínimo os quatro axiomas a seguir sejam obedecidos:

- **Condição de Limite:**

$$s(1,1) = 1$$

$$s(a,0) = s(0,a) = a$$

- **Comutatividade:**  $s(a, b) = s(b, a)$
- **Condição de Não-Redução:**  $\text{Se } a \leq a' \text{ e } b \leq b'$   
 $\text{Então } s(a, b) \leq s(a', b')$
- **Associatividade:**  $s((a, b), c) = s(a, (b, c))$

Vários tipos de função podem obedecer a estas regras, um exemplo é a norma-s como o máximo das funções de pertinência, ou seja, a Equação 4 apresenta a norma-s (Wang, 1997):

$$s[\mu_A, \mu_B] = \mu_{A \cup B} = \text{máx}[\mu_A, \mu_B] \quad (4)$$

#### NORMA-T

A norma-t é usada para definir as operações de “interseção” e a função lógica “e”. Assim como na norma-s, a norma-t precisa obedecer aos axiomas descritos a seguir (Wang, 1997):

- **Condição de Limite:**  $t(0, 0) = 0$   
 $t(a, 1) = t(1, a) = a$
- **Comutatividade:**  $t(a, b) = t(b, a)$
- **Condição de Não-Redução:**  $\text{Se } a \leq a' \text{ e } b \leq b'$   
 $\text{Então } t(a, b) \leq t(a', b')$
- **Associatividade:**  $t((a, b), c) = t(a, (b, c))$

A norma-t, de acordo com Wang (1997), pode ser representada sendo o mínimo entre as funções de pertinência como se pode observar na Equação 5.

$$t[\mu_A, \mu_B] = \mu_{A \cap B} = \text{mín}[\mu_A, \mu_B] \quad (5)$$

Outra formatação relevante para a norma-t é a do produto algébrico que consiste na realização do produto entre os valores. A Equação 6 apresenta esta conFiguração.

$$t[a, b] = ab \quad (6)$$

O operador de negação é definido como o complemento da função de pertinência do conjunto (Wang, 1997). A Equação 7 apresenta a negação de um conjunto *fuzzy* com função de pertinência igual a  $\mu_A$ .

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (7)$$

### IMPLICAÇÃO DE MAMDANI (SE-ENTÃO)

Sistemas *fuzzy* utilizam regras (implicações) do tipo se-então para compor sua base de regras, onde estas implicações têm por função o relacionamento entre entrada e saída. A expressão “se  $p$  então  $q$ ” ( $p \rightarrow q$ ) é definida através da Tabela 1 que apresenta a Tabela verdade para  $p$  que implica  $q$ .

**Tabela 1** – Tabela Verdade da Implicação

<i>P</i>	<i>q</i>	$p \rightarrow q$
Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro
Verdadeiro	Falso	Falso
Falso	Verdadeiro	Verdadeiro
<b>Falso</b>	<b>Falso</b>	<b>Verdadeiro</b>

A expressão “ $p$  que implica  $q$ ” também pode ser apresentada como na Equação 8, onde  $\wedge$  representa o operador lógico “e”,  $\vee$  representa o operador lógico “ou” e  $\bar{p}$  representa a negação de  $p$ .

$$p \rightarrow q \leftrightarrow (p \wedge q) \vee \bar{q} \quad (8)$$

Esta solução para a implicação  $p \rightarrow q$  está adequada apenas para conjuntos convencionais, onde a Tabela 1 pode abranger todos os casos possíveis para a resposta. Para conjuntos *fuzzy*, pode-se escrever a implicação como sendo da forma (Wang, 1997):

$$p \rightarrow q \leftrightarrow p \wedge q \quad (9)$$

Esta aproximação significa que, para implicações do tipo se-então pode-se considerar a implicação como sendo a norma-t de  $p$  e  $q$ . Nisto consiste a implicação de Mamdani na norma-t entre as funções de pertinência dos conjuntos envolvidos.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Código Utilizado na Programação do Controlador *Fuzzy* Utilizando o LDR

O código foi escrito em linguagem baseada em C compatível com a plataforma Arduino.

```

FLOAT LK,VIN,SOMALUX=0, SOMATEN=0, SOMALUX1=0, SOMATEN1=0, VH, H, M, L, VL, LP, SP,
ZR, SN, LN, LK1, DLK1, CTR;
INT L1=975, L2=980, L3=985, L4=990, L5=998, DL1=-50, DL2=-20, DL3=0, DL4=20, DL5=50, CTRFZZ;
CONST INT TX=300;
INT I=0, X=0;

VOID SETUP()
{
  PINMODE(5,OUTPUT);
  PINMODE(8,OUTPUT);
  PINMODE(11,OUTPUT);

  SERIAL.BEGIN(9600);
}
VOID LOOP() {

  FOR (X=0;X<=TX;X++){
    SOMALUX+= ANALOGREAD(A0);
    SOMATEN+= ANALOGREAD(A4);
    I=I++;
    DELAY(1);
  }
  DELAY(500);
  FOR (I=TX;I<=2*TX;I++){
    SOMALUX1+= ANALOGREAD(A0);
    SOMATEN+= ANALOGREAD(A4);
    DELAY(1);
  }
  FLOAT LK=SOMALUX/TX;
  FLOAT LK1=SOMALUX1/TX;
  DLK1= LK1-LK;
  VIN=SOMATEN/(2*TX);
  VIN=500*VIN/1026;
  IF (I=2*TX){
    SOMALUX1=0;
    SOMALUX=0;
    SOMATEN=0;
    I=0;
  }

  VH=0; H=0; M=0; L=0; VL=0; LP=0; SP=0; ZR=0; SN=0; LN=0; CTR=0; CTRFZZ=0;
  //CONJUNTOS FUZZY DE ENTRADA PARA A LUMINOSIDADE
  IF (LK1<=L1){
    VL=1;
    DIGITALWRITE(8,1);
    DIGITALWRITE(11,0);
  }
  IF (LK1>L1&&LK1<=L2){

```

```

VL=(LK1-L2)/(L1-L2);
L=(LK1-L1)/(L2-L1);
DIGITALWRITE(8,1);
DIGITALWRITE(11,1);
}
IF (LK1>L2&&LK1<=L3){
L=(LK1-L3)/(L2-L3);
M=(LK1-L2)/(L3-L2);
DIGITALWRITE(8,1);
DIGITALWRITE(11,1);
}
IF (LK1>L3&&LK1<=L4){
M=(LK1-L4)/(L3-L4);
H=(LK1-L3)/(L4-L3);
DIGITALWRITE(8,1);
DIGITALWRITE(11,1);
}
IF (LK1>L4&&LK1<=L5){
H=(LK1-L5)/(L4-L5);
VH=(LK1-L4)/(L5-L4);
DIGITALWRITE(8,1);
DIGITALWRITE(11,1);
}
IF (LK1>L5){
VH=1;
DIGITALWRITE(8,0);
DIGITALWRITE(11,1);
}
//CONJUNTOS FUZZY DE ENTRADA PARA A VARIAÇÃO DA LUMINOSIDADE

IF (DLK1<=DL1){
LN=1;
}
IF (DLK1>DL1&&DLK1<=DL2){
LN=(DLK1-DL2)/(DL1-DL2);
SN=(DLK1-DL1)/(DL2-DL1);
}
IF (DLK1>DL2&&DLK1<=DL3){
SN=(DLK1-DL3)/(DL2-DL3);
ZR=(DLK1-DL2)/(DL3-DL2);
}
IF (DLK1>DL3&&DLK1<=DL4){
ZR=(DLK1-DL4)/(DL3-DL4);
SP=(DLK1-DL3)/(DL4-DL3);
}
IF (DLK1>DL4&&DLK1<=DL5){
SP=(DLK1-DL5)/(DL4-DL5);
LP=(DLK1-DL4)/(DL5-DL4);
}
IF (DLK1>DL5){
LP=1;
}
//BASE DE REGRAS
FLOAT R1=VH*LP;
DOUBLE C1=5;
FLOAT R2=VH*SP;
DOUBLE C2=5;
FLOAT R3=VH*ZR;
DOUBLE C3=5;
FLOAT R4=VH*SN;

```

```

DOUBLE C4=2.5;
FLOAT R5=VH*LN;
DOUBLE C5=0;
FLOAT R6=H*LP;
DOUBLE C6=5.0;
FLOAT R7=H*SP;
DOUBLE C7=4.5;
FLOAT R8=H*ZR;
DOUBLE C8=4.0;
FLOAT R9=H*SN;
DOUBLE C9=1.5;
FLOAT R10=H*LN;
DOUBLE C10=0;
FLOAT R11=M*LP;
DOUBLE C11=2.0;
FLOAT R12=M*SP;
DOUBLE C12=1.5;
FLOAT R13=M*ZR;
DOUBLE C13=1.0;
FLOAT R14=M*SN;
DOUBLE C14=0.5;
FLOAT R15=M*LN;
DOUBLE C15=0;
FLOAT R16=L*LP;
DOUBLE C16=0.5;
FLOAT R17=L*SP;
DOUBLE C17=0.5;
FLOAT R18=L*ZR;
DOUBLE C18=0;
FLOAT R19=L*LN;
DOUBLE C19=0;
FLOAT R20=L*SN;
DOUBLE C20=0;
FLOAT R21=VL*LP;
DOUBLE C21=0;
FLOAT R22=VL*SP;
DOUBLE C22=0;
FLOAT R23=VL*ZR;
DOUBLE C23=0;
FLOAT R24=VL*SN;
DOUBLE C24=0;
FLOAT R25=VL*LN;
DOUBLE C25=0;

//DEFUZZIFICADOR PELA MÉDIA DOS CENTROS
CTR=(R1*C1+R2*C2+R3*C3+R4*C4+R5*C5+R6*C6+R7*C7+R8*C8+R9*C9+R10*C10+R11*C11+R12*C
12+R13*C13+R14*C14+R15*C15+R16*C16+R17*C17+R18*C18+R19*C19+R20*C20+R21*C21+R22*C22
+R23*C23+R24*C24+R25*C25)/(R1+R2+R3+R4+R5+R6+R7+R8+R9+R10+R11+R12+R13+R14+R15+R16+
R17+R18+R19+R20+R21+R22+R23+R24+R25);

CTRFZZ=(CTR*255/5);
ANALOGWRITE(5,CTRFZZ);
SERIAL.PRINTLN(LK1);
SERIAL.PRINTLN(DLK1);
SERIAL.PRINTLN(VIN);
}

```

## Apêndice B – Código Utilizado na Programação do FLC Utilizando o Módulo Sensor

O código foi escrito em linguagem baseada em C compatível com a plataforma Arduino.

```
float Lk,Vin,somaCel=0, somaTen=0, somaCel1=0, somaTen1=0, VH, H, M, L, VL, LP, SP, ZR, SN, LN, Lk1,
dLk1, Ctr;
int i1=80, i2=450, i3=650, i4=1100, i5=1200, d11=-200, d12=-50, d13=0, d14=50, d15=200, CtrFzz, estadobotao =
0;
const int Tx=300,fc1=1, fc2=1, fc3=1, fc4=1, fc5=1;
int i=0, x=0;
void setup()
{
pinMode(2, INPUT); //Botao de RESET
pinMode(3,OUTPUT); //Saida de Controle
pinMode(4, OUTPUT); //Saida pro RESET
pinMode(8,OUTPUT); //IHM de Aquisição de dados
Serial.begin(9600);
}
void loop() {

for (x=0;x<=Tx;x++){
somaCel+= analogRead(A0);
delay(1);
i=i++;
}
digitalWrite(8,LOW);
delay(500);
digitalWrite(8,HIGH);
for (i=Tx;i<=2*Tx;i++){
somaCel1+= analogRead(A0);
delay(1);
}
float modten=somaCel/(Tx);
modten=modten*5/1026;
float ten=modten*27.25;

float modten1=somaCel1/(Tx);
modten1=modten1*5/1026;
float ten1=modten1*27.25;
```

```

float Lk=1000*ten/75.1;
float Lk1=1000*ten1/75.1;
dLk1= Lk1-Lk;

if (x=2*Tx){
somaCel1=0;
somaCel=0;
x=0;
i=0;
}
VH=0; H=0; M=0; L=0; VL=0; LP=0; SP=0; ZR=0; SN=0; LN=0; Ctr=0; CtrFzz=0;
//Conjuntos Fuzzy de Entrada para a LUMINOSIDADE
if (Lk1<=70){
    VL=0;//Encerra Controle
//digitalWrite(8,0);
//digitalWrite(11,0);
}
if (Lk1>70&&Lk1<=11){
    VL=1;
//digitalWrite(8,1);
//digitalWrite(11,0);
}
if (Lk1>11&&Lk1<=12){
    VL=(Lk1-12)/(11-12);
    L=(Lk1-11)/(12-11);
//digitalWrite(8,1);
//digitalWrite(11,1);
}
if (Lk1>12&&Lk1<=13){
    L=(Lk1-13)/(12-13);
    M=(Lk1-12)/(13-12);
//digitalWrite(8,1);
//digitalWrite(11,1);
}
if (Lk1>13&&Lk1<=14){
    M=(Lk1-14)/(13-14);
    H=(Lk1-13)/(14-13);
//digitalWrite(8,1);
//digitalWrite(11,1);
}

```

```

}
if (Lk1>14&&Lk1<=15){
    H=(Lk1-15)/(14-15);
    VH=(Lk1-14)/(15-14);
    //digitalWrite(8,1);
    //digitalWrite(11,1);
}
if (Lk1>15){
    VH=1;
    //digitalWrite(8,0);
    //digitalWrite(11,1);
}
//Conjuntos Fuzzy de Entrada para a VARIAÇÃO da LUMINOSIDADE

if (dLk1<=d11){
    LN=1;
}
if (dLk1>d11&&dLk1<=d12){
    LN=(dLk1-d12)/(d11-d12);
    SN=(dLk1-d11)/(d12-d11);
}
if (dLk1>d12&&dLk1<=d13){
    SN=(dLk1-d13)/(d12-d13);
    ZR=(dLk1-d12)/(d13-d12);
}
if (dLk1>d13&&dLk1<=d14){
    ZR=(dLk1-d14)/(d13-d14);
    SP=(dLk1-d13)/(d14-d13);
}
if (dLk1>d14&&dLk1<=d15){
    SP=(dLk1-d15)/(d14-d15);
    LP=(dLk1-d14)/(d15-d14);
}
if (dLk1>d15){
    LP=1;
}
//Base de Regras
float r1=VH*LP;
double c1=5*fc5;
float r2=VH*SP;

```

```
double c2=5*fc5;
float r3=VH*ZR;
double c3=5*fc5;
float r4=VH*SN;
double c4=4.8*fc5;
float r5=VH*LN;
double c5=4.5*fc5;
```

```
float r6=H*LP;
double c6=5*fc4;
float r7=H*SP;
double c7=4.9*fc4;
float r8=H*ZR;
double c8=4.9*fc4;
float r9=H*SN;
double c9=4.7*fc4;
float r10=H*LN;
double c10=4*fc4;
```

```
float r11=M*LP;
double c11=4.4*fc3;
float r12=M*SP;
double c12=4.3*fc3;
float r13=M*ZR;
double c13=4.3*fc3;
float r14=M*SN;
double c14=4.0*fc3;
float r15=M*LN;
double c15=3.5*fc3;
```

```
float r16=L*LP;
double c16=4.2*fc2;
float r17=L*SP;
double c17=4.1*fc2;
float r18=L*ZR;
double c18=4*fc2;
float r19=L*SN;
double c19=3.5*fc2;
float r20=L*LN;
double c20=3*fc2;
```

```
float r21=VL*LP;  
double c21=2.5*fc1;  
float r22=VL*SP;  
double c22=2.0*fc1;  
float r23=VL*ZR;  
double c23=1.5*fc1;  
float r24=VL*SN;  
double c24=0*fc1;  
float r25=VL*LN;  
double c25=0*fc1;
```

```
//Defuzzificador pela Média dos Centros
```

```
Ctr=(r1*c1+r2*c2+r3*c3+r4*c4+r5*c5+r6*c6+r7*c7+r8*c8+r9*c9+r10*c10+r11*c11+r12*c12+r13*c13+r14*c14+r15*c15+r16*c16+r17*c17+r18*c18+r19*c19+r20*c20+r21*c21+r22*c22+r23*c23+r24*c24+r25*c25)/(r1+r2+r3+r4+r5+r6+r7+r8+r9+r10+r11+r12+r13+r14+r15+r16+r17+r18+r19+r20+r21+r22+r23+r24+r25);
```

```
CtrFzz=(Ctr*255/5);  
analogWrite(3,CtrFzz);  
Serial.println(Lk1);  
Serial.println(dLk1);  
Serial.println(CtrFzz);
```

```
}
```