

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

USP

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia

PIPGE

(EP/FEA/IEE/IF)

**OTIMIZAÇÃO DO ACOPLAMENTO DE GERADORES  
FOTOVOLTAICOS A MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA  
ATRAVÉS DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA  
COMERCIAIS PARA ACIONAR BOMBAS CENTRÍFUGAS**

**Alaan Ubaiara Brito**

São Paulo

2006

ALAAN UBAIARA BRITO

**OTIMIZAÇÃO DO ACOPLAMENTO DE GERADORES  
FOTOVOLTAICOS A MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA  
ATRAVÉS DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA  
COMERCIAIS PARA ACIONAR BOMBAS CENTRÍFUGAS**

Tese apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica/ Faculdade de Economia e Administração/ Instituto de Eletrotécnica e Energia/ Instituto de Física) para obtenção do Título de Doutor em Energia.

Orientador: Prof. Dr. **Roberto Zilles**  
Co-orientador: Prof. Dr. **João Tavares Pinho**

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Brito, Alaan Ubaiara

Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais Para Acionar Bombas Centrífugas/ Alaan Ubaiara Brito; orientador Roberto Zilles, co-orientador João Tavares Pinho. - São Paulo, 2006.

84p.: il.; 29,7 cm.

Tese (Doutorado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo.

1. Conversor de frequência
2. Sistema de bombeamento fotovoltaico
3. Bombeamento de água
4. Energia solar.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
EP-FEA-IEE-IF

ALAAN UBAIARA BRITO

*“Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas”*

Tese defendida e aprovada em 05/05/2006 pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Roberto Zilles - PIPGE/USP - Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. João Tavares Pinho - DEEC/UFPA

Prof. Dr. Adnei Melges de Andrade - PIPGE/USP

Prof. Dr. Naum Fraidenraich - UFPE

Prof. Dr. Eduardo Lorenzo Piguerras - Universidade Politécnica de Madri

Aos meus Pais, minha esposa Regina e meu filho Giovanni.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela graça de conceder-me este momento tão importante na minha vida, dando-me força e perseverança.

Ao meu orientador, professor Roberto Zilles, pela orientação no decorrer da tese, dedicação e amizade.

Ao meu co-orientador, professor João Tavares Pinho, pelas importantes sugestões que contribuíram para a elaboração da tese.

Aos professores Eduardo Lorenzo e Luis Narvarte e ao Engenheiro Fernando Poza do Instituto de Energia Solar (UPM-Madrid), que me acolheram em setembro de 2004, pondo à disposição sua instrumentação laboratorial.

Aos membros do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, Federico Morante, Cristina Fedrizzi, Joaquim Simões, André, Luciano, Luis Guilherme e Wilson Negrão, pela ajuda na elaboração deste trabalho e momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos fornecida por dois anos.

Ao apoio financeiro obtido do projeto IBIRITERMO/PETROBRAS/ANEEL P&D 2974-001/2003, que possibilitou a execução da tese.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia, pela infra-estrutura oferecida.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS . . . . .	ix
LISTA DE TABELAS . . . . .	xii
RESUMO . . . . .	xiii
ABSTRACT . . . . .	xiv
INTRODUÇÃO . . . . .	1
<b>1 USO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO</b>	<b>5</b>
1.1 Introdução . . . . .	5
1.2 Descrição técnica do conversor de frequência . . . . .	7
1.2.1 Métodos de controle de velocidade . . . . .	9
1.2.1.1 Bombas de deslocamento positivo . . . . .	9
1.2.1.2 Bombas centrífugas . . . . .	10
1.2.1.3 Seleção do tipo de bomba em aplicações fotovoltaicas . . . . .	10
1.2.1.4 Características das bombas . . . . .	10
1.2.2 Requisitos técnicos necessários . . . . .	11
1.3 Configuração do sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência (SBFCF) . . . . .	12
1.3.1 Dispositivo de proteção . . . . .	12
1.3.2 Parametrização do conversor de frequência (CF) . . . . .	15
<b>2 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA</b>	<b>19</b>
2.1 Introdução . . . . .	19
2.2 Sintonia do controlador proporcional integral derivativo (PID) . . . . .	24
2.2.1 Caracterização do processo . . . . .	25
2.2.1.1 Técnica da curva de reação . . . . .	25
2.2.1.2 Técnica da sensibilidade limite . . . . .	26
2.2.2 Métodos de sintonia . . . . .	26
2.2.2.1 Métodos Ziegler-Nichols . . . . .	26
2.2.2.2 Método de Cohen e Coon . . . . .	28
2.2.3 Análise comparativa dos métodos de sintonia de controladores PID . . . . .	28

	vii
2.2.3.1	Seleção do conjunto de parâmetros de sintonia . . . . . 32
2.2.3.2	Teste operacional . . . . . 34
2.3	Determinação e análise das estratégias de operação . . . . . 36
2.3.1	Estratégia de <i>set-point</i> fixo . . . . . 37
2.3.1.1	Determinação do valor de <i>set-point</i> ótimo . . . . . 37
2.3.2	Estratégia de <i>set-point</i> variável . . . . . 40
<b>3</b>	<b>AValiação Técnica e Econômica do Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Conversor de Frequência</b> . . . . . <b>45</b>
3.1	Introdução . . . . . 45
3.2	Avaliação técnica . . . . . 45
3.2.1	Instrumentação utilizada . . . . . 47
3.2.2	Descrição da bancada de ensaio . . . . . 48
3.2.2.1	Ajuste da bancada para realização de ensaios . . . . . 52
3.2.2.2	Análise operacional da bancada de ensaio . . . . . 52
3.2.3	Descrição dos ensaios realizados . . . . . 55
3.2.3.1	Análise dos resultados obtidos com a bancada de ensaio . . . . . 58
3.2.4	Avaliação em campo do sistema de bombeamento com conversor de frequência . . . . . 59
3.2.5	Análise dos dados obtidos em campo . . . . . 63
3.3	Avaliação econômica . . . . . 69
3.3.1	Figuras de mérito . . . . . 69
3.3.1.1	Custo do ciclo de vida ( <i>CCV</i> ) . . . . . 69
3.3.1.2	Custo do ciclo de vida anualizado ( <i>CCVA</i> ) . . . . . 70
3.3.1.3	Custo do volume bombeado ( <i>CVB</i> ) . . . . . 70
3.3.1.4	Determinação do volume bombeado por ano ( <i>VB<sub>a</sub></i> ) . . . . . 70
3.3.1.5	Comparação entre os valores - experimental x modelo . . . . . 71
3.3.2	Cenários . . . . . 72
3.3.2.1	Cenário I: uma reposição de equipamentos . . . . . 73
3.3.2.2	Cenário II: duas reposições de equipamentos . . . . . 75
3.3.2.3	Análise dos resultados . . . . . 76
	CONCLUSÕES . . . . . 77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . . 80

PUBLICAÇÕES REALIZADAS DURANTE O DOUTORADO . . . . . 84

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Aplicação do CF no acionamento de bomba (SANTOS et al., 2001) . . . . .	6
1.2	Diagrama de blocos de um conversor de frequência (CAPELLI, 2002). . . . .	7
1.3	IHM típico. . . . .	8
1.4	Variação da vazão e irradiância ao longo do dia. . . . .	11
1.5	Bombeamento fotovoltaico utilizando CF. . . . .	12
1.6	Valor de $I_c$ para a motobomba de 1/2 CV operando a 10 m. . . . .	13
1.7	Desempenho do relé de nível como dispositivo de proteção. . . . .	14
1.8	Painel de controle. . . . .	15
1.9	Diagrama de blocos em malha fechada. . . . .	16
1.10	Uso do divisor de tensão para extração do sinal de realimentação. . . . .	17
1.11	Sinal de realimentação obtido diretamente da saída analógica do CF. . . . .	17
1.12	Tipos de curva $V/f$ . . . . .	18
2.1	Volume bombeado - motobomba SQF 2.5-2 - helicoidal. . . . .	20
2.2	Volume bombeado - motobomba SQF 5A-6 - centrífuga. . . . .	20
2.3	Volume bombeado - motobomba SQF 2.5-2 - helicoidal. . . . .	21
2.4	Volume bombeado - motobomba SQF 5A-6 - centrífuga. . . . .	21
2.5	Curva de capacidade instantânea - motobomba helicoidal e centrífuga (20 m). . .	22
2.6	Curva de capacidade instantânea - motobomba helicoidal e centrífuga (30 m). . .	22
2.7	Curvas indicativas de utilização de motobombas de deslocamento positivo (A) e centrífugas (B). . . . .	23
2.8	Exemplo de resposta do processo a um degrau na variável de entrada. . . . .	25
2.9	Oscilações estáveis com período $P_{cr}$ . . . . .	26
2.10	Curva de reação. . . . .	27
2.11	Caracterização do processo para o SBFCF 1: (a) - curva de reação; (b) - oscilações estáveis. . . . .	29
2.12	Caracterização do processo para o SBFCF 2: (a) - curva de reação; (b) - oscilações estáveis. . . . .	29
2.13	Caracterização do processo para o SBFCF 3: curva de reação. . . . .	29
2.14	Variação no ponto de operação, <i>set-point</i> , devido a uma variação na irradiância. . .	32
2.15	Tempo de estabilização do sistema no valor de <i>set-point</i> especificado - SBFCF 1. . .	33
2.16	Tempo de estabilização do sistema no valor de <i>set-point</i> especificado - SBFCF 2. . .	33
2.17	Tempo de estabilização do sistema no valor de <i>set-point</i> especificado - SBFCF 3. . .	33

2.18	Variação de Vop, SBFCV. . . . .	34
2.19	Variação de Vop, SBFCF 1. . . . .	35
2.20	Variação de Vop, SBFCF 2. . . . .	35
2.21	Variação de Vop, SBFCF 3. . . . .	36
2.22	Problema de casamento de impedância. . . . .	37
2.23	Distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico para Belém. . . . .	39
2.24	Distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico para São Paulo. . . . .	39
2.25	Transferência do algoritmo para o CF. . . . .	41
2.26	Tensão de máxima potência versus potência máxima - gráfico obtido com dados horários anuais para a cidade de São Paulo. . . . .	41
2.27	Desempenho do algoritmo utilizado. . . . .	42
2.28	Desempenho do sistema operando com <i>set-point</i> fixo. . . . .	43
3.1	Curva de rendimento do conjunto motobomba. . . . .	46
3.2	Bancada de ensaio. . . . .	48
3.3	Detalhes da bancada de ensaio - reservatório, divisória, motobombas e tubos flexíveis. . . . .	49
3.4	Detalhes da bancada de ensaio - ponto de coleta do sinal de realimentação, válvula de retenção, manômetro e transdutor de pressão. . . . .	49
3.5	Vista do conversor de frequência utilizado - Micromaster 420 de 2 CV. . . . .	50
3.6	Detalhes da bancada de ensaio - medidor de vazão e pressostato. . . . .	50
3.7	Detalhes da bancada de ensaio - rotâmetros e registro. . . . .	51
3.8	Vista frontal da bancada de ensaio. . . . .	52
3.9	Variação de $H_T$ ao longo do dia - SBFCV. . . . .	53
3.10	Variação de $H_T$ ao longo do dia - SBFCF. . . . .	54
3.11	Ensaio realizados com a fonte de tensão cc 500 V/ 10 A. . . . .	55
3.12	Curvas de capacidade instantânea para a motobomba BMSAF407/1,0-8. . . . .	56
3.13	Ensaio realizados a sol real. . . . .	57
3.14	Volume bombeado e irradiação para um turno de bombeamento. . . . .	57
3.15	Eficiência média do conjunto CF+motobomba. . . . .	58
3.16	Montagem do gerador fotovoltaico. . . . .	61
3.17	Instalação da motobomba. . . . .	61
3.18	Instalação dos equipamentos de condicionamento de potência. . . . .	62
3.19	Configuração da sistema de aquisição de dados. . . . .	62
3.20	Vista do SBFCF instalado. . . . .	63
3.21	Ábaco de dimensionamento. . . . .	64

	xi
3.22 Indicação das variáveis monitoradas. . . . .	65
3.23 Volume bombeado diário de água. . . . .	65
3.24 Variação da irradiância e vazão - 19/01/2006. . . . .	66
3.25 Variação do nível do reservatório ao longo do dia. . . . .	67
3.26 Limitação da produção de água em função da capacidade máxima do reservatório. . . . .	68
3.27 Comparação entre os valores de irradiância e vazão - modelo x experimental. . . . .	71
3.28 CVEB e Eficiência média, Cenário I. . . . .	74
3.29 CVEB e Eficiência média, Cenário II. . . . .	76

## LISTA DE TABELAS

2.1	Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada na curva de reação (OGATA, 1993). . . . .	27
2.2	Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico, $K_{cr}$ , e no período crítico, $P_{cr}$ (OGATA, 1993). . . . .	27
2.3	Regra de determinação dos parâmetros de Cohen-Coon baseada na curva de reação (SPANDRI, 2003). . . . .	28
2.4	Características dos sistemas de bombeamento fotovoltaico. . . . .	28
2.5	Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 1. . . . .	30
2.6	Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 2. . . . .	30
2.7	Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 3. . . . .	30
3.1	Características técnicas das motobombas. . . . .	46
3.2	Características técnicas dos CF. . . . .	46
3.3	Características técnicas dos SBFCV. . . . .	46
3.4	Características técnicas do sistema de monitoração e aquisição de dados. . . . .	51
3.5	Resumo dos resultados obtidos para os sistemas de bombeamento ensaiados. . . . .	59
3.6	Principais características dos sistemas de bombeamento fotovoltaico - Pontal do Paranapanema - PRODEEM, fonte: (FEDRIZZI & ZILLES, 1998). . . . .	60
3.7	Características técnicas do sistema, antes e pós-revitalização. . . . .	60
3.8	Custo dos equipamentos - valores referentes a 03/05/2005 ( $US\$ 1 = R\$ 2,5$ ). . . . .	72
3.9	Custo do volume bombeado, $US\$/m^3$ . . . . .	73
3.10	Custo do volume específico bombeado, Cenário I. . . . .	74
3.11	Custo do volume específico bombeado, Cenário II. . . . .	75

## RESUMO

BRITO, A. U. **Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Freqüência Comercias para Acionar Bombas Centrífugas**. 2006. 83p. Tese de Doutorado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

O trabalho dedica atenção à otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de freqüência comerciais, para acionar bombas centrífugas para fins de bombeamento de água. Procedimentos para otimização deste novo tipo de configuração são propostos. As ações de otimização são avaliadas através de ensaios experimentais realizados em uma bancada desenvolvida para este propósito. A bancada desenvolvida permite simular poços de até 100 *m* de profundidade. Resultados da operação de um protótipo instalado em campo são apresentados. Os resultados da pesquisa comprovam que este novo tipo de configuração é confiável e economicamente viável, podendo ser adotada como uma solução universal para sistemas de bombeamento de água que utilizam motobombas com potência igual ou superior a  $1/2 CV$ .

Palavras-chave: conversor de freqüência, bombeamento de água, sistema de bombeamento fotovoltaico, energia solar.

## ABSTRACT

BRITO, A. U. **Optimization of Photovoltaic Pumping Systems that use Variable-speed Drive and Conventional Induction Motor with Centrifugal Pump**. 2006. 83 p. Thesis (doctor degree) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

This work is concerned with in the optimization of photovoltaic pumping systems that make use of a variable-speed drive and conventional induction motor with centrifugal pumps. Procedures for optimization of this new kind of configuration are proposed. The optimization actions are evaluated through experimental measurements accomplished in a test facility developed for this purpose. The developed test facility allows the simulation of wells with total head up to 100 *m*. Operation results of a prototype installed in the field are shown. The research results prove that this new kind of configuration is reliable and economically feasible, and could be adopted as a universal solution for water pumping systems with motors of 1/2 *HP* (metric) or higher.

Key-words: variable-speed drive, water pumping, photovoltaic pumping system, solar energy.

## INTRODUÇÃO

O bombeamento fotovoltaico teve grandes avanços desde suas primeiras aplicações na década de 1970. Utilizado principalmente na zona rural de países em desenvolvimento, tem como previsão de crescimento uma cifra da ordem de 150.000 sistemas até o ano de 2010 (EPIA<sup>1</sup> 1996 apud FEDRIZZI, 2003 p.18). Sua expansão ocorre, basicamente, pela redução dos preços de seus componentes, pelo aprimoramento tecnológico, pela iniciativa governamental de alguns países e por programas de Cooperação Internacional.

No caso do Brasil, já foram instalados inúmeros sistemas de bombeamento fotovoltaico, em sua maioria, fruto de iniciativas isoladas, tendo o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) como a iniciativa de maior expressão, em âmbito nacional, responsável pela instalação de 3.291 sistemas no período de 1994 a 2002, o que corresponde a um total de 1.590,7 kWp de potência instalada para esse uso final (FEDRIZZI, 2003).

Apesar de visualizar-se um panorama promissor no crescimento do bombeamento fotovoltaico, uma análise da real situação de projetos no campo revela a ocorrência de inúmeros problemas que podem comprometer sua difusão. Para se ter uma idéia, em 2003, oito anos após o início do PRODEEM, o Tribunal de Contas da União (TCU) elaborou um relatório de auditoria de natureza operacional e constatou inúmeras falhas no programa e emitiu uma série de recomendações e determinações, sendo todas acolhidas pelo Ministério de Minas e Energia (MME), entendendo tais recomendações como um roteiro sugestivo de trabalho para a reformulação do modelo de implementação do PRODEEM.

Surgiu então o Programa de Revitalização e Capacitação (PRC-PRODEEM), para o qual foi elaborado um guia com os procedimentos para revitalização de todos os sistemas instalados pelo PRODEEM, energético e bombeamento, (CERQUEIRA et al., 2004). No caso dos sistemas de bombeamento, estes guardam particularidades não encontradas nos sistemas energéticos. Por este motivo, elaborou-se um guia com orientações específicas para revitalização de sistemas de bombeamento (BRITO et al., 2004). Uma das metas do PRC-PRODEEM é a recuperação de todos os sistemas inoperantes até o ano de 2006, sendo proibida a aquisição de novas unidades até que esse processo seja concluído.

---

<sup>1</sup>EPIA. Photovoltaic in 2010. Commission of the European Communities - Directorate General for Energy. Summary Report, 1996

Nos sistemas a serem revitalizados, constatou-se que a maior parte dos problemas não ocorrem com o equipamento estritamente solar, o gerador fotovoltaico, mas com outros elementos do sistema de abastecimento de água. Exemplo disso é o que mostra um levantamento da situação de 801 sistemas de bombeamento instalados no Brasil pelo PRODEEM, onde foram registradas 337 ocorrências, sendo que 57 % das avarias ocorreram com os grupos motobomba, 41 % com os equipamentos de condicionamento de potência e apenas 2 % com os módulos fotovoltaicos (BEZERRA<sup>2</sup>, 2002 apud FEDRIZZI, 2003 p.40).

Para se ter uma idéia dos tipos de problemas ocorridos, os relatos de Galdino & Lima (2002) apresentam um histórico e a experiência obtida pelo Centro de Pesquisa em Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL) após diversos anos de desenvolvimento nas atividades do PRODEEM.

De acordo com Galdino & Lima (2002), durante a Fase I houve uma “alta taxa de falhas ocorridas em motores e controladores”. Com relação às Fases IV e Fase Bombeamento, relata-se que esses sistemas “vêm sofrendo severos problemas de corrosão nos eixos das bombas, que são rapidamente ( $\approx$  6 meses) destruídos pela água subterrânea salobrada encontrada em muitos locais do Brasil”. “Além disso, os sistemas de bombeamento de outro fornecedor, instalados desde a Fase I, vêm apresentando alta taxa de falhas, consideradas significativas e acima do esperado, atingindo muitas dezenas de sistemas”.

Esses problemas também são evidenciados em um relatório de avaliação dos sistemas de bombeamento fotovoltaico do Pontal do Paranapanema, estado de São Paulo (FEDRIZZI & ZILLES, 1998), onde se constatou que dos 13 sistemas instalados somente 5 estavam funcionando<sup>3</sup> adequadamente, sendo que os demais ou encontram-se inoperantes ou funcionando de forma insatisfatória. Com relação aos sistemas que estavam inoperantes, as causas são as relatadas por Galdino & Lima (2002), ou são por falha do conjunto motobomba ou então por falha dos dispositivos eletrônicos<sup>4</sup>.

Tais problemas de natureza técnica costumam levar tempo para serem solucionados e, muitas vezes, acabam sendo esquecidos e, em conseqüência, os sistemas abandonados. Uma das causas dessa demora é o fato desses sistemas serem obtidos na forma de *kits* no mercado internacional, o que implica em sistemas constituídos por componentes importados e de difícil aquisição no mercado nacional, tornando assim a reposição das partes defeituosas um processo árduo e oneroso. Isto sem contar que, após a implementação, a responsabilidade de

---

<sup>2</sup>BEZERRA, P. Bombeamento de Água Fotovoltaico - Problemas na Implantação de um Programa de Utilização Ampla: PRODEEM. VIII Seminário Ibero-Americano de Energia Solar - Abastecimento de Água em Áreas Rurais Mediante Bombeamento Fotovoltaico, Recife, 2002

<sup>3</sup>Atualmente 12 sistemas estão desativados.

<sup>4</sup>Seguidor do ponto de máxima potência, inversor, conversor cc-cc, etc.

manutenção do sistema costuma ser repassada à comunidade local, tornando o problema mais crítico, pois essas dificilmente possuem uma estrutura bem organizada, capaz de levar adiante tais procedimentos, principalmente quando se trata da aquisição de materiais importados.

Esta situação sustenta os esforços para utilização de equipamentos mais padronizados como os desenvolvidos para aplicações com a rede elétrica convencional. Estes apresentam uma tecnologia muito mais madura e estabelecida do que os dedicados exclusivamente a aplicações com a fonte de energia fotovoltaica. Uma solução que satisfaz esta premissa consiste em substituir os tradicionais equipamentos de condicionamento de potência de um sistema de bombeamento fotovoltaico por um conversor de frequência (CF)<sup>5</sup>, o qual irá proporcionar o uso de motobombas convencionais.

O CF possui internamente um controlador proporcional integral derivativo (PID), o qual permite que o equipamento seja programado para operar em sintonia com as particularidades de um sistema de bombeamento fotovoltaico. No entanto, por ser o CF um equipamento destinado à aplicação com a rede elétrica convencional e não com uma fonte de energia variável com o tempo, como é o caso da geração fotovoltaica, é necessário a realização de estudos sobre a otimização e a confiabilidade de seu uso em um sistema de bombeamento fotovoltaico.

Atualmente, constata-se a existência de uma lacuna importante no conhecimento do uso de CF em aplicações desse tipo, pois poucos são os trabalhos realizados dentro e fora do Brasil que os avaliam de forma sistemática. As referências mais relevantes sobre o tema são: Alonso-Abella et al. (1997), Alonso-Abella et al. (1998), Alonso-Abella et al. (2000), Alonso-Abella et al. (2003), Eyra et al. (2004) e Narvarte et al. (2005).

Neste sentido, este trabalho visa responder à pergunta: a nova configuração de sistema de bombeamento fotovoltaico, onde se substitui o dispositivo de condicionamento de potência e o conjunto motobomba dedicados exclusivamente a aplicações com a fonte de energia fotovoltaica, por um conversor de frequência e uma motobomba dedicados a aplicações com a rede elétrica convencional, é uma alternativa tecnicamente confiável e economicamente viável?

Com base nesta pergunta, formulou-se a hipótese de que um sistema de bombeamento fotovoltaico, formado por um conversor de frequência e uma motobomba convencional, representa uma alternativa para incremento da confiabilidade e apresenta rendimento global semelhante ao de um sistema de bombeamento fotovoltaico composto por equipamentos dedicados exclusivamente a este tipo de aplicação.

---

<sup>5</sup>Este equipamento também é conhecido no mercado com a denominação de inversor de frequência; VSD: Variable speed drive; VFD: variable frequency drive.

Para estudo e análise da hipótese formulada, foram adquiridos diversos CF e motobombas de diferentes fabricantes e faixas de potência que, depois de parametrizados, foram avaliados em laboratório. Após essa etapa, um sistema foi selecionado para avaliação em condições reais de operação.

O trabalho está composto por três capítulos. No capítulo 1 é abordado o uso do CF em aplicações de bombeamento fotovoltaico; esse capítulo tem como objetivo apresentar o procedimento lógico para correta programação do equipamento. O capítulo 2 está direcionado à operação otimizada da configuração. No capítulo 3 são realizadas a avaliação técnica e econômica da configuração, cujo objetivo é a comprovação da hipótese formulada. O trabalho é finalizado com as conclusões, onde são relatadas as contribuições da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

À guisa de informação, quando for mencionado sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência (SBFCF), trata-se de um sistema que utiliza motobomba convencional com conversor de frequência parametrizado para operar com energia solar fotovoltaica; e quando for mencionado sistema de bombeamento fotovoltaico convencional (SBFCV), trata-se de sistema que utiliza motobomba comercial desenvolvida especialmente para operar com energia solar fotovoltaica, o qual conta com o dispositivo de condicionamento de potência incorporado na própria carcaça do motor ou em compartimento externo.

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## USO DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

### 1.1 Introdução

O inversor ou conversor de frequência (CF) é um equipamento eletrônico que permite obter potência com tensão e frequência variáveis (AZCÁRRAGA, 1998). Esse equipamento se tornou uma excelente opção técnico-econômica para controle de velocidade de motores elétricos de corrente alternada (ca), particularmente para o motor de indução trifásico (MIT). Controlar a velocidade de um motor de indução trifásico tem como principal objetivo a conservação de energia, pois, ao diminuir a rotação do motor através de um CF, a potência consumida cai na mesma proporção que a rotação, ou seja, em 50 % da rotação a potência consumida é de 50 %, ou até menor, dependendo do tipo de carga acionada (WEQ, 2003).

A variação de velocidade nas aplicações industriais é indispensável, em função da necessidade de otimização dos processos industriais, como por exemplo, na adequação da velocidade de uma linha de produção em função da demanda e no controle da vazão ou pressão de um sistema de bombeamento.

A figura 1.1 ilustra uma aplicação típica do conjunto CF-MIT no controle do fluxo de vazão de uma motobomba do tipo hidráulica. O ajuste de velocidade do motor de indução trifásico permite reduzir o consumo de energia durante o processo de operação da bomba (SANTOS et al., 2001).

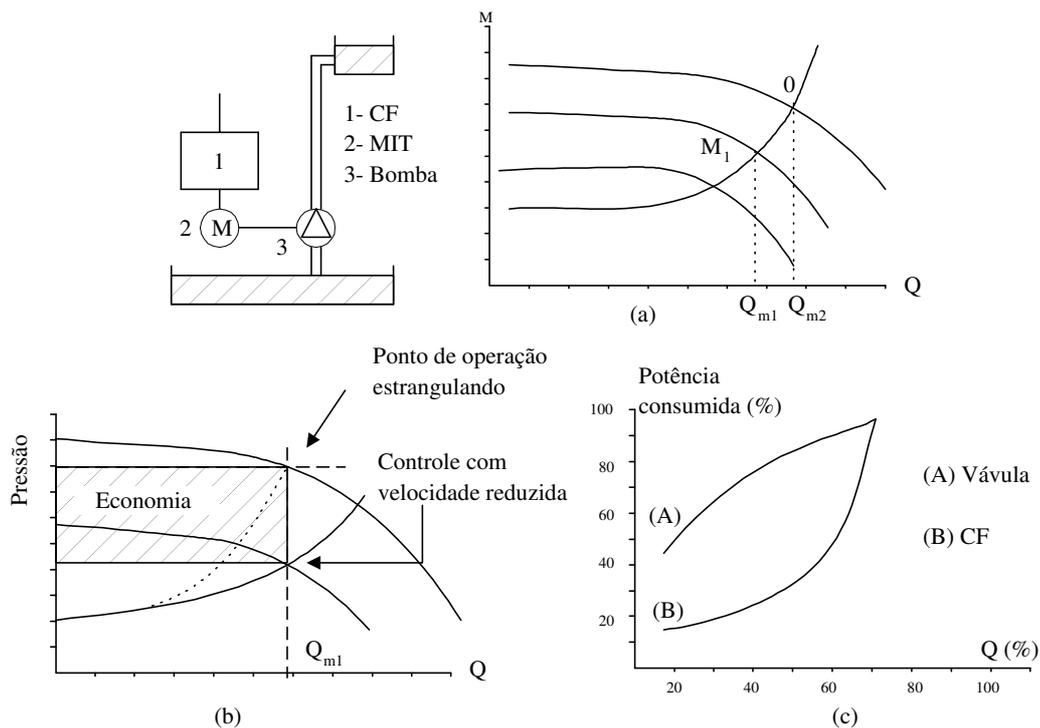


Figura 1.1: Aplicação do CF no acionamento de bomba (SANTOS et al., 2001)

Além do aspecto econômico, devido à redução do consumo de energia, o sistema de controle por variação de velocidade da bomba apresenta as seguintes vantagens em relação ao sistema de controle por válvula (SANTOS et al., 2001):

- melhora na eficiência do sistema pelo ajuste da característica da bomba com a característica do sistema;
- limitação da corrente de partida;
- partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- simplificação da rede de dutos através da eliminação das válvulas de estrangulamento;
- aumento da vida útil da bomba devido à eliminação do desequilíbrio interno de pressão, fonte causadora do desgaste mecânico;
- utilização de motores de indução trifásicos que requerem menor manutenção e apresentam baixo custo de aquisição e reparação;
- método simples de realimentação para sinais de controle externo, tais como: 0 – 10 V ou 4 – 20 mA, provenientes de transmissores de pressão, vazão, nível, ou de telemetria.

## 1.2 Descrição técnica do conversor de frequência

Como já mencionado, o CF é um equipamento que, através de um dispositivo eletrônico e a partir da tensão e frequência constantes da rede elétrica, fornece um sistema trifásico de tensão e frequência variáveis. A função do CF é regular a velocidade de um motor elétrico mantendo seu torque constante ou variável. Foram desenvolvidos para trabalhar com motores em corrente alternada (ca), pois, conforme se observa na equação 1.1, ao se variar a frequência de alimentação, a velocidade de rotação, assumindo que  $p$  seja fixo, varia na mesma proporção.

$$N = 120 \cdot \frac{f}{p}, \quad (1.1)$$

onde:  $N$  é a rotação em  $rpm$ ,  $f$  é a frequência de alimentação em  $Hz$  e  $p$  é o número de pólos da máquina. Apesar de cada fabricante utilizar sua própria tecnologia, o diagrama de blocos ilustrado na figura 1.2 descreve bem grande parte dos CF encontrados atualmente no mercado.

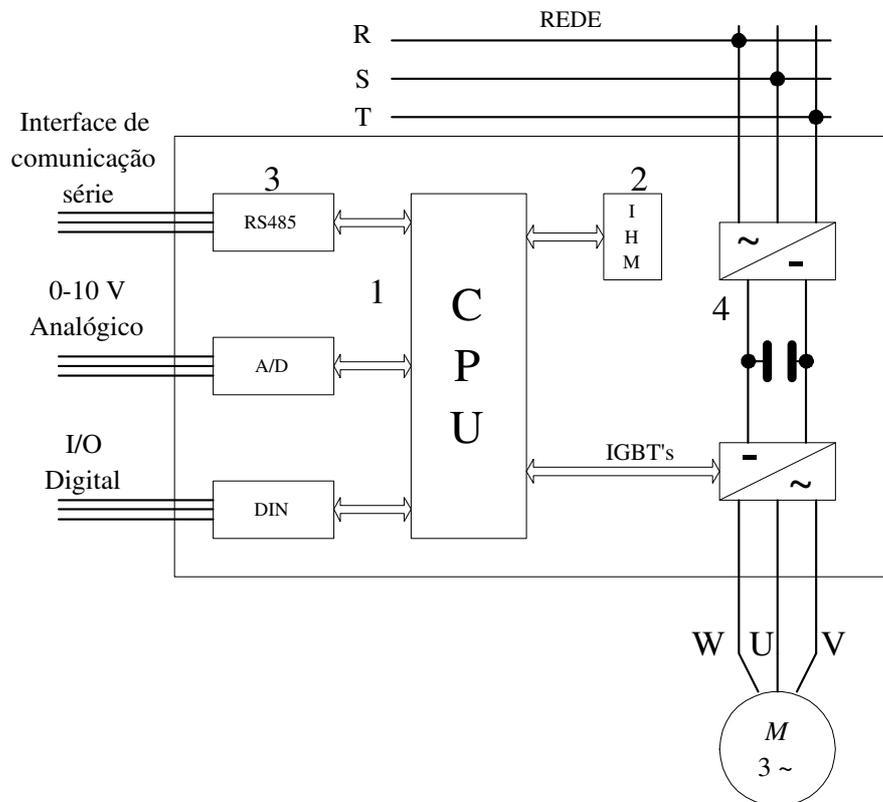


Figura 1.2: Diagrama de blocos de um conversor de frequência (CAPELLI, 2002).

De acordo com a figura 1.2, o CF pode ser dividido em quatro partes principais:

1. **CPU**<sup>1</sup>: 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 (CAPELLI, 2002).
2. **IHM**<sup>2</sup>: é através desse dispositivo que se pode visualizar o que ocorre no CF, e parametrizá-lo de acordo com a aplicação. Na figura 1.3, é apresentado um IHM típico com suas respectivas funções (CAPELLI, 2002).

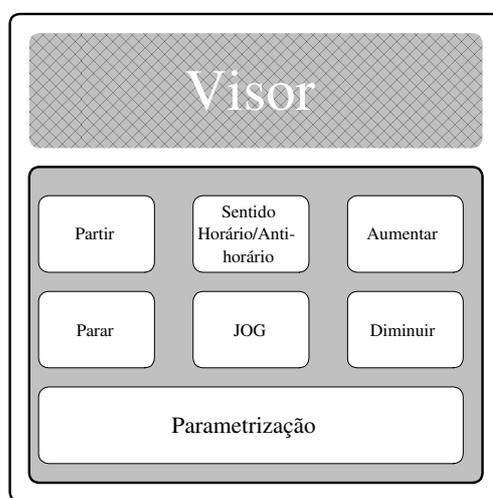


Figura 1.3: IHM típico.

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 cc) 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.

<sup>1</sup>Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)

<sup>2</sup>Interface homem máquina

### 1.2.1 Métodos de controle de velocidade

Os CF são dotados de dois métodos de controle (vetorial e escalar<sup>3</sup>) que podem ser utilizados para acionamento de diferentes tipos de carga.

1. Controle escalar -  $V/f$ : é normalmente utilizado em aplicações monomotores<sup>4</sup> ou multi-motores<sup>5</sup> e aplicações a torque constante ou variável. Um CF com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com uma precisão de até 0,5 % da rotação nominal para sistemas sem variação de carga, e de 3 % a 5 % com variação de carga de 0 a 100 % do torque nominal. Com estas características, o inversor de frequência escalar é mais utilizado em sistemas que não requerem alto desempenho. Este apresenta também um custo relativo menor quando comparado com um CF mais sofisticado, como por exemplo, o que utiliza controle vetorial
2. Controle vetorial: é utilizado em aplicações monomotores e aplicações a torque constante. Sua utilização se faz necessária quando se desejam obter uma alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de torque e velocidade para uma faixa extensa de condições de operação. Contudo, sua utilização necessita que se conheça ou calcule alguns parâmetros específicos do motor tais como: resistência do estator, resistência do rotor, indutância do estator, indutância do rotor, indutância de magnetização e outros.

Como se pode observar, o CF pode ser utilizado para acionamento tanto de cargas que necessitam de torque constante quanto das que necessitam de torque variável; com isto é possível a utilização de ambos os tipos de bombas existentes no mercado: deslocamento positivo (torque constante) e centrífugas (torque variável).

#### 1.2.1.1 Bombas de deslocamento positivo

Bombas de deslocamento positivo é um termo genérico para caracterizar bombas onde o fluido na entrada do sistema tem aproximadamente a mesma direção que no ponto de saída do mesmo. As bombas de deslocamento positivo podem ser de vários tipos: helicoidal, diafragma, e pistão. Em aplicações de bombeamento fotovoltaico as mais utilizadas são a helicoidal e de diafragma.

---

<sup>3</sup>Alguns CF possuem apenas o método de controle escalar.

<sup>4</sup>Um motor por inversor.

<sup>5</sup>Mais de um motor por inversor, desde que a somatória de corrente não ultrapasse a nominal do CF.

### 1.2.1.2 Bombas centrífugas

As bombas centrífugas possuem um dispositivo rotatório dotado de pás chamado rotor, o qual transfere movimento de rotação para a massa de água contida na carcaça; desta forma a água é forçada para fora da carcaça através das aberturas de saída, devido a força centrífuga. O vácuo criado, em consequência, possibilita a pressão atmosférica a forçar mais água para dentro da carcaça através da abertura de entrada. Esse processo continua enquanto perdurar o movimento do rotor, e enquanto for possível a alimentação de água. Essas bombas podem conter diferentes números de estágios, os quais são empilhados sequencialmente para obter aumento de pressão, ou seja, quanto maior o número de estágios maior será a altura manométrica de operação dessas bombas.

### 1.2.1.3 Seleção do tipo de bomba em aplicações fotovoltaicas

Com relação às bombas para aplicações de pequena potência (até 400 W<sub>p</sub>), as mais utilizadas são as de deslocamento positivo de diafragma ou, ainda, bombas centrífugas mono ou de poucos estágios. Para aplicações de grande potência, as bombas utilizadas são as centrífugas multiestágios e de deslocamento positivo helicoidais (FEDRIZZI, 2003).

As bombas centrífugas são indicadas para grandes vazões e menores alturas manométricas, pois para alturas manométricas elevadas esse tipo de bomba apresenta redução na eficiência. Já para grandes alturas manométricas e menores vazões, são mais indicadas as bombas de deslocamento positivo, principalmente do tipo helicoidal (FEDRIZZI, 2003).

### 1.2.1.4 Características das bombas

Uma característica importante, e que cabe ser discutida, é que devido às bombas de deslocamento positivo apresentarem torque de arranque superior ao das bombas centrífugas, para uma mesma carga e potência do motor, acredita-se que seu uso em aplicações de bombeamento fotovoltaico tem como consequência o dimensionamento de um gerador fotovoltaico de maior capacidade (MAYER et al., 1995). Contudo, isto acaba sendo um equívoco, pois a potência de arranque do motor não está relacionada somente ao seu torque mas sim, ao produto do torque pela velocidade de rotação ( $P = \frac{2\pi}{60} \cdot T \cdot n$ ) onde,  $P$  é a potência do motor (W),  $T$  é o torque (Nm) e  $n$  é a velocidade de rotação (rpm).

No caso da bomba de deslocamento positivo, apesar do torque de arranque do motor ser maior que o da bomba centrífuga no início de seu ciclo de bombeamento, a operação se dá com baixa velocidade de rotação, de tal forma que o produto ( $T \cdot n$ ) é menor que o da bomba centrífuga, ou seja, a bomba de deslocamento positivo necessita de menos potência

para iniciar seu ciclo de bombeamento.

### 1.2.2 Requisitos técnicos necessários

Para que o CF possa ser utilizado em aplicações de bombeamento fotovoltaico, é necessário que este possua como característica técnica o controlador proporcional integral derivativo (PID) incorporado ao seu circuito. Este dispositivo permite realizar a tarefa de variar automaticamente, proporcionalmente à irradiância, a relação  $V/f$  da forma de onda de alimentação da motobomba. Dessa forma, se a potência disponível do gerador fotovoltaico, para um determinado nível de irradiância, não for suficiente para manter a motobomba funcionando em sua frequência nominal (50 ou 60 Hz), o CF reduz a relação  $V/f$  para um valor permissível. Isto tem como objetivo manter o torque que a motobomba necessita para continuar operando; porém, neste caso, o volume de água bombeado é inferior àquele quando ela opera em seu ponto nominal. O resultado desta operação é representado na figura 1.4.

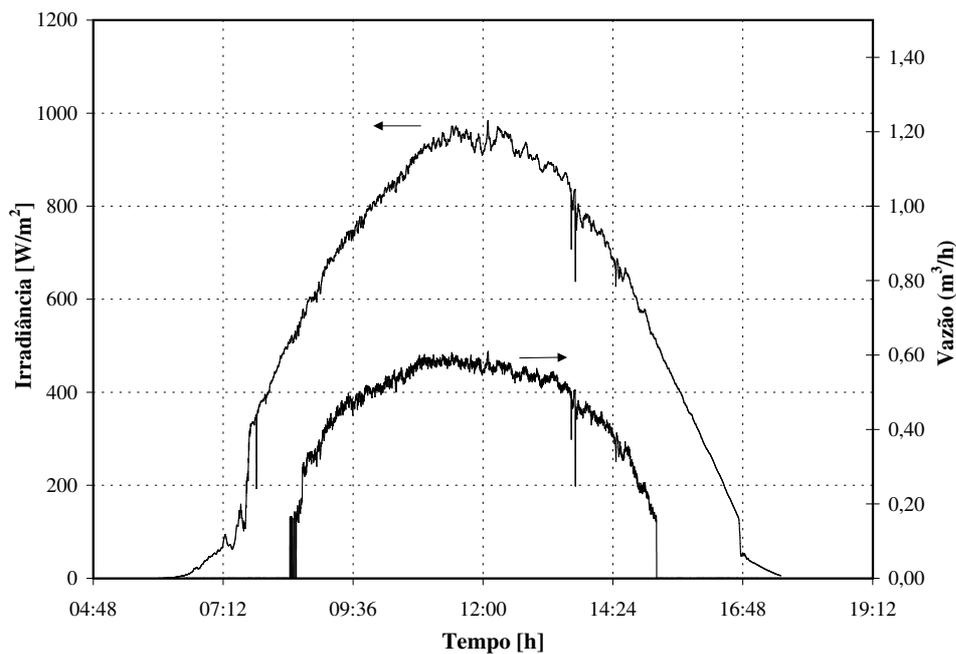


Figura 1.4: Variação da vazão e irradiância ao longo do dia.

Para simplificar o entendimento faz-se referência no texto somente ao controlador PID que é o caso genérico onde todas as ações de controle estão presentes; proporcional, integral e derivativa. Contudo, o controlador pode ser do tipo proporcional (P), proporcional integral (PI) ou proporcional derivativo (PD). O tipo de controlador mais apropriado para o uso do conversor de frequência em aplicação de bombeamento fotovoltaico será apresentado no capítulo 2.

## 1.3 Configuração do sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência (SBFCF)

A configuração do SBFCF consiste de um subsistema de geração fotovoltaico conectado diretamente a um CF alimentando um conjunto motobomba, que pode ser do tipo centrífuga ou de deslocamento positivo. Entretanto, devido à maior utilização de motobombas centrífugas em sistemas de bombeamento de água, este trabalho estuda a otimização de um subsistema de geração fotovoltaica com um CF alimentando um conjunto motobomba do tipo centrífuga, como mostra a figura 1.5.

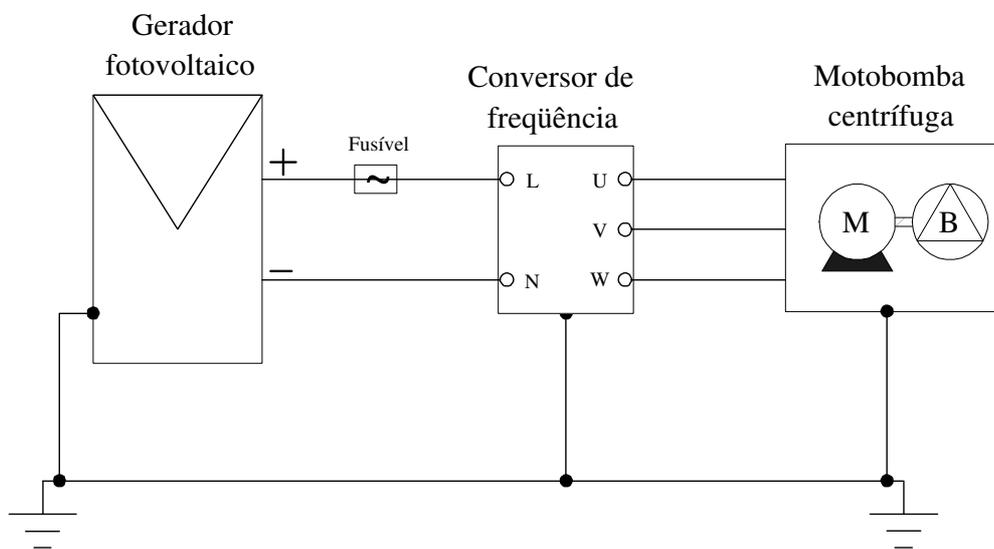


Figura 1.5: Bombeamento fotovoltaico utilizando CF.

No SBFCF, todo o controle do sistema é realizado pelo CF; logo, é preciso “informá-lo” em que condições de trabalho ele irá operar. Essa tarefa é justamente a sua parametrização. Uma outra característica é que diferentemente do SBFCV, esta nova configuração não vem acompanhada de um dispositivo de proteção que evita seu funcionamento quando o reservatório encontra-se completamente cheio ou falta de água no poço (motobomba operando em seco). Estas questões são abordadas nos próximos itens.

### 1.3.1 Dispositivo de proteção

Como dispositivo de proteção do sistema pode-se utilizar relés de nível. Tais equipamentos necessitam de uma fonte de alimentação de  $24 V_{cc}$  ( $-15\% + 10\%$ ), que pode ser proporcionada por um módulo fotovoltaico com potência suficiente para alimentar os dois relés, que em conjunto demandam um total de  $1 W$  ( $-15\% + 10\%$ ). Esta potência deve ser entregue pelo módulo fotovoltaico quando o nível de irradiância está próximo dos  $150 W/m^2$ , o qual está abaixo do menor valor de irradiância necessário para a motobomba iniciar seu ciclo de

bombeamento para todos os sistemas testados. Este valor de irradiância onde as motobombas iniciam seu ciclo de bombeamento é denominado de valor crítico ( $I_c$ ). Dentre os sistemas testados, o que apresentou menor valor crítico foi um sistema com uma motobomba de 1/2 CV operando a 10 m; para este sistema, o valor de  $I_c$  foi de  $300 \text{ W/m}^2$  (figura 1.6)

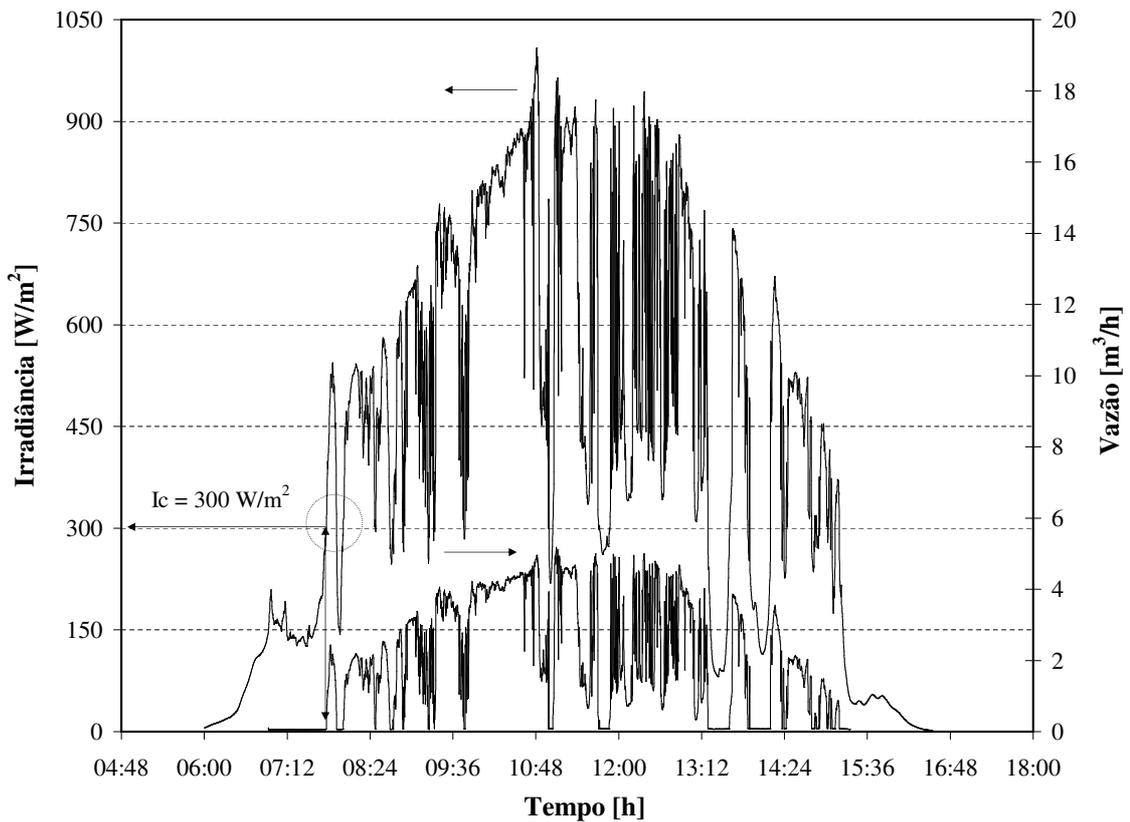


Figura 1.6: Valor de  $I_c$  para a motobomba de 1/2 CV operando a 10 m.

Outra opção é a utilização de uma bóia de nível para controle do nível do reservatório e apenas um relé para proteção da motobomba, caso esta venha a operar em seco. Esta opção pode ser implementada com um módulo de menor potência. Na figura 1.7, é apresentado o desempenho dos relés para um turno completo de bombeamento em um dia muito nublado. A partir desses resultados conclui-se que os relés são confiáveis para a aplicação, pois mantêm a operação contínua do SBFCF.

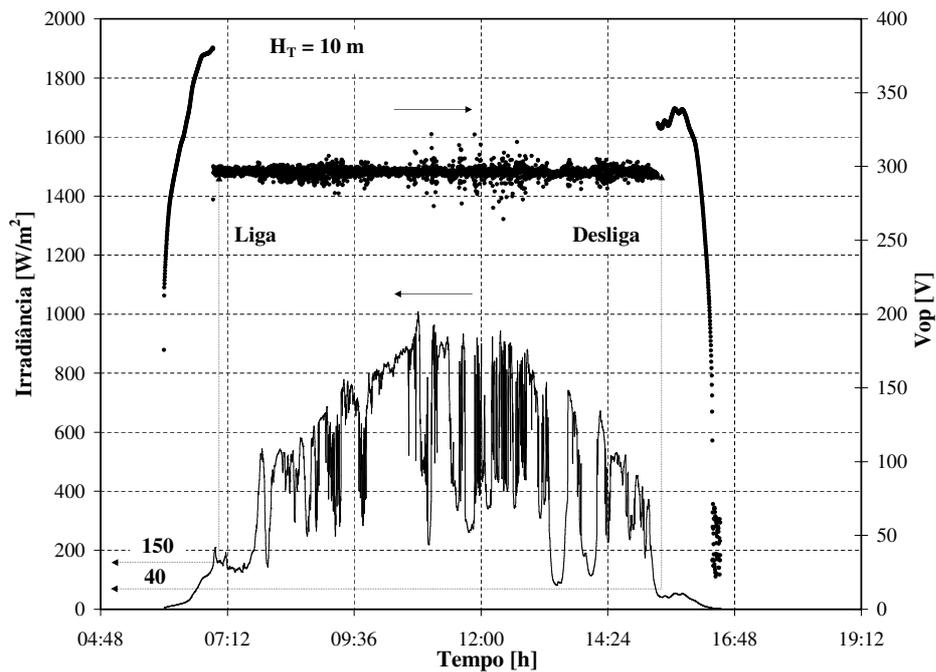


Figura 1.7: Desempenho do relé de nível como dispositivo de proteção.

A característica de funcionamento dos relés de nível agregou uma vantagem ao SBFCF, que não se observa em um SBFCV. Esta vantagem refere-se ao não chaveamento sucessivo do CF e, conseqüentemente, da motobomba, no nascer e pôr do Sol, quando o nível de irradiância é insuficiente para o sistema entrar ou permanecer em operação. Este processo de chaveamento do CF tem como conseqüência a redução de sua vida útil e, conseqüentemente, da motobomba.

No gráfico da figura 1.7 este fato está bem ilustrado, pois, observando a curva da tensão de operação do sistema ( $V_{op}$ ) e analisando o período do nascer do Sol, observa-se que o valor de  $V_{op}$  corresponde ao valor da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico, ou seja, constata-se que o CF está desligado. A partir do momento em que o nível de irradiância alcança um valor em torno de  $150 \text{ W/m}^2$ , os relés já dispõem de energia suficiente para ativar o CF, sendo que este nível de irradiância é também suficiente para evitar o chaveamento do CF.

O painel de controle com o esquema de ligação dos relés e demais componentes do SBFCF é apresentado na figura 1.8. Nesta figura, pode-se ver também a inclusão de um ventilador para refrigeração do CF. Sua utilização é opcional, devendo ser adotada nos casos em que a convecção natural não for suficiente.

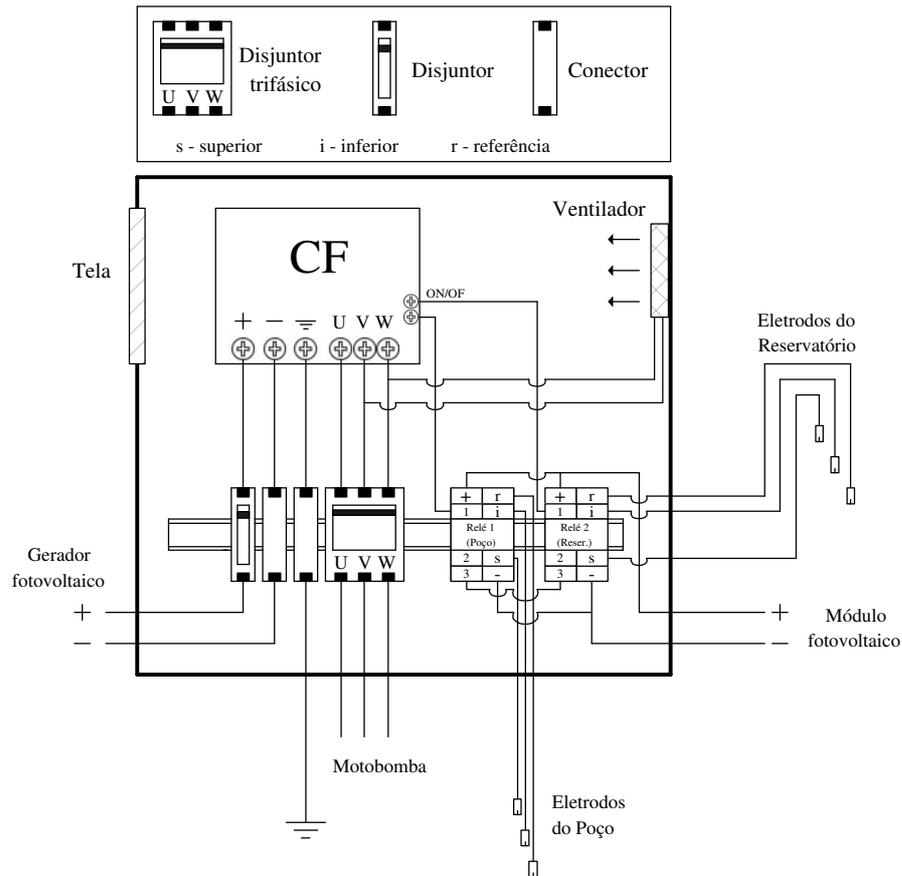


Figura 1.8: Painel de controle.

### 1.3.2 Parametrização do conversor de frequência (CF)

Apresentar um processo de parametrização que sirva para todos os CF não é possível, pois o endereço dos parâmetros e sua lógica de programação mudam de fabricante para fabricante, assim como para uma nova versão do mesmo produto. Dada esta especificidade, apresenta-se aqui apenas o procedimento lógico de como deve ser parametrizado cada CF, pois estando isto assimilado, o técnico, dispondo do manual de operação do produto, será capaz de realizar a parametrização do mesmo.

O procedimento consiste em fazer o CF operar em malha fechada, ou seja; possuir um *set-point* programado pelo usuário, receber um sinal de realimentação do sensor de medição da variável do processo e possuir um sistema de controle de modo a manter a variável do processo no valor desejado (figura 1.9). Este controle é realizado pelo controlador PID, que deve estar habilitado por um dos parâmetros do CF. O PID atua sobre o erro do sistema (diferença entre os sinais de *set-point* e realimentação), de forma a mantê-lo próximo de zero, o que se efetiva indiretamente pela variação da frequência de operação do CF.

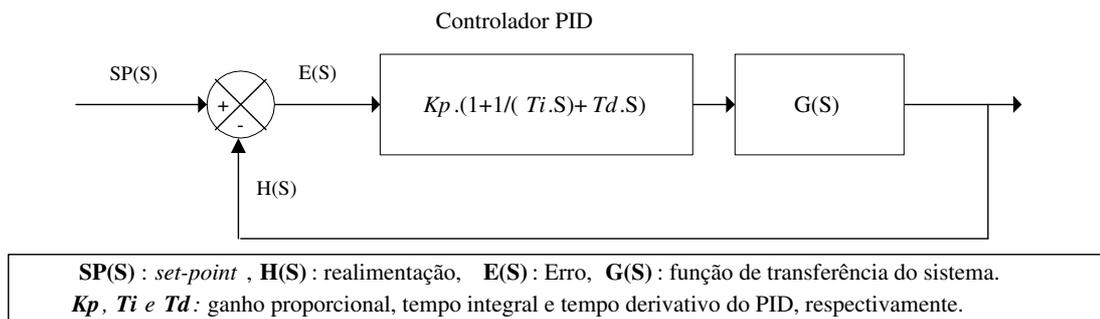


Figura 1.9: Diagrama de blocos em malha fechada.

Para esta aplicação, a variável de processo a ser controlada deve ser a tensão do barramento cc, que, por sua vez, é a mesma tensão de alimentação do CF. Esta variável foi escolhida porque o CF é programado para fornecer à motobomba sua frequência nominal de operação. Ou seja, se a potência que o gerador fotovoltaico estiver entregando não for suficiente para a motobomba operar nessa frequência, isto ocasionará uma queda de tensão no barramento cc, que resultará no desarme do equipamento por erro de subtensão.

No entanto, tendo a tensão do barramento cc como variável de processo, este fato não acontece, pois à medida em que o CF for aumentando sua frequência de operação, que por sua vez ocasiona a diminuição da tensão do barramento cc, o controlador PID atua reduzindo a frequência de operação do CF sempre que a tensão no barramento cc ficar abaixo do valor de *set-point* especificado. Porém, para que o PID atue desta forma, o parâmetro referente a sua ação de controle deve ser selecionado para a opção reverso.

Os valores dos sinais de *set-point* e realimentação são fornecidos para o CF em forma de porcentagem (%) da variável de controle. Assim sendo, se a faixa de valores escolhida para esses sinais for de 0 a 100 %, 0 % corresponderá a uma tensão de 0 V, e 100 % à máxima tensão programada no CF, permitida para o barramento cc. Para a aplicação em estudo, esse deve ser um valor maior que a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico ( $V_{oc}$ ). Em geral, recomenda-se um valor em torno de  $1,25V_{oc}$  sobre as condições de teste padrão (STC) (ALONSO-ABELLA et al., 2003).

Diferentemente do sinal de *set-point*, onde existe um parâmetro para selecionar o seu valor, o sinal de realimentação é proveniente de um sensor que monitora o comportamento do sistema, o qual fornece um sinal analógico de tensão entre 0 a 10 V em cc, que para o CF equivale à faixa de 0 a 100%. Este sinal de realimentação deve ser conectado a uma das entradas analógicas do CF, a qual deverá estar habilitada para receber esse nível de tensão. Este sensor pode ser um simples divisor de tensão, tal como é especificado na figura 1.10.

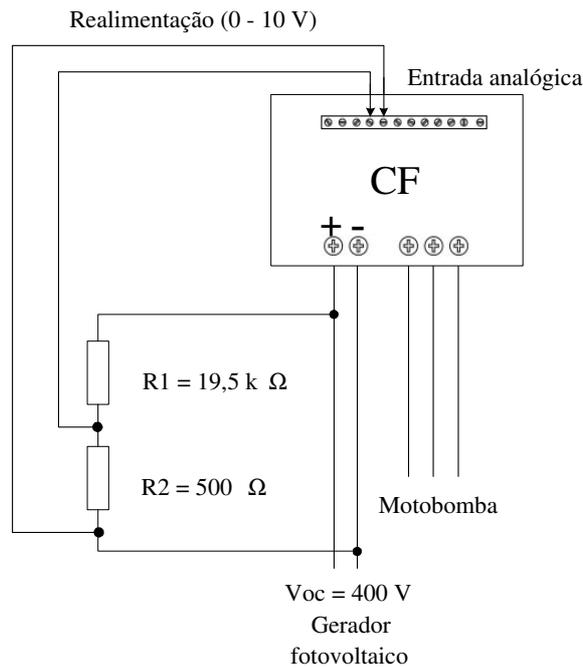


Figura 1.10: Uso do divisor de tensão para extração do sinal de realimentação.

Contudo, em alguns CF este sinal de realimentação pode ser obtido diretamente a partir de uma de suas saídas analógicas, assim como indicado na figura 1.11(a), a qual deve ser programada para fornecer o referido nível de tensão (0 a 10 V em cc), sendo este proporcional à tensão do barramento cc. É válido lembrar que, caso o sensor utilizado não seja um divisor de tensão e este forneça um sinal de realimentação somente na forma de corrente (0 a 20 mA) e a entrada analógica receber somente sinal de tensão, deverá ser previsto um resistor de 500  $\Omega$  para ser conectado na entrada analógica (ver figura 1.11(b)).

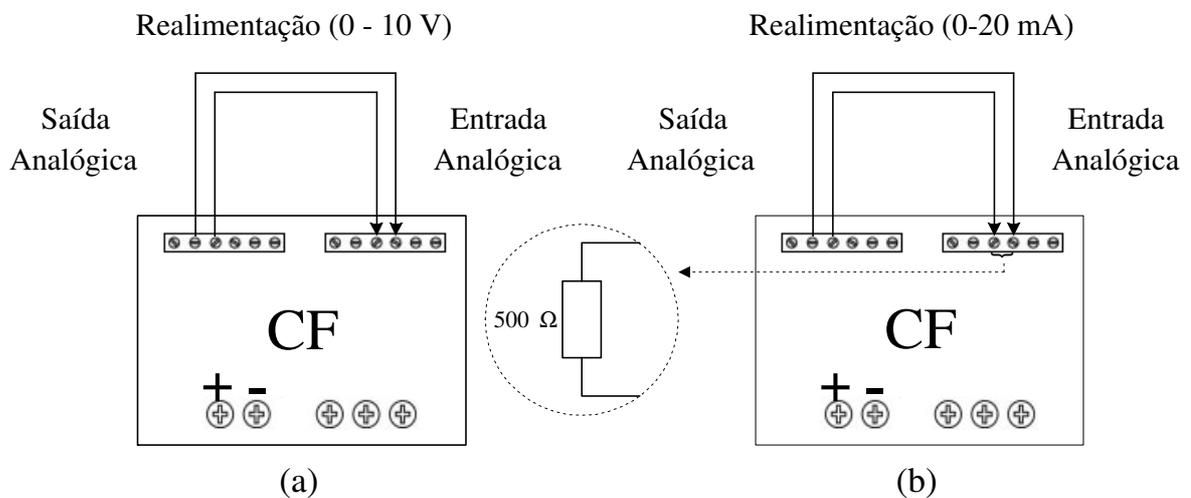


Figura 1.11: Sinal de realimentação obtido diretamente da saída analógica do CF.

A próxima etapa consiste em selecionar a opção de controle escalar e ajustar os parâmetros da curva  $V/f$  para operar bombas centrífugas, tal como ilustrado na figura 1.12(a), sendo que, para alguns CF isto não é necessário, pois possuem a opção de controle escalar quadrático, que é próprio para aplicações com bombas centrífugas, figura 1.12(b). Em seguida, deve-se ajustar os tempos da rampa de aceleração e desaceleração no menor valor possível (0,1 s, por exemplo).

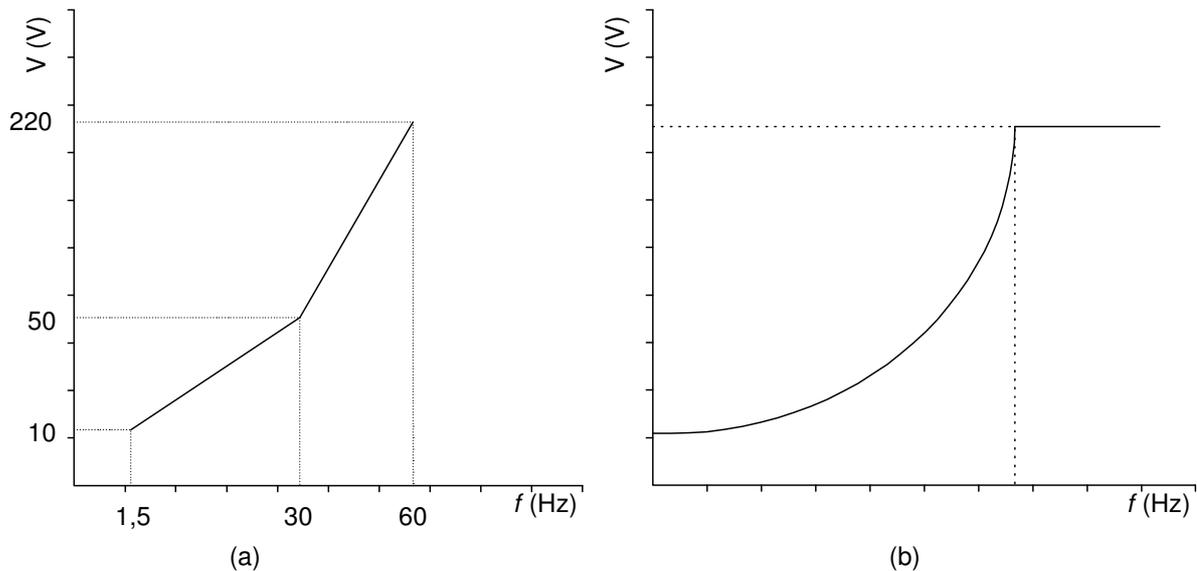


Figura 1.12: Tipos de curva  $V/f$ .

Somente para o tempo de aceleração, o valor de 0,1 s nem sempre é possível, pois pode ocasionar um elevado sobre-sinal no momento da partida, resultando no desarme do equipamento por erro de subtensão. Assim sendo, deve-se selecionar o menor valor que permita ao sistema entrar em operação. O ideal é que este valor seja menor que 10 s, caso contrário, o sistema pode operar com muita oscilação (dificuldade para operar em um valor constante de tensão).

A parametrização é finalizada com a sintonia do controlador PID. Esta sintonia, refere-se aos valores que devem ser atribuídos a cada um de seus parâmetros<sup>6</sup>. Este assunto é abordado com maior profundidade no capítulo 2, onde são apresentados os procedimentos para operação otimizada do SBFCF.

<sup>6</sup>Ganho proporcional ( $Kp$ ), tempo integral ( $Ti$ ) e tempo derivativo ( $Td$ )

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os procedimentos necessários para a operação otimizada do SBFCF. Estes procedimentos visam ao casamento entre as diferentes características de cada elemento do sistema, para obtenção do máximo volume de água bombeado ao menor custo.

Com este propósito e sabendo-se que o CF é o equipamento responsável pela interface entre a geração intermitente de energia e a aplicação, deve-se adotar procedimentos que possibilitem a otimização de sua operação em SBFCF. Adicionalmente, deve-se selecionar o conjunto motobomba mais adequado às condições de contorno de determinada aplicação. Um SBFCF com o CF adequadamente otimizado ofertará um menor volume de água se o conjunto motobomba for inadequado para as condições de contorno da aplicação.

Para exemplificar, considerem-se dois sistemas de bombeamento fotovoltaico, ambos com 900  $W_p$  de potência instalada. Um dos sistemas possui uma motobomba helicoidal de 1/3  $CV$ , modelo SQF 2.5-2, e o outro, uma motobomba centrífuga de 1/3  $CV$ , modelo SQF 5A-6. Ambos os sistemas foram ensaiados para dois casos de alturas manométricas total, 20  $m$  e 30  $m$ . Os quais foram realizados em uma bancada de ensaio desenvolvida para este propósito cuja descrição será apresentada no capítulo 3. Para o caso dos sistemas operando a 20  $m$ , os resultados são apresentados na figuras 2.1 e 2.2.

Nesta situação, observa-se que, apesar da motobomba helicoidal operar em um dia com maior irradiação, o volume bombeado é inferior ao da motobomba centrífuga. Isto acontece devido à motobomba helicoidal operar com torque elevado e baixa velocidade de rotação. Como a demanda de potência cresce linearmente com a velocidade até alcançar o valor nominal de operação (figura 2.5) que, para 20  $m$ , é obtido na potência de 300 W (1/3

da potência instalada), ocorre assim muita perda por limitação.

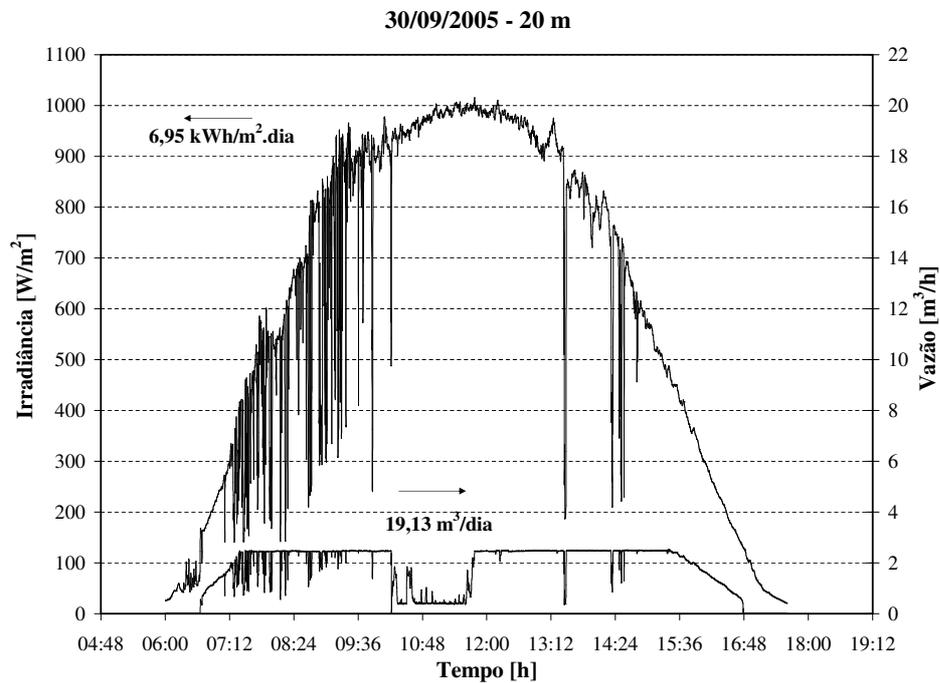


Figura 2.1: Volume bombeado - motobomba SQF 2.5-2 - helicoidal.

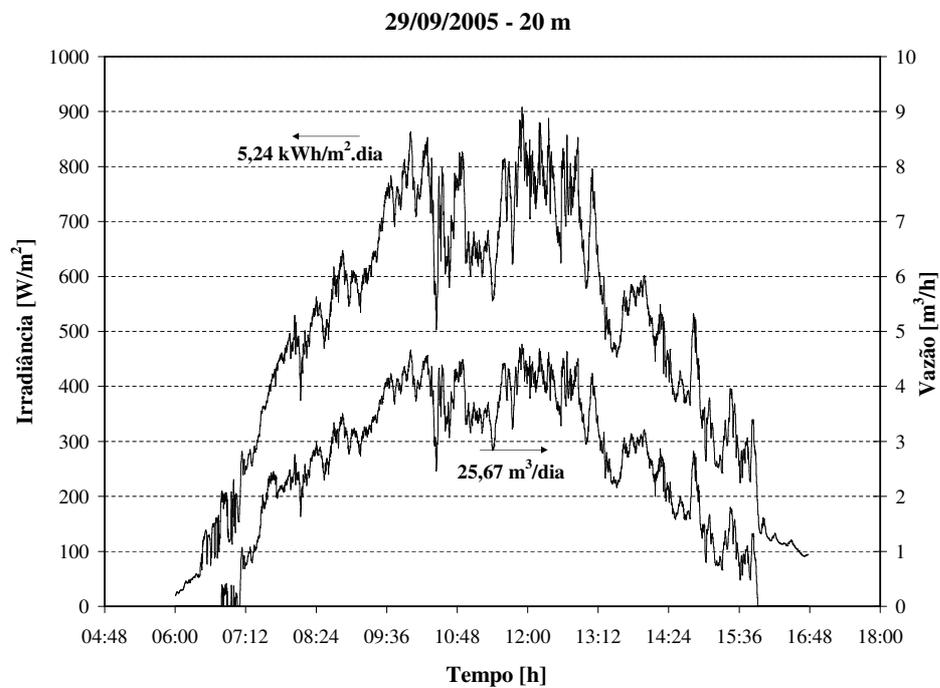


Figura 2.2: Volume bombeado - motobomba SQF 5A-6 - centrífuga.

Quanto ao segundo caso, em que os sistemas foram ensaiados a 30 m, os resultados são apresentados nas figuras 2.3 e 2.4.

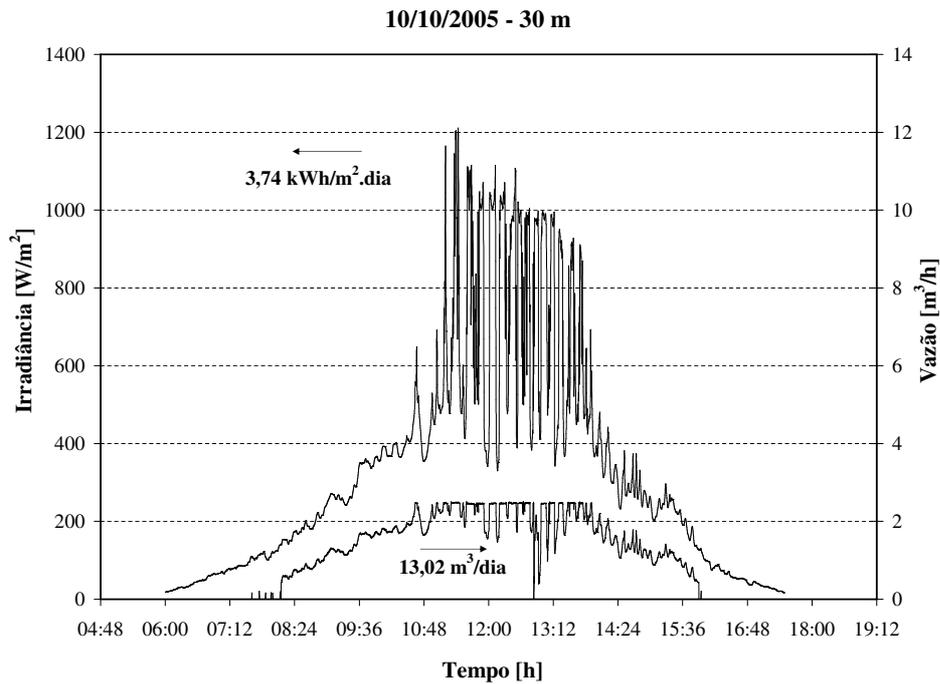


Figura 2.3: Volume bombeado - motobomba SQF 2.5-2 - helicoidal.

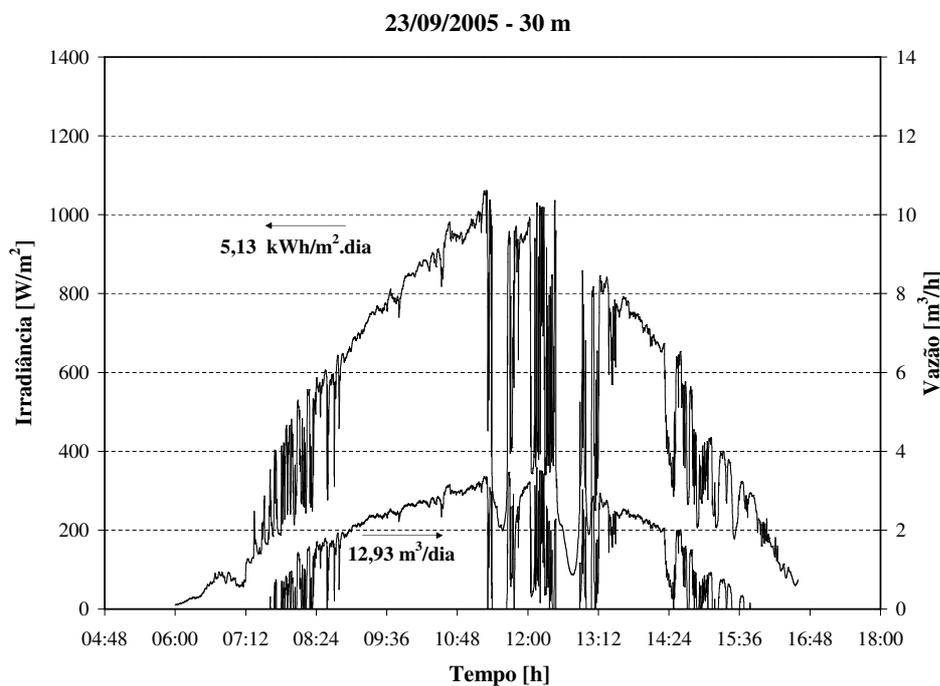


Figura 2.4: Volume bombeado - motobomba SQF 5A-6 - centrífuga.

Nesta situação, observa-se que, apesar da motobomba helicoidal operar em um dia com menor irradiação, o volume bombeado é superior ao da motobomba centrífuga, pois neste caso, a perda por limitação é sensivelmente menor quando comparada ao caso anterior. Nos gráficos das figuras 2.5 e 2.6 têm-se as curvas de capacidade instantânea para os dois sistemas ensaiados, onde é possível observar o efeito da limitação de potência na motobomba helicoidal.

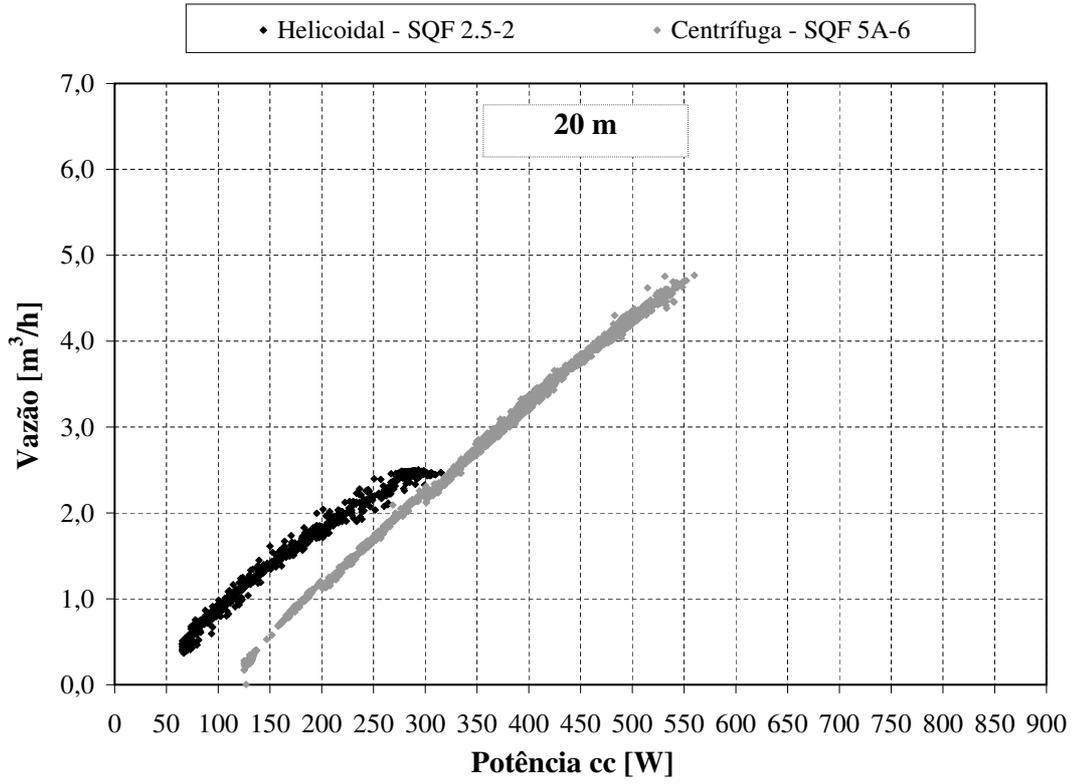


Figura 2.5: Curva de capacidade instantânea - motobomba helicoidal e centrífuga (20 m).

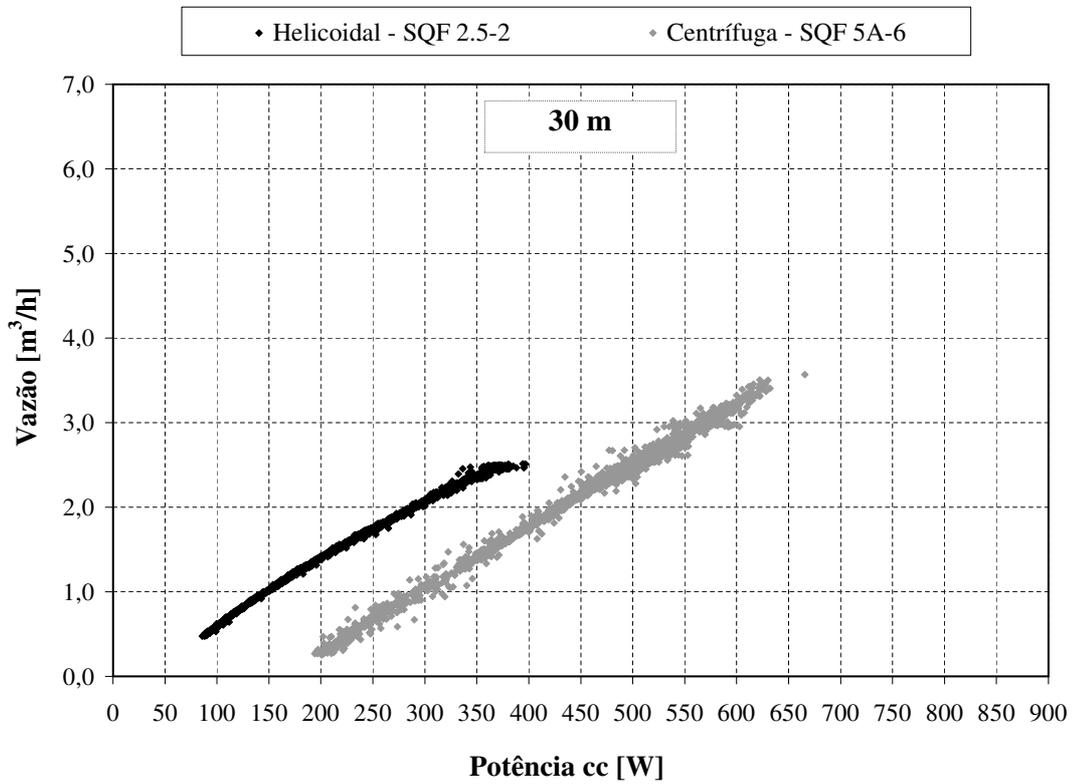


Figura 2.6: Curva de capacidade instantânea - motobomba helicoidal e centrífuga (30 m).

A partir dos gráficos das figuras 2.5 e 2.6 pode-se observar que a motobomba helicoidal necessita menor potência que a motobomba centrífuga para iniciar seu ciclo de bombeamento. Nota-se, também, que a motobomba centrífuga apresenta maior capacidade de vazão instantânea que a motobomba helicoidal. Contudo, à medida em que a altura manométrica de operação aumenta, observa-se a variação na curva de capacidade instantânea da motobomba centrífuga, ou seja, aumento da potência necessária para esta iniciar seu ciclo de bombeamento e redução do valor instantâneo de vazão quando esta opera em seu ponto nominal sendo que, para a motobomba helicoidal, esse efeito é reduzido. Todavia, para a motobomba helicoidal, na medida em que esta é posta a operar em altura manométrica mais elevada, ela necessita de mais potência para operar em seu ponto nominal.

Estes fatos confirmam as recomendações presentes na literatura sobre o uso desses tipos de motobombas, onde se recomenda a utilização de motobombas centrífugas para aplicações onde se necessita grande volume diário de água a baixa altura manométrica total e motobombas helicoidais para situações contrárias. Neste sentido, é comum os fabricantes de motobombas disponibilizarem um ábaco para orientar projetistas a selecionarem a motobomba mais apropriada, tal como o apresentado na figura 2.7.

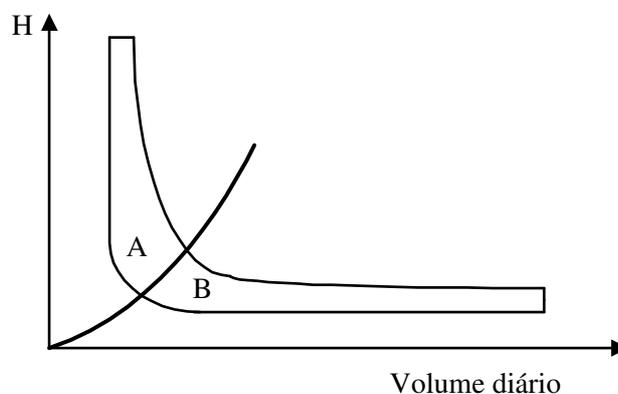


Figura 2.7: Curvas indicativas de utilização de motobombas de deslocamento positivo (A) e centrífugas (B).

Observa-se na figura 2.7 que existe uma região de fronteira onde o uso de ambas as motobombas seria recomendado, helicoidal ou centrífuga. Contudo, nesta condição, teoricamente, é mais apropriado o uso da motobomba helicoidal caso esta venha a ser instalada em regiões com alto índice de nebulosidade, haja vista que esta necessita de menor potência para iniciar seu ciclo de bombeamento. No entanto, isto é um caso a ser estudado com maior profundidade.

Com os exemplos apresentados pode-se constatar que a influência da motobomba na operação otimizada do sistema deve-se apenas a sua correta seleção. Neste sentido, os procedimentos apresentados neste capítulo objetivam somente a otimização do CF, pois isto resultará na operação otimizada do SBFCF.

Entende-se que o CF estará otimizado quando for capaz de atender a dois requisitos: primeiro, ser confiável para a aplicação; segundo, prover a máxima velocidade possível à motobomba, ou seja, a maior vazão, dentro da disponibilidade de potência do gerador fotovoltaico.

O primeiro requisito é satisfeito quando o CF mantém a estabilidade do sistema, a qual depende, exclusivamente, da sintonia ótima do controlador PID; caso isso não seja possível, sempre que houver variação brusca<sup>1</sup> de irradiância sobre a superfície do gerador fotovoltaico, o sistema deixa de operar.

Com relação ao segundo requisito, este será satisfeito quando o CF, dentro de suas limitações, for capaz de proporcionar à motobomba o máximo de potência disponível pelo gerador fotovoltaico. Isto está relacionado à estratégia de operação do sistema.

## 2.2 Sintonia do controlador proporcional integral derivativo (PID)

Na literatura há uma diversidade de métodos de sintonia de controladores PID; contudo, independentemente do método a ser utilizado, é necessário o conhecimento da função de transferência do sistema. Todavia, se o sistema é tão complicado a ponto de inviabilizar a determinação analítica da função de transferência, é mais viável a utilização de métodos práticos com os quais a função de transferência é obtida experimentalmente.

O processo de obtenção experimental da função de transferência do sistema é denominado de caracterização do sistema, que, para a aplicação em estudo, é a opção mais indicada, pois permite que pessoas não tão conhecedoras da teoria de controle sejam capazes de realizar essa tarefa. Contudo, a determinação de qual método de sintonia de controladores PID deve ser utilizado vai depender de como será realizada a caracterização do processo e se esta satisfaz os requisitos necessários para a aplicação do método.

Levando em consideração esses propósitos, foram avaliados, para um SBFCF, alguns métodos de caracterização do processo e de sintonia de controladores PID, verificando se que, por intermédio desses, é possível obter um conjunto de parâmetros de sintonia ( $Kp$ ,  $Ti$  e  $Td$ ) que permita a boa operação do sistema.

---

<sup>1</sup>Rápida mudança da situação de céu claro para céu nublado

## 2.2.1 Caracterização do processo

A caracterização do processo consiste em representar a função de transferência do sistema por modelos aproximados, normalmente utilizando modelos lineares.

### 2.2.1.1 Técnica da curva de reação

Esta técnica é bastante conhecida, particularmente por sua simplicidade. O procedimento baseia-se na aplicação de uma entrada tipo degrau no processo em malha aberta, sendo a resposta determinada de “curva de reação” (ALMEIDA et al., 1999), tal como apresentado na figura 2.8. A variável de entrada tipo degrau é gerada parametrizando o CF da seguinte forma: (1) desabilitar o controlador PID; (2) ajustar os tempos das rampas de aceleração e desaceleração para 0,0 s; (3) selecionar a frequência mínima do CF para o valor desejado, na qual o sistema permanece em operação estável.

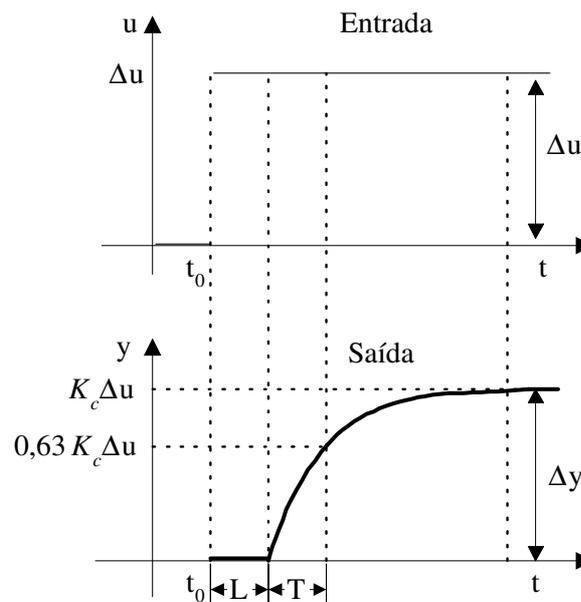


Figura 2.8: Exemplo de resposta do processo a um degrau na variável de entrada.

Da figura 2.8, três parâmetros são importantes para representar o modelo:

1. Ganho do processo ( $K_c$ ): expressa quanto se altera a variável de saída para cada unidade de variação da variável de entrada. O ganho é uma razão dimensional e pode ser calculado pela equação 2.1. Todavia, quando as variáveis envolvidas ( $\frac{\Delta y}{\Delta u}$ ) forem de escalas diferentes, o valor de  $K_c$  deve ser normalizado em função das mesmas.

$$K_c = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2.1)$$

2. Tempo de retardo ( $L$ ): tempo que o processo leva para começar a responder à variação na variável de entrada.

3. Constante de tempo ( $T$ ): tempo que o processo demora, uma vez iniciada a variação, para chegar aos 63% da variação total final.

### 2.2.1.2 Técnica da sensibilidade limite

Nesta técnica, as características do processo são representadas em termos do ganho crítico,  $K_{cr}$ , e do período crítico,  $P_{cr}$ . Essas variáveis são determinadas da seguinte forma: estando o sistema em malha fechada estabelece-se no controlador o tempo integral,  $Ti = \infty$ , e o tempo derivativo,  $Td = 0$ ; em seguida incrementa-se o ganho proporcional,  $Kp$ , até o processo entrar em oscilações estáveis. O ganho onde isto ocorre é  $K_{cr}$  e o período correspondente é  $P_{cr}$  (LEVINE, 1996) (figura 2.9). Se a saída não exibir oscilações estáveis para nenhum dos valores que  $Kp$  possa assumir, então esta técnica não se aplica (OGATA, 1993).

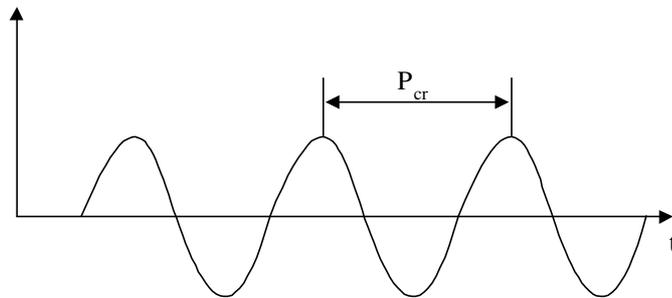


Figura 2.9: Oscilações estáveis com período  $P_{cr}$ .

## 2.2.2 Métodos de sintonia

Com o conhecimento das técnicas de caracterização do processo, apresentam-se a seguir os métodos de sintonia de controladores PID.

### 2.2.2.1 Métodos Ziegler-Nichols

Ziegler e Nichols propuseram dois métodos para determinação dos valores do ganho proporcional,  $Kp$ , do tempo integral,  $Ti$ , e do tempo derivativo,  $Td$ . O primeiro método consiste de equações derivadas a partir dos parâmetros da curva de reação. No entanto, sua aplicação é mais indicada para curva de reação na forma de um “S” e que atenda o seguinte critério:  $0,1 < \frac{L}{T} < 1$ . Para esta curva, os parâmetros, tempo de retardo,  $L$ , e constante de tempo,  $T$ , são determinados passando-se uma reta tangente no ponto de inflexão da curva, assim como ilustrado na figura 2.10.

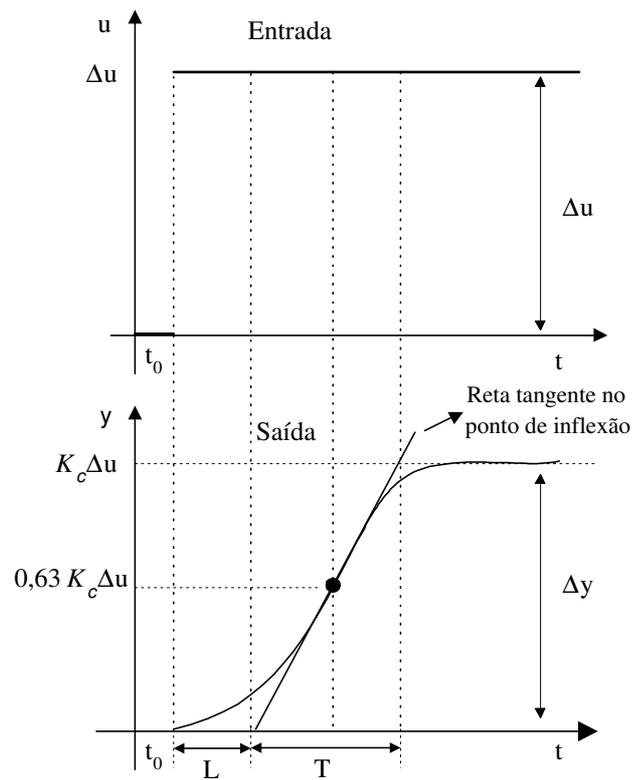


Figura 2.10: Curva de reação.

Tendo-se obtido experimentalmente os valores de  $L$  e  $T$ , pode-se recorrer à tabela 2.1 para determinar os valores dos parâmetros do controlador PID.

Tabela 2.1: Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada na curva de reação (OGATA, 1993).

Controlador	fórmulas		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$(1/K_c) \cdot (T/L)$	$\infty$	0
PI	$(0,9/K_c) \cdot (T/L)$	$3,33 \cdot L$	0
PID	$(1,2/K_c) \cdot (T/L)$	$2 \cdot L$	$L/2$

Quanto ao segundo método, este consiste de equações derivadas a partir da caracterização do processo pela **técnica da sensibilidade limite**, onde os parâmetros são determinados em termos do ganho crítico,  $K_{cr}$ , e do período crítico,  $P_{cr}$  (tabela 2.2).

Tabela 2.2: Regra de determinação dos parâmetros de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico,  $K_{cr}$ , e no período crítico,  $P_{cr}$  (OGATA, 1993).

Controlador	fórmulas		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 \cdot K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45 \cdot K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} \cdot P_{cr}$	0
PID	$0,6 \cdot K_{cr}$	$0,5 \cdot P_{cr}$	$0,125 \cdot P_{cr}$

### 2.2.2.2 Método de Cohen e Coon

Assim como no primeiro método de Ziegler-Nichols, as equações formuladas para este método são obtidas com base nos parâmetros da curva de reação (tabela 2.3). Este método apresenta bons resultados quando a resposta do sistema se assemelha à da figura 2.8.

Tabela 2.3: Regra de determinação dos parâmetros de Cohen-Coon baseada na curva de reação (SPANDRI, 2003).

Controlador	fórmulas		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{K_c} \cdot \frac{T}{L} \cdot \left(1 + \frac{L}{3T}\right)$	$\infty$	0
PI	$\frac{1}{K_c} \cdot \frac{T}{L} \cdot \left(0,9 + \frac{L}{12T}\right)$	$L \cdot \frac{(30+3 \cdot \frac{L}{T})}{(9+20 \cdot \frac{L}{T})}$	0
PID	$\frac{1}{K_c} \cdot \frac{T}{L} \cdot \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T}\right)$	$L \cdot \frac{(32+6 \cdot \frac{L}{T})}{(13+8 \cdot \frac{L}{T})}$	$L \cdot \frac{4}{(11+2 \cdot \frac{L}{T})}$

### 2.2.3 Análise comparativa dos métodos de sintonia de controladores PID

Para realização desta análise utilizou-se como referência três CF, conforme apresentado na tabela 2.4. Para cada sistema, o controlador PID do CF utilizado foi sintonizado por todos os métodos apresentados. Nas figuras 2.11 a 2.13 são apresentados os resultados da caracterização do processo para cada um dos sistemas.

Tabela 2.4: Características dos sistemas de bombeamento fotovoltaico.

	GFV <sup>a</sup>	MB <sup>b</sup>	CF	AMT <sup>c</sup>
SBFCF 1	1,5 kWp	1 CV	Micromaster 420	20 m
SBFCF 2	1,5 kWp	1 CV	VS-606V7	20 m
SBFCF 3	1,5 kWp	1 CV	CFW08Plus	20 m

<sup>a</sup> Gerador fotovoltaico;

<sup>b</sup> Motobomba centrífuga;

<sup>c</sup> Altura manométrica total.

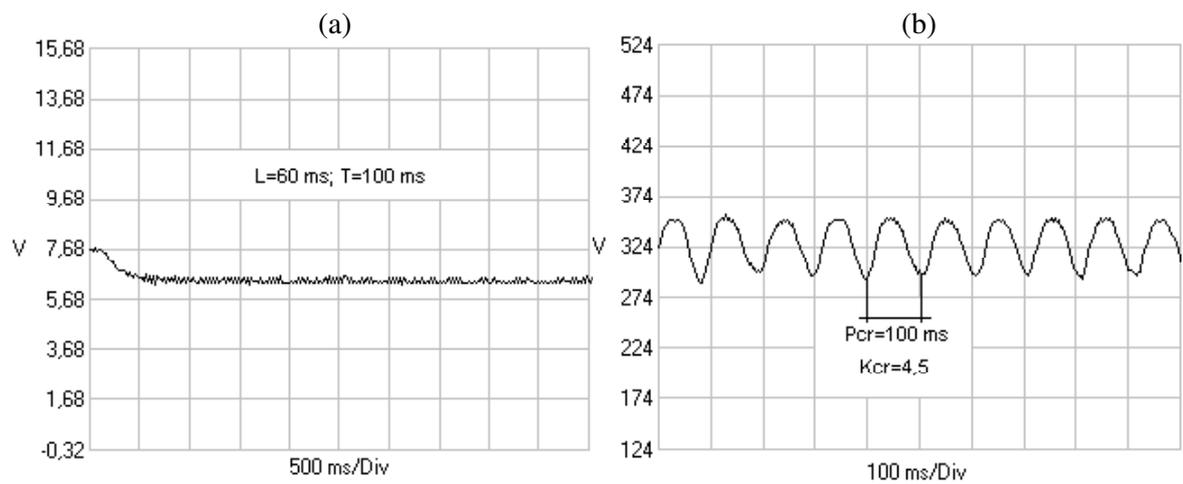


Figura 2.11: Caracterização do processo para o SBFCF 1: (a) - curva de reação; (b) - oscilações estáveis.

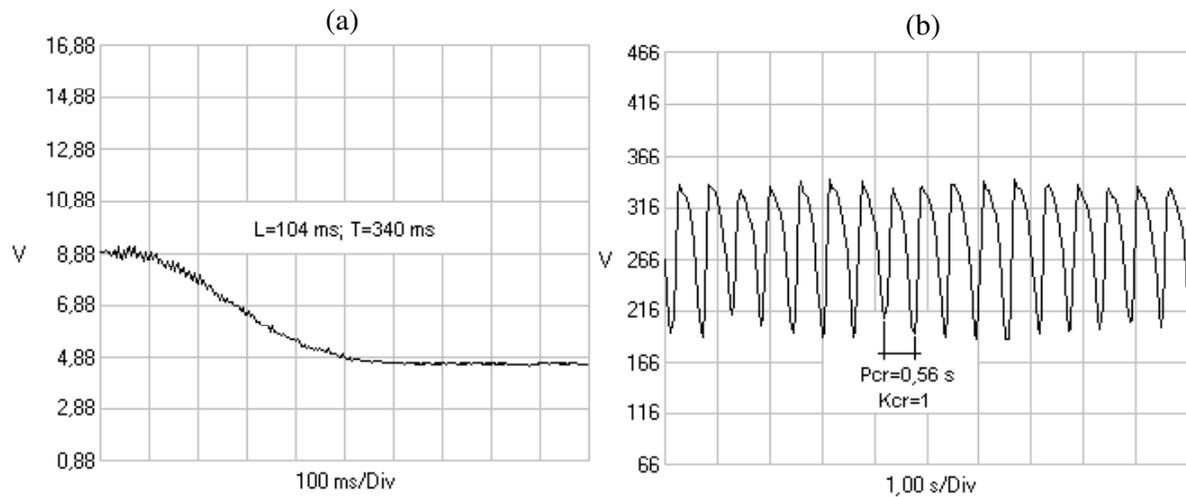


Figura 2.12: Caracterização do processo para o SBFCF 2: (a) - curva de reação; (b) - oscilações estáveis.

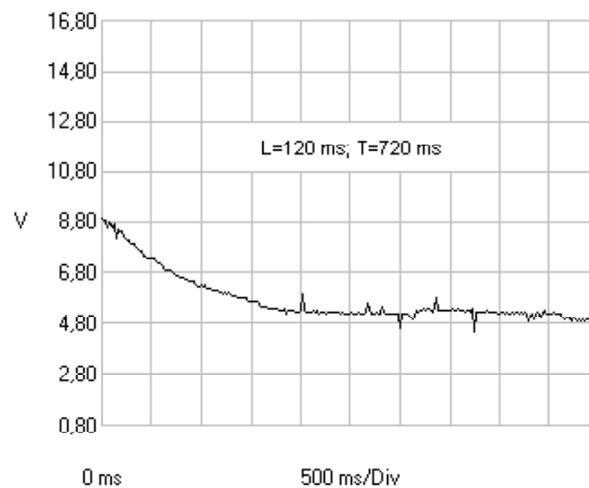


Figura 2.13: Caracterização do processo para o SBFCF 3: curva de reação.

Especificamente para o SBFCF 3, não foi possível a caracterização do processo pelo método da sensibilidade limite, dado que nesse sistema o máximo valor admitido para o parâmetro referente ao tempo integral do CF utilizado não é suficientemente grande para ser considerado infinito. Neste caso, não foi possível anular a ação de controle integral  $1/(Ti.S)$ , necessário para a aplicação do método.

Concluída a etapa de caracterização do processo, foram aplicados os métodos de sintonia para obtenção dos valores dos parâmetros do controlador PID dos três CF mostrados nas tabelas 2.5, 2.6 e 2.7.

Tabela 2.5: Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 1.

	1º Método de Ziegler-Nichols			2º Método de Ziegler-Nichols			Método de Cohen e Coon		
	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td
P	1,067	$\infty$	0,000	2,250	$\infty$	0,000	1,280	$\infty$	0,000
PI	0,960	0,200	0,000	2,025	0,087	0,000	1,013	0,091	0,000
PID	1,280	0,120	0,030	2,700	0,052	0,013	1,582	0,120	0,020

Tabela 2.6: Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 2.

	1º Método de Ziegler-Nichols			2º Método de Ziegler-Nichols			Método de Cohen e Coon		
	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td
P	0,678	$\infty$	0,000	0,500	$\infty$	0,000	0,747	$\infty$	0,000
PI	0,610	0,346	0,000	0,450	0,467	0,000	0,628	0,213	0,000
PID	0,814	0,208	0,052	0,600	0,280	0,070	0,956	0,228	0,036

Tabela 2.7: Parâmetros de sintonia do controlador PID - SBFCF 3.

	1º Método de Ziegler-Nichols			2º Método de Ziegler-Nichols			Método de Cohen e Coon		
	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td	Kp	Ti	Td
P	1,914	$\infty$	0,000	-	-	-	2,268	$\infty$	0,000
PI	1,722	0,666	0,000	-	-	-	1,811	0,315	0,000
PID	2,296	0,400	0,100	-	-	-	2,817	0,405	0,066

A etapa seguinte consiste em verificar qual o conjunto de parâmetros de sintonia que permite que o sistema opere estável e no valor de *set-point* especificado. Contudo, é necessário decidir por uma das possíveis combinações das ações de controle (P, PI, PD ou PID).

- Ação Proporcional (P): a característica desta ação de controle, é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorrer uma alteração de carga<sup>2</sup>. O erro estacionário

<sup>2</sup>Alteração de carga deve ser interpretado neste texto como uma modificação dos parâmetros do sistema a controlar, isto é, do comportamento dinâmico do sistema.

é dependente do ganho proporcional ( $Kp$ ) e da carga podendo ser minimizado com o aumento de  $Kp$ . No entanto, deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabelecimento e, eventualmente, até à instabilidade. Conclui-se, assim, que este tipo de controlador só pode ser usado quando o ganho proporcional é suficientemente elevado para reduzir o erro estacionário a um nível aceitável, ou quando não são previsíveis alterações freqüentes da carga;

- Ação proporcional - integral (PI): a componente integral tem como função eliminar o erro estacionário, independentemente do sistema que se pretende controlar. Contudo, tem-se o aumento do tempo de estabelecimento e piora a estabilidade do sistema, o que, usualmente, é indesejável. O PI é utilizado em sistemas com freqüentes alterações de carga, sempre que o controlador P, por si só, não seja capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitável. Contudo, o sistema deve ter alterações de carga relativamente lentas para evitar oscilações induzidas pela ação integral;
- Ação proporcional - derivativa (PD): a adição do modo derivativo ao modo proporcional resulta num controlador altamente sensível. Contudo, o modo derivativo não afeta o erro estacionário. No entanto, ao adicionar amortecimento ao sistema, permite o uso de valores de  $Kp$  mais elevados, o que implica um menor erro estacionário. Todavia, o aumento de  $Kp$  pode levar o sistema a instabilidade;
- Ação proporcional - integral - derivativa (PID): neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI.

De acordo com as características apresentadas para cada ação de controle, observa-se que o desempenho mais satisfatório é obtido pela combinação das três ações de controle, PID. No entanto, como a função de transferência do sistema é dinâmica, os sistemas apresentados na tabela 2.4 não apresentaram desempenho satisfatório para condições de operação distintas das de sintonia, ocasionando aos mesmos pelo menos um dos seguintes problemas:

1. o sistema opera fora do valor de *set-point* especificado,
2. aumento da oscilação do sistema em relação ao valor de *set-point* especificado.

Esses fatos se verificaram para as demais combinações de ações de controle. Todavia, para a combinação PI esses efeitos foram reduzidos tal como é apresentado na figura 2.14

onde pode-se observar que no controlador PI, o sistema se estabiliza no ponto de operação especificado - SBFCF 3.

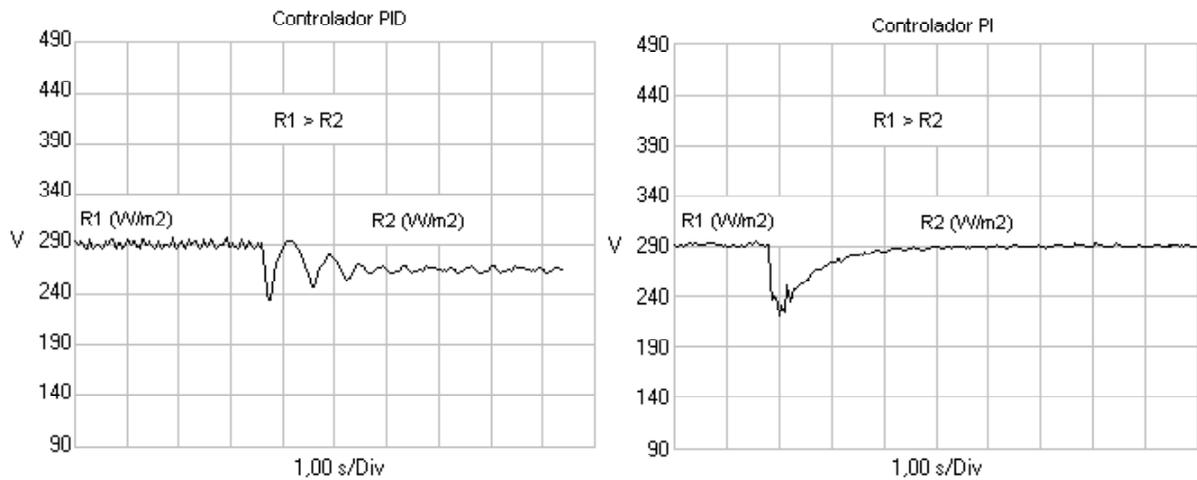


Figura 2.14: Variação no ponto de operação, *set-point*, devido a uma variação na irradiância.

De posse desses resultados, pode-se constatar que em um SBFCF o controlador PI se mostrou mais apropriado, proporcionando para os três sistemas analisados desempenhos similares, ou seja, garantia de operar no valor de *set-point* especificado e com baixa oscilação.

### 2.2.3.1 Seleção do conjunto de parâmetros de sintonia

Feita a opção pelo tipo de controlador a ser utilizado, no caso o PI, verificou-se para cada sistema o melhor conjunto de parâmetros de sintonia, o qual foi selecionado levando-se em consideração os seguintes critérios:

1. seleção do conjunto de parâmetros de sintonia que proporciona menor oscilação do sistema em relação ao valor de *set-point* especificado ( $\pm 10 V$ ),
2. escolha do conjunto que proporciona menor tempo de resposta ao sistema, ou seja, estando o sistema desativado, o menor tempo que este leva para chegar no valor de *set-point* especificado ao ser ativado.

Nas figuras 2.15, 2.16 e 2.17, são apresentados os resultados obtidos para cada sistema em ordem de melhor desempenho.

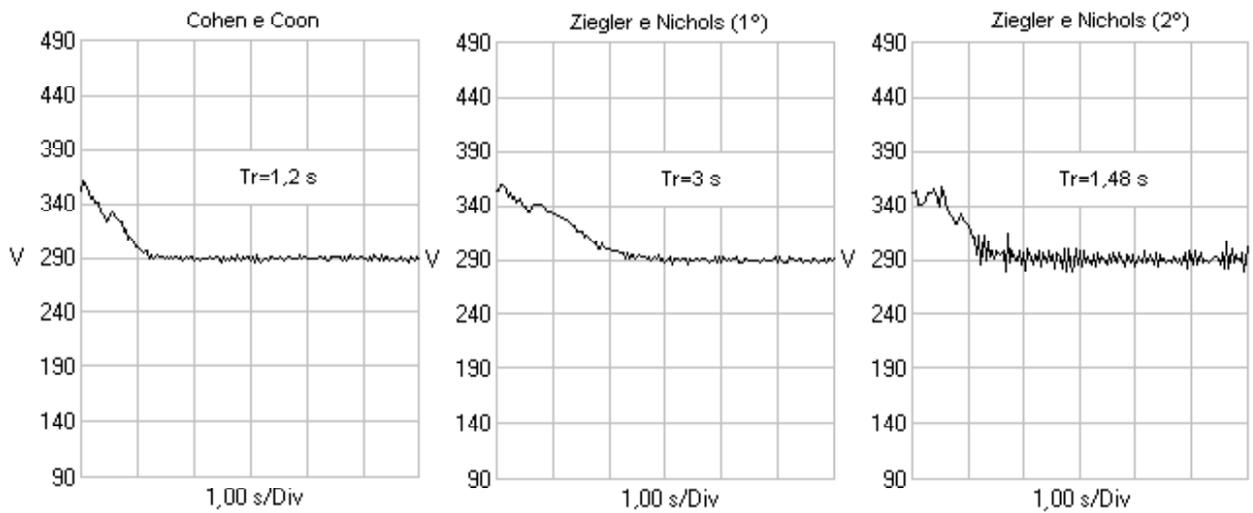


Figura 2.15: Tempo de estabilização do sistema no valor de *set-point* especificado - SBFCF 1.

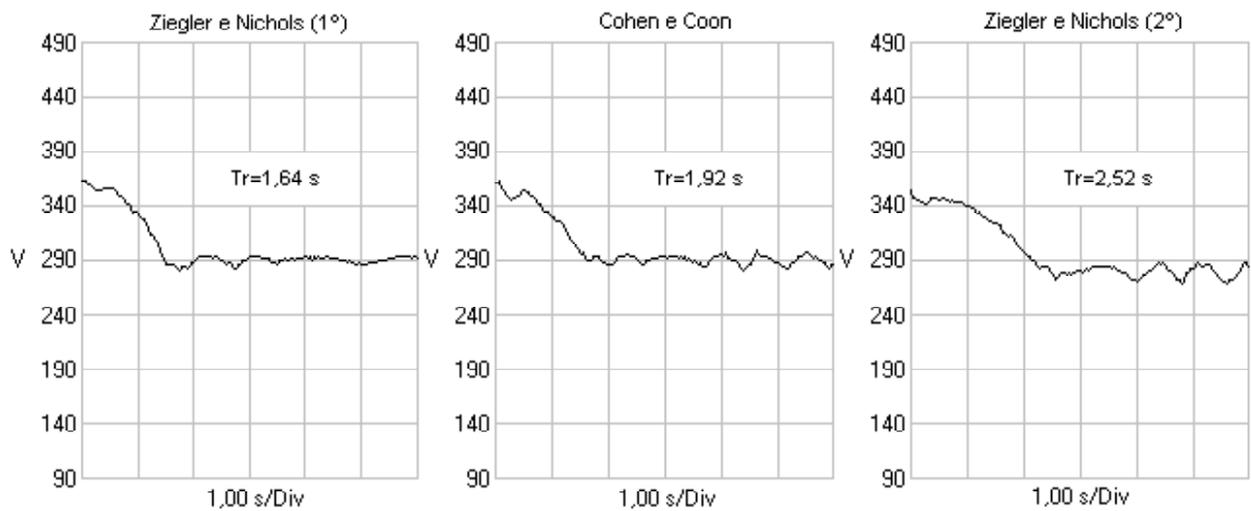


Figura 2.16: Tempo de estabilização do sistema no valor de *set-point* especificado - SBFCF 2.

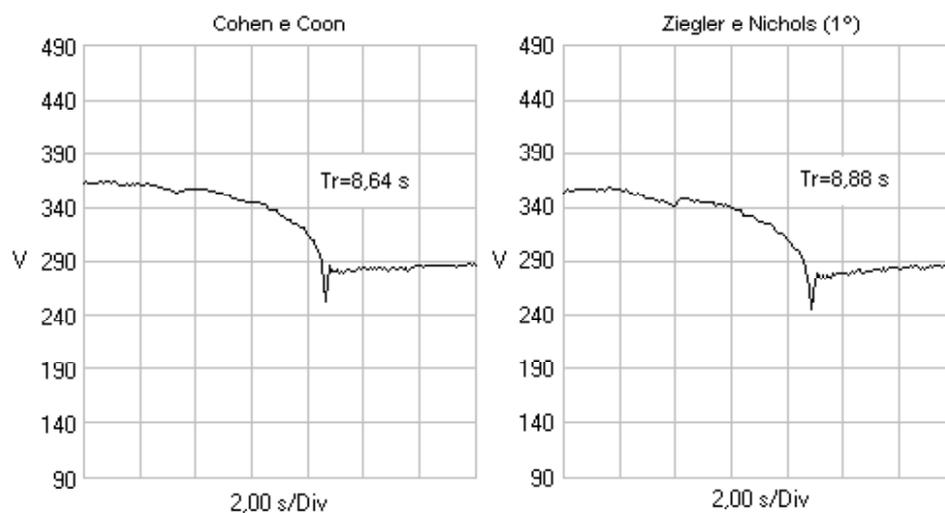


Figura 2.17: Tempo de estabilização do sistema no valor de *set-point* especificado - SBFCF 3.

Das figuras 2.15, 2.16 e 2.17, observa-se que os conjuntos de parâmetros de sintonia que proporcionam melhor desempenho ao sistema são os obtidos pelos métodos fundamentados na resposta do sistema em malha aberta (curva de reação). Observa-se, também, que a diferença de desempenho do sistema quando se utiliza o conjunto de parâmetros de sintonia obtidos pelas equações propostas por Ziegler e Nichols (1º Método) ou Cohen e Coon são irrelevantes. Contudo, é coerente selecionar o conjunto de equações com base no formato da curva de reação.

### 2.2.3.2 Teste operacional

Nesta seção são apresentados os desempenhos dos três sistemas analisados (tabela 2.4) para um turno completo de bombeamento e sua comparação com um SBFCV<sup>3</sup>, figura 2.18. De acordo com os resultados ilustrados nas figuras 2.19 a 2.21, pode-se constatar que os conjuntos de parâmetros de sintonia obtidos para os três sistemas analisados permitem que estes operem estáveis em torno do valor de *set-point*. Verifica-se, também, que em nenhum momento houve o desarme de um dos três sistemas em decorrência da passagem de nuvens e que a estabilidade de operação é similar à do SBFCV.

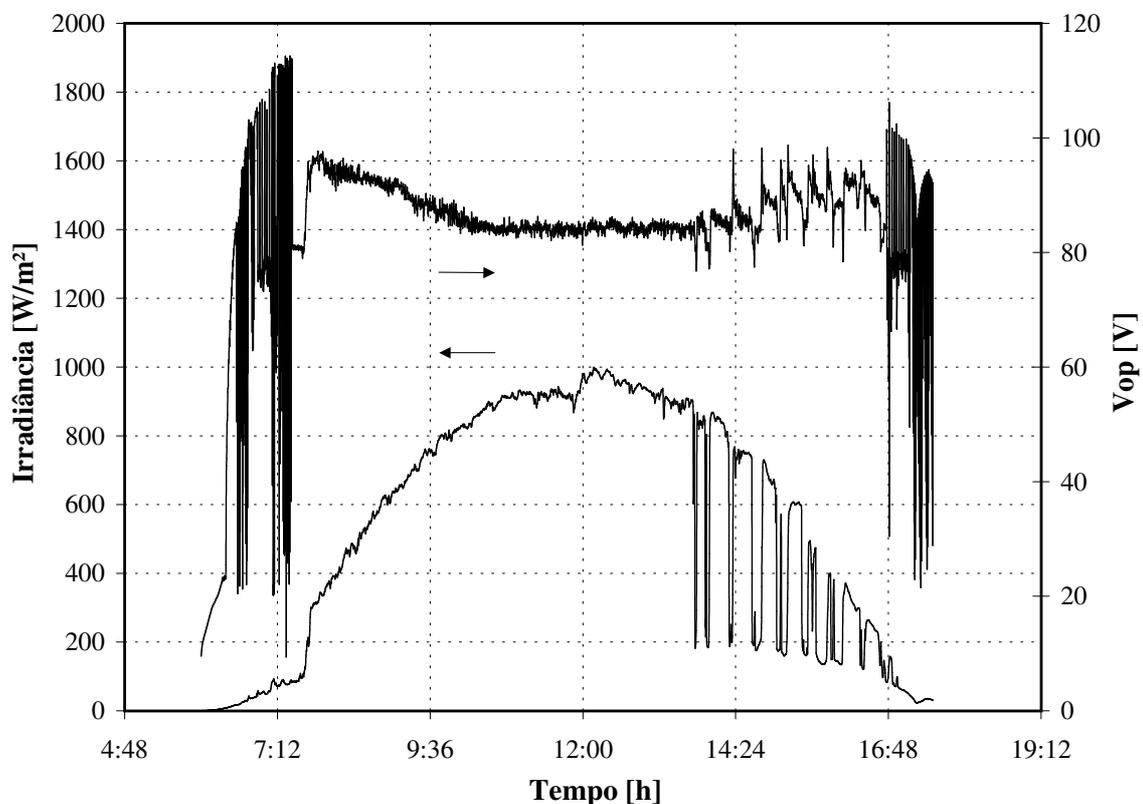


Figura 2.18: Variação de  $V_{op}$ , SBFCV.

<sup>3</sup>Para este sistema, o teste também foi realizado a 20 m com uma motobomba modelo SP 1A-9/90V DC conectada a um gerador fotovoltaico de 450 Wp. O inversor utilizado é de 400 W e possui seguidor do ponto de máxima potência.

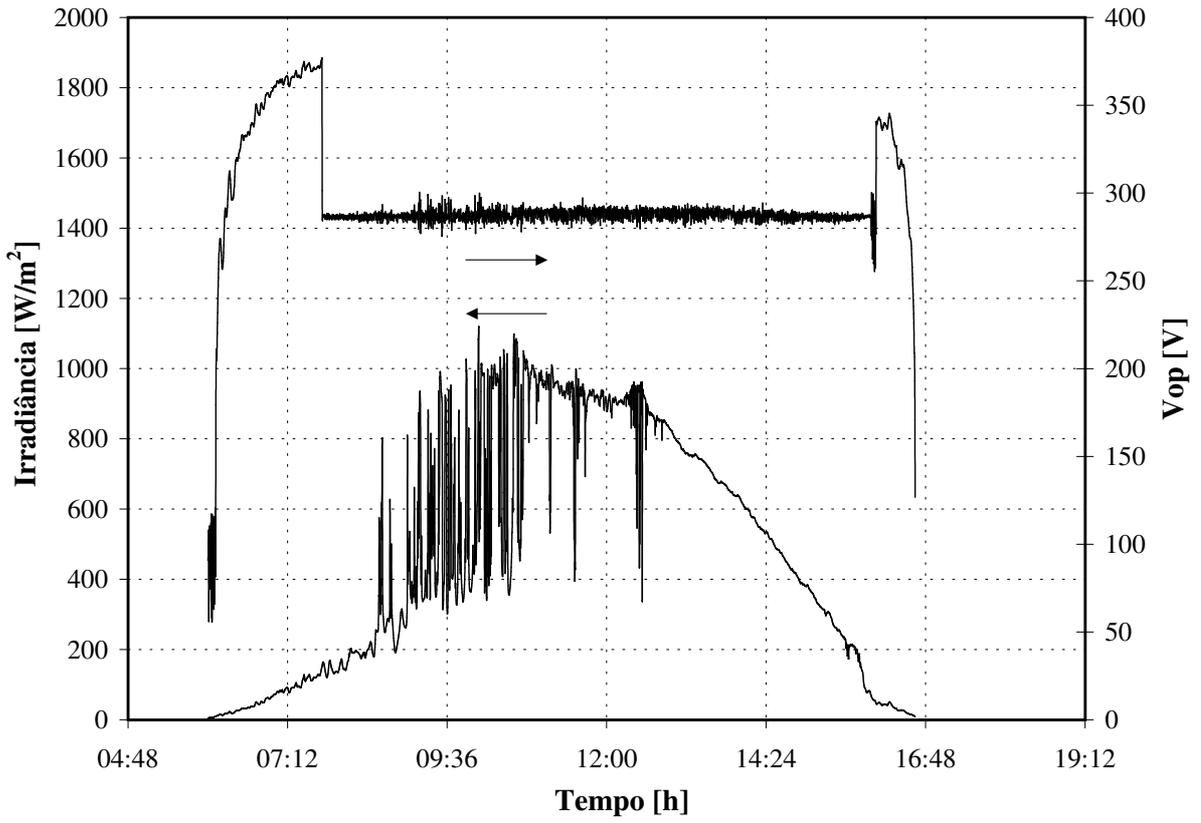


Figura 2.19: Variação de Vop, SBFCF 1.

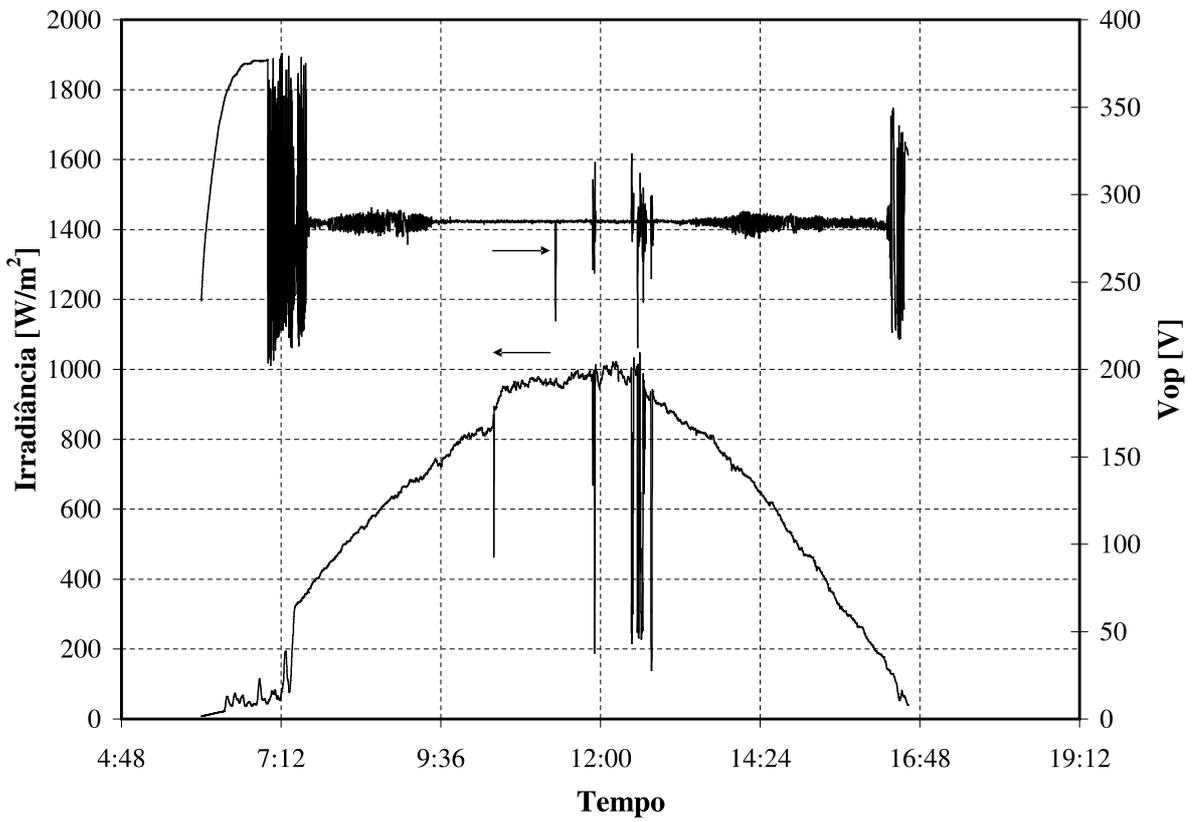


Figura 2.20: Variação de Vop, SBFCF 2.

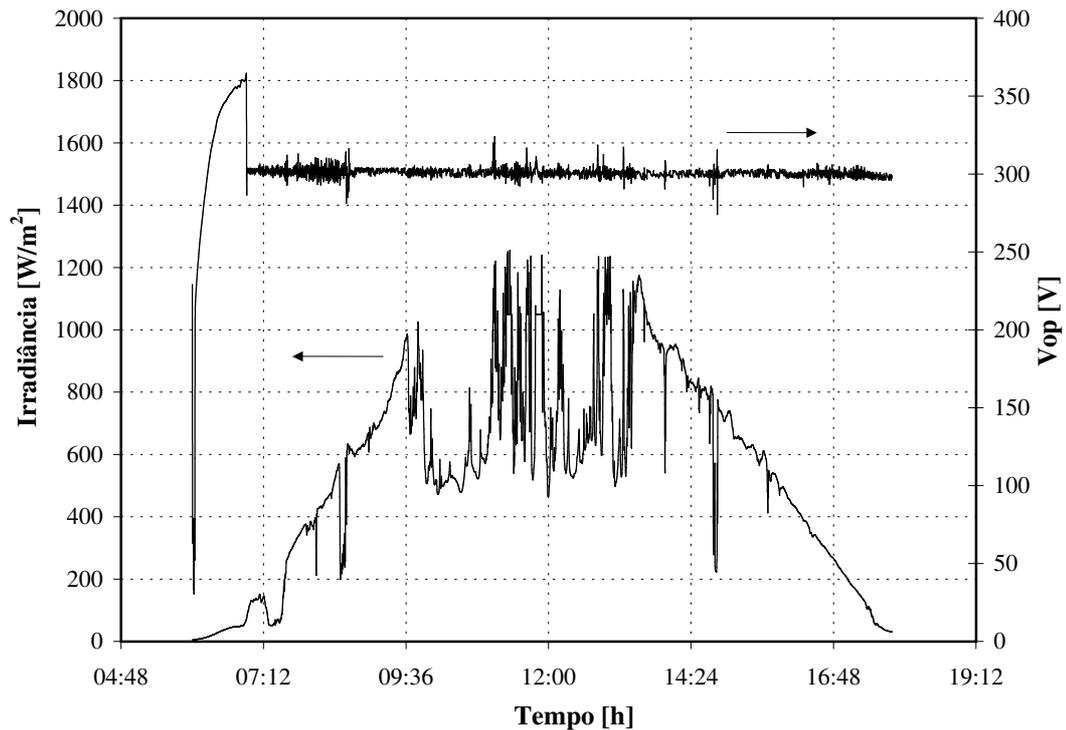


Figura 2.21: Variação de  $V_{op}$ , SBFCF 3.

Com os resultados obtidos, pode-se verificar que os métodos de sintonia fundamentados na curva de reação do sistema em malha aberta são bastante apropriados. Todavia, embora sua aplicação seja de utilidade prática para a maioria dos CF analisados, esta mostrou-se mais apropriada para aqueles com funções de transferência com maior faixa de linearidade, SBFCF 1 e 3. Para o caso do CF utilizado no SBFC 2, os parâmetros de sintonia determinados não proporcionam operação estável do sistema (com oscilações menores que  $\pm 10$  V) quando este opera com um valor de *set-point* abaixo de 270 V.

### 2.3 Determinação e análise das estratégias de operação

A estratégia de operação consiste em determinar de que forma o CF irá operar tendo em vista otimizar o SBFCF, ou seja, fazer com que este bombeie o maior volume possível de água durante o mês ou ano. No entanto, com relação à geração fotovoltaica e ao conjunto motobomba, pouco se tem a fazer, a não ser no processo de escolha dos equipamentos a serem utilizados.

Portanto, esta tarefa está relacionada exclusivamente ao CF; mais claramente, como este equipamento será programado de maneira a fazer o gerador fotovoltaico transferir o máximo de energia para o conjunto motobomba. Para este tipo de configuração, SBFCF, existem duas estratégias de operação; são elas: estratégia de *set-point* fixo e estratégia de *set-point* variável.

### 2.3.1 Estratégia de *set-point* fixo

A estratégia de *set-point* fixo faz o sistema operar com um valor de tensão constante na entrada do CF, sendo esta a estratégia mais simples. No entanto, este método não é o ideal, pois o sistema opera frequentemente fora do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico, tal como é ilustrado na figura 2.22.

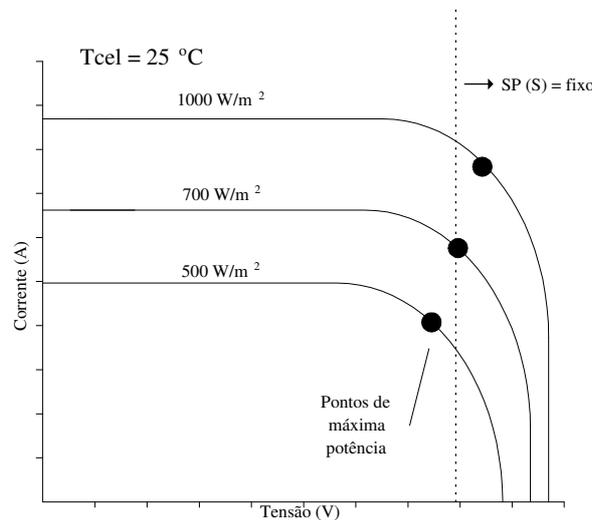


Figura 2.22: Problema de casamento de impedância.

O problema é que existem no mercado CF que só poderão operar sob esta estratégia de operação e, para esses equipamentos, é necessário determinar o valor do *set-point* que otimiza o sistema.

#### 2.3.1.1 Determinação do valor de *set-point* ótimo

A determinação do valor de *set-point* ótimo é realizada com base no gráfico de distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico em função de sua tensão de máxima potência. O gráfico é construído com base no ano típico da localidade onde será instalado o sistema. Para este propósito, utilizam-se as equações 2.2 a 2.5 (LORENZO, 2002).

$$P_{cor} = \frac{P_{STC} \cdot G}{G_0} \cdot [1 - \gamma \cdot (T_C - 25)] \quad (2.2)$$

$$V_{cor} = V_{STC} + \frac{dV_{STC}}{dT_C} \quad (2.3)$$

$$\frac{dV_{STC}}{dT_C} = \beta \cdot N_s \cdot (T_C - 25) \quad (2.4)$$

$$T_C = T_a + (T_{NOC} - 20) \cdot \frac{G}{800} \quad (2.5)$$

sendo,

$P_{STC}$ , potência nas condições padrão de operação,  $W$ ;

$P_{cor}$ , potência corrigida,  $W$ ;

$V_{STC}$ , tensão nas condições padrão de operação,  $V$ ;

$V_{cor}$ , tensão corrigida,  $V$ ;

$G_0$ , irradiância padrão,  $1.000 \text{ W/m}^2$ ;

$G$ , irradiância incidente,  $W/m^2$ ;

$T_C$ , temperatura equivalente de operação das células,  $^{\circ}C$ ;

$T_{NOC}$ , temperatura de operação nominal da célula,  $^{\circ}C$ ;

$T_a$ , temperatura ambiente,  $^{\circ}C$ ;

$N_s$ , número de células em série;

$\beta$ , coeficiente de variação de tensão com a temperatura,  $-2,3 \text{ mV}/^{\circ}C$ ;

$\gamma$ , coeficiente de temperatura no ponto de máxima potência,  $0,4\%/^{\circ}C$  a  $0,5\%/^{\circ}C$ ,

para módulos de Si-m e Si-p, e  $0,1\%/^{\circ}C$  a  $0,2\%/^{\circ}C$ , para módulos de Si-a (KROPOSKI & HANSEN, 1999).

Para exemplificar o método, considera-se um subsistema de geração fotovoltaico composto por 20 módulos (Si-p) de 36 células cada, todos em série, possuindo, nas condições de operação padrão, as seguintes características: tensão de máxima potência de  $15,9 \text{ V}$ , máxima potência de  $74,4 \text{ W}$ .  $V_{oc}$  de  $20,7 \text{ V}$  e  $T_{NOC}$  de  $49 \text{ }^{\circ}C$ . De posse desses dados, construíram-se os gráficos para duas localidades distintas, mostrados nas figuras 2.23 e 2.24.

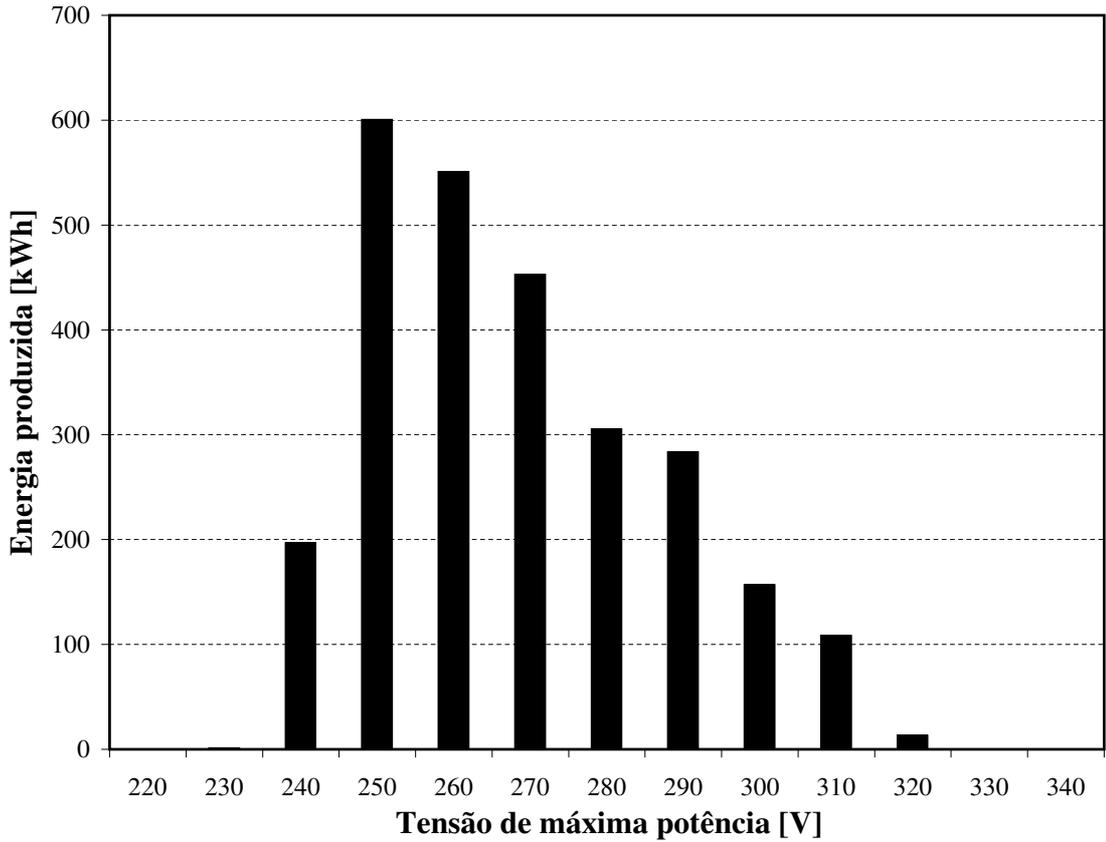


Figura 2.23: Distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico para Belém.

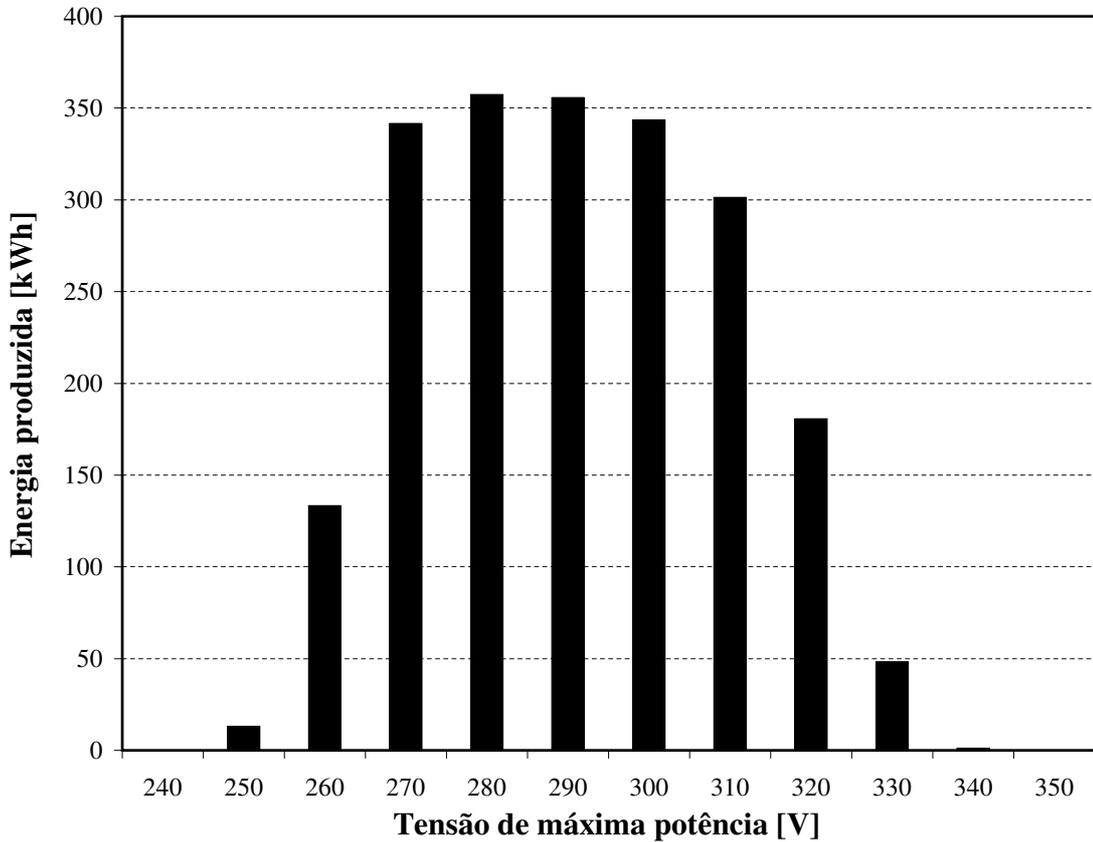


Figura 2.24: Distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico para São Paulo.

Observando-se os gráficos, percebe-se que o valor do *set-point* a ser selecionado deve ser aquele onde é maior a potência acumulada durante as horas do ano, pois este será o valor que proporcionará o melhor casamento de impedância entre a carga e a fonte geradora de energia elétrica. Para a cidade de Belém o *set-point*<sup>4</sup> será um valor que corresponderá à tensão de 250 V; já para a cidade de São Paulo será um valor correspondente a 280 V ou 290 V.

### 2.3.2 Estratégia de *set-point* variável

Essa estratégia de operação consiste em programar o CF para que este varie automaticamente o *set-point* do sistema, podendo com isto, ser capaz de seguir os pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico (figura 2.22, página 37). O problema é que os CF não permitem a realização dessa tarefa simplesmente pela programação de seus parâmetros.

Em Alonso-Abella et al. (1998), descreve-se o desenvolvimento de um circuito eletrônico que corrige o valor do *set-point* com a temperatura da superfície do módulo, de maneira a tentar seguir os pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico. Contudo, neste trabalho busca-se uma forma de fazer o CF seguir os pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico sem a inclusão de qualquer circuito externo.

Tendo em vista este propósito, verificou-se que os CF da série VS – 606 V7, fabricados pela empresa YEC,<sup>5</sup> permitem que o usuário escreva um algoritmo em linguagem C, que é descarregado em sua memória interna, permitindo, assim, utilizar essa funcionalidade para seguir os pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico.

Como ferramenta e interface de programação, a YEC disponibiliza o *software* CASE (*Custom Application Software Environment*), desenvolvido para expandir as funcionalidades dos CF da série VS – 606 V7 (YASKAWA, 1998). Através desse *software* é possível editar o código fonte dos arquivos do CF e transferir o algoritmo para a memória interna do CF, utilizando um gravador de memória *flash* (73606 FMW-01) (figura 2.25).

Nesta aplicação, foi utilizado um CF (VS – 606 V7 de 1 CV) que dispõe dos seguintes arquivos: *CaseRam.C*, *CaseRnd.C*, *CaseScan.C*, *CaseNo.C*, *CaseCore.h*, *CaseUse.h*, *CaseRnd.h*, *CaseScan.h*, *Def.h*, *Ext.h*, *GFunc.h*, *CstTable.c*, *KVATBL.asm* e *K2TBL.asm*. Dentre esses arquivos, foram modificados o *CaseScan.C*, que é o arquivo responsável pela execução do algoritmo a cada 8 ms, e os arquivos *CaseRam.C* e *CaseUse.h*, que são destinados à declaração das variáveis globais e locais, respectivamente.

<sup>4</sup>Este valor é determinado a partir de uma regra-de-três simples. Por exemplo, se 100% equivale a 400 V, então para 250 V o valor de *set-point* é 62,5%.

<sup>5</sup>Yaskawa Electric Corporation (YEC): fabricante de servo-acionamentos, conversores de frequência, controladores de máquinas e robótica, [www.yaskawa.com](http://www.yaskawa.com).

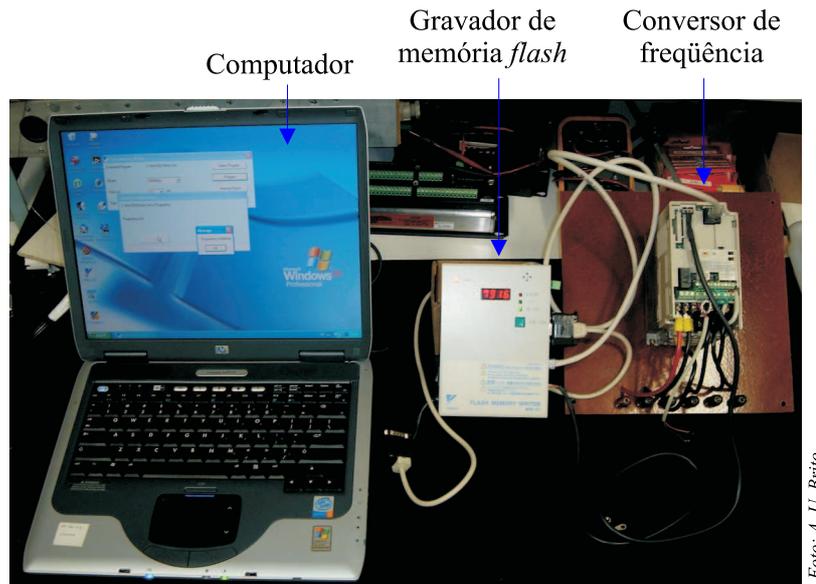


Figura 2.25: Transferência do algoritmo para o CF.

O algoritmo implementado corrige o valor de *set-point* do CF de acordo com a potência de operação do sistema, haja vista que, traçando-se em um gráfico (tensão versus potência) para todos os pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico, percebe-se que existe uma relação linear entre as variáveis envolvidas, tal como apresentado na figura 2.26.

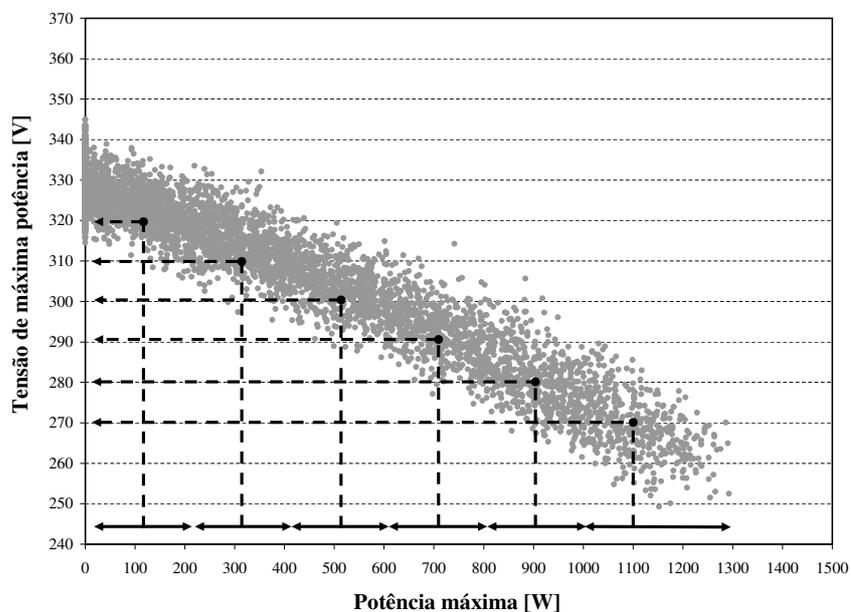


Figura 2.26: Tensão de máxima potência versus potência máxima - gráfico obtido com dados horários anuais para a cidade de São Paulo.

Tendo como referência a figura 2.26, fez-se um algoritmo que corrige o valor da tensão de operação do sistema de acordo com sua potência. O gráfico da figura 2.27, ilustra a variação da tensão de operação em relação ao ótimo.

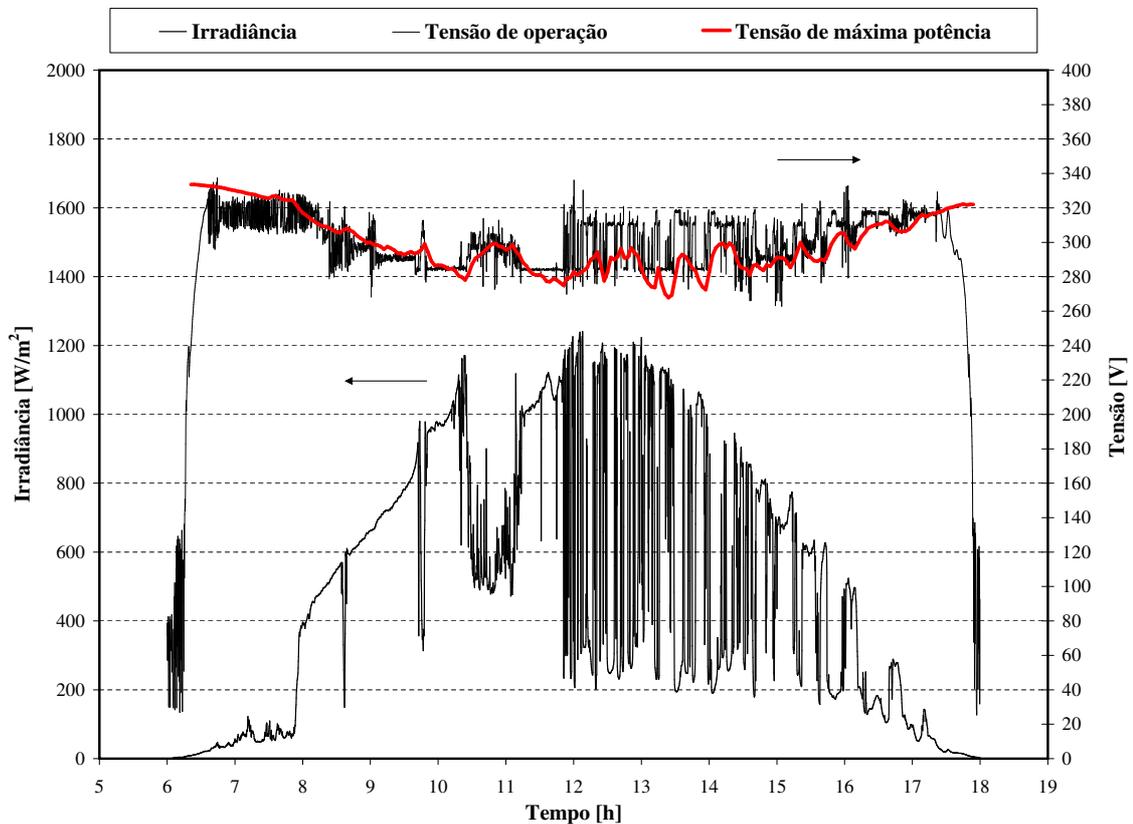


Figura 2.27: Desempenho do algoritmo utilizado.

Para este caso, a eficiência do algoritmo foi de 89,73 %. Esse valor foi obtido mediante a equação 2.6,

$$\eta_{smp} = \frac{\int_0^t P_{real} \cdot dt}{\int_0^t P_{max} \cdot dt}, \quad (2.6)$$

onde,  $\eta_{smp}$  é a eficiência do algoritmo,  $P_{real}$  é a potência medida e  $P_{max}$  a potência calculada a partir dos valores de irradiância e temperatura da célula.

De acordo com o gráfico da figura 2.27, percebe-se que, durante o período de 6:00 às 12:00 hs, quando as variações de irradiância são lentas, o algoritmo mantém o sistema operando satisfatoriamente próximo do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico. Para esse intervalo, o algoritmo opera com eficiência de 96,39 %. Contudo, para o período posterior, 12:00 às 18:00 hs, quando as variações de irradiância foram mais freqüentes, o algoritmo apresentou eficiência de 83,07 %.

Uma forma mais otimizada de operar com o *set-point* variável, seria a implementação de um algoritmo, dentre os existentes na literatura, destinado ao seguimento dos

pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico, a saber: perturbe e observe; condutância incremental; tensão constante; capacitância parasita; lógica fuzzy e outros (HOHM & ROPP, 2003). Contudo, o emprego de cada algoritmo está sujeito a um determinado número de variáveis de entrada referentes ao gerador fotovoltaico, tais como: tensão de circuito aberto; tensão e corrente de operação; potência; irradiância; e temperatura.

Dadas as características mencionadas e levando-se em consideração as variáveis monitoradas pelo CF utilizado, o algoritmo possível de ser implementado seria o do tipo perturbe e observe (P&O). A eficiência deste tipo de algoritmo situa-se em torno de 81,1 – 85,0 %. Hohm & Ropp (2003) mencionam que este algoritmo pode seguir o ponto de máxima potência com eficiência de 97 %, se devidamente otimizado. No entanto, os resultados obtidos com a adoção deste algoritmo não foram satisfatórios.

Quanto ao algoritmo testado, constata-se que este seria bastante apropriado para ser usado em regiões com baixo índice de nebulosidade, onde variações de irradiância não são tão frequentes. Caso contrário, a eficiência do algoritmo será similar, ou inferior, à de um sistema operando com *set-point* fixo, a qual encontra-se em torno de 85 %. No gráfico da figura 2.28 tem-se ilustrado o resultado da operação do sistema com *set-point* fixo. Para este caso particular, o sistema opera com eficiência de 83,83 %.

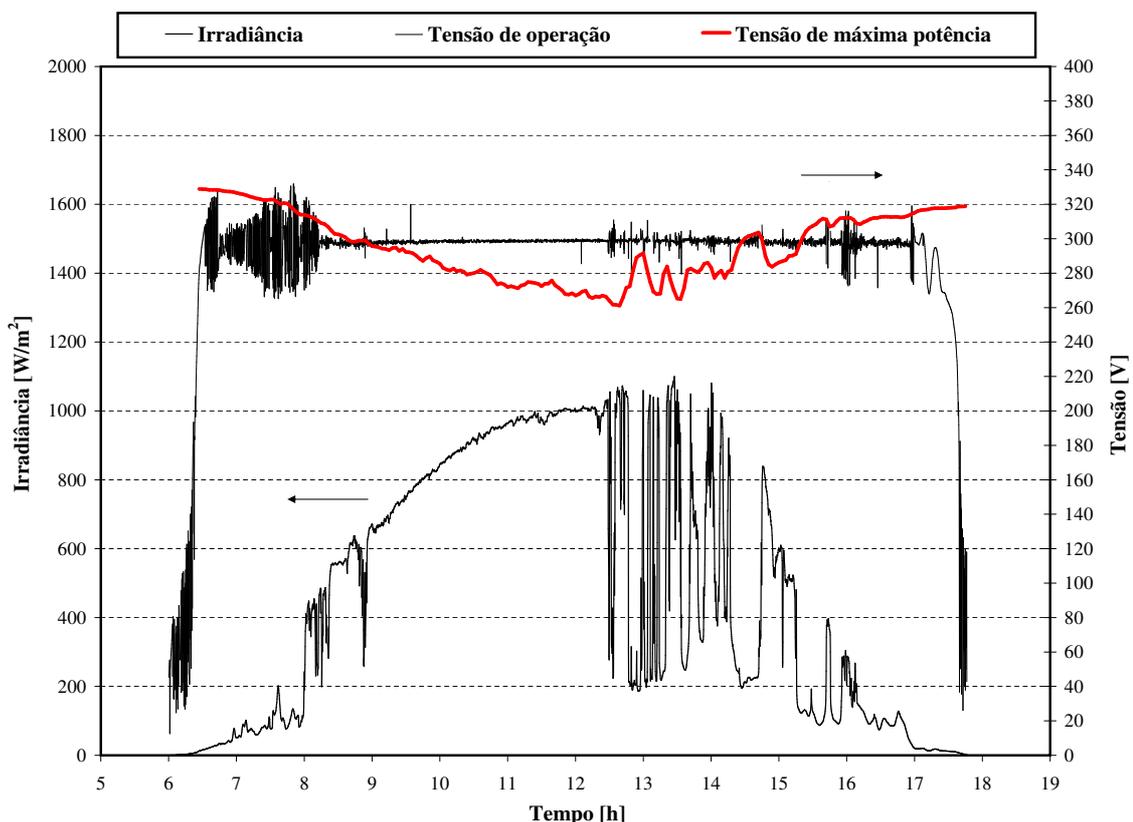


Figura 2.28: Desempenho do sistema operando com *set-point* fixo.

Dado o exposto e levando-se em consideração que somente os CF da série *VS – 606 V7* permitem alterar seu código fonte para inclusão de um algoritmo, os testes operacionais que visam avaliar a confiabilidade técnica e econômica do SBFCF foram realizados com o sistema operando com a estratégia de *set-point* fixo.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

### 3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é comprovar a hipótese formulada neste trabalho de que um sistema de bombeamento fotovoltaico, formado por um conversor de frequência e uma motobomba convencional, representa uma alternativa para incremento da confiabilidade, e apresenta rendimento global semelhante ao de um sistema de bombeamento fotovoltaico composto por equipamentos dedicados exclusivamente a esse tipo de aplicação.

### 3.2 Avaliação técnica

Na realização desta avaliação, foram testadas várias combinações de CF e motobombas de diferentes fabricantes. Os equipamentos foram selecionados na faixa de 1/2 a 2 CV. Contudo, para um único valor de potência, não se encontrou no mercado motobombas com idênticas características técnicas dentre os diferentes fabricantes, ou seja, mesmo volume bombeado para a mesma altura manométrica.

De acordo com tais condições de contorno, cada combinação foi testada tendo como referência o ponto ótimo de operação de cada motobomba. Este parâmetro é fornecido pelo fabricante na forma de gráfico, como o ilustrado na figura 3.1. Nas tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as características técnicas dos CF e motobombas utilizados.

Cada combinação foi avaliada em um turno completo de bombeamento, onde foram verificados: o rendimento médio (%) e a produção diária de água ( $m^3/dia$ ) em função da irradiação diária ( $kWh/m^2$ ) e da altura manométrica total ( $m$ ). Esses resultados são comparados com os obtidos para SBFCV, selecionados na mesma faixa de potência (tabela 3.3).

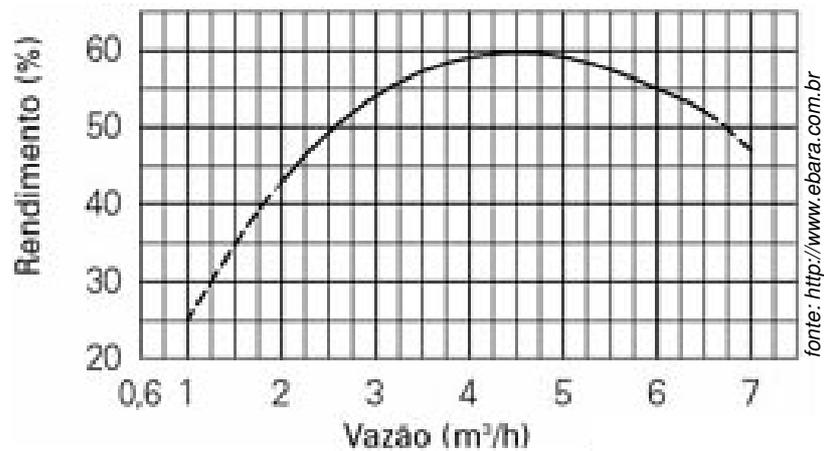


Figura 3.1: Curva de rendimento do conjunto motobomba.

Tabela 3.1: Características técnicas das motobombas.

Fabricante	Modelo	Potência (CV)	Estágios	Vazão ( $m^3/h$ ) *	$H_T$ (m)
A1	BHS222-4	3/4	4	4,84	24
A1	BHS222-5	1	5	4,04	26
A1	BHS222-12	2	12	5,56	60
B1	3.2-S-07	1/2	7	2,95	30
B1	8.3-S-07	1	7	5,65	30
B1	5.4-S-16	2	8	4,52	60
C1	BMSAF404/0,5-7	1/2	7	3,04	30
C1	BMSAF407/1,0-8	1	8	4,52	40
C1	BMSAF407/2-13	2	13	5,62	60
D1	4R5-05	1	5	4,01	35

\* Valores medidos.

Tabela 3.2: Características técnicas dos CF.

Fabricante	Modelo	Potência (CV)	Tipo de controlador
A2	CFW08plus	1/2	PID
A2	CFW08plus	1	PID
A2	CFW08plus	2	PID
B2	Micromaster 420	1/2	PI
B2	Micromaster 420	1	PI
B2	Micromaster 420	2	PI
C2	VS-606V7	1	PID

Tabela 3.3: Características técnicas dos SBFCV.

	Gerador FV	Motobomba	Disp. cond. de potência
S1	900 W <sub>p</sub>	SQF 5A-6	CU 200
S2	1050 W <sub>p</sub>	SCS 10-230	PCB-120-M1
S3	1575 W <sub>p</sub>	SP 3A-10	SOLARTRONIC - SA 1500

### 3.2.1 Instrumentação utilizada

Assim como já mencionado, os ensaios para a verificação do desempenho operacional determinam o rendimento médio (%) e a produção diária de água ( $m^3/dia$ ) em função da irradiação diária ( $kWh/m^2$ ) e da altura manométrica total ( $m$ ). Contudo, em decorrência das características intrínsecas do sistema de bombeamento solar fotovoltaico<sup>1</sup>, a potência que chega ao sistema é variável e acompanha as flutuações da irradiância ( $W/m^2$ ), conforme ilustra a figura 1.4, página 11. Esta situação requer a adoção de instrumentação e procedimentos que mantenham a altura manométrica total a um valor razoavelmente estável ao longo do ensaio.

Todavia, são poucos os laboratórios que dispõem deste tipo de instrumentação que e executa este tipo de ensaio, havendo, basicamente, três modalidades de bancada estabilizadora da altura manométrica ao longo de um turno de bombeamento. A primeira delas conta com uma torre de equilíbrio na qual encontra-se uma ou mais tubulações que gradam a altura manométrica requerida para o ensaio, em metros de coluna d'água (VILELA & FRAIDENRAICH, 2001). Esta modalidade é de instalação e utilização relativamente simples para pequenas alturas manométricas, mas tem seu custo e dificuldades incrementados à medida que sejam necessárias maiores alturas manométricas, pois isto implica na construção, operação e manutenção de torres proporcionais à altura manométrica requerida, por exemplo; para uma altura manométrica total de 90  $m$ , a torre e a tubulação deverão ter a mesma altura.

Na segunda modalidade, a estabilização da altura manométrica é feita através de um depósito pressurizado água/ar, com a utilização de um compressor de ar. Para uma maior altura manométrica, maior injeção de ar comprimido no depósito, acionado por eletroválvulas, em função da variação da irradiância (ARAB, 1999; ARAB et al., 2004). Esta é mais compacta que a anterior, porém com a desvantagem de requerer um longo tempo para a estabilização da altura manométrica, o que pode prejudicar as medições principalmente em dias nublados, quando a variação da irradiância é extremamente dinâmica. Neste sentido, este tipo de bancada de teste vem sendo mais utilizada em combinação com um simulador fotovoltaico.

A terceira, é a bancada de ensaio desenvolvida no âmbito deste trabalho (BRITO et al., 2006). Essa bancada foi concebida tendo como referência uma bancada de teste simplificada (FEDRIZZI & SAUER, 2001) a qual permite, através de um processo rápido, fácil e barato, averiguar as curvas de desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico. À bancada simplificada foi adicionada uma segunda motobomba para a estabilização da pressão de trabalho, tal como é apresentado a seguir.

---

<sup>1</sup>Sem a utilização de baterias

### 3.2.2 Descrição da bancada de ensaio

A bancada de ensaio proposta funciona com duas motobombas que trabalham em paralelo, submersas em um mesmo reservatório, conforme o diagrama esquemático da figura 3.2. O sistema funciona da seguinte forma: à medida em que a motobomba que está sendo testada for aumentando sua capacidade de bombeamento, o que conseqüentemente aumentará a pressão na tubulação, a outra motobomba reduz a sua, e vice-versa, de forma a manter o valor da pressão sempre em torno de um valor pré-estabelecido.

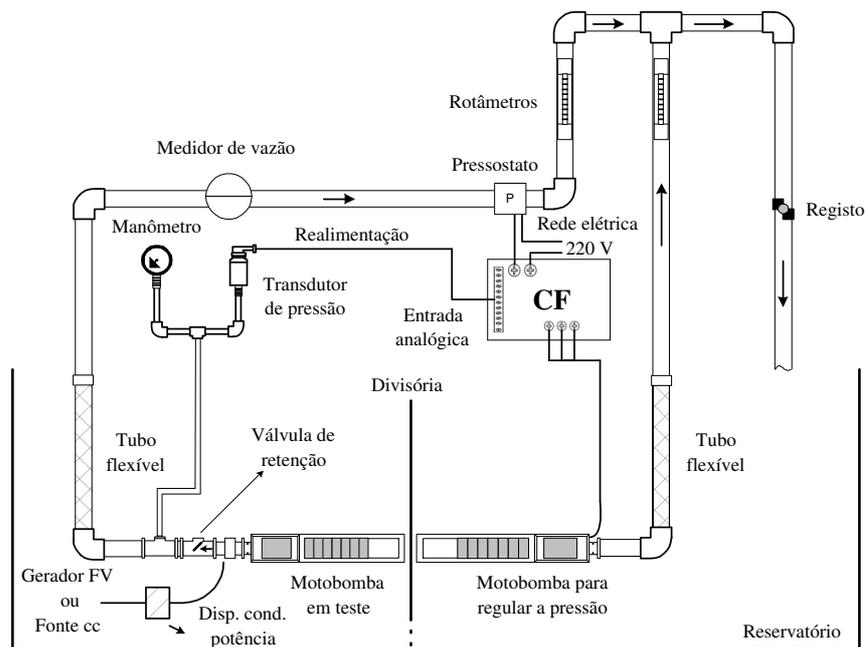


Figura 3.2: Bancada de ensaio.

O reservatório da bancada de ensaio contém uma divisória onde, num dos compartimentos coloca-se a motobomba a ser testada e no outro a motobomba reguladora da pressão e a tubulação de saída da água bombeada. A divisória tem a finalidade de evitar possíveis interferências sobre a motobomba a ser testada por bolhas de ar formadas pela turbulência da descarga da água bombeada. Na saída de cada motobomba instala-se um rotâmetro, que permite a leitura da vazão instantânea de cada uma delas e, após os rotâmetros, no final da tubulação, há um registro que permite o ajuste inicial da pressão de trabalho.

O controle da motobomba que regula a pressão na tubulação é realizado por um CF que possui internamente um controlador PID. O CF é programado para operar em malha fechada. O sinal de realimentação é fornecido por um transdutor de pressão instalado na saída da motobomba a ser testada. Nas figuras 3.3 a 3.7, tem-se ilustrado as diversas partes da bancada de ensaio.

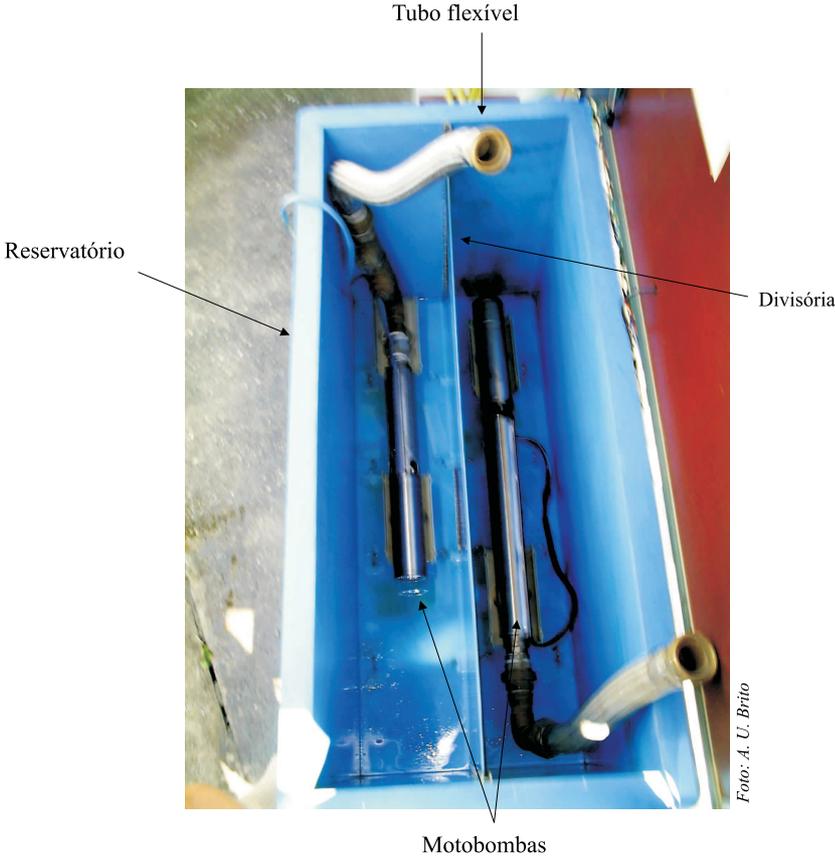


Figura 3.3: Detalhes da bancada de ensaio - reservatório, divisória, motobombas e tubos flexíveis.

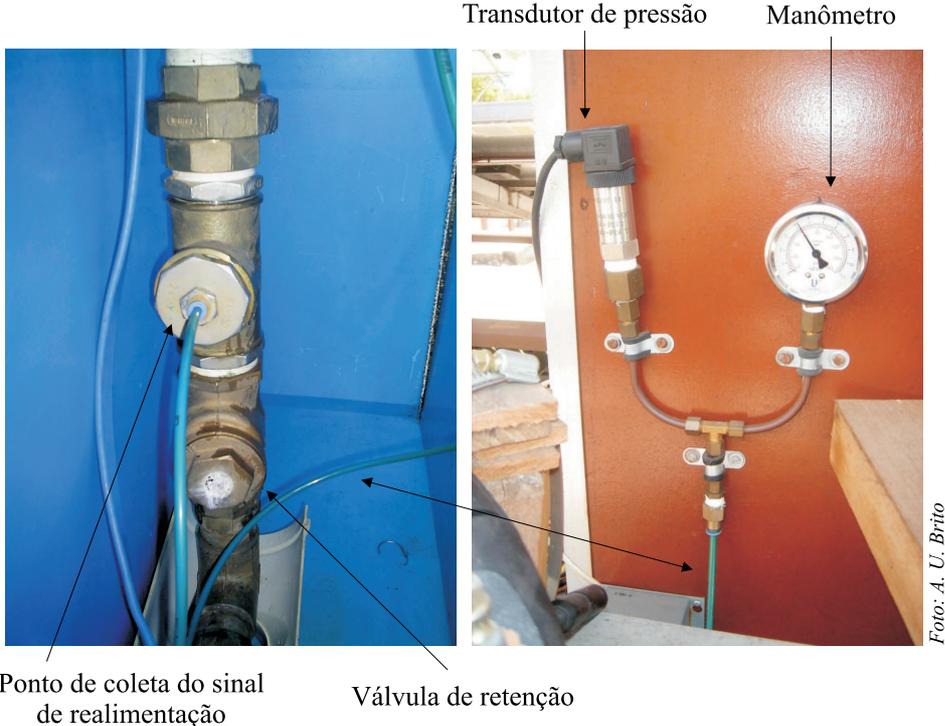


Figura 3.4: Detalhes da bancada de ensaio - ponto de coleta do sinal de realimentação, válvula de retenção, manômetro e transdutor de pressão.



Figura 3.5: Vista do conversor de frequência utilizado - Micromaster 420 de 2 CV.

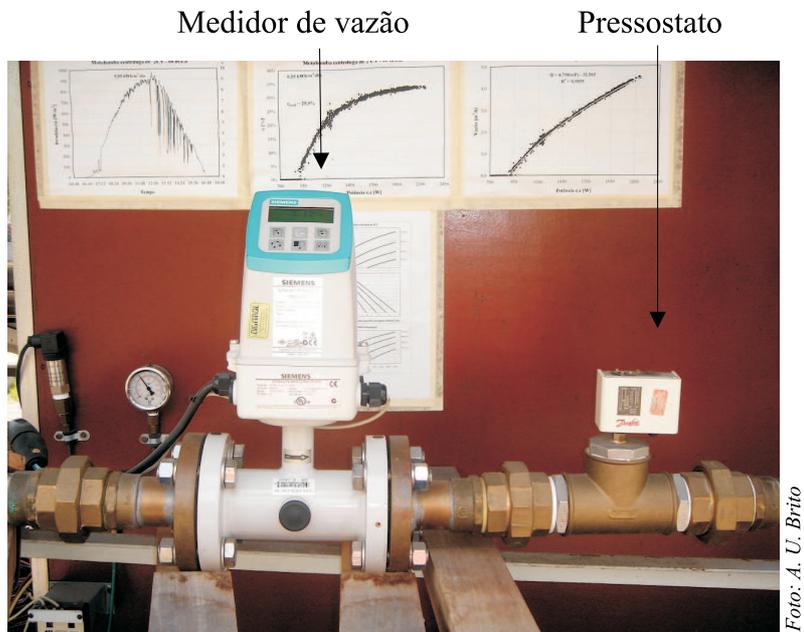


Figura 3.6: Detalhes da bancada de ensaio - medidor de vazão e pressostato.



Figura 3.7: Detalhes da bancada de ensaio - rotômetros e registro.

A bancada de ensaio agrega, também, um sistema de monitoração e aquisição de dados, onde cinco variáveis são monitoradas: irradiância, tensão e corrente do gerador fotovoltaico ou da fonte cc, pressão de operação do sistema e vazão da motobomba em teste. Os valores das variáveis monitoradas são armazenados em uma unidade de aquisição de dados. Na tabela 3.4 apresenta-se um resumo das características técnicas dos componentes do sistema de monitoração e aquisição de dados.

Tabela 3.4: Características técnicas do sistema de monitoração e aquisição de dados.

Variável monitorada	Tipo de transdutor	Faixa de medição
Irradiância	Célula fotovoltaica calibrada	$130,2 \text{ mV} \longleftrightarrow 1.000 \text{ W/m}^2$
Tensão de entrada	Transdutor de tensão	$0 - 500 \text{ Vcc} \longleftrightarrow 0 - 10 \text{ Vcc}$
Corrente de entrada	<i>Shunt</i>	$100 \text{ mV} \longleftrightarrow 10 \text{ A}$
Pressão na tubulação	Transdutor de pressão	$0 - 10 \text{ kgf/cm}^2 \longleftrightarrow 0 - 10 \text{ Vcc}$
Vazão	Transdutor de vazão	$0 - 32 \text{ m}^3/\text{h} \longleftrightarrow 0 - 20 \text{ mA}$
<b>Unidade de aquisição de dados: HP 34970A - 50.000 registros</b>		

Devido à limitação da capacidade do reservatório, particularmente para testes de motobombas com potência elevada, pode ocorrer um sobre-aquecimento da água em decorrência do arrefecimento de seus motores. A refrigeração pode ser implementada através da circulação da água em um trocador de calor externo, tal como é observado na figura 3.8 onde é ilustrada uma vista frontal da bancada de ensaio.



Foto: M. C. Fedrizzi

↓  
Trocador de calor

Figura 3.8: Vista frontal da bancada de ensaio.

### 3.2.2.1 Ajuste da bancada para realização de ensaios

Para facilitar a compreensão, a motobomba a ser testada, que é alimentada pelo gerador fotovoltaico ou pela fonte cc, é chamada de motobomba A e a motobomba reguladora da pressão, alimentada através da rede elétrica convencional via CF, é chamada de motobomba B.

Inicialmente, deve-se programar no CF que controla a motobomba B o valor da pressão de operação e, em seguida, somente com esta em funcionamento, regular o registro até o valor de pressão pré-estabelecido no CF ser alcançado. É importante observar que, para o sistema funcionar adequadamente, a motobomba B deve ter maior capacidade de bombamento que a motobomba A.

### 3.2.2.2 Análise operacional da bancada de ensaio

A bancada de ensaio foi posta à prova e os resultados foram satisfatórios tanto para SBFCV quanto para SBFCF. Os resultados são apresentados nas figuras 3.9 e 3.10, respectivamente. Pode-se observar que, para ambos os casos, a pressão na tubulação da bancada de ensaio permanece razoavelmente estável para os valores especificados (40 e 38 m), mesmo para o caso de um dia muito nublado, o que prova que a bancada está apta à realização dos ensaios.

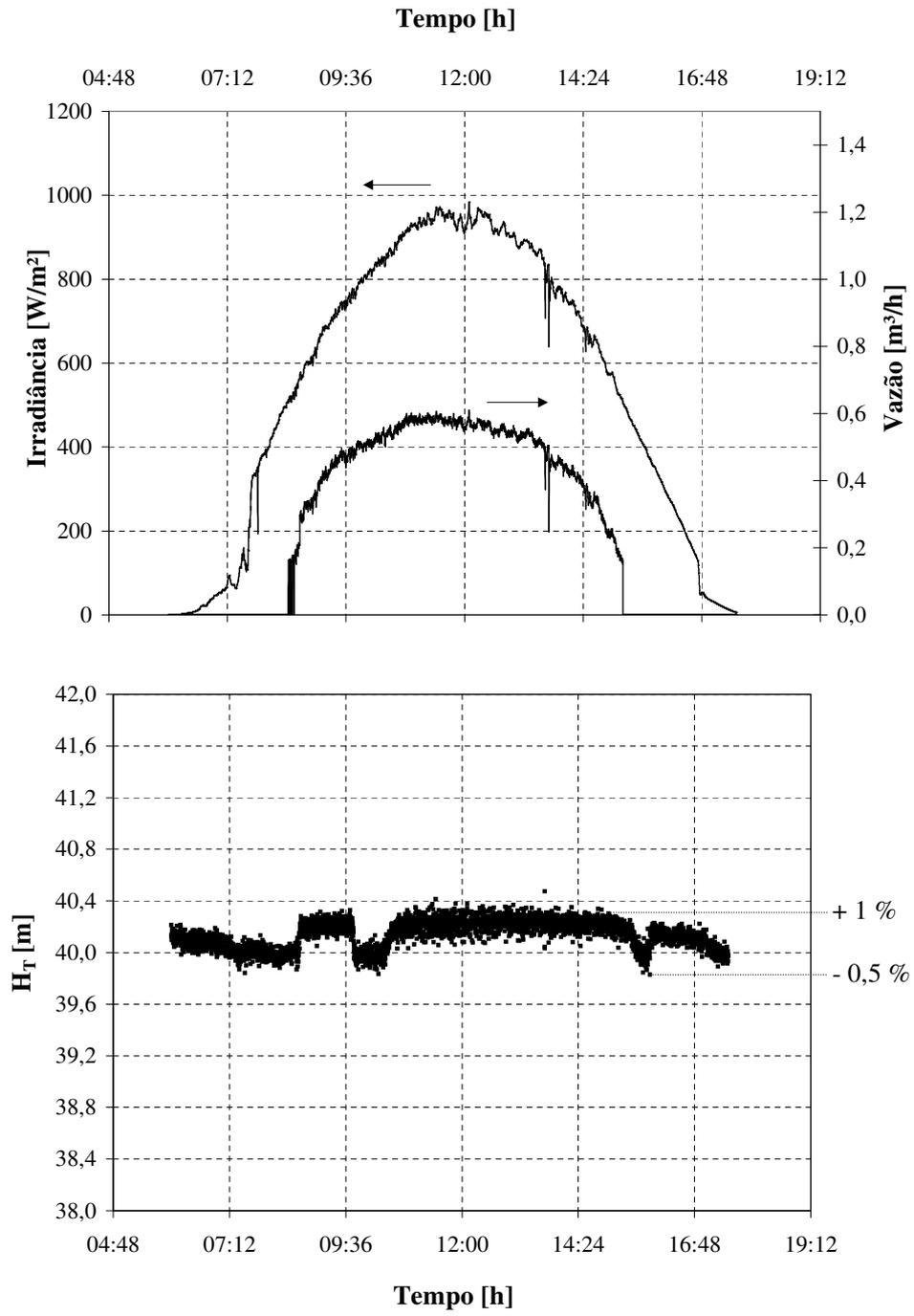


Figura 3.9: Variação de H<sub>T</sub> ao longo do dia - SBFCV.

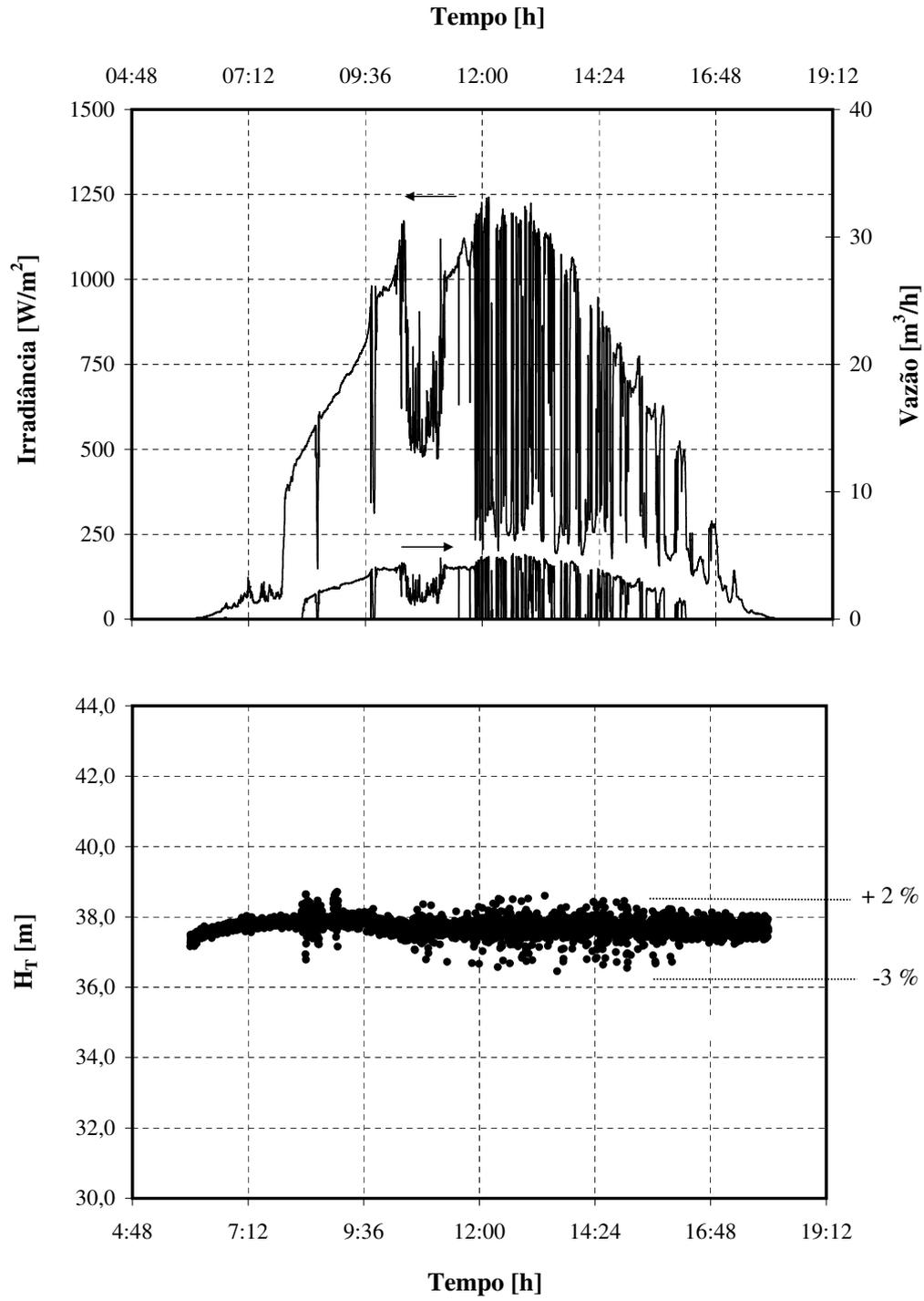


Figura 3.10: Variação de  $H_T$  ao longo do dia - SBFCF.

### 3.2.3 Descrição dos ensaios realizados

Inicialmente determinou-se para todas as combinações de CF+motobomba a curva de capacidade instantânea, com o auxílio de uma fonte de tensão cc de 500 V/10 A, tal como ilustrado no gráfico da figura 3.11.

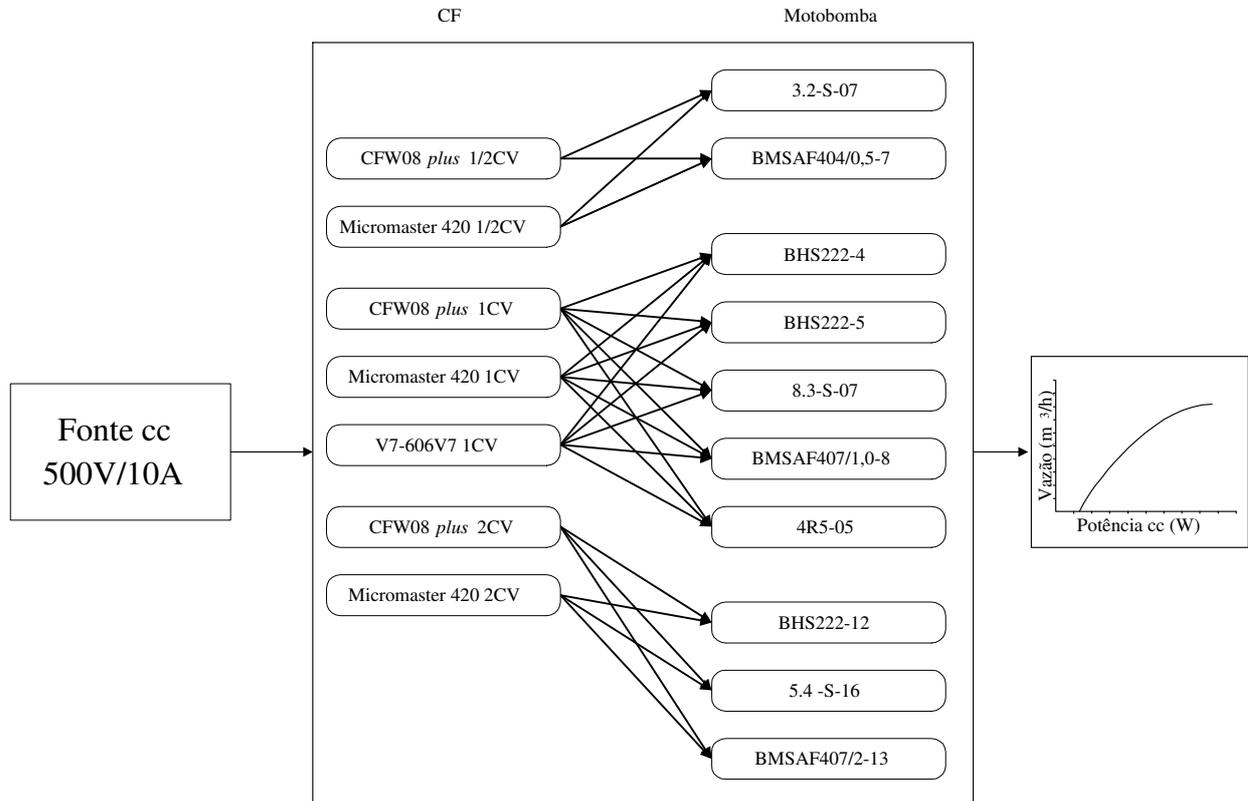


Figura 3.11: Ensaios realizados com a fonte de tensão cc 500 V/ 10 A.

Esses ensaios objetivaram selecionar o conjunto CF+motobomba mais eficiente para realização dos testes a sol real. Na figura 3.12 são apresentados os resultados obtidos para a motobomba de 1 CV, modelo BMSAF407/1,0-8. De acordo com a figura 3.12, constata-se que a capacidade de bombeamento pouca varia. A maior diferença se deu com o uso do CF VS-606V7; porém isto era esperado, haja vista que a curva  $V/f$  é do tipo apresentado na figura 1.12(a), página 18. As demais combinações de CF+motobomba ensaiadas tiveram seus perfis de curvas de capacidade instantânea idênticos aos apresentados na figura 3.12.

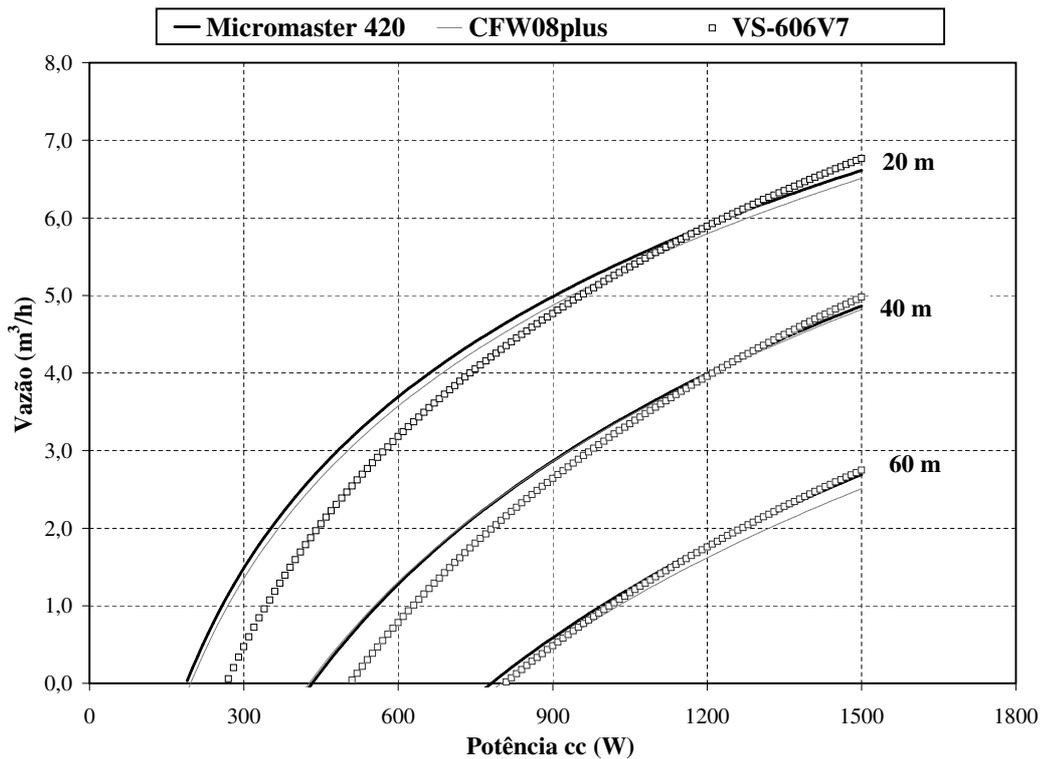


Figura 3.12: Curvas de capacidade instantânea para a motobomba BMSAF407/1,0-8.

Com base nos resultados obtidos com a fonte de tensão cc, deu-se início aos ensaios a sol real, utilizando-se os CF de um único fabricante. Os ensaios foram realizados segundo o esquema da figura 3.13. Nesses ensaios, optou-se por utilizar os CF do fabricante nacional, A2 (Tabela 3.2) pelo fato deste dispor de um parâmetro não disponível nos demais CF.

- **Ride-Trough:** quando este parâmetro está habilitado e houver uma queda de tensão, fazendo com que a tensão no circuito intermediário fique abaixo do nível de subtensão, os pulsos de saída são desabilitados (motor gira livre) e o CF aguarda o retorno da tensão por até 2 s. Se a tensão voltar ao estado normal antes desse tempo, o CF volta a habilitar os pulsos PWM, impondo a referência de frequência instantaneamente (Weg, 2002). Esta funcionalidade é extremamente útil, pois como já foi visto, se o controlador PID do CF utilizado não estiver adequadamente sintonizado, sempre que houver variações bruscas de irradiância o CF pode vir a desarmar por erro de subtensão. Todavia, com a existência desse parâmetro, mesmo que o controlador PID do CF utilizado não esteja sintonizado adequadamente, este problema dificilmente ocorrerá.

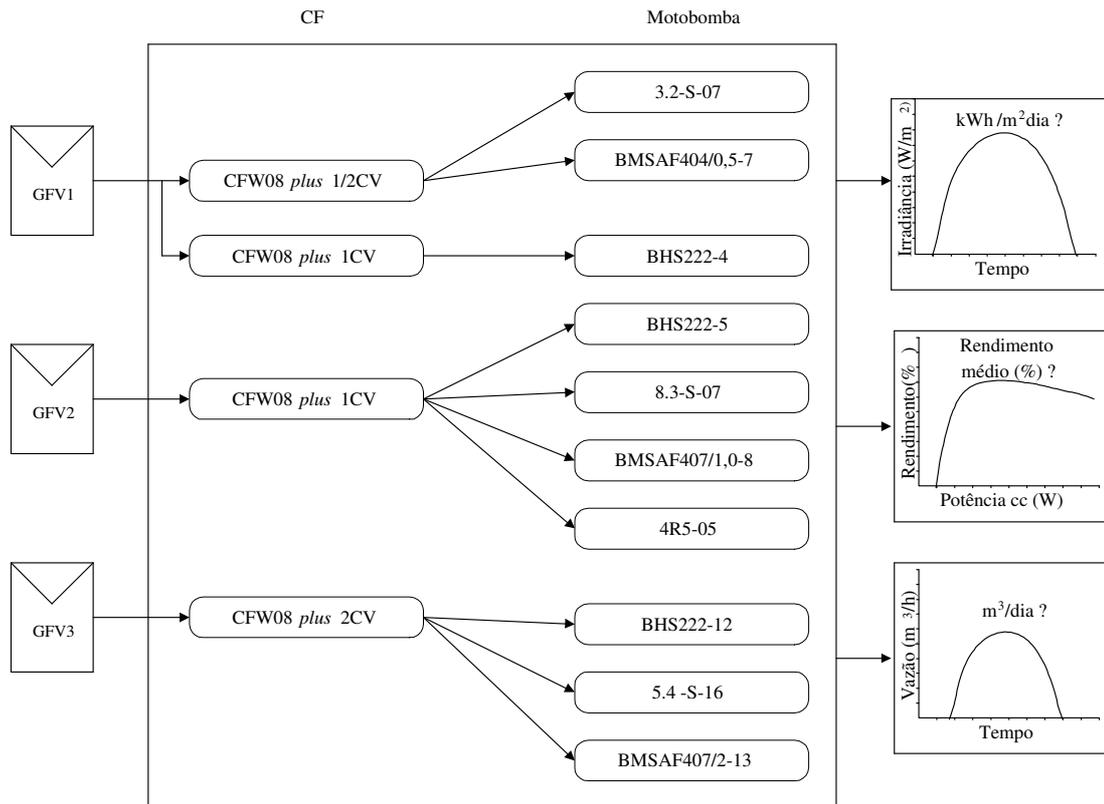


Figura 3.13: Ensaios realizados a sol real.

A título de ilustração, nas figuras 3.14 e 3.15 são apresentados os resultados obtidos para a motobomba de 1 CV modelo BMSAF407/1,0-8.

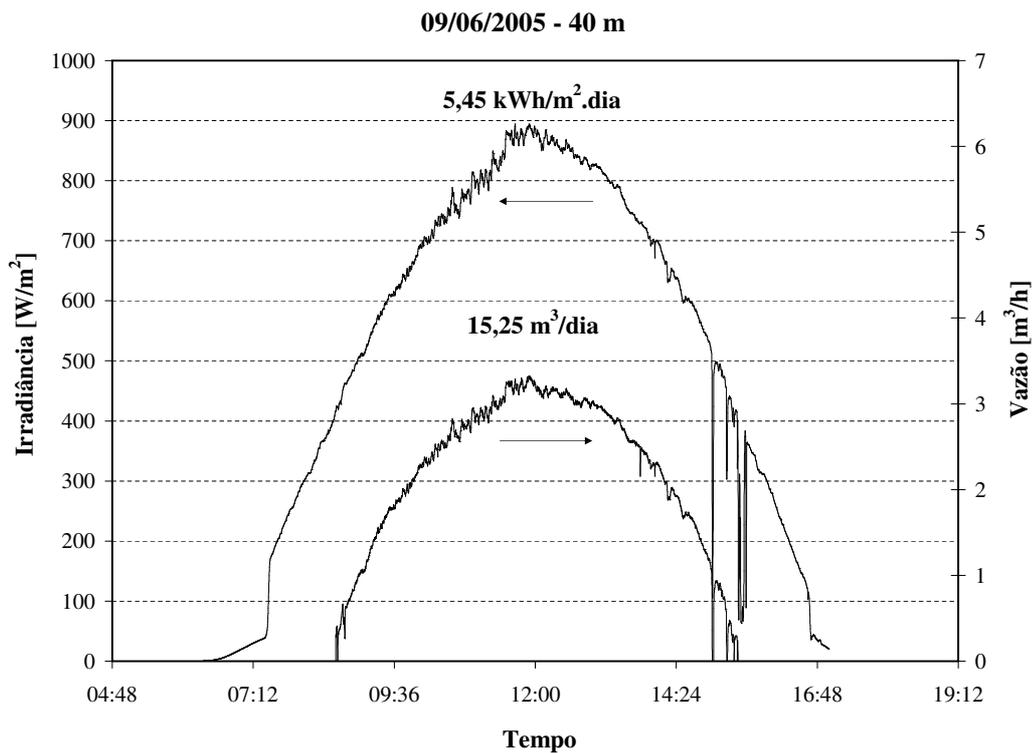


Figura 3.14: Volume bombeado e irradiação para um turno de bombeamento.

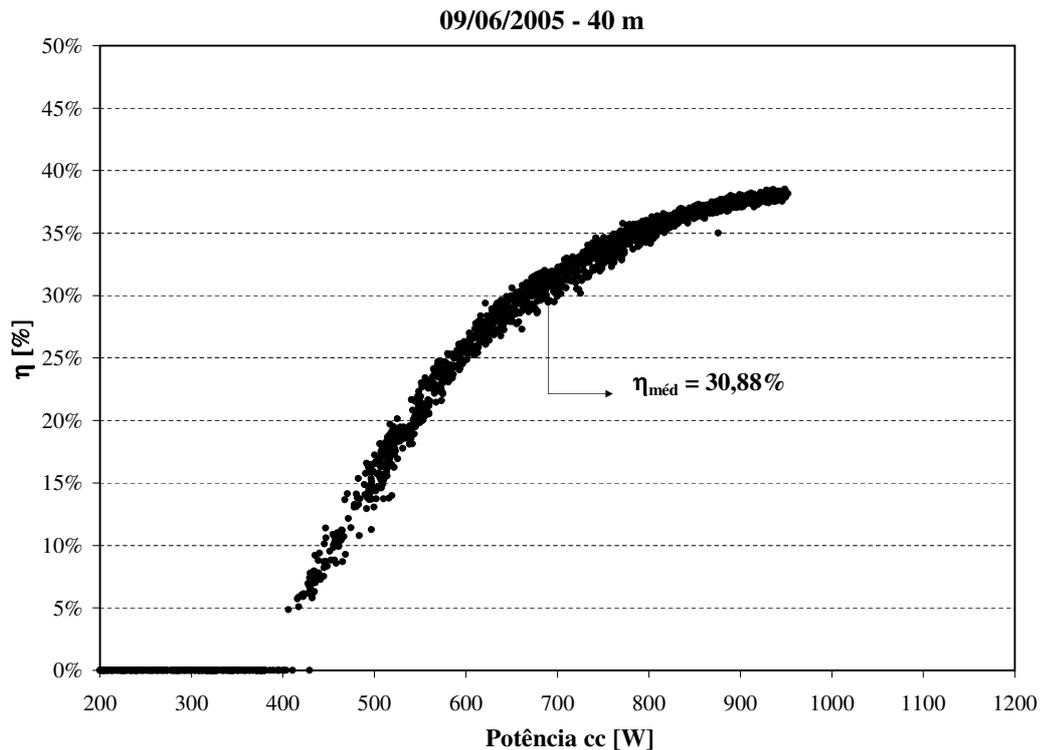


Figura 3.15: Eficiência média do conjunto CF+motobomba.

O valor de eficiência média ilustrado na figura 3.15 é obtido por intermédio da equação 3.1,

$$\eta_{med} = 2,725 \cdot H_T \cdot \frac{\int_0^t Q \cdot dt}{\int_0^t V_{cc} \cdot I_{cc} \cdot dt}, \quad (3.1)$$

onde,  $H_T$  é a altura manométrica total ( $m$ ),  $Q$  é a vazão ( $m^3/h$ ),  $V_{cc}$  e  $I_{cc}$  correspondem à tensão e à corrente, respectivamente ( $V$ ) e ( $A$ ), entregues pelo gerador fotovoltaico.

### 3.2.3.1 Análise dos resultados obtidos com a bancada de ensaio

Na tabela 3.5 estão indicados os resultados obtidos para todos os sistemas de bombeamento ensaiados, SBFCF e SBFCV. Há de se ressaltar que, como já mencionado na seção 3.2, cada sistema foi ensaiado tomando como referência o ponto ótimo de operação de cada motobomba.

Tabela 3.5: Resumo dos resultados obtidos para os sistemas de bombeamento ensaiados.

	GFV <sup>a</sup>	MB - modelo <sup>b</sup>	H <sub>r</sub> <sup>c</sup>	I <sup>d</sup>	V <sup>e</sup>	η <sub>m</sub> <sup>f</sup>
SBFCF	1000	BHS222-4	24	5,47	13,87	22,7
	1000	3.2-S-07	30	5,73	11,02	21,6
	1000	BMSAF404/0,5-7	30	5,90	12,23	23,1
	1500	BHS222-5	26	4,23	16,40	26,0
	1500	8.3-S-07	30	5,14	15,20	19,2
	1500	BMSAF407/1,0-8	40	5,45	15,25	30,8
	1500	4R5-05	35	5,45	15,77	27,6
	3000	BHS222-12	60	5,92	27,86	35,9
	3000	5.4-S-16	60	5,55	19,51	25,5
	3000	BMSAF407/2-13	60	5,52	21,4	28,2
SBFCV	900	SQF 5A-6	20	5,24	25,67	42,4
	1050	SCS 10-230	60	5,46	7,52	31,4
	1575	SP 3A-10	50	5,76	16,35	34,1

<sup>a</sup> Gerador fotovoltaico,  $Wp$ ;

<sup>b</sup> Motobomba;

<sup>c</sup> Altura manométrica total,  $m$ ;

<sup>d</sup> Irradiação diária medida,  $kWh/m^2$ ;

<sup>e</sup> Volume bombeado,  $m^3/dia$ ;

<sup>f</sup> Eficiência média (CF+motobomba), %;

Observa-se na tabela 3.5 que, com exceção do SBFCV que usa a motobomba SQF 5A-6<sup>2</sup>, os SBFCF oferecem rendimento global semelhante a de um SBFCV, comprovando parte da hipótese formulada.

Quanto à segunda parte da hipótese formulada, de que um SBFCF representa uma alternativa para incremento da confiabilidade neste tipo de aplicação, esta foi avaliada com base em um SBFCF operando em condições reais de operação. Neste sentido, foi feita a revitalização de um SBFCV que se encontrava desativado por problemas técnicos.

### 3.2.4 Avaliação em campo do sistema de bombeamento com conversor de frequência

Inicialmente, através de um levantamento de SBFCV originalmente instalados em campo (FEDRIZZI & ZILLES, 1998) fez-se a seleção de um dos sistemas para ser substituído por um SBFCF. Os SBFCV levantados foram implantados pelo PRODEEM em assentamentos da Reforma Agrária, localizados no Pontal do Paranapanema - SP, cujas características técnicas encontram-se na tabela 3.6.

<sup>2</sup>Estas são motobombas de alta eficiência, onde o dispositivo de condicionamento de potência está incorporado à carcaça da mesma.

Tabela 3.6: Principais características dos sistemas de bombeamento fotovoltaico - Pontal do Paranapanema - PRODEEM, fonte: (FEDRIZZI & ZILLES, 1998).

Assentam.	Nº lotes	Poço	Vazão Poço (m <sup>3</sup> /h)	Motobomba	Controlador (booster)	Arranjo do Gerador Fotovoltaico
Palú	14	P33	9,30	SCS10-230	PCB 8-90	16 KC 80 (8sX2p)
S. Rita	31	P39	12,20	SCS10-230	PCB 8-90	14 MSX 77 (7sX2p)
Yapinary	20	P47	8,20	SCS10-230	PCB 8-90	18 MSX 83 (6sX3p)
Yapinary	20	P40	8,30	SCS10-230	PCB 8-90	18 MSX 83 (6sX3p)
S. Maria	75	P38	12,20	SCS10-400	PCB 8-180	30 MSX 83 (10sX3p)
Primavera	23	P57	7,00	SCS10-230	PCB 8-90	21 MSX 70 (7sX3p)
Maturí	50	P56	11,30	SCS10-230	PCB 8-180	36 MSX 83 (12sX3p)
Santana 1	15	P16	12,38	SCS20-200	PCB 8-180	27 MSX 83 (9sX3p)
Santana 2	35	P17	10,85	SCS10-230	PCB 8-180	30 MSX 83 (10sX3p)
S. Cruz 1	43	P08	9,65	SCS10-230	PCB 8-90	21 MSX 70 (7sX3p)
S. Cruz 2	12	P09	8,80	SCS10-230	PCB 8-90	21 MSX 70 (7sX3p)
S. Rosa II	29	P29	8,30	SCS10-400	PCB 8-180	27 MSX 70 (9sX3p)
S. Isabel	67	P42	7,00	SCS10-400	PCB 8-180	36 MSX 83 (12sX3p)

Dentre os sistemas apresentados na tabela 3.6, foi selecionado o que está localizado no assentamento Palú, por se tratar de um local de fácil acesso. O assentamento Palú localiza-se no município de Presidente Bernardes, às margens da rodovia que comunica as cidades de Presidente Prudente e Mirante do Paranapanema. Para esse sistema, os dados do poço são: nível estático de 10 m; nível dinâmico de 42 m; e capacidade do poço de 11 m<sup>3</sup>/h. Na tabela 3.7 são apresentadas as características técnicas do sistema originalmente instalado, assim como do sistema já revitalizado, e nas figuras 3.16 a 3.20, estão ilustradas as várias etapas da instalação do SBFCE.

Tabela 3.7: Características técnicas do sistema, antes e pós-revitalização.

	Sistema original	Sistema revitalizado
Gerador FV	16 módulos KC 80	40 módulos KC 80
Configuração	8 série x 2 paralelo	20 série x 2 paralelo
Potência máxima instalada	1.280 Wp	3.200 Wp
Posicionamento da motobomba	72 m	54 m
Reservatório (7,5 m)	7.500 l	7.500 l
Motobomba	SCS10-230	* BMSAF407/2-13 / 2 CV
Disp. cond. de potência	Booster PCB 8-90B	CFW08plus

\* Tabela 3.1.



Figura 3.16: Montagem do gerador fotovoltaico.



Figura 3.17: Instalação da motobomba.



Foto: R. Zilles

Figura 3.18: Instalação dos equipamentos de condicionamento de potência.

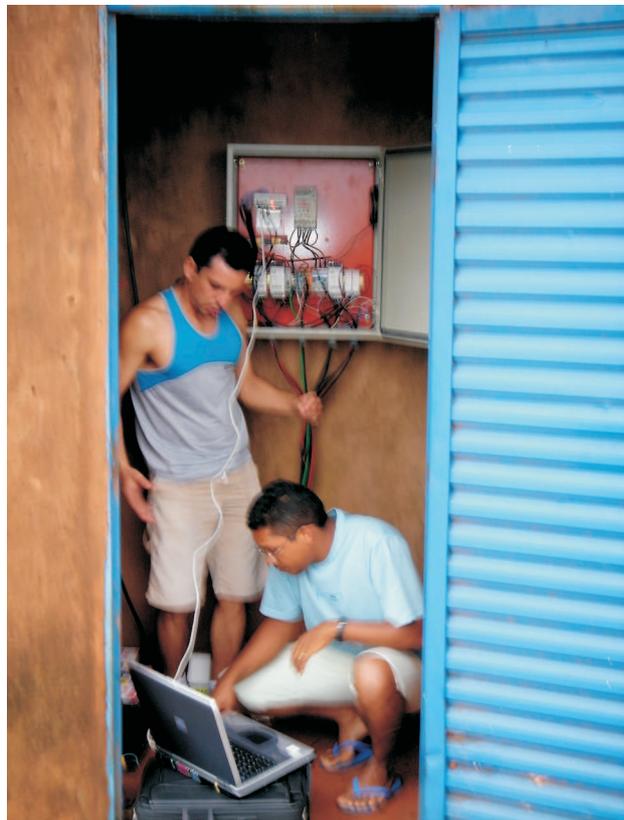


Foto: R. Zilles

Figura 3.19: Configuração da sistema de aquisição de dados.



Figura 3.20: Vista do SBFCF instalado.

O SBFCF é capaz de fornecer por dia  $32 \text{ m}^3$  de água para uma irradiação diária de  $5 \text{ kWh/m}^2$  a  $40 \text{ m}$  de altura manométrica total, tal como é ilustrado no ábaco de dimensionamento da figura 3.21. Os passos para sua composição correspondem aos descritos por Alonso-Abella et al. (2003).

O SBFCF iniciou sua operação em 12 de novembro de 2005 e estão sendo monitorados os seguintes parâmetros ao longo de cada dia de funcionamento: tensão ( $V$ ) e corrente ( $A$ ) do gerador fotovoltaico, vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), irradiância ( $\text{W/m}^2$ ) e nível do reservatório ( $m$ ). Com esses dados é possível fazer um diagnóstico detalhado e identificar os problemas não observados nos ensaios de laboratório. Na figura 3.22 estão indicados os pontos onde são obtidos os parâmetros acima mencionados.

### 3.2.5 Análise dos dados obtidos em campo

A análise dos dados obtidos em campo corresponde ao período de 12/11/2005 a 19/01/2006. Até a data de 18/01/2006, não houve ocorrências de falhas de operação, tal como pode ser observado no gráfico da figura 3.23, onde tem-se representado o volume bombeado diário de água para todos os dias do período de análise.

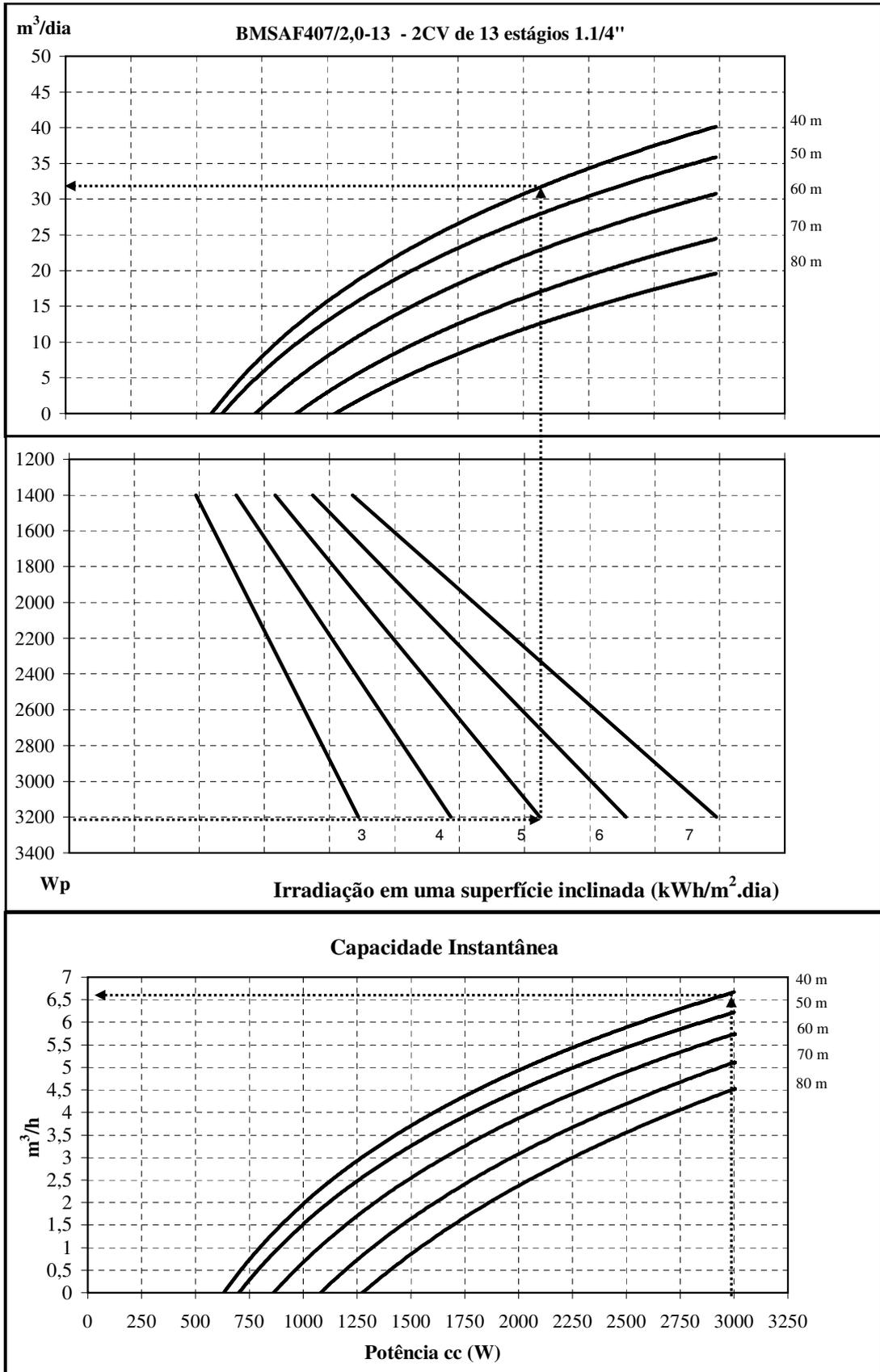


Figura 3.21: Ábaco de dimensionamento.

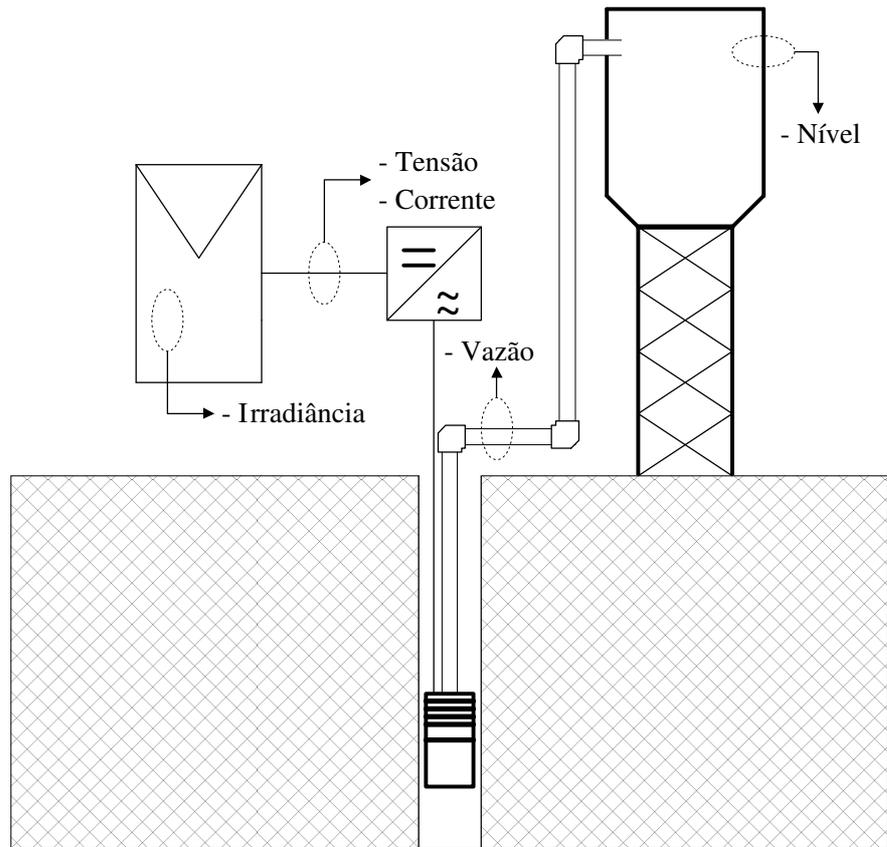


Figura 3.22: Indicação das variáveis monitoradas.

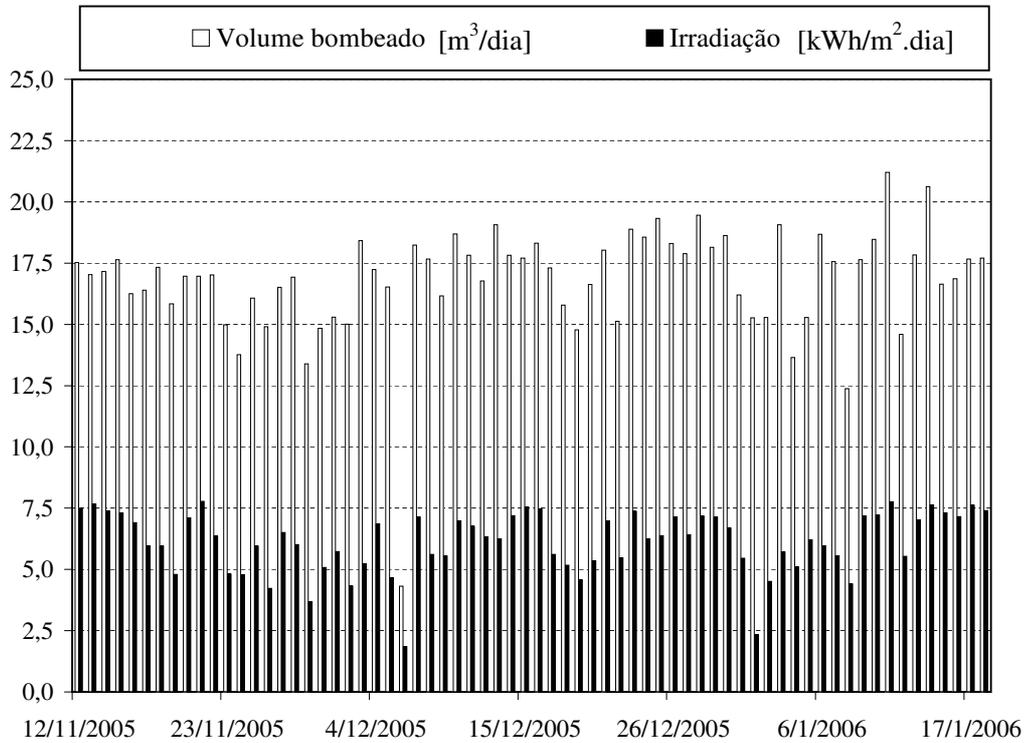


Figura 3.23: Volume bombeado diário de água.

A partir da data de 19/01/2006, o sistema deixou de operar devido a um problema técnico no CF. O código de erro apresentado, refere-se ao módulo dos transistores IGBTs (*Insulation Gate Bipolar Transistor*) em curto-circuito. De acordo com informações presentes no manual de operação do CF, este problema é decorrente de sobrecorrente na saída do mesmo. As causas mais prováveis são: curto-circuito entre duas fases do motor ou curto-circuito entre uma ou mais fases de saída do CF com o terra.

No entanto, segundo relatos dos moradores, o sistema deixou de operar após ocorrência de uma descarga atmosférica nas proximidades do mesmo por volta das 16:00 h. No gráfico da figura 3.24 tem-se indicado, com um círculo, o momento em que o sistema deixou de operar, às 16:02 h, o que comprova o informado. Neste sentido, é possível que esta seja a causa do problema técnico apresentado no CF, haja vista que a ocorrência de curto-circuito entre duas fases ou destas para o terra está descartada. Na data de 17/03/2006, o CF foi substituído e o sistema segue operando normalmente.

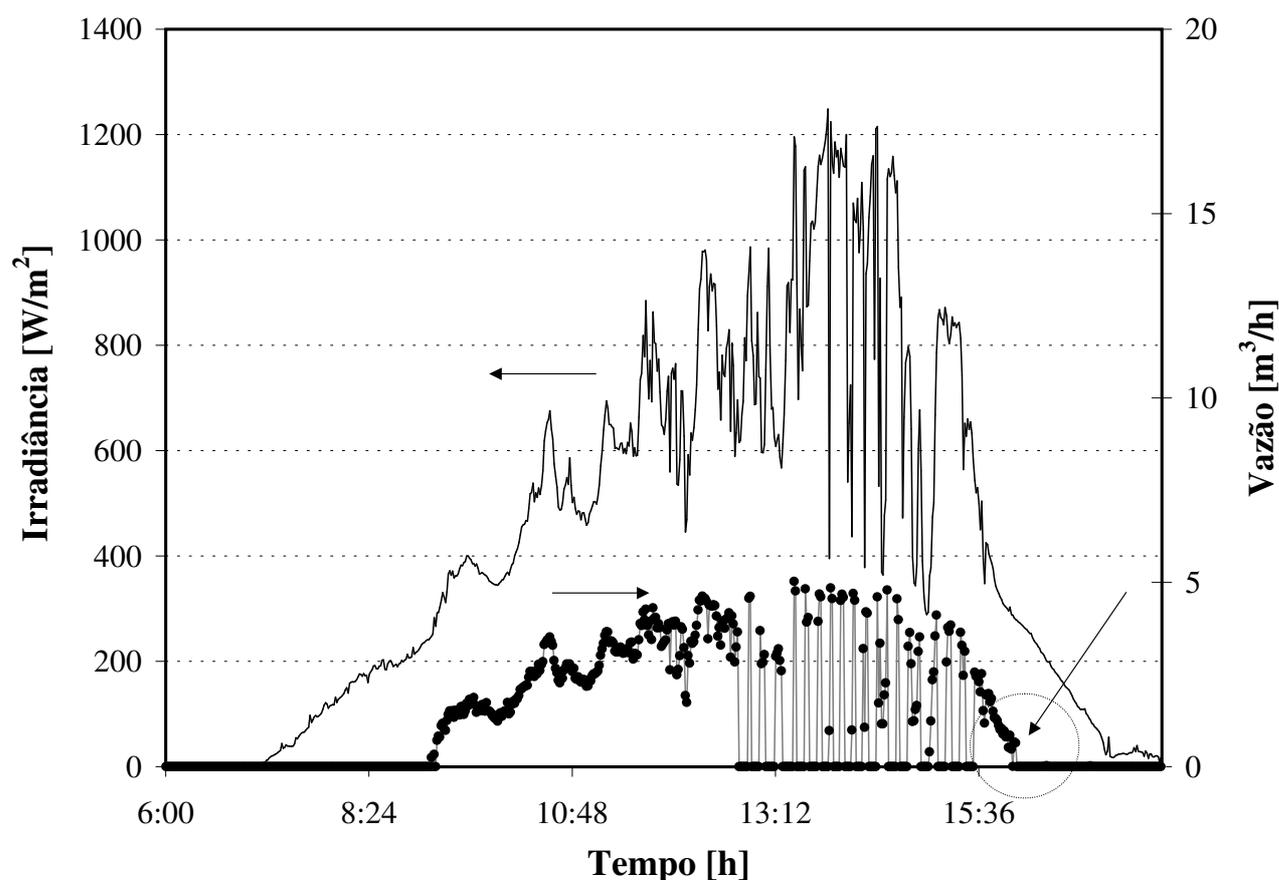


Figura 3.24: Variação da irradiância e vazão - 19/01/2006.

Com a ocorrência do problema técnico apresentado no CF pode-se perceber o incremento na confiabilidade da aplicação de bombeamento fotovoltaico, pois, neste tipo de configuração, onde todos os componentes são facilmente encontrados no mercado nacional, o

processo de manutenção do sistema foi otimizado. Esse novo contexto muda um cenário onde os sistemas são constituídos por componentes importados e de difícil aquisição no mercado nacional. Nesse cenário, os problemas técnicos costumam levar muito tempo para serem solucionados e, em muitas vezes, sendo esquecidos e, em consequência, os sistemas abandonados.

Durante o período de 12/11/2005 à 18/01/2006 o sistema forneceu  $1.141,96 m^3$  de água; o equivalente a  $16,79 m^3$  por dia. Este volume de água supre a demanda das famílias por um período de  $17 h$  ininterruptas, assim como observado no gráfico da figura 3.25, onde tem-se a variação do nível do reservatório para três dias consecutivos, 17, 18 e 19 de novembro de 2005.

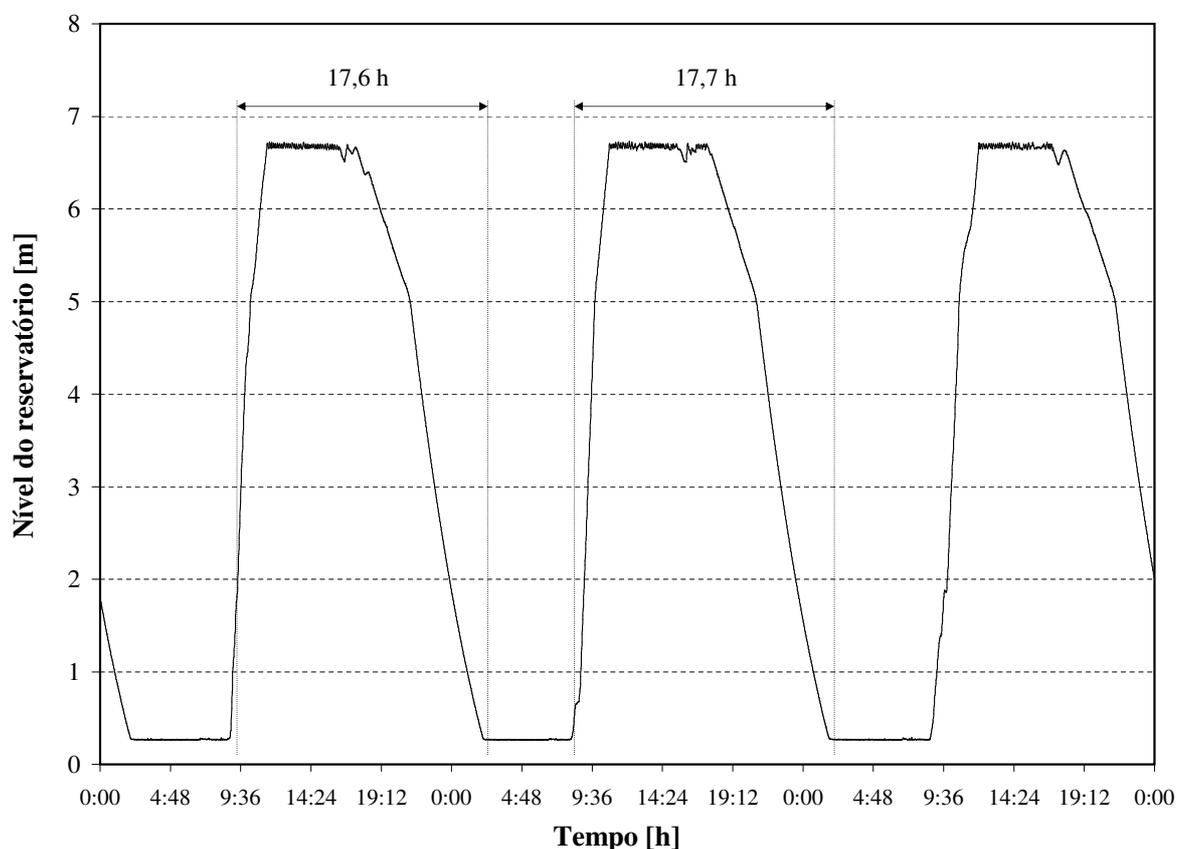


Figura 3.25: Variação do nível do reservatório ao longo do dia.

Observa-se que a capacidade máxima do sistema não está sendo usada em sua totalidade, pois o fator de utilização<sup>3</sup> está em torno de 50 %. Isso se deve a capacidade do reservatório ( $7,5 m^3$ ) ser insuficiente para armazenar o volume diário de água produzido pelo sistema, ou seja, o consumo está sendo limitado pelo reservatório. No gráfico da figura 3.26, obtido para um dia de céu claro, este fato está melhor ilustrado.

<sup>3</sup>Fator de utilização é definido como a razão entre a energia hidráulica medida, pela energia hidráulica do sistema caso operasse continuamente.

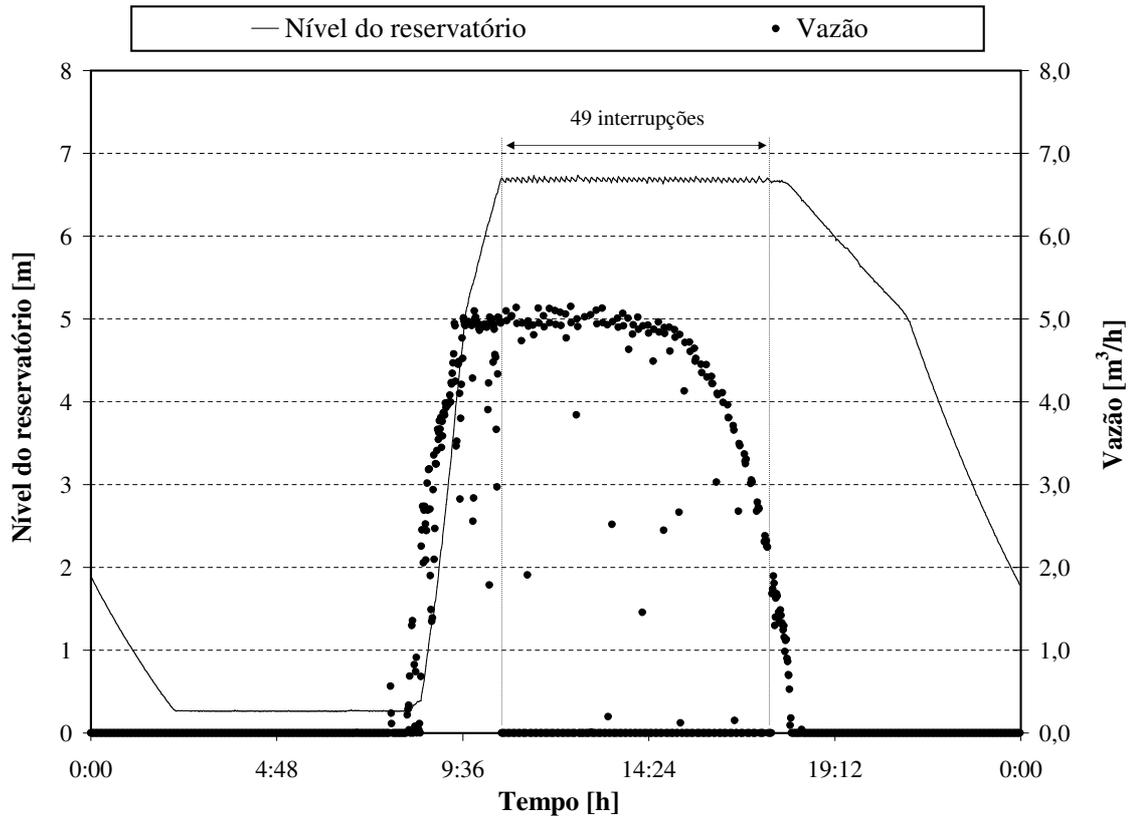


Figura 3.26: Limitação da produção de água em função da capacidade máxima do reservatório.

De acordo com o gráfico da figura 3.26 constata-se que, devido ao sobredimensionamento do sistema, o número de interrupções do SBFCF é muito elevado, 49<sup>4</sup>. Este valor pode ser reduzido aumentando-se o tempo em que o sistema permanece desativado; contudo, tendo em vista que um dos objetivos da pesquisa é avaliar a robustez dos vários componentes do SBFCF, este segue operando sem nenhuma modificação em seu sistema de controle.

Com a instalação do SBFCF em campo, pode-se constatar um problema não observado nos ensaios de laboratório. Esse problema aparece com o aumento da distância entre o CF e o motor, pois a partir de 50 m, a capacitância dos cabos para o terra aumenta (efeito “linha de transmissão”) podendo atuar a proteção de sobrecorrente, desativando o sistema. Para solucionar esse problema tem-se duas alternativas: 1) ligação de uma reatância trifásica de carga em série; 2) reduzir a frequência de chaveamento.

1. A utilização de uma reatância trifásica de carga adiciona uma indutância na saída do CF para o motor. Com isto, a corrente de fuga que irá aparecer com distâncias grandes entre o motor e o inversor é praticamente eliminada (WEG, 2002).

<sup>4</sup>Tendo como referência o número de acionamentos diários recomendado pelo fabricante para uma motobomba, o qual está em torno de 25 vezes. Contudo, este número se refere a uma motobomba ligada a seu painel de controle, ou seja, frequência fixa e não variável.

2. A redução da frequência de chaveamento reduz as correntes de fuga para o terra, podendo evitar a atuação indevida da proteção de sobrecorrente. Todavia, isto tem como consequência o aumento do ruído acústico do CF (WEG, 2002).

Dentre as duas opções apresentadas, a segunda é mais conveniente, pois evita-se a inclusão de mais um componente no sistema. No caso do protótipo instalado, esta foi a solução adotada.

### 3.3 Avaliação econômica

A avaliação econômica apresentada neste trabalho foi realizada utilizando-se figuras de mérito que normalizam os custos de investimentos, de reposição e de operação e manutenção dos diferentes sistemas, para um mesmo período de vida útil do projeto. Contudo, é preciso deixar claro que o objetivo deste tópico é apenas analisar a viabilidade econômica da configuração em estudo, tendo como referência um SBFCV, pois, com relação a outras tecnologias, já existem na literatura estudos que comprovam que, sob certas circunstâncias, a opção fotovoltaica é a mais viável. Como exemplos podem-se citar (HAMMAD, 1995) e (FEDRIZZI, 1997).

Em Hammad (1995) é realizada uma análise comparativa do custo do volume bombeado para diferentes tipos de tecnologia; a saber; solar fotovoltaica, eólica (mecânica e elétrica) e diesel. Em média, para todos os sistemas estudados, num total de 14, o custo do volume bombeado com a tecnologia de geração a diesel chega a ser o dobro em relação à fotovoltaica. Já em Fedrizzi (1997) é feita uma análise econômica comparativa das opções de bombeamento de água com tecnologia elétrica convencional, solar fotovoltaica e a gasolina, demonstrando que no contexto atual já há significativo espaço para o emprego do bombeamento fotovoltaico

#### 3.3.1 Figuras de mérito

Neste trabalho estão sendo usadas as seguintes figuras de mérito: Custo do Ciclo de Vida, Custo do Ciclo de Vida Anualizado, Custo do Volume Bombeado e Custo do Volume Específico Bombeado.

##### 3.3.1.1 Custo do ciclo de vida (CCV)

O *CCV* é o valor presente de todos os custos associados com o investimento, reposição, operação e manutenção ao longo da vida útil do sistema. O *CCV* determina o

custo total do investimento levando em conta o valor do dinheiro no tempo, em função da taxa de desconto utilizada (equação 3.2),

$$CCV = I_0 + O\&M \cdot \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + CMB \cdot (1+i)^{-N_{MB}} + CCP \cdot (1+i)^{-N_{CP}} + CPC \cdot (1+i)^{-N_{PC}}, \quad (3.2)$$

onde,  $I_0$  é o custo do investimento inicial,  $US\$$ ;  $O\&M$  é o custo de operação e manutenção,  $US\$$ ;  $i$  é a taxa de desconto anual <sup>5</sup>, %;  $n$  é a vida útil, anos;  $CMB$  é o custo da motobomba,  $US\$$ ;  $CCP$  é o custo do dispositivo de condicionamento de potência<sup>6</sup>,  $US\$$ ;  $CPC$  é o custo do painel de controle,  $US\$$ ,  $N_{MB}$  é a vida útil da motobomba, anos;  $N_{CP}$  é a vida útil do dispositivo de condicionamento de potência, anos, e  $N_{PC}$  é a vida útil do painel de controle, anos.

### 3.3.1.2 Custo do ciclo de vida anualizado (*CCVA*)

O *CCVA* é o custo anual,  $US\$/ano$ , requerido para o pagamento total do investimento ao longo de sua vida útil. Pode ser calculado segundo a equação 3.3,

$$CCVA = CCV \cdot FRC, \quad (3.3)$$

sendo *FRC* o fator de recuperação de capital, índice pelo qual, o investimento total do projeto é recuperado anualmente em função de uma determinada taxa de desconto,  $i$ , dentro de seu período do vida útil. O *FRC* é calculado pela equação 3.4,

$$FRC = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}. \quad (3.4)$$

### 3.3.1.3 Custo do volume bombeado (*CVB*)

O *CVB* é o custo unitário do volume bombeado,  $US\$/m^3$ , para cada uma das opções utilizadas. Seu valor é calculado pela equação 3.5,

$$CVB = \frac{CCVA}{VB_a}, \quad (3.5)$$

onde,  $VB_a$  equivale ao volume bombeado por ano ( $m^3/ano$ ).

### 3.3.1.4 Determinação do volume bombeado por ano ( $VB_a$ )

O  $VB_a$  é determinado a partir do volume diário bombeado ( $V_d$ ), sendo este calculado de acordo com o procedimento descrito por Alonso-Abella et al. (2003), o qual corresponde aos seguintes passos:

---

<sup>5</sup>A taxa de desconto,  $i$ , é o índice pelo qual estima-se o valor presente de determinada quantidade de moeda no futuro. A taxa de desconto oferece uma indicação do nível de aproveitamento das oportunidades de investimento econômico da sociedade.

<sup>6</sup>Custo do CF para o caso de um SBFCF.

1. Selecionar um perfil de curva de irradiância. O método analítico descrito em (IEC 61725, 1997) é bem apropriado,
2. Determinar a potência cc entregue pelo gerador fotovoltaico,
3. Determinar a vazão através da curva de capacidade instantânea  $Q(t) = f(P_{cc}, H_T)$ . Essas curvas foram obtidas experimentalmente com o auxílio da bancada de ensaio utilizando-se uma fonte cc (500 V/10 A) (seção 3.2.3),
4. Determinar o volume diário bombeado integrando  $Q(t)$ ,  $V_d = \int_0^t Q \cdot dt$ ,
5. Determinar o volume bombeado por ano,  $VB_a = 365 \cdot V_d$ .

### 3.3.1.5 Comparação entre os valores - experimental x modelo

Na figura 3.27, tem-se uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos por simulação. Os resultados presentes nesta análise são para um SBFCF ensaiado a uma altura manométrica total de 20 m. Este sistema é composto por um gerador fotovoltaico de 1.500 Wp, um CF modelo CFW08plus de 1 CV, e uma motobomba trifásica modelo 4R-05, de 1 CV.

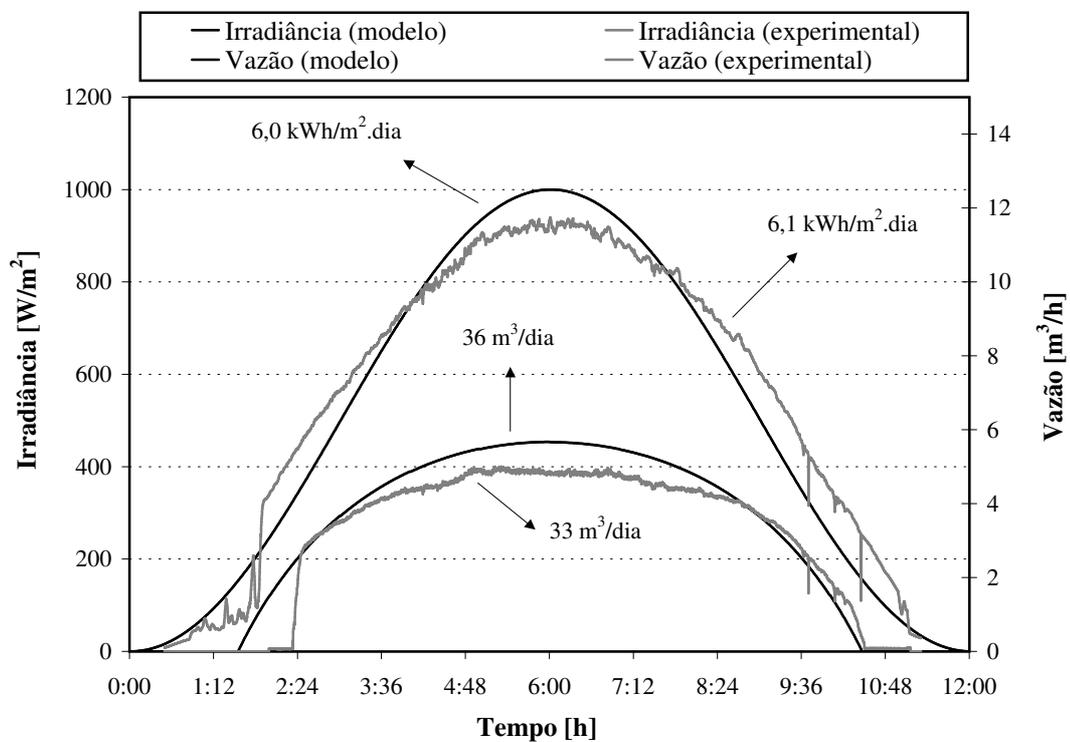


Figura 3.27: Comparação entre os valores de irradiância e vazão - modelo x experimental.

De acordo com a figura 3.27, observa-se que o erro encontra-se abaixo de 10%. Dada a magnitude do erro, o valor de  $VB_a$  obtido por simulação é confiável para realização da análise econômica.

### 3.3.2 Cenários

Neste trabalho estão sendo comparados dois sistemas de bombeamento que utilizam a mesma fonte de geração de energia e que diferem nos demais equipamentos utilizados (dispositivo de condicionamento de potência e motobomba). Neste caso, a variável que irá alterar a diferença entre os resultados obtidos é o número de vezes em que tais equipamentos terão que ser substituídos. Assim sendo, foram criados dois cenários, cujas premissas, diferem apenas neste ponto. Para os dois cenários, são listadas as seguintes premissas de ordem comum:

1. O período de análise é de 20 anos;
2. A taxa de desconto considerada é de 12% ao ano;
3. A irradiação de referência é de  $5 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{dia}$ ;
4. O preço do gerador fotovoltaico é de  $5 \text{ US}\$/\text{Wp}$  ( $\text{US}\$ 1 = \text{R}\$ 2,50$ );
5. O custo anual de operação e manutenção (*O&M*) de  $\text{US}\$ 100,00$ .

Na tabela 3.8 tem-se listados os custos de cada equipamento utilizados na análise econômica para ambos os tipos de sistemas de bombeamento (SBFCV e SBFCF). Os valores são referentes ao ano de 2005.

Tabela 3.8: Custo dos equipamentos - valores referentes a 03/05/2005 ( $\text{US}\$ 1 = \text{R}\$ 2,5$ ).

SBFCF	1/2 CV	CFW 08 plus (CF)	US\$ 249,00
		BHS222-4 (motobomba)	US\$ 680,00
		3.2-S-07 (motobomba)	US\$ 386,80
		BMSAF404/0,5-7 (motobomba)	US\$ 652,00
	1 CV	CFW 08 plus (CF)	US\$ 268,00
		BHS222-5 (motobomba)	US\$ 704,00
		8.3-S-07 (motobomba)	US\$ 414,80
		BMSAF407/1,0-8 (motobomba)	US\$ 714,40
		4R5-05 (motobomba)	US\$ 524,00
	2 CV	CFW 08 plus (CF)	US\$ 348,00
		BHS222-12 (motobomba)	US\$ 865,60
		5.4-S-16 (motobomba)	US\$ 572,00
		BMSAF407/2-13 (motobomba)	US\$ 882,40
Quadro elétrico (comum a todos os sistemas)		US\$ 240,00	
SBFCV	SQF 5A-6 (motobomba)	US\$ 3.400,00	
	SCS 10-230 (motobomba)	US\$ 3.096,00	
	PCB-120-M1 (booster)	US\$ 455,00	
	SP 3A-10 (motobomba)	US\$ 1.080,00	
	SOLARTRONIC - SA 1500 (inversor)	US\$ 1.540,00	

### 3.3.2.1 Cenário I: uma reposição de equipamentos

Na tabela 3.9, tem-se o valor do custo do volume bombeado para todos os sistemas de bombeamento analisados. Nela, observa-se como é característico dos sistemas de bombeamento, o aumento do *CVB* com o aumento da altura manométrica total. Dada esta característica, torna-se difícil fazer a comparação entre os sistemas por meio dessa figura de mérito, haja visto que os pontos ótimos de operação dos sistemas são distintos. Todavia, é possível comparar os sistemas entre si, por meio de uma outra figura de mérito, a qual foi denominada de Custo do Volume Específico Bombeado (*CVEB*).

Tabela 3.9: Custo do volume bombeado,  $US\$/m^3$ .

	GFV ( $W_p$ )	MB - modelo	Altura manométrica total (m)													CVB ( $US\$/m^3$ )			
			10	13	18	20	24	26	27	28	30	35	40	42	50		51	60	80
SBFCF	1000	BHS222-4	0,08			0,24			0,41										
	1000	3.2-S-07		0,15						0,26						1,96			
	1000	BMSAF404/0,5-7	0,13							0,26				0,98					
	1500	BHS222-5		0,09			0,14												
	1500	8.3-S-07			0,12					0,20		0,56							
	1500	BMSAF407/1,0-8			0,11							0,21					0,97		
	1500	4R5-05						0,13			0,18		0,23						
	3000	BHS222-12										0,17					0,24	0,39	
	3000	5.4-S-16			0,14							0,19					0,31	0,70	
3000	BMSAF407/2-13										0,22					0,26	0,60		
SBFCV	900	SQF 5A-6	0,08		0,11					0,19									
	1050	SCS 10-230			0,19							0,26					0,42		
	1575	SP 3A-10									0,20		0,25			0,33			

GFV: Gerador fotovoltaico

MB: Motobomba

CVB: Custo do volume bombeado

\*Os CFs utilizados correspondem ao modelo CFW08plus

\*\* Irradiação diária de referência: 5 kWh/m<sup>2</sup>

O *CVEB* ( $US\$/m^4$ ), permite uma avaliação de diferentes tecnologias de bombeamento para situações que envolvem diferentes alturas manométricas e volume bombeado (Hahn, 2002). O valor do  $m^4$  é obtido multiplicando-se o volume bombeado ( $m^3$ ) pela altura manométrica total (m). Na tabela 3.10, obtida a partir da tabela 3.9, tem-se *CVEB* ( $US\$/m^4$ ) para cada sistema operando em seu ponto ótimo.

Tabela 3.10: Custo do volume específico bombeado, Cenário I.

	GFV ( $Wp$ )	MB - modelo	$H_T$ (m)	(US\$/m <sup>4</sup> )
SBFCF	1000	BHS222-4	24	0,0099
	1000	3.2-S-07	30	0,0086
	1000	BMSAF404/0,5-7	30	0,0086
	1500	BHS222-5	26	0,0054
	1500	8.3-S-07	30	0,0068
	1500	BMSAF407/1,0-8	40	0,0051
	1500	4R5-05	35	0,0050
	3000	BHS222-12	60	0,0039
	3000	5.4-S-16	60	0,0051
	3000	BMSAF407/2-13	60	0,0043
SBFCV	900	SQF 5A-6	20	0,0054
	1050	SCS 10-230	40	0,0066
	1575	SP 3A-10	50	0,0050

GFV: Gerador fotovoltaico

MB: Motobomba

\*Os CFs utilizados correspondem ao modelo CFW08plus

\*\* Irradiação diária de referência: 5 kWh/m<sup>2</sup>

Comparando os valores dos *CVEB* presentes na tabela 3.10 com os valores de rendimento médio apresentados na tabela 3.5, pode-se constatar que somente os SBFCF que apresentam eficiência média<sup>7</sup> abaixo de 23 % possuem *CVEB* superior aos dos SBFCV (figura 3.28). Esse valor de eficiência tende a diminuir à medida que o número de troca de equipamentos tende a aumentar, tal como constatado no segundo cenário

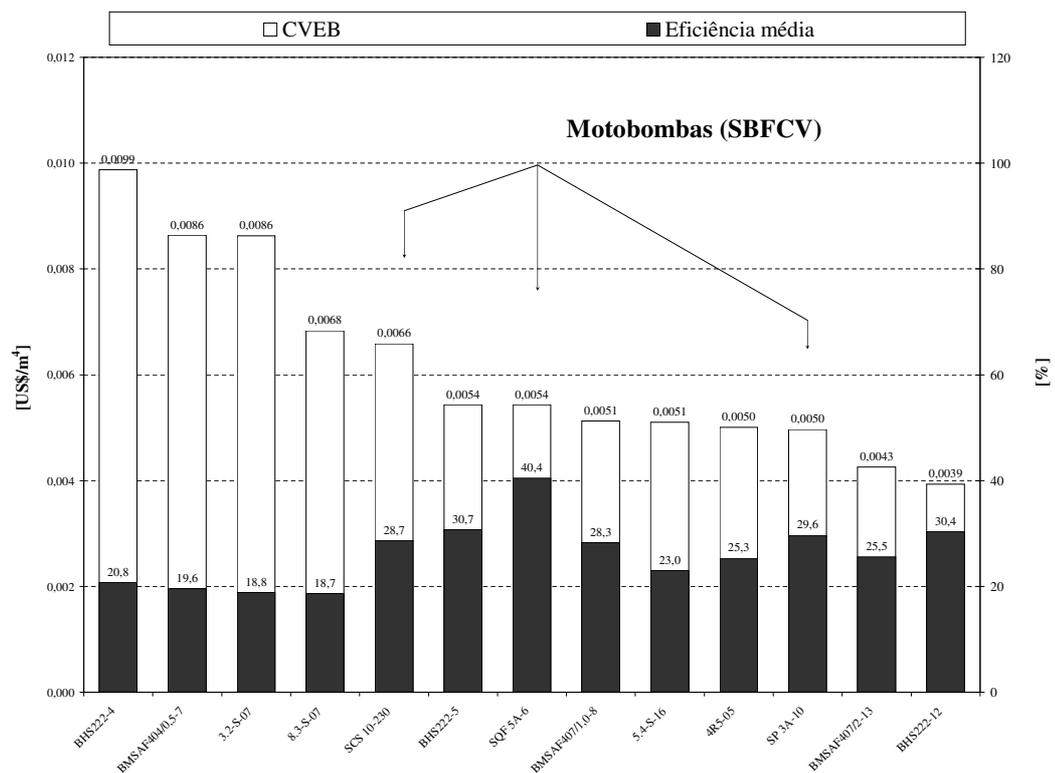


Figura 3.28: CVEB e Eficiência média, Cenário I.

<sup>7</sup>Motobomba+CF

### 3.3.2.2 Cenário II: duas reposições de equipamentos

Na tabela 3.11, tem-se o valor do custo do volume específico bombeado para todos os sistemas de bombeamento analisados. Observa-se neste cenário que, com o aumento do número de reposições de equipamentos, a diferença entre os *CVEB* para os dois tipos de sistema (SBFCV e SBFCF) é menor. Este fato é melhor ilustrado comparando os dois tipos de sistemas, um formado pela motobomba 8.3-S-07 e o outro formado pela motobomba SCS 10-230, sendo que neste cenário, o sistema formado pela motobomba 8.3-S-07 apresenta *CVEB* menor. O mesmo se verifica também entre os dois tipos de sistemas, um formado pela motobomba BHS222-5 e o outro formado pela SQF 5A-6 ( figura 3.29).

Tabela 3.11: Custo do volume específico bombeado, Cenário II.

	GFV ( $W_p$ )	MB - modelo	$H_T$ (m)	(US\$/m <sup>4</sup> )
SBFCF	1000	BHS222-4	24	0,0104
	1000	3.2-S-07	30	0,0090
	1000	BMSAF404/0,5-7	30	0,0091
	1500	BHS222-5	26	0,0056
	1500	8.3-S-07	30	0,0070
	1500	BMSAF407/1,0-8	40	0,0053
	1500	4R5-05	35	0,0052
	3000	BHS222-12	60	0,0040
	3000	5.4-S-16	60	0,0052
	3000	BMSAF407/2-13	60	0,0044
SBFCV	900	SQF 5A-6	20	0,0060
	1050	SCS 10-230	40	0,0072
	1575	SP 3A-10	50	0,0053

GFV: Gerador fotovoltaico

MB: Motobomba

\*Os CFs utilizados correspondem ao modelo CFW08plus

\*\* Irradiação diária de referência: 5 kWh/m<sup>2</sup>

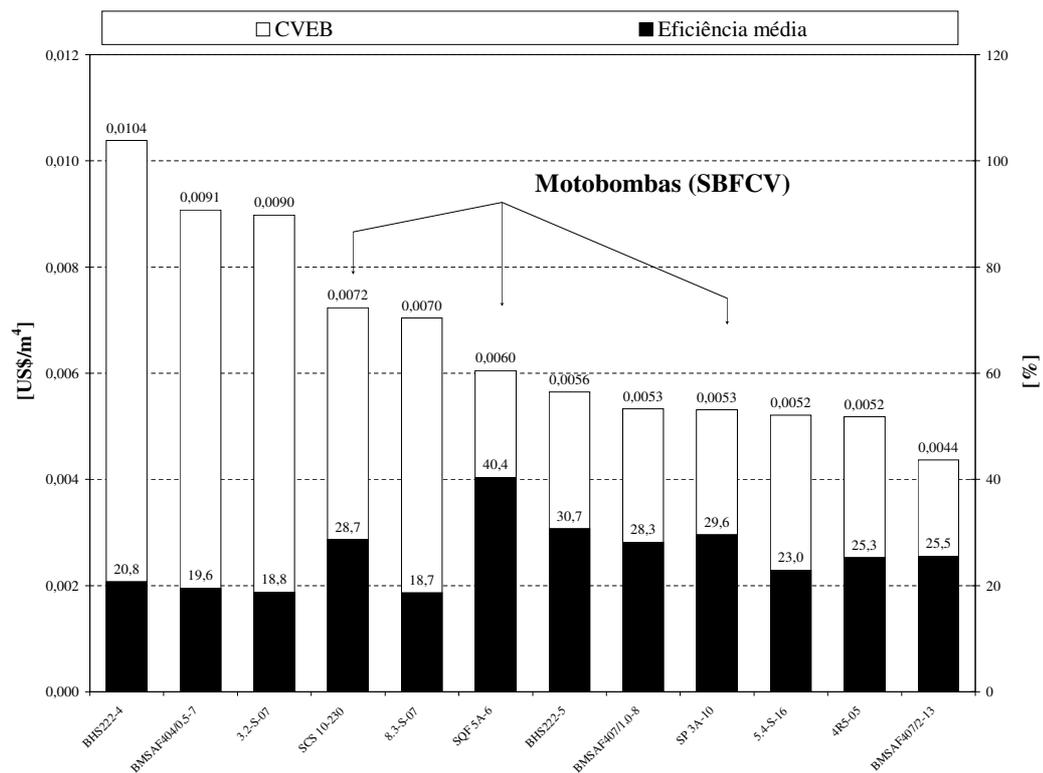


Figura 3.29: CVEB e Eficiência média, Cenário II.

### 3.3.2.3 Análise dos resultados

Com os resultados obtidos para ambos os cenários, pode-se constatar que um SBFCF é economicamente viável, mesmo quando comparado a um SBFCV de alta eficiência<sup>8</sup>. Para este caso específico, e considerando que ambos os sistemas estão dimensionados para produzir similar volume de água por dia, o SBFCF agrega certa desvantagem, pois o fato da utilização de motobombas convencionais de menor eficiência tem como consequência a utilização de um gerador fotovoltaico de maior capacidade, o que implica maior custo de investimento inicial.

Contudo, a grande vantagem do SBFCF é o fato de ser uma configuração composta por equipamentos facilmente encontrados no mercado nacional, que como já comentado anteriormente, facilita todo o processo de manutenção e reposição de equipamentos danificados.

<sup>8</sup>Sistema de bombeamento que utilizam motobombas modelo SQF, onde todo o dispositivo de condicionamento de potência está incorporado a este equipamento

## CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo a otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada para aplicação de bombeamento de água com bombas centrífugas. A motivação para o desenvolvimento da pesquisa se traduz nos diversos benefícios que este tipo de configuração de sistema pode proporcionar à sociedade em termos de facilidade de manutenção, confiabilidade, apropriação da tecnologia e a não dependência de equipamentos importados.

Os benefícios são decorrentes da utilização de equipamentos desenvolvidos para aplicações com a rede elétrica convencional, os quais representam uma tecnologia muito mais madura e estabelecida do que os dedicados exclusivamente a aplicações com a fonte de energia fotovoltaica.

Para o desenvolvimento da pesquisa formulou-se a hipótese de que este tipo de configuração de sistema de bombeamento de água representa uma alternativa para incremento da confiabilidade cujo rendimento global é semelhante à de um sistema de bombeamento fotovoltaico composto por equipamentos dedicados exclusivamente a este tipo de aplicação.

A hipótese formulada foi comprovada por meio de uma análise técnica e econômica do sistema em estudo. Com base na comprovação da hipótese é possível afirmar que o uso do conversor de frequência em aplicações de bombeamento de água é uma alternativa tecnicamente confiável e economicamente viável.

No decorrer da pesquisa pôde-se constatar que o conversor de frequência é o elemento chave para a operação otimizada do sistema. Sua parametrização é relativamente simples, pois, em suma, consiste em habilitar o controlador PID e configurar a entrada e saída analógicas para fazer o sistema operar em malha fechada.

A maior dificuldade encontra-se na determinação dos parâmetros de sintonia do controlador PID para proporcionar a operação estável do sistema durante todo o seu ciclo de bombeamento. Esses parâmetros devem ser determinados considerando apenas as ações de controle proporcional e integral, pois, é nesta situação que o sistema apresentou melhor desempenho.

Para determinação dos parâmetros de sintonia verificou-se que os métodos práticos de sintonia, baseados na resposta do sistema em malha aberta, são satisfatórios. Contudo tais métodos necessitam da utilização de computador e osciloscópio.

Todavia, uma vez determinados os parâmetros de sintonia, percebe-se que estes praticamente não se alteram quando se muda a motobomba ou o gerador fotovoltaico. Contudo, recomenda-se o refinamento dos parâmetros com o sistema em operação, o que torna-se uma tarefa simples de se executar, pois o controle utilizado é do tipo proporcional integral, ou seja, há apenas dois parâmetros a serem refinados.

No trabalho foram avaliadas duas formas de estratégia de operação, *set-point* fixo e variável. Para o caso do sistema operando com valor de *set-point* fixo, é recomendado que se construa o gráfico de distribuição da energia produzida pelo gerador fotovoltaico em função de sua tensão de máxima potência para um ano típico. Sendo assim, é possível fazer a escolha certa do valor de *set-point* que otimiza a aplicação.

O valor de *set-point* deve corresponder a um valor de tensão que esteja dentro da faixa de operação admissível para o barramento cc; em se tratando dos conversores de frequência da *linha 200V*, a faixa de tensão corresponde a 200 – 410 V em cc. Todavia, para alguns conversores de frequência estes valores podem ser alterados.

Para regiões com alto índice de nebulosidade é recomendado que o sistema opere com um valor de *set-point* elevado. Isto tem como objetivo minimizar ainda mais as chances do sistema vir a desarmar devido à passagem de nuvens. Contudo, deve-se tomar cuidado para que a tensão de circuito aberto do gerador formado não ultrapasse o limite máximo de tensão admissível para o barramento cc, sob risco de danificar o equipamento.

Quanto à estratégia de *set-point* variável, esta só terá aplicação prática no momento em que esta funcionalidade vier a fazer parte dos conversores de frequência. No entanto, para que isto seja possível, é necessário que se faça um trabalho conjunto com os fabricantes.

Em se tratando da avaliação técnica e econômica do sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência, pode-se constatar que, para grande parte dos sistemas ensaiados, os valores de eficiência média<sup>9</sup> não apresentaram perdas significativas em relação a um sistema de bombeamento fotovoltaico composto por equipamentos dedicados a este tipo de aplicação. Para esses casos, os sistemas são economicamente competitivos.

Alguns sistemas apresentaram baixa eficiência média, em torno de 18 % a 20 %<sup>10</sup>. Mesmo nessa condição, há casos em que o sistema é economicamente competitivo, devido ao custo do equipamento ser sensivelmente inferior ao de uma motobomba dedicada à aplicação fotovoltaica. É de se ressaltar que a baixa eficiência é decorrente da má qualidade das motobombas e não do conversor de frequência.

---

<sup>9</sup>Excluindo-se o gerador fotovoltaico.

<sup>10</sup>Valor referente a 5 kWh/m<sup>2</sup>.dia

Por fim, este trabalho de pesquisa deu origem a uma bancada de ensaio de sistemas de bombeamento fotovoltaico. Esta bancada se mostrou uma ferramenta muito útil para realização de ensaios sem restrição de alturas manométricas, permitindo um diagnóstico completo do sistema. Por meio dessa bancada, é possível determinar a eficiência do dispositivo de condicionamento de potência mais motobomba, obter a curva de capacidade instantânea (vazão x potência cc), a potência de arranque da bomba (I crítico) e o volume diário bombeado ( $m^3/dia$ ).

Para trabalhos futuros propõe-se a instalação de mais sistemas em campo para serem avaliados em longo prazo, tendo como objetivos: avaliar a apropriação da tecnologia, capacitar equipes técnicas e identificar problemas ainda não verificados no âmbito deste trabalho de pesquisa, pois, só assim, é possível realizar um processo seguro de difusão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. F.; ALFANO, C.; LIMA, E. L.; EMBIRUÇU, M. Sintonia de Controladores PID. **ENPROMER'99 - II Congresso de Engenharia de Processos do MERCOSUL, Florianópolis - Santa Catarina, 1999.**

ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F.; BLANCO, J. A Detailed Procedure for Performance Prediction of PV Pumping Systems. **Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK, p.2679–2682, 2000.**

ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F.; BLANCO, J.; MANSO, D. Use of Standard Frequency Converters in PV Pumping Systems. **2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, p.3254–3257, 1998.**

ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F.; ESCUDERO, U.; CLAMAGIRAND, J. M. Impedance Matching and New Use of Speed Controllers in PV Pumping Systems. **14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 30 June-4 July, 1997.**

ALONSO-ABELLA, M.; LORENZO, E.; CHENLO, F. PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converters. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications, p.179–191, 19 February, 2003.**

ARAB, A. H.; CHENLO, F.; BENGHANEM, M. Loss-of-load Probability of Photovoltaic Water Pumping Systems. **Solar Energy, v.76, p.713–723, 2004.**

ARAB, H. Optimisation of Low Power Photovoltaic Pumping Systems. Madrid, 1999. Doctorate in telecommunication - Polytechnic University of Madrid (ETSIT-UPM), Spain.

AZCÁRRAGA, J. M. M. **Convertidores de Frecuencia para Motores de Corriente Alterna: Funcionamiento y Aplicaciones.** McGraw-Hill/Interamericana de España, 1998. 66p.

BRITO, A. U.; FEDRIZZI, M. C.; DE CERQUEIRA, R. R. **Guia com Orientações para Revitalização de Sistemas de Bombeamento.** Diretório PRC-PRODEEM, 2004.

BRITO, A. U.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. PV Pumping Systems: A Useful Tool to Check Operational Performance. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Published Online in Wiley InterScience (www.interscience.com), DOI:10.1002/pip.710**, 2006.

CAPELLI, A. Inversores de Frequência. **Mecatrônica Atual**, v.1, n.2, p.7–15, 2002.

CERQUEIRA, R. R.; ZILLES, R.; MERLIN, S. **Guia Da Revitalização e Capacitação do PRODEEM**. Diretório PRC-PRODEEM, 2004.

EYRAS, R.; PERPIÑÁN, P.; HUNGRÍA; RAI, I. PV Pumping Systems: Cases of Study. **Proceedings of 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference**, p.2063–2065, 2004.

FEDRIZZI, M. C. Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

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

FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L. Simple and useful instrumentation to determine performance of pv pumping systems in the field. **17<sup>th</sup> European Photovoltaic Energy Conference, Munique, Alemanha**, 2001.

FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. **Avaliação dos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico - Pontal do Paranapanema - Versão Preliminar**. USP, São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, 1998.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H. G. PRODEEM - O Programa Nacional de Eletrificação Rural Baseado em Energia Solar Fotovoltaica. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia**, v.IV, p.1086–1814, 2002.

HAHN, A. Photovoltaic Water Pumping. **Appropriate Technology**, v.29, n.1, p.48–50, 2002.

HAMMAD, M. Photovoltaic, wind and diesel. **Energy Policy**, v.23, n.8, p.723–726, 1995.

HOHM, D. P.; ROPP, M. E. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v.11, n.1, p.47–62, 2003.

IEC61725. **Analytical Expression for Daily Solar Profiles**. 1ª edição: International Stander CEI/IEC 61725, 1997.

KROPOSKI, B.; HANSEN, R. Performance and modeling of amorphous silicon photovoltaics for building-integrated applications. **Solar 99: Growing the Market Conference, Portland, Maine**, 1999.

LEVINE, W. S. **The Control Handbook**. USA: CRC Press in cooperation with IEEE Press, 1996. 817-819p.

LORENZO, E. Energy Collected and Delivered by PV Modules. In: LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (Ed.). **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Wiley, 2002. p.947-953.

MAYER, O.; ZÄNGERL, H. P.; KLEMT, M. Start up of screw pumps by optimal inverter parameter setting. **In: 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, França**, , n.1, p.819–1820, 1995.

NARVARTE, L.; LORENZO, E.; AANDAM, M. Lessons from a PV Pumping Programme in South Morocco. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v.13, n.3, p.261–270, 2005.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. PHB-Prentice/Hall do Brasil, 1993. 483-486p.

SANTOS, A. H. M.; SIMÕES, A. A.; MARTINS, A. R. S.; ET AL. **Conservação de Energia - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. ELETROBRÁS/PROCEL, Escola Federal de Engenharia de Itajubá: Ed. EFEI, 2001. 460-461p.

SPANDRI, R. Sintonia de Controladores PID. **Bol. Téc. Petrobras, Rio de Janeiro - RJ**, p.383–410, 2003.

VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N. A Methodology for the Design of Photovoltaic Water Supply Systems. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v.9, n.5, p.349–361, 2001.

WEG. **Inversor de Freqüência CFW08 Plus - Manual do Usuário**. São Paulo: WEG automação, 2002. 112;133p.

WEQ. **Motores: Alto Rendimento plus.** WEG automação, 2003.

YASKAWA. **Program Write-in Tool: Flash Memory Write - Instruction Manual.**  
Japan: Yaskawa Electric Corporation, 1998. 1-25p.

## PUBLICAÇÕES REALIZADAS DURANTE O DOUTORADO

### Publicações em revistas internacionais

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, n.3, p.249-260, 2006.

BRITO, A. U.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. PV Pumping Systems: A Useful Tool to Check Operational Performance. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI:10.1002/pip.710, 2006.

### Publicações em anais de congressos

BRITO, A. U.; ZILLES, R. Conversores de Frequência, uma Solução Para Diminuir a Dependência aos Equipamentos Importados em Aplicações de Bombeamento Fotovoltaico. CD-ROM do **IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, Itajubá - MG, 2004.

FEDRIZZI, M. C.; BRITO, A. U.; ZILLES, R. Procedimento Para Averiguação Operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. CD-ROM do **5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída - AGRENER GD**, Campinas - SP, 2004.

MACÊDO, W. N.; OLIVEIRA, L. G. M.; BRITO, A. U.; ZILLES, R.; PINHO, J. T. Metodologia de Avaliação do Problema de Suprimento de Energia Elétrica em Comunidades não Atendidas: O Caso da Comunidade de Marujá. **X CBE - Congresso Brasileiro de Energia**, Rio de Janeiro - RJ, v. IV, p.2456-2465, 2004.

### Elaboração de apostilas e manuais para cursos de capacitação

BRITO, A.U.; FEDRIZZI, M. C.; CERQUEIRA, R. R. Guia de Revitalização de Sistemas de Bombeamento do PRODEEM. In: LEONELLI, P. A. **Diretório PRC-PRODEEM**, v.1, 2004.