

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO COM
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E MOTOBOMBAS DE
FABRICAÇÃO NACIONAL: AVALIAÇÃO E ORIENTAÇÕES PARA
SUA IMPLANTAÇÃO**

LUIS ROBERTO VALER MORALES

SÃO PAULO

2016

LUIS ROBERTO VALER MORALES

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO COM CONVERSORES DE
FREQUÊNCIA E MOTOBOMBAS DE FABRICAÇÃO NACIONAL: AVALIAÇÃO E
ORIENTAÇÕES PARA SUA IMPLANTAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Energia do Instituto de Energia
e Ambiente para a obtenção do título de
Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO

2016

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

FICHA CATALOGRÁFICA

Valer Morales, Luis Roberto.

Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação / Luis Roberto Valer Morales; orientador Roberto Zilles - São Paulo, 2016.

f.143.: il.: 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Energia Solar 2. Sistemas fotovoltaicos 3. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Nome: VALER MORALES, Luis Roberto

Título: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em: 08/11/2016

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Roberto Zilles

Instituto de Energia e Ambiente – Universidade de São Paulo

Prof. Dr. João Tavares Pinho

Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Eduardo Lorenzo Pigueiras

Universidad Politecnica de Madrid

Prof. Dr. Fernando Selles Ribeiro

Escola Politécnica – Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Murilo Tadeu Werneck Fagá

Instituto de Energia e Ambiente – Universidade de São Paulo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao povo do semiárido nordestino sertanejo cujo esforço para conseguir água durante a época da seca me inspirou a pesquisar este tema.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é o fruto de uma longa jornada de trabalhos em campo e em laboratório, onde contei com ajuda direta ou indireta de muitas pessoas.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Roberto Zilles, pelo apoio necessário para poder desenvolver minha pesquisa.

Aos membros do LSF-IEE-USP, em especial a Cristina F. e Teddy F., cuja experiência na área foi importante para enriquecer este trabalho.

Ao Albemerc Moraes, companheiro de várias jornadas de campo e coautor de muitos artigos.

A Tina Selles, pelas gratas conversas e trabalhos de campo.

Aos amigos do IEE, pelos gratos momentos de camaradagem na hora do cafezinho e das refeições no bandeirão.

Aos membros de todas as instituições que me deram apoio para minha pesquisa: Instituto Mamirauá, IDER, Instituto Ecoengenh, ONG Diaconia, Instituto Piauí Solar, Instituto Agrônomo de Pernambuco, EMATERCE, COELCE, CELPE, Universidade Federal do Ceará, entre tantas outras.

À CAPES e à FUSP, pelas bolsas de doutorado. Ao CNPq – Programa Ciências sem Fronteiras, pela bolsa sanduiche que me permitiu conhecer mais sobre os sistemas de bombeamento de grande porte.

Aos membros do Instituto de Energia Solar da *Universidad Politécnica de Madrid* pelo apoio durante o intercâmbio.

À minha família pelo suporte e carinho oferecido mesmo à distância.

Às gratas amigas que eu fiz durante o doutorado: Carolina N, Patty C, Tatiana G, Danna R, Natasha H, Carol X, Laize S, Raimonda M e Thays D.

Aos meus amigos dançarinos dos grupos de dança ForrIO, SPINI, FORRÒ MADRID, etc.

Ao Luiz Gonzaga e todos os outros cantores do forró, por todas essas músicas maravilhosas que foram parte da minha *playlist* durante o doutorado.

RESUMO

Valer Morales, Luis Roberto. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação. 2016. 143. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

No Brasil apesar de já terem sido instalados centenas de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, há pouca informação sobre a operacionalidade e adoção desses sistemas. Para identificar as vantagens e problemas desta aplicação foram visitados sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados em cinco estados. Observou-se que muitos desses sistemas encontram-se atualmente desativados, devido aos problemas técnicos relacionados à substituição e conserto das motobombas, assim como aos erros na concepção, planejamento e implantação dos projetos. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento que utilizam conversores de frequência, como o proposto por Brito (2006), apresentam-se como uma alternativa para a solução de alguns problemas técnicos de operação e manutenção. O acompanhamento de projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência com a configuração proposta por Brito (2006) permitiu identificar várias vantagens técnicas e econômicas em relação a outras configurações. Apesar de existirem algumas limitações com a configuração mencionada, muitos dos problemas registrados nos projetos com conversores de frequência são consequência de falhas na concepção e implantação dos projetos e não da tecnologia. Neste sentido, orientações para a implantação de sistemas de bombeamento que utilizam esta configuração foram propostas. Entre estas orientações encontram-se a utilização de um novo modelo de conversor de frequência, a capacitação de técnicos e usuários para manutenção dos sistemas e o cuidado com o planejamento dos projetos.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistemas fotovoltaicos, Sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

ABSTRACT

Valer Morales, Luis Roberto. Photovoltaic pumping systems with commercial variable speed drive and pumps: evaluation and guidelines for projects implementation. 2016. 143 p. Doctorate Thesis. Post-Graduate Program in Energy. University of São Paulo, São Paulo.

In Brazil, although hundreds of solar water pumping systems have been installed, there is little information about the operation and adoption of these systems. To identify the advantages and limitations of this configuration, photovoltaic pumping systems installed in five states were visited, to identify current problems of these projects. It was observed that many of these systems are currently disabled due to technical problems related to the replacement and repair of motor pumps, as well as errors in the design, planning and implementation of projects.

Photovoltaic pumping systems using variable speed drives as proposed by Brito (2006) were presented as an alternative for solving the aforementioned technical problems. Monitoring projects with photovoltaic pumping systems with the configuration proposed by Brito (2006) allow the identification of several technical and economic advantages over other configurations. Although there are some limitations to this configuration, many of the problems recorded in projects with frequency converters are the result of flaws in the project design and implementation. In this sense, some guidelines were proposed for the implementation of systems with this configuration. Among them are the use of a new variable speed drive model, the training of technicians and users to maintain the systems, and the care with project planning.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic systems, Photovoltaic Pumping systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplos de sistemas de bombeamento utilizados no nordeste brasileiro	18
Figura 1.2: Exemplos de sistemas de transporte de água até os locais de consumo	19
Figura 1.3: Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência.....	20
Figura 1.4: Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência.....	22
Figura 2.1: Esquema de um sistema fotovoltaico de bombeamento para consumo humano, consumo animal e irrigação	23
Figura 2.2: Diagrama de configurações que podem ser adotadas em SFB	24
Figura 2.3: Sistema fotovoltaico de bombeamento de 600 Wp instalado em 1981	26
Figura 2.4: SFB instalados pela Diocese de Florianópolis	28
Figura 2.5: SFB instalados na comunidade Boca da Vereda e em residência particular em Oeiras	29
Figura 2.6: SFB instalado na comunidade Bom Jesus	30
Figura 2.7: Detalhes do SFB instalado em Granja	30
Figura 2.8: Esquema ilustrativo do sistema de bombeamento instalado em Quixeramobim ..	31
Figura 2.9: Área de plantio e local de captação da água no rio do SFB instalado em Quixeramobim	31
Figura 2.10: SFB instalado no Sítio Traíras, Pão de Açúcar em 2006 e em 2013	32
Figura 2.11: Sistema fotovoltaico para a produção hidropônica de pimenta em São José da Tapera	33
Figura 2.12: Sistema fotovoltaico conectado à rede e SFB instalados no restaurante Grotta dos Angicos, Canindé do São Francisco	34
Figura 2.13: SFB instalados em Bom Sucesso e Brejo da Carapuça, Afogados de Ingazeira	35
Figura 2.14: Componentes dos SFB instalados em São José do Egito	36
Figura 3.1: Diagrama de blocos de um CF.....	41
Figura 3.2: Estratégias de controle variável (1) e fixo (2)	43
Figura 3.3: Configuração proposta por Brito (2006).....	44
Figura 3.4: Modelos de CFs testados por Brito (2006)	44
Figura 3.5: Quadro elétrico e principais componentes.....	45
Figura 3.6: Configuração de Alonso-Abella (2003).....	46
Figura 3.7: Quadro elétrico com CF configurado segundo Melo (2004).....	46
Figura 3.8: Circuito elétrico MPPT proposto por Driemeier e Zilles (2010).....	47
Figura 3.9: CF e PLC utilizados na configuração de Fernandez-Ramos (2010).....	47
Figura 3.10: Diagrama de blocos da configuração usada por Maranhão (2015)	48
Figura 3.11: SFB-CF instalado no Pontal de Paranapanema e quadro com CF.....	50
Figura 3.12: SFB-CF instalado na comunidade Exu.....	51
Figura 3.13: Quadro elétrico e boca do poço	52
Figura 3.14: Kits de irrigação e área de plantio	52
Figura 3.15: SFB-CF instalado na comunidade São Pedro de Tricé (CE).....	53
Figura 3.16: Quadro elétrico e abrigo do quadro	54
Figura 3.17: Vista superior e frontal da boca do poço	54
Figura 3.18: SFB-CF instalado na Fazenda Papagaio.....	55
Figura 3.19: SFB-CF instalado na comunidade Jatobá de Cima.....	56
Figura 3.20: SFB-CF instalado na comunidade Lagoinha	56
Figura 3.21: SFB-CF instalado na comunidade Paus pretos/Cipó.....	57
Figura 3.22: SFB-CF instalado na comunidade Serrinha.....	57

Figura 3.23: SFB-CF instalado no Assentamento Carnaúba.....	58
Figura 3.24: SFB-CF instalado na comunidade Angico Grande.....	58
Figura 4.1: Comparação do investimento inicial entre o SFB-C e o SFB-CF de menor preço	62
Figura 4.2: Comparação de custos de ciclo de vida entre um SFB-C e um SFB-CF.....	63
Figura 4.3: Custos do volume bombeado.....	64
Figura 4.4: Investimento inicial.....	66
Figura 4.5: Custo de ciclo de vida.....	67
Figura 4.6: Custo do volume bombeado.....	68
Figura 4.7: Análise do ponto de equilíbrio entre SFB-CF e SGDB.....	68
Figura 4.8: Bancada de ensaio.....	69
Figura 4.9: Resultados do ensaio em laboratório com CFW08-plus com motobomba de 1 CV	70
Figura 4.10: Resultados do ensaio em laboratório com CFW08-plus com motobomba de 1 CV	71
Figura 4.11: Ocorrências registradas até o momento nos SFB-CF instalados em Serra Talhada	71
Figura 4.12: Problemas no gerador fotovoltaico. Módulo trincado e presença de ninhos de insetos na estrutura.....	72
Figura 4.13: Problemas no quadro elétrico. Presença de insetos e corrosão.....	73
Figura 4.14: Problemas nas motobombas.....	73
Figura 4.15: Realimentação do PID com circuito divisor de tensão.....	75
Figura 4.16: Exemplo de diferenças entre o valor de <i>set point</i> e o ponto de máxima potência para várias curvas de irradiância.....	76
Figura 4.17: Exemplo de sistemas de condicionamento de potência de sistemas de bombeamento e conversor de frequência.....	76
Figura 5.1: Quadro elétrico com o CFW500.....	78
Figura 5.2: Resultados do ensaio com o CFW500 para uma motobomba de 1 CV para tensão MPPT programada entre 260 e 300 V.....	80
Figura 5.3: Resultados do ensaio com o CFW500 para uma motobomba de 1 CV para tensão MPPT programada entre 280 e 320 V.....	81
Figura 5.4: Espigão de plástico usado para conectar a tampa do poço com a mangueira da bomba.....	82
Figura 5.5: Retirada da areia do motor e ponta de eixo desgastada.....	82
Figura 5.6: Presença de raízes na bomba.....	83
Figura 5.7: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Gerador sujo.....	84
Figura 5.8: Tarefa de manutenção preventiva - limpeza dos módulos fotovoltaicos.....	84
Figura 5.9: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Presença de insetos na estrutura do gerador fotovoltaico.....	85
Figura 5.10: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Presença de roedores.....	85
Figura 5.11: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - vegetação crescida próxima ao quadro elétrico do SFB-CF.....	85
Figura 5.12: Tarefa de manutenção preventiva - remoção de ninhos de insetos.....	86
Figura 5.13: Tarefa de manutenção preventiva - limpeza da vegetação na área de geração....	86
Figura 5.14: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - vazamentos na rede hidráulica.....	87
Figura 5.15: Tarefa de manutenção preventiva - conserto da rede hidráulica.....	87
Figura 5.16: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF – gerador fotovoltaico danificado.....	87

Figura 5.17: Capacitação de técnicos em Serra Talhada – aulas teóricas.....	89
Figura 5.18: Capacitação de técnicos em Serra Talhada – atividades em campo.....	89
Figura 5.19: Remoção da motobomba e teste em superfície.....	91
Figura 5.20: Exemplo de uma tarefa de manutenção no manual de técnicos	91
Figura 5.21: Bancada de ensaio para treinamento do uso de CF	97
Figura 5.22: Exemplos de kits de bombeamento fotovoltaico comercializados na internet	98
Figura 5.23: Exemplo de notícias disseminadas com erros conceituais sobre a tecnologia fotovoltaica	99
Figura 5.24: Repercussão dos projetos com SFB-CF na mídia.....	99
Figura 5.25: Kit didático de bombeamento fotovoltaico.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Brasil entre 1981-2002 ..	25
Tabela 2.2: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Semiárido.....	26
Tabela 2.3: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados	27
Tabela 2.4: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Piauí.....	28
Tabela 2.5: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Ceará.....	29
Tabela 2.6: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Alagoas	32
Tabela 2.7: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Sergipe	34
Tabela 2.8: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Pernambuco	35
Tabela 3.1: SFB-CF instalados no Brasil	49
Tabela 3.2: Ocorrências com o SFB instalado em Pontal de Paranapanema.....	50
Tabela 3.3: Ocorrências com o sistema.....	53
Tabela 3.4: Principais características dos SFB-CF instalados em Serra Talhada	55
Tabela 3.5: Ocorrências e medidas adotadas	59
Tabela 4.1: Principais características dos SFB selecionados para análise econômica.....	60
Tabela 4.2: Preços dos componentes dos SFB escolhidos	61
Tabela 4.3: Parâmetros para a análise de CCV entre os SFB-C e os SFB-CF.....	63
Tabela 4.4: Resultados da comparação econômica entre os SFB-C e os SFB-CF.....	65
Tabela 4.5: Investimento inicial do SFB-CF e do SGDB	66
Tabela 4.6: Parâmetros para a análise de CCV entre o SFB-CF e o SGDB	67
Tabela 4.7: Resultado da avaliação econômica entre o SFB-CF e o SGDB	67
Tabela 5.1: Lista de possíveis problemas detectáveis pelos usuários dos SFB-CF	88
Tabela 5.2: Lista de possíveis problemas detectáveis pelos técnicos	90
Tabela 5.3: Lista dos principais erros sinalizados pelo CF	90
Tabela 5.4: Fatores técnicos, econômicos, sociais, ambientais e produtivos.....	92
Tabela 5.5: Conteúdo programático para capacitação de técnicos em SFB-CF	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CF	Conversor de frequência
CCV	Custo de ciclo de vida
CVB	Custo do volume bombeado
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
IDER	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
LSF-IEE-USP	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PI	Controlador proporcional integral
PID	Controlador proporcional integral derivativo
PLC	Controlador lógico programável
PRODEEM	Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PVC	Policloreto de vinila
SFB	Sistema fotovoltaico de bombeamento
SFB-C	Sistema fotovoltaico de bombeamento convencional
SFB-CF	Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência
SGDB	Sistema de bombeamento com diesel

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Caracterização do problema	17
1.2 Hipótese.....	20
1.3 Objetivo geral.....	21
1.4 Objetivos específicos.....	21
1.5 Metodologia utilizada.....	21
1.6 Estrutura da tese	22
2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO: PROBLEMAS CONSTATADOS.....	23
2.1 Componentes de um sistema fotovoltaico de bombeamento	23
2.2 Breve histórico dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento no Brasil	25
2.3 Visitas de campo para avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.....	27
2.3.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Piauí	27
2.3.2 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Ceará	29
2.3.3 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Alagoas	31
2.3.4 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Sergipe	33
2.3.5 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Pernambuco ...	34
2.4 Problemas observados nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados	36
2.4.1 Dificuldades para compra e reposição dos componentes: motobombas e sistemas de condicionamento de potência.	36
2.4.2 Preço elevado das motobombas dedicadas para aplicações fotovoltaicas.....	36
2.4.3 Problemas na manutenção dos sistemas devido à falta de pessoal qualificado para diagnosticar problemas e reparar sistemas	37
2.4.4 Falta de informações sobre o desempenho dos projetos em campo	37
2.4.5 Obra civil e infraestrutura hidráulica de baixa qualidade.....	37
2.4.6 Falta de dados adequados para dimensionamento correto	38
2.5 Problemas gerais identificados com a concepção, execução e gestão dos projetos com SFB	38
2.5.1 Problemas na identificação das peculiaridades dos beneficiários	38
2.5.2 Instituições distantes dos locais de instalação	38
2.5.3 Falta de planos para substituição das motobombas e outros componentes	39
2.5.4 Uso de poços de água salobra.....	39
2.5.5 Problemas com sistemas de uso produtivo	39
2.6 Resumo do capítulo	40
3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	41
3.1 Conversor de frequência.....	41
3.2 A configuração proposta por Brito (2006)	43
3.3 Outras configurações.....	45
3.3.1 A configuração de Alonso-Abella (2003)	45
3.3.2 A configuração de Melo (2004)	46
3.3.3 A configuração de Driemeier e Zilles (2010).....	46
3.3.4 A configuração de Fernandez-Ramos (2010).....	47

3.3.5 A configuração de Maranhão (2015).....	48
3.4 Experiências com sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência no mundo.....	48
3.5 Experiências com sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência no Brasil	49
3.5.1 Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência instalado no Pontal de Paranapanema.....	49
3.5.2 Projeto Sol e Água no Sertão.....	51
3.5.3 Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência instalado em São Pedro de Tricí	53
3.5.4 Projeto com Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia de Bombeamento Nacional – Zona Rural de Pernambuco.....	54
3.6 Resumo do capítulo.....	59
4. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO SFB-CF.....	60
4.1 Comparação econômica entre o SFB-C e o SFB-CF	60
4.1.1 Investimento Inicial	61
4.1.2 Custo de ciclo de vida.....	62
4.1.3 Custo do volume bombeado	63
4.1.4 Resultados da comparação econômica entre os SFB-C e os SFB-CF.....	64
4.2 Comparação econômica entre o SFB-C e um Sistema diesel de bombeamento (SGDB)..	65
4.3 Operação e funcionamento dos SFB-CF	69
4.3.1 Desempenho dos SFB-CF em bancada de ensaios.....	69
4.3.2 Operação e funcionamento dos SFB-CF em campo.....	71
4.4 Vantagens técnicas dos SFB-CF em relação aos SFB-C	73
4.5 Problemas técnicos da configuração proposta por Brito (2006)	74
4.5.1 Acesso restrito à parametrização	74
4.5.2 Circuitos adicionais para ajustar a tensão de operação no método de controle com tensão fixa.....	75
4.5.3 Dificuldade para a determinação do <i>set point</i> fixo.....	75
4.5.4 A complexidade dos CF	76
4.6 Problemas gerais identificados com a concepção, execução e gestão dos projetos com SFB-CF.....	77
4.7 Resumo do capítulo.....	77
5. PROPOSTA PARA APRIMORAMENTO DOS PROJETOS COM SFB-CF.....	78
5.1 Recomendações técnicas	78
5.1.1 Substituição do CFW-08 Plus por CFW500	78
5.1.2 Uso de motobombas e controladores de frequência adequados para as características elétricas da rede elétrica local	81
5.1.3 Qualidade dos componentes hidráulicos do sistema	81
5.1.4 Estudo dos poços para uma seleção da motobomba.....	82
5.1.5 Capacitação dos usuários.....	83
5.1.6 Capacitação de técnicos para manutenção dos SFB-CF.....	88
5.2 Recomendações sobre planejamento e execução de projetos com SFB-CF	92
5.2.1 Aspectos socioculturais	93
5.2.2 Projetos de uso produtivo	93
5.3 A difusão da tecnologia.....	95

5.3.1 Capacitação de recursos humanos	95
5.3.2 Comercialização do sistema	97
5.3.3 Avaliação de conformidade	98
5.3.4 Difusão da tecnologia em outros níveis.....	98
5.4 Resumo do capítulo	100
6. CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O DOUTORADO	109
ANEXO I – MANUAL DE CAPACITAÇÃO PARA TÉCNICOS	111
ANEXO II – DESCRIÇÃO DO KIT DEMONSTRATIVO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO	138

1. INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do problema

O acesso às fontes de energia de maneira confiável e a preços razoáveis aumenta as oportunidades de desenvolvimento das atividades produtivas, pois permite o uso de equipamentos para reduzir o tempo de produção, incrementando a capacidade de produção bem como a oportunidade de melhora da qualidade dos produtos (ALLDERDICE; ROGERS, 2000; WEINGART; GIOVANNUCCI, 2003; MEADOWS et al., 2003; CABRAAL; BARNES; AGARWAL, 2005).

No entanto, o acesso à eletricidade, é limitado e desigual para muitas pessoas no mundo. Isso ocorre, principalmente, em áreas rurais que por suas características (baixa densidade populacional, baixa demanda de energia e limitações técnicas para o fornecimento elétrico através de redes ou combustíveis fósseis) não têm acesso à eletricidade. No Brasil, estima-se que ainda haja 716 mil moradias sem acesso à eletricidade (IBGE, 2010). No entanto, outras estimativas, como a da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) estimam que um milhão de casas ainda não tenham eletricidade. Uma grande parcela dessas casas sem eletricidade pertence a pequenos produtores rurais que dependem de atividades relacionadas com a agricultura familiar e o extrativismo.

O semiárido brasileiro caracteriza-se pela má distribuição dos regimes de chuva, alta irradiação solar e elevadas temperaturas, que associadas à indisponibilidade elétrica, dificultam o acesso à água. A escassez hídrica torna difícil o desenvolvimento de atividades produtivas como a agricultura e a pecuária, já que o risco de perda de produção durante os períodos de seca é alto. Apesar da existência de programas para ampliar o abastecimento de água, ainda existem milhares de moradias que não têm acesso garantido a ela durante todo o ano. As Figuras 1.1 e 1.2 mostram alguns sistemas de bombeamento utilizados no semiárido e as formas de transporte da água até os locais de consumo. Se a situação já é complicada para abastecimento humano durante a seca, ainda é mais difícil para a produção agrícola e pecuária, a qual demanda mais recursos econômicos e tecnológicos para enfrentar a estiagem. Com a incerteza de ter água para produzir, os agricultores focam a sua produção em culturas de curta duração que muitas vezes têm baixo valor no mercado. As dificuldades de produção, somadas à falta de oportunidades de emprego no meio rural, causam massivos êxodos para os centros urbanos.



Figura 1.1: Exemplos de sistemas de bombeamento utilizados no nordeste brasileiro: (A) cata-vento, (B) bomba com a rede, (C) gerador a diesel e (D) bomba manual



Figura 1.2: Exemplos de sistemas de transporte de água até os locais de consumo

A geração de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos tem características que permitiram sua aplicação em muitos programas de eletrificação rural em todo o mundo. A diminuição dos preços dos sistemas fotovoltaicos, como resultado do desenvolvimento tecnológico e da crescente demanda mundial, melhorou a competitividade econômica dos sistemas de energia fotovoltaica, possibilitando a instalação de sistemas maiores.

Uma das aplicações da energia fotovoltaica é o bombeamento de água. A tecnologia vem sendo usada no Brasil há muitos anos para fornecer água para consumo humano e uso produtivo. Mesmo com os avanços tecnológicos e as inúmeras experiências, os problemas com a tecnologia ainda persistem, como: alto custo das motobombas e dos sistemas de condicionamento de potência e a falta de estrutura de manutenção e serviços pós-venda para conserto e substituição de componentes.

É nesse contexto que as configurações propostas por autores como Alonso-Abella, Lorenzo e Chenlo (2003) e Brito e Zilles (2004), com conversor de frequência e motobombas centrífugas trifásicas convencionais, foram apresentadas para substituir os sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais. No entanto, a configuração proposta por Brito

(2006), mostrada na Figura 1.3, só foi utilizada em poucos projetos, por motivos que precisam ser analisados.

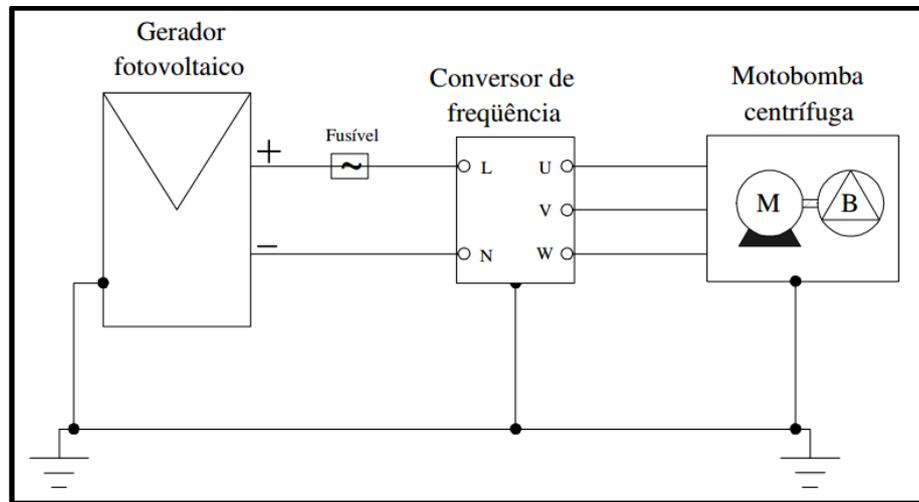


Figura 1.3: Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência

Fonte: Brito (2006)

Por isso, apesar do potencial da configuração mencionada, é necessário o estudo em campo do sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência, SFB-CF, para responder as perguntas a seguir:

- O uso de conversores de frequência poderá resolver o problema de manutenção dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento? Se esta configuração não atenuar este problema, quais estratégias serão necessárias para operação e manutenção desta configuração?
- Os SFB-CF têm a capacidade de satisfazer a demanda reprimida de água dos produtores rurais? Quais são os entraves para a introdução desse tipo de configuração nas cadeias produtivas rurais?

1.2 Hipótese

Projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento que utilizam conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional enfrentam problemas semelhantes aos observados na implantação, operação e manutenção de projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais.

1.3 Objetivo geral

Compreender os entraves do uso da configuração proposta por Brito (2006) e propor alternativas e soluções para a redução desses entraves.

1.4 Objetivos específicos

- Analisar em campo a operacionalidade dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais.
- Analisar em campo a operacionalidade dos SFB-CF.
- Identificar as principais vantagens e limitações dos SFB-CF.
- Sistematizar orientações para redução dos entraves para implantação de projetos.

1.5 Metodologia utilizada

A metodologia proposta para realização dos objetivos estabelecidos é dividida em duas linhas de atuação:

I. Identificação dos principais problemas dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais.

II. Acompanhamento de projetos que adotaram a instalação de SFB-CF, com o objetivo de analisar em campo a operação e uso dos sistemas segundo os seguintes critérios:

- Técnico: Compatibilidade de uso com os hábitos e práticas locais, facilidade de operação e manutenção, confiabilidade, durabilidade e disponibilidade dos equipamentos, disponibilidade de serviço técnico e materiais de reposição e capacidade de produção de água para satisfazer a demanda;
- Econômico: Investimento inicial, custo de ciclo de vida e custo do metro cúbico bombeado.

Para obter respostas às perguntas formuladas, projetos de bombeamento fotovoltaico com e sem a configuração proposta por Brito (2006) foram visitados em cinco estados nordestinos e 11 municípios. A Figura 1.4 mostra a localização dos municípios visitados.

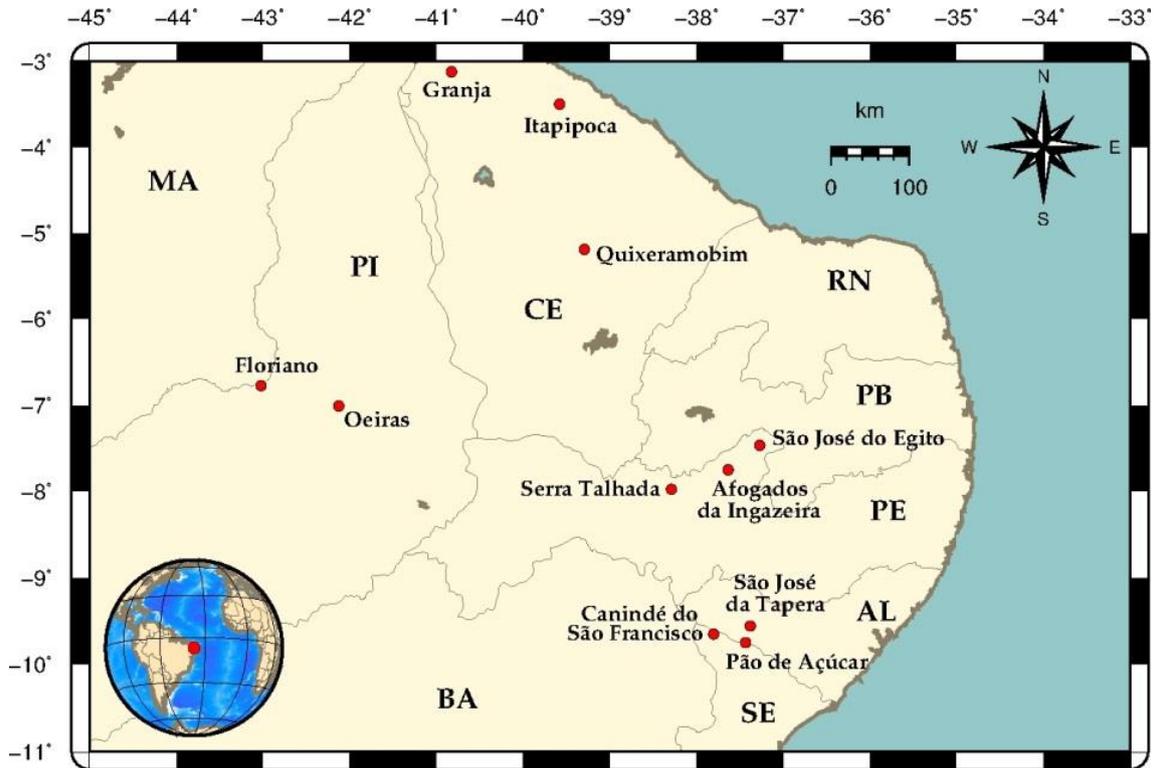


Figura 1.4: Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência

Fonte: Elaboração própria

1.6 Estrutura da tese

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos. O capítulo 2 discorre sobre o estado dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento e seus principais problemas. O capítulo 3 apresenta ao leitor uma introdução sobre a configuração proposta por Brito (2006) e os projetos implantados no Brasil com essa configuração. O capítulo 4 mostra a análise técnica e econômica da utilização dos SFB-CF. No capítulo 5 são apresentadas orientações para mitigar problemas associados com a implantação de projetos com SFB-CF. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO: PROBLEMAS CONSTATADOS

Neste capítulo são apresentados os conceitos gerais relacionados com os sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Os problemas associados com a implantação desses sistemas no Brasil, registrados e constatados com visitas em campo e entrevistas com pessoas envolvidas na implantação dos projetos, também são apresentados.

2.1 Componentes de um sistema fotovoltaico de bombeamento

Um sistema fotovoltaico de bombeamento, SFB, é composto por um gerador fotovoltaico, um sistema de controle, uma motobomba, um sistema de armazenamento e a rede de distribuição. A água bombeada pode ser utilizada para consumo humano, animal ou na irrigação de cultivos, como mostrado na Figura 2.1.

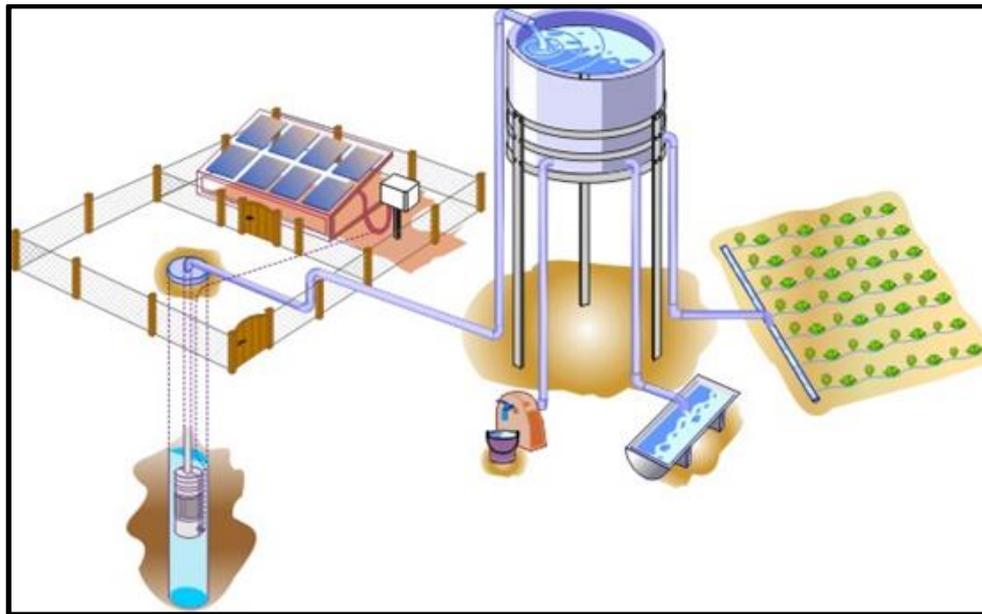


Figura 2.1: Esquema de um sistema fotovoltaico de bombeamento para consumo humano, consumo animal e irrigação

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

O gerador fotovoltaico é composto por um determinado número de módulos fotovoltaicos conectados em associações série ou/e em paralelo para atingir os parâmetros operacionais requeridos pela motobomba. O gerador fotovoltaico pode ser montado em estruturas fixas ou móveis com seguimento solar ou ajuste sazonal.

Em relação à bomba, duas são as tecnologias mais usadas para SFB: deslocamento positivo e centrífuga. As bombas centrífugas são mais utilizadas para baixas alturas manométricas e maiores vazões, enquanto as bombas de deslocamento positivo são mais utilizadas para grandes alturas e menores vazões.

Existem várias configurações para conectar o gerador fotovoltaico com o conjunto motobomba. A mais simples é ligar o gerador fotovoltaico diretamente a uma motobomba c.c.. Este tipo de acoplamento é usado principalmente em pequenas aplicações. Outras configurações incluem o uso de equipamento de condicionamento de potência como conversor c.c./c.c. e o inversor c.c./c.a..

Como o recurso solar está disponível apenas por um determinado número de horas durante o dia, é utilizado um sistema de armazenamento se o período de utilização não coincide com o período de geração. Há duas opções para armazenar energia: acumuladores eletroquímicos (baterias) ou reservatórios de água. Ainda que os acumuladores eletroquímicos sejam amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos autônomos, no caso do bombeamento essa opção costuma ser mais cara quando comparada aos reservatórios de água. O volume de água a ser armazenado depende de vários fatores: condições climáticas locais, demanda hídrica, tempo de autonomia desejado e disponibilidade financeira do projeto. Quanto maior o tempo de autonomia, maior o custo do sistema. Portanto, a decisão de quanta água armazenar deve ser tomada levando em consideração critérios de viabilidade econômica e de segurança de abastecimento. A Figura 2.2 apresenta algumas configurações que podem ser adotadas em sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

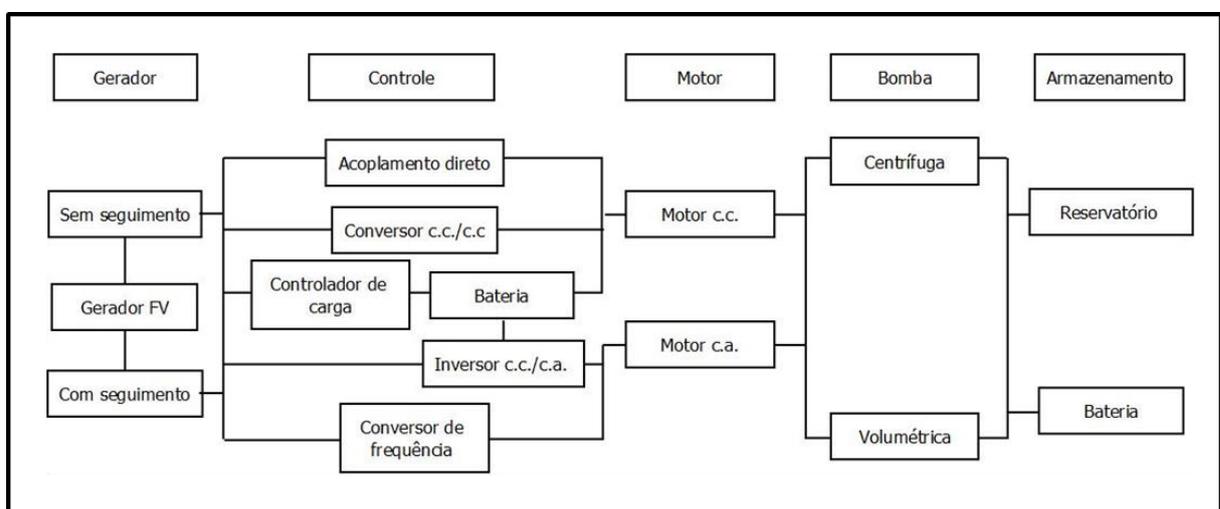


Figura 2.2: Diagrama de configurações que podem ser adotadas em SFB

Fonte: Valer et al. (2014b)

2.2 Breve histórico dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento no Brasil

Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água são usados há vários anos como uma alternativa para o abastecimento de água no meio rural desde suas primeiras aplicações na década de 1970 na ilha de Córsega e em Mali¹.

Já no Brasil, foi a cooperação internacional que viabilizou a instalação dos primeiros SFB em programas como o “*Programme for Introduction of PhotoVoltaic Pumping*” e o projeto Eldorado, da cooperação alemã, o Programa “NREL-CEPEL”, entre outros. Estima-se que até o ano 2002 ao redor de 3.291 sistemas fotovoltaicos de bombeamento foram instalados no Brasil, vide Tabela 2.1, sendo que 2.485 pertencem ao Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios, PRODEEM (FEDRIZZI, 2003).

Tabela 2.1: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Brasil entre 1981-2002

Instituição/Projeto	Número de sistemas	Potência (kWp)
Várias instituições (1981-1984)	150	93
PRODEEM	2.485	1229,7
Ministério de Ciência e Tecnologia- Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá	29	4,5
Ministério da Saúde	39	31,1
Cooperação Internacional	54	38,4
Companhia de Engenharia Rural da Bahia	62	34,8
Companhia de Saneamento de Minas Gerais	168	125,5
Prefeituras de Rio do Soto, TO e de Belém do Pará, PA	6	5,4
Uso Privado	298	28,3
Total	3.291	1.590,7

Fonte: Fedrizzi (2003)

Muitos outros sistemas foram instalados depois por instituições públicas e privadas como concessionárias de energia, centros de pesquisas, ONGs, etc. No entanto, não existem muitas publicações que permitam conhecer quantos sistemas de bombeamento foram instalados nos últimos anos e quantos estão em funcionamento. Moraes (2015) estima que além dos sistemas mencionados na Tabela 2.1 pelo menos mais 209 SFB foram instalados na região semiárida nos últimos anos, Tabela 2.2.

¹ Maiores informações sobre a história mundial do bombeamento fotovoltaico podem ser encontradas no trabalho de Poza (2008) e Fedrizzi (2003)

Tabela 2.2: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Semiárido

Instituição/Projeto	Estados	Número de sistemas
IDER	Ceará	73
Instituto Agropolos	Ceará	5
Companhia Energética do Ceará, COELCE	Ceará	1
Instituto Ecoengenho	Alagoas	105
Instituto Xingó	Sergipe/Alagoas	3
FUMDHAM	Piauí	5
FUNDED/PRODEEM	Piauí	10
Diocese de Floriano	Piauí	10
Instituto Piauí Solar	Piauí	1
Prefeituras municipais	Piauí	8
Sistemas particulares	Piauí	3
Exercito	Rio Grande do N.	1
Prefeitura de Apodi	Rio Grande do N.	20
NAPER	Pernambuco	30
Companhia Energética de Pernambuco	Pernambuco	7
Instituto Agrônomo de Pernambuco	Pernambuco	1
Projeto Eldorado	Pernambuco	15
Adapta Sertão	Bahia	9
Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba	Paraíba	3
Prefeitura de Cajazeiras	Paraíba	1
Total		311

Fonte: Adaptado de Moraes (2015)

Em relação à procedência das motobombas só existe no momento um fabricante nacional de motobombas para aplicações fotovoltaicas, produzindo bombas vibratórias submersíveis para poços de até seis polegadas de diâmetro e alturas manométricas de até 40 m (ANAUGER, 2015). Segundo Barlow, Mc Neils e Derrick (1993), na década de 80 a empresa brasileira Heliodinâmica, além de produzir módulos fotovoltaicos, também produziu e instalou bombas superficiais e submersíveis para aplicações fotovoltaicas. A Figura 2.3 apresenta um SFB instalado pela Heliodinâmica em 1981.



Figura 2.3: Sistema fotovoltaico de bombeamento de 600 Wp instalado em 1981

Fonte: Arquivo gráfico da Heliodinâmica

2.3 Visitas de campo para avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Para conhecer melhor a realidade dos projetos de bombeamento fotovoltaico implantados no semiárido brasileiro foram realizadas visitas de campo, vide Figura 1.4. Antes de cada viagem, levantaram-se dados sobre a existência de projetos em cada região. Depois foram selecionados os projetos que eram mais acessíveis, de acordo com os recursos logísticos e orçamentários disponíveis. Quando possível, as pessoas envolvidas nos processos de implantação dos projetos e os beneficiários foram entrevistados. Para isso, foram utilizados questionários previamente elaborados para cada situação. Procurou-se, em cada caso, obter informações sobre a concepção do projeto, o estado do sistema, os principais problemas e resultados. No total foram visitados dezoito sistemas fotovoltaicos de bombeamento e contatadas sete instituições. A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos sistemas visitados e das instituições participantes de cada projeto, e a continuação é feita uma breve descrição por estado dos projetos analisados.

Tabela 2.3: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados

Estado	Municípios	Instituições participantes	Sistemas visitados
Piauí	Floriano	Diocese de Floriano	5
	Oeiras	Particular	2
Ceará	Itapipoca	IDER/USAID	2
	Granja	IA/SDA	1
	Quixeramobim	COELCE	1
Alagoas	Pão de açúcar São José de Tapera	Inst. Ecoengenhos	2
Sergipe	Canindé do São Francisco	Inst. Xingó e Grupo FAE	1
Pernambuco	Afogados da Ingazeira	Diaconia e NAPER	2
	São José de Egito		2

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo.

2.3.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Piauí

Em novembro de 2012 foram visitados 7 SFB no estado do Piauí. Desses sistemas, 5 foram instalados pela Diocese de Floriano e 2 pertencem a instalações particulares. A Tabela 2.4 mostra as principais características dos sistemas visitados.

Tabela 2.4: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no Estado de Piauí

Município	Comunidade	Instituições participantes	Tipo de uso ^(a)	Potência (Wp)	Ano de instal.	Situação do sistema
Floriano	Cabaceiro	D. Floriano	I.	360	2008	Operativo
	Boca da Entrada		I.	450	2008	Operativo
	Poço do peixe		I.	450	2007	Operativo
	Betânia		I.	540	2010	Operativo
	Uica		I.	520	2008	Operativo
Oeiras	Boca da Vereda	Particular	I.	550	2000	Desativa.
	Gleba solta	Particular	I e CH	300	2011	Operativo

^(a) CH = consumo humano e I = Irrigação.

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo.

A Diocese de Floriano foi responsável pela instalação de 12 SFB no município de Floriano. A maior parte desses sistemas encontra-se na zona urbana e são usados para diminuir as despesas com energia elétrica para bombeamento, mas também existem alguns sistemas em regiões rurais, como os mostrados na Figura 2.4.



Figura 2.4: SFB instalados pela Diocese de Floriano

Fonte: Moraes et al. (2014)

Na ocasião da visita foram identificados dois sistemas instalados em propriedades particulares do município de Oeiras, Figura 2.5. Ambos os sistemas foram instalados por um técnico local, capacitado durante a implantação do PRODEEM.



Figura 2.5: SFB instalados na comunidade Boca da Vereda e em residência particular em Oeiras

Fonte: Moraes et al (2014)

Mais informações sobre esses e outros sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados nesse estado podem ser encontradas em Moraes et al. (2011), Moraes et al. (2014) e Moraes (2015).

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Ceará

No estado do Ceará foram visitados 4 SFB em junho de 2013, Tabela 2.5. Todos estes sistemas foram instalados para uso em atividades agrícolas. Dois destes sistemas encontravam-se ainda operativos no momento da visita.

Tabela 2.5: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Ceará

Município	Comunidade	Instituições participantes	Tipo de uso ^(a)	Potência (Wp)	Ano de instal.	Situação do sistema
Itapipoca	Bom Jesus	IDER	I.	1.836	2004	Desativ.
	Barra do Córrego	IDER	I.	N.D ^(b)	2004	Desativ.
Granja	Iapara/Vaquejador	Agropolos/ EMATERCE	I	405	2008	Operativo
Quixeramobim	Poço grande	COELCE	I.	1.000	2010	Operativo

^(a) I = Irrigação.

^(b) Não foi possível identificar a potência

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo.

O Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis, IDER, foi responsável pela instalação de dois SFB instalados no município de Itapipoca. Apesar dos bons resultados do projeto durante os primeiros anos de funcionamento, na ocasião da visita os sistemas

encontravam-se desativados devido a problemas associados com a reposição das motobombas, Figura 2.6.



Figura 2.6: SFB instalado na comunidade Bom Jesus

Fonte: Valer et al. (2013)

Outros quatro sistemas foram instalados pela parceria entre o Instituto Agropolos, a Secretaria de Desenvolvimento Agrário, SDA, e a Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará, EMATERCE, em comunidades rurais dos municípios de Itaitira, Assaré, Lavras de Mangabeira e Granja. As duas primeiras instituições instalaram mais um sistema no município Deputado Irapuan Pinheiro. O sistema mostrado na Figura 2.7 encontra-se no município de Granja e pertence a uma pequena associação de produtores agrícolas.



Figura 2.7: Detalhes do SFB instalado em Granja

Fonte: Valer et al. (2013)

Além desses SFB, a Companhia Energética do Ceará, COELCE, instalou em 2010 um sistema para irrigação de uma horta comunitária em Poço Grande, Quixeramobim. Devido à altura entre o reservatório e o rio, o sistema foi desenvolvido em dois estágios de bombeamento: no primeiro a motobomba bombeava água do rio até um reservatório intermediário, no qual estava instalada outra motobomba que elevava a água até o segundo reservatório, do qual a água era distribuída por gravidade até a zona de plantio, Figuras 2.8 e 2.9. No momento da

visita, o primeiro estágio tinha sido substituído por uma motobomba que funciona com a rede elétrica.

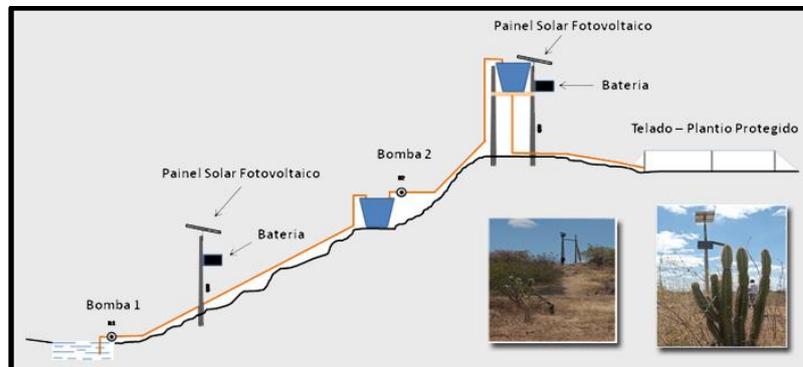


Figura 2.8: Esquema ilustrativo do sistema de bombeamento instalado em Quixeramobim

Fonte: COELCE (2013)



Figura 2.9: Área de plantio e local de captação da água no rio do SFB instalado em Quixeramobim

Fonte: Valer et al. (2013)

Mais informações sobre esses sistemas podem ser encontradas em Valer et al. (2013).

2.3.3 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Alagoas

Em setembro de 2013 foram visitados dois sistemas no sertão alagoano, ambos implantados pelo Instituto Ecoengenh, Tabela 2.6. Um deles para a irrigação de uma pequena horta, no município de Pão de Açúcar, e outro para a produção hidropônica de pimenta no município de São José da Tapera.

Tabela 2.6: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Alagoas

Município	Comunidade	Instituições participantes	Tipo de uso ^(a)	Potência (Wp)	Ano de instal.	Situação do sistema
Pão de Açúcar	Sítio Trairas	Ecoengenho	I.	1.600	2006	Desativ.
São José de Tapera	Sítio Baixas	Ecoengenho	H.	700	2008	Operativo

^(a) I = Irrigação e H = Hidroponia

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo.

O sistema de irrigação de Pão de Açúcar era composto por gerador fotovoltaico de 1.600 Wp, motobomba importada, duas caixas d'água de 10 m³ cada e sistema de irrigação por gotejamento, Figura 2.10. A água era bombeada do rio São Francisco, possibilitando a irrigação de um hectare de cultivo de melancia, mamão, feijão, milho e melão. O sistema fotovoltaico funcionou por dois anos, deixando de funcionar devido a problema com a motobomba. Como não havia material de reposição para a motobomba importada nem recursos financeiros após o término do projeto, não foi possível o conserto nem a substituição da motobomba pela instituição promotora. Além disso, devido ao alto custo desse equipamento, a população não pode custear a sua substituição. O sistema foi então desativado e em seu lugar os moradores adquiriram duas motobombas operadas com geração diesel.



Figura 2.10: SFB instalado no Sítio Trairas, Pão de Açúcar em 2006 e em 2013

Fonte: Valer et al. (2014a) e Valer (2011)

Já em São José de Tapera, um sistema piloto de bombeamento de água para produção hidropônica de pimentas foi instalado no Sítio Baixas em 2006. Com o sucesso do sistema piloto, mais cinco canteiros hidropônicos foram instalados. Cada canteiro é manejado por duas famílias e as pimentas produzidas são beneficiadas para sua comercialização em supermercados e hotéis maceioenses. A Figura 2.11 mostra o sistema de produção hidropônica. Cada canteiro possui um gerador de 140 Wp, duas caixas de água de 0,5 m³

cada, controlador de carga, bateria e uma motobomba c.c. para recirculação da água. Os sistemas estavam operativos no momento da visita de campo.



Figura 2.11: Sistema fotovoltaico para a produção hidropônica de pimenta em São José da Tapera

Fonte: Valer et al. (2014a)

Em Valer (2011) e Valer et al. (2014a) são apresentados mais detalhes dessas iniciativas.

2.3.4 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Sergipe

Às margens do rio São Francisco, na divisa entre Alagoas e Sergipe, encontra-se uma iniciativa familiar de turismo gastronômico. Trata-se do Restaurante Angicos, situado no município de Canindé do São Francisco, local próximo do ponto onde foi abatido o cangaceiro Lampião. Apesar do fluxo cada vez maior de visitantes ao local, o restaurante não conseguiu dar conta da demanda por causa da falta de eletricidade na região. Para solucionar esse problema, um sistema fotovoltaico autônomo de 440 Wp foi instalado para iluminação em 1990 e dez anos depois, mais um sistema fotovoltaico autônomo de 880 Wp foi instalado para alimentar o freezer do restaurante. Já em 2002 foi instalado pelo PRODEEM um sistema de bombeamento fotovoltaico de 400 Wp sobre uma balsa flutuante para abastecer de água o restaurante e irrigar uma horta. Segundo Barbosa et al. (2007), a primeira motobomba funcionou bem durante o primeiro ano e meio, e teve que ser trocada por uma segunda que funcionou com alguns problemas até 2006. Em 2007, viabilizou-se, através de um Projeto de P&D, a substituição do sistema de bombeamento por um novo sistema de 1,25 kWp e uma motobomba de maior capacidade. O sistema de bombeamento utiliza um conversor de frequência importado.

Esse sistema foi visitado em setembro de 2013, e na ocasião, verificou-se que após várias modificações os sistemas autônomos foram reagrupados em uma estrutura de 2.300 Wp e

encontravam-se conectados à rede e o SFB que utilizava conversor de frequência importado estava parcialmente desativado, Figura 2.12 e Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Sergipe

Município	Comunidade	Instituições participantes	Tipo de uso ^(a)	Potência (Wp)	Ano de instal.	Situação do sistema
Canindé de São Francisco (SE)	Grota dos Angicos	Inst. Xingó/ Grupo FAE-UFPE	I e E.	1,25	2002	Parcialmente desativado

^(a) I = Irrigação e E = Ecoturismo.

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo

Para mais informações sobre essa iniciativa consultar Barbosa et al. (2007) e Valer et al. (2014a).

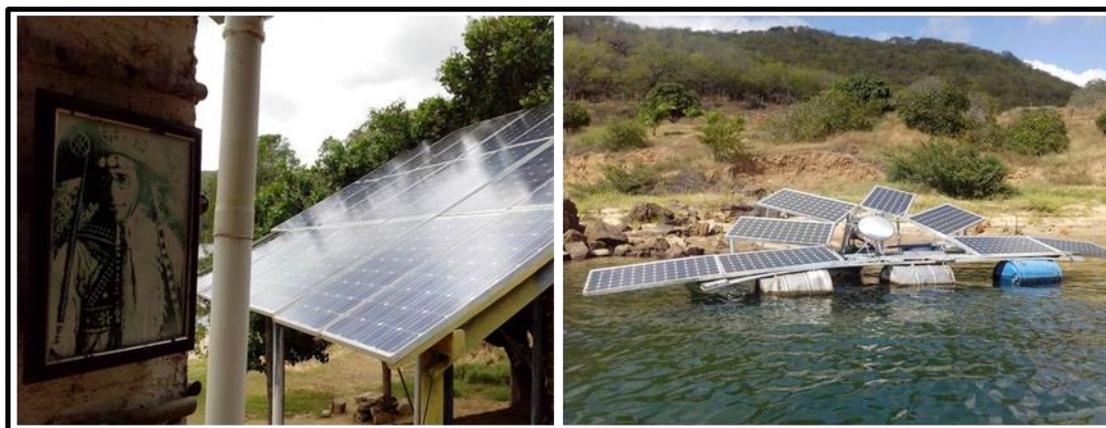


Figura 2.12: Sistema fotovoltaico conectado à rede e SFB instalados no restaurante Grota dos Angicos, Canindé do São Francisco

Fonte: Valer et al. (2014a)

2.3.5 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Pernambuco

Em março de 2014 foram visitados no sertão pernambucano quatro SFB implantados pela ONG Naper Solar em parceria com a ONG Diaconía. Os sistemas utilizam pequenas motobombas importadas, mas só um deles encontrava-se operativo no momento da visita, Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados no estado de Pernambuco

Município	Comunidade	Instituições participantes	Tipo de uso ^(a)	Potência (Wp)	Ano de instal.	Situação do sistema
Afogados da Ingazeira	Bom Sucesso	NAPER	I.	120	2000	Paralizad.
	Brejo Carapuça	Diaconía	I.	130	2011	Operativo
São José do Egito	Passagem da Cobra	NAPER	I	120	2002	Desativa.
	Barreiros	NAPER	I.	135	2004	Desativa.

^(a) CH = consumo humano, CA = consumo animal, I = Irrigação.

Fonte: Elaboração própria com base na pesquisa de campo.

Na comunidade Bom Sucesso em Afogados da Ingazeira, o sistema funcionou bem por oito anos, até que a motobomba apresentou problema. Apesar de várias tentativas de conserto, o sistema foi desativado pouco tempo depois, já que não havia peças de reposição. Mesmo assim, com apoio de instituições locais, os produtores continuaram investindo em diversas tecnologias (barragens, cisternas calçadão, biodigestores, etc.) e hoje comercializam seus produtos em feiras orgânicas, no comércio local e para o Programa de Aquisição de Alimentos. Já o sistema instalado na comunidade Brejo do Carapuça encontra-se operativo e é usado para irrigação de uma pequena área de cultivo e, eventualmente, para consumo humano. A Figura 2.13 mostra os dois SFB instalados em Afogados da Ingazeira.



Figura 2.13: SFB instalados em Bom Sucesso (esquerda) e Brejo da Carapuça, Afogados de Ingazeira (direita)

Os SFB instalados em São José do Egito encontram-se desativados e eram usados para irrigação de hortas. O sistema de irrigação utilizado era de tipo artesanal, conhecido como xique-xique. A Figura 2.14 mostra alguns componentes dos sistemas. Na esquerda estão os módulos e a motobomba que faziam parte do SFB instalado na comunidade de Barreiros e nas figuras do centro e da direita a bomba submersível SHURFLO e o sistema de condicionamento de potência instalados na comunidade Passagem da Cobra.



Figura 2.14: Componentes dos SFB instalados em São José do Egito

Mais informações desses sistemas podem ser encontradas em Costa; Araujo e Costa (2006) e Moraes; Valer e Ribeiro (2016).

2.4 Problemas observados nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento visitados

Esta seção apresenta os principais problemas técnicos e econômicos identificados nos projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento pesquisados.

2.4.1 Dificuldades para compra e reposição dos componentes: motobombas e sistemas de condicionamento de potência.

O mercado para sistemas fotovoltaicos de bombeamento não está desenvolvido no país e em particular na região nordeste. Bombas projetadas para uso em sistemas fotovoltaicos e seus respectivos sistemas de controle não são produzidos no país, motivo pelo qual não existem postos de serviço técnico e é necessário importar peças para reposição em caso de avarias.

2.4.2 Preço elevado das motobombas dedicadas para aplicações fotovoltaicas

Apesar de que o preço dos módulos fotovoltaicos diminuiu consideravelmente ao longo dos últimos anos, o preço das motobombas dedicadas às aplicações fotovoltaicas ainda é alto, principalmente se é considerado o poder aquisitivo dos usuários de baixa renda. Além disso, faltam linhas de crédito específicas para possibilitar aos potenciais usuários o acesso a equipamentos tecnológicos como os sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

2.4.3 Problemas na manutenção dos sistemas devido à falta de pessoal qualificado para diagnosticar problemas e reparar sistemas

O Brasil, de um modo geral, carece de mão de obra capacitada para trabalhar na instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, seja em sistemas isolados ou conectados à rede elétrica. Na realidade do Semiárido brasileiro esse problema é agravado, tendo em vista a localização dispersa das comunidades rurais contempladas com os SFB. A maioria dos sistemas visitados não possuía, nas redondezas, técnicos capacitados para resolver eventuais problemas, ficando na dependência de técnicos oriundos de outras regiões, o que dificulta e onera a utilização de sistemas fotovoltaicos. Constatou-se que nos municípios que dispõem de pessoas capacitadas para reparar eventuais problemas técnicos (por exemplo, em Oeiras, PI), os SFB operam com maior disponibilidade e conquistaram a credibilidade da comunidade como um todo.

2.4.4 Falta de informações sobre o desempenho dos projetos em campo

Existem poucos dados sobre o número de projetos com SFB e o estado atual deles em artigos científicos ou outros tipos de publicações. As poucas notícias existentes muitas vezes se limitam à implantação e aos primeiros anos de andamento dos projetos, faltando informações sobre os projetos que fracassaram e os motivos do baixo desempenho. Constatou-se que há pouca troca de informação entre instituições executoras de projetos na região e, por esse motivo, muitas iniciativas cometem os mesmos erros, sem se beneficiarem do aprendizado de experiências anteriores.

2.4.5 Obra civil e infraestrutura hidráulica de baixa qualidade

Locais afastados e de difícil acesso apresentam maiores dificuldades para a execução de projetos, principalmente as obras civis com perfuração de poços, construção de reservatórios, chafarizes e rede hidráulica, sendo necessário o deslocamento, e em alguns casos hospedagem, de pessoal capacitado e de maquinaria até o local de instalação, aumentando assim os custos do projeto. Além dessa questão, muitos problemas encontrados em projetos não estão diretamente relacionados com os sistemas fotovoltaicos, mas à qualidade da execução das obras civis e da rede hidráulica e seus componentes, como torneiras e conexões. Foi observado, especialmente em sistemas de uso coletivo, que a torneira é o primeiro

componente a apresentar problemas. Por isso, estes elementos devem ser de boa qualidade e robustos.

2.4.6 Falta de dados adequados para dimensionamento correto

Alguns sistemas estudados aparentemente foram dimensionados inadequadamente por falta de informação sobre as características locais como a hidrogeologia dos poços (capacidade e altura dinâmica do poço) e as necessidades dos usuários. Há também pouca informação nos catálogos dos fabricantes e inclusive discrepâncias nos valores estimados pelos próprios fabricantes e os obtidos em bancada de ensaios e em experiências em campo.

2.5 Problemas gerais identificados com a concepção, execução e gestão dos projetos com SFB

Esta seção apresenta os principais problemas relacionados com a forma de implantação, execução e do uso produtivo dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

2.5.1 Problemas na identificação das peculiaridades dos beneficiários

Entender as particularidades de cada comunidade não é um processo fácil nem muito menos imediato. Precisa-se de recursos humanos e tempo para conhecer as prioridades dos usuários, sua capacidade e vontade real de assumir compromissos com os sistemas, sua forma de organização atual, etc. Muitos dos projetos analisados tiveram problemas devido a não levar em conta essas peculiaridades: sistemas entregues a pessoas que não precisavam deles, sistemas concebidos para serem comunitários em comunidades que não conseguem trabalhar em conjunto, etc.

2.5.2 Instituições distantes dos locais de instalação

A grande maioria das instituições executoras dos projetos analisados encontra-se localizada em centros distantes dos locais onde foram instalados os sistemas. Assim, quando não existe uma estrutura adequada de manutenção local, as tarefas de monitoramento, manutenção e conserto enfrentam dificuldades para serem executadas. Situação que faz com que pequenos problemas possam ter uma resposta demorada e custosa.

2.5.3 Falta de planos para substituição das motobombas e outros componentes

A maioria dos projetos analisados é de uso comunitário e com recursos a fundo perdido, onde os sistemas são doados ou cedidos temporariamente aos beneficiários. A quase totalidade deles não tem um plano de manutenção e substituição de equipamentos avariados. Assim, quando os recursos do projeto acabam os usuários não conseguem viabilizar reparos ou substituições de componentes. É justamente nesse momento, geralmente após a saída do agente interventor, que ocorre o sucateamento dos sistemas.

2.5.4 Uso de poços de água salobra

Muitos dos poços perfurados no semiárido brasileiro têm água com altas concentrações de sais que a torna imprópria para o consumo humano, animal e uso na irrigação. No entanto, mesmo assim, esse tipo de água segue sendo utilizada em muitos locais, devido à falta de outra fonte de água de melhor qualidade.

2.5.5 Problemas com sistemas de uso produtivo

Muitos dos projetos para uso produtivo analisados estão focados nos sistemas fotovoltaicos em si e não no uso produtivo dessa energia, carecendo de apoio técnico agrícola, bem como de infraestrutura para a comercialização da produção. Apesar da experiência dos pequenos produtores sertanejos, existem muitos problemas que determinam a baixa produtividade e lucro dos pequenos agricultores e que devem ser resolvidos (LACKI, 2014), tais como:

- o uso de técnicas agrícolas inadequadas reduz a produtividade. Isso se percebe, por exemplo, no uso de técnicas de irrigação com uso intensivo de água;
- a inadequada diversificação da produção aumenta a vulnerabilidade da produção ao clima, pragas e oscilações do mercado;
- o gerenciamento inadequado dos fatores de produção (terras, água, insumos, etc.) que aumenta os custos de produção;
- a produção de espécies de pouco valor econômico e baixa qualidade diminui as chances de aumentar os lucros;
- a dependência de intermediários para aquisição de matérias-primas e comercialização de excedentes.

2.6 Resumo do capítulo

Como foi visto neste capítulo, muitos problemas dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento no Brasil, relatados por autores como Galdino; Lima (2002) e Fedrizzi (2003) persistem até o momento e são relacionados principalmente a problemas de aquisição, manutenção e substituição das motobombas e seus respectivos equipamentos de condicionamento de potência. Os problemas relatados neste levantamento são comuns na literatura internacional encontrando-se problemas similares nos trabalhos de Short; Thompson (2003), Espericueta et al. (2004), Meah; Fletcher (2008), entre outros autores.

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Nesse capítulo discorre-se sobre a configuração proposta por Brito (2006) e outros autores para o uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência, SFB-CF, e são apresentadas algumas experiências de utilização de conversores de frequência em sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

3.1 Conversor de frequência

O conversor de frequência, CF, é um equipamento eletrônico que controla a velocidade e o torque de um motor de indução, variando a frequência e a tensão de alimentação do motor. Ele é usado amplamente no setor industrial para o controle de processos, mas também pode ser utilizado em aplicações fotovoltaicas que utilizem motores de indução trifásicos como sistemas de bombeamento (ALONSO-ABELLA; LORENZO; CHENLO, 2003 e BRITO; ZILLES, 2004) ou máquinas de gelo (DRIEMEIER; ZILLES, 2010b), pois permite condicionar a rotação do motor a valores variáveis em função da potência e porque possibilitam seu acoplamento a uma fonte de corrente contínua sem necessidade de acrescentar equipamentos adicionais. Isso é possível porque, como pode ser observado na Figura 3.1, a tensão da rede de alimentação em c.a. é retificada e filtrada, para depois ser transformada novamente em uma onda c.a. com tensão e frequência variáveis.

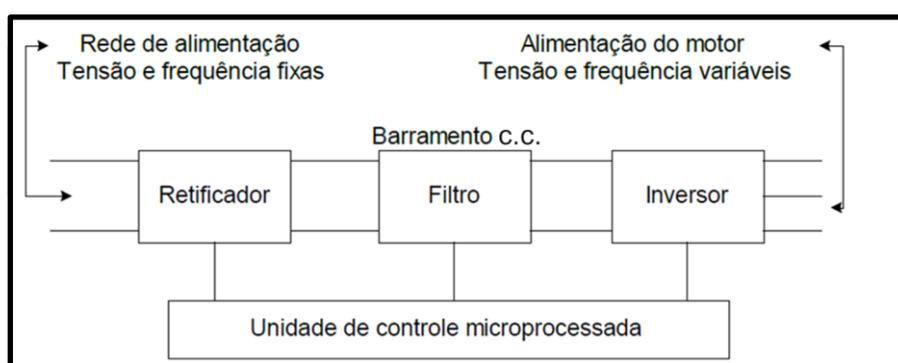


Figura 3.1: Diagrama de blocos de um CF

Fonte: Brito e Zilles (2004)

Brito (2006) especifica que para que o CF possa ser utilizado em aplicações fotovoltaicas é necessário que este possua um controlador proporcional integral, PI, ou um controlador proporcional integral derivativo, PID, incorporado, já que esse dispositivo permite ajustar a

alimentação da motobomba às variações da irradiância. A partir da realimentação da tensão do gerador fotovoltaico o controlador ajusta a frequência de saída para que a tensão se mantenha dentro da faixa operacional ao redor de um valor de tensão. Este valor pode ser fixado previamente ou ser igual ao valor da tensão do ponto de máxima potência, se existir um circuito de seguimento do ponto de máxima potência. Se a tensão do gerador for maior que esse valor de tensão, o CF aumenta a frequência e assim a tensão do gerador diminui. Já quando a tensão do gerador fotovoltaico for menor que esse valor de tensão, o CF diminui a frequência de saída.

Os conversores de frequência podem ser utilizados com uma grande variedade de motores trifásicos. Para permitir seu uso com o gerador fotovoltaico e a motobomba escolhida é necessária a realização da parametrização. Para uma correta operação do conversor de frequência a parametrização deve levar em conta os seguintes requisitos: confiabilidade do sistema (evitar o desarme do sistema por causa da intermitência da irradiância solar) e disponibilidade de potência (recolher a máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico).

Assegurar a confiabilidade do sistema significa uma correta sintonia do controlador PID, como é mostrado em Brito e Zilles (2006). Já para garantir a disponibilidade de potência é necessária uma estratégia de operação do conversor de frequência que no caso pode ser em tensão constante, *set point* fixo, ou variável, Figura 3.2. Se o conversor de frequência for operar com *set point* fixo, basta determinar o valor desejado, tensão de *set point*, em função das características climáticas de um ano típico do local onde será instalado o sistema. Essa estratégia é simples de ser implantada, porém o sistema pode operar frequentemente fora do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico. Por outro lado, se o conversor de frequência for trabalhar com *set point* variável, o CF deve possuir um circuito interno ou externo de seguimento do ponto de máxima potência, como é apresentado em Driemeier e Zilles (2010a).

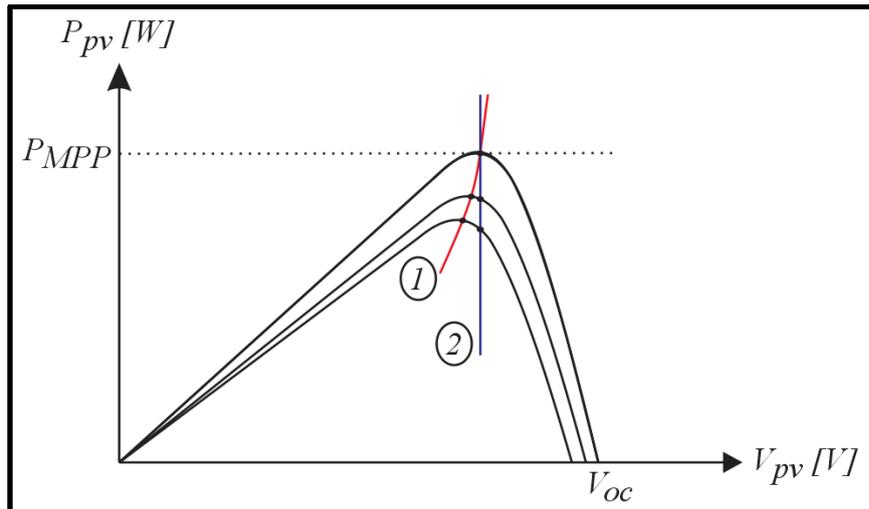


Figura 3.2: Estratégias de controle variável (1) e fixo (2)

Fonte: Brito e Zilles (2004)

O controle do sinal de saída pode ser escalar ou vetorial. No controle escalar, a relação entre a tensão e a frequência segue uma curva pré-programada, de modo que o torque do motor seja mantido constante para qualquer velocidade de funcionamento do motor. Este tipo de controle é utilizado para sistemas que não demandam alto desempenho, como o acionamento de bombas e ventiladores. Conversores de frequência com esse tipo de controle são geralmente mais baratos e alguns contam com a opção de controle escalar quadrático, mais adequado para acionamento de bombas centrífugas. Já o controle vetorial é um processo mais complexo, onde o torque é regulado com maior precisão para toda a faixa de operação do motor, oferecendo uma resposta dinâmica mais rápida para variações bruscas de carga.

3.2 A configuração proposta por Brito (2006)

A configuração proposta por Brito (2006) utiliza um conversor de frequência como equipamento de condicionamento de potência para o uso com motobombas centrífugas trifásicas, Figura 3.3.

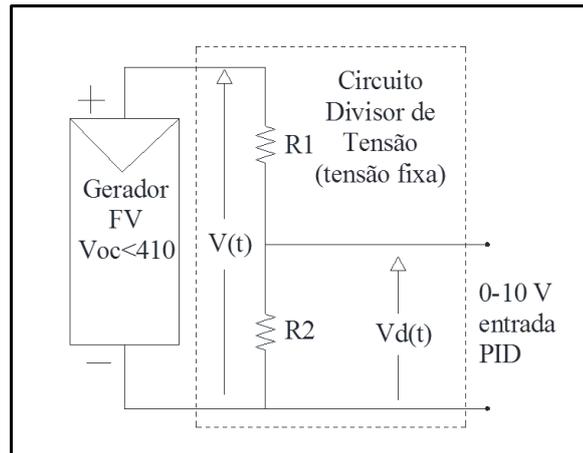


Figura 3.3: Configuração proposta por Brito (2006)

Fonte: Brito e Zilles (2006)

Brito (2006) testou três modelos de conversores de frequência, Figura 3.4, sendo escolhido o conversor CFW08 - Plus da marca WEG, por ser de fabricação nacional e possuir a opção de controle proporcional integral derivativo. Trabalha-se nessa configuração com tensão constante (*set-point* fixo) e controle escalar. O CF é instalado dentro de um quadro elétrico que conta com alguns elementos de proteção elétrica e seccionamento, Figura 3.5. No circuito c.c. são utilizados DPS² e um disjuntor entre o gerador fotovoltaico e o CF. Já no circuito c.a. são utilizados DPS e um disjuntor entre o CF e a motobomba. Dentro do quadro é usada uma barra de equipotencialização para aterramento. Além dos dispositivos mencionados, um circuito de resistências tem como função fornecer um sinal de realimentação necessário para o controle PID.



Figura 3.4: Modelos de CFs testados por Brito (2006)

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

² O dispositivo de proteção contra surtos, DPS, protege os equipamentos de sobretensões causadas por descargas atmosféricas ou manobras do circuito.



Figura 3.5: Quadro elétrico e principais componentes

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

3.3 Outras configurações

Além da configuração proposta por Brito (2006) existem outras configurações para utilização de conversores de frequência com motobombas trifásicas em sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Nesta seção são apresentadas cinco configurações propostas por outros autores.

3.3.1 A configuração de Alonso-Abella (2003)

Nessa configuração um circuito eletrônico adicional, que inclui um sensor de temperatura acoplado à superfície de um dos módulos, permite corrigir o valor de *set-point* para acompanhar melhor o ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico (ALONSO-ABELLA; LORENZO; CHENLO, 2003). A Figura 3.6 mostra o esquema da configuração proposta.

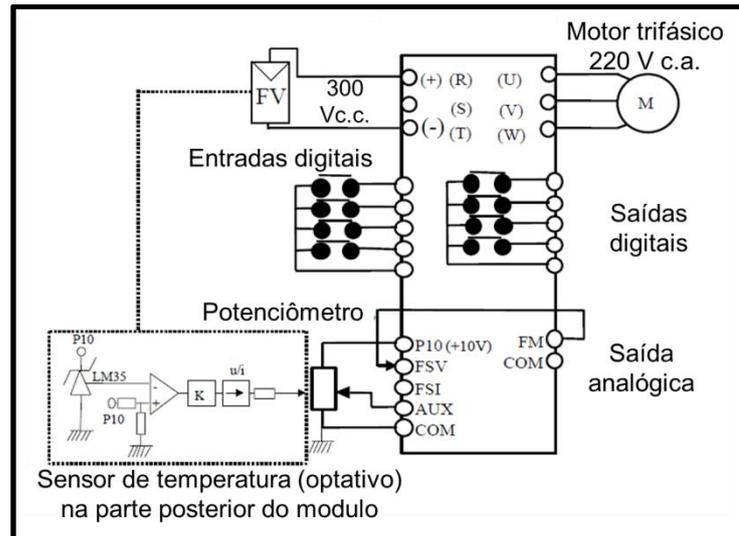


Figura 3.6: Configuração de Alonso-Abella (2003)

Fonte: Modificado de Alonso-Abella; Lorenzo; Chenlo (2003)

3.3.2 A configuração de Melo (2004)

Melo (2004), como parte de sua dissertação de mestrado, desenvolveu uma configuração similar a de Brito (2006) utilizando um conversor de frequência importado. Uma aplicação dessa configuração foi utilizada no sistema de bombeamento mencionado na seção 2.3.4. A Figura 3.7 mostra o quadro elétrico com esta configuração, instalado no restaurante Grota dos Angicos.



Figura 3.7: Quadro elétrico com CF configurado segundo Melo (2004)

3.3.3 A configuração de Driemeier e Zilles (2010)

Driemeier e Zilles (2010a) também desenvolveram um circuito elétrico ligado ao conversor de frequência, com o objetivo de seguir o ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico.

Segundo os autores, o circuito é simples, fácil de reproduzir e de baixo custo de fabricação. A Figura 3.8 mostra o circuito elétrico mencionado.

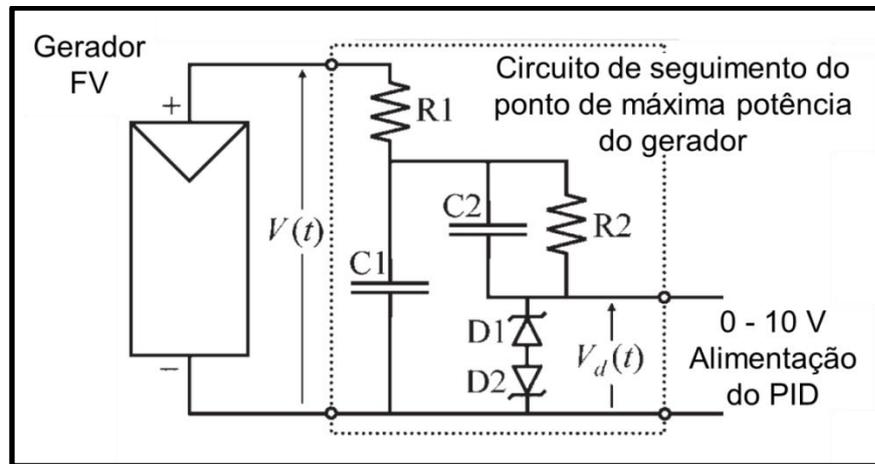


Figura 3.8: Circuito elétrico MPPT proposto por Driemeier e Zilles (2010)

Fonte: Driemeier e Zilles (2010a)

3.3.4 A configuração de Fernandez-Ramos (2010)

Fernandez-Ramos; Narvarte-Fernandez e Poza-Saura (2010) propõem a utilização de um controlador lógico programável (PLC, como é conhecido por sua sigla em inglês) para o seguimento do ponto de máxima potência e detecção, por parte do CF, de algumas situações: poço seco, tanque cheio e queda brusca dos níveis de irradiância. A Figura 3.9 mostra o PLC junto ao conversor de frequência modelo V7AZ-B2P2 da OMRON.



Figura 3.9: CF e PLC utilizados na configuração de Fernandez-Ramos (2010)

Fonte: Fernandez-Ramos; Narvarte-Fernandez e Poza-Saura (2010)

3.3.5 A configuração de Maranhão (2015)

Maranhão et al. (2015) desenvolveram um controlador fuzzy que pode ser conectado a um conversor de frequência para aprimorar o controle de velocidade da motobomba segundo a variação da irradiância. Para funcionamento do sistema, é necessário um sensor de irradiância que pode ser um foto-resistor ou uma célula calibrada. A Figura 3.10 mostra o diagrama proposto por Maranhão para esta configuração.

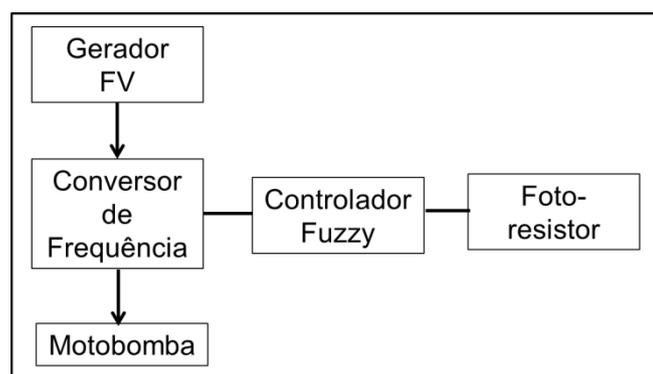


Figura 3.10: Diagrama de blocos da configuração usada por Maranhão (2015)

Fonte: Maranhão et al. (2015)

3.4 Experiências com sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência no mundo

Os maiores programas de instalação de SFB-CF foram o Programa de Bombeamento Solar e o Programa MEDA, ambos desenvolvidos pelo Grupo de Sistemas Fotovoltaicos da Universidade Politécnica de Madri em parceria com outras instituições. O Programa de Bombeamento Solar foi o primeiro projeto que adotou os SFB-CF. Como parte desse programa, 10 SFB-CF foram instalados em 1997 no sul de Marrocos. Após pouco mais de sete anos de funcionamento, só foi reportado um problema relacionado ao CF (NARVARTE; LORENZO, 2010). Já o programa MEDA instalou 52 SFB-CF, 29 em Marrocos, 10 na Argélia e 13 na Tunísia, totalizando uma potência de 257,3 kWp. Um levantamento posterior mostrou que menos de 5 % dos problemas tinham relação com o CF e que a maior parte dos problemas tinha relação com o sistema de distribuição de água (POZA, 2008).

3.5 Experiências com sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversor de frequência no Brasil

O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, LSF-IEE-USP, participou da instalação de 10 SFB-CF no Brasil. Adicionalmente, o Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Grupo FAE – UFPE, em parceria com o Instituto Xingó, revitalizou um SFB em Sergipe, instalando um CF, vide seção 2.4.3. Esse sistema usa um conversor de frequência da SIEMENS, diferentemente dos outros, onde o conversor CFW08-plus é utilizado. A Tabela 3.1 mostra um resumo dos SFB-CF instalados no Brasil. À continuação são apresentados os projetos com SFB-CF que tiveram a participação do LSF-IEE-USP.

Tabela 3.1: SFB-CF instalados no Brasil

Município	Instituições participantes	Num. de SFB-CF	Potência Total (Wp)	Ano de instal.	Uso ^(a)
Presidente Bernardes (SP)	LSF-IEE-USP	1	3.200	2005	I.
Canindé de São Francisco (SE)	Inst. Xingó/ Grupo FAE-UFPE	1	3.300	2002	I.
Oeiras (PI)	Inst. Piauí solar / LSF-IEE-USP	1	1.200	2012	I.
Tauá (CE)	CELPE/ LSF-IEE-USP	1	900	2013	I.
Serra Talhada (PE)	CELPE/ LSF-IEE-USP	7	8.700	2014	I, CH e CA.

^(a) CH = consumo humano, CA = consumo animal, I = Irrigação.

Fonte: Elaboração própria

3.5.1 Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência instalado no Pontal de Paranapanema

Um sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência foi instalado em novembro de 2005 no Assentamento Palú, município de Presidente Bernardes, região do Pontal de Paranapanema, SP, como parte das atividades de pesquisa na elaboração da tese de Brito (2006). O local foi escolhido por seu fácil acesso entre um grupo de sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados na região na época do PRODEEM. O sistema original possuía uma potência instalada de 1,28 kWp com uma motobomba submersível c.c.

SolarJack SunPump de 1 cv, modelo SCS10-230, e sistema de condicionamento de potência PCB 8-90B. O poço possui uma capacidade de 11 m³/h com um nível dinâmico de 42 m.

O novo sistema foi projetado para fornecer 32 m³ de água por dia a 40 m de altura manométrica total para uma irradiação diária global de 5 kWh/m². Para esse fim, a potência do gerador foi ampliada para 3,2 kWp. A motobomba foi substituída por uma motobomba SOMAR BMSAF407/2-13, de 2 cv - 13 estágios, acoplada a um conversor de frequência CFW08 da WEG, Figura 3.11.



Figura 3.11: SFB-CF instalado no Pontal de Paranapanema e quadro com CF

Fonte: Brito (2006)

A Tabela 3.2 mostra as principais ocorrências registradas com este SFB-CF. O primeiro problema aconteceu em janeiro de 2006, devido a uma descarga atmosférica que danificou o CF. Em março do mesmo ano, o CF foi substituído e instalou-se um DPS. Em 2013, a motobomba parou de funcionar e os técnicos retiraram-na com o CF, pois não conseguiram identificar o problema. O sistema encontra-se paralisado desde então.

Tabela 3.2: Ocorrências com o SFB instalado em Pontal de Paranapanema

Problema	Data da ocorrência	Solução
(Quadro elétrico) – Problema no CF	Janeiro (2006)	Substituição do CF
(Motobomba) – Problema da motobomba	Maior (2013)	Ainda não foi solucionado

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de Brito (2006)

3.5.2 Projeto Sol e Água no Sertão

Um SFB-CF foi instalado na comunidade Exu, município de Oeiras, Piauí em 2012. A comunidade Exu é composta por 80 famílias, que se dedicam principalmente a agricultura familiar. A comunidade encontra-se eletrificada, mas há reclamações em relação às frequentes interrupções de serviço. Segundo Moraes (2015), a comunidade foi escolhida devido ao grau de organização existente, à motivação dos moradores, à experiência prévia com sistemas fotovoltaicos e à disponibilidade de um poço tubular situado em área não eletrificada. Devido à falta de recursos financeiros, o Instituto Piauí Solar pediu a ajuda de várias instituições para a aquisição dos componentes do sistema. Os módulos são remanescentes de instalações do PRODEEM na região. A motobomba e o quadro elétrico com o conversor de frequência foram fornecidos pelo LSF-IEE-USP. Outras instituições locais doaram a fiação e tubulação, os *kits* de irrigação e financiaram o transporte dos componentes, a instalação do sistema e a capacitação dos usuários.

O sistema é composto por um gerador fotovoltaico de 1,2 kWp, motobomba trifásica Leão 4R4P de 1 cv, 9 estágios, e um conversor de frequência CFW08 de 1 cv. A Figura 3.12 mostra o sistema quando foi visitado em 2012. Na época a cisterna que se observa ao fundo já estava com problemas e foi substituída depois por uma caixa de 2 m³. A mostra o quadro elétrico e a boca do poço.



Figura 3.12: SFB-CF instalado na comunidade Exu



Figura 3.13: Quadro elétrico e boca do poço

Apesar do interesse inicial da comunidade para participar do projeto, a água só está sendo aproveitada por um produtor. A Figura 3.14 mostra a área de plantio desse produtor, a caixa de água e o *kit* de irrigação. Moraes (2015) comenta também os principais problemas registrados com o sistema. O primeiro aconteceu três meses depois da instalação, quando foi necessário descer mais a bomba devido à diminuição do nível dinâmico. Já um mês depois, a cisterna teve problemas com vazamentos e o sistema ficou paralisado até junho de 2013, quando foi possível conseguir financiamento para a compra de um novo reservatório. Depois da primeira safra de melancia e abóbora, houve problemas fitossanitários no solo, que inviabilizaram novas safras desses cultivos. Atualmente, o sistema está sendo utilizado para a produção de outras culturas para consumo da própria família. A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos problemas desse sistema.



Figura 3.14: Kits de irrigação e área de plantio

Tabela 3.3: Ocorrências com o SFB – CF instalado na comunidade de Exú

Problema	Data da ocorrência	Solução
(Circuito hidráulico) – Vazamento no reservatório	Outubro (2012)	Substituição do reservatório

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de Moraes (2015)

3.5.3 Sistema fotovoltaico de bombeamento com conversor de frequência instalado em São Pedro de Tricí

A pedido da Prefeitura Municipal de Tauá, Ceará, um SBF-CF foi instalado em setembro de 2013 na comunidade de São Pedro de Tricí, para substituir um sistema de bombeamento com rede elétrica, cujo funcionamento estava comprometido devido à má qualidade da rede elétrica local. O SBF-CF é composto por um gerador de 900 Wp, um conversor de frequência CFW08 da WEG, bomba Mark-Grundfos CS-5-05-07 de 0,75 cv, 5 estágios, e um reservatório de 5 m³. O sistema foi instalado mediante uma parceria da empresa KYOCERA e o LSF-IEE-USP. Em uma primeira etapa foram instalados o reservatório e o gerador fotovoltaico. Porém, como pode ser observado na Figura 3.15, o reservatório faz sombra no gerador nas primeiras horas da manhã.



Figura 3.15: SFB-CF instalado na comunidade São Pedro de Tricí (CE)

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

Já na segunda etapa, foram instalados a motobomba e o quadro elétrico. O quadro elétrico do SFB-CF foi instalado no abrigo já existente. No entanto, houve necessidade de perfurar a porta do abrigo para ventilação e instalação de uma tela de proteção contra insetos, Figura 3.16. Devido às discrepâncias entre a profundidade do poço informada pela empresa que o perfurou e o valor real, houve necessidade de estrangular a válvula de saída para evitar que a

motobomba secasse o poço. A Figura 3.17 mostra a vista superior e frontal da boca do poço. A água fornecida pelo sistema é utilizada para criação de ovinos e caprinos.



Figura 3.16: Quadro elétrico e abrigo do quadro

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 3.17: Vista superior e frontal da boca do poço

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

3.5.4 Projeto com Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia de Bombeamento Nacional – Zona Rural de Pernambuco

O projeto “Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia de Bombeamento Nacional – Zona Rural de Pernambuco” foi desenvolvido como parte de um projeto de P&D da Companhia Energética de Pernambuco, CELPE. Inicialmente avaliou-se a ideia de instalar 10 SFB-CF, mas finalmente foram instalados sete sistemas em janeiro de 2014, Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Principais características dos SFB-CF instalados em Serra Talhada

Localidade	Potência do gerador (Wp)	Potência do conversor de frequência (cv)	Modelo da motobomba	Potência da motobomba (cv)/numero de estágios	Tipo de uso ^(a)
Jatobá de Cima	600	1	CS207-05	0,5 / 5	CH, UD e I
As. Carnaúba	900	1	2.1SSR-11	0,7 / 11	UD e I
Angico Grande	900	1	4R4-06	0,7 / 6	UD, CA e I
Lagoinha	900	1	4R4-07	0,7 / 7	CH, UD e CA
Faz. Papagaio	1.800	2	4R4-09	1,5 / 9	CA
Paus Pretos – Cipó	1.800	2	4R4-09	1,5 / 9	UD, CA e I
Serrinha	1.800	2	4R4-09	1,5 / 9	UD, CA e I

^(a) CH = consumo humano, UD = uso doméstico, CA = consumo animal, I = Irrigação.

Fonte: Elaboração própria baseado nos dados de Fedrizzi et al (2016).

O SFB-CF instalado na Fazenda Papagaio possui um gerador de 1,8 kWp e uma motobomba de 2 cv, 9 estágios, Figura 3.18, e está instalado dentro de uma área particular. O sistema é usado para consumo animal (caprinos). Não há registros de problemas e o sistema seguia em funcionamento até julho de 2016.

**Figura 3.18: SFB-CF instalado na Fazenda Papagaio**

Na comunidade Jatobá de Cima, um sistema de 0,6 kWp com motobomba de 0,5 cv, 5 estágios foi instalado para irrigação de uma horta, consumo animal e uso doméstico, Figura 3.19. No momento da primeira visita, em março de 2014, o sistema não estava operativo. Após avaliação do quadro e da motobomba, encontrou-se um pequeno problema no circuito de resistências de realimentação do controle PID. O elemento foi substituído e o quadro e a

motobomba foram reinstalados pouco tempo depois. Infelizmente, o sistema foi desativado devido à instabilidade estrutural do poço.



Figura 3.19: SFB-CF instalado na comunidade Jatobá de Cima

Na comunidade Lagoinha foi instalado um sistema de 0,9 kWp com uma motobomba de 1 cv, 7 estágios. O sistema é de uso comunitário e atualmente a água é utilizada para consumo humano, animal e fins domésticos. Até o momento só houve um problema com o sistema, associado com a fixação entre o espigão plástico da tampa da boca do poço e a mangueira da motobomba, Figura 5.4. Nesse sistema foi instalada uma instrumentação de monitoramento de dados de irradiância solar, vazão de água, temperatura do módulo e temperatura ambiente, Figura 3.20. Em maio de 2015, o conversor foi substituído por um CFW500.



Figura 3.20: SFB-CF instalado na comunidade Lagoinha

Outro SFB-CF foi instalado na comunidade Paus Pretos - Cipó. O sistema possui um gerador de 1,8 kWp e uma motobomba de 1,5 cv, 9 estágios. Apesar de a água ser salobra, ela é utilizada para irrigação, mas também para fins domésticos e consumo animal. Um fato interessante é que os moradores construíram uma rede de distribuição de água que permite o

uso da água em outras residências e numa área de plantio próxima, Figura 3.21. Na visita realizada em maio de 2015, detectou-se que um dos módulos estava trincado, mas desconhece-se o motivo.



Figura 3.21: SFB-CF instalado na comunidade Paus pretos/Cipó

O SFB-CF instalado na comunidade Serrinha é utilizado para fins domésticos, consumo animal e irrigação de uma pequena área de plantio. A água é salobra e não é utilizada para consumo humano. O sistema está composto por um gerador de 1,8 kWp e uma motobomba de 1,5 cv, 9 estágios, Figura 3.22. Na visita realizada em maio de 2015, a motobomba foi enviada para conserto e reinstalada pouco tempo depois.



Figura 3.22: SFB-CF instalado na comunidade Serrinha

No Assentamento Carnaúba foi instalado um sistema de 0,9 kWp e motobomba de 0,7 cv, 11 estágios. A água é utilizada para atividades domésticas e irrigação, apesar de ser salobra, Figura 3.23. A motobomba deste sistema também teve que ser substituída em maio de 2015.



Figura 3.23: SFB-CF instalado no Assentamento Carnaúba

O sistema instalado na comunidade Angico Grande foi o único que não foi visitado em março de 2014, mas foi visitado em maio de 2015. O sistema possui um gerador de 0,9 kWp e motobomba de 0,7 cv, 6 estágios, Figura 3.24. A água bombeada é usada para fins domésticos, consumo animal e irrigação. Houve duas ocorrências registradas com este sistema. A primeira devido à boia do nível de reservatório. A segunda devido ao travamento do eixo do motor, que foi obstruído por raízes.



Figura 3.24: SFB-CF instalado na comunidade Angico Grande

A Tabela 3.5 apresenta as principais ocorrências registradas até julho de 2016 com os sete sistemas.

Tabela 3.5: Ocorrências e medidas adotadas nos SFB-CF instalados em Serra Talhada

Comunidade	Problema	Data aproximada	Solução
Jatobá de Cima	(Quadro elétrico) – Defeito no divisor de tensão	Março, 2014	Substituição do quadro
Faz. Lagoinha	(Rede hidráulica) – Espigão na saída da MB danificado	Abril 2014	Substituição do espigão de PVC
Jatobá de Cima	(Rede hidráulica) – Problema do poço	Junho, 2014	Realocação do sistema
Angico Grande	(Rede hidráulica) – Problema na boia do reservatório	Junho, 2014	Conserto da boia
Angico Grande	(Motobomba) - Obstrução da bomba por raízes	Maio 2015	Limpeza da bomba
Angico Grande	(Rede hidráulica) – Espigão na saída da MB danificado	Maio 2015	Substituição do espigão de PVC
Serrinha	(Motobomba) – Corrosão na ponta do eixo	Maio 2015	Substituição de motobomba
Ass. Carnaúba	(Motobomba) – Problema na bomba devido a desgaste do eixo por abrasão de areia da água do poço	Maio 2015	Conserto da motobomba
Paus Pretos - Cipó	(Gerador fotovoltaico) – Módulo quebrado	Maio 2015	Substituição do módulo

Fonte: Elaboração própria

3.6 Resumo do capítulo

O presente capítulo foi dedicado à apresentação de algumas configurações de utilização de conversores de frequência em sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Como pode ser observado, a configuração proposta por Brito (2006) não é a única existente para uso de conversores de frequência em bombeamento com energia solar fotovoltaica. Entretanto, a configuração proposta por Brito (2006) é mais adaptada para o contexto nacional, por utilizar um equipamento fabricado nacionalmente e com vários pontos de serviço técnico espalhados no país. Também foram apresentadas algumas experiências no país, de utilização de sistemas fotovoltaicos que utilizam conversores de frequência.

4. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO SFB-CF

Como foi comentado no Capítulo 2, os SFB apresentam problemas associados à manutenção e à reposição dos seus componentes. No presente capítulo são analisadas as vantagens e limitações da configuração proposta por Brito (2006) em relação aos SFB sem esta configuração.

4.1 Comparação econômica entre o SFB-C e o SFB-CF

Para comparar os custos de ambas as configurações, uma análise econômica foi feita com três figuras de mérito: investimento inicial, custo de ciclo de vida e custo do volume de água bombeada. Para este fim, adotou-se um sistema com capacidade de fornecimento diário de 20 m³ a uma altura de total de 50 m. Um sistema com estas características pode satisfazer as demandas de água para uma área de um hectare de vários cultivos comuns na agricultura familiar nordestina (CODEVASF, 1989). A bomba é submersível para uso em poço artesiano.

A partir de uma pesquisa entre as opções disponíveis no mercado brasileiro, dois SFB-C e quatro SFB-CF foram selecionados. A Tabela 4.1 mostra algumas características dos sistemas de bombeamento fotovoltaicos avaliados. Os SFB-C foram dimensionados usando os ábacos criados pelos respectivos fabricantes. Os SFB-CF foram dimensionados segundo a metodologia utilizada até o momento pelo LSF-IEE-USP. Devido à diferença entre as metodologias de dimensionamento utilizadas pelos fabricantes e o LSF-IEE-USP, a potência do gerador nos SFB-CF é maior, o que não implica que estes sistemas sejam menos eficientes do que os convencionais.

Tabela 4.1: Principais características dos SFB selecionados para análise econômica

Sistema	Gerador fotovoltaico (kWp)	Bomba (Potência / número de estágios)	Sistema de condicionamento de potência	Volume bombeado (m ³ /dia)
SFB- C1	1,2	1,5 cv/10	Controlador próprio – 1,5 cv	20,5*
SFB-C2	1,2	1 cv /7	Controlador próprio	21,0*
SFB-CF1	1,5	1 cv /6	CF - 1 cv	21,0
SFB-CF2	1,5	1 cv /6	CF - 1 cv	19,1
SFB-CF3	1,5	1 cv /9	CF - 1 cv	25,3
SFB-CF4	1,5	1 cv /8	CF - 1 cv	23,4

*Estimado dos respectivos ábacos para 6 kWh/m² por dia para uma altura de 50 m.

Fonte: Elaboração própria

4.1.1 Investimento Inicial

A Tabela 4.2 apresenta os preços obtidos a partir de uma pesquisa no mercado local e a percentagem relativa do investimento inicial por cada componente. Considerou-se que o preço por Wp de um módulo fotovoltaico foi de R\$ 5, preço encontrado em lojas varejistas no Brasil. Observa-se que tanto as motobombas quanto os equipamentos de condicionamento de potência são mais caros para os SFB-C do que para os SFB-CF. Estima-se que os outros componentes elétricos (cabos, conectores, caixas elétricas, DPS, etc.) custam R\$ 600 para os SFB-C e R\$ 700 para os SFB-CF. Os custos de instalação e serviço de transporte de São Paulo para outra cidade brasileira não foram levados em conta neste cálculo. Como pode ser observado na Tabela 4.2, o preço inicial dos módulos representa mais de 50 % do investimento inicial na maioria dos sistemas analisados. A Figura 4.1 mostra a comparação entre o investimento inicial para o SFB-C e o SFB-CF de menor preço.

Tabela 4.2: Preços dos componentes dos SFB escolhidos

	Preço do gerador FV		Preço da motobomba		Preço do condicionador de potência		Invest. inicial total (R\$)
	R\$	%	R\$	%	R\$	%	
SFB-C1	6.000	40,0 %	6.720	44,8 %	1.680	11,2 %	15.000
SFB-C2	6.000	38,5 %	7.184	46,1 %	1.796	11,5 %	15.580
SFB-CF1	7.500	75,3 %	989	9,9 %	775	7,8 %	9.964
SFB-CF2	7.500	74,0 %	1.162	11,5 %	775	7,6 %	10.137
SFB-CF3	7.500	71,6 %	1.500	14,3 %	775	7,4 %	10.475
SFB-CF4	7.500	72,9 %	1.317	12,8 %	775	7,5 %	10.292

Fonte: Elaboração própria

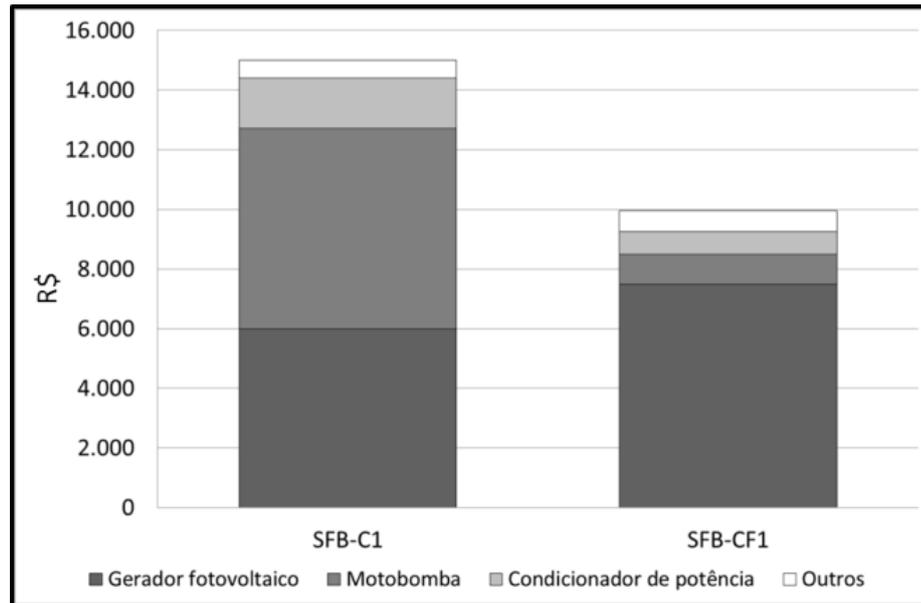


Figura 4.1: Comparação do investimento inicial entre o SFB-C e o SFB-CF de menor preço

Fonte: Elaboração própria

4.1.2 Custo de ciclo de vida

O custo de ciclo de vida, CCV, é a soma de todos os custos ao longo da vida útil do projeto, como: investimento inicial, custos de operação, manutenção e reposição dos equipamentos. A Equação 4.1 mostra o cálculo do CCV, onde N é o período de análise, neste caso 24 anos, i é a taxa de desconto anual (10 %), C_0 é o preço inicial e C_{MB} , C_{CP} e C_{OC} são os preços da motobomba, condicionador de potência e de outros componentes respectivamente. Cada componente é substituído após um número “ m ”, “ n ” e “ p ” de anos, sendo que “ m ” é o período de substituição da motobomba, “ n ” do condicionador de potência e “ p ” de outros elementos. O Fator de Recuperação de Capital, FRC é definido na equação 4.2.

$$CCV = C_0 + \frac{C_{O\&M}}{FRC} + \sum_{j=1}^N C_{MB}(1+i)^{-j*m} + \sum_{j=1}^N C_{CP}(1+i)^{-j*n} + \sum_{j=1}^N C_{OC}(1+i)^{-j*p} \quad (4.1)$$

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.2)$$

Devido à pouca informação sobre a operação dos SFB-CF no campo, estes parâmetros são escolhidos considerando as informações sobre a vida útil da bomba convencional no sistema de bombeamento conectado à rede e o tempo de vida do CF praticado na indústria. Supõe-se que todas as bombas devem ser substituídas depois de quatro anos e o condicionador de potência depois de oito anos. Outros componentes serão substituídos depois de 10 anos. Os custos de manutenção e de operação, $C_{O\&M}$, não foram considerados na análise, porque eles

variam consideravelmente, dependendo de localização, e são relativamente iguais para ambos os casos. A Tabela 4.3 resume os principais parâmetros escolhidos para esta análise. No presente estudo, o CCV variou de R\$ 28.800 a R\$ 30.300 para o SFB-C e de R\$ 12.700 a R\$ 14.130 para os SFB-CF, vide Tabela 4.4 .

Tabela 4.3: Parâmetros para a análise de CCV entre os SFB-C e os SFB-CF

Parâmetro	Valor
Período de análise	24 anos
Taxa de juros	10%
Tempo de vida do gerador fotovoltaico	24 anos
Tempo de vida da motobomba	4 anos
Tempo de vida do condicionador de potência	8 anos
Tempo de vida de outros componentes	10 anos

Fonte: Elaboração própria

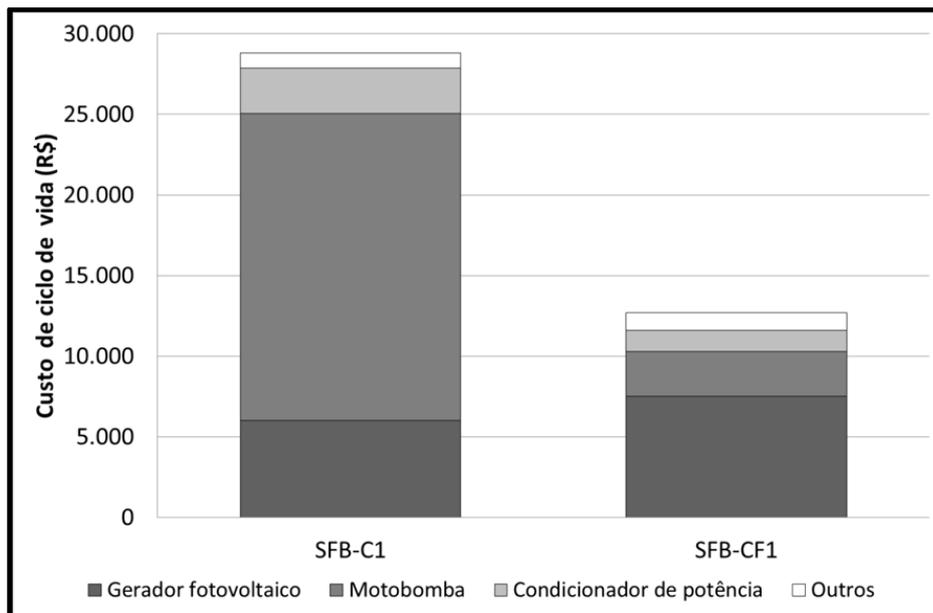


Figura 4.2: Comparação de custo de ciclo de vida entre um SFB-C e um SFB-CF

Fonte: Elaboração própria

4.1.3 Custo do volume bombeado

Para o cálculo do custo do volume bombeado, CVB, analisa-se os custos de ciclo de vida usando o Fator de Recuperação de Capital, FRC, e divide-se pelo volume bombeado (V_b), Equações 4.2 e 4.3. Os valores de volume diários bombeados, Q_p , foram obtidos a partir de folhas de dados do fabricante e são mostrados na Tabela 4.1. A Figura 4.3 e a Tabela 4.4 mostram os valores do CVB para cada configuração.

$$CVB = \frac{CCV * FRC}{V_b} \quad (4.3)$$

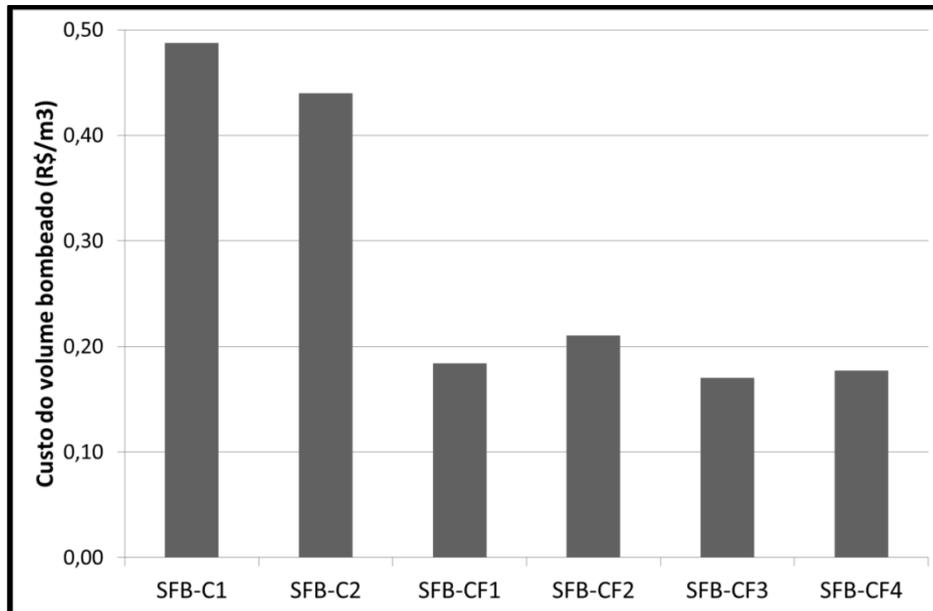


Figura 4.3: Custos do volume bombeado

Fonte: Elaboração própria

4.1.4 Resultados da comparação econômica entre os SFB-C e os SFB-CF

Como pode ser visto na Tabela 4.4, o investimento inicial necessário para os SFB-CF é menor do que dos SFB-C. Observa-se que no caso do SFB-C2, ele é 64 % mais caro do que a configuração mais barata com CF (SFB-CF1). A redução no preço de bomba também reduz o CCV do sistema, já que é o componente com menor expectativa de vida. Com o uso de uma motobomba de menor preço, o CCV do SFB-CF1 é menos da metade do SFB-C1, Figura 4.2. Em relação ao terceiro parâmetro, o CVB para SFB-CF (0,17 - 0,21 R\$/m³) é menor do que para SFB-C (0,44 e 0,49 R\$/m³) como pode ser visto na Figura 4.3.

Tabela 4.4: Resultados da comparação econômica entre os SFB-C e os SFB-CF

Sistema	Investimento inicial (R\$)	CCV (R\$) *	CVB (R\$/m ³)*
SFB-C1	15.000	28.797	0,49
SFB-C2	15.580	30.308	0,44
SFB-CF-1	9.964	12.682	0,18
SFB-CF-2	10.137	13.173	0,21
SFB-CF-3	10.475	14.131	0,17
SFB-CF-4	10.292	13.612	0,18

*Os custos de instalação e manutenção não foram considerados nesta análise

Fonte: Elaboração própria

Conclui-se, então, que em termos econômicos resulta muito mais atrativo o uso de SFB-CF, por ter um investimento inicial menor, menor custo de ciclo de vida e menor custo do metro cúbico de água bombeado.

4.2 Comparação econômica entre o SFB-C e um Sistema diesel de bombeamento (SGDB)

Similarmente à seção 4.1, foi feita uma comparação econômica entre um sistema de bombeamento fotovoltaico com conversor de frequência, SFB-CF, e um sistema de geração a diesel de bombeamento, SGDB. Para este fim, a motobomba convencional mais barata da Tabela 4.1 foi utilizada em ambos sistemas. Neste cenário, os custos de instalação não incluem infraestrutura hidráulica, como perfuração de poços e canalizações.

A Figura 4.4 e a Tabela 4.5 mostram os valores de investimento inicial para ambas as configurações e os percentuais de cada componente no valor total. Observa-se que o investimento inicial para o SFB-CF é três vezes maior que para o sistema com diesel, principalmente pelo custo do gerador fotovoltaico e, em menor grau, pela diferença dos custos de instalação e do quadro elétrico.

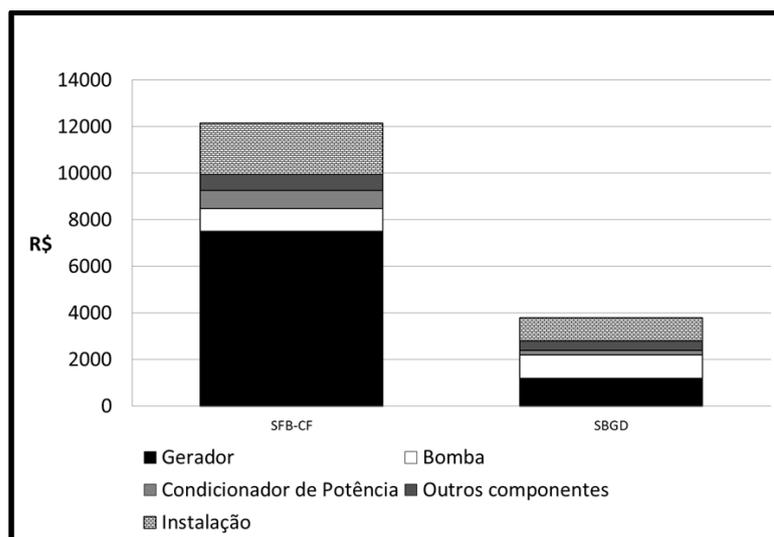


Figura 4.4: Investimento inicial

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4.5: Investimento inicial do SFB-CF e do SGDB

Componente	SFB-CF		SGDB	
	Preço (R\$)	Percentual	Preço (R\$)	Percentual
Gerador	7.500	62 %	1.200	32 %
Bomba	989	8 %	989	26 %
Condicionador de potência	775	6 %	200	5 %
Outros componentes	700	6 %	400	11 %
Instalação	2.200	18 %	1.000	26 %

Fonte: Elaboração própria

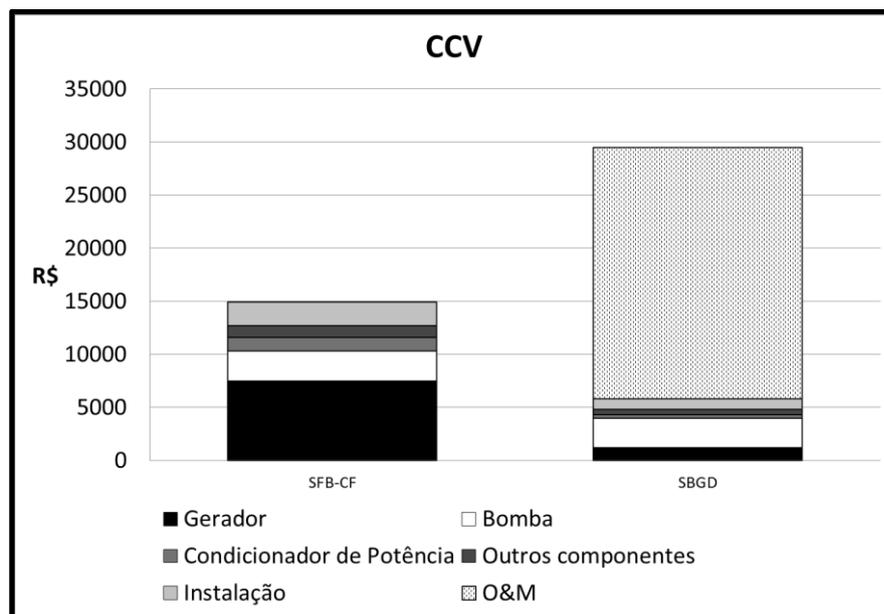
A análise de ciclo de vida foi feita usando as Equações 4.1, 4.2 e 4.3 e os parâmetros utilizados nas Tabelas 4.3 e 4.6. O custo anual de manutenção do gerador diesel tem um valor de R\$ 100. O gerador diesel selecionado consome 1,25 litros por hora de funcionamento e cada litro custa R\$ 3. Assim, o custo de operação anual é de aproximadamente de R\$ 8.200, com o gerador trabalhando 6 horas por dia. Devido à dificuldade de estimar o custo de manutenção para o SFB-CF, assumiu-se um cenário onde uma pessoa faz as tarefas de manutenção básicas necessárias sinalizadas na Tabela 5.1 sem cobrar por esse serviço. Neste cenário, a motobomba é substituída totalmente a cada 4 anos, supõe-se que não haverá necessidade de manutenção corretiva no período.

Tabela 4.6: Parâmetros para a análise de CCV entre o SFB-CF e o SGDB

Fator	SFB-CF	SGDB
Potência do gerador	1,5 kWp	2,2 kVA
Potência da bomba	1	1
Custo de instalação (R\$)	2.200	1.000
Custo anual de operação (R\$)	0	8.192
Custo anual de manutenção (R\$)	0	100

Fonte: Elaboração própria

Assim, o custo de ciclo de vida tem valor próximo aos 15 mil reais para o SFB-CF e de quase o dobro para o SGDB, Tabela 4.7. A Figura 4.5 mostra o impacto de cada componente no custo de ciclo de vida de cada tecnologia. Como pode ser visto, os custos de operação e manutenção representam o 80 % do CCV do SGDB. Essa diferença de valores do CCV também repercute no valor do CVB, Figura 4.6, sendo o CVB para o SFB-CF cinco vezes menor.

**Figura 4.5: Custo de ciclo de vida**

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4.7: Resultado da avaliação econômica entre o SFB-CF e o SGDB

	SFB-CF	SGDB
CCV	14.923	29.498
CVB	0,22	1,17

Fonte: Elaboração própria

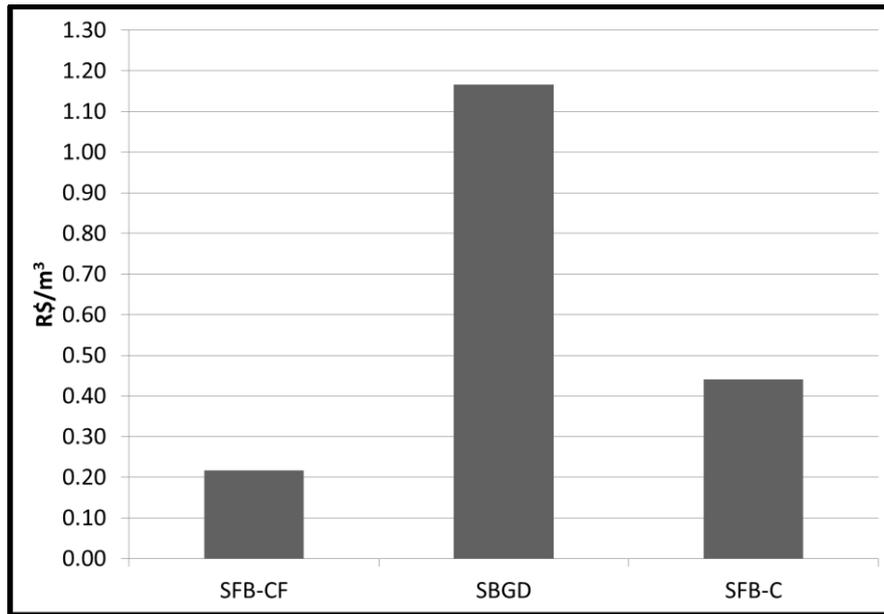


Figura 4.6: Custo do volume bombeado

Fonte: Elaboração própria

A fim de saber a partir de qual ano é mais atraente usar um SFB-CF em vez de um SGDB, uma análise do ponto de equilíbrio foi feita, Figura 4.7. Para este efeito comparou-se o CCV acumulado até chegar o momento em que o CCV de SFB-CF se torne menor ao CCV de um SGDB. Este evento aconteceu após um ano de operação. Esta informação pode variar muito, dependendo do preço do óleo combustível. Portanto, apesar de que o valor do investimento inicial é muito mais alto para os SFB-CF, em curto prazo estes se tornam mais atrativos para bombeamento.

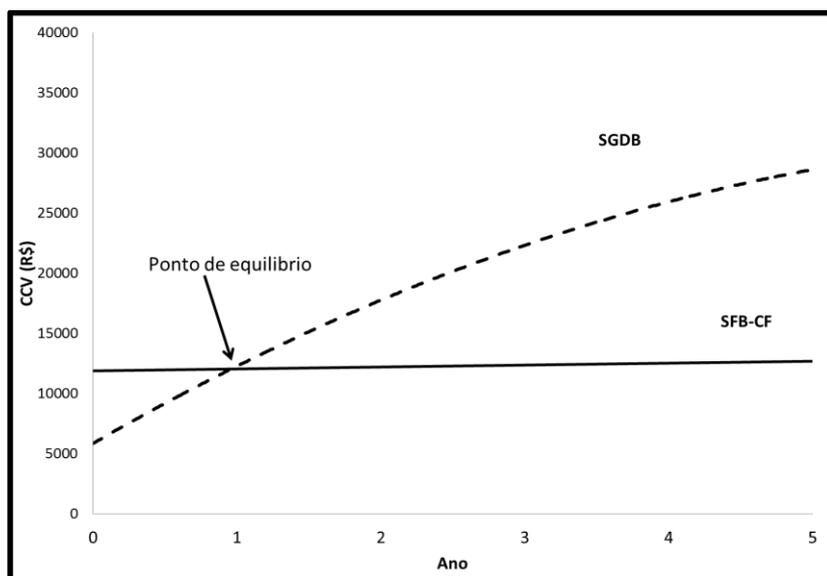


Figura 4.7: Análise do ponto de equilíbrio entre SFB-CF e SGDB

Fonte: Elaboração própria

4.3 Operação e funcionamento dos SFB-CF

Na continuação descreve-se o desempenho em campo e em bancada de ensaios dos SFB-CF.

4.3.1 Desempenho dos SFB-CF em bancada de ensaios

Brito (2006) desenvolveu uma bancada de ensaios de bombas para uso fotovoltaico, Figura 4.8. Diferentemente de outras bancadas de ensaio de motobombas que possuem poços ou simulam diversas alturas manométricas através de colunas de água ou circuitos hidráulicos complexos, a bancada do LSF-IEE-USP utiliza duas motobombas em paralelo, submersas no mesmo reservatório. Uma das motobombas regula a pressão da motobomba ensaiada, oferecendo uma contrapressão. Quando a motobomba em ensaio começa a funcionar, e em consequência, aumenta a pressão do circuito hidráulico, a motobomba de controle reduz sua capacidade de bombeamento até um valor determinado de pressão, mediante um processo controlado por um CF. Juntamente com a medição da vazão bombeada e a pressão na tubulação, também são medidas a irradiância no plano do gerador fotovoltaico, a tensão de entrada no CF e a corrente de entrada.

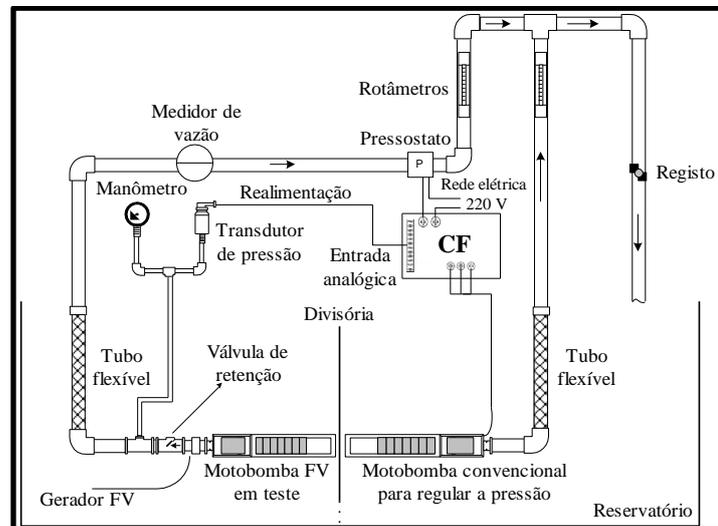


Figura 4.8: Bancada de ensaio

Fonte: Brito (2006)

Com o uso da bancada é possível avaliar o desempenho de vários sistemas de CF. No entanto, é difícil ver o desempenho das motobombas com perfis de irradiância específicos, já que se depende das condições climáticas da cidade de São Paulo. A Figura 4.9 mostra o ensaio de um SFB-CF com motobomba de 1 CV e arranjo fotovoltaico de 1.200 kWp, para uma altura manométrica de 40 m, para uma tensão fixa de 300 V e uma irradiação de 5,3 kWh/m². O volume bombeado nesse dia foi de 15 m³. Observa-se nessa figura que o controlador mantém

a tensão de entrada em corrente contínua aproximadamente na tensão configurada, mesmo com quedas de irradiância. O mesmo acontece em ensaio similar em um dia nublado e com baixa irradiação diária ($3,49 \text{ kWh/m}^2$), Figura 4.10.

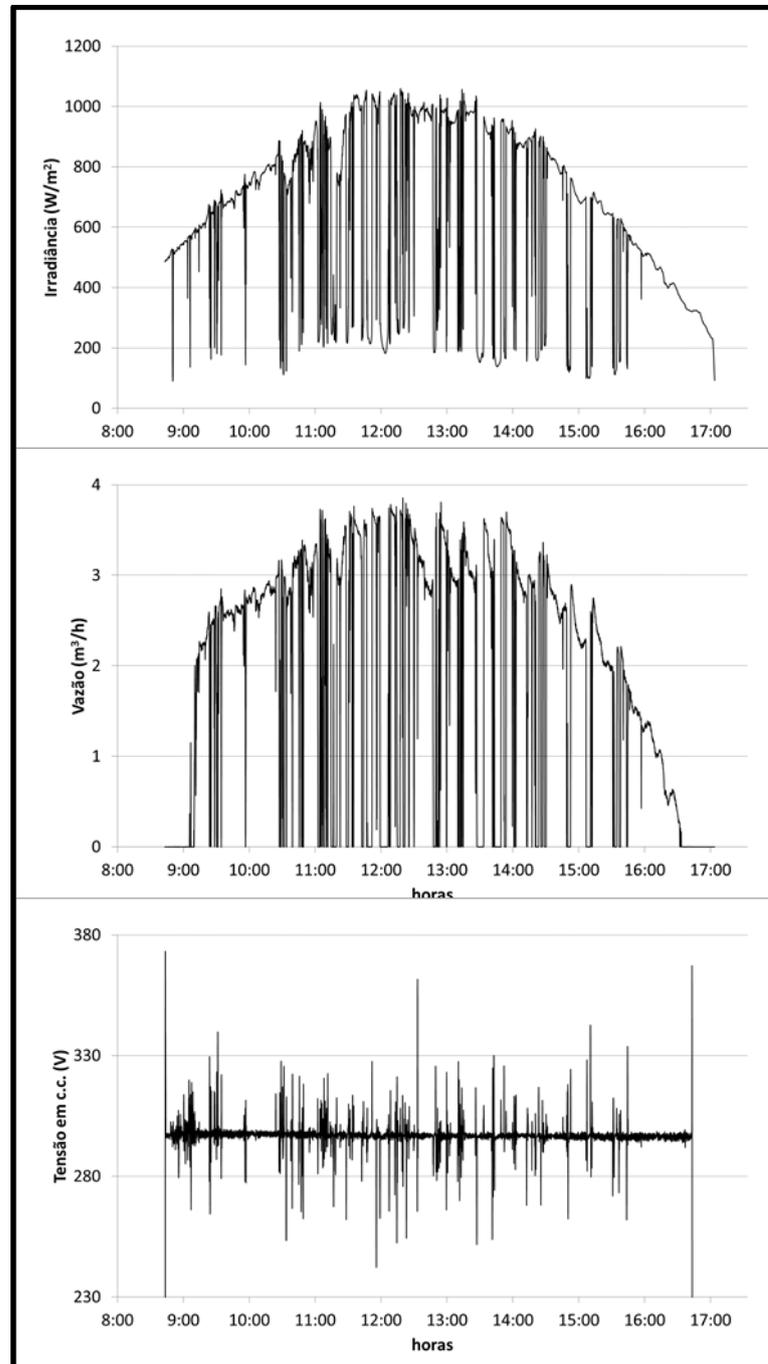


Figura 4.9: Resultados do ensaio em laboratório com CFW08-plus com motobomba de 1 CV

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

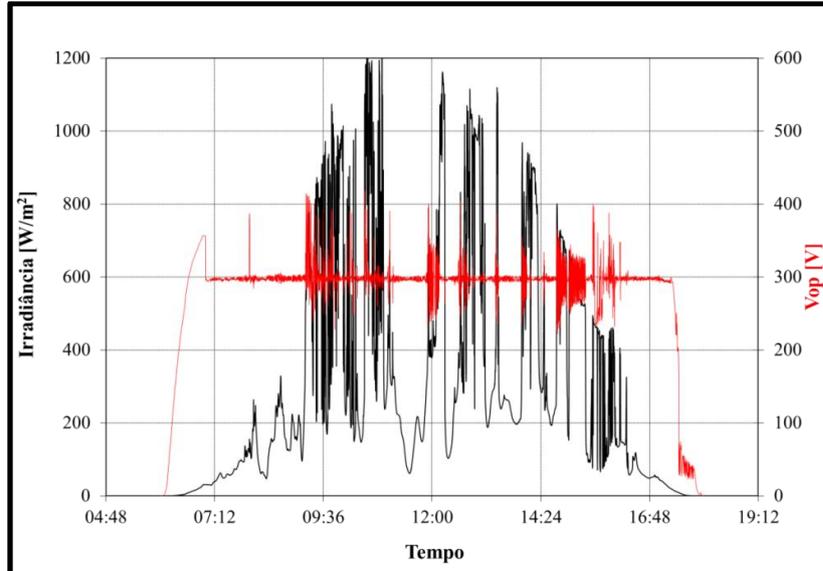


Figura 4.10: Resultados do ensaio em laboratório com CFW08-plus com motobomba de 1 CV

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

4.3.2 Operação e funcionamento dos SFB-CF em campo

As Tabelas 3.2, 3.3 e 3.5 resumem os principais problemas ocorridos em campo durante o funcionamento dos SFB-CF estudados. No sistema do Pontal de Paranapanema houve dois problemas relacionados ao CF e à motobomba. No sistema de Exú o problema tem relação com a parte hidráulica. Já nos sistemas de Serra Talhada houve nove ocorrências que paralisaram temporariamente algum dos sistemas. Como se pode observar na Figura 4.11, a maior parte dos problemas tem relação com a motobomba e a rede hidráulica.

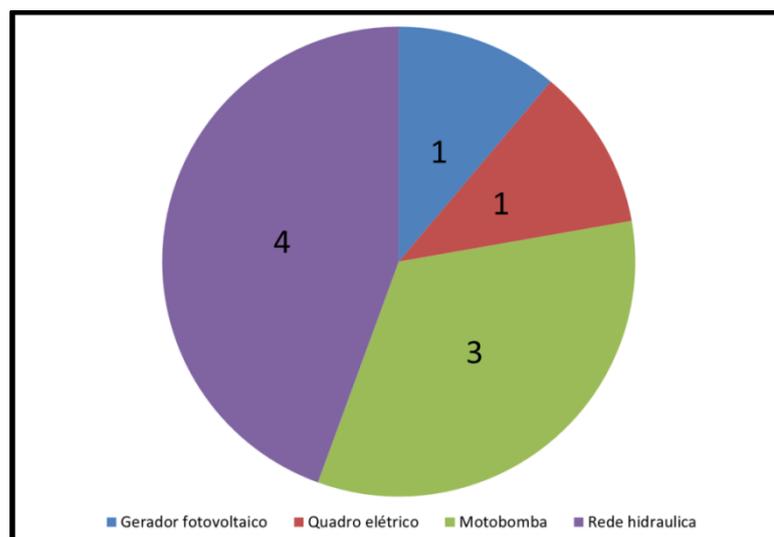


Figura 4.11: Ocorrências registradas até o momento nos SFB-CF instalados em Serra Talhada

Fonte: Elaboração própria

O único problema relacionado com o gerador fotovoltaico foi o trincamento de um módulo em um SFB-CF instalado em Serra Talhada. Verificou-se também a presença de ninhos de insetos na estrutura metálica, Figura 4.12. Os quadros elétricos com CFs apresentaram poucos problemas durante o período de acompanhamento dos projetos mencionados na seção 3.4. No sistema do Pontal de Paranapanema, o problema com o CF aconteceu devido à falta de proteções elétricas necessárias para proteger o conversor de frequência de tensões induzidas por descargas atmosféricas. Já nos sistemas instalados em Serra Talhada, seção 3.4.4, o único incidente importante registrado com um quadro elétrico foi o problema do circuito de resistências necessário, para o controle de realimentação do PID. Houve outros problemas menores, como ingresso de insetos em alguns quadros, corrosão nos quadros e paradas temporárias do sistema por sobretensão, devido à dificuldade de estabelecer um valor de tensão de *set-point*, Figura 4.13, mas elas não foram consideradas no registro das nove ocorrências graves mostradas na Figura 4.11. Por outro lado, as motobombas já apresentaram vários problemas, o que reforça a importância de contar com assistência técnica para esse componente nas cercanias, Figura 4.14. Entre os problemas encontrados, observa-se a obstrução da bomba pela entrada de raízes e o desgaste do eixo do motor por corrosão e presença de material particulado.



Figura 4.12: Problemas no gerador fotovoltaico. Módulo trincado (esquerda) e presença de ninhos de insetos na estrutura (direita)

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

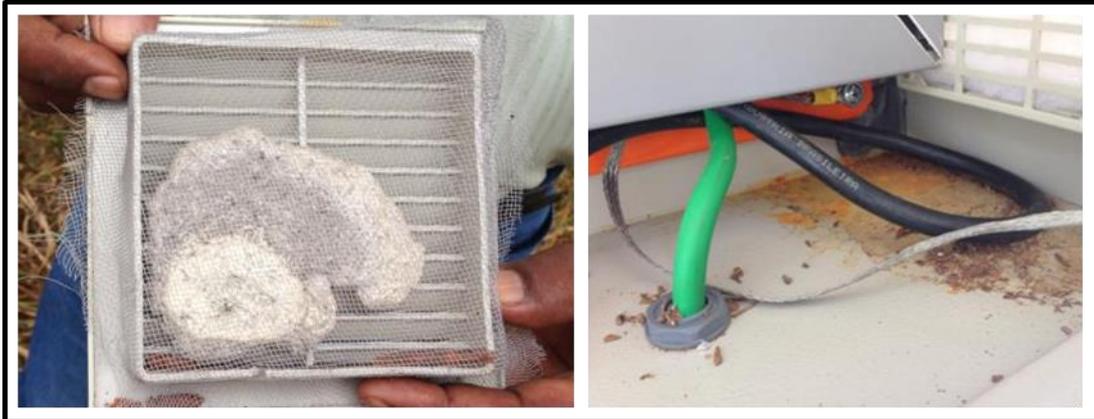


Figura 4.13: Problemas no quadro elétrico. Presença de insetos (esquerda) e corrosão (direita)

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 4.14: Problemas nas motobombas. (a) Raízes capilares obstruindo a entrada da bomba, (b) Degradação do emborrachado do cabo elétrico, (c) Corrosão da ponta do eixo entalhada e (d) Presença de areia no acoplamento motor-bomba

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

4.4 Vantagens técnicas dos SFB-CF em relação aos SFB-C

Destacam-se as seguintes vantagens dos SFB-CF: flexibilidade, maior facilidade para reposição das motobombas e aproveitamento do sistema após a chegada da rede. A primeira

vantagem dos SFB-CF é o aumento da flexibilidade do projeto, uma vez que é possível a utilização de uma maior variedade de bombas que poderiam ter características mais bem adaptadas à demanda local (potência, altura manométrica total e vazão) do que motobombas comercializadas exclusivamente para sistemas fotovoltaicos. A segunda está associada com a existência de uma grande rede de distribuidores que vendem motobombas centrífugas trifásicas e conversores de frequência, sendo a aquisição destes componentes consideravelmente mais fácil. Isto é importante para a reposição de equipamentos, um dos aspectos críticos dos projetos discutidos no Capítulo 2. Além disso, alguns fabricantes de motobombas têm assistência técnica local e apresentam uma logística de reposição de peças adequada mesmo em regiões remotas. Também pode-se aproveitar o sistema instalado se a rede elétrica chegar até a fonte de água. Mesmo se o atendimento for monofásico, o quadro e a motobomba podem permanecer em uso já que o CF tem a opção de operar com entrada monofásica e saída trifásica, alimentando-se da rede. Apenas as bombas convencionais fotovoltaicas mais caras comercializadas no Brasil podem fazer isso. Além disso, o CF pode ser usado como interface entre a rede elétrica e a bomba, permitindo uma partida mais suave.

4.5 Problemas técnicos da configuração proposta por Brito (2006)

Como foi comentado na seção 3.3, a configuração proposta por Brito (2006) usa o conversor de frequência CFW08 – plus, o qual foi instalado nos projetos da seção 3.4. Esta configuração ainda herda alguns dos problemas dos SFB, como a pouca familiaridade dos potenciais usuários com a tecnologia. Apesar das vantagens mencionadas em 4.4, a configuração apresenta os problemas mencionados a seguir:

4.5.1 Acesso restrito à parametrização

A tese desenvolvida por Brito (2006) foi financiada por um projeto de P&D FINEP - CT-ENERG – Desenvolvimento e Inovação em Fontes de Energias Renováveis 01-2006, onde participaram o LSF-IEE-USP, o fabricante de conversores de frequência WEG e a empresa Solaris Tecnologia Fotovoltaica. Devido ao caráter do P&D, a parametrização feita por Brito (2006) ficou restrita ao uso das instituições participantes limitando, sua difusão em projetos sem essas instituições.

4.5.2 Circuitos adicionais para ajustar a tensão de operação no método de controle com tensão fixa

Para que o conversor de frequência trabalhe com alimentação em corrente contínua com controle fixo, é necessário um sinal de realimentação da tensão de entrada formando um circuito em malha fechada. Esse sinal é fornecido por um sensor conectado a uma das entradas analógicas do CF, sendo possível utilizar um divisor de tensão em paralelo na entrada da alimentação c.c., Figura 4.15. Infelizmente, apesar do divisor de tensão ser um circuito elétrico simples, ele é um elemento que pode comprometer o funcionamento de todo o sistema.

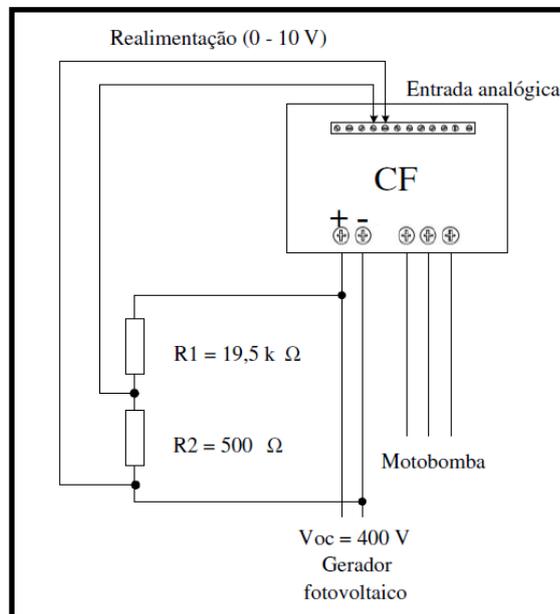


Figura 4.15: Realimentação do PID com circuito divisor de tensão
Fonte: Brito e Zilles (2004)

4.5.3 Dificuldade para a determinação do *set point* fixo

Para fixar o valor do *set point* fixo precisa-se conhecer bem as características do módulo, do gerador fotovoltaico e as condições climáticas do local, Figura 4.16. Geralmente, é feito um teste em campo, por volta do meio dia solar, para determinar o valor mais adequado de *set-point*. Porém, se a medição for feita em um dia atípico ou as condições climáticas entre estações forem muito variáveis, o valor escolhido pode não ser o correto, o que pode causar que o sistema não trabalhe eficientemente em certos períodos do ano.

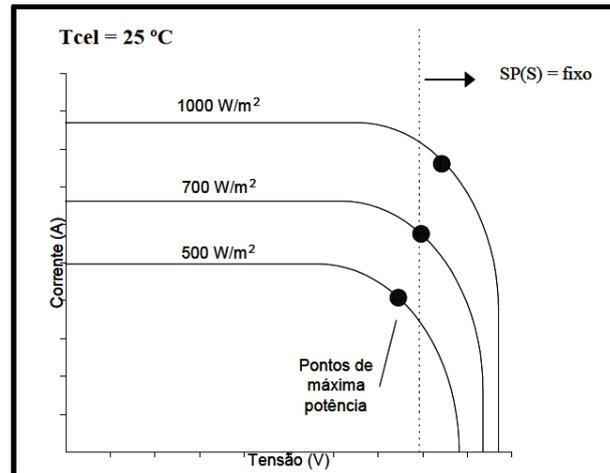


Figura 4.16: Exemplo de diferenças entre o valor de *set point* e o ponto de máxima potência para várias curvas de irradiância

Fonte: Brito e Zilles (2004)

4.5.4 A complexidade dos CF

Um sistema fotovoltaico de bombeamento é um sistema complexo para muitos dos seus usuários, devido à variedade de componentes elétricos (gerador fotovoltaico, motobomba, sistema de condicionamento de potência) e hidráulicos (reservatório, chaves, tubulação, hidrômetros, etc). Os sistemas de bombeamento com conversor de frequência não escapam dessa realidade, sendo até um pouco mais complexos, devido à interfase que os conversores de frequência possuem em relação a outros sistemas de condicionamento de potência dedicados a aplicações fotovoltaicas, Figura 4.17. Como pode ser visto, os sistemas de condicionamento de potência para motobombas dedicadas a aplicações fotovoltaicas possui uma interfase menos complexa que o CFW08-plus, já que além da grande quantidade de botões, este CF sinaliza dados que talvez não sejam fáceis de ser, interpretados pelos potenciais usuários.



Figura 4.17: Exemplo de sistemas de condicionamento de potência de sistemas de bombeamento e conversor de frequência

4.6 Problemas gerais identificados com a concepção, execução e gestão dos projetos com SFB-CF

Os projetos analisados com os SFB-CF não fogem dos mesmos problemas registrados com sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais comentados na seção 2.5. Por exemplo, devido aos problemas orçamentários e logísticos, a resposta para solucionar problemas foi sempre demorada, provocando prejuízos nos usufrutuários dos sistemas. Também foram observados problemas organizacionais dentro das comunidades, como por exemplo, na desistência de vários beneficiários no sistema no Piauí.

4.7 Resumo do capítulo

Os SFB-CF apresentam várias vantagens do ponto de vista econômico e técnico principalmente porque facilitam a substituição e manutenção das motobombas e dos equipamentos de condicionamento de potência. No entanto, existem alguns problemas técnicos relacionados à complexidade para manutenção do sistema do ponto de vista do usuário médio sem a devida capacitação.

O investimento inicial e o custo de ciclo de vida mais baixo dos SFB-CF facilitam a sua aquisição e gestão por parte dos produtores de baixa renda. No entanto, um sistema de empréstimo com base na renda do produtor ainda é necessário, porque o investimento inicial não é barato o suficiente para o pequeno agricultor rural médio. Na verdade, o governo Brasileiro já tem uma linha de crédito chamada PRONAF, Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar, que pode ser usada para essa finalidade. O tempo de retorno do investimento pode ser reduzido, através do cultivo de culturas de alto valor e se o sistema for usado continuamente, através de rotatividade de cultivos.

5. PROPOSTA PARA APRIMORAMENTO DOS PROJETOS COM SFB-CF

Como foi visto no capítulo anterior, apesar das muitas vantagens técnicas e econômicas dos SFB-CF com a configuração proposta por Brito (2006), os projetos com SFB-CF não estão isentos de problemas. Pode-se perceber que esses problemas são similares aos encontrados nos projetos com os SFB-C. Neste sentido, apresenta-se uma série de recomendações para mitigar alguns problemas técnicos e para o planejamento e execução de projetos com SFB-CF.

5.1 Recomendações técnicas

As recomendações técnicas estão focadas em melhorar a robustez dos SFB-CF e facilitar a manutenção e reposição dos componentes.

5.1.1 Substituição do CFW-08 Plus por CFW500

Em 2015, a companhia WEG, fabricante do CFW-08 Plus, começou a incorporar a opção de bombeamento com sistemas fotovoltaicos no modelo de conversor CFW500. O CF mencionado possui um PLC que permite a atualização do software de fábrica e uso de programas especiais para bombeamento fotovoltaico, como o seguimento do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico. A Figura 5.1 mostra o quadro elétrico instalado na comunidade de Lagoinha, Serra Talhada, onde o CFW-08 Plus foi substituído pelo novo modelo de conversor de frequência.



Figura 5.1: Quadro elétrico com o CFW500

Como pode ser visto no catálogo da WEG (WEG, 2016), o CFW500 e o CFW08-Plus são comercializados nas mesmas faixas de potências e tensões de entrada. Ambos são produtos fabricados nacionalmente e contam com uma rede ampla para venda e conserto no país. No entanto, as diferenças entre as características de cada modelo permitem a solução de alguns dos problemas mencionados na seção 3.4. Por exemplo, o CFW500 não precisa de um circuito de realimentação para o PID, eliminando a necessidade de circuitos externos. Além disso, o PLC incorporado permite a opção de seguimento do ponto de máxima potência e a detecção de poço seco mediante a leitura da velocidade e torque do motor.

A Figura 5.2 mostra a operação do CFW500 com um gerador fotovoltaico de 1.200 Wp ($I_{sc} = 4,5$ A; $V_{oc} = 417$ V; $I_{mp} = 4$ A; $V_{mp} = 300$ V nas condições padrão) e uma motobomba centrífuga submersa de 1 cv e 8 estágios a uma altura manométrica de 40 m.c.a. para a faixa de rastreamento do ponto de máxima potência entre 260 e 300 V. Observa-se que a tensão de MPPT se manteve na faixa de 260 a 280 V. É importante esclarecer que antes das 9 da manhã apesar do recurso solar ser suficiente para a partida da motobomba, a motobomba não parte devido ao sombreamento parcial no gerador fotovoltaico utilizado para o ensaio. Da mesma maneira, pode-se ver, que para uma seleção de rastreamento entre 280 e 320 V, a tensão se manteve ao redor de 280 V, Figura 5.3. Mais informações sobre o desempenho desta configuração podem ser encontradas em Melendez, Fedrizzi e Zilles (2016).

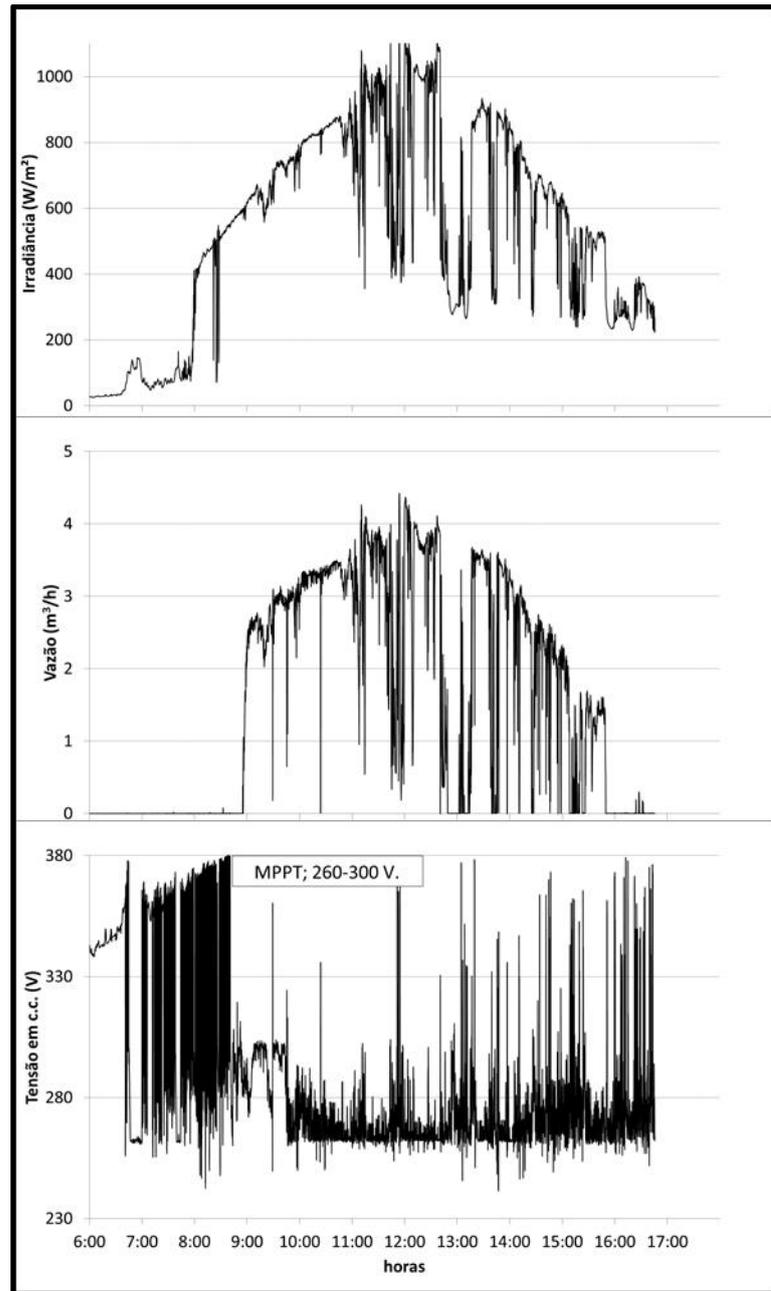


Figura 5.2: Resultados do ensaio com o CFW500 para uma motobomba de 1 cv para tensão MPPT programada entre 260 e 300 V

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

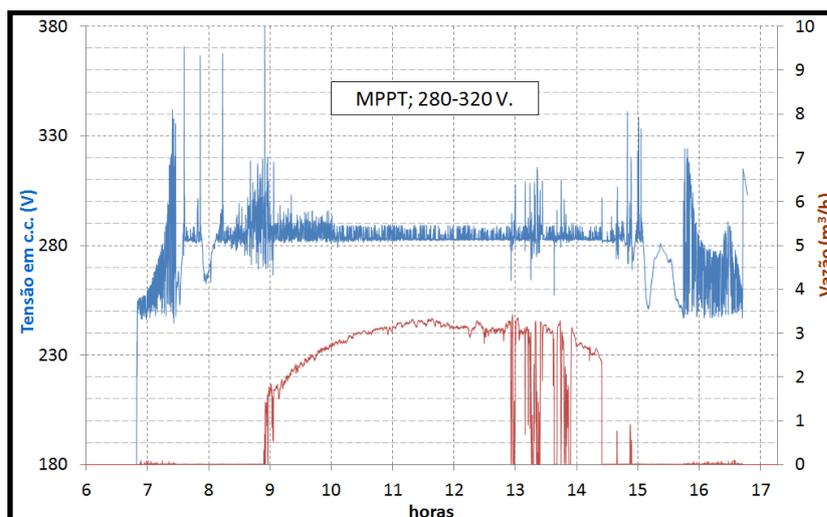


Figura 5.3: Resultados do ensaio com o CFW500 para uma motobomba de 1 cv para tensão MPPT programada entre 280 e 320 V

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

5.1.2 Uso de motobombas e controladores de frequência adequados para as características elétricas da rede elétrica local

A adoção da configuração proposta por Brito (2006) abre a possibilidade de usar um maior leque de marcas e modelos de motobombas. No entanto, como foi observado nos sistemas de Serra Talhada, algumas marcas utilizadas não contavam com serviço técnico nas imediações ou trabalhavam em tensão diferente da rede local. Por exemplo, algumas motobombas instaladas trabalhavam em 220 V, enquanto as comercializadas na região trabalhavam em 380 V. Por isso, previamente ao dimensionamento do sistema, recomenda-se o levantamento prévio de comercializadoras de motobombas na região e a adoção de conversores de frequência e motobombas com as mesmas características da rede de distribuição local.

5.1.3 Qualidade dos componentes hidráulicos do sistema

Como foi comentado nas seções 2.4.5 e 4.3.2 e em trabalhos como Fedrizzi (2003) e Poza (2008), a baixa qualidade dos componentes hidráulicos pode ocasionar um índice maior de falhas que os componentes elétricos. Por isso, recomenda-se um cuidado especial na seleção desses componentes. Um exemplo disso é mostrado na peça de junção da Figura 5.4 que comunica a tampa da boca do poço com a mangueira da motobomba. Esta peça trincou devido aos movimentos da tubulação na passagem da água. Uma peça dessas, cujo valor é pequeno em relação a outros componentes, paralisou mais de um sistema, por não contar com abraçadeiras adequadas.



Figura 5.4: Espigão de plástico usado para conectar a tampa do poço com a mangueira da bomba

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

5.1.4 Estudo dos poços para uma seleção da motobomba

Como já foi comentado, uma das grandes dificuldades para a seleção das motobombas é a falta de informação sobre as características hidrogeológicas dos poços: capacidade, nível dinâmico do poço e salinidade. Se os dados do poço não forem corretos, corre-se o risco de selecionar uma motobomba com vazão maior do que a capacidade do poço ou sem a capacidade de bombear o volume desejado, devido à mudança da altura manométrica. Os poços do semiárido apresentam características especiais para as quais muitas motobombas não são adequadas. Por exemplo, motobombas resfriadas com água são geralmente feitas com ferro fundido e por isso, suas peças são corroídas devido à salinidade da água e à presença de material particulado, Figura 5.5.



Figura 5.5: Retirada da areia do motor e ponta de eixo desgastada

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

Outro problema dos poços é a presença de raízes de certas árvores da catinga, as quais, na procura por água em tempo da seca, invadem os poços, obstruindo a bomba, Figura 5.6. Entre

essas espécies encontram-se o Juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), a Baraúna (*Schinopsis brasiliensis*), a Quixabeira (*Sideroxylon obtusifolium*) e Algarobeira (*Prosopis juliflora*). Por isso, recomenda-se a manutenção dos poços, removendo o material particulado e de raízes.



Figura 5.6: Presença de raízes na bomba

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

5.1.5 Capacitação dos usuários

Apesar do sistema fotovoltaico de bombeamento não precisar de pessoas para sua operação, é necessária a capacitação dos usuários para realizar tarefas de manutenção básica, identificar potenciais ocorrências que podem danificar o sistema e reportar a ocorrência de problemas aos técnicos ou responsáveis. Neste sentido, tarefas como a limpeza dos módulos, a podagem da vegetação das áreas próximas à geração para evitar sombreamento e danos ao sistema e a remoção de ninhos de animais no SFB são tarefas de manutenção preventiva que devem ser ensinadas ao usuário.

Se o gerador estiver sujo, o desempenho do sistema será menor que o esperado. A Figura 5.7 mostra um módulo sujo e a diferença entre módulos sujos e limpos em um gerador fotovoltaico. Apesar da limpeza dos módulos ser uma tarefa simples, o usuário deve tomar as precauções necessárias para não danificar os módulos. Mostra-se na Figura 5.8, a execução desta tarefa com um rodo e com uma ferramenta improvisada por um morador de uma comunidade rural. A frequência desta tarefa depende das condições locais. Por exemplo, em locais com baixo nível de precipitação e grande presença de pássaros a limpeza dos módulos deve ser mais frequente.

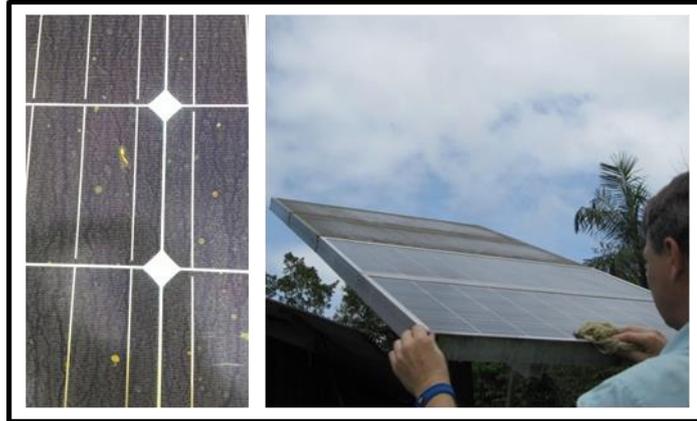


Figura 5.7: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Gerador sujo

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.8: Tarefa de manutenção preventiva - limpeza dos módulos fotovoltaicos

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

Por outro lado, a presença de insetos mostrados na Figura 5.9, roedores, na Figura 5.10, e vegetação, como na Figura 5.11, nas imediações do sistema, podem danificar os componentes e representar risco de segurança para os usuários e a equipe de manutenção. Em particular, a existência de ninhos de vespas é um problema recorrente nas instalações visitadas. O uso de inseticidas e de fumaça é uma solução paliativa, porque os insetos tendem a retornar. Neste sentido recomenda-se vedar os orifícios da estrutura, para evitar a construção destes ninhos, Figura 5.12. Além disso, a vegetação de porte alto deve ser removida, como é mostrado na Figura 5.13.



Figura 5.9: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Presença de insetos na estrutura do gerador fotovoltaico

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.10: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - Presença de roedores

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.11: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - vegetação crescida próximo ao quadro elétrico do SFB-CF

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.12: Tarefa de manutenção preventiva - remoção de ninhos de insetos

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.13: Tarefa de manutenção preventiva - podagem da vegetação na área de geração

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

Além das tarefas de manutenção preventiva, o usuário deve ser capacitado para executar algumas tarefas de manutenção corretiva, principalmente as relacionadas à vedação de vazamentos no reservatório e na rede hidráulica, Figuras 5.14 e 5.15. O usuário deve ser capacitado para detectar alguns problemas com o sistema e reportá-las aos responsáveis. Um exemplo desses problemas é a quebra do vidro frontal de um módulo, Figura 5.16.



Figura 5.14: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF - vazamentos na rede hidráulica

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.15: Tarefa de manutenção preventiva - conserto da rede hidráulica

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.16: Ocorrências detectáveis pelos usuários dos SFB-CF – gerador fotovoltaico danificado

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

Em resumo, a Tabela 5.1 mostra uma lista de possíveis problemas que podem ser detectados pelos usuários e, em alguns casos, solucionados por eles.

Tabela 5.1: Lista de possíveis problemas detectáveis pelos usuários dos SFB-CF

Componente	Ocorrência	Solução
Gerador Fotovoltaico	Módulos sujos	Limpeza dos módulos
	Sombreamento dos módulos	Eliminação dos elementos que produzem a sombra
	Módulos danificados	Substituição dos módulos pelo técnico
	Vegetação excessiva nos arredores da área de geração	Limpeza da área de geração
	Problemas de estabilidade da estrutura	Fixação dos parafusos da estrutura de sustentação
	Presença de insetos	Retirada dos ninhos e vedação dos orifícios
Quadro de controle	Quadro de controle em mau estado (corrosão)	Reportar ao técnico
	Presença de insetos	Reportar ao técnico
	Obstrução das grades de ventilação	Limpeza das grades e retirada dos elementos obstrutivos
Motobomba	Motobomba parada em dia ensolarado	Verificar se o reservatório está cheio. Caso contrário, chamar ao técnico.
Rede hidráulica	Presença de animais nas caixas de água, caixas de registro, etc.	Retirar os ninhos
	Vazamentos na rede hidráulica	Substituir os canos nos trechos danificados.

Fonte: Elaboração própria

5.1.6 Capacitação de técnicos para manutenção dos SFB-CF

No Capítulo 2 pode-se constatar que muitos projetos não tiveram ações de capacitação ou quando tiveram não foi suficiente. O treinamento técnico é muito importante para a sustentabilidade operacional. Se não houver técnicos capazes de identificar problemas e consertá-los, os SFB-CF podem ficar paralisados por meses. Isso é o que aconteceu, por exemplo, no SFB-CF instalado no Pontal de Paranapanema, SP, relatado na seção 3.5.1. Por mais que os técnicos tivessem experiência com motobombas, o desconhecimento da programação do CF complicou a substituição da motobomba na época, causando a paralização do sistema. Outro exemplo é a lenta resposta registrada para atender os primeiros problemas dos sistemas de Serra Talhada enquanto não havia técnicos capacitados. Embora os problemas fossem simples, não podiam ser solucionados pelos usuários. Só em maio de 2015, 16 meses após a instalação dos SFB-CF, foi realizada a capacitação dos técnicos do IPA. A capacitação foi dividida em duas partes: uma teórica e uma prática. Na capacitação teórica

foram ensinados conceitos básicos sobre energia solar, bombeamento fotovoltaico e uso de conversores de frequência, Figura 5.17. Nos quatro dias seguintes, como parte da capacitação prática, identificaram-se e resolveram-se problemas em campo, e houve treinamento para a substituição de conversores de frequência e motobombas, Figura 5.18.



Figura 5.17: Capacitação de técnicos em Serra Talhada – aulas teóricas

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP



Figura 5.18: Capacitação de técnicos em Serra Talhada – atividades em campo

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

A Tabela 5.2 mostra uma lista de problemas relacionados com os SFB-CF que podem ser supervisionados pelos técnicos em cada visita aos sistemas. Diferentemente da Tabela 5.1, os técnicos devem também ter conhecimento para resolver os problemas relacionados ao conversor de frequência, os dispositivos de proteção e as motobombas. Como já foi comentado na seção 4.5.4, a programação dos conversores de frequência é complexa devido à quantidade de parâmetros existentes. Mesmo com o uso do CFW500, os técnicos devem aprender a programar o CF e identificar sinais de erros, como os mostrados na Tabela 5.3. Em relação às motobombas, os técnicos devem identificar se o problema encontra-se no poço, no motor ou na bomba. A Figura 5.19 mostra a remoção de uma motobomba do poço e o teste

em superfície da motobomba. Durante o treinamento em Serra Talhada, os técnicos identificaram os problemas mencionados em 4.3.2 e tomaram as medidas necessárias para o conserto: limpeza das raízes e sedimentos na união do motor e a bomba, entalhamento da ponta do eixo do motor desgastado e substituição de um motor avariado.

Tabela 5.2: Lista de possíveis problemas detectáveis pelos técnicos

Componente	Inspeção visual
Gerador Fotovoltaico	Sujeira nos módulos fotovoltaicos
	Módulos com defeito (vidro trincado)
	Sombreamento do gerador
	Vegetação de porte alto
	Problemas na estrutura de sustentação
Quadro Elétrico	Presença de insetos no gerador
	Estado do quadro elétrico
	Obstrução das grades de ventilação
	Estado dos terminais do quadro
Motobomba	Presença de insetos no quadro elétrico
	Estado do DPS (cor do visor)
Obra Civil e Rede Hidráulica	Estado da motobomba
	Vazamentos na tubulação
	Vazamento no reservatório
	Estado do chafariz/torneiras
	Estado do hidrômetro
	Presença de animais no barrilete da boca do poço ou no reservatório
	Estado da base do reservatório

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.3: Lista dos principais erros sinalizados pelo CF

Erro	Significado	Solução
E000: Curto circuito	Curto-circuito entre as fases do motor ou do módulo IGBT	Medir a continuidade entre os fios de alimentação. Se for necessário, substituir a motobomba.
E001: Sobretensão	Tensão do gerador elevada	Medir a tensão em circuito aberto do gerador. Se a tensão for maior a 410 V desconectar um módulo.
E002: Subtensão	Baixo nível de irradiância	Se o problema acontecer durante o pico do horário solar em um dia ensolarado, substituir o CF.
E004: Sobreaquecimento	Sobreaquecimento do CF	Conferir o funcionamento da ventoinha do CF e a obstrução das grades de ventilação do quadro.
E005: Sobrecarga	Corrente de partida do motor elevada	Verificar o valor programado para este parâmetro no CF. Verificar se o motor está travado.

Fonte: Adaptação do manual do CFW500 (WEG, 2011)



Figura 5.19: Remoção da motobomba e teste em superfície

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

A partir da experiência de campo, constata-se que sem um adequado reforço do treinamento alguns conceitos são esquecidos. Mocelin (2007), por exemplo, relata o longo processo de capacitação de técnicos e usuários dos sistemas fotovoltaicos domiciliares na comunidade de São Francisco de Aiucá. Se bem que o treinamento permitiu que a maior parte dos sistemas funcionasse adequadamente mesmo depois da saída dos executores dos projetos, um levantamento feito por Valer et al. (2014c) mostra que as novas instalações, ainda que funcionais não tinham a mesma qualidade das instalações iniciais, e apresentavam riscos de segurança para os usuários. Uma maneira de reforçar os conhecimentos é a elaboração de guias e manuais simples de manutenção preventiva e corretiva. No Anexo I apresenta-se um manual elaborado pelo LSF-IEE-USP para o projeto de Serra Talhada, onde são mostrados os principais problemas, métodos e ferramentas para sua solução, e uma lista com as principais tarefas a serem realizadas, Figura 5.20.

Atividade 3. Reaperto de terminais e contatos do quadro elétrico	
<p>Procedimento Conferir se há terminais de conexão soltos ou com mau contato.</p> <p>Efeito Paradas intempestivas do conversor de frequência e pontos quentes nos terminais.</p> <p>Reparo Desligar o conversor de frequência através do seccionamento dos disjuntores em c.c. e c.a. Fazer o reaperto dos contatos e conexões. Religar o sistema.</p> <p>Frequência Anual</p> <p>Acessórios e materiais Alicate universal, chaves Philips e de fenda, conforme as características dos parafusos.</p>	

Figura 5.20: Exemplo de uma tarefa de manutenção no manual de técnicos

5.1.7 Recursos econômicos para manutenção

Um grande problema de projetos de tipo “fundo perdido” é que muitas vezes por limitações orçamentárias não há uma provisão para conserto ou substituição de componentes. Apesar dos SBF-CFs reduzirem consideravelmente os custos das manutenções, os técnicos precisam de recursos financeiros e logísticos para deslocamento até os locais de instalação.

5.2 Recomendações sobre planejamento e execução de projetos com SFB-CF

Tal como já foi comentado em Valer (2011), existem uma série de fatores que devem ser levados em conta na hora de planejar um projeto com SFB-CF, Tabela.

Tabela 5.4: Fatores técnicos, econômicos, sociais, ambientais e produtivos

Tipo de fator	Descrição
Fatores técnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de recurso solar abundante e de fontes hídricas adequadas. • Existência de serviços de fornecimento e reparação dos componentes do SFB. • Existência de infraestrutura organizativa para a operação e manutenção do SFB.
Fatores econômicos	<ul style="list-style-type: none"> • Condições e vontade de pagamento por parte dos usuários. • Acesso à linha de crédito.
Fatores sociais	<ul style="list-style-type: none"> • Peculiaridades dos usuários • Aceitação do projeto por parte dos futuros usuários. • Existência de projetos complementares e seus resultados. • Existência de uma organização de usuários. • Existência de conflitos internos entre os beneficiários, que possam atrapalhar o desenvolvimento do projeto. • Possíveis impactos na comunidade segundo o percentual de beneficiários.
Fatores ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos ambientais das obras necessárias para a implantação do SFB. • Impactos ambientais no recurso hídrico, no solo e no ecossistema agrícola (uso de agroquímicos, introdução de novas espécies, desmatamento).
Fatores produtivos	<ul style="list-style-type: none"> • Dependência e afinidade da população com a atividade agrícola. • Existência de mercados compatíveis com a oferta e suas possíveis melhoras em termos de qualidade e quantidade. • Existência de problemas de produção e logística na cadeia produtiva. • Existência de serviços de fornecimento de insumos (fertilizantes, sementes, etc.), mão-de-obra, maquinaria e serviços afins a preços razoáveis. • Existência de uma cultura empreendedora dos futuros

	beneficiários.
--	----------------

Fonte: Modificado de Valer (2011)

Como pode ser visto na tabela anterior, são muitos fatores que devem ser considerados no planejamento de cada etapa do projeto. Recomenda-se neste sentido, a participação de profissionais de diversas áreas do conhecimento na equipe envolvida no projeto, o trabalho em conjunto com os usuários e a criação de parcerias com instituições locais afins. Em sistemas de uso coletivo os aspectos socioculturais e organizacionais devem ser levados em conta. Da mesma maneira, projetos de uso produtivo devem levar em conta os problemas existentes da cadeia produtiva. Finalmente, recomenda-se a formulação de regras claras com os usuários e o aproveitamento de experiências similares anteriores.

5.2.1 Aspectos socioculturais

Conhecer as peculiaridades de cada comunidade, por exemplo, a forma em como ela é estruturada, é um processo longo e que precisa de recursos humanos e financeiros. Por exemplo, os hábitos de consumo de água influenciam na demanda de água, fator importante na seleção da motobomba e dimensionamento do reservatório. Entre os aspectos socioculturais observados durante as visitas de campo destacam-se o problema do trabalho coletivo e a dependência de muitas comunidades do assistencialismo público.

Apesar de grande parte das comunidades serem muito unida devido aos laços de parentesco ou a existência de uma forte liderança local, em outras, pelo contrário, percebe-se a dificuldade para trabalhar em conjunto. Este fator pode atrapalhar na tomada de decisões básicas, como a localização do sistema, a distribuição e utilização da água, manutenção dos sistemas, etc.

Outro fator a considerar é a forte dependência das comunidades sertanejas ao assistencialismo público que complica, por exemplo, a criação de um fundo de reposição de peças ou o pagamento de uma contrapartida pela água, já que muitos usuários esperam que o governo local assuma os custos e a iniciativa para consertar os equipamentos.

5.2.2 Projetos de uso produtivo

Projetos que visem o uso produtivo da água bombeada são nichos importantes de uso dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, principalmente porque muitos locais de produção

não contam com serviço elétrico de boa qualidade. Em 18 dos SFB analisados neste trabalho, a água é utilizada parcial ou totalmente em alguma atividade produtiva, principalmente a irrigação de pequenas hortas.

O uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para atividades produtivas envolve uma série de desafios diferentes do consumo humano porque, além dos problemas relacionados à infraestrutura elétrica e hidráulica e ao sistema de manutenção, existem os problemas próprios da atividade produtiva e de interação com o mercado. Vários projetos no mundo mostram resultados diversos nos aspectos técnicos, sociais e econômicos (VAN CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000; ESPERICUETA et al., 2010, MEAH; FLETCHER; ULA, 2008; GTZ, 2008; BURNEY et al., 2010).

Entre os problemas detectados está o limitado conhecimento do uso da irrigação localizada, apesar do aumento de áreas irrigadas no Nordeste (CHRISTOFIDIS, 2006). Como pode ser visto na seção 2.5.5, esse é só um dos vários problemas enraizados na produção agrícola familiar e que só pode ser solucionado com uma efetiva e contínua assistência técnica ao produtor.

Por isso recomenda-se treinamento específico em técnicas agrícolas, principalmente para mudança da produção tradicional para a produção orgânica: capacitação para a produção de cultivos mais adequados ao clima do sertão, o uso de fertilizantes produzidos localmente, controle de pragas e doenças com uso de inseticidas e repelentes naturais, etc.

Além disso, a maior parte dos sistemas para uso produtivo foi projetada como sistemas comunitários, mas a existência de uma associação não implica que a comunidade consiga produzir em conjunto e distribuir adequadamente os benefícios. Por exemplo, na comunidade de Bom Jesus, Itapipoca, CE, seção 2.3.2, apesar de ter sido recomendado o uso rotativo de terras, houve problemas para o trabalho comunitário e a horta foi distribuída em parcelas, cada uma com uma família trabalhando independentemente da outra. Na comunidade de Poço de Pedra, Itatira, CE, seção 2.3.2, também houve desistência de algumas famílias, por não acharem atraentes os lucros da horta comunitária. O mesmo problema aconteceu em Exu, Oeiras, PI, seção 3.5.2, onde, apesar do interesse inicial de muitos moradores, só um produtor aceitou finalmente participar no projeto. Estes exemplos mostram a importância de associações fortalecidas para os projetos de uso comunitários.

É importante considerar que uma associação de vários produtores pode ter melhor poder de negociação dos preços dos produtos no mercado e a redução dos preços dos insumos (sementes de boa qualidade, fertilizantes, etc.) e de transporte. A existência de uma associação de produtores organizada e fortalecida, mais a garantia de acesso à água, podem ajudar a venda contratada da produção ao Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE) ou ao Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) do Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. A existência da associação também cumpre um papel importante na manutenção preventiva dos equipamentos, assim como a arrecadação coletiva para substituir ou reparar os componentes do sistema.

5.3 A difusão da tecnologia

Apesar das vantagens dos SFB-CF já estudadas nos trabalhos de Brito (2006) e de Meléndez (2009) e dos desempenhos em campo dos primeiros projetos pilotos, pode-se observar que a tecnologia ainda não decolou, entre outros fatores pela complexidade da configuração e a necessidade de conhecimentos para parametrizar adequadamente o CF. Isso é consequência da falta de recursos humanos com o conhecimento e habilidades necessárias, que como mencionado por Kandpal e Broman (2014), é uma das razões chaves para a pouca disseminação das tecnologias com energias renováveis. Mas também há outros motivos como a dificuldade para adquirir o sistema como um “produto de prateleira” e a pouca difusão que o produto tem na mídia até o momento.

5.3.1 Capacitação de recursos humanos

A capacitação de recursos humanos para instalação, comissionamento, manutenção e conserto dos diversos componentes de um SFB-CF é um passo importante para a difusão desta configuração. Barbosa et al (2000) descreve o processo de capacitação de 145 técnicos para a instalação de SFB como parte das atividades do PRODEEM. Apesar dos problemas com este programa mencionados em Galdino e Lima (2002), as repercussões deste treinamento ainda podem ser observadas em algumas regiões do nordeste, i.e. no município de Oeiras, PI, mencionado na seção 2.3.1, onde alguns técnicos ainda oferecem serviço para alguns sistemas instalados na região.

Como Mocelin (2015) comenta, não é necessária a criação de um curso técnico específico para instaladores fotovoltaicos, porque é possível incorporar alguns conceitos relacionados

aos sistemas fotovoltaicos no conteúdo curricular dos cursos técnicos de eletrotécnica dos Institutos Federais. Também é válida a observação de Moraes (2015) de incorporar esta capacitação nas escolas agrícolas. Em geral, uma capacitação de técnicos para dimensionamento, instalação e manutenção de SFB-CF deve ter os conteúdos mostrados na Tabela 5.5 os quais devem ser revisados de forma teórica e prática:

Tabela 5.5: Conteúdo programático para capacitação de técnicos em SFB-CF

Etapa	Conteúdo programático
1 Fundamento básico de eletricidade e hidráulica	1.1 Identificação dos componentes de um sistema fotovoltaico de bombeamento (módulos, condicionador de potência, motobomba, caixa d'água e elementos de proteção) conhecendo suas principais características e funções; 1.2 Identificação e manipulação de ferramentas para utilização nas atividades de instalação e manutenção; 1.3 Compreensão das variáveis elétricas: tensão corrente, resistência e potência; 1.4 Compreensão das variáveis hidráulicas: pressão, vazão, etc; 1.5 Aprendizagem do uso do multímetro, principalmente para medir tensão, corrente, frequência e continuidade; 1.6 Diferença de materiais isolantes e condutores; 1.7 Percepção dos perigos ao manipular sistemas com energia elétrica (choque elétrico); 1.8 Aprendizagem e aplicação dos procedimentos de segurança.
2 Fundamentos sobre SFB 1	2.1 Visão geral do funcionamento de um sistema fotovoltaico de bombeamento como um todo; 2.2 Aprendizagem da função dos equipamentos de condicionamento de potência ou do conversor de frequência; 2.3 Aprendizagem sobre as características das motobombas (submersa ou superficial; centrífuga ou descolamento positivo); 2.4 Manipulação do multímetro medindo os valores da tensão no quadro elétrico; 2.5 Identificação e interpretação dos parâmetros mostrados pelo conversor de frequência; 2.6 Identificação dos problemas mais simples que aparecem no quadro elétrico principalmente nos disjuntores, elementos de proteção e conversor de frequência; 2.7 Identificação dos problemas mais simples que aparecem na parte hidráulica (boias, nível do poço, vazamentos, etc).
3 Fundamentos sobre SFB 2	3.1 Dimensionamento de um SFB 3.2 Instalação em campo do SFB 3.3 Comissionamento da instalação
4 Manutenção preventiva	4.1 Realização de atividades relacionadas com a manutenção preventiva (limpeza e orientação dos módulos, reaperto nas conexões elétricas e hidráulicas, conserto de eventuais vazamentos de água, dentre outros); 4.2 Aprendizagem de como solucionar problemas simples relacionados com parte elétrica e hidráulica.

5 Manutenção corretiva	5.1 Substituição de módulos no gerador fotovoltaico; 5.2 Substituição do conversor de frequência e dos elementos de proteção; 5.3 Parametrização do conversor de frequência; 5.4 Substituição da motobomba.
------------------------	--

Fonte: Modificado de Mocelin (2015)

Como pode ser visto na Figura 5.21, uma bancada simples como a utilizada pela OMRON, fabricante de conversores de frequência, pode ser útil para treinar diversos tipos de parametrizações no conversor de frequência.



Figura 5.21: Bancada de ensaio para treinamento do uso de CF

5.3.2 Comercialização do sistema

Uma das dificuldades para difusão da tecnologia é que o SFB-CF não é ofertado como uma solução pronta em prateleira, diferentemente de outros sistemas de bombeamento, onde os sistemas são comercializados em *kits*, Figura 5.22. Apesar de a empresa Solaris, participante do P&D executado no contexto da tese do Brito (2006), já ter comercializado alguns SFB-CF no país, não há informação específica sobre SFB-CF na página da empresa. Dessa maneira, são os próprios usuários ou as empresas interessadas os que têm que dimensionar o sistema, selecionar os componentes mais adequados e parametrizar o CF. Isso é uma dificuldade, porque não existe um guia de dimensionamento deste tipo de sistemas nem informação sobre os parâmetros a serem parametrizados no CF.



Figura 5.22: Exemplos de kits de bombeamento fotovoltaico comercializados na internet

Fonte: Pesquisa na Internet

5.3.3 Avaliação de conformidade

Assim como aconteceu com os sistemas fotovoltaicos isolados e atualmente com sistemas conectados à rede, precisa-se reduzir o risco de adquirir componentes defeituosos ou inadequados para as condições reais de trabalho, através de ensaios em laboratórios. No entanto, ainda não foram estabelecidos os requisitos para avaliação de conformidade de equipamentos de SFB. Os módulos fotovoltaicos são avaliados segundo a Portaria INMETRO 004/2011 (INMETRO, 2011). As motobombas centrífugas trifásicas multiestágios de até 25 cv também são avaliadas dentro do marco do Programa Brasileiro de Etiquetagem, mas os ensaios são feitos em operação na potência nominal, pelo qual não refletem seu possível desempenho para SFB-CF.

Neste sentido, a bancada de ensaios desenvolvida por Brito (2006) é uma ferramenta importante para conhecer o desempenho operacional dos SFBF. No entanto, deve-se desenvolver um procedimento que permita avaliar o desempenho operacional de SFB.

5.3.4 Difusão da tecnologia em outros níveis

Percebe-se um desconhecimento sobre a tecnologia fotovoltaica por parte da grande maioria dos brasileiros, incluindo alguns jornalistas. Isso se vê refletido, por exemplo, em manchetes como a mostrada na Figura 5.23, onde se publicita a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em 2015 como se fosse um invento de um brasileiro.



Figura 5.23: Exemplo de notícias disseminadas com erros conceituais sobre a tecnologia fotovoltaica

Fonte: Pesquisa na Internet

Por isso, é importante difundir e esclarecer mitos sobre a energia fotovoltaica e, neste caso específico, sobre os SFB. No ambiente acadêmico a difusão da configuração foi disseminada através de vários artigos científicos escritos por membros do LSF, mas a grande maioria de potenciais usuários não tem acesso ou interesse nesse tipo de conteúdo. Por outro lado, os SFB-CF instalados no Piauí e Pernambuco ganharam várias reportagens jornalísticas, Figura 5.24, mas há pouca informação sobre as configurações, locais de venda e outras características dos sistemas.



Figura 5.24: Repercussão dos projetos com SFB-CF na mídia

Fonte: Pesquisa na Internet

Por exemplo, no contexto de instrumentação didática foi desenvolvido nesta pesquisa um *kit* para simular o funcionamento de um SFB, Figura 5.25, Anexo II. O *kit* didático de

bombeamento vem sendo utilizado nas visitas às instalações do LSF-IEE-USP, mas pode ser utilizado como uma ferramenta de divulgação, capacitação e de demonstração para usuários. Além do *kit*, a bancada de ensaios desenvolvida por Brito (2006) é utilizada também para divulgação e avaliação de SFB.



Figura 5.25: Kit didático de bombeamento fotovoltaico

Fonte: Arquivo gráfico do LSF-IEE-USP

5.4 Resumo do capítulo

Apresentou-se neste capítulo uma série de recomendações para mitigação dos problemas técnicos e não técnicos relacionados aos projetos com SFB-CF. Em relação às sugestões para os problemas técnicos recomendou-se a adoção do CFW500, a capacitação dos usuários para a execução das tarefas básicas de manutenção e a capacitação de técnicos para a execução de tarefas mais complexas. Para os problemas não relacionados aos SFB-CF recomenda-se o trabalho interdisciplinar e em conjunto com os usuários, para poder adequar este tipo de sistema ao contexto dos usuários. No caso dos projetos que visem o uso produtivo da água bombeada, recomenda-se o fortalecimento das associações e a capacitação em práticas agrícolas, que permitam o aumento da qualidade e da produtividade.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho dedicou atenção à adoção de conversores de frequência em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, em particular a configuração proposta por Brito (2006), com o foco na avaliação do potencial e identificação das barreiras para sua implantação. Com este fim, analisou-se em campo a operacionalidade de SFB-C. As visitas em campo e entrevistas com os agentes participantes de vários projetos (idealizadores, executores e beneficiários) permitiu compreender que, apesar das muitas vantagens e impactos positivos dos SFB-C, estes sistemas apresentam uma série de problemas técnicos e econômicos relacionados às dificuldades para manutenção, conserto e reposição de motobombas e seus respectivos sistemas de condicionamento de potência. Também avaliaram-se projetos onde foram instalados SFB-CF utilizando a configuração proposta por Brito (2006).

Constatou-se que, mesmo sem satisfazer os critérios de tecnologia apropriada proposto por autores como Short e Thompson (2003): uso de habilidades locais, uso de materiais locais, uso de recursos locais, compatibilidade com costumes e práticas locais e satisfação de desejos e necessidades locais; os SFB-CF com a configuração proposta por Brito (2006) satisfazem outros critérios importantes para implantação destes sistemas em regiões rurais. Estes critérios são: compatibilidade de uso, facilidade de operação, confiabilidade, durabilidade e disponibilidade dos equipamentos, disponibilidade de serviço técnico e materiais de reposição, investimento inicial, custo de ciclo de vida e custo do volume bombeado.

Em relação à compatibilidade de uso com os costumes locais, o uso do SFB não é diferente do outros sistemas de bombeamento. No entanto, a gestão de sistemas comunitários pode demandar mudanças organizacionais em algumas comunidades, para o uso, a manutenção e a gestão dos sistemas. Por outro lado, os SFB-CF funcionam autonomamente, não precisando de um operador para seu funcionamento. Com uma capacitação simples, as tarefas de manutenção preventiva dos sistemas podem ser executadas sem maiores problemas pelos beneficiários. Já para a manutenção corretiva demanda-se uma capacitação técnica mais aprofundada. No que tange à confiabilidade do sistema, se a motobomba e o CF são selecionados analisando a oferta local, a chance de obtenção de materiais de reposição e serviço técnico nas proximidades é grande. O único problema é que o uso de alguns elementos externos necessários para o funcionamento do CF na configuração proposta por Brito (2006) compromete a confiabilidade do sistema.

Os SBF-CFs também têm bons resultados em termos econômicos, se comparados com bombeamento com geração a diesel ou com SFB-C. Por causa dos altos custos das motobombas e do condicionador de potência dos SFB-C, o investimento inicial, CCV e CVB dos SFB-CF são mais baixos. Também, é mais barato usar SFB-CF a longo prazo do que SGDB, principalmente em regiões com bom recurso solar onde o sistema vai ser utilizado por mais de um ano. Resultados semelhantes foram registrados na Namíbia (MME – NAMIBIA, 2006), México (FOSTER; COTA, 2008) e Nigéria (CLOUTIER; ROWLEY, 2011). No entanto, os resultados obtidos para a realidade brasileira são mais favoráveis, devido ao menor preço das motobombas convencionais e do CF.

O uso do conversor de frequência CFW500 elimina a necessidade de circuitos externos para realimentação do PID, possibilita o seguimento do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico e a detecção do poço seco. Desta maneira, resolvem-se alguns dos problemas técnicos encontrados com a configuração proposta por Brito (2006). Outros problemas técnicos podem ser solucionados com a adoção das seguintes medidas: seleção de motobombas com as características do poço e da rede elétrica local e a capacitação de usuários e técnicos para manutenção dos SFB.

Mesmo assim, os grandes problemas dos projetos com os SFB-CF não são consequência da tecnologia em si, mas de falhas na concepção e execução dos projetos. Os problemas registrados com os projetos com os SFB-CF são semelhantes aos registrados anteriormente nos projetos com os SFB-C. Isso corrobora a hipótese planteada nesta tese. Neste sentido, percebe-se a importância do conhecimento prévio das especificidades dos usuários, da sua capacidade de se organizar e estabelecer regras, e dos fatores técnicos necessários para manter a operacionalidade do sistema fotovoltaico de bombeamento. Como já amplamente exposto em diversos trabalhos sobre introdução e adoção de sistemas fotovoltaicos (SERPA; ZILLES, 2007, FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009), os resultados reforçam a necessidade de equipes interdisciplinares e do trabalho em conjunto com os usuários, para o melhor planejamento deste tipo de empreendimento. Também verifica-se a importância e os esforços que devem ser depositados na capacitação para execução de tarefas de manutenção corretiva.

No que tange a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento aplicados em atividades produtivas, garantir o acesso à água em quantidade suficiente para a produção agrícola não é a única condição para aumentar a produção agrícola familiar. Percebe-se a necessidade de aperfeiçoamento da cadeia produtiva, introdução e treinamento de técnicas de cultivo irrigado

e assessoramento para novas práticas agrícolas. Constatase que, quando implementadas da forma correta, estas medidas podem agregar valor ao produto conforme registrado na produção e comercialização de pimentas na Comunidade de Sitio Baixas (seção 1.3.3). É necessário, também, fortalecer as associações de produtores, fornecer sementes de melhor qualidade e mais adequadas ao clima local, articular um sistema de venda dos produtos e proporcionar treinamento em técnicas agrícolas.

Os resultados apresentados neste trabalho sintetizam o aprendizado adquirido e consolidado através da extensa pesquisa de campo baseada em levantamento de dados sobre os projetos, entrevistas com as pessoas envolvidas, visitas técnicas aos sistemas e, em alguns casos, acompanhamento e envolvimento com os projetos. As recomendações reforçam o que já foi amplamente discutido e comentado por outros projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento em outras regiões do mundo, e podem ser aplicados para tecnologias similares. Com o conhecimento das limitações e vantagens da configuração de Brito (2006), este trabalho também abre espaço para novas pesquisas relacionadas à utilização de conversores de frequência em sistemas fotovoltaicos de bombeamento:

- concepção e construção de instrumentação para monitoramento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento;
- acompanhamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com o conversor de frequência CFW500;
- desenvolvimento de procedimentos de ensaio para avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos de bombeamento e de uma proposta para comissionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento;
- elaboração de uma ferramenta computacional para dimensionamento do gerador fotovoltaico e das motobombas para sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência
- avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência de grande porte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLERDICE, A.; ROGERS, J. H. **Renewable energy for microenterprise**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado, USA. 2000.

ALONSO-ABELLA, M.; LORENZO, E.; CHENLO, F. PV water pumping systems based on standard frequency converters. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 11, n. 3, p. 179-191, 2003. ISSN 1099-159X.

ANAUGER. **Bombas Solares**. Disponível em: <<http://www.anauger.com.br/index.php/produtos/linha-anauger-solar>>. Acesso: junho de 2015.

ANEEL. **Despacho N° 3296**. 23 de Outubro de 2012.

BARBOSA, E. M. S; TIBA, C; SALVIANO C. J. C; CARVALHO, A.M; LYRA, M.F. Photovoltaic water pumping systems installer training: a partnership experience between the university and São Francisco hydroelectric power plant. **Renewable Energy**, v. 11, p. 187-205. 2000.

BARBOSA, E. M. S., PRATA A. R., SILVA E.S., TIBA C. Avaliação dos benefícios socioeconômicos em aplicações fotovoltaicas com finalidades produtivas – caso restaurante Grota de Angicos. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 11, p. 12.17-12.24. 2007.

BARLOW, R., MCNEILS, B., DERRICK, A. Solar pumping: an introduction and update on the technology, performance, costs, and economics. World Bank Technical Paper No. 168. Intermediate Technology Publications and the World Bank, Washington, DC, USA. 1993.

BRITO, A. U. **Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas**. 84f. Tese (Doutorado em Energia) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRITO, A. U.; ZILLES, R. Conversores de Frequência, uma Solução para Diminuir a Dependência aos Equipamentos Importados em Aplicações de Bombeamento Fotovoltaico. In: IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2004, Itajubá/MG. Política, Planejamento e Regulação: Os Papéis do Estado, do Governo e da Sociedade, 2004.

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, f 249–260. 2006

BURNEY, J.; WOLTERING, L; BURKEC, M; NAYLORA, R; PASTERNAKB, D.. Solar-powered drip irrigation enhances food security in the Sudano – Sahel. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 5, p. 1848–1853, 2010.

CABRAAL, R. A.; BARNES, D. F.; AGARWAL, S. G. Productive uses of energy for rural development. **Annual review of environmental and resources**, n. 30, p. 117-144, 2005.

CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos dos cerrados e seu potencial de utilização na irrigação. **Irrigação e tecnologia moderna**, Brasília, n. 69/70, p. 87-97, 2006.

CLOUTIER, M.; ROWLEY, P. The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-Saharan Africa: A case study for Central Nigeria. **Renewable Energy** ; 36: 2220 -2226, 2011

CODEVASF, SUDENE, OEA. Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale de São Francisco – PLANVASD. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 1989.

COELCE. **Famílias de Quixeramobim produzem cheiro verde e tomate com energia solar**. 2010 Disponível em: <<https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/noticias/energia-solar-quixeramobim.aspx>>. Acesso: junho de 2015.

COSTA, H.; ARAUJO, K.; COSTA, G. N. “Água do sol” – uso da energia solar fotovoltaica na pequena irrigação de base familiar no semi-árido brasileiro. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – AVERMA**, Argentina, v. 10, 2006. ISSN 03295184.

DRIEMEIER C.; ZILLES R. Six-element circuit for maximum power point tracking in photovoltaic-motor systems with variable-frequency drives. **Progress in Photovoltaics** 18, 107-114, 2010a.

DRIEMEIER C.; ZILLES R. An ice machine adapted into an autonomous photovoltaic system without batteries using a variable-speed drive. **Progress in Photovoltaics** 18, 299-305, 2010b.

ESPERICUETA, A. D. C.; FOSTER, R. E.; GOMEZ-ROCHA, L. M.; ROSS, M. P.; HANLEY, C. J.; GUPTA, V. P.; MONTUFAR-AVILEZ, O.; PAREDES-RUBIO, A. R. Ten-year reliability assessment of photovoltaic water pumping systems in Mexico. In: **American solar energy society conference**. Portland. 2004.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão**. 201p. Tese (Doutorado em Energia). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FEDRIZZI, M.C.; RIBEIRO, F. S.; ZILLES, R. Lessons from field experiences with photovoltaic pumping systems in traditional communities. **Energy Sustainable Development**. , v.13, p.64 – 70, 2009

FEDRIZZI, M. C.: MELENDEZ T. A; VALER, L. R.; SORIANO, O. Implantação e acompanhamento de projeto fotovoltaico de bombeamento: ocorrência de problemas. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. 2016.

FOSTER, G. M. **As Culturas Tradicionais e o Impacto da Tecnologia**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1964.

FOSTER R, COTA A. Solar water pumping advances and comparative economics. **Energy Procedia**;57: 1431 – 1436, 2008.

FERNÁNDEZ-RAMOS J.; NARVARTE-FERNÁNDEZ L.; POZA-SAURA F. Improvement of photovoltaic pumping systems based on standard frequency converters by means of programmable logic controllers. **Solar Energy**; 84: 101-109, 2010.

GALDINO, M.A.; Lima J. H. G. PRODEEM – The brazilian programme for rural electrification using photovoltaics. **RIO 02 World Climate & Energy Event**, 1: 77–84. Rio de Janeiro, 2002.

GTZ. **Ex-post Evaluation 2007 Resource-conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems, Chile Brief Report**. GTZ. Frankfurt, p. 1-11. 2008.

IBGE. **Censo demográfico 2010: resultados do universo - características da população e dos domicílios**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso: outubro de 2014.

INMETRO. Portaria 004/2011. 2011

KANDPAL, T.C.; BROMAN, L. Renewable energy education: a global status review. **Renewable Sustainable Energy Review**, 34, 300–324. 2014

LACKI, P. Livro dos pobres rurais. Disponível em: <<http://www.polanlacki.com.br>>. Acesso: junho de 2013.

MARANHÃO, A. G. N. BRITO, A. U.; LEAL, A. M.; FONSECA, J.K.; MACÊDO, W.N. Using LDR as Sensing Element for an External Fuzzy Controller Applied in Photovoltaic Pumping Systems with Variable-Speed. **Sensors**, v. 15, 24445-24457, 2015.

MEADOWS, K; RILEY, C.; RAO, G.;HARRIS, P. **Modern energy: impacts on microenterprises**. UK Department for international development.2003.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. Solar photovoltaic water pumping for remote. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 472-487, 2008.

MELLENDEZ, T. A. F. **Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MELLENDEZ, T. A. F. ; FEDRIZZI, M. C. ; ZILLES, R. Conversor de frequência com CLP para Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento: caracterização operacional. In: VI Congresso

Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.

MELO, R.O. **Condicionamento de potência de uma motobomba em um sistema de bombeamento fotovoltaico através de um conversor de frequência.** 65 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MINISTRY OF MINES AND ENERGY (NAMIBIA). **Feasibility assessment for the replacement of diesel water pumps with solar water pumps.** Namibia, 2006.

MOCELIN, A. R. **Implantação e Gestão de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares> Resultados Operacionais de um Projeto Piloto de Aplicação da Resolução Aneel n. 83/2004.** 136 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MOCELIN, A. R. **Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos.** 299 f. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MORAES, A. M.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M. C. La problemática de obtención de agua potable en la región semiárida brasileña utilizando sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 15, p. 04.97-04.104. 2011.

MORAES, A. M; VALER, L. R.; MORANTE, F. e FEDRIZZI, M.C. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento implantados no semiárido piauiense. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014.

MORAES, A.M. **A difusão do acesso à água com sistemas fotovoltaicos de bombeamento no semiárido brasileiro.** 190 f. Tese (Doutorado em Energia). Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC. Santo André. 2015.

MORAES, A. M.; VALER, L. R.; RIBEIRO T. B. S. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento implantados no semiárido pernambucano: observações de campo. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Gramado, 2016.

NARVARTE, L.; LORENZO, E. PV Pumping Systems: Sustainability of PV water pumping programmes: 12-years of successful experience. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 18, n. 4, p. 291-298, 2010. ISSN 1099-159.

POZA, F. **Contribución al diseño de procedimientos de control de calidad para sistemas de bombeo fotovoltaico.** 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidad Politecnica de Madrid. Madri. 2008.

SERPA, P; ZILLES, R. The diffusion of photovoltaic technology in traditional communities: the contribution of applied anthropology. **Energy Sustainable Development.** , v.XI, p.78 – 87, 2007.

SHORT, T. D. THOMPSON, P. Breaking the mould: solar water pumping—the challenges and the reality. **Solar Energy**. v. 75, 1, 1–9, 2003.

VALER, L. R. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2011.

VALER, L. R. M. MORAES, A. M.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M. C. ZILLES, R. 2013. Experiências no semiárido cearense na implantação de sistemas fotovoltaicos para irrigação: lições aprendidas. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**. v. 17, p. 04.01-04.10, 2013.

VALER, L. R.; MORAES, A. M. ; FEDRIZZI, M. C. ; TRIGOSO, F. M. ; ZILLES, R. . Experiências na implantação de sistemas fotovoltaicos para usos produtivos: observações de campo no semiárido alagoano e sergipano. In: IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianopolis., 2014a.

VALER, L. R. M. MORAES, A. M.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. Desafios actuales para la difusión de sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua en el semiárido brasileño: observaciones de campo. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**. v. 18, pp. 04.85-0492. 2014b

VALER, L. R.; RIBEIRO T. B. S.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. . Lições aprendidas no processo de implantação de sistemas fotovoltaicos domiciliares em duas comunidades rurais. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, p. 18-26, 2014c.

VAN CAMPEN, B.; GUIDI, D.; BEST, G. **Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles**. FAO. Roma, p. 4,53-54. 2000.

WEINGART, J.; GIOVANNUCCI, D. **Rural (Renewable) Energy: A Practical Primer for Productive Applications**. p. 2-3. 2003.

WEG. **Inversor de frequência CFW500 – Manual de programação**. 2011. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw500-manual-de-programacao-10001469555-1.1x-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso: maio de 2016.

TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O DOUTORADO

ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS: 5

VALER, L.R.; MELENDEZ, T.A.; FEDRIZZI, M.C.; ZILLES, R.; MORAES, A. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 15, p. 20-26, 2016.

VALER, L.R.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. MOURA, E. NASCIMENTO A.C. Assessment of socioeconomic impacts of access to electricity in Brazilian Amazon: case study in two communities in Mamirauá Reserve. **Energy for sustainable development** v. 20, p. 58-65, 2014.

VALER, L. R.; MORAES, A. M.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M. C. ZILLES, R. Desafios actuales para la difusión de sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua en el semiárido brasileño: observaciones de campo. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**. v. 18, pp. 04.85-0492. 2014

VALER, L. R.; RIBEIRO T. B. S.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. . Lições aprendidas no processo de implantação de sistemas fotovoltaicos domiciliares em duas comunidades rurais. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, p. 18-26, 2014.

VALER, L. R.; MORAES, A. M.; MORANTE, F.; FEDRIZZI, M. C. ZILLES, R. 2013. Experiências no semiárido cearense na implantação de sistemas fotovoltaicos para irrigação: lições aprendidas. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**. v. 17, p. 04.01-04.10, 2013.

TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS: 8

MORAES, A. M.; VALER, L. R.; RIBEIRO T. B. S. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento implantados no semiárido pernambucano: observações de campo. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Gramado, 2016.

FEDRIZZI, M. C.; MELENDEZ T. A; VALER, L. R.; SORIANO, O. Implantação e acompanhamento de projeto fotovoltaico de bombeamento: ocorrência de problemas. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. 2016.

MORAES A. M; MORANTE F.; VALER L. R.; FEDRIZZI M.C. O papel das instituições na difusão de sistemas fotovoltaicos de bombeamento no semiárido brasileiro. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. 2016.

VALER, L. R.; RIBEIRO T. B. S.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. Lições aprendidas no processo de implantação de sistemas fotovoltaicos domiciliares em duas comunidades rurais. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. 2014.

MORAES A. M; VALER L. R.; MORANTE F.; FEDRIZZI M.C. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento implantados no semiárido piauiense. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife,. 2014..

VALER, L. R.; MORAES, A. M. ; FEDRIZZI, M. C. ; TRIGOSO, F. M. ; ZILLES, R. . Experiências na implantação de sistemas fotovoltaicos para usos produtivos: observações de campo no semiárido alagoano e sergipano. In: IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianopolis., 2014.

VALER, L.R.; MELENDEZ T. A; MOCELIN, A.; ZILLES, R. Impactos e mudanças no consumo energético de uma comunidade rural amazônica após seis anos e meio de uso de sistemas fotovoltaicos domiciliares. In: IX Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural AGRENER GD 2013, Itajubá, 2013.

VALER, L. R.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. Estado dos sistemas fotovoltaicos domiciliares instalados em uma comunidade ribeirinha amazônica após seis anos e meio de operação. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 2012

Anexo I – Manual de capacitação para técnicos



INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
LABORATÓRIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

P&D CELPE 43-1111/2011

**Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia
Nacional – Zona Rural de Pernambuco”**

HISTÓRICO DE REVISÃO

Data	Ver.	Descrição	Autores
25/05/2015	01	Manual de operação e manutenção	Maria Cristina Fedrizzi Teddy Arturo Melendez Luis Roberto Valer

Mai 2015



Sumário

1	Apresentação	3
2	Glossário	4
3	Os sistemas de bombeamento fotovoltaico de Serra Talhada	6
3.1	Gerador fotovoltaico	8
3.1.1	Manutenção preventiva do gerador fotovoltaico	9
3.1.2	Identificação de falhas e manutenção corretiva do gerador fotovoltaico	12
3.2	Dispositivo de condicionamento de potência	14
3.2.1	Parâmetros de leitura do conversor de frequência	14
3.2.2	Manutenção preventiva do condicionamento de potência	16
3.2.3	Identificação de falhas no sistema de condicionamento de potência	17
3.2.4	Troca de dispositivos do sistema	19
3.3	Grupo motobomba	19
3.3.1	Manutenção preventiva do grupo motobomba	20
3.3.2	Identificação de falhas e manutenção corretiva do grupo motobomba	21
3.3.3	Reinstalação da motobomba	21
3.4	Rede hidráulica	22
3.5	Obra civil	22
4	Recomendações de segurança	23
4.1	Riscos em instalações e serviços com eletricidade	23
4.2	Equipamentos de Proteção Individual (EPI)	23
4.3	Medidas de segurança a serem adotadas na realização de tarefas de operação e manutenção de sistemas de bombeamento fotovoltaico	24
5	Formulário de Inspeção	26
6	Relatório de Falhas	27



1 Apresentação

Esta apostila faz parte do programa de capacitação dos técnicos encarregados da manutenção dos sistemas de bombeamento fotovoltaico pertencentes ao P&D CELPE 43-1111/2011 “Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia Nacional – Zona Rural de Pernambuco”.

Idealizada para ser um guia prático de fácil consulta, a apostila é composta por um glossário da nomenclatura utilizada, apresentação dos principais dispositivos que formam os sistemas de bombeamento fotovoltaico pertencentes ao projeto, orientações para a execução da manutenção preventiva e corretiva, recomendações de segurança e dois *check list* para inspeção em campo, o “Formulário de Inspeção” e o “Formulário - Relatório de Falhas”.



Ressalta-se que os trabalhos de manutenção em sistemas elétricos exigem o treinamento conforme a Norma Regulamentadora NR10 (Segurança em instalações e serviços em eletricidade) do Ministério do Trabalho e Emprego.

A manutenção preventiva é relativamente simples e rápida, já a manutenção corretiva exige conhecimento teórico e treinamento prático de tal forma que a pessoa capacitada consiga identificar as falhas no sistema e, quando possível, realizar reparos e reposição dos elementos.

Obs. Nas orientações de manutenção, quando for indicado “entrar em contato com o responsável pelo projeto”, deverá ser a entidade indicada pela CELPE.



2 Glossário

Arranjo fotovoltaico: É a forma de conexão dos módulos fotovoltaicos (série, paralelo) que formam o gerador fotovoltaico.

Célula fotovoltaica: Dispositivo que converte a energia solar em energia elétrica.

Condições padrão de teste (STC, Standard Test Condition): Condições de irradiância (1.000 W/m^2), temperatura da célula (25 C°) e distribuição espectral padrão para uma massa de ar de 1,5 para as quais são medidos e etiquetados os parâmetros característicos de um módulo fotovoltaico.

Conversor de frequência: Dispositivo eletrônico responsável por gerenciar e controlar o acoplamento do gerador fotovoltaico com a motobomba.

Corrente de curto-circuito (I_{sc}). Corrente do gerador fotovoltaico quando se põe em curto-circuito o polo positivo e negativo do gerador fotovoltaico.

EPI: Equipamento de Proteção Individual.

Gerador fotovoltaico: Conjunto de módulos conectados em série ou paralelo.

Irradiância: É a energia incidente por unidade de superfície de todos os tipos de radiação eletromagnética (W/m^2).

Irradiação: É a irradiância integrada em um intervalo de tempo especificado, geralmente em hora, e é dada em watt hora por metro quadrado ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$).

Módulo fotovoltaico: Conjunto de células ligadas em série ou paralelo.

NR10: Norma Regulamentadora Número 10 do Ministério do Trabalho e Emprego que trata sobre a segurança em instalações e serviços em eletricidade.

PE: Polietileno.

Potência: Capacidade para realização de trabalho, unidade Watt (W).



PVC: policloreto de vinil

Quadro elétrico: Caixa que comporta o conversor de frequência e os componentes de proteção e seccionamento.

SBFV: Sistema de bombeamento de água fotovoltaico.

String ou fileira. Conjunto de módulos fotovoltaicos ligados em série.

Tensão de circuito aberto (Voc). Tensão do gerador fotovoltaico sem carga.

Watt pico (Wp): Potência elétrica dos módulos fotovoltaicos nas condições padrão de teste, irradiância (1.000 W/m^2), temperatura da célula (25 C°) e distribuição espectral padrão para uma massa de ar de 1,5.



3 Os sistemas de bombeamento fotovoltaico de Serra Talhada

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico do município de Serra Talhada foram instalados em janeiro de 2014, em sete localidades rurais e tem como peculiaridade a utilização de motobombas trifásicas convencionais acopladas a conversores de frequência, o que possibilita o bombeamento com frequência variável, em função do comportamento da irradiância.

Os sistemas foram subdivididos em pequeno, médio e grande, proporcionalmente à potência e os arranjos são de 20 módulos em série, em todos os casos. Maiores informações na Tabela 1 e Figura 1. Nesta figura, “*Diagrama multifilar dos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico*”, estão identificados os níveis de tensão nominal em cada trecho da instalação.

Tabela 1. Características gerais dos sistemas de bombeamento fotovoltaico de Serra Talhada.

			S	Pp	Hb	Dp/r	Hp/r	Qr	P _G	MB	CF
Tipo	Localidade	Proprietário	mg/L	m	m	m	m	m ³ /h	Wp	mod.	mod.
Pequeno	*Jatobá C.	Roberto Santos	750	36	33	114	4	1,0	600	SUB10_05S4E6	CFW08
	Carnaúba	João Silva	1.217	40	33	174	18	1,2	900	2.1-SSR-11	CFW08
Médio	Angico G.	M Glória Lima	915	33	30	30	2	2,8	900	4R4-06	CFW08
	Lagoinha	Exedito Mora	754	40	31	559	22	2,4	900	4R4-07	CFW500
Grande	Papagaio	Irapuã Aguiar	2.054	31	25	200	6	5,0	1.800	4R4-09	CFW08
	Paus Pret.	Luiz Nogueira	3.750	40	25	168	10	4,0	1.800	4R4-09	CFW08
	Serrinha	Evilásio Filho	1.664	40	30	290	14	4,8	1.800	4R4-09	CFW08

*O sistema de Jatobá deverá ir para o Sítio Canudos de propriedade do Sr. Aldísio

S - Concentração de sais da água do poço

Pp - Profundidade poço

Hb - Altura da motobomba

Dp/r - Distância entre poço e reservatório

Hp/r - Desnível entre boca do poço e reservatório

Qr - Vazão de recarga do poço

P_G - Potência do gerador fotovoltaico

MB - Modelo da motobomba

CF - Modelo do conversor de frequência

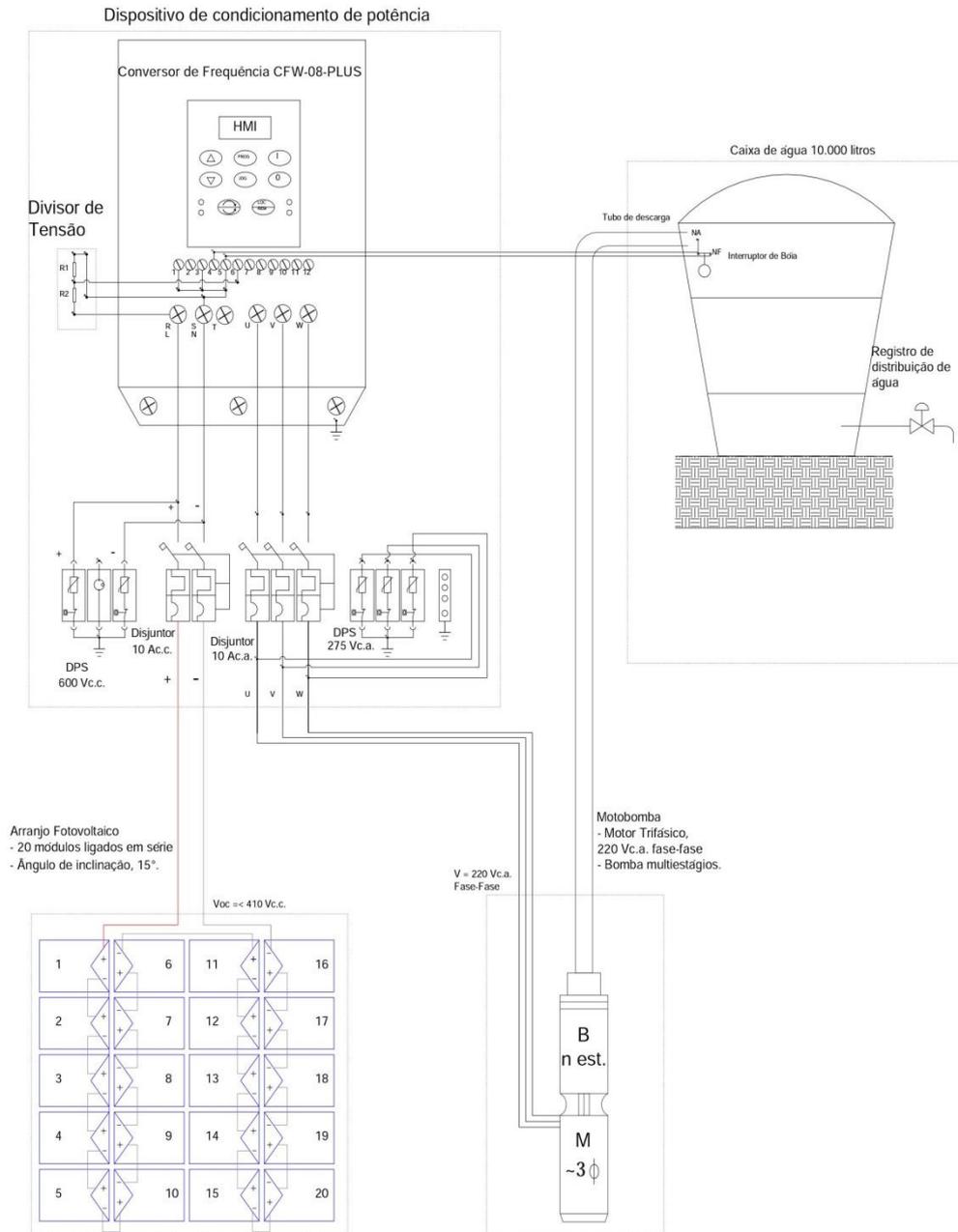


Figura 1. Diagrama multifilar dos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico.



A parte hidráulica dos sistemas de bombeamento é composta por um reservatório com capacidade de 10.000 litros, hidrômetro, manômetro, válvula de retenção e rede de distribuição, que é composta por mangueira de PE e conexões de PVC, com diâmetro interno de 1.1/4".

Além desses equipamentos, o sistema de Lagoinha conta com uma central de monitoramento remoto de dados. Os parâmetros monitorados são temperatura ambiente, temperatura do módulo, irradiância e volume diário bombeado.

Nos próximos itens são apresentados os principais componentes de um sistema de bombeamento fotovoltaico (SBFV) - gerador, condicionamento de potência, motobomba, rede hidráulica, obra civil - com indicações de procedimentos de operação e manutenção (preventiva e corretiva).

O sistema de bombeamento fotovoltaico é idealizado para operar de forma autônoma, ou seja, sem a intervenção do usuário para o funcionamento.

Para qualquer tarefa de limpeza e manutenção deve-se levar em conta as recomendações de segurança apresentadas no Capítulo 4.



Deve dar-se atenção especial à tensão de saída dos geradores fotovoltaicos, pois pode chegar a 420 Vc.c.

3.1 Gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é composto por um conjunto de módulos ligados em série ou paralelo e estrutura de sustentação. O módulo fotovoltaico é uma tecnologia madura e consolidada com vida útil de cerca de 25 anos. A Figura 2 apresenta os principais componentes de um módulo fotovoltaico.

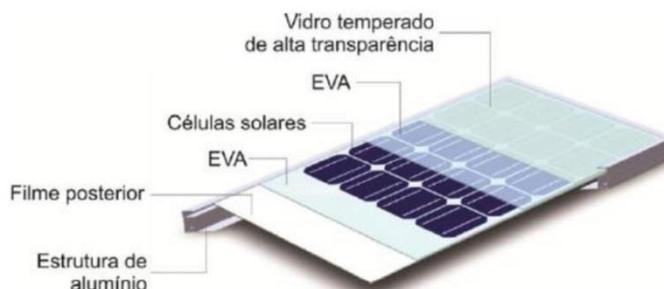


Figura 2 – Componentes do módulo fotovoltaico.

A Tabela 2 apresenta as características elétricas dos módulos fotovoltaicos instalados nos sistemas de bombeamento de Serra Talhada.

Tabela 2 – Características elétricas nas condições padrão de teste dos módulos FV.

Modelo	KS90T	KS45T	S30P
Potência	90 Wp	45 Wp	30 Wp
Tensão circuito aberto (Voc)	21,7 V	22,1 V	21,56 V
Tensão ponto máxima potência (Vmp)	17,8 V	17,7 V	17,56 V
Corrente curto circuito (Isc)	5,6 A	2,8 A	1,84 A
Corrente ponto máxima potência (Imp)	5,1 A	2,55 A	1,71 A
Localidades	Papagaio Paus Pretos Serrinha	Carnaíba Angico Grande Lagoinha	Jatobá (Canudos)

Os geradores fotovoltaicos estão orientados para o norte geográfico e inclinação em relação ao solo de 15°. Estão montados sobre estrutura de alumínio, firmemente fixada no terreno a fim de evitar o tombamento em caso de ventos fortes.

3.1.1 Manutenção preventiva do gerador fotovoltaico

As tarefas de manutenção preventiva do gerador fotovoltaico são a inspeção periódica dos módulos, das caixas de conexão e estruturas de sustentação a fim de identificar possíveis avarias, fios soltos e sujeira dos módulos.



Antes de lavar os módulos fotovoltaicos verifique a condição dos mesmos. Caso seja detectado anomalias (vidro quebrado ou



moldura danificada), cancelar a lavagem e contatar o responsável pelo projeto para orientação.

Unicamente lavar a face frontal dos módulos como mostra a Figura 3, não lavar a face posterior, nem abrir as caixas de conexão (Figura 4).

A limpeza da superfície dos módulos fotovoltaicos deve ser realizada a cada seis meses ou quando detectada alguma camada de poeira significativa, vegetação ou excrementos de pássaros, o que é muito comum. É uma tarefa que exige muito cuidado, por isso, antes de iniciar a limpeza deve-se desligar o dispositivo de condicionamento de potência através dos disjuntores que ficam dentro do quadro elétrico. Somente após esta operação é que pode-se realizar a operação de limpeza dos módulos. Esta atividade é de fácil realização, bastando molhar a superfície a ser limpa, esfregar com escova, sabão ou detergente e enxaguar.



Figura 3 – Limpeza dos módulos fotovoltaicos.



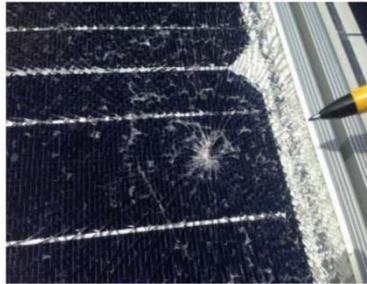
Figura 4 – Caixa de conexão de um módulo fotovoltaico.

A verificação da estrutura de sustentação deve conferir a rigidez do conjunto e o aperto dos parafusos de fixação de módulos fotovoltaicos.

Os encarregados de lavar e inspecionar os módulos devem usar equipamentos de proteção individual - EPI (capacete, óculos de proteção, luvas e sapatos de eletricitista).



Como medida de segurança recomenda-se lavar os módulos preferencialmente antes das 9 ou após as 16 horas.

Atividade 1. Inspeção visual dos módulos fotovoltaicos	
<p>Procedimento Verificar se algum módulo sofreu danos (vidro quebrado).</p> <p>Efeitos Redução da produção de energia elétrica, curto-circuito no módulo.</p> <p>Reparo Contatar o responsável pelo projeto para fazer a substituição do módulo por outro com as mesmas características elétricas.</p> <p>Frequência A cada visita ao sistema.</p>	
Atividade 2. Limpeza dos módulos fotovoltaicos	
<p>Procedimento Conferir se existe sujeira (poeira, excremento de aves, acúmulo de restos vegetais) sobre a superfície dos módulos.</p> <p>Efeitos Redução da produção de energia elétrica, geração de "pontos quentes" no módulo.</p> <p>Reparo Limpeza do gerador fotovoltaico.</p> <p>Frequência Semestral ou quando for detectado acúmulo de sujeira.</p> <p>Acessórios e materiais Escova/vassoura de cabo longo, mangueira/balde, água, detergente/sabão.</p>	
Atividade 3. Limpeza do terreno	
<p>Procedimento Verificar se há vegetação de porte alto no cercado onde se encontra o gerador fotovoltaico e o poço.</p> <p>Efeito Sobreamento dos módulos, risco de incêndio, dificuldade de acesso para manutenção.</p> <p>Reparo Manter o porte baixo da vegetação dentro e nas proximidades do cercado</p> <p>Frequência Trimestral ou com maior frequência, dependendo do crescimento da vegetação local.</p> <p>Acessórios e materiais Enxada, foice, facão.</p>	



Atividade 4. Fixação dos parafusos da estrutura de sustentação

Procedimento

Verificar o aperto dos parafusos da estrutura dos módulos.

Efeitos

Os módulos podem perder sustentação, arrebentar o cabeamento e até cair com ventos fortes.

Reparo

Reapertar os parafusos.

Frequência

Anual

Acessórios e materiais

Chaves de fenda, boca e estrela.



Atividade 5. Existência de insetos e outros animais

Procedimento

Verificar a presença de ninhos de insetos ou de outros animais na estrutura do gerador fotovoltaico.

Efeitos

Pode causar danos aos equipamentos, acidentes pessoais e impedir o acesso dos técnicos.

Reparo

Retirada do ninho (evitar o uso de fogo, utilizar inseticida spray ou outra formulação), vedar os orifícios.

Frequência

A cada visita de inspeção.

Acessórios e materiais

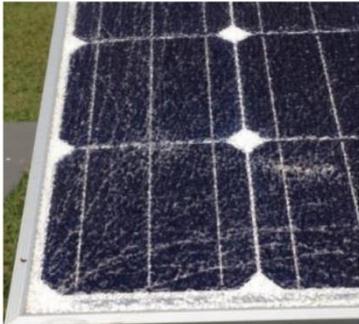
Inseticida spray.



3.1.2 Identificação de falhas e manutenção corretiva do gerador fotovoltaico

A maioria das falhas do gerador fotovoltaico costuma estar associada a problemas com os cabos de conexão entre módulos (cabos desencapados e com mau contato) e ao sombreamento da superfície dos módulos (poeira, excrementos de aves, folhas).



Falha 1. O gerador fotovoltaico não está gerando energia	
<p>Procedimento 1</p> <p>- Abrir o quadro elétrico, desligar os disjuntores. Com um multímetro medir a tensão Voc em c.c. nos pontos de conexão do disjuntor em c.c. (gerador fotovoltaico). A tensão de circuito aberto deve ser maior que 350 Vc.c.</p> <p>Solução 1</p> <p>- Verificar a continuidade elétrica dos cabos e o aperto dos parafusos de conexão dos módulos.</p> <p>Procedimento 2</p> <p>- Verificar na superfície do gerador fotovoltaico se há algum objeto, excremento de pássaros ou folhas que estejam sombreando alguma célula.</p> <p>Solução 2</p> <p>- Eliminar os elementos que causam sombreamento.</p> <p>Se a falha não for solucionada desta maneira, verificar a existência de problema em outro elemento do sistema, como o conversor de frequência e a motobomba.</p>	 
Falha 2. Módulo com vidro quebrado	
<p>Procedimento</p> <p>Inspeção visual.</p> <p>Solução</p> <p>Usando equipamentos de proteção individual adequado (ver item 4) desligar o sistema e proceder a substituição do módulo quebrado por outro de mesmas características.</p> <p> Considerar todas as precauções necessárias, pois o módulo fotovoltaico fica energizado mesmo com pouca luz solar.</p>	
Falha 3. Fio desencapado	
<p>Procedimento</p> <p>Inspeção visual.</p> <p>Solução</p> <p>Desligar o sistema. Trocar o fio com defeito. Conferir o aperto dos parafusos.</p>	



3.2 Dispositivo de condicionamento de potência

Chama-se de condicionamento de potência o conjunto de elementos do quadro elétrico que gerenciam o acoplamento do gerador fotovoltaico com a motobomba. Nos sistemas de Serra Talhada, o condicionamento é formado pelo conversor de frequência, divisor de tensão, dispositivos de seccionamento e de proteção. Neste caso, o dispositivo encontra-se instalado na estrutura de fixação do gerador fotovoltaico, na parte inferior dos módulos, para proteção contra intempéries (Figura 5).



Figura 5 – Gerador fotovoltaico e dispositivo de condicionamento de potência.

A tabela 3 apresenta as características elétricas gerais dos conversores de frequência utilizados nos sistemas de Serra Talhada.

Tabela 3 – Conversor de frequência.

Conversor de frequência CFW-08-PLUS		
Potência	1 CV	2 CV
Tensão nominal em c.a.	220 V	220 V
Frequência nominal em c.a.	60 Hz	60 Hz
Corrente nominal em c.a.	4 A	7,3 A

3.2.1 Parâmetros de leitura do conversor de frequência

O painel frontal do conversor de frequência (Figura 6) é composto por um *display* e botões através dos quais são inseridos os parâmetros desejados, além do controle liga/desliga. Há, também, dois LEDs que indicam o sentido de giro do motor (horário/anti-horário) e outros dois que indicam modo local (manual) e remoto (automático).



Figura 6 – Informação visual do conversor de frequência.

Para acessar a leitura dos parâmetros do conversor de frequência o operador deve pressionar o botão PROG:  e com os botões de setas  , procurar o parâmetro desejado e ler o valor.

Na tabela 4 são listados parâmetros de leitura do conversor de frequência. As grandezas elétricas apresentadas no display são tensão, corrente e frequência.

Tabela 4– Parâmetros de leitura do conversor de frequência.

Parâmetro	Função	Faixa de valores	Unidade	Explicação
P002	Valor proporcional à frequência de saída que alimenta o motor	... 0 - 66	Hz	Este parâmetro sempre está ativo e aparece assim que o sistema começa a operar.
P003	Corrente de saída que alimenta o motor	...0 - 7,3	A c.a.	Pressionar o botão PROG e com o botão das setas, procurar o parâmetro para verificar o valor correspondente.
P004	Tensão do gerador fotovoltaico	...0 - 420	V c.c.	Pressionar o botão PROG e com o botão das setas, procurar o parâmetro para verificar o valor correspondente.
P005	Frequência de saída que alimenta o motor	... 0 - 66	Hz	Pressionar o botão PROG e com o botão das setas, procurar o parâmetro para verificar o valor correspondente.
P007	Tensão de saída que alimenta o motor	... 0 - 220	V c.a.	Pressionar o botão PROG e com o botão das setas, procurar o parâmetro para verificar o valor correspondente.
P008	Temperatura do conversor de frequência	... 25 - 100	°C	Pressionar o botão PROG e com o botão das setas, procurar o parâmetro para verificar o valor.



3.2.2 Manutenção preventiva do condicionamento de potência

As tarefas de manutenção preventiva do sistema de condicionamento de potência são, basicamente, a inspeção periódica do quadro elétrico, do conversor de frequência, das conexões e dos dispositivos de seccionamento e proteção elétrica. Essa inspeção deve ser feita a cada três meses ou sempre que ocorrer a inspeção de outros componentes do sistema.



Antes de fazer a inspeção do quadro elétrico, desligar os disjuntores seccionadores.

Atividade 1. Inspeção visual do quadro elétrico	
<p>Procedimento Verificar o estado de conservação do quadro elétrico, da borracha de vedação e dos prensa-cabos.</p> <p>Efeito Água da chuva e insetos podem danificar os componentes internos do quadro. Insetos podem criar colônias no interior do quadro</p> <p>Reparo Contatar o responsável pelo projeto para efetuar os devidos reparos e, se necessário, substituir o quadro elétrico.</p> <p>Frequência Trimestral ou sempre que ocorrer inspeção.</p>	
Atividade 2. Limpeza das grades de ventilação	
<p>Procedimento Verificar se há acúmulo de poeira ou presença de vegetação, insetos ou outros animais obstruindo as grades de ventilação do quadro.</p> <p>Efeito Redução da vida útil dos componentes eletrônicos devido ao superaquecimento.</p> <p>Reparo Desligar o sistema através dos disjuntores, <u>esperar 5 minutos</u> e desobstruir a ventilação.</p> <p>Frequência Trimestral ou sempre que ocorrer outro tipo de inspeção.</p> <p>Acessórios e materiais Pincel e pano seco de algodão.</p>	



Atividade 3. Reaperto de terminais e contatos do quadro elétrico

Procedimento

Conferir se há terminais de conexão soltos ou com mau contato.

Efeito

Paradas intempestivas do conversor de frequência e pontos quentes nos terminais.

Reparo

Desligar o conversor de frequência através do seccionamento dos disjuntores em c.c. e c.a. Fazer o reaperto dos contatos e conexões. Religar o sistema.

Frequência

Anual

Acessórios e materiais

Alicate universal, chaves Philips e de fenda, conforme as características dos parafusos.



3.2.3 Identificação de falhas no sistema de condicionamento de potência

As falhas ou erros no conversor de frequência são identificadas no *display* conforme quadro a seguir.

Falha 1. O display do conversor de frequência acusa erros

E00. Sobrecorrente

Causa

- Curto-circuito entre as duas fases do motor;
- Curto-circuito para o terra em uma ou mais fases de saída;
- Módulo de transistores IGBT em curto.

Diagnóstico

- Verificar se o erro acontece no horário das 10 às 15 h em dia ensolarado.
- Medir a continuidade elétrica do cabo que alimenta a motobomba.
- Retirar a motobomba e verificar seu funcionamento.

Solução

- Entrar em contato com o responsável pelo projeto para conserto ou substituição da motobomba.

E001. Sobretenção

Causa

- Tensão do gerador fotovoltaico elevada, pode danificar os capacitores do conversor de frequência.

Diagnóstico

- Medir a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico:
 $V_{oc} < 410 \text{ Vc.c.}$ ----- normal
 $V_{oc} > 410 \text{ Vc.c.}$ ----- risco de danos ao equipamento

Solução

- Desconectar um módulo fotovoltaico da série para diminuir o nível de tensão.



<p>E002. Subtensão</p>	<p>Causa: Baixo nível de irradiância.</p> <p>Diagnóstico - Este erro pode aparecer no começo e final de dias ensolarados ou em dias muito nublados, sem causar interferências no bombeamento. Somente será um problema, se o E002 aparecer em períodos de maior incidência solar (p.ex., entre 9 e 15 h de um dia ensolarado).</p> <p>Solução - Entrar em contato com o responsável pelo projeto para diagnóstico mais detalhado.</p>
<p>E004. Sobreaquecimento</p>	<p>Causa Ventoinha com defeito, grades de ventilação obstruídas, temperatura ambiente elevada.</p> <p>Diagnóstico - Verificar o estado das ventoinhas e das grades de ventilação. - Medir a temperatura ambiente (Ta), Se $T_a > 40^\circ\text{C}$ igual a erro.</p> <p>Solução: - Limpar as grades de ventilação. - Comunicar o responsável pelo projeto que deverá entrar em contato com a assistência técnica da WEG para substituição da ventoinha.</p>
<p>E005. Sobrecarga</p>	<p>Causa Corrente de partida do motor elevada.</p> <p>Diagnóstico - Verificar se o motor está travado. - Verificar se a corrente nominal de placa do motor é compatível com o parâmetro de corrente do conversor de frequência.</p> <p>Solução Entrar em contato com o responsável pelo projeto para conserto ou substituição da motobomba.</p>

Falha 2: Boia de controle de nível de água do reservatório com problemas.

A boia pode estar travada ou o cabo interrompido.

Procedimento

- Chacoalhar a boia, logo ligar o sistema e esperar cerca de 15 minutos. Executar esta operação no horário das 10 às 15 horas, com sol.
- Com multímetro, verificar se o contato da boia abre e fecha, se o contato não fechar, a boia deve ser trocada.
- Testar com o multímetro a continuidade elétrica do cabo (medir em uma das extremidades do cabo em quanto a outra deve permanecer temporariamente em curto-circuito), em caso de não apresentar continuidade o cabo deve ser trocado.





Falha 3: Divisor de tensão (componente queimado)

Procedimento

- Usando o multímetro medir a tensão em c.c. nos pontos 5 e 6 do conversor de frequência, o valor deve ser maior que 4 V em c.c.; se a tensão for zero, o componente deve estar com defeito e será necessária a substituição (ver item 4.2).

Nota: sempre antes de qualquer substituição desligue o sistema.



Falha 4: DPS (dispositivo de proteção contra surtos)

Procedimento

- Verificar a cor que aparece no visor que fica na parte frontal do DPS.

DPS FV: Branco (serviço), Vermelho (defeito).

DPS c.a.: Verde (serviço), Vermelho (defeito).



3.2.4 Troca de dispositivos do sistema

Reposição do conversor de frequência, divisor de tensão, DPS e boia de nível do reservatório

Procedimento

- Desligar todo o sistema.

- Antes de retirar o dispositivo com defeito deve-se identificar os cabos e sinalizá-los com fita (ou outro dispositivo) e numeração, de forma a manter a ordem dos cabos.



3.3 Grupo motobomba

As motobombas dos sistemas em questão são do tipo submersíveis (ou submersas) multiestágios, motor de indução trifásico, 220 V (figura 7 e tabela 5). Sua velocidade é controlada pelo conversor de frequência e bombeia água com vazão variável, em função da irradiância ao longo do dia.



Figura 7 – Motobombas multiestágio submersíveis.

Tabela 5 – Características técnicas das motobombas.

Característica técnica				
Localidades	Marca	Modelo	Estágios	Potencia (CV)
S. Jatobá de Cima.	Schneider	SUB10_05S4E6	06	0,5
Assentamento Carnaúba.	Dancor	2.1 SSR 11	11	0,75
Faz. Angico Grande	Leão	4R3-07	07	1,0
Faz. Lagoinha	Leão	4R4-06	06	0,7
Faz. Papagaio	Leão	4R4-09	09	1,5
Faz. Paus Pretos Cipós	Leão	4R4-09	09	1,5
Faz Serrinha	Leão	4R4-09	09	1,5

3.3.1 Manutenção preventiva do grupo motobomba

A motobomba não requer manutenção preventiva a não ser manter a integridade do poço.



3.3.2 Identificação de falhas e manutenção corretiva do grupo motobomba

Vários fatores podem afetar o normal funcionamento da motobomba como a qualidade da água, a estrutura do poço, o nível da água no poço, entre outros.

Falha 1. A motobomba não bombeia	
<p>Procedimento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Com o multímetro medir a tensão em c.a. (preferencialmente no horário das 10 às 14 h, com sol), ela deve oscilar, pois é proporcional à frequência de rotação do motor. - Chacoalhar a boia de nível do reservatório e aguardar cerca de 15 minutos para ver se volta a bombear. <p>Solução</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desligar todos os disjuntores. - Retirar a motobomba do poço. - Desconectar a mangueira. - Colocar a motobomba em um recipiente com água e testar o bombeamento em superfície (figura ao lado), este procedimento ajuda a verificar o estado da bomba e do poço. - Testar a continuidade dos cabos. <p>Se a motobomba não bombear, comunicar ao responsável pelo projeto para diagnóstico, conserto ou substituição por outra motobomba com as mesmas características elétricas e hidráulicas.</p>	

3.3.3 Reinstalação da motobomba

Atividade. Testes preliminares antes de reinstalar a motobomba	
<p>Procedimento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colocar a motobomba em um recipiente com água e testar o bombeamento em superfície (figura do item Falha 1.) - Ligar a motobomba (preferivelmente no horário das 10 às 14 h, com sol) e verificar o sentido de rotação do motor mediante a visualização do jato de água (maior jato, a rotação está correta; menor jato, a rotação está incorreta). - Se estiver incorreta, inverter a rotação do motor alterando a ordem de conexão dos cabos. - Com o multímetro medir a tensão em c.a., que deve oscilar, pois é proporcional à frequência de rotação do motor. - Após aferir o sentido de rotação e a medida de tensão, proceder a instalação da motobomba no poço. 	



3.4 Rede hidráulica

Os cuidados com a rede hidráulica são, basicamente, de conservação quanto a rupturas na tubulação, hidrômetro, conexões e chafarizes.

Atividade. Inspeção visual do estado da rede hidráulica	
<p>Procedimento Verificar a presença de vazamentos em toda a rede hidráulica superficial/visível e manchas de umidade no solo localizadas nas imediações da tubulação enterrada.</p> <p>Efeitos Além de acarretar perda de água, os vazamentos podem provocar problemas de erosão, lixiviação e salinização do solo, dependendo dos níveis de sais dissolvidos na água e o tipo de solo.</p> <p>Solução Reparar os vazamentos assim que forem localizados.</p> <p>Frequência A cada visita de inspeção.</p> <p>Acessórios e materiais Chaves de boca e grifo, cola para PVC, serra para tubos, veda rosca, conexões para reposição.</p>	

3.5 Obra civil

Assim como na rede hidráulica, os cuidados com a obra civil são, essencialmente, de conservação das instalações.

Atividade. Evitar a proliferação de insetos e outros animais	
<p>Procedimento Verificar a presença de ninhos de insetos e de outros animais, como roedores, nas proximidades ou internamente ao reservatório de água e barrilete da boca do poço.</p> <p>Efeitos Pode causar danos ao módulo, quadro elétrico, acidentes pessoais e dificultar o acesso dos técnicos.</p> <p>Solução Retirada do ninho (evitar o uso de fogo, utilizar inseticida <i>spray</i> ou outro repelente), vedação dos orifícios, tanto na estrutura do gerador, quanto no barrilete da boca do poço.</p>	



<p>Frequência A cada visita de inspeção.</p> <p>Acessórios e materiais Inseticida <i>spray</i>.</p>	
---	--

4 Recomendações de segurança

4.1 Riscos em instalações e serviços com eletricidade

O uso inadequado de EPIs e a falta de procedimentos de segurança em instalações e serviços elétricos pode provocar graves acidentes. Os principais acidentes são o choque elétrico e o arco elétrico.

O **choque elétrico** ocorre quando o corpo humano é percorrido por uma corrente elétrica. A corrente elétrica que circula pelo corpo durante o choque é diretamente proporcional à diferença de potencial submetida e inversamente proporcional à resistência elétrica do corpo. Quanto maior o valor da corrente, maiores são as complicações decorrentes do choque elétrico, dentre elas, queimaduras profundas com destruição dos tecidos e fibrilação cardíaca, provocada pelas contrações desordenadas do músculo cardíaco, com risco de morte.

O **arco elétrico** ocorre quando há a passagem de corrente elétrica por um meio não condutor devido ao rompimento de suas características isolantes. Envolve as partes metálicas sujeitas à diferença de potencial, que não estão em contato direto. Os arcos elétricos provocados pelo curto-circuito produzem uma forte explosão desprendendo partículas incandescentes a elevadas temperaturas, que podem ocasionar lesões como queimaduras de pele, perda da visão e óbito.

4.2 Equipamentos de Proteção Individual (EPI)

Devido ao risco envolvido em instalações e serviços elétricos, é obrigatório o cumprimento da norma NR10 que inclui a utilização de equipamento de proteção individual (EPI) adequados às atividades desenvolvidas. Os principais EPIS são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Equipamentos de Proteção Individual.

EPI	
Capacete Protege a cabeça contra queda de objetos e diminui o risco de choque elétrico.	
Botas de proteção: Botas reforçadas e isolantes, protegem os pés e diminui o risco de choque elétrico.	
Óculos de segurança: Protegem os olhos do operador, evitando que partículas voláteis provenientes de faíscas ou poeira impactem diretamente os olhos.	
Luvas de borracha: Destinado a proteção do operador contra choque elétrico, provenientes de contato direto com condutores ou equipamentos energizados. Devem possuir tensão de isolamento mínima de 1.000 V.	

4.3 Medidas de segurança a serem adotadas na realização de tarefas de operação e manutenção de sistemas de bombeamento fotovoltaico

Apesar das pequenas potências envolvidas nos sistemas de bombeamento de Serra Talhada, a associação dos módulos pode fornecer níveis letais de corrente e tensão. O Gerador fotovoltaico apresenta tensões em circuito aberto (Voc) que atingem 420 Vc.c. Dessa forma, os procedimentos de operação e manutenção devem ser realizados por pessoal habilitado e treinado conforme a norma NR-10.

Os procedimentos citados a seguir devem ser cuidadosamente observados sempre que uma manutenção for necessária.



a) Antes de iniciar os trabalhos em locais com instalações elétricas, qualquer objeto pessoal metálico (cordão, relógio, anel, etc.) deve ser retirado.



b) Os módulos fotovoltaicos produzem energia elétrica sempre que alguma luz incide sobre eles. Podem ser desenergizados desde que a superfície frontal seja coberta com material que impeça a passagem de luz.



c) Durante a manutenção, o técnico deve manter-se isolado das partes energizadas do circuito. Usar luvas e calçados isolantes específicos.



d) As extremidades de empunhadura das ferramentas metálicas usadas durante a manutenção elétrica devem estar adequadamente isoladas (revestimento isolante de alta resistência e com nível de isolamento maior a 1.000 V).



5 Formulário de Inspeção

Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia Nacional – Zona Rural de Pernambuco” P&D CELPE 43-1111/2011

Executor da inspeção			
Comunidade			
Leitura do hidrômetro (m³)		Data	
	Inspeção visual	✓	Observações
Gerador Fotovoltaico	Sujeira nos módulos fotovoltaicos		
	Módulo com defeito (vidro quebrado)		
	Sombreamento do gerador		
	Vegetação de porte alto		
	Problemas na estrutura de sustentação		
	Presença de insetos no gerador		
Quadro Elétrico	Estado do quadro elétrico		
	Obstrução das grades de ventilação		
	Estado dos terminais do quadro		
	Presença de insetos no quadro elétrico		
	Estado do DPS (cor do visor)		
Obra Civil e Rede Hidráulica	Vazamentos na tubulação		
	Vazamento no reservatório		
	Estado do chafariz/torneiras		
	Estado do hidrômetro		
	Presença de animais no barrilete da boca do poço ou no reservatório		
	Estado da base do reservatório		



6 Relatório de Falhas

Sistemas de Bombeamento de Água com Sistemas Fotovoltaicos e Tecnologia Nacional – Zona Rural de Pernambuco” P&D CELPE 43-1111/2011

Executor da inspeção			
Comunidade			
Leitura do hidrômetro (m³)		Data	

1. Gerador fotovoltaico

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de circuito aberto		V c.c.

2. Quadro elétrico

Parâmetro	Valor	Unidade
*Erro no display do conversor de frequência		-
Corrente de saída de alimentação do motor (P003)		A c.a.
Tensão de operação do gerador fotovoltaico (P004)		V c.c.
Frequência de alimentação do motor (P005)		Hz
Tensão de alimentação do motor (P007)		V c.a.
Temperatura do conversor de frequência (P008)		(°C)
Tensão do divisor de tensão (pinos 5 e 6)		V c.c.

* Verificar a especificação do erro no manual do conversor de frequência

3. Outros testes

Tipo	✓	Observação
Funcionamento da motobomba fora do poço		
Teste de continuidade elétrica da boia		
Verificação da capacidade do poço		

Anexo II – Descrição do kit demonstrativo de um sistema fotovoltaico de bombeamento

Construção de um kit demonstrativo de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água

Nádia Coelho Pontes
Roberto Valer

Introdução

Devido a suas características de geração in loco, a energia solar fotovoltaica pode ser utilizada em comunidades isoladas com problemas de abastecimento de água.

Um empecilho comum na implantação desse tipo de sistema de bombeamento é a pouca capacitação de pessoas para operá-los. Tanto esse grupo, quanto o de potenciais usuários desse tipo de sistemas seriam bastante beneficiados com projetos que visassem disseminar a informação relacionada a esse tipo de tecnologia.

Com essa motivação principal, o presente trabalho teve como proposta a construção de um pequeno kit demonstrativo do uso de energia fotovoltaica para o bombeamento de água. Três diretrizes foram adotadas para o desenvolvimento do kit: o kit devia mostrar os diversos elementos de um sistema real, devia poder ser transportado com facilidade e devia ter uma operação simples.

Descrição de kit demonstrativo

De acordo com Fedrizzi (2003), os componentes básicos de um sistema fotovoltaico de bombeamento (SBFV) são: gerador fotovoltaico, dispositivo de condicionamento de potência (inversor, controlador de bomba), conjunto composto por bomba hidráulica acionada por motor elétrico e reservatório de água (Figura 1). A ideia geral é que, nos períodos de maior insolação, a água seja bombeada para um reservatório, onde será armazenada para uso posterior. Se o motor for de corrente alternada, deve-se adicionar um inversor para fazer a comunicação do gerador com o motor. Caso este seja de corrente contínua, não é necessário; pode-se fazer um acoplamento direto.

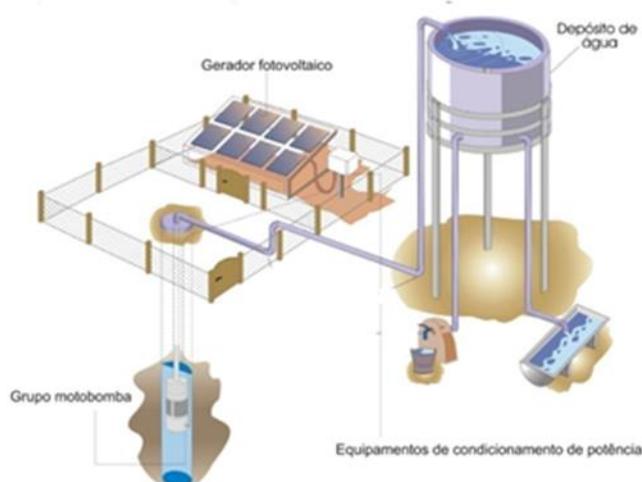


Figura 1 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico de abastecimento de água.

Por ter o intuito de possibilitar a demonstração de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, uma característica primordial do modelo é sua portabilidade. Assim, as duas partes, de acordo com as quais se desenvolveu a construção do KIT (gerador fotovoltaico e parte hidráulica), foram feitas fisicamente separadas, de forma que facilitasse o transporte. Dessa forma, os componentes da bancada são: dois reservatórios plásticos, bomba centrífuga de pequeno porte em c.c., manômetro, hidrômetro e conexões hidráulicas. O gerador fotovoltaico, por sua vez, consiste numa estrutura metálica com seguimento manual e um módulo fotovoltaico.

a) Reservatórios Plásticos

Os reservatórios simulam um poço, ou local de retirada da água, e uma caixa d'água, ou local de destino da água. Ambos possuem volume aproximado de 5L. É necessário fazer testes para se certificar que não há vazamentos por eventuais arranhões, especialmente se os reservatórios forem reutilizados (como foi o caso). Os pontos que apresentaram vazamento foram recobertos com cola epóxi (Araudite).



Figura 2 - À direita, reservatório de origem da água (modelo de poço). À esquerda, reservatório de destino da água (modelo de caixa d'água).

b) Bomba centrífuga

A bomba utilizada, da marca Comet, é de superfície, ou seja, não pode ser utilizada submersa no reservatório. É necessária uma tensão de 12 Vc.c. e corrente de aproximadamente 2,2 A para sua alimentação. A bomba consegue bombear até uma altura de recalque de 5 m, mas na montagem, trabalhou-se com 0,75m. A altura de sucção, por outro lado, é pequena, e portanto, o poço tem que estar no mesmo plano da bomba.



Figura 3 - Bomba de superfície utilizada na montagem.

c) Manômetro

O manômetro utilizado foi analógico, com fundo de escala de 4 kgf/cm² (3,9e-1 MPa).



Figura 4- Manômetro analógico utilizado na montagem.

d) Hidrômetro

Para visualizar a vazão de água, foi adicionado à estrutura hidráulica um hidrômetro digital 552059 da marca Conrad, alimentado por uma bateria interna. O mostrador indica na parte superior a vazão instantânea, e na parte inferior, a vazão acumulada, i. e., todo o volume de água registrado desde o começo da marcação - que pode ser reconfigurado pelo botão inferior direito.



Figura 5 - Hidrômetro digital utilizado na montagem.

e) Disjuntores

Para comunicar o módulo com o sistema da bancada, foram adicionados dois disjuntores. O primeiro faz a ligação entre o módulo e a bomba. O segundo foi colocado para deixar a possibilidade de outra fonte de alimentação, para situações que não há sol. Além disso, os conectores adicionados possibilitam a conexão de aparelhos de medição, como amperímetros e multímetros.



Figura 6 - Par de disjuntores e terminal de plástico utilizados na montagem.

f) Módulo

O gerador fotovoltaico utilizado na montagem foi um YGE 55 series da marca YINGLI. A potência de saída nominal sob as condições padrão é de 55 Wp, com tensão de circuito aberto 17,83 V e corrente de curto circuito de 3,08 A.



Figura 7 – Módulo fotovoltaico utilizado na montagem.

g) Suporte metálico

O desenvolvimento da estrutura de suporte do módulo foi uma parte importante do projeto. Era importante que, mesmo sendo firme e resistente para fornecer segurança nos momentos de exposição, fosse também portátil e permitisse versatilidade. Assim, pensou-se numa estrutura de alumínio, que facilitaria o transporte devido ao pequeno peso.

Além disso, foi desenvolvido um mecanismo de rotação que permite mudar o ângulo de inclinação do módulo, de forma a facilitar a demonstração da influência desse fator na produção de energia fácil. A possibilidade de rotação do módulo permite uma disposição vertical que também facilita o transporte. Na base da estrutura foram instaladas rodas que também facilitam a utilização.

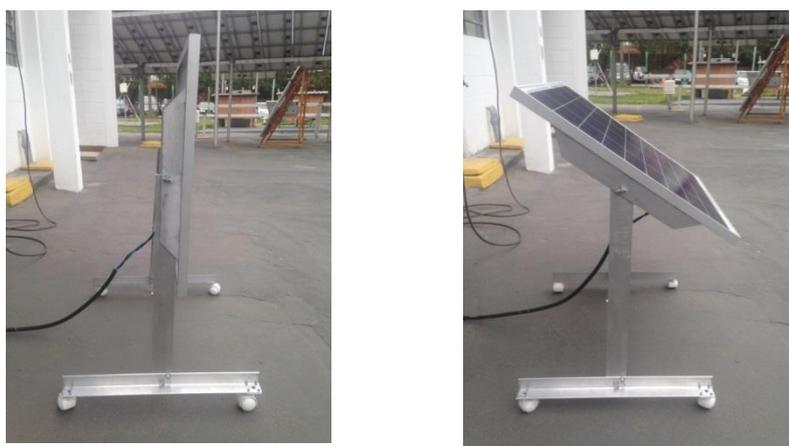


Figura 8 - À esquerda, vista lateral do suporte, como o módulo na posição vertical. À direita, vista lateral do suporte com o módulo inclinado.

Operação do kit

A utilização do kit é simples e intuitiva. Os instrumentos de bancada já estão configurados para o uso, e, portanto, o manuseio da bancada e do módulo para uma melhor demonstração permitem variações nas condições de bombeamento, por exemplo, sombreamento e inclinação do módulo, fluxo de passagem da torneira, entre outras possíveis variáveis. Os passos para a utilização são os seguintes:

1º) Posicionamento

Deve-se encontrar um local que permita tanto o apoio estável e equilibrado da bancada quanto um acesso de no máximo 3.5 m de distância do módulo, que precisa estar em um lugar que tenha incidência solar.

2º) Carregamento do reservatório

Antes de ligar os disjuntores, é necessário acrescentar a água no reservatório de origem. O volume de água ideal é entre 5 e 7 litros, que permite uma visualização mais expressiva do funcionamento. A adição da água pode ser feita através de uma mangueira, ou de um recipiente com saída afunilada, pois o orifício de acesso tem diâmetro de 4,5 cm.

É importante certificar-se que a água utilizada não contém impurezas que possam danificar a bomba ou a tubulação.

3º) Acionamento do disjuntor

Uma vez preparada a bancada e posicionado o módulo, é possível ligar o disjuntor e perceber o funcionamento do sistema. Caso se queira um funcionamento contínuo, é importante deixar a conexão entre os reservatórios aberta e o reservatório de origem da água destampado, para que não haja diferença de pressão suficiente que pode deformar os recipientes.

Para uma melhor visualização do processo, é bom fazer algumas alterações nas condições durante o funcionamento da bomba e perceber como ela se altera. É possível mudar a inclinação do módulo (e assim a incidência de luz); diminuir a irradiância (sombreando algumas células); modificar a vazão de saída (abrindo ou fechando mais a torneira), etc.

4º) Descarregamento do reservatório

Após o término da exposição, é necessário evacuar a água para evitar o acúmulo de microorganismos. Essa ação pode ser feita acoplando uma mangueira média ao terminal da torneira e ligando a bomba. A água remanescente nos reservatórios, o volume abaixo do orifício de conexão, pode ser retirada manualmente, inclinando a bancada, ou utilizando um sifão.

Conclusões e considerações finais

A operação desse kit demonstrativo é simples e intuitiva. A pressão de operação pode ser ajustada de forma variável com a irradiância. Além disso, sob boas condições de irradiância, o volume inicial de $\frac{3}{4}$ do total do reservatório proporciona um bom fluxo de operação. Essa quantidade também depende da irradiância, sendo diretamente proporcional a ela.

Dessa forma, tem-se um kit facilmente operável, que simula o bombeamento de água com uso exclusivo de energia solar fotovoltaica.

As demonstrações durante as visitas ao laboratório mostram a efetividade como ferramenta didática.

Referências Bibliográficas

Fedrizzi, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão**. São Paulo, Brasil: Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2003.