

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

**A UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE  
BOMBAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS  
PROPRIEDADES RURAIS**

**LUIS ROBERTO VALER MORALES**

**SÃO PAULO**

**2011**

LUIS ROBERTO VALER MORALES

A UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO PARA  
IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física) para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

SÃO PAULO

2011

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

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Valer Morales, Luis Roberto.

A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais / Luis Roberto Valer Morales; orientador Roberto Zilles.—São Paulo, 2011.

f.170.: il.: 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo

1. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento 2. Usos produtivos de energia 3. Irrigação

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

**LUIS ROBERTO VALER MORALES**

*“A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em  
pequenas propriedades rurais”*

Dissertação aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Roberto Zilles – PPGE/USP  
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. João Tavares Pinho – UFPA

Prof. Dr. Heitor Scalabrini Costa - UFPE

## **DEDICATÓRIA**

À minha querida família, pais, irmãos e tios por todo o apoio que me deram nesta nova etapa e a Carolina, meu amor, pela companhia nos momentos mais difíceis e alegres.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto Zilles, pela orientação, incentivo e apoio constante.

À Dra Cristina Fedrizzi e aos outros membros da equipe do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP): André, Aimé, Marcelo, Teddy, Daniel, Ricardo e Joaquim.

Ao Prof. Dr. Raul Sapiain e sua equipe da *Universidad de Tarapacá* (UTA) - Chile e à Carolina Barreto da *Massachusetts Lowell University* pelo apoio durante as visitas aos projetos.

Aos membros do Projeto Pintadas; Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis; Instituto Eco Engenho; Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba e Instituto Joazeiro pela colaboração com os questionários e informação sobre os projetos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT- EREEA) pelo auxílio econômico que permitiu o desenvolvimento da dissertação.

À minha família pelo incentivo para fazer o mestrado e pelo apoio para realizar este sonho.

À Carolina, minha namorada, por sua companhia e apoio constante.

Aos amigos e colegas do programa de mestrado, pelo companheirismo durante as aulas e as longas jornadas de estudo.

Aos companheiros de república e USP: Alberto, Carlos, Daniel, Elvis, Ivan, Lenin, Liz, Javier, Jorge, Milagros, Pablo, Tina e Wilbert, pelos bons momentos de convivência.

Aos amigos que me apoiaram à distância; ao Dr. Manfred Horn, Eng. Rafael Espinoza e meus ex-companheiros de trabalho do *Centro de Energias Renovables de Universidad Nacional de Ingenieria* e do *Grupo de Apoyo al Sector Rural*, meus companheiros de colégio e faculdade.

## RESUMO

**Valer Morales, Luis Roberto. A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais.** 2011. 170p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

Projetos piloto com sistemas fotovoltaicos de irrigação foram implementados ao redor do mundo para avaliar a confiabilidade e a viabilidade desta aplicação frente a outras opções de bombeamento. O presente trabalho dedicou atenção à compilação de informações sobre projetos com sistemas fotovoltaicos de bombeamento para uso na irrigação. A partir dessa compilação foi realizada uma síntese das experiências com identificação das principais barreiras e potencialidades de seu uso no Brasil. Levando em conta as lições aprendidas em projetos anteriores, o trabalho é finalizado com recomendações e orientações para implantação de projetos de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais.

**Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos de bombeamento, Usos produtivos de energia, Irrigação.**

## **ABSTRACT**

**Valer Morales, Luis Roberto. Use of photovoltaic pumping systems in irrigation for small rural properties. 2011. 170 p. M.Sc. Diss. Post-Graduate Program in Energy. University of São Paulo, São Paulo.**

Pilot projects with photovoltaic irrigation systems have been implemented around the world to evaluate the reliability and feasibility of this application. This paper has devoted attention to compiling information about projects with photovoltaic pumping systems for use in irrigation. From this compilation, a synthesis of experience, the key barriers and the potential for their use in Brazil were made. Taking into account the lessons learned in previous projects the work shows recommendations and guidelines for implementation of projects for photovoltaic pumping systems for irrigation on small farms.

**Keywords: Photovoltaic Pumping systems, Productive uses of energy, Irrigation**

## SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS**  
**LISTA DE TABELAS**  
**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
Caracterização do problema .....	1
Objetivo geral .....	3
Objetivos específicos .....	3
Metodologia utilizada .....	4
<b>CAPÍTULO 1 - USO PRODUTIVO DA ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>6</b>
1.1 Panorama atual da produção de energia elétrica no mundo .....	6
1.2 Panorama atual de acesso à energia elétrica no mundo .....	7
1.3 Uso produtivo da energia.....	12
1.4 Panorama atual da energia fotovoltaica e seu uso em aplicações produtivas.....	15
<b>CAPÍTULO 2 - IRRIGAÇÃO COMO MEIO DE DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>21</b>
2.1 Agricultura como eixo para o desenvolvimento.....	21
2.2 Irrigação.....	22
2.2.1 Sistemas de irrigação .....	23
2.2.1.1 Irrigação superficial.....	23
2.2.1.2 Irrigação por aspersão.....	23
2.2.1.3 Irrigação localizada.....	24
2.2.2 Seleção do sistema de irrigação.....	24
2.2.2.1 Características do manancial .....	25
2.2.2.2 Qualidade de água .....	26
2.2.2.3 Características do solo .....	26
2.2.2.4 Topografia .....	27
2.2.2.5 Clima .....	27
2.2.2.6 Características de cultura.....	28
2.2.2.7 Capital de investimento .....	28
2.2.2.8 Mão de obra .....	28
2.2.2.9 Fonte de energia disponível.....	29
2.2.2.10 Questões políticas, sociais e ambientais .....	29
2.2.3 Problema da água na irrigação.....	29
2.2.3.1 Problema da água na irrigação brasileira.....	32
2.3 Irrigação localizada.....	34
2.3.1 Tipos de sistemas de irrigação localizada.....	35
2.3.1.1 Irrigação por gotejamento.....	35
2.3.1.2 Microaspersão.....	35
2.3.1.3 Sistema Xique-xique.....	36
2.3.2 Componentes de um sistema de irrigação localizada .....	36
2.3.2.1 Cabeçal de irrigação .....	36
2.3.2.2 Sistema de distribuição.....	37
2.3.2.3 Emissores.....	37
2.4 Sistemas de bombeamento .....	37

2.4.1	Sistemas fotovoltaicos de bombeamento.....	38
2.4.2	Sistemas de bombeamento com motores de combustão interna.....	39
2.4.3	Sistemas de bombeamento que utilizam a rede elétrica convencional.....	39
2.4.4	Sistemas eólicos de bombeamento .....	39
2.4.5	Sistemas de bombeamento manuais .....	40
<b>CAPÍTULO 3 – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE IRRIGAÇÃO (SFVI) .....</b>		<b>41</b>
3.1	Projetos com SFVI no mundo. ....	41
3.2	Projetos com SFVI no Brasil .....	44
3.3	Sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação .....	46
3.3.1	Gerador fotovoltaico.....	47
3.3.2	Conjunto motobomba .....	49
3.3.2.1	Motor .....	50
3.3.2.2	Bomba.....	51
3.3.3	Tipos de acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto motobomba. ....	53
3.3.3.1	Acoplamento direto .....	53
3.3.3.2	Acoplamento com baterias .....	54
3.3.3.3	Acoplamento com equipamentos de condicionamento de potência.....	54
3.3.4	Sistemas de armazenamento .....	56
3.3.4.1	Sistema de armazenamento com baterias .....	56
3.3.4.2	Sistema de armazenamento com reservatório .....	57
3.3.5	Sistema de irrigação.....	58
3.3.6	Tipos de acoplamento entre o conjunto motobomba e o sistema de irrigação.....	58
3.3.6.1	Acoplamento direto .....	59
3.3.6.2	Reservatório elevado conectado a um sistema de irrigação .....	59
3.3.6.3	Reservatório ao nível do solo com bombeamento adicional de impulsão.....	59
3.3.6.4	Acoplamento direto com baterias e sem reservatório de água .....	59
<b>CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO DOS PROJETOS ESTUDADOS.....</b>		<b>60</b>
4.1	Informações sobre projetos de bombeamento fotovoltaico instalados.....	60
4.1.1	Tailândia .....	60
4.1.2	México .....	61
4.1.3	Estados Unidos .....	63
4.1.4	Programa MEDA em Marrocos, Argélia e Tunísia.....	65
4.1.5	Brasil.....	66
4.2	Sistemas fotovoltaicos de irrigação visitados durante a elaboração do trabalho.....	68
4.2.1	<i>PVP Irrigation Pilot Project</i> (Chile) .....	68
4.2.2	Projeto Piloto em Turripampa, Huarmey – Peru .....	72
4.3	Experiências com sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil.....	76
4.3.1	Projeto do açude do Rio de Peixe em Capim Grosso (BA).....	77
4.3.2	Projeto H2SOL na comunidade de Traíras (AL).....	79
4.3.3	Projeto “Energia solar, uma alternativa para a pequena irrigação” (PB) .....	81
4.3.4	Projeto “Adapta sertão”(BA).....	84
4.3.5	Projeto de irrigação no Centro de Referência em Agricultura Urbana Sustentável (CE) .....	86
4.3.6	Projeto de irrigação para produção de alimentos orgânicos da Associação de Moradores do assentamento do imóvel de Maceió (CE).....	88

## **CAPÍTULO 5 – BENEFÍCIOS, BARREIRAS E POTENCIALIDADES ENCONTRADAS DURANTE A IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE IRRIGAÇÃO ..... 91**

5.1 Benefícios encontrados com os sistemas fotovoltaicos de irrigação.....	91
5.1.1 Redução de custos de operação .....	91
5.1.2 Mitigação dos riscos de perda de safra.....	91
5.1.3 Incremento da produção .....	91
5.1.4 Diversificação de culturas .....	92
5.1.5 Criação de empregos .....	92
5.1.6 Redução do tempo necessário para bombear água.....	92
5.1.7 Redução de impactos ambientais.....	92
5.1.8 Diminuição do êxodo rural .....	93
5.1.9 Segurança alimentar .....	93
5.2 Barreiras encontradas para a implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento na irrigação .....	93
5.2.1 Barreiras econômicas e financeiras .....	93
5.2.2 Barreiras informativas .....	95
5.2.3 Barreiras técnicas.....	95
5.2.4 Barreiras institucionais e regulatórias .....	97
5.2.5 Barreiras comerciais .....	98
5.3 Potencialidades para a implementação de sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil ..	98
5.3.1 Recurso solar e existência de dados confiáveis sobre o recurso.....	98
5.3.2 Existência de lugares sem acesso à rede elétrica e/ou com problemas de manutenção das bombas diesel e de fornecimento de combustíveis para sua operação.....	99
5.3.3 Diversificação da oferta local de sistemas fotovoltaicos de bombeamento e diminuição dos preços dos sistemas no mercado local.....	100
5.3.4 Existência de experiência com sistemas fotovoltaicos de bombeamento no Brasil ...	101
5.3.5 Aumento do uso de técnicas de irrigação localizada.....	101
5.3.6 Uso de fontes subterrâneas .....	103
5.3.7 Potencialidade de desenvolvimento da produção agrícola familiar no nordeste.....	103

## **CAPÍTULO 6 – RECOMENDAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO ..... 105**

6.1 Recomendações gerais para concepção e desenho do projeto com SFVI.....	105
6.1.1 Equipes multidisciplinares para o elaboração do projeto .....	107
6.1.2 Trabalho em conjunto com os futuros usuários.....	108
6.1.3 Trabalho em conjunto com entidades locais relacionadas com o setor agrícola, energético e afins .....	109
6.1.4 Regras claras e atingíveis com os beneficiários .....	109
6.1.5 Análise da cadeia produtiva, identificação de barreiras e solução dos problemas de logística e organização.....	109
6.1.6 Uso de lições já aprendidas em projetos anteriores e criação de uma base para projetos futuros .....	111
6.1.7 Utilização de equipamentos robustos e manutenção contínua. ....	112
6.2 Recomendações para seleção da configuração do sistema e dos equipamentos .....	112
6.2.1 Seleção da configuração e dos equipamentos do SFVI.....	115
6.2.2 Seleção do sistema de geração .....	117
6.2.3 Seleção do tipo de estrutura.....	117
6.2.4 Seleção do sistema de bombeamento .....	118
6.2.5 Seleção do sistema de condicionamento de potência e dispositivos de controle .....	118

6.2.6 Seleção do sistema de armazenamento.....	119
6.2.7 Seleção da cultura e tamanho da área de cultivo .....	119
6.2.8 Seleção do sistema de irrigação.....	120
6.2.9 Outros elementos .....	120
6.3 Recomendações para a instalação do sistema.....	121
6.3.1 Instalação dos módulos.....	122
6.3.2 Instalação do condicionador de potência e da motobomba .....	122
6.3.3 Instalação do reservatório de água.....	123
6.3.5 Instalação do sistema de irrigação .....	123
6.3.6 Instalação de outros equipamentos .....	123
6.4 Recomendações para a manutenção dos equipamentos .....	123
6.4.1 Manutenção preventiva.....	124
6.4.2 Manutenção corretiva .....	125
6.5 Recomendações para capacitação de beneficiários e técnicos .....	125
6.5.1 Capacitação dos usuários.....	126
6.5.2 Capacitação dos técnicos locais.....	127
6.6 Recomendações para a gestão e administração dos sistemas .....	127
6.7 Recomendações para a escolha do sistema de financiamento.....	128
6.8 Recomendações para o monitoramento e assistência técnica.....	130
6.9 Recomendações para a avaliação dos resultados.....	131
6.10 Recomendações para a difusão da tecnologia .....	132
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO A - QUESTIONÁRIO DE PESQUISA SOBRE PROJETOS DE IRRIGAÇÃO FOTVOLTAICA .....</b>	<b>145</b>
<b>ANEXO B – DIMENSIONAMENTO SIMPLIFICADO DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS DE IRRIGAÇÃO .....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO C – TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO.....</b>	<b>157</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento histórico da geração de energia elétrica.....	6
Figura 2 - Matriz energética mundial para a geração de energia elétrica.....	7
Figura 3 - População sem acesso à energia elétrica por região e tipo de zona, em milhões de habitantes.....	9
Figura 4 - Transição de consumo energético segundo o nível de renda.....	10
Figura 5 - Transição de consumo energético segundo o nível de renda.....	10
Figura 6 - Relação entre o acesso à energia elétrica e o percentagem de população em estado de pobreza. ....	11
Figura 7 - Relação entre o acesso à energia elétrica e o IDH.....	11
Figura 8 - Capacidade elétrica instalada com energias renováveis (sem incluir a capacidade instalada de hidroelétricas de grande porte) até o ano 2009 .....	16
Figura 9 - Produção mundial anual de células fotovoltaicas (MWp/ano).....	16
Figura 10 - Produção mundial acumulada segundo o tipo de aplicação .....	17
Figura 11 - Curva de aprendizado da tecnologia fotovoltaica.....	18
Figura 12 - Estado atual das eficiências e custos das células fotovoltaicas .....	19
Figura 13 - Consumo de água segundo o uso final no mundo, países desenvolvidos e em desenvolvimento.....	30
Figura 14 – Mapa da distribuição de regiões áridas e semiáridas no mundo .....	31
Figura 15 - Falta de sustentabilidade na agricultura irrigada no mundo .....	32
Figura 16 - Polígono das secas .....	33
Figura 17 - Sistemas fotovoltaicos de bombeamento utilizados para irrigação de oliveiras em Jaén, Espanha .....	43
Figura 18 - Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento com aplicações para consumo humano, animal e irrigação.....	47
Figura 19 - Configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento .....	50
Figura 20 - Faixas de utilização de bombas fotovoltaicas.....	52
Figura 21 - Configurações de reservatório segundo a elevação .....	58
Figura 22 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados na Tailândia .....	61
Figura 23 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no México.....	62
Figura 24 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Wyoming – USA.....	64
Figura 25 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no projeto MEDA.....	66
Figura 26 – Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no marco do PRODEEM.....	67
Figura 27 - Paisagens típicas do vale de Vitor .....	69
Figura 28 - Sistema fotovoltaico de irrigação com tanque elevado .....	70
Figura 29 - Sistema fotovoltaico de irrigação sem reservatório de água.....	70
Figura 30 - Vista do poço do sistema sem reservatório com presença de um gerador diesel auxiliar.....	71
Figura 31 – Cabeçal de irrigação com sistema de filtragem e sistema de fertirrigação .....	71
Figura 32 - Fitas de irrigação usadas na produção de cebola .....	72
Figura 33 - Cata-vento e biodigestor com excrementos de porquinho-da-índia .....	72
Figura 34 - Exemplos da poluição produzida pelo uso de motores de combustão interna.....	73
Figura 35 - Gerador fotovoltaico de 250 Wp .....	74

Figura 36 - Conjunto motobomba .....	74
Figura 37 - Sistema de condicionamento de potência e baterias .....	75
Figura 38 - Cabeçal de irrigação com sistema de pressurização e filtragem.....	75
Figura 39 - Reservatórios elevados .....	76
Figura 40 - Sistema de irrigação por gotejamento para aspargo e abacate.....	76
Figura 41 - Sistema fotovoltaico de bombeamento sobre base flutuante instalado em Capim Grosso.....	78
Figura 42 - Sistema fotovoltaico de bombeamento organopônico em Baixas (AL) .....	79
Figura 43 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado em Traíras (AL).....	80
Figura 44 - Beneficiários com a melancia produzida com o SFVI .....	81
Figura 45 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na estação experimental de Veludo, Itaporanga (PB) .....	82
Figura 46 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade de Condado (PB).....	83
Figura 47 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade Cruz da Menina, Patos (PB) .....	84
Figura 48 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade Pintadas (BA).....	86
Figura 49 - Instalação do sistema fotovoltaico de irrigação no Centro de Referência em Agricultura Urbana Sustentável .....	87
Figura 50 - Horta abastecida pelo SFVI e venda das mercadorias .....	87
Figura 51 - SFVI no Centro de Referência em Alimentação Sustentável para Redução de Desnutrição Infantil.....	88
Figura 52 - Gerador fotovoltaico .....	89
Figura 53 - Caixa de conexões, inversor e reservatório de água .....	89
Figura 54 - Horta abastecida pelo SFVI .....	90
Figura 55 - Polígono das secas e mapa de irradiação solar na mesma região .....	99
Figura 56 - Porcentagem relativa à comercialização de diferentes sistemas de irrigação pressurizados, no período de 2001 a 2007 .....	102
Figura 57 – Etapas do projeto.....	105
Figura 58 - Passos para a configuração do SFVI .....	113
Figura 59 - Configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água para irrigação .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - População sem acesso à energia elétrica por região e tipo de zona .....	8
Tabela 2 - Impactos da energia nos objetivos do milênio .....	13
Tabela 3 - Aplicações produtivas de SFV na agricultura .....	20
Tabela 4 - Condições determinantes na escolha de um método de irrigação .....	25
Tabela 5 - Comparação entre sistemas de bombeamento segundo a fonte .....	38
Tabela 6 - Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados até 2002 no Brasil .....	66
Tabela 7 - Lista de instituições que avaliam equipamentos dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento .....	96
Tabela 8 - Participação de instituições educativas brasileiras na pesquisa sobre SFVI.....	97
Tabela 9 - Área (hectares) irrigada segundo o método de irrigação no Nordeste .....	102
Tabela 10 - Fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais .....	106
Tabela 11 - Configurações mais comuns de motobombas e sistemas de condicionamento de potência para varias faixas de potência. ....	116
Tabela 12 - Configurações mais comuns de acoplamento entre o reservatório de água e o sistema de irrigação localizada.....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

BREED - *Brazil Rural Energy Enterprise Development Program*

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia

EMATERCE - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Governo do Estado do Ceará

EMEPA - Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba

FAO - *Food and Agriculture Organization*

GLP - Gás liquefeito de petróleo

GTZ - *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (hoje GIZ)

IDER - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IEA - Internacional Energy Agency

LSF-IEE - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia

MEDA - Programa de Bombeamento Fotovoltaico em países Mediterrâneos Região Mediterrânea de Marrocos, Argélia e Tunísia

MPPT - *Maximum Power Point Tracking*

NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

NCM - Nomenclatura Comum do Mercosul

MME - Ministério de Minas e Energia

PRODEEM - Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

REN21 - *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*

SFV - Sistemas Fotovoltaicos

SFVB - Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento

SFVI - Sistemas Fotovoltaicos de Irrigação

USAID - *United States Agency for International Development*

## INTRODUÇÃO

### Caracterização do problema

Muitos moradores de comunidades rurais não contam com serviços básicos essenciais como energia elétrica, água potável e esgoto<sup>1</sup>. Tal falta de condições e oportunidades para o desenvolvimento motivam os moradores rurais a buscarem melhores condições de vida migrando para centros urbanos, o que resulta em novos problemas sociais (aumento das taxas de desemprego, criminalidade e crescimento desordenado das cidades com insuficiência de serviços básicos para esta população, etc.).

Diversos estudos sugerem que o uso de fontes de energia de maneira confiável e acessível é uma condição necessária para o desenvolvimento econômico das comunidades rurais. No entanto o acesso à essa energia não é uma condição suficiente para incremento da qualidade de vida. (ALLERDICE; ROGERS, 2000; WEINGART; GIOVANNUCCI, 2003; MEADOWS et al., 2003; CABRAAL; BARNES; AGARWAL, 2005). Por isso, além de fornecer energia elétrica, é necessário realizar uma serie de ações complementares que permitam o desenvolvimento local para a melhora da qualidade de vida dos habitantes das regiões rurais.

A agricultura é uma fonte de sobrevivência para quase 86% dos habitantes da zona rural no mundo e proporciona emprego a 1,3 bilhões de pequenos agricultores (BANCO MUNDIAL, 2007). Portanto, é preciso ver que problemas existentes podem ser resolvidos com o uso da energia. Por exemplo, um problema comum em comunidades rurais de regiões áridas e semiáridas é a falta de acesso à quantidades suficientes de água para abastecer a demanda das culturas agrícolas. De fato, a água é o maior fator limitante para a produção agrícola (KENDALL; PIMENTEL, 1994).

---

<sup>1</sup> Encontram-se entre elas as dificuldades técnicas e econômicas de fornecimento dos serviços básicos em regiões isoladas em razão das condições geográficas (discutidas na seção 1.3) e a falta de interesse de alguns governos por mudar esse panorama.

O bombeamento com sistemas fotovoltaicos apresenta-se como uma das aplicações mais competitivas dos sistemas fotovoltaicos isolados, particularmente por não necessitar uso de baterias.

Neste sentido, o uso da energia fotovoltaica em bombeamento de água para irrigação é uma aplicação produtiva da energia, que pode servir para reduzir a limitante hídrica existente em localidades onde outras fontes de energia não estão disponíveis ou seu fornecimento é difícil ou insuficientemente confiável. É importante destacar a complementaridade que tem o uso da energia fotovoltaica com a irrigação, porque a época de maior demanda de água coincide com a época de maior quantidade de radiação solar e, além disso, as regiões áridas que apresentam as maiores necessidades de água também são aquelas que têm a maior quantidade de radiação solar disponível.

Sistemas fotovoltaicos podem ser usados para irrigação de culturas, possibilitando uma série de benefícios econômicos para famílias produtoras rurais. Do ponto de vista técnico, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento não são muito diferentes de outros sistemas de bombeamento elétrico, diferenciam-se pelo uso do sol como fonte de energia. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento não dependem de fontes combustíveis, apresentam baixa necessidade de manutenção de seus equipamentos, facilidade de instalação e reduzido impacto ambiental durante sua operação. Em contraposição, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento têm custos iniciais relativamente mais altos que outros sistemas e sua produtividade depende do recurso solar, que está diretamente relacionado com as condições meteorológicas. Adicionalmente a isso, em muitos lugares é difícil adquirir peças de reposição ou ter mão de obra qualificada para a reparação dos equipamentos do sistema.

A tecnologia fotovoltaica de bombeamento não é novidade no Brasil. Até o ano 2002 foram instalados pelo menos 3.291 sistemas fotovoltaicos de bombeamento com uma potência total de 1,5 MWp<sup>2</sup> (FEDRIZZI, 2003). O uso principal desses sistemas é o abastecimento de água potável para consumo humano. Uma análise da situação dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Brasil mostra que ainda há um longo caminho para desenvolvimento e transferência desta tecnologia aos beneficiários.

---

<sup>2</sup> O Wp (Watt pico) é uma unidade de potência padrão específica da tecnologia solar fotovoltaica que representa a potência entregue por um módulo fotovoltaico nas condições padrão de medida (STC – Standard Test Conditions): irradiância de 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula de 25 °C e massa de ar de 1,5.

Já há algumas experiências de irrigação de hortas e pequenos plantios com sistemas fotovoltaicos de bombeamento. No entanto, este uso não é tão difundido quanto os sistemas de abastecimento de água para consumo doméstico e os resultados obtidos com essas poucas experiências são diversos. Por essa razão, é necessário estudar as experiências existentes, para conhecer as limitações e potencialidades desta aplicação.

Para uma melhor compreensão do panorama atual desta tecnologia é importante responder as seguintes questões:

- Qual é a situação atual dos sistemas fotovoltaicos de irrigação implementados ao redor do mundo?
- Que equipamentos e configurações são as mais adequadas para a implantação desse tipo de sistema?
- Que outros benefícios, além do econômico, podem ser obtidos com esse tipo de projetos e quais são os fatores chaves para a obtenção dos mesmos?
- Que impactos podem ser produzidos pela implementação dos sistemas fotovoltaicos de irrigação?
- Como fazer com que os sistemas fotovoltaicos de irrigação sejam tecnologias apropriadas para o desenvolvimento local?
- Quais são as principais recomendações para implantação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação?

### **Objetivo geral**

A partir da análise e revisão das experiências realizadas no Brasil e em outros países, identificar e caracterizar as principais barreiras e potencialidades para o uso de sistemas fotovoltaicos de irrigação e propor orientações para futuros projetos com essa tecnologia.

### **Objetivos específicos**

- Pesquisar o desempenho de projetos com sistemas fotovoltaicos de irrigação implementados em vários países.
- Identificar as condições necessárias para viabilizar financeiramente os projetos de irrigação fotovoltaica.

- Estudar a existência de impactos positivos na atividade agrícola e na qualidade de vida dos beneficiários com o uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação e a existência de possíveis impactos negativos.
- Identificar as condições necessárias para maximizar os impactos positivos e minimizar os impactos negativos do uso produtivo da energia fotovoltaica em aplicações de irrigação.

### **Metodologia utilizada**

Para a obtenção dos objetivos propostos, foram feitas visitas em dois projetos com sistemas fotovoltaicos de irrigação (um no Peru e outro no Chile) com a finalidade de conhecer a tecnologia e o impacto do projeto nas localidades beneficiadas.

Paralelamente foram identificados casos exitosos e problemáticos, mediante uma revisão bibliográfica sobre o tema em questão, com ênfase em experiências de implementação de sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil. Uma vez identificadas as diversas instituições privadas e públicas que trabalham na área de irrigação fotovoltaica, foi enviado um questionário elaborado pelo autor, como ferramenta de coleta de dados. O questionário continha perguntas relacionadas aos seguintes aspectos (Ver Anexo A):

- Localização do projeto.
- Sistema de transferência tecnológica (financiamento, organização, capacitação e operação) e participação dos beneficiários no processo.
- Características técnicas do sistema fotovoltaico de irrigação.
- Impactos positivos e negativos do uso da tecnologia.
- Barreiras encontradas e superadas.
- Lições aprendidas.

Com os dados coletados em forma primária e secundária, foi realizada uma síntese e uma proposta de diretrizes para a implementação de projetos com sistemas fotovoltaicos de irrigação.

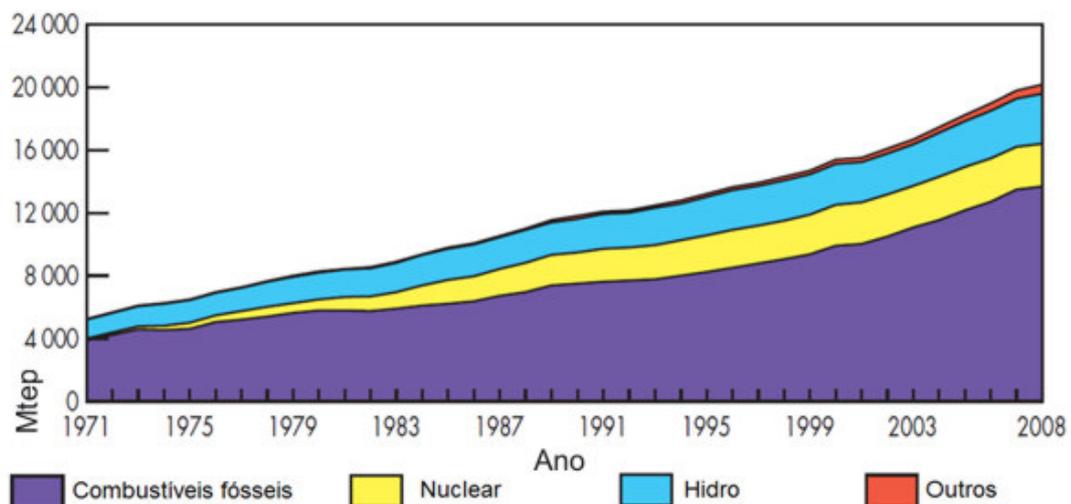
O capítulo 1 discorre sobre a importância do uso da energia como condição para o desenvolvimento de comunidades rurais, especialmente quando seu uso está dirigido a uma atividade econômica. O capítulo 2 faz uma introdução ao leitor dos conceitos básicos relacionados com a irrigação, os tipos de sistemas de irrigação e de bombeamento existentes e as vantagens e desvantagens de cada um deles. O capítulo 3 mostra as diferentes configurações e os equipamentos existentes em um sistema fotovoltaico de irrigação: sistema de geração, sistema de condicionamento de potência, conjunto motobomba e sistema de irrigação localizada. O capítulo 4 apresenta alguns dos projetos implantados ao redor do mundo com sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação, cuja informação foi obtida de artigos científicos e questionários preenchidos por alguns de seus responsáveis. O capítulo 5 apresenta os impactos encontrados pelo uso dos Sistemas Fotovoltaicos de Irrigação, SFVI, assim como as barreiras e potencialidades existentes no Brasil para a implementação desta tecnologia. O capítulo 6 apresenta algumas recomendações para a implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento visando sua aplicação para geração de renda e a obtenção dos benefícios relatados no capítulo anterior. Finalmente são apresentadas as conclusões resultantes da pesquisa e comentadas as contribuições da dissertação. O trabalho finaliza com sugestões e recomendações para futuros trabalhos de pesquisa e implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para uso na irrigação.

## CAPÍTULO 1 - USO PRODUTIVO DA ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo descreve-se a importância do uso da energia elétrica como condição para o desenvolvimento de comunidades rurais, especialmente quando se tem um uso produtivo focado em uma atividade econômica e a energia é produzida com sistemas fotovoltaicos. Com esse fim, apresenta-se o panorama atual da energia elétrica e de seu acesso no mundo, assim como do estado da arte da energia fotovoltaica.

### 1.1 Panorama atual da produção de energia elétrica no mundo

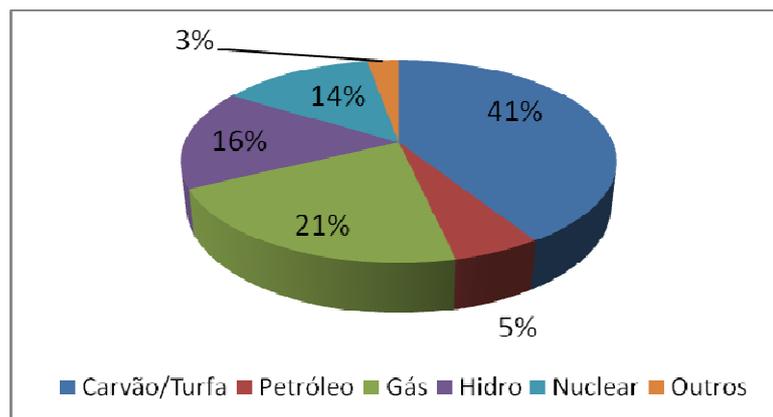
Historicamente, os combustíveis fósseis têm um papel importante na geração de energia elétrica, como é observado na figura 1. A energia nuclear começou a ser utilizada modestamente em meados da década de 1970 até quase se equiparar com a energia produzida com usinas hidrelétricas. Observa-se que outros tipos de fontes além das mencionadas têm pouca expressão no cenário atual.



**Figura 1 - Desenvolvimento histórico da geração de energia elétrica**

Fonte: (IEA, 2010a)

Atualmente no mundo, aproximadamente 81% da energia elétrica é produzida por fontes não renováveis como carvão, turfa, gás natural, energia nuclear e petróleo. Uma pequena porcentagem da energia elétrica é produzida por fontes não convencionais como a solar, eólica, biomassa moderna entre outros. A figura 2 apresenta, em percentuais, a utilização de cada fonte para a geração de energia elétrica em 2008.



**Figura 2 - Matriz energética mundial para a geração de energia elétrica**

Fonte: (IEA, 2010a)

Previsões para o futuro energético mostram a tendência de uma maior diversificação das fontes renováveis utilizadas, o aumento do uso de carvão e gás natural, e a diminuição do uso de petróleo para a geração de energia elétrica (IEA, 2010a). Essa situação é consequência da previsão de que em qualquer cenário futurista, o fornecimento de energia elétrica com qualidade e preço competitivo não seria sustentável se dependesse somente do petróleo<sup>3</sup>.

## 1.2 Panorama atual de acesso à energia elétrica no mundo

Ao analisar o panorama mundial atual de consumo de energia elétrica (Tabela 1), percebe-se a existência de grande diferença entre o acesso à energia elétrica entre os países em desenvolvimento e os países desenvolvidos economicamente, e entre os habitantes das zonas urbanas e rurais.

Regiões como a África subsaariana apresentam taxas de eletrificação de somente 14,3% em zonas rurais, o que somado ao número de pessoas da região urbana resulta em um total de 585 milhões de pessoas sem acesso à energia elétrica.

<sup>3</sup> A falta de sustentabilidade do uso de fontes combustíveis na produção elétrica é consequência da redução das reservas mundiais, o aumento da demanda dos combustíveis para uso doméstico, transporte e industrial e descobrimento da existência de impactos ambientais (com aquecimento global entre eles) durante a extração, refino, transporte e queima.

Tabela 1 - População sem acesso à energia elétrica por região e tipo de zona

Região	População sem acesso à energia elétrica (milhões de pessoas)	Taxa de eletrificação (%)		
		Total	Urbana	Rural
África	587	41,9	68,9	25,0
África do Norte	2	99,0	99,6	98,4
África subsaariana	585	30,5	59,9	14,3
Ásia não OCED <sup>4</sup>	799	78,1	93,9	68,8
China/Leste da Ásia	186	90,8	96,4	86,5
Sul da Ásia	612	62,2	89,1	51,2
América Latina	31	93,4	98,8	74,0
Meio este asiático	22	89,5	98,6	72,2
Economias em transição e membros da OCED	3	99,8	100	99,5
<b>Total</b>	<b>1.441</b>	<b>78,9</b>	<b>93,6</b>	<b>65,1</b>

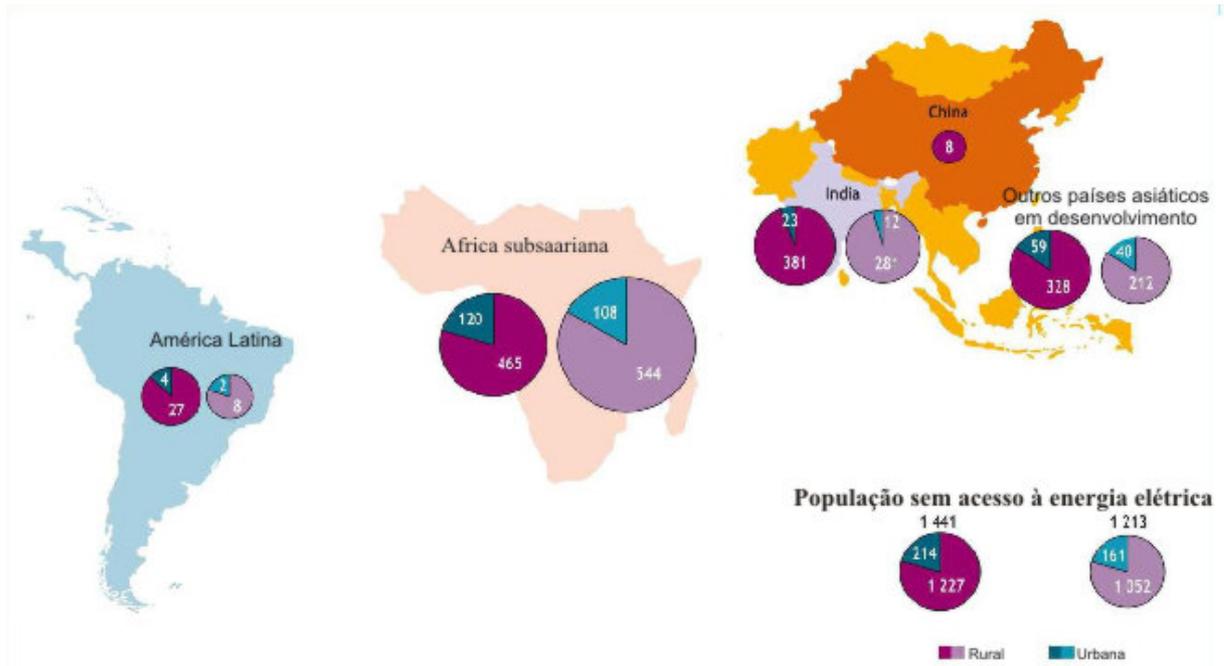
Fonte: IEA, 2010b

Estimativas feitas pela IEA (2010b), figura 3, mostram que em 2030, 1,2 bilhões de pessoas ainda não terão acesso à eletricidade. As baixas taxas de eletrificação nas regiões rurais (65% em 2009 segundo IEA, 2010b) são geralmente consequência dos seguintes fatores (VAN CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000):

- Grande dispersão dos consumidores potenciais e demanda pequena,
- Concentração da demanda em breves períodos do dia (primeiras horas da noite),
- Perdas de energia consideráveis na transmissão,
- Limitado poder de compra para consumo de energia elétrica e compra de equipamentos elétricos,
- Dificuldade de faturamento, manutenção e serviço.

Essa falta de acesso à energia elétrica, em certa medida, inibe o desenvolvimento econômico das comunidades rurais. Diversos estudos sugerem que o uso de fonte de energia confiável e acessível é condição necessária para o desenvolvimento econômico das comunidades rurais, apesar de que o acesso à energia não é uma condição suficiente para incremento da qualidade de vida. (ALLERDICE; ROGERS, 2000; WEINGART; GIOVANNUCCI, 2003; MEADOWS et al., 2003; CABRAAL; BARNES; AGARWAL, 2005)

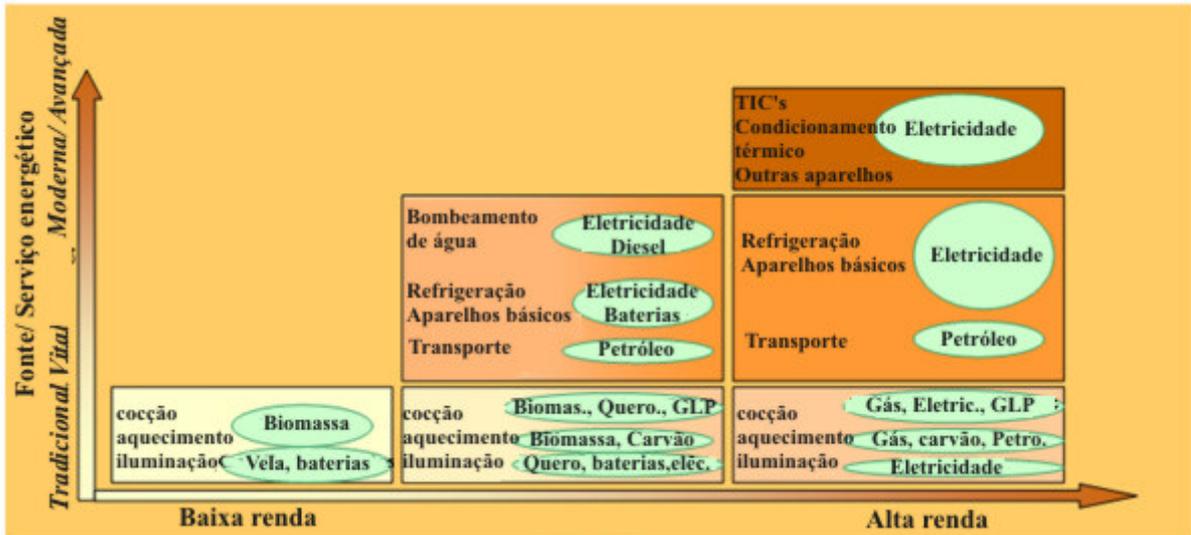
4 OCDE (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico) é uma organização internacional constituída por 31 países considerados países desenvolvidos.



**Figura 3 - População sem acesso à energia elétrica por região e tipo de zona, em milhões de habitantes**

Fonte: (IEA, 2010b)

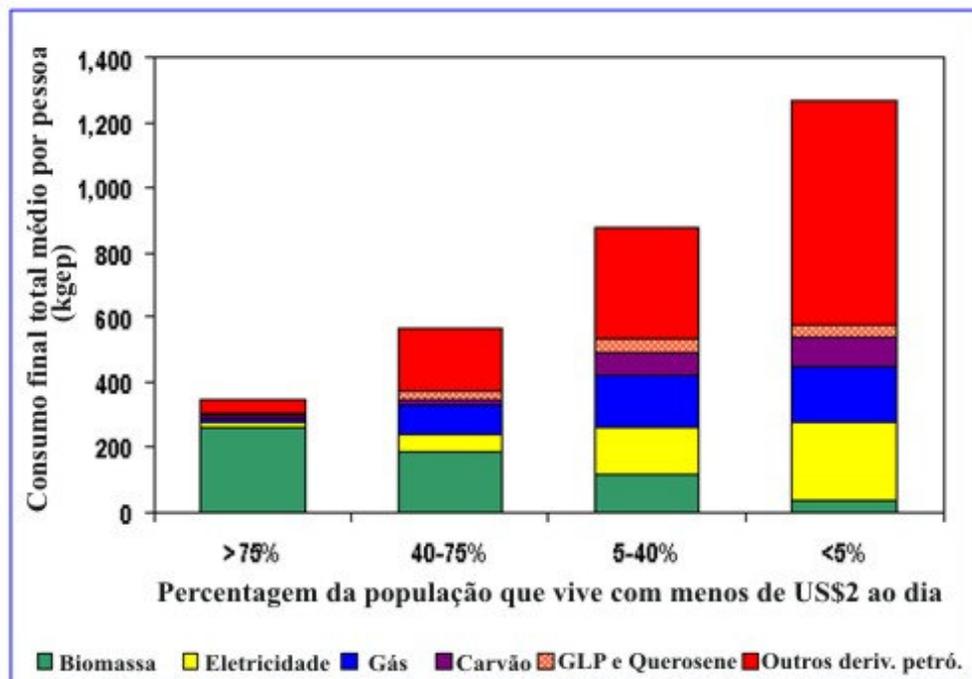
A figura 4 mostra como as pessoas satisfazem suas necessidades energéticas segundo o nível de renda familiar. No primeiro estágio, correspondente às famílias de mais baixa renda, as necessidades básicas de cocção de alimentos, conforto térmico e iluminação são atendidas com a queima de biomassa e com o uso de velas ou pilhas. No segundo estágio é possível observar maior diversificação de fontes energéticas (energia elétrica e derivados do petróleo) e de necessidades (transporte, refrigeração de alimentos, uso de equipamentos elétricos, etc.). Finalmente, pessoas com maior renda satisfazem suas necessidades energéticas principalmente com energia elétrica e gás natural.



**Figura 4 - Transição de consumo energético segundo o nível de renda**

Fonte: (IEA, 2002)

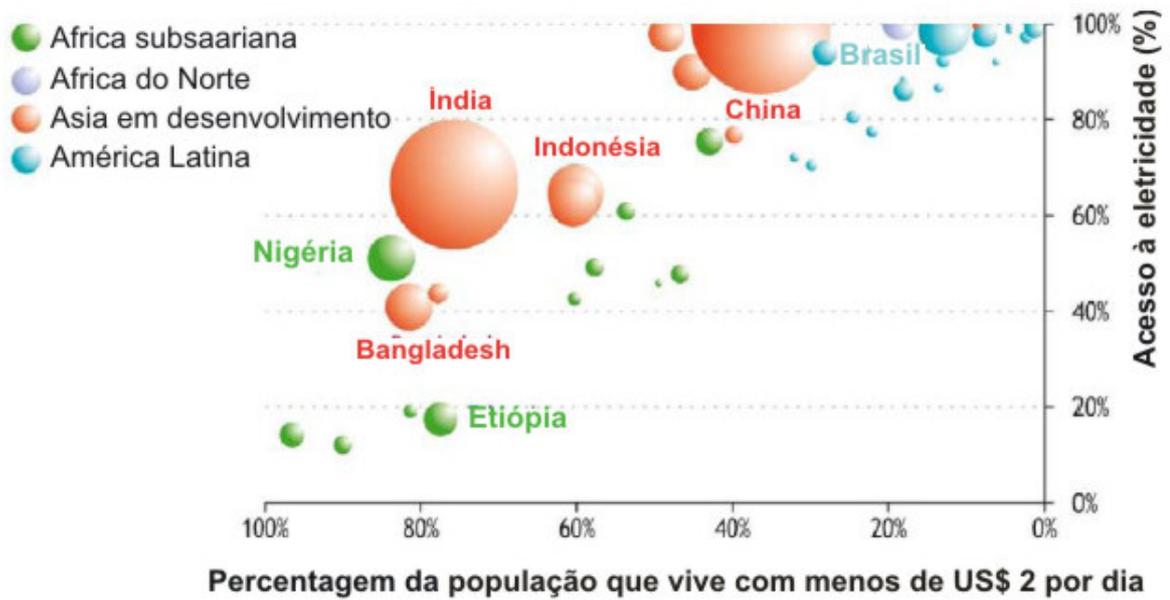
A figura 5 mostra como o consumo de energia elétrica torna-se uma parcela importante no consumo per capita total nos países cuja população é minoritariamente pobre.



**Figura 5 - Transição de consumo energético segundo o nível de renda**

Fonte: (IEA, 2002)

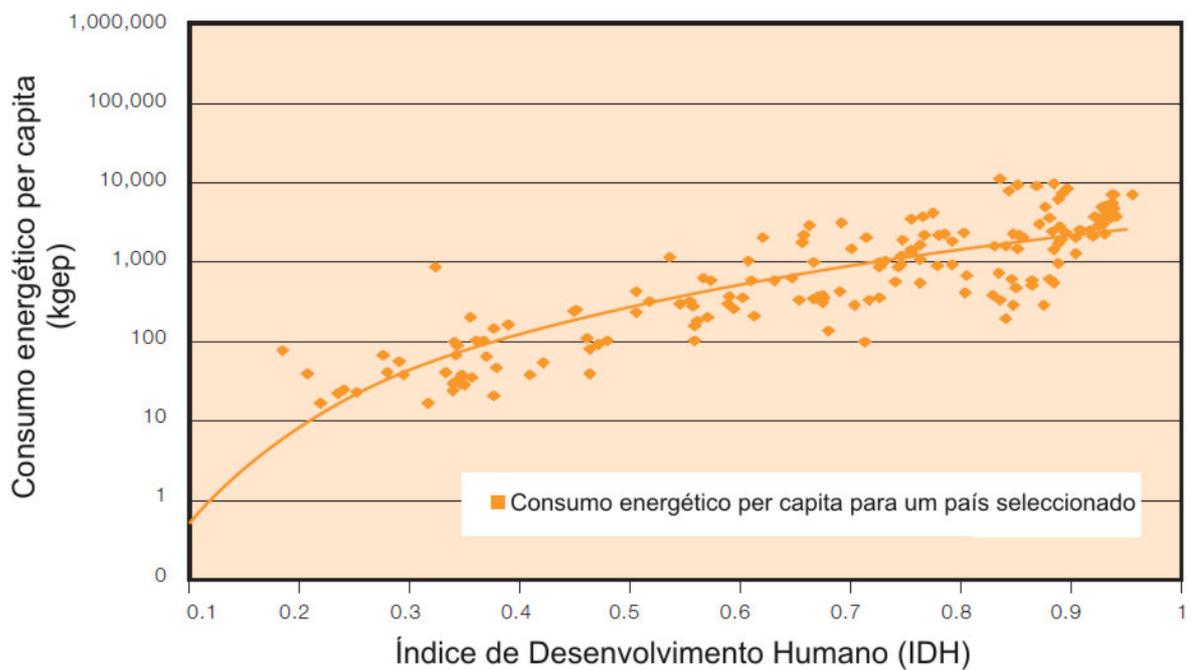
A figura 6 mostra que existe certa correlação entre a pobreza e a falta de acesso à energia elétrica. Muitos países que tem 50% da sua população vivendo com menos de US\$2 por dia (por exemplo, Etiópia) apresentam taxas de eletrificação de menos de 40% (IEA, 2010).



**Figura 6 - Relação entre o acesso à energia elétrica e o percentagem de população em estado de pobreza.**

Fonte: (IEA, 2010b)

A figura 7 mostra que, num mesmo país, a desigualdade no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) tem correlação com o acesso às fontes de energia modernas, entre as quais a energia elétrica.



**Figura 7 - Relação entre o acesso à energia elétrica e o IDH**

Fonte: (UN-ENERGY, 2005)

### 1.3 Uso produtivo da energia

A energia é um recurso que cumpre um papel importante para o desenvolvimento da sociedade humana porque serve para satisfazer as necessidades básicas de alimentação, moradia, locomoção e conforto. Dado que existe uma relação clara entre o consumo de energia e o desenvolvimento econômico, e também entre consumo de energia e qualidade de vida, a energia torna-se condição necessária para garantir o desenvolvimento socioeconômico das regiões menos favorecidas.

Como já foi comentado anteriormente, o acesso às fontes de energia moderna é infelizmente limitado e desigual para muitas pessoas no mundo. Isso acontece principalmente em zonas rurais sem acesso à energia elétrica em virtude de suas características (baixa densidade populacional, demanda energética pequena e limitações técnicas, ambientais e financeiras para o fornecimento com redes). Experiências como, por exemplo Van Campen; Guidi e Best (2000), mostram que o uso da energia elétrica permitiria melhorar as condições de vida de populações, e que o uso de equipamentos que reduzam o tempo de produção proporciona incremento da qualidade e da produção.

Classicamente, o uso produtivo da energia é o aproveitamento da energia elétrica ou não elétrica (calor ou energia mecânica) para atividades que melhorem os ingressos econômicos e o bem-estar das pessoas (KAPADIA; 2004). Uma definição mais abrangente foi criada em uma reunião de trabalho organizada em 2002 pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) e a *Global Environment Facility* (GEF). A nova definição é a seguinte:

White (2002, p.33, tradução própria)

[...] Em um contexto que envolve o desenvolvimento sustentável das zonas rurais, esta energia, para uso produtivo, precisa ser fornecida principalmente de fontes renováveis e seu impacto deve ter uma influência positiva no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)<sup>5</sup>.

Os possíveis benefícios de usar produtivamente a energia, em particular a energia elétrica produzida por fontes renováveis, foram estudados por vários autores (WHITE, 2002; KAPADIA, 2004; CABRAAL; BARNES; AGARWAL, 2005; SHRESTHA et al., 2005) e dentre os benefícios encontram-se os seguintes:

---

<sup>5</sup>As componentes principais do IDH são o produto interno bruto (PIB), a expectativa de vida e o nível de educação.

- incremento do ingresso econômico das famílias e microempresas,
- aumento da produtividade,
- aumento do valor agregado do produto, ao melhorar o processo de produção, processamento, conservação e distribuição,
- redução de custos de operação relacionados ao uso de combustíveis,
- melhora das condições para a criação de microempresas e a geração de empregos,
- incremento da sustentabilidade dos projetos de eletrificação, principalmente pelo fato de aumentar a demanda elétrica e criar condições mais atrativas para novos investimentos e a obtenção de créditos por entidades financeiras,
- obtenção dos objetivos do milênio<sup>6</sup>, porque se criam benefícios em diversas áreas, como a saúde e a educação quando os projetos são implementados em planos que favoreçam melhoras das condições de vida, a redução do trabalho pesado e a redução dos impactos ambientais (Tabela 2).

Tabela 2 - Impactos da energia nos objetivos do milênio

Objetivo do milênio	Importância da energia na obtenção dos objetivos do milênio
1. Acabar com a fome e a miséria	<p>– Acesso aos serviços confiáveis de energia moderna (energia elétrica e combustíveis líquidos ou gasosos) permite:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ desenvolvimento empresarial,</li> <li>▪ aumento das horas de trabalho com iluminação artificial,</li> <li>▪ incremento da produtividade com o uso de máquinas,</li> <li>▪ criação de microempresas relacionadas ao fornecimento e manutenção de pequenos sistemas energéticos,</li> <li>▪ diminuição de perdas após a colheita, com uso de técnicas de preservação (secagem, congelamento, refrigeração).</li> </ul> <p>– A maioria de alimentos precisa de cocção e água.</p> <p>– Uso da energia na irrigação permite incrementos de produção e acesso à nutrição.</p>
2. Educação básica de qualidade para todos	<p>– Energia pode criar um ambiente mais amigável para aumentar a taxa de comparecimento nas escolas.</p> <p>– Iluminação nas escolas pode reter os professores, especialmente se suas acomodações tiverem energia elétrica</p> <p>– Energia elétrica permite aumentar o uso de material audiovisual e de educação à distância.</p>

<sup>6</sup> Os objetivos do milênio são metas propostas pela Organização das Nações Unidas para solucionar os maiores problemas mundiais. Para maior informação consultar: <http://www.objetivosdomilenio.org.br/>.

3. Igualdade entre sexos e valorização da mulher	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Disponibilidade de energia moderna permite libertar o tempo das mulheres em tarefas de sobrevivência (colheita de lenha e água, cocção de alimentos com técnicas ineficientes, processamento manual de alimentos, trabalho de campo manual).</li> <li>– Uso de combustíveis limpos e equipamentos adequados na cocção de alimentos permitem reduzir a exposição a gases de combustão.</li> <li>– Iluminação domiciliar permite estudar em casa e assistência a aulas noturnas.</li> <li>– Iluminação de ruas aumenta a segurança das mulheres</li> <li>– Acesso à energia moderna de maneira confiável permite desenvolvimento de empreendimentos pelas mulheres.</li> </ul>
4.Reduzir a mortalidade infantil	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Diminuição da poluição no interior das casas que produz infecções respiratórias e é a causa de 20% de mortalidade infantil.</li> <li>– Colheita e uso de combustíveis tradicionais gera problemas de saúde em crianças.</li> <li>– Fornecimento de alimentos nutritivos e cozidos, espaços quentes e água fervida aumentam a saúde da criança.</li> <li>– Energia permite bombeamento e purificação da água.</li> </ul>
5. Melhorar a saúde das gestantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Serviços de energia são necessários para fornecer melhores instalações para o cuidado materno.</li> <li>– Trabalho excessivo e pesado (carregamento de lenha ou água) pode afetar a saúde da mãe e do filho.</li> </ul>
6. Combater a AIDS, a malária e outras doenças	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Serviços de energia são necessários para fornecer melhores instalações para o cuidado dos pacientes.</li> <li>– Energia para refrigeração e conservação de vacinas e remédios permite a prevenção e tratamento de doenças.</li> <li>– Descarte adequado de seringas usadas por incineração evita seu reuso e a difusão de AIDS.</li> <li>– Energia permite o desenvolvimento, a manufatura e a distribuição de remédios e vacinas.</li> <li>– Energia permite o uso de material audiovisual para a educação sobre saúde.</li> </ul>
7. Qualidade de vida e respeito ao meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Uso de máquinas e irrigação aumenta a produtividade agrícola e reduz a necessidade de expansão de áreas de cultivo e a pressão sobre os ecossistemas.</li> <li>– Uso de combustíveis tradicionais produz erosão, perda de fertilidade dos solos e desertificação.</li> <li>– Uso de combustíveis mais eficientes e limpos reduz a emissão de gases de efeito estufa.</li> <li>– Energia permite bombeamento e purificação de água.</li> </ul>

Fonte: DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT , 2002

Os projetos de uso produtivo de energia podem ter impactos diretos ou indiretos nas economias dos beneficiários. Por exemplo, o uso de sistemas de bombeamento na irrigação

tem um impacto direto, por que melhora a produtividade dos campos agrícolas e aumenta os ingressos do agricultor. Por outro lado, o uso de energia no campo da saúde (refrigeração de vacinas) ou na educação (iluminação, refrigeração da merenda escolar, uso de computadores) melhora a qualidade de vida das pessoas, aumentando indiretamente a capacidade delas de produzir e melhorar sua renda. Dependendo se é aproveitada com fins produtivos ou não (ampliação de horas de trabalho), a eletrificação rural pode ter impactos positivos nos ingressos econômicos.

A obtenção desses benefícios depende de muitos fatores internos, próprios do tipo de empreendimento e das condições locais, de fatores externos à atividade agrícola (características do mercado consumidor, existência de serviços de apoio e de infraestrutura adequada para a atividade produtiva), assim como de um bom planejamento e execução do projeto.

#### **1.4 Panorama atual da energia fotovoltaica e seu uso em aplicações produtivas**

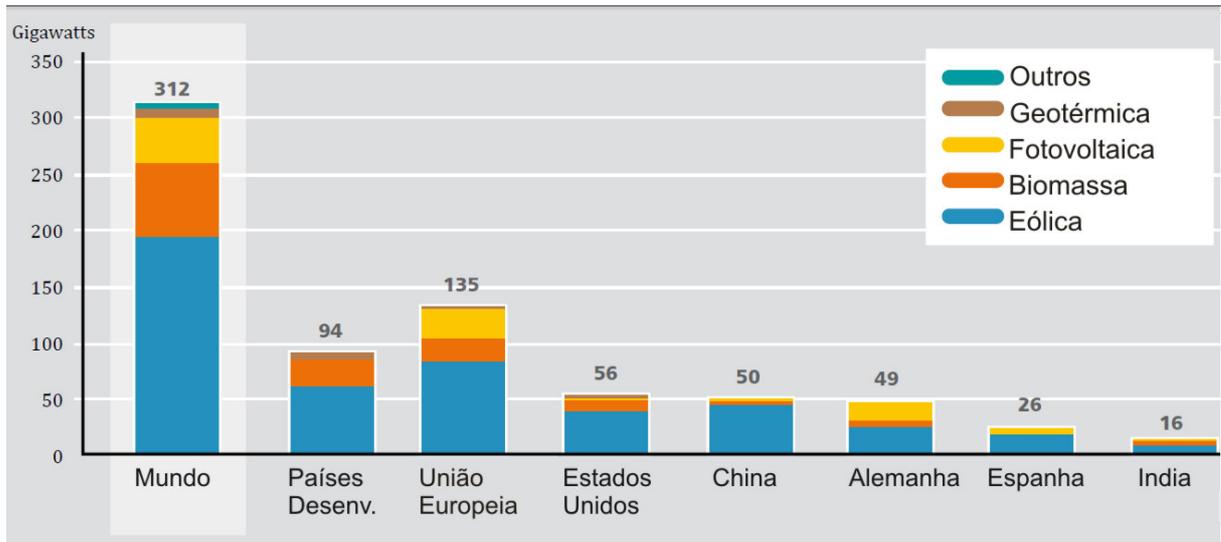
Desde 1954, quando cientistas do *Bell Telephone Laboratories* criaram a primeira célula fotovoltaica, a energia solar fotovoltaica tem passado por vários estágios de desenvolvimento tecnológico e de aplicação. As primeiras células fotovoltaicas tinham aplicações espaciais, mas com o tempo, as células foram utilizadas em aplicações terrestres, como os sistemas de telecomunicações, sinalização e proteção catódica, e depois, em sistemas de eletrificação<sup>7</sup>.

Embora o recurso solar seja a fonte mais abundante no mundo<sup>8</sup> (WEC, 2010), sua conversão em energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos é ainda cara e pouco utilizada. Mesmo quando comparada com outras fontes não convencionais como a energia eólica, a capacidade mundial instalada da energia fotovoltaica é ainda pequena. Até o ano de 2010, a capacidade mundial total instalada de energia fotovoltaica não superava os 40 GW (Figura 8).

---

7 . Para uma análise mais aprofundada do processo histórico recomenda-se ler Perlin. *From Space to Earth. The Story of Solar Electricity*. Harvard University Press. Cambridge, EUA, 2002.

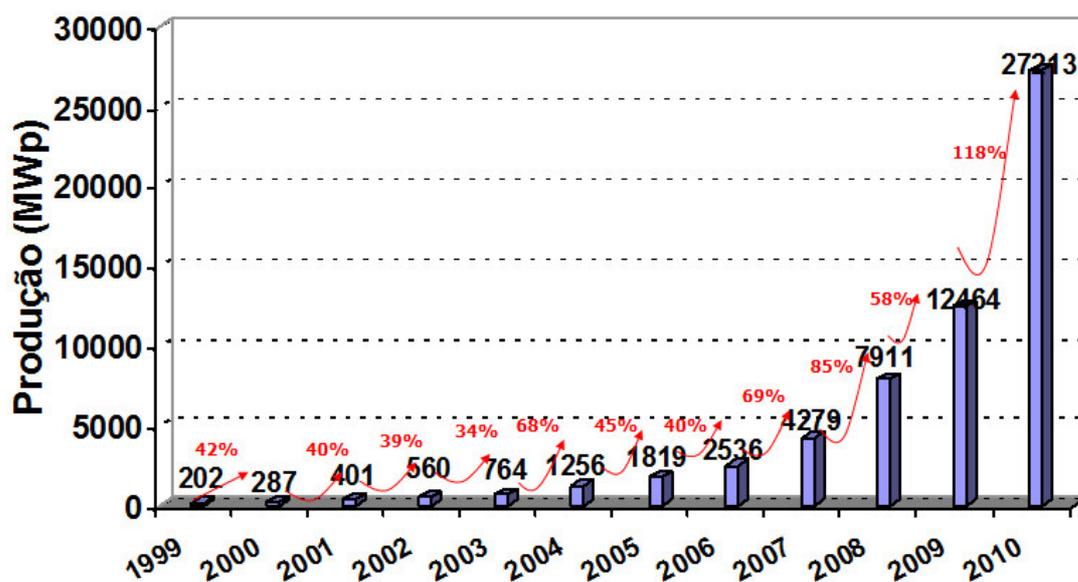
<sup>8</sup> A fonte relata que se 0,1% da energia solar que chega a Terra for transformada em energia útil com 10% de eficiência, a capacidade de energia que poderia ser produzida equivaleria a quatro vezes a capacidade atual de produção do mundo (3000 GW).



**Figura 8 - Capacidade elétrica instalada com energias renováveis (sem incluir a capacidade instalada de hidroelétricas de grande porte) até o ano 2009**

Fonte: (REN21, 2011)

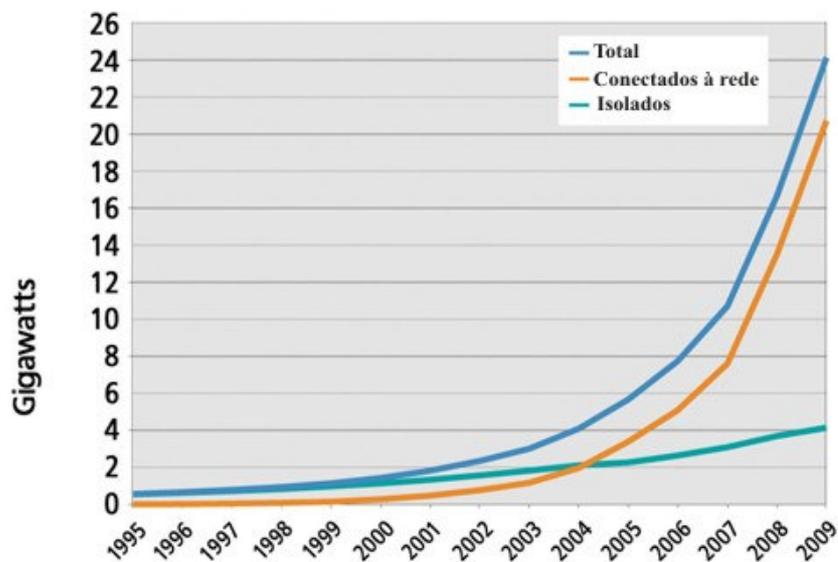
Por outro lado, a energia fotovoltaica é também a tecnologia de geração elétrica de maior crescimento no mundo em termos percentuais (REN21, 2011). Segundo uma estimativa (Ibid., p.19), a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos cresceu com uma média anual de 49% entre os anos 2005 e 2010. Outra estimativa (PHOTON INTERNATIONAL, 2011) calcula que o aumento médio anual de toda a produção de módulos fotovoltaicos no mesmo período foi de 72% e que entre os anos 2009 e 2010 a produção aumentou em 118%. (Figura 9)



**Figura 9 - Produção mundial anual de células fotovoltaicas (MWp/ano)**

Fonte: (PHOTON INTERNATIONAL, 2011)

Como pode ser visto na figura 10, a demanda de módulos fotovoltaicos para sistemas conectados à rede supera amplamente a demanda para sistemas isolados há vários anos. Isto se deve ao fato de que os sistemas conectados a rede são usados em países desenvolvidos economicamente, onde existem incentivos como meio de reduzir a poluição ambiental provocada por outras fontes e de reforçar a indústria local. A situação é distinta para os sistemas isolados que são usados principalmente nos programas de eletrificação rural de países em desenvolvimento, nos quais o investimento governamental é, geralmente, reduzido.

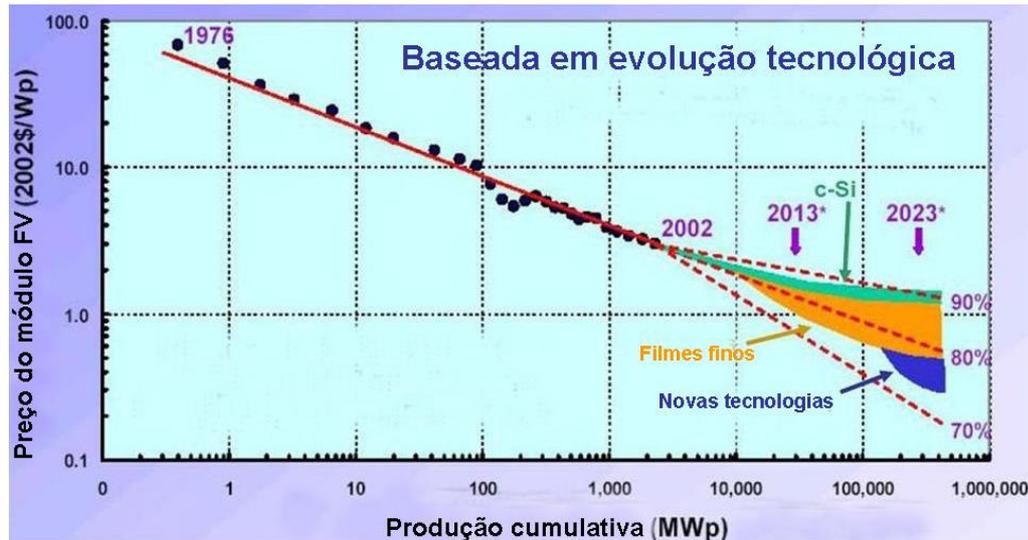


**Figura 10 - Produção mundial acumulada segundo o tipo de aplicação**

Fonte: (REN21, 2010)

O custo de produção de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos tem uma tendência a diminuir como consequência do contínuo desenvolvimento tecnológico e do aumento da demanda<sup>9</sup>. A figura 11 mostra a curva de aprendizado (chamada de *learning curve* em inglês) correspondente à tecnologia fotovoltaica. Em outras palavras, se continuar a tendência atual de diminuição de preços com uma *learning curve* de 80%, os custos de produção seriam reduzidos em 20% cada vez que duplicada a produção acumulada.

<sup>9</sup> Demanda motivada principalmente por programas de incentivo aos sistemas conectados à rede e em menor grau por programas eletrificação rural.

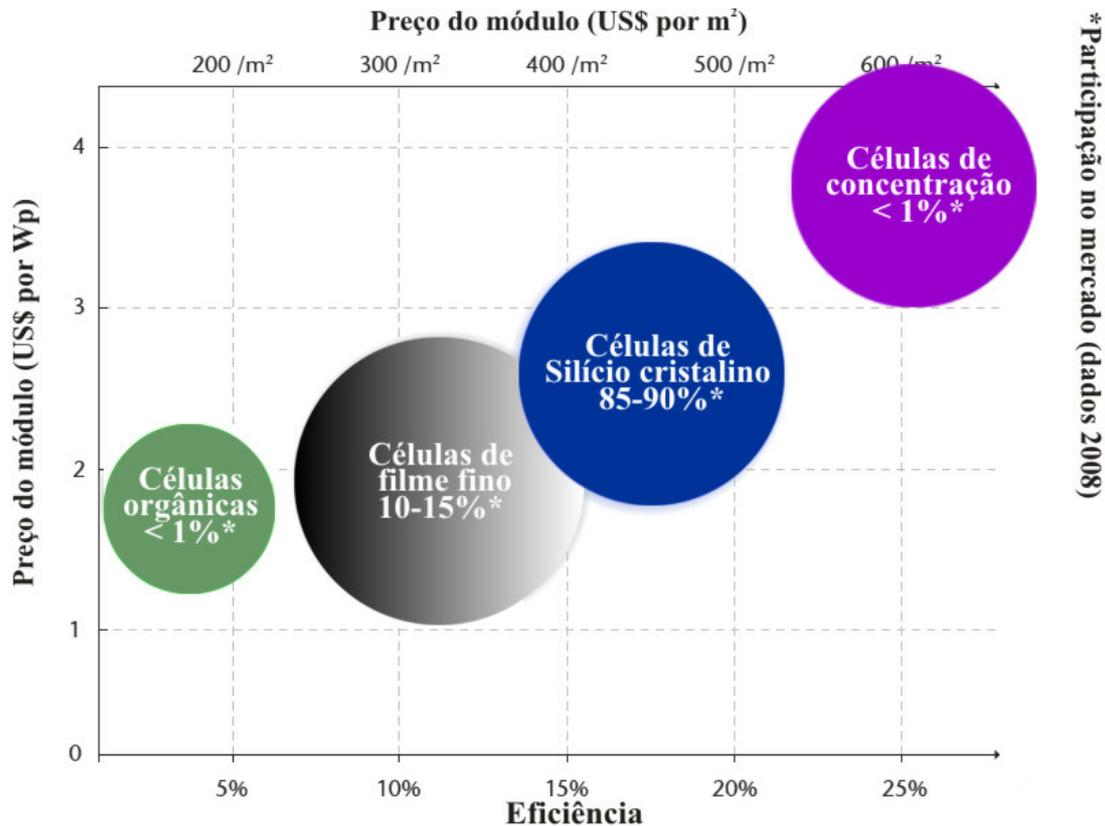


**Figura 11 - Curva de aprendizado da tecnologia fotovoltaica**

Fonte: (SUREK, 2005)

No que diz respeito às tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas, encontram-se principalmente dois tipos: silício cristalino (c-Si) e filmes finos. A primeira categoria, que na atualidade domina o mercado, pode ser subdividida em monocristalino (mc-Si) e policristalino (pc-Si). Já as células de filme fino podem ser classificadas por sua vez em amorfas (a-Si), microamorfos ( $\mu$ -Si), Telureto de Cádmio (Cd-Te), Disseleneto de Cobre-Índio (CIS), Disseleneto de Cobre-Índio-Galio (CIGS). Paralelamente, novas tecnologias de fabricação estão sendo desenvolvidas, como as células orgânicas, as células Graetzel (DSC), as células de multicamadas (MJ) e as células com concentração.

Na atualidade, a eficiência das células comerciais de tipo monocristalina está na ordem de 14 a 20%, da policristalina de 13 a 15%, da amorfa de 6 a 9%, da CdTe entre 9 e 11% e as de CIS/CIGS entre 10 e 12%. (Figura 12). O mercado é dominado atualmente pelas células de silício cristalino cuja participação no mercado está na faixa de 85 a 90%.



**Figura 12 - Estado atual das eficiências e custos das células fotovoltaicas**

Fonte: (TANAKA, 2010)

Nos países onde existe um grande potencial energético solar, o uso produtivo da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos é uma alternativa tecnológica viável, que poderia gerar uma mudança significativa no estilo de vida de seus habitantes, se for usada para melhoria da atividade econômica local. Alguns exemplos de aplicações produtivas da energia solar fotovoltaica na agricultura são: a cerca elétrica, o bombeamento de água para irrigação ou uso de bebedouros e a refrigeração de produtos perecíveis. A cerca elétrica geralmente tem como principal aplicação afastar possíveis predadores do gado e poder realizar um adequado manejo de pastos. O bombeamento de água pode satisfazer as necessidades hídricas de um campo de cultivo ou do gado, e o uso de refrigeradores/congeladores permite a preservação de produtos agrícolas (carnes, lácteos ou verduras) por uma maior quantidade de tempo. Uma lista de aplicações produtivas com energia fotovoltaica assim como suas respectivas faixas típicas de consumo, pode ser vista na tabela 3.

Tabela 3 - Aplicações produtivas de SFV na agricultura

Aplicação agrícola	Faixa típica de potência (kWp)
Irrigação	1-3
Água para bebedouros	0,5 -1
Cerca elétrica	0,02 -0,1
Eletrificação de granjas (iluminação, segurança)	0,05 – 0,5
Secagem forçada	0,1 – 1
Iluminação de currais, granjas e campos	0,2 – 3
Bombeamento de água para peixes	0,5 – 3
Aeração – peixes	0,2 – 1
Armadilhas de luz para insetos	por lâmpada: 0,01-0,02
Refrigeração de vacinas para gado	0,05-0,1
Refrigeração de produtos agrícolas	0,5 – 10+
Máquinas de gelo	2 – 10
Telecomunicações	0,2 – 0,3

Fonte: Modificado de Weingart (2003)

Diversas experiências com projetos de uso produtivo da energia solar fotovoltaica podem ser encontradas ao redor do mundo. Destacam-se os relatórios de nove experiências em Ibero – América no marco do *Seminario Aplicaciones Productivos y Sustentables de la Energía Solar de la Red Iberoamericana para 22 Aplicaciones Sustentables de la Energía Fotovoltaica*<sup>10</sup> e o documento elaborado pela FAO, intitulado *Solar photovoltaics for sustainable agriculture and rural development* (VAN CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000).

<sup>10</sup> Maiores informações sobre estas experiências em:  
<http://fc.uni.edu.pe/riasef/Proyectos%20FV%20productivos%20iberoamericanos/Proyectos%20FV%20productivos.htm>

## CAPÍTULO 2 - IRRIGAÇÃO COMO MEIO DE DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são introduzidos os conceitos básicos relacionados com a irrigação, os tipos de sistemas de irrigação e de bombeamento existentes e as vantagens e desvantagens de cada um deles.

### 2.1 Agricultura como eixo para o desenvolvimento

A agricultura é o conjunto de ações humanas que servem para transformar o meio ambiente natural em um meio apto para o desenvolvimento das culturas. Segundo as dimensões de produção, a agricultura pode ser classificada em agricultura de subsistência e de mercado<sup>11</sup>. A primeira caracteriza-se pela produção de quantidades mínimas para satisfazer as necessidades da família e pelo uso de técnicas agrícolas básicas, enquanto a segunda implica o uso de técnicas avançadas para produzir grandes quantidades de produtos agrícolas.

Vários economistas (citados por Van Koppen, Namara e Safilios-Rothschild, 2005), baseados na análise do comportamento histórico do desenvolvimento dos países ao redor do mundo, afirmaram que a agricultura tem sido o motor de todo o crescimento econômico e, em consequência, a base da redução da pobreza ao longo da história.

Num informe do Banco Mundial (2007, p.3) é mencionado que:

[...] A agricultura é uma fonte de sobrevivência para quase 86% dos habitantes da zona rural. Proporciona emprego a 1,3 bilhões de pequenos agricultores. Dos 5,5 bilhões de habitantes do mundo em desenvolvimento, três bilhões vivem em áreas rurais (quase a metade da humanidade). Desses habitantes da zona rural, quase 2,5 bilhões vivem em domicílios envolvidos com a agricultura e 1,5 bilhões são donos de pequenas propriedades agrícolas.

Nesse contexto, nem sempre é possível ter acesso a quantidades suficientes de água para abastecer a demanda das culturas. Por isso, no mesmo informe é mencionado que:

[...] 61% da sua população rural nos países em desenvolvimento moram em zonas com condições favoráveis para a agricultura (zonas irrigadas, úmidas e semi-úmidas com pouco estresse de umidade e com acesso de menos de 5 horas dos mercados com 5.000 ou mais habitantes). No entanto, dois terços da população rural da África Subsaariana vivem em áreas menos favorecidas, definidas como áridas ou semiáridas e com acesso precário ao mercado.

---

<sup>11</sup> Existem também outros tipos de agricultura que são combinações das características da agricultura de subsistência e de mercado.

A escassez de água tem diversas consequências no desenvolvimento humano, já que limita a produção agrícola. A água é o maior fator limitante para a produção agrícola (KENDALL; PIMENTEL, 1994). Por isso, em regiões de baixa pluviometria, pluviometria irregular ou sem possibilidades de irrigação, é comum o fato de que muitos agricultores não se arrisquem a plantar certos tipos de cultivos de longo período de crescimento (por exemplo, frutíferas), mesmo que elas tenham um maior valor no mercado, pois temem a perda de plantas por causa da seca antes de seu aproveitamento.

## 2.2 Irrigação

A irrigação é o fornecimento de água ao solo, quando a fornecida pela chuva ou águas subterrâneas não é suficiente, na quantidade e no momento oportuno, visando proporcionar umidade adequada ao desenvolvimento dos cultivos. A irrigação pode ser total, quando fornece a quantidade de água para o ciclo completo de desenvolvimento da cultura, ou parcial, quando fornece água somente para um período do ciclo, sendo o restante provido pela pluviometria local.

O fornecimento de água às plantas traz vários benefícios: (HANSEN; ISRAELSEN; SRINGHAM, 1979 apud ASAWA, 2006):

- fornece umidade ao solo, o que é importante para a germinação de sementes e para os processos químicos e bacteriológicos que acontecem durante o crescimento da planta,
- refresca o solo e seus arredores, o que torna o ambiente mais favorável para o crescimento da planta,
- dilui minerais no solo,
- suaviza o solo e ajuda nas operações de lavra,
- permite a aplicação de fertilizantes,
- reduz os efeitos daninhos das geadas nas culturas,
- garante o sucesso da cultura contra secas de curta duração,
- permite o cultivo e/ou colheita duas ou mais vezes ao ano (milho, feijão, batata, frutas, etc.) em determinadas regiões,
- supre em quantidades essenciais e em épocas oportunas as reais necessidades hídricas das plantas cultivadas podendo aumentar consideravelmente o rendimento das colheitas.

Aas civilizações mais antigas dos vales dos rios Nilo, Tigre, Eufrates, Indo e Amarelo, já conheciam os benefícios da irrigação e basearam sua existência neste tipo de atividade

agrícola (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2007). Desde aquela época, a agricultura tem-se desenvolvido tecnologicamente com o uso de melhores fertilizantes, máquinas e técnicas especializadas para o cultivo e colheita, razão pela qual a produtividade agrícola é agora maior.

De acordo com Hagos (2009, p.1, tradução própria), a irrigação contribui para a economia de uma nação de várias maneiras:

[...] Ao nível microeconômico, a irrigação permite o incremento da produção por hectares e em consequência da renda do agricultor e de segurança alimentar. A irrigação permite a diversificação de culturas e a mudança de produção de culturas de baixo valor para produtos de alto valor no mercado. A irrigação pode trazer benefícios aos agricultores pobres, pelos incrementos em produção, diminuição dos riscos de estragos da safra, e a criação de empregos diretos ou indiretos durante quase todo o ano, em virtude do cultivo. [...] No nível macroeconômico, os investimentos em irrigação agem como vetores de produção e fornecimento, porque empurram o limite da produção a um nível maior e garantem que a produção seja possível, sem os riscos de escassez de umidade, trazendo um efeito positivo no crescimento econômico.

## **2.2.1 Sistemas de irrigação**

A irrigação pode ser dividida nas seguintes modalidades: superficial, aspersão e localizada (ANDRADE, 2001); há ainda a irrigação subterrânea com inexpressiva utilização.

### **2.2.1.1 Irrigação superficial**

A irrigação superficial, ou por inundação, é a técnica de aplicação da água diretamente na superfície do solo em altas doses. Usa a energia hidráulica propiciada pelo desnível do terreno, da altura do reservatório ou pressão forçada para distribuir a água sobre o solo. A inundação pode ocorrer na modalidade de sulcos e, ainda, de forma contínua ou intermitente. Apesar de não precisar de altas pressões para a distribuição da água, este método utiliza grandes quantidades de água e, conseqüentemente, muita energia para sua realização.

### **2.2.1.2 Irrigação por aspersão**

A irrigação por aspersão consiste na aplicação de água no cultivo em forma de chuva artificial na parte aérea das plantas, através do aspersor (mecanismo giratório que asperge água através de tubulação sob pressão). São comumente utilizados os aspersores de rotação lenta, ao redor

de um eixo vertical, movimento este originado graças ao impacto constante de um braço móvel, acionado pelo jato do próprio aspersor; mas podem também ser utilizados aspersores de rotação rápida e do tipo pivô central ou canhão giratório (LOSADA-VILLASANTE, 1992). Este sistema também demanda grandes quantidades de energia.

### **2.2.1.3 Irrigação localizada**

Na irrigação localizada a aplicação da água ocorre sobre o solo na zona radicular das plantas, em alta frequência e baixa intensidade, para manter uma umidade elevada na região do sistema radicular (OLIVEIRA et al., 2007). Este sistema funciona bem melhor com culturas que necessitam ser espaçadas consideravelmente e/ou em lugares onde a água é escassa ou tem um custo elevado (SANTOS et al., 1997).

### **2.2.2 Seleção do sistema de irrigação**

A seleção do sistema de irrigação depende de vários fatores, dentre eles: das características do manancial, da qualidade da água, do tipo de solo, da topografia, do clima, do tipo e fase da cultura a ser irrigada, do capital de investimento, da mão de obra, da fonte de energia disponível; assim como de questões políticas, sociais, sanitárias e ambientais (ANDRADE, 2001).

Na tabela 4 são apresentadas as condições que devem ser satisfeitas para a escolha do método de irrigação.

Tabela 4 - Condições determinantes na escolha de um método de irrigação

Fator \ Tipo	Superficial	Aspersão	Localizada
Preço da água	Baixo	Intermediário	Alto
Fornecimento de água	Irregular	Regular	Contínuo
Disponibilidade de água	Abundante	Média	Limitada
Pureza da água	Não limita	Sem sólidos	Elevada
Capacidade de infiltração do solo	Alta	Intermediária a baixa	Qualquer
Capacidade de armazenamento do solo	Alta	Intermediária a baixa	Não limitada
Topografia	Plana e uniforme	Relevo moderado	Irregular
Sensibilidade ao déficit hídrico	Baixa	Moderada	Alta
Valor da produção	Baixo	Moderado	Alto
Custo de mão de obra	Baixo	Moderado	Alto
Custo de energia	Alto	Baixo	Moderado
Disponibilidade de capital	Baixo	Médio a alto	Alto
Exigência em tecnologia	Limitada	Média a alta	Elevada

Fonte: PEREIRA; TROUT, 1999

### 2.2.2.1 Características do manancial

A água usada para irrigação pode ser fornecida de fontes superficiais, subterrâneas ou não convencionais. As principais fontes de águas superficiais são rios, lagoas, reservatórios e açudes. Águas subterrâneas podem ser obtidas de aquíferos profundos ou rasos. Fontes não convencionais de água, como a água dessalinizada ou água residual tratada, são usadas quando não existe disponibilidade de água doce nas quantidades necessárias para a irrigação e também como meio de proteção ao meio ambiente. Água tratada pode ser usada, por exemplo, para a irrigação de gramados e parques, enquanto a água dessalinizada, por seus altos custos de produção, geralmente é usada só para fins domésticos ou industriais.

A distância entre a fonte e o plantio influi no custo da água, pois quanto maior for a distância, maior será a quantidade de energia necessária ao bombeamento de água. A diferença de altura entre a fonte e o campo de cultivo determina se o sistema pode trabalhar sob determinada pressão e se o sistema precisa ou não usar uma bomba adicional ou um sistema de pressurização.

### **2.2.2.2 Qualidade de água**

Alguns fatores que devem ser considerados na escolha do método da irrigação são a salinidade, a toxicidade, a presença de sedimentos e de organismos vetores de doenças. A água superficial comumente possui materiais em suspensão como lodo, microrganismos como larvas, algas e resíduos orgânicos e inorgânicos

A salinidade é definida como a concentração de sais (como o potássio, sulfatos e cloro) no solo ou na água. (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2007). A própria irrigação, quando não for criteriosa, pode gerar salinização do solo, mesmo quando a água utilizada não tenha altas concentrações de sais. Isso pode acontecer quando há grande evaporação superficial deixando os sais depositados no solo. Em casos em que a quantidade de sal é maior do que a tolerada pela cultura faz-se necessário o uso de uma lâmina de lixiviação, que é a lavagem do solo através de grandes volumes de água, já que a presença de sais dificulta a absorção de nutrientes pelas plantas.

A toxicidade está determinada pela quantidade de íons de cloro, sódio ou boro que podem ser encontrados na água. A presença desses materiais aumenta a pressão osmótica, dificultando a absorção de água e dos nutrientes por parte da planta.

A existência de sedimentos provoca entupimento das tubulações e dos aspersores, razão pela qual uma fonte de água com muitos sedimentos pode impossibilitar o uso de irrigação por aspersão ou localizada, se não for usado um sistema de filtragem adequado.

A quantidade de microrganismos patogênicos pode impedir que uma fonte de água seja usada. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a água destinada para fins de irrigação deve possuir menos de 1.000 organismos de coliformes fecais para cada 100 mL de amostra.

### **2.2.2.3 Características do solo**

A capacidade de infiltração e a capacidade de retenção da água são características que influenciam na escolha do método de irrigação. A capacidade de infiltração indica a velocidade com que a água passa através do solo. Se a capacidade de infiltração for alta,

poderá ocorrer perda de água e lixiviação de nutrientes por percolação. Neste caso deve-se evitar o uso de irrigação superficial. Por outro lado, se a capacidade de infiltração for mais baixa do que taxa de aplicação da água, poderá existir escoamento superficial gerando problemas de erosão. Solos arenosos têm maior capacidade de infiltração do que os argilosos.

A capacidade de retenção da água mede quanta água pode ser armazenada no solo e está determinada pela textura e pela proporção de matéria orgânica no solo. A água armazenada no solo é consumida pelas raízes, razão pela qual a irrigação deve ser mais frequente em solos com menor capacidade de retenção.

#### **2.2.2.4 Topografia**

A declividade de um terreno pode restringir o uso de sistemas de irrigação superficial para evitar a erosão do solo. Em terrenos planos pode-se usar qualquer tipo de irrigação. Terrenos com declividade de até 5% permitem o uso de irrigação superficial, até 30% o uso de irrigação por aspersão e até 60% o uso de irrigação localizada (ANDRADE, 2001).

#### **2.2.2.5 Clima**

A periodicidade das chuvas durante o crescimento da planta determina a importância da irrigação no processo de produção. Em consequência, a irrigação pode ter um papel complementar em regiões úmidas, mas fundamental em regiões áridas e semiáridas. Esse papel influencia na seleção de um método mais econômico, como a irrigação superficial, quando for possível.

Se a radiação solar for elevada, as perdas por evaporação serão consideráveis, razão pela qual deve-se evitar o uso de alguns tipos de sistemas de aspersão e/ou irrigar em períodos do dia com menor evaporação. O vento também pode influenciar no rendimento dos sistemas de irrigação por aspersão. Por outro lado, em regiões com problemas de geadas, utiliza-se sistemas de aspersão como proteção sempre que eles permitam irrigar toda a área cultivada de forma simultânea (ANDRADE, 2001).

### **2.2.2.6 Características de cultura**

As características da cultura (sistema e espaçamento do plantio, profundidade do sistema radicular, altura das plantas, valor econômico e exigências agronômicas) influenciam a escolha do método de irrigação. Por exemplo, a tolerância a períodos de secas e as condições de umidade por parte da cultura também faz parte importante dessa escolha. Culturas como o arroz permitem ser alagadas (irrigação por inundação), enquanto culturas como hortaliças e plantas ornamentais podem desenvolver fungos e outras pragas, caso não se encontrem em condições de umidade ótimas.

### **2.2.2.7 Capital de investimento**

O pequeno agricultor geralmente tem pouca capacidade de investimento quando sua produção é para a subsistência familiar. Neste caso, os preços dos sistemas de irrigação por aspersão ou localizadas podem ser proibitivos. Por causa do preço, os sistemas de irrigação localizada são recomendáveis para culturas de bom valor no mercado, como frutíferas e hortaliças. (ANDRADE, 2001). Do ponto de vista econômico, a escolha de um sistema de irrigação depende da disponibilidade de créditos e taxa de juros, e da durabilidade dos equipamentos.

A quantidade de energia necessária para operar os sistemas de bombeamento e irrigação determina uma parte dos custos de operação. Geralmente, o custo de operação é menor no sistema superficial, intermediário no sistema localizado, e alto no sistema por aspersão (ANDRADE, 2001). Já os custos de manutenção dos sistemas pressurizados são menores do que dos sistemas superficiais.

### **2.2.2.8 Mão de obra**

A seleção de um determinado método de irrigação pode determinar a dependência da produção com a quantidade e qualidade de mão de obra. Neste sentido, a quantidade de mão de obra tem um papel importante na irrigação superficial, moderado na irrigação por aspersão, e mínimo na irrigação localizada.

### **2.2.2.9 Fonte de energia disponível**

Com exceção dos sistemas de bombeamento manual ou dos cata-ventos de acionamento mecânico, a maioria dos sistemas de bombeamento convencional precisa de energia elétrica para seu funcionamento. Neste caso pode-se usar a energia elétrica fornecida pela rede elétrica, ou caso o local esteja distante da rede elétrica, sistemas de geração local, como os geradores a diesel, os sistemas fotovoltaicos, ou os geradores eólicos. No Brasil, aproximadamente 70% dos irrigantes compram energia elétrica de um fornecedor, 29% geram com motores de combustão a diesel e 1% gera sua própria energia com o aproveitamento do potencial hídrico disponível na sua propriedade (ALVES et al., 2003)

### **2.2.2.10 Questões políticas, sociais e ambientais**

Do ponto de vista político, deve-se analisar se existem incentivos governamentais para a promoção de emprego, produção local de alimentos e utilização de equipamentos produzidos localmente, que permitam viabilizar economicamente um método de irrigação determinado.

Do ponto de vista social, os hábitos, tradições, preconceitos e modismos dos agricultores irão influenciar fortemente na determinação de um método de irrigação, com a possibilidade de que um método pode ser rejeitado em razão a uma incompatibilidade com seus costumes.

Do ponto vista ambiental, deve-se avaliar os impactos ambientais de cada método de irrigação nos solos (erosão e salinização), na água (degradação da qualidade de água) e nos ecossistemas ao redor. Em alguns países existem incentivos para evitar esses impactos ou leis que os limitam. Existem também áreas de preservação ambiental, onde não é permitido irrigar, inclusive nos arredores.

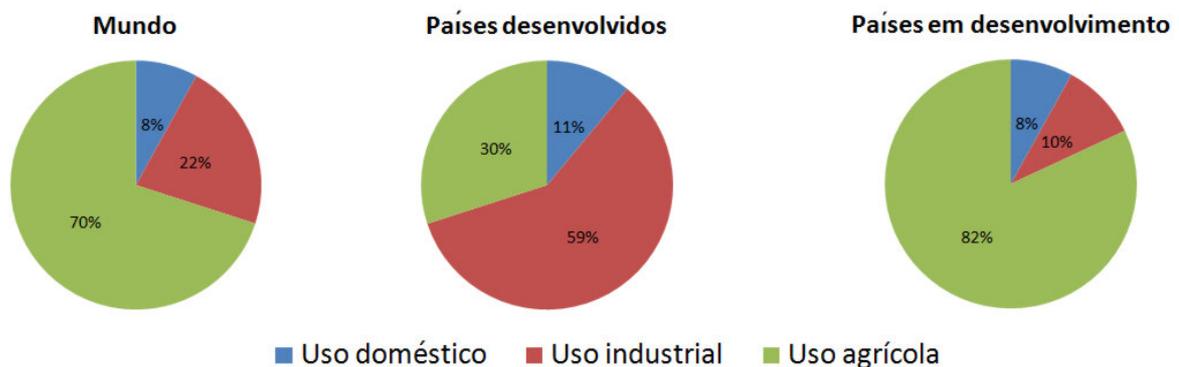
### **2.2.3 Problema da água na irrigação**

Apesar de que a água ser considerada um recurso renovável (porque pode ser repostada pelas chuvas), a disponibilidade dela é finita em termos da quantidade disponível por unidade de tempo em uma região (PIMENTEL et al.,2004). Em outras palavras, a água pode ser abundante em alguns meses e escassa em outros.

Estima-se que a Terra tenha aproximadamente  $1,4 \times 10^{18} \text{ m}^3$  de água, das quais mais do que 97% encontram-se nos oceanos (água salgada) e  $3,5 \times 10^{16} \text{ m}^3$  é água doce armazenada em rios, lagos e reservatórios, glaciais, neve permanente e aquíferos subterrâneos (SHIKLOMANOV; RODDA, 2003).

Aproximadamente 30% ( $1,1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ) de toda a água doce na Terra está armazenada em fontes subterrâneas, as quais só têm capacidade de regeneração média de 0,1% a 3% por ano (PIMENTEL et al., 2004). A água doce é renovada no chamado ciclo hidrológico onde o sol tem um papel importante.

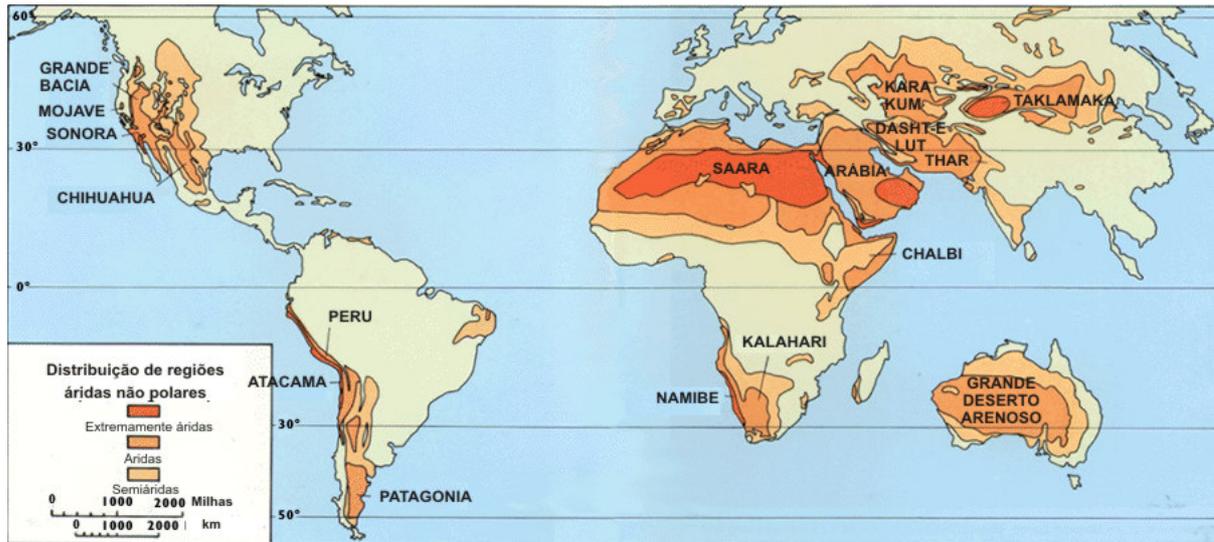
A água doce é utilizada para muitas das atividades domésticas (necessidades fisiológicas, preparação de alimentos, limpeza e esgoto), na irrigação de culturas e na indústria. Em países em desenvolvimento, o consumo de água em atividades agrícolas pode representar mais de 80% do consumo total, enquanto que em países desenvolvidos esse consumo é de cerca de 30% (Figura 13).



**Figura 13 - Consumo de água segundo o uso final no mundo, países desenvolvidos e em desenvolvimento**

Fonte: (UNESCO, 2003)

Existe um problema quanto à sustentabilidade dos recursos hídricos em muitos lugares porque a taxa de utilização da água doce é maior que a taxa de regeneração das fontes naturais. Isso acontece, por exemplo, nas regiões áridas e semiáridas, que apresentam escassez hídrica em razão da falta de chuvas. Por esse motivo, elas são também as regiões que precisam de um maior uso de águas subterrâneas e de energia para poder bombear água dessas fontes. A figura 14 mostra o mapa de regiões áridas e semiáridas no mundo.



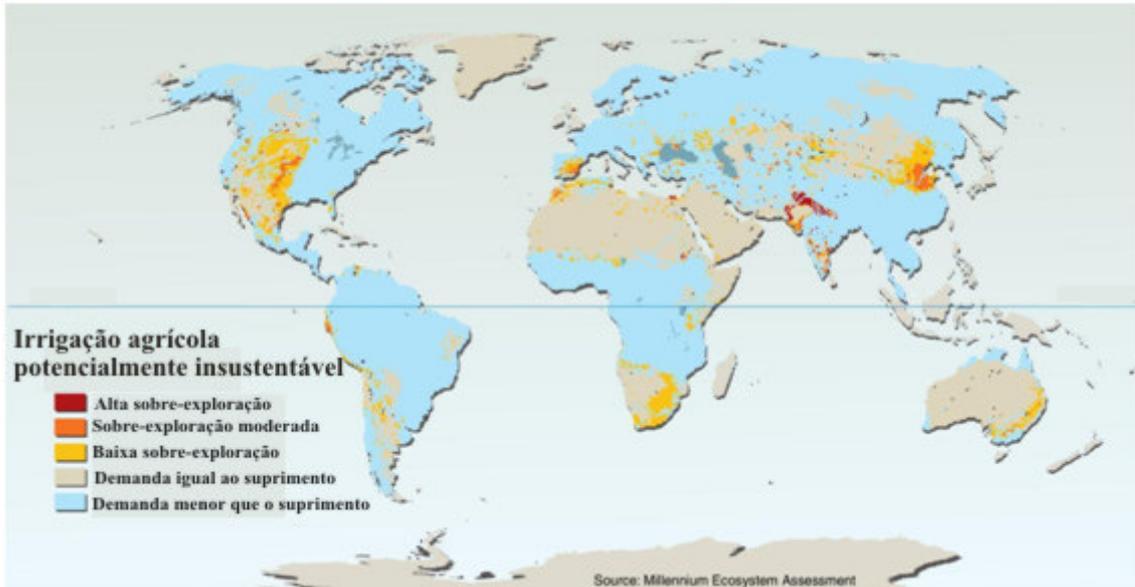
**Figura 14 – Mapa da distribuição de regiões áridas e semiáridas no mundo**

Fonte: (United States Geographical Survey, 1997)

Como pode ser visto na figura 14, as regiões áridas e semiáridas na América do Sul correspondem à faixa costeira do Peru e do Norte do Chile, o cone que abarca a região andina de Chile e Argentina e que se estende até a Patagônia, a região da península de Guajira no norte da Colômbia e da Venezuela e o Nordeste brasileiro.

O problema da falta de água se agrava quando a água é utilizada para fins agrícolas, pois é um consumo de tipo consultivo<sup>12</sup>. A figura 15 mostra a falta de sustentabilidade da agricultura irrigada no mundo. Algumas regiões, como o nordeste brasileiro, começam a apresentar alguns problemas de sustentabilidade da irrigação, enquanto em locais como a Espanha, a Índia, o norte da África e parte do sul da Ásia, o uso da agricultura irrigada já apresenta sérios problemas, com índices alarmantes de rebaixamento do lençol freático.

<sup>12</sup> O uso consultivo de água acontece quando o volume de água após sua utilização é inferior ao inicial. A planta precisa de água para satisfazer suas necessidades de fotossíntese, crescimento e reprodução. Esses tipos de processos são irreversíveis e não permitem a recuperação da água.



**Figura 15 - Falta de sustentabilidade na agricultura irrigada no mundo**

Fonte: (UNEP/GRID-ARENDAL, 2005)

### 2.2.3.1 Problema da água na irrigação brasileira

O semiárido brasileiro abrange 1.133 municípios dos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, com uma superfície de 969.589,4 km<sup>2</sup> (CARVALHO, 2006). Os critérios para pertencer ao semiárido brasileiro são uma precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros, índice de aridez de até 0,5 e risco de seca maior que 60% (CARVALHO, 2006). A figura 16 mostra o denominado “polígono das secas” brasileiro.



**Figura 16 - Polígono das secas**

Fonte: (CARVALHO, 2006)

O semiárido apresenta má distribuição dos regimes de chuva, com períodos curtos e irregulares durante o ano. Em consequência da alta irradiação solar, existe também alta taxa de evaporação das águas. A soma desses dois fatores provoca escassez de água. A falta de água causa uma forte dependência de maior parte das atividades produtivas da região à existência de infraestrutura hídrica (poços, barragens, adutoras, etc.) ou ao fornecimento de água com sistemas de bombeamento ou carros-pipas. A falta de fornecimento confiável de água faz com que o agricultor rural termine por produzir cultivos de curto período (hortaliças, feijão, etc.) e pouco valor no mercado.

Esse problema é apresentado, por exemplo, num estudo do Banco Mundial (2004), onde é mostrado que durante um período de 30 anos, os municípios beneficiados com projetos de irrigação cresceram em média cerca de 82%, enquanto municípios similares que não tiveram tais benefícios só cresceram em torno de 15% no mesmo período.

### 2.3 Irrigação localizada

Como a irrigação localizada otimiza o uso da água e opera com baixas pressões, com descargas entre 1 a 10 L/h e pressão de 5 a 25 m (LOSADA-VILLASANTE, 1992), a demanda total de energia deste sistema é inferior às demais alternativas e é esta característica que a torna mais compatível com os Sistemas Fotovoltaicos de Irrigação (SFVI), cujos custos de geração costumam ser elevados.

A irrigação localizada é o método de irrigação em que a água só é aplicada a uma fração do sistema radicular das plantas com o emprego de emissores pontuais (gotejadores), lineares (tubo porosos) ou superficiais (microaspersores) (ANDRADE, 2001).

Neste método a água só molha uma parte do solo, ou seja, mantêm-se a oferta ao mínimo possível o que resulta em economia de água. A máxima área sombreada pela planta molhada deve ser 20% nas regiões úmidas e 33% nas regiões semiáridas. Uma área molhada maior que 55% da área sombreada pela planta deixa de ser parte deste tipo de irrigação (SANTOS, 1997).

A economia de água torna-se importante, especialmente em regiões com escassez periódica de água ou em lugares onde o custo da água bombeada é elevado.

A aplicação da água na microirrigação precisa de uma rede hidráulica principal e outra secundária, além de ramais porta-emissores e dispositivos de aplicação de água (emissores). Os emissores são colocados a uma distância da planta que depende do tipo e da idade da cultura. Os sistemas de irrigação localizada funcionam normalmente com sistemas automatizados o que reduz o custo de mão de obra para seu funcionamento, mas que necessita também de uma manutenção constante.

A irrigação localizada apresenta várias vantagens em comparação com outros métodos de irrigação. Essas vantagens são listadas a seguir: (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2007)

- incrementa a eficiência de uso de água<sup>13</sup> em razão do incremento da produção e da qualidade da cultura e da redução de perdas de água na evapotranspiração e na percolação,
- permite a aplicação de fertilizantes e outros produtos,
- diminui os requerimentos de energia ao reduzir a quantidade de água bombeada necessária e trabalhar com baixas pressões,
- permite várias práticas agrícolas como borrifado, remoção de ervas daninhas, raleio, colheita, uso de húmus entre outras.
- permite o uso de efluentes biológicos e águas tratadas, sempre que filtrados.

Entre as desvantagens podem ser citadas:

- grande necessidade de manutenção do sistema em virtude do entupimento dos emissores, ataques de roedores e a intrusão das raízes,
- acumulação salina perto das plantas, especialmente em lugares onde as águas tiverem grandes concentrações de sais e em regiões áridas pela alta evaporação
- desenvolvimento limitado das raízes à zona de aplicação que sem uma boa planejamento pode ser excessivo, além de limitar o potencial de crescimento e produção da planta,
- custos elevados do sistema.

### **2.3.1 Tipos de sistemas de irrigação localizada**

Existem muitos tipos de irrigação localizada. Os mais utilizados na região semiárida são brasileira são: o gotejamento, a microaspersão e o xique-xique (SANTOS et al., 1997).

#### **2.3.1.1 Microirrigação por gotejamento**

Nesse sistema a água é liberada pontualmente na forma de pequenas gotas na superfície com baixa vazão (geralmente menor que 12 L/h segundo Lamm; Ayars; Nakayama 2007). Ainda que o sistema por gotejamento seja fácil de instalar e limpar, ele precisa de um bom sistema de filtragem, para evitar entupimentos.

#### **2.3.1.2 Microaspersão**

Nesse sistema a água é aplicada na superfície do solo em forma de uma pequena chuva, esguicho ou borrifo, utilizando o ar como meio de distribuição da água. As taxas de vazão são inferiores a 175 L/h (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2007). Esse tipo de sistema é

---

<sup>13</sup> Proporção entre a quantidade que foi captada pela cultura por quantidade de água colocada no sistema.

utilizado para irrigação de árvores ou plantas distantes, mas tem como principal problema a vulnerabilidade a ventos fortes e perdas evaporativas.

### **2.3.1.3 Sistema Xique-xique**

O sistema xique-xique é um sistema de irrigação de tipo artesanal introduzido no Brasil como parte do Projeto “Tecnologias apropriadas à pequena irrigação” no marco da Cooperação técnica Franco-brasileira (COSTA; ARAUJO; COSTA, 2006). O agricultor perfura uma tubulação com orifícios de 1 a 2 mm. A eficiência da distribuição de água neste sistema está em torno de 67% (SANTOS et al., 1997).

## **2.3.2 Componentes de um sistema de irrigação localizada**

Um sistema de irrigação localizada típico tem como componentes: cabeçal de irrigação, sistema de condução e distribuição e emissores.

### **2.3.2.1 Cabeçal de irrigação**

O cabeçal de irrigação é constituído por sistema de impulsão de água, unidade de filtragem, unidade de fertilização e elementos de controle hidráulico (válvulas, registros e manômetros).

O sistema de impulsão de água fornece a pressão e vazão de trabalho ao sistema de irrigação. Pode-se utilizar uma bomba ou um reservatório elevado para regular a pressão. A vazão pode variar segundo o diâmetro da tubulação.

O sistema de filtragem serve para evitar o entupimento dos emissores. Os filtros mais comuns são os de areia e os de tela. O primeiro é geralmente um tanque com areia em seu interior e serve para filtrar lodo, areia fina e material orgânico. Os filtros de tela estão constituídos por um corpo metálico ou de plástico com um elemento filtrante no interior e permitem a filtração de partículas mais finas, como areia, argila ou silte.

A seleção de um filtro depende da fonte de água. Quando se utiliza águas superficiais, os filtros de areia são usados como sistema de filtragem primário e os de tela como secundário. No caso de fontes subterrâneas, é comum o uso único do filtro de tela.

A unidade de fertilização serve para a aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas

### **2.3.2.2 Sistema de distribuição**

O sistema de distribuição é caracterizado pela rede hidráulica que permite a condução da água da fonte ou reservatório até a cultura. As tubulações são principalmente de materiais como o policloreto de vinila (PVC) e polietileno (PE). O PVC é um material rígido enquanto o PE é flexível. Geralmente por questão de custos, utiliza-se PE para as redes terciárias e o PVC para as redes secundárias e principal. Neste caso, o PVC é enterrado, em virtude da sua baixa resistência à energia solar.

A linha principal é a de maior diâmetro na rede e sua função é conduzir a água até as hortas. As linhas secundárias são de menor diâmetro e transportam a água até as linhas laterais. As linhas principais e secundárias contam geralmente com registros e, em alguns casos, com filtros secundários, dispositivos de segurança e válvulas de controle de pressão ou volumétricas automatizadas ou manuais. Os emissores são instalados nas linhas laterais.

### **2.3.2.3 Emissores**

Os emissores são dispositivos que controlam a saída da água para a planta. Existe grande variedade de emissores, mas os principais são os gotejadores, as fitas ou tubos perfurados e os microaspersores.

Em geral um bom emissor deve ter as seguintes características (SANTOS et al., 1997):

- não deve ser facilmente entupido e deve oferecer facilidade de limpeza,
- deve ser resistente ao desgaste provocado pela radiação solar, agentes químicos e ação da temperatura,
- deve ser estável em relação a vazão e pressão,
- deve possuir boa qualidade, uniformidade de fabricação e garantia do fabricante.

## **2.4 Sistemas de bombeamento**

Existe grande variedade de sistemas de bombeamento de água que podem ser aplicadas em zonas isoladas ou remotas. Os sistemas de bombeamento podem ser classificados de acordo com suas fontes de energia e suas características técnicas. Quanto à escolha de um sistema de

bombeamento a tabela 5 mostra as vantagens e desvantagens de três opções de bombeamento: com rede elétrica convencional, com motores de combustão interna e com sistemas fotovoltaicos.

Tabela 5 - Comparação entre sistemas de bombeamento segundo a fonte

	Rede elétrica convencional	Motores de combustão interna	Fotovoltaico
Custo inicial	Baixo se tiver acesso à rede elétrica	Moderado	Elevado
Custo de operação	Baixo	Alto	Nulo
Custo de manutenção	Baixo	Alto	Moderado
Disponibilidade de equipamentos	Ampla	Ampla	Difícil em alguns lugares
Impactos ambientais	Na construção da rede elétrica e na geração dependendo da fonte (hidrelétrica, nuclear ou combustíveis)	Altos impactos ambientais na operação (emissão de gases contaminantes e ruídos)	Impactos ambientais (na fabricação dos equipamentos)
Outras vantagens			Operação autônoma
Outros problemas	Custo e dificuldade de extensão de rede em alguns lugares	Custo e dificuldade de fornecimento contínuo de combustíveis em alguns lugares	É necessário um sistema de armazenamento hídrico ou eletroquímico.

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Assim como em outras aplicações de energia fotovoltaica, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento podem ser usados em localidades remotas onde outras fontes de energia não são disponíveis ou confiáveis. As principais vantagens dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento são: independência de fontes combustíveis, baixa necessidade de manutenção de seus equipamentos, relativa facilidade de instalação e deslocamento, longa vida do gerador e operação autônoma. Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento têm custos iniciais elevados, dependência do recurso solar e das condições atmosféricas, e dificuldade de obtenção de material de reposição e de mão de obra qualificada para o reparo dos equipamentos.

#### **2.4.2 Sistemas de bombeamento com motores de combustão interna**

Os sistemas de bombeamento com motores de combustão interna são muito usados ao redor do mundo principalmente porque não dependem de condições meteorológicas ou geográficas especiais para seu funcionamento. Estes sistemas apresentam como principais vantagens um relativo baixo custo inicial, facilidade de instalação e deslocamento, facilidade de aquisição de peças de reposição e existência de recursos humanos capacitados para sua instalação e manutenção. Entretanto, apresentam custo de operação elevado, especialmente em zonas remotas onde o fornecimento periódico de combustíveis pode ser uma tarefa complicada e muito cara. Os sistemas de bombeamento com diesel precisam de manutenção contínua e especializada. Esse tipo de sistema também apresenta problemas de poluição ambiental ao emitir gases contaminantes e produzir ruído durante seu funcionamento.

#### **2.4.3 Sistemas de bombeamento que utilizam a rede elétrica convencional**

Muitos sistemas de bombeamento ao redor de mundo usam a energia elétrica distribuída pela rede elétrica convencional, a qual dependendo da matriz energética da região pode ser produzida por usinas térmicas, hidrelétricas ou nucleares.

Os sistemas de bombeamento que aproveitam a rede convencional têm baixos custos de investimento, além de baixos custos de operação. Como seu uso é massivo, há facilidade para comprar motobombas e materiais de reposição. Outra vantagem é que em sua operação produzem um baixo impacto ambiental. Por outro lado, esse tipo de sistemas precisa de técnicos qualificados para manutenção da rede elétrica.

A principal limitação dessa modalidade é a dependência da existência de rede de distribuição elétrica até o local de uso, o que muitas vezes não ocorre por problemas técnicos ambientais ou econômicos.

#### **2.4.4 Sistemas eólicos de bombeamento**

Os sistemas eólicos de bombeamento são uma boa opção em lugares com bons regimes de vento, em virtude de sua operação independente de supervisão e de uso de combustível, longa vida útil de vários dos seus componentes e baixos impactos ambientais.

Os sistemas eólicos de bombeamento precisam de um clima favorável para seu funcionamento. Quando isso não acontece, torna-se necessário armazenar água em reservatórios, o que aumenta os custos iniciais. A necessidade de manutenção dessa modalidade costuma ser maior do que nos sistemas fotovoltaicos e dos sistemas que usam a rede elétrica.

#### **2.4.5 Sistemas de bombeamento manuais**

Os sistemas de bombeamento manuais têm como principais vantagens: baixo custo, facilidade de manutenção e a possibilidade de serem produzidos e reparados no próprio local, em alguns casos. Além disso, as bombas manuais não utilizam combustíveis.

Por outro lado, as bombas manuais precisam de manutenção constante e de operários que se dediquem a essa tarefa por longos períodos porque a vazão fornecida é muito baixa. Também está limitado a pequenas alturas manométricas.

## **CAPÍTULO 3 – SISTEMAS FOTOVOLTAICO DE IRRIGAÇÃO (SFVI)**

Este capítulo apresenta sucintamente o histórico dos projetos com sistemas fotovoltaicos de irrigação (SFVI) no mundo e no Brasil. Também são apresentadas as diferentes configurações e equipamentos existentes para um SFVI, como o sistema de geração, sistema de condicionamento de potência, conjunto motobomba e o sistema de irrigação localizada.

### **3.1 Projetos com SFVI no mundo**

A energia solar vinha sendo testada para o bombeamento de água desde a segunda metade do século XX, mas as condições tecnológicas necessárias para o bombeamento fotovoltaico só ocorreram bem mais tarde (POZA, 2008). Muitos projetos foram desenvolvidos ao redor do mundo e uma análise mais detalhada do histórico dos projetos de bombeamento fotovoltaico pode ser encontrada em Poza (2008) e Fedrizzi (2002). No entanto, é difícil saber com precisão quando essa tecnologia começou a ser utilizada para a irrigação.

Durante a década de 1960, foi implementado com êxito um sistema fotovoltaico de irrigação (SFVI) na antiga União Soviética, em uma área remota do semiárido do sudeste do país. No Japão, alguns dos sistemas fotovoltaicos instalados entre 1963 e 1973 foram usados para a irrigação. Em 1977, nos Estados Unidos da América, foi instalado um sistema experimental para irrigação, uso de ventiladores para secagem de grãos e outros equipamentos. (REDDY; SATYANARAYANA, 2008)

Entre 1979 e 1981, uma parceria entre o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Banco Mundial (BM) e a ONG *Intermediate Technology Development Group* (ITDG) permitiu a realização de um projeto piloto para avaliação de pequenos SFVI (de 100 a 300 Wp) usados em pequenas propriedades rurais de Mali, Filipinas e Sudão (HALCROW, 1981).

Em 1998 um projeto de irrigação fotovoltaica foi implementado para a irrigação de cultivo de forragem para gado em uma zona da Baixa Califórnia (EUA) que caracteriza-se pelos longos períodos de secas (ROCHIN; ELLIS; STRACHAN, 1998).

Entre 1998 e 2002, a Agência de Cooperação Alemã, *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ)<sup>14</sup>, iniciou o programa *PVP Irrigation Pilot Project* no qual foram instalados dez SFVI no Chile, Egito e Jordânia (GTZ, 2003). A experiência mostrou a aceitação da tecnologia pelos usuários e a viabilidade dos SFVI em relação aos sistemas de combustão interna sob certas condições (alto grau de utilização do sistema, campos de cultivo menores do que quatro hectares, produção de culturas com alto valor de mercado). Cinco anos depois de finalizado o projeto foi observado que um dos quatro sistemas instalados no Chile estava funcionando em perfeitas condições, dois continuavam em operação, mas não em toda sua capacidade, e outro havia sido soterrado por um terremoto (GTZ, 2008). (Detalhes podem ser consultados na seção 4.2.1).

O Programa Regional Solar (PRS) para o abastecimento de água com energia fotovoltaica a oito países da região Saheliana instalou 1.040 sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Além do uso doméstico, foi fomentada a irrigação de hortaliças e frutíferas. Este programa foi pioneiro na avaliação e controle de qualidade dos equipamentos antes de serem instalados (FEDRIZZI, 2002)

O *PV Water Pumping Program* implantado em Marrocos com apoio da União Européia, conta com 12 anos de experiência monitorada. Neste período, abasteceu com cinco milhões de metros cúbicos de água uma população com cerca de 40 mil pessoas, com 49 sistemas totalizando 173 kWp (NARVARTE; LORENZO, 2010). Apesar de não ter sido idealizado para a irrigação, parte do excedente de água é utilizada para irrigação de subsistência.

No marco do programa MEDA (*Euro-Mediterranean Regional Programme for Local Water Management*), financiado pela União Européia para ajudar na reforma da estrutura econômica e social dos países da África mediterrânea, foram instalados 52 sistemas de bombeamento fotovoltaico em Marrocos, Argélia e Tunísia. Da água bombeada por esses sistemas, 10% é utilizada para irrigação (POZA, 2008).

O fundo *Global Environment Facility* (GEF) - *Small Grants* promoveu a instalação de quatro SFVI demonstrativos na Tanzânia, com a finalidade de reduzir a pobreza alimentar de comunidades rurais. Uma parte do investimento foi viabilizada pelo fundo (60%) e o restante

---

<sup>14</sup> Hoje GIZ: *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*.

pelo governo local (10%) e as comunidades (30%). O fundo promoveu também a instalação de dois sistemas fotovoltaicos de bombeamento na Albânia, um dos quais teve dedicação exclusiva para irrigação. O mesmo fundo ajudou na implementação de um SFVI na região de Usulután, El Salvador. (GLOBAL ENVIROMENT FACILITY (GEF) - SMALL GRANTS, 2003)

Na Espanha, o governo de Andaluzia incentivou, mediante esquemas financeiros atrativos, a aquisição de SFVI para irrigação de Olivares (FEDRIZZI, 2003) (Figura 17).



**Figura 17 - Sistemas fotovoltaicos de bombeamento utilizados para irrigação de oliveiras em Jaén, Espanha**

Fonte: (Arquivo gráfico do LSF-IEE)

A companhia Shell e a *WorldWater & Power Corporation* instalaram em 2003 o maior sistema de irrigação do mundo, com 36 kWp, no Vale de San Joaquin, Estados Unidos. Esse sistema tem fins demonstrativos e não comerciais (CALIFORNIA SOLAR CENTER, 2003).

Na Argentina, ONGs argentinas em parceria com ONGs alemãs, entre 2002 e 2004, instalaram seis SFVI para a irrigação de campos de cultivos para produção de batata, cenoura, milho e outros grãos (MÜLLER, 2004).

No Peru, um sistema piloto para irrigação localizada de aspargos foi instalado em 2008 pela Universidade de Massachusetts Lowell, como parte de seu programa de cooperação. (Detalhes podem ser consultados na seção 4.1.2).

Na Mauritânia, a ONG *Dentistas Sobre Ruedas* instalou um sistema SFVI piloto, de 425 Wp em 2009 (DENTISTAS SOBRE RUEDAS, 2009).

Em Benin, a ONG *Solar Electric Light Fund* (SELF) instalou três SFVI por gotejamento. Após um ano do monitoramento, foram registrados benefícios na renda, nutrição e no meio ambiente (BURNEY et al., 2010).

### **3.2 Projetos com SFVI no Brasil**

No Brasil foram instalados inúmeros sistemas fotovoltaicos de bombeamento, entretanto, informações sobre seu uso para irrigação são escassas. Alguns “projetos piloto” implementados principalmente no Nordeste do país, viabilizados através de parcerias entre ONGs, companhias fornecedoras de eletricidade e institutos de pesquisa, são apresentados nesta seção, totalizando 32 sistemas.

Alguns sistemas fotovoltaicos com aplicações de irrigação de culturas como uva, banana, melão, laranja, pinha, tomate e coco foram instalados na década de 1980 nos estados de Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (BIONE, 2006).

Na Bahia, entre 2006 e 2008, o Projeto “Adapta sertão” instalou sete sistemas de irrigação no município de Pintadas. Desses sistemas, quatro são operados com geradores a diesel, dois com bombas manuais e um deles com sistemas fotovoltaicos. Este sistema opera com a modalidade de gotejamento para a produção de hortaliças (Seção 4.3.4). Além disso, foi instalado em Capim Grosso nove SFVI de 880 Wp para bombear água do açude Rio dos Peixes, em parceria entre a *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) (Seção 4.3.1).

No Ceará foi implantado um SFVI em Lavras da Mangabeira pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Governo do Estado (EMATERCE), com o apoio da Secretaria de Desenvolvimento Agrário, da Coordenadoria de Desenvolvimento da Agricultura Familiar e do Instituto Agropolos. O projeto beneficia quatro famílias produtoras de hortaliças orgânicas. Em Fortaleza, a ONG Instituto Joazeiro de Desenvolvimento Sustentável implantou um SFVI no Centro de Referência em Alimentação Sustentável para o Combate à Desnutrição Infantil e outro no Centro de Referência em Agricultura Sustentável (Seção 4.3.5). O Programa B-REED (*Brazil Rural Energy Enterprise Development Program*)

financiou a aquisição de um SFVI para uma cooperativa de 20 famílias que produz produtos orgânicos comercializados em Fortaleza (Seção 4.3.6).

No estado de Mato Grosso, o fundo B-REED, administrado pela ONG E+CO, colaborou com a microempresa Village Ambiental, dedicada ao suprimento e manutenção de tecnologias com energias renováveis, na venda financiada de SFVI. Os dados disponíveis indicam que oito SFVI foram vendidos.

Em Minas Gerais, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) instalaram 17 sistemas fotovoltaicos domiciliares e um sistema fotovoltaico de bombeamento na comunidade de Macacos. Alguns equipamentos foram doados pelo NREL e o restante foi financiado pela Secretaria de Estado de Minas e Energia - SEME e o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios - PRODEEM. Uma parte do excedente da água bombeada foi destinada para irrigar a horta comunitária. A CEMIG também instalou um SFVI piloto na Fazenda Energética de Uberaba para a irrigação de uma plantação de 0,8 hectares de limão.

No estado de Tocantins, o Instituto Ecológica instalou três SFVI nos municípios de Palmas, Pium e Araguacema. Os sistemas têm como finalidade a produção de cultivos orgânicos.

Em Pernambuco a ONG NAPER SOLAR em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco instalou 6 SFVI utilizando sistemas de irrigação artesanal xique-xique. Em cinco anos de projeto foram observados impactos positivos na renda, segurança alimentar, saúde e bem-estar social da população local. (COSTA; ARAUJO; COSTA, 2006)

No estado de Alagoas, o Instituto Eco-Engenho, no marco do Programa H2SOL - Água Solar implantou um SFVI. Um deles foi instalado na comunidade de Traíras, às margens do Rio São Francisco, e serve para irrigar uma área de um hectare para o cultivo de melancia e mamão (seção 4.3.2). Este sistema, de 1,6 kWp, está integrado a um sistema de irrigação por gotejamento. Outro sistema instalado na comunidade de Baixas, propicia a circulação de água em cultivo hidropônico de pimenta.

Na Paraíba, três SFVI foram instalados pela Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba (EMEPA) nos municípios de Patos, Itaporanga e Condado. Os SFVI serviram para

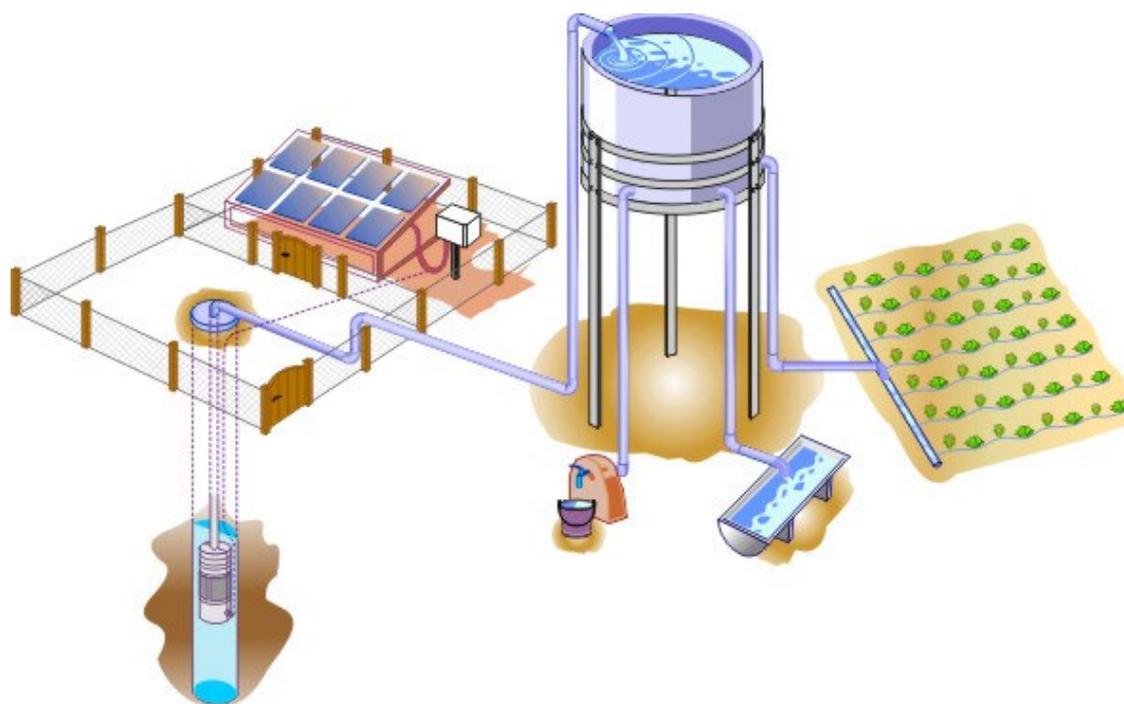
avaliar o desempenho dos consórcios: banana - feijão, e goiaba - maracujá - melão no sertão paraibano, utilizando-se o sistema xique-xique (seção 4.3.3).

### **3.3 Sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação**

A configuração básica de um sistema fotovoltaico de bombeamento típico é constituída por gerador fotovoltaico, equipamentos de condicionamento de potência, grupo motobomba, sistema de armazenamento (opcional) e sistema de distribuição. Enquanto os três primeiros elementos são similares para qualquer aplicação, os sistemas de armazenamento e distribuição variam de acordo a topografia do terreno e com a finalidade que é dada à água, que poderá ser destinada para consumo humano, consumo animal e irrigação.

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação mais simples incluem um sistema de geração fotovoltaica conectado diretamente a um conjunto motobomba em CC, sendo este último conectado diretamente ao sistema de distribuição. Sistemas mais complexos, porém mais custosos, podem incluir um sistema de armazenamento (bateria ou reservatório de água), além de condicionamento de potência para otimizar o acoplamento entre o gerador e a motobomba, e seguimento solar para maximizar a quantidade de água bombeada. Além disso, quando necessário, pode haver o uso de um subsistema de bombeamento para a elevação da pressão de irrigação.

A figura 18 apresenta um diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico de bombeamento com aplicações para consumo humano, animal e irrigação.



**Figura 18 - Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento com aplicações para consumo humano, animal e irrigação**

Fonte: (Arquivo gráfico do LSF-IEE)

Em aplicações de bombeamento de água com geração fotovoltaica, diversos tipos de bomba podem ser utilizados. Elas são classificadas, segundo a tecnologia, em centrífugas ou deslocamento positivo, e em submersíveis, superficiais ou flutuantes, segundo sua localização na fonte de água a ser utilizada. Também existe uma variedade de controladores de potência cujo uso depende, entre outros fatores, das características da motobomba selecionada.

Embora exista grande variedade de equipamentos e configurações para o sistema fotovoltaico de bombeamento, a sua seleção varia de acordo com as características específicas da aplicação e da localização do empreendimento. Essa seleção de equipamentos afeta criticamente a viabilidade econômica e o tempo de vida útil do projeto (SHARMA et al., 1995 apud WENHAM et al., 2007).

### 3.3.1 Gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é constituído por módulos conectados em associações em série e/ou paralelo, para poder atingir os parâmetros de trabalho requeridos pela motobomba. O gerador fotovoltaico deve ser montado sobre uma estrutura feita de material resistente às condições climáticas do lugar (chuvas, umidade, nevascas, radiação intensa, etc.). Essa estrutura pode ser

de tipo fixo ou móvel. A orientação do gerador fotovoltaico costuma ser em direção ao Norte para localidades do hemisfério sul e em direção ao Sul para as localidades do hemisfério norte.

No tipo fixo, o gerador pode ser colocado num ângulo de inclinação que maximize a captação do recurso solar durante o ano todo (o qual é geralmente igual ao valor da latitude do lugar) ou em posição que maximize a captação durante o período de maior demanda energética. No caso específico dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação a escolha vai depender do balanço entre a irradiação solar, a pluviometria e as necessidades de água dos cultivos. Pode-se privilegiar a captação nos meses de chuva, quando a radiação é menor, ou privilegiar a captação nos meses secos, quando há menos água disponível e é maior a demanda hídrica dos cultivos.

No tipo móvel, são usados sistemas de seguimento solar com a finalidade de maximizar a captação da irradiação solar e, em consequência, aumentar a quantidade de água bombeada. Com os sistemas de seguimento solar pode-se reduzir o número de módulos necessários para bombear uma determinada quantidade de água, o que significa uma economia na aquisição dos módulos e um uso menor de área de captação. Os sistemas com seguimento podem ser classificados em passivos ou ativos se usam ou não a energia auxiliar; e segundo o número de graus de liberdade de giro, em seguidores de um eixo ou de dois eixos (horizontal, vertical/azimutal ou polar). Segundo GTZ (1999), um arranjo de um eixo, onde só se modifica o ângulo de inclinação, pode incrementar a captação em 7 % e um arranjo com seguimento azimutal pode aumentar a captação em 22 %.

Entretanto, em virtude da existência de partes móveis nos sistemas de seguimento solar o uso desse tipo de tecnologia adiciona complexidade ao sistema de bombeamento e reduz a confiabilidade. Além disso, os custos de aquisição, manutenção e reposição dos equipamentos para o seguimento solar ao longo da vida útil do projeto podem não compensar a menor utilização de módulos e da área ocupada pelo gerador (FEDRIZZI, 2003). A estrutura mecânica também pode ser movimentada manualmente. Halcrow et al. (1981) (citado por WENHAM et al., 2007) menciona que em um projeto de bombeamento do Banco Mundial que utilizava o conjunto motobomba mais eficiente da época (1981) se obteve incremento de 30 % na produtividade diária, quando foi utilizado um sistema de seguimento manual com dois ajustes diários. Em um estudo comparativo sob determinadas condições de

funcionamento, obteve-se entre 37 % e 41 % a mais de água bombeada com o sistema com seguimento ativo em relação ao sistema sem seguimento solar (VILELA; FRAINDERAICH; TIBA, 2003).

Sistemas com concentração solar também podem ser usados para aumentar a captação do recurso solar. O uso deste tipo de tecnologia ainda é limitado e raro, em razão da necessidade de seguimento, da iluminação não homogênea das células, do estresse térmico e das mudanças a longo prazo das propriedades óticas do sistema (GTZ, 1999). O trabalho de Bione, Vilela e Frainderaich (2004) mostra que se adicionalmente ao sistema de seguimento for instalado também um sistema de concentração (neste caso, um concentrador tipo V) pode-se obter, sob certas condições, incrementos de até 149% da captação. Segundo esses autores, o custo da água bombeada pode ser reduzido em até 19% em comparação com um sistema de geração fixo, se usado um sistema de seguimento, e em 48% quando usados um sistema de seguimento com concentração.

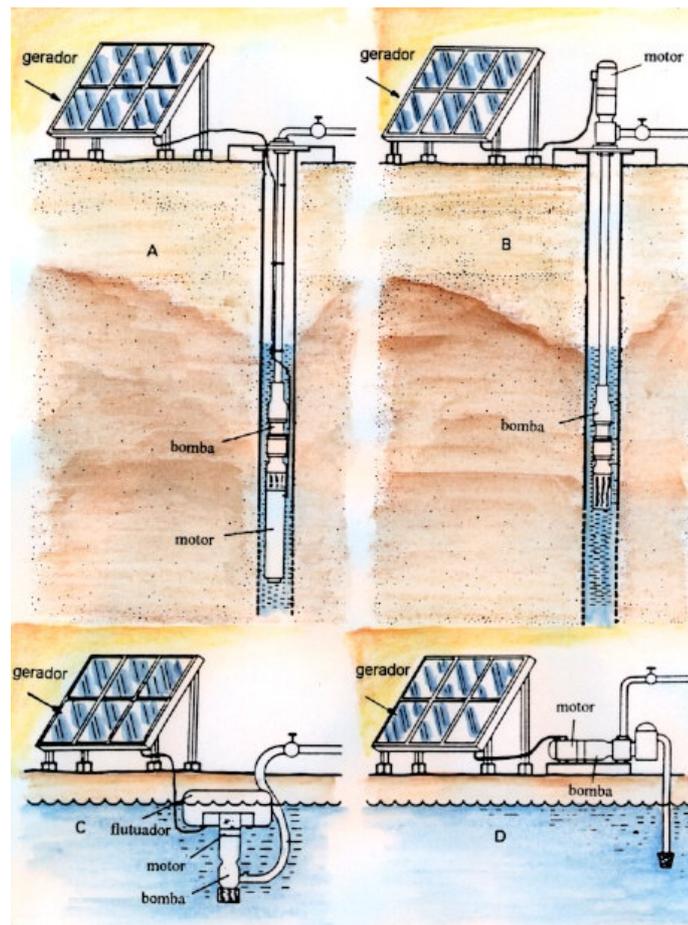
### **3.3.2 Conjunto motobomba**

A motobomba é a parte do sistema que transforma a energia elétrica em energia mecânica e, como seu nome indica, é composta por um motor e uma bomba. O termo motobomba integrada é dado em casos em que o motor e a bomba são conectados e colocados dentro do mesmo bloco pelo fabricante. Esta configuração simplifica o sistema e fornece altas eficiências quando operadas na proximidade do seu ponto de desenho. Porém, se usadas fora desse ponto as perdas podem ser consideráveis. (WENHAM et al., 2007).

A eficiência instantânea do conjunto motobomba está ao redor de 30% a 60%, dependendo do tipo do motor, da bomba e do sistema de transmissão de potência. Para maximizar a eficiência de operação, o conjunto motobomba deve ser adequadamente escolhido. Pode-se encontrar no mercado motores com eficiências próximas a 88% e bombas com eficiência de 70%. (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003).

Fedrizzi (1997) comenta que existem quatro configurações básicas de posicionamento do grupo motobomba no sistema (Figura 19, esquemas A, B, C e D). O esquema A, caracterizado por poço tubular com grupo motobomba em posição submersa, é amplamente utilizado em poços profundos com bombas centrífugas multiestágios ou de deslocamento positivo do tipo

helicoidal. O esquema B utiliza equipamento do tipo injetor com motor na superfície e a bomba na posição submersa, são pouco utilizados principalmente por causa da baixa eficiência do sistema. No esquema C, chamado de sistema flutuante, a motobomba se encontra na posição submersa posicionada em um flutuador. No esquema D o grupo motobomba encontra-se na superfície próximo do nível da água, pois funciona com um mecanismo de sucção. Os dois últimos são utilizados em rios, açudes, ou em poços de grande diâmetro do tipo cacimba.



**Figura 19 - Configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**

Fonte: (FEDRIZZI, 1997)

Não é comum a aquisição do motor separado da bomba. Ao contrário, o equipamento no mercado é encontrado já conectado. Porém, para fins didáticos é apresentada na continuação uma descrição separada de ambos os equipamentos.

### 3.3.2.1 Motor

O motor elétrico é o componente que transforma a energia elétrica em energia mecânica, a qual será aproveitada pela bomba. Motores CC são atrativos para pequenas potências,

principalmente porque permitem um acoplamento direto com o gerador fotovoltaico. Para maiores potências, o uso de motores CA com inversores CC - CA é mais atrativo, devido ao seu custo e disponibilidade.

Motores CC podem ser classificados em motores de ímã permanente (com escovas e sem escovas) e motores bobinados (*wound-field*). Os motores de ímã permanente não consomem energia para produzir o campo magnético e, por isso, sua eficiência é maior. Por isso, são mais atrativos para pequenas aplicações fotovoltaicas (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003).

Motores CC com escovas usam pequenos blocos de carvão-grafite que devem ser substituídos com frequência. Motores CC sem escovas foram desenvolvidos usando circuitos eletrônicos em lugar de escovas e precisam de menor manutenção. Os conjuntos motobombas mais seguros usam água como lubrificante para evitar uma possível contaminação do poço por vazamento de óleo diesel (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2010).

Os motores de corrente alternada são mais comuns no mercado porque estão concebidos para usar a energia que é distribuída pela rede elétrica convencional. Em consequência, há grande disponibilidade e variedade de motores CA no mercado.

Existem dois tipos básicos de motores CA: de indução assíncrona e síncrona. Segundo Argaw; Foster e Ellis (2003), o motor CA mais adequado para aplicações fotovoltaicas é o de indução de tipo gaiola de esquilo, por causa da sua robustez.

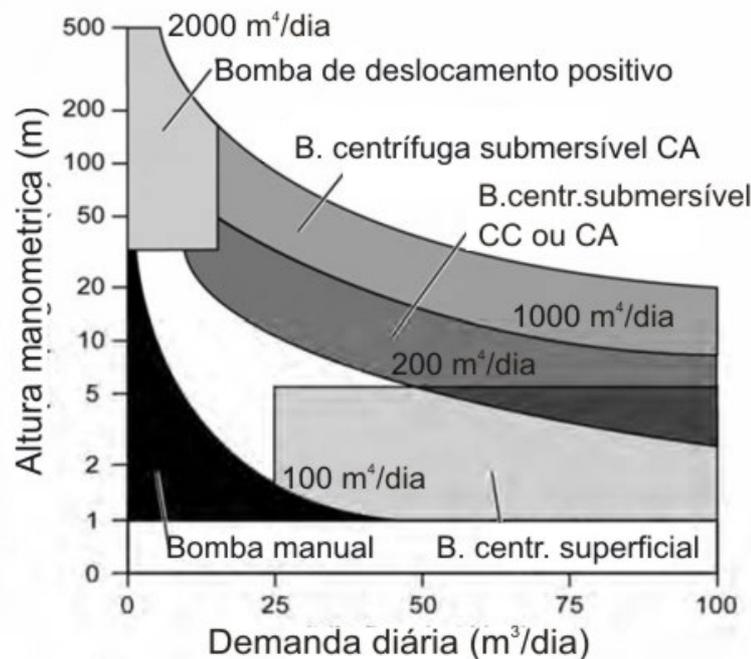
Motores CA geralmente são menos eficientes que os motores CC principalmente motores menores de 1 kW; no entanto, costumam ser mais baratos que estes últimos (WENHAM et al., 2007).

### **3.3.2.2 Bomba**

A bomba é o componente do sistema que através do acionamento do motor permite o deslocamento do fluido. As bombas usadas para o bombeamento de água são classificadas em bombas de deslocamento positivo (ou volumétricas) e bombas centrífugas. Além das diferenças de princípio de funcionamento de cada uma delas, essas bombas se diferenciam

pelas vazões e alturas manométricas máximas atingíveis por cada tecnologia. Segundo a localização, as bombas podem ser classificadas em submersíveis, superficiais e flutuantes.

A seleção do melhor tipo de bomba depende do requerimento de água diário, altura manométrica total do sistema e tipo de fonte de água. Por exemplo, Argaw; Foster e Ellis (2003) indicam que geralmente bombas volumétricas são melhores para vazões baixas ( $< 15 \text{ m}^3/\text{dia}$ ) e alturas manométricas altas (30–150 m) e bombas centrífugas de tipo submersível são mais adequadas para aplicações com vazões altas (25–100  $\text{m}^3/\text{dia}$ ) e alturas manométricas baixas (10–30 m). A figura 20 mostra as faixas aproximadas de aplicação para as bombas fotovoltaicas existentes.



**Figura 20 - Faixas de utilização de bombas fotovoltaicas**

Fonte: (WENHAM et al., 2007)

As bombas centrífugas, como seu nome indica, usam a força centrífuga para deslocar água através delas. Elas são constituídas por um elemento móvel (o impulsor) que controla o movimento do líquido usando a energia fornecida pelo motor. O impulsor incrementa a energia cinética do fluido a qual é transformada gradualmente em energia potencial em forma de pressão.

As bombas centrífugas são normalmente indicadas para aplicações de baixa pressão e grande vazão de água (WENHAM et al.,2007). Elas podem ser classificadas em mono ou multiestágios.

Para bombeamento a maiores alturas são usadas as multiestágios, sendo que cada estágio corresponde a um impulsor. Cada estágio aumenta a pressão e, assim, a capacidade de bombeamento do sistema, mas também aumenta as perdas por atrito, que podem resultar em perda de até 5% de eficiência por estágio (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2010).

Em velocidades reduzidas, como as produzidas por baixas irradiâncias, bombas centrífugas tem baixas eficiências.

As bombas de deslocamento positivo efetuam pressão sobre o líquido, o qual por estar confinado em uma câmara selada desloca-se a uma nova posição estática. Estas bombas são geralmente usadas em aplicações de potências menores a 500 Wp (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2010).

A eficiência e capacidade de bombeamento das bombas de deslocamento positivo são boas ainda em baixas velocidades de rotação durante baixas condições de irradiância. (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2010).

### **3.3.3 Tipos de acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto motobomba.**

Existem três possibilidades de acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto motobomba: direto para sistemas em corrente contínua, usando baterias e um sistema de controle de carga, ou usando um equipamento de condicionamento de potência.

#### **3.3.3.1 Acoplamento direto**

Este tipo de acoplamento é usado principalmente em sistemas fotovoltaicos de pequena potência (de 50 até 400 Wp), sendo o tipo de configuração mais simples.

A grande vantagem dessa modalidade é a economia que se obtém nos custos iniciais e de reposição por não requerer equipamentos mais complexos e mais caros. É possível usar essa

configuração para equipamentos de pequena potência e conjuntos motor CC com bombas de deslocamento positivo (diafragma ou pistão) porque elas são as que melhor se adaptam às variações de potência causadas pela mudança de irradiação.

### **3.3.3.2 Acoplamento com baterias**

O uso de baterias em um sistema fotovoltaico de bombeamento pode ter duas funções: armazenamento de energia e condicionamento de potência. Como sistema de armazenamento de energia as baterias permitem a operação fora do horário solar (Seção 3.3.4.1). Como sistema de condicionamento de potência, a função das baterias é de manter uma tensão constante de trabalho, a qual é selecionada para ter um valor próximo ao ponto máximo de potência do gerador fotovoltaico. Independentemente da função da bateria, é necessário o uso de um circuito de controle de carga e descarga, com a finalidade de proteger a bateria de sobrecargas e sobredescargas.

Segundo Wenham et al. (2007), se as baterias têm a função de condicionador de potência e não de sistema de armazenamento, é preferível usar baterias de Ni – Cd apesar de ser mais custosas (duas a três vezes o preço das baterias de Chumbo – ácido) e terem menor densidade energética, porque elas exigem pouca manutenção, permitem a ciclagem profunda e podem ser sobrecarregadas e sobredescarregadas por longos períodos de tempo sem prejudicar sua vida útil. O mesmo autor menciona que baterias industriais (*forklift*) podem ser compatíveis com esse uso, mesmo com suas altas taxas de autodescarga, em razão de sua capacidade de cargas e descargas rápidas.

### **3.3.3.3 Acoplamento com equipamentos de condicionamento de potência**

Muitos sistemas fotovoltaicos de bombeamento são equipados com algum tipo de sistema de condicionamento de potência, os quais servem como um elemento de ligação entre o gerador fotovoltaico e o sistema motobomba. O uso desses equipamentos permite controlar ou processar a energia fornecida à motobomba e, dessa maneira, maximizar a eficiência do sistema. Entre as principais funções desses sistemas se encontram o controle do arranque e das paradas da bomba, a conversão CC a CA ou a mudança de tensão CC – CC, se for o caso, e a proteção da motobomba com a eliminação das perturbações elétricas resultantes.

Os equipamentos de condicionamento de potência mais usados em sistemas fotovoltaicos de bombeamento são: conversores CC - CC, *booster*, inversores CC - CA e conversores de frequência. O consumo típico desses equipamentos é de 4-7% do valor total fornecido pelo gerador (MATLIN, 1979 apud WENHAM et al., 2007).

O conversor CC - CC é um dispositivo que serve para regular a energia em CC fornecida aos motores que trabalham em corrente contínua, ajustando as variáveis tensão e corrente ao elevá-las ou reduzi-las segundo os requerimentos do conjunto motobomba. Este sistema é essencial quando se trabalha com motobombas de deslocamento positivo, porque por suas condições de trabalho precisam de uma corrente específica de arranque, a qual não pode ser sempre fornecida pelo gerador fotovoltaico quando as condições climáticas não são adequadas (primeiras horas da manhã ou aparição de nuvens). Há também conversores configurados para trabalhar na tensão de entrada do ponto de máxima potência da curva I-V do gerador fotovoltaico para as diferentes condições de temperatura, irradiação e carga, chamados de Conversores CC – CC com MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

O *booster* é um capacitor que armazena uma fração da energia produzida pelo gerador fotovoltaico com o fim de fornecer uma corrente de pico para arranque das bombas de deslocamento positivo.

O inversor CC – CA é usado para transformar a corrente contínua fornecida pelo gerador fotovoltaico em corrente alternada. Geralmente os inversores usados em aplicações fotovoltaicas têm frequências e tensões de saída constantes, mas para aplicações de bombeamento esses parâmetros precisam ser variáveis. Por outro lado, muitos inversores no mercado só operam com tensões de entrada estáveis, sendo necessário o uso de baterias ou conversores CC - CC para seu funcionamento. Os inversores usados para bombeamento também podem incluir sistemas de seguimento do ponto de máxima potência e saídas monofásicas ou trifásicas.

O conversor de frequência possui um circuito eletrônico similar ao inversor CC - CA, mas transforma a corrente contínua em corrente alternada com frequência variável. Quando conectados ao motor CA, os conversores de frequência modificam a frequência de trabalho do motor e, assim, sua vazão de extração. Em razão destas características, o conversor de

frequência permite o uso de motores de menor potência, o que implica uma redução de custos especialmente em sistemas de bombeamento de grande porte.

Outro benefício importante é a possibilidade de uso de motobombas convencionais em lugar de motobombas fabricadas exclusivamente para uso solar, o qual permite ampliar as possibilidades de compra de motobombas, com a conseqüente redução de custos e facilidade de manutenção e reposição. (ALONSO-ABELLA; LORENZO; CHENLO, 2003; BRITO, 2006).

### **3.3.4 Sistemas de armazenamento**

O recurso solar só está disponível durante um número determinado de horas por dia. Por esse motivo, usam-se mecanismos que permitam armazenar essa energia, de maneira que o sistema possa ser utilizado em qualquer momento. Existem duas opções para esse fim: armazenar uma parte ou a totalidade da energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico em sistemas eletroquímicos (baterias), ou armazenar a água bombeada em reservatórios.

#### **3.3.4.1 Sistema de armazenamento com baterias**

O armazenamento com baterias é comum em várias aplicações da energia fotovoltaica como a eletrificação domiciliar autônoma. Nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, o uso de baterias permite o uso do sistema fora do “horário solar” ou em momentos em que a radiação não é suficiente para o bombeamento.

Mesmo que a característica de independência com relação à disponibilidade do sol seja favorável para a programação da irrigação, o aumento dos custos totais com esta modalidade a torna inviável economicamente (SCHMIDT et. al 2000). Além disso, significa uma dificuldade a mais quando instaladas em localidades remotas, porque precisam ser substituídas com frequência, gerando problemas econômicos e de logística.

A vida útil das baterias depende do tipo e das condições de uso (temperatura do ambiente, profundidade de descarga e manutenção).

### 3.3.4.2 Sistema de armazenamento com reservatório

A utilização de reservatório de água permite o uso do sistema de irrigação fora do horário de bombeamento. A forma, volume e localização do reservatório dependem do tipo de aplicação e da disponibilidade no mercado onde se encontra o empreendimento (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003). Os reservatórios de água podem ser de diversos materiais, como PVC, fibra de vidro, polietileno, concreto, metal ou até mesmo escavações no terreno impermeabilizadas com material sintético ou com argila compactada.

O uso de um reservatório elevado é a configuração mais utilizada para sistemas de irrigação, principalmente pela simplicidade na operação que favorece a adoção pelo usuário. Dado que a altura da água do reservatório determina a pressão de trabalho do sistema, pode-se trabalhar diretamente com sistemas de irrigação de baixa pressão sempre que se minimizem as perdas hidráulicas do tanque até o sistema de irrigação. Nesse sentido, pode-se usar uma estrutura para esse fim ou aproveitar o relevo do lugar para a elevação do tanque (Figura 21 A e B). Devido aos altos custos e dificuldades técnicas que pode representar a elevação de um reservatório de grande volume, muitas vezes se opta por colocá-lo no nível do solo (Figura 21 C).

O volume de água a ser armazenado vai depender de vários parâmetros, como as condições climáticas locais, o tipo de solo, a demanda hídrica da cultura e a disponibilidade financeira do projeto. A demanda hídrica depende grandemente da evapotranspiração, que, por sua vez, está relacionada à umidade relativa do ar, à temperatura, ao tipo e a fase da cultura. Além desses aspectos, o volume de água a ser armazenado vai depender do tempo de autonomia desejado, ou seja, da quantidade de água armazenada para irrigar determinado número de dias sem que o bombeamento esteja funcionando. 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 segurança da produção.



**Figura 21 - Configurações de reservatório segundo a elevação**  
**A. Elevado com uma estrutura. B. Elevado aproveitando as características do terreno.**  
**C. No nível do solo**

Fonte: (Arquivo pessoal, Arquivo gráfico do LSF-IEE)

### 3.3.5 Sistema de irrigação

A seleção do sistema de irrigação depende de vários fatores discutidos na seção 2.2.2. O sistema de irrigação localizado vem sendo o mais utilizado com SFVB, pois otimiza o uso da água e de energia. Maiores detalhes podem ser consultados na seção 2.3.

### 3.3.6 Tipos de acoplamento entre o conjunto motobomba e o sistema de irrigação.

De acordo com Müller (1992) citado por Schmidt et al. (2000), há basicamente quatro tipos de configurações de acoplamento entre os sistemas fotovoltaicos de bombeamento e o sistema de irrigação localizada: acoplamento direto, acoplamento com reservatório elevado conectado a um sistema de irrigação, acoplamento com reservatório ao nível do solo com bombeamento adicional de impulsão, e acoplamento direto com baterias e sem reservatório de água.

### **3.3.6.1 Acoplamento direto**

Nesse caso o conjunto motobomba é conectado diretamente ao sistema de irrigação. A pressão de trabalho varia de acordo com o nível de água no poço e com a irradiação solar. Como nessa configuração não se armazena água nem energia, pode haver dificuldade de manter a uniformidade e periodicidade de irrigação. Para uniformizá-la, pode-se usar uma válvula reguladora de pressão na saída da bomba, que permita a obtenção das condições de trabalho do emissor (HERRERA, 2006).

Atualmente existe um sistema de acoplamento direto no Chile com bom desempenho (GTZ, 2008). A experiência chilena mostra a importância da capacitação para a adoção desta tecnologia por parte do usuário (SCHMIDT et al., data indefinida).

### **3.3.6.2 Reservatório elevado conectado a um sistema de irrigação**

Este tipo de configuração é a mais utilizada para sistemas de irrigação, principalmente pela simplicidade na operação. Dado que a altura da água do reservatório determina a pressão de trabalho do sistema, pode-se trabalhar com sistemas de baixa pressão sempre que se minimizem as perdas hidráulicas do tanque até o sistema de irrigação, ou que se reduza a pressão quando essa for superior à pressão de trabalho dos difusores.

### **3.3.6.3 Reservatório ao nível do solo com bombeamento adicional de impulsão**

Para reduzir os custos de elevação do reservatório (principalmente para grandes volumes), pode-se trabalhar com um reservatório de água ao nível do solo em conjunto com uma motobomba de menor potência para poder condicionar o fluido às condições de trabalho requeridas. Em muitos casos esta opção consiste em uma escavação no solo, com algum tipo de revestimento. É possível usar alternativamente um tanque pressurizador.

### **3.3.6.4 Acoplamento direto com baterias e sem reservatório de água**

Este tipo de sistema já foi discutido na seção 3.3.4.1 e não se recomenda seu uso em SFVI.

## CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO DOS PROJETOS ESTUDADOS

Neste capítulo são apresentados os projetos estudados durante o desenvolvimento da dissertação. A informação sobre esses projetos foi obtida em visitas de campo, comunicação com membros da equipe do projeto mediante o uso de questionários e de a revisão bibliográfica de artigos.

### 4.1 Informações sobre projetos de bombeamento fotovoltaico instalados

Nesta seção, são descritos alguns projetos de instalação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. A finalidade desta seção é analisar e identificar barreiras e fatores chaves em comum para a implementação de projetos de bombeamento com sistemas fotovoltaicos, mesmo que cada região possua características particulares que as diferenciam das outras e eles não estejam dedicados à irrigação.

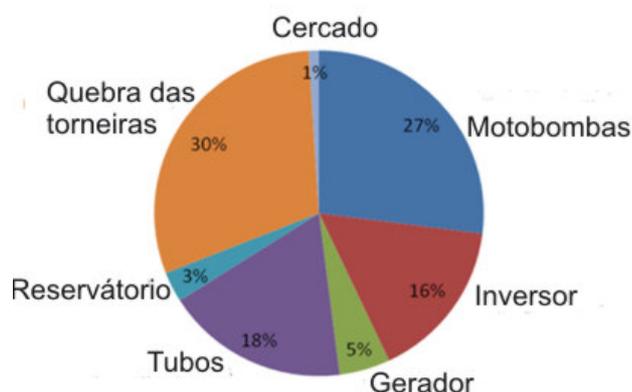
#### 4.1.1. Tailândia<sup>15</sup>

Até meados de 1999 foram instalados na Tailândia cerca de 1.000 sistemas fotovoltaicos de bombeamento pelo Departamento de Obras Públicas do Ministério do Interior e pelo projeto GIP (*Green Isan Project*) coordenado pelo Ministério da Defesa. A maior parte desses sistemas de bombeamento tem uma potência instalada entre 600 a 1.000 Wp, totalizando uma potência de aproximadamente 1 MWp. Os sistemas usavam motobombas submersíveis de corrente alternada e inversores CC - CA.

Entre 1995 e 1998, a *King Mongkut's University of Technology* fez um levantamento da situação dos SFVB instalados até aquele momento, realizando enquetes em 489 comunidades e entrevistando 360 moradores de 18 comunidades selecionadas além de monitorar o desempenho técnico de 13 sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Dos 489 sistemas analisados, 220 (45%) já não funcionavam ao término da pesquisa. Os problemas mais comuns desses sistemas foram devidos a quebras das torneiras (30%), falhas do conjunto motobomba (27%), vazamento de tubos (18%) e falhas dos inversores (16%) (Figura 22).

---

<sup>15</sup> Informação baseada no artigo de Kaunmuang et al. (2001)



**Figura 22 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados na Tailândia**

Fonte: (KAUNMUANG et al., 2001)

As falhas das motobombas são resultado da má qualidade da água e da falta de manutenção para evitar o entupimento de tubulações e da bomba com algas, plantas aquáticas e sedimentos. As falhas dos inversores foram causadas por sobretensões associadas a descargas atmosféricas, proteções inadequadas para a umidade, sobreaquecimento e curto-circuitos pela presença de ninhos de animais. Muito dos problemas citados estão relacionados com:

- inadequado levantamento de dados durante a etapa da elaboração do projeto,
- ausência de supervisão durante a instalação,
- inadequada organização para manter e administrar os sistemas,
- ausência de monitoramento dos sistemas por parte das entidades executoras.

#### 4.1.2 México<sup>16</sup>

Criado em 1992, o Programa Mexicano de Energias Renováveis instalou 206 SFVB entre 1994 e 2000. Este programa foi criado através de uma parceria entre a *Agency for International Development* (USAID) e *U.S. Department of Energy* (DOE) sendo administrado pela *Sandia National Laboratorie* e contando com o apoio de algumas instituições locais. Os recursos para a aquisição dos SFVB teve uma parte financiada pelo programa (principalmente nos primeiros anos) e o resto pelas entidades mexicanas (que aportaram mais nos últimos anos do projeto).

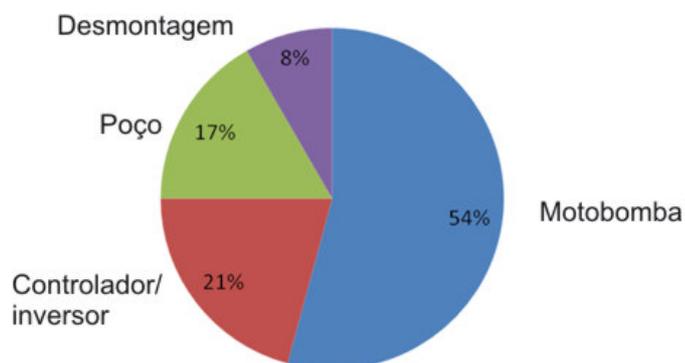
<sup>16</sup> Informação baseada no artigo de Espericueta et al. (2004)

Os 206 SFVB tinham uma potência média de 500 Wp, totalizando uma potência instalada do projeto de 101 kWp. Os sistemas contavam com motobomba, controlador, inversor para sistemas que utilizam motobombas CA e um dispositivo de proteção contra sobretensões.

Na situação anterior ao projeto, os fazendeiros usavam motores de carros, a gasolina ou diesel, para bombear a água. Esses equipamentos tinham uma vida entre quatro a cinco anos e precisam ser reparados de duas a três vezes por ano devido a falhas. Além disso, o custo de aquisição e transporte dos combustíveis é alto e essas regiões não estavam em planos de eletrificação imediata.

Entre 2003 e 2004 (10 anos após o começo do projeto), decidiu-se estudar o estado dos sistemas instalados. Com esse intuito foram visitados 46 SFVB (22% do número total de sistemas instalados) e se entrevistaram os donos ou operadores de cada sistema usando uma enquete elaborada para esse levantamento de dados. A pesquisa mostrou que 80% dos usuários estavam satisfeitos com a confiabilidade e o desempenho dos SFVB e que aproximadamente 13% deles usaram uma parcela da água bombeada para irrigação.

Dos 46 SFVB, 18 sistemas (39% dos SFVB visitados) não estavam operativos. Reportaram-se em total, 26 falhas acontecidas nesses sistemas, das quais 8 foram reparadas pelos usuários, o que permitiu que os sistemas continuem funcionando. 54% dos problemas tiveram relação com as bombas, 21% com controlador/inversor e 17% com o rebaixamento do freático ou colapso do poço. Não houve problemas com os módulos, mesmo eles sendo de diversas marcas e tipos, nem com os poucos sistemas de seguimento passivo instalados (Figura 23).



**Figura 23 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no México**

Fonte: (Espericueta et al., 2004)

Os SFVB instalados no projeto mostraram ser uma aplicação viável economicamente e aceita pelos usuários. O tempo médio de retorno do investimento dos sistemas é de 5-6 anos. Com o projeto, foi mostrado que fatores-chave para alcançar um mercado maduro incluem treinamento, tamanho do programa, existência de vários vendedores, qualidade do trabalho e a tecnologia usada. Nesse sentido, o programa investiu na capacitação de instaladores, vendedores, engenheiros e usuários.

Mesmo com os benefícios relatados, muitos sistemas ficaram paralisados, sem previsão de serem concertados em razão de que os usuários esperam que o governo assuma os gastos de reparação.

#### **4.1.3 Estados Unidos<sup>17</sup>**

Como a região sul dos EUA padece com longas temporadas de seca, o governo de Wyoming iniciou um programa de implementação de SFVB em parceria com a *University of Wyoming*, cooperativas e governos municipais locais.

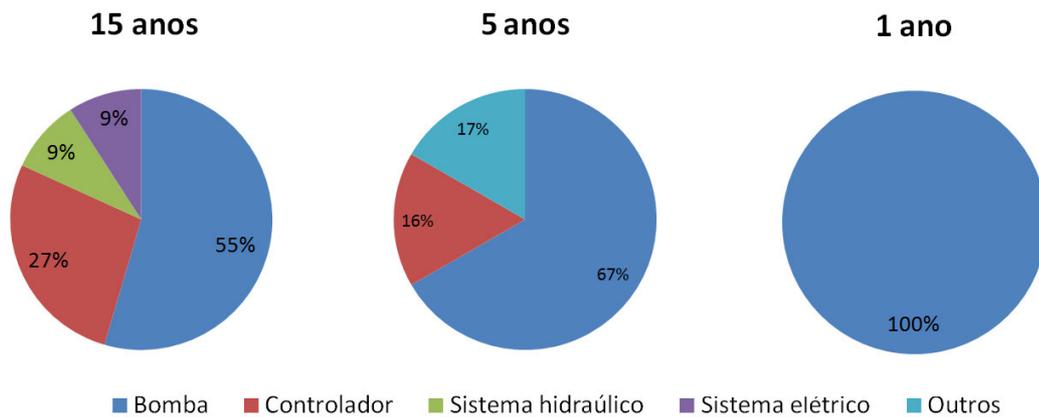
A distância média das propriedades à rede de distribuição é de 2,7 km. Os motogeradores a combustível fóssil apresentam problemas para sua manutenção e reabastecimento de combustível. Existem cata-ventos em alguns lugares, mas não existe vento suficiente em alguns dias do verão.

A *University of Wyoming* participou como instaladora e/ou supervisora na implementação de 90 SFVB entre 1991 e 2006. Entre 1991 e 1992 foram instalados 7 SFVB pela Universidade citada em parceria com a *Sandia National Laboratories*. Entre 2001 e 2002, instalaram-se 8 SFVB no estado, supervisionados pela Universidade, e, finalmente entre 2005 e 2006 foram instalados mais 75 SFVB.

O levantamento de dados sobre o estado de 42 SFVB foi feito pela *University of Wyoming* em 2006. Este levantamento foi realizado através de enquetes dirigidas aos usuários e agruparam-se os sistemas em três categorias, segundo o tempo de operação do sistema: 15 anos, 5 anos e 1 ano (Figura 24).

---

<sup>17</sup> Informação baseada no artigo de Meah, Fletcher e Ula (2008)



**Figura 24 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no Wyoming – USA**

Fonte: (MEAH; FLETCHER; ULA, 2008)

Analisaram-se cinco dos sete SFVB com quinze anos de operação, os quais estavam em operação no momento da pesquisa. Reportou-se 11 problemas (seis motobombas, três do controlador, um da tubulação e um das conexões e dos cabos). Em dois lugares, a motobomba precisou ser trocada duas vezes. Estudou-se também o estado de sete dos oito SFVB com cinco anos de operação. Só um deles não se encontrava em operação no momento da pesquisa devido a uma seca do poço. Dos cinco problemas reportados neste grupo, quatro foram da motobomba e um do controlador. Os problemas com as motobombas eram devido à presença de areia no poço. Um dos beneficiários teve de trocar três vezes a motobomba devido a esse problema. Nos sistemas com um ano de operação, as falhas estavam associadas a equipamentos defeituosos (controlador da motobomba e estator) e à corrosão do estator devido à acidez da água de um poço.

Os SFVB apresentaram um bom desempenho em termos de produtividade, confiabilidade e ganhos econômicos, segundo os próprios beneficiários. Vários beneficiários decidiram aumentar a sua quantidade de animais devido ao incremento da água disponibilizada com os SFVB.

O uso de materiais fornecidos por vendedores locais, criação de capacidades para a operação e manutenção dos SFVB a nível local e investimento em difusão da tecnologia foram pontos-chaves para esses resultados. Viu-se também que o conjunto motobomba mostrou ser a parte mais vulnerável do SFVB.

#### 4.1.4 Programa MEDA em Marrocos, Argélia e Tunísia<sup>18</sup>

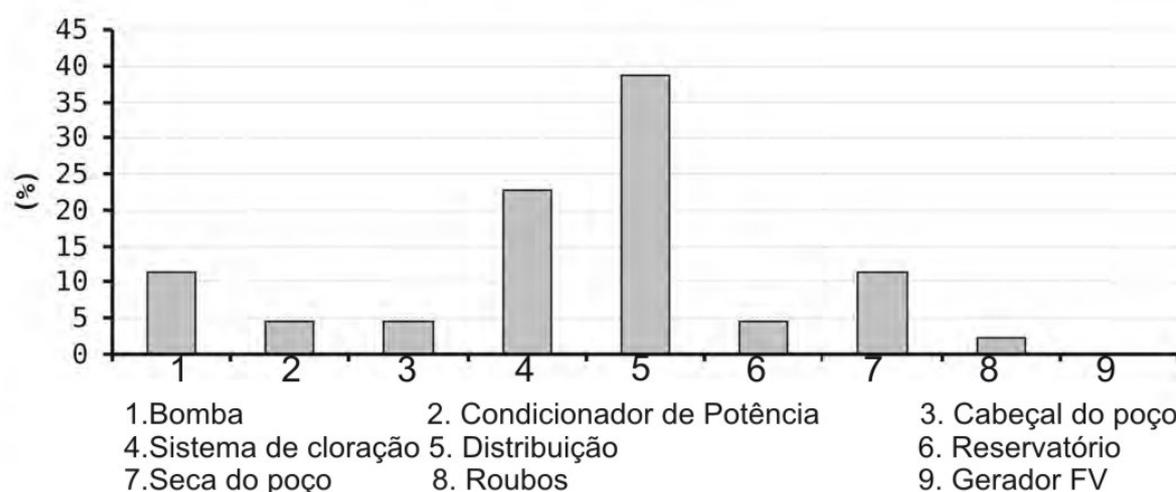
Como parte do programa MEDA (*Euro-Mediterranean Regional Programme for Local Water Management*), foi criado o projeto *Implementation of a PV Water pumping programme in Mediterrean countries*. O projeto foi financiado pela União Européia e a Agencia Espanhola de Cooperação Internacional (AECI) com o objetivo de ajudar na reforma da estrutura econômica e social dos países da África mediterrânea. No marco do programa foram instalados 52 sistemas fotovoltaicos de bombeamento em Marrocos, Argélia e Tunísia

O projeto teve um monitoramento contínuo do estado dos sistemas instalados. Além disso, vários equipamentos (motobombas, conversores de frequência, etc.) foram testados previamente em laboratório para conferir seu desempenho. A partir dos relatórios preenchidos pelos usuários e técnicos, constatou-se que a maior parte das falhas tinha relação com as partes de infraestrutura hidráulica e não com a parte fotovoltaica (Figura 25).

Entre as falhas registradas com a motobomba estão: ruptura do eixo de acoplamento, corrosão devido à acidez da água e curtos-circuitos nos cabos elétricos devido à perda de isolamento. Na parte hidráulica, os problemas registrados foram poços com nível baixo e/ou secos e vazamentos nas tubulações, conexões e reservatórios. Em razão do rigoroso controle de qualidade dos equipamentos elétricos do sistema e a uma revisão imediata dos problemas, a maior parte das falhas foi solucionada com baixo custo e até o momento do levantamento de dados, 37% dos sistemas instalados não tinham apresentado nenhum problema.

---

<sup>18</sup> Informação baseada na tese de Poza (2008)



**Figura 25 - Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no projeto MEDA**

Fonte: (Poza, 2008)

#### 4.1.5 Brasil

O Brasil é um país que conta com grande número de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Estima-se que até o ano 2002 foram instalado 3.291 sistemas fotovoltaicos de bombeamento com uma potência total de 1,5 MWp (FEDRIZZI, 2003) como poder ser visto na tabela 6<sup>19</sup>.

Tabela 6 - Sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados até 2002 no Brasil

Programa / Estado	Unidade	Potência (kWp)
Estimativa de 1981 a 1984	150	93
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM Fase I	54	77,9
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM Fase II	179	212,6
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM Fase III	224	164,5
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM Fase IV	1.240	539,5
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM Emerg.	800	235
Ministério de Ciência e Tecnologia - PTU.	29	4,5
Ministério da Saúde - FUNASA.	39	31,1
Cooperação Internacional	54	38,4
Governo da Bahia	62	34,8
Governo de Minas Gerais	168	125,5
Prefeitura Rio do Soto e Belém	6	5,4
Uso privado	298	28,3
<b>Total</b>	<b>3.291</b>	<b>1.590,7</b>

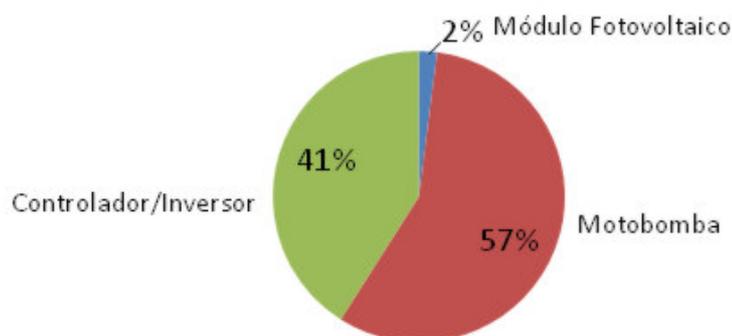
Fonte: Fedrizzi, 2003

<sup>19</sup> Devido à grande dispersão dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, esta é a versão disponível mais atualizada.

O PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios<sup>20</sup> foi a iniciativa federal mais importante de fornecimento de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos no Brasil. O PRODEEM constou de seis fases denominadas I, II, III, IV, V e “especial” ou “de bombeamento”.

Sob a coordenação da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), foi realizado um relatório com os problemas registrados em 801 sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no marco do PRODEEM. Os sistemas estudados foram instalados nos estados do Piauí, Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe. Mesmo sem considerar as falhas existentes com o sistema hidráulico, foram registradas 337 ocorrências com os SFVB.

A figura 26 mostra a distribuição das ocorrências. A maior parte dos problemas (57%) está associada à motobomba utilizada. As falhas dos equipamentos de condicionamento de potência representaram cerca de 41% dos problemas, e os problemas com os módulos fotovoltaicos representaram 2%.



**Figura 26 – Principais motivos de falhas nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados no marco do PRODEEM**

Fonte: (BEZERRA, 2002 apud FEDRIZZI, 2003)

Costa (2006), fez uma visita a 64 sistemas fotovoltaicos de bombeamento em 15 municípios de Pernambuco após um ano de operação e encontrou vários problemas relacionados a uma má concepção do projeto (equipamentos inadequadamente dimensionados ou selecionados) e problemas de instalação e manutenção. Borges Neto e Carvalho (2006) fizeram um artigo

<sup>20</sup> O PRODEEM foi criado em dezembro de 1994 mediante um decreto presidencial. Em 2002, o PRODEEM foi suspenso pelo Tribunal de Contas – TCU e logo incorporado ao programa Luz para Todos.

com base em relatórios similares feitos no município de Petrolina (PE), mostrando que de 29 sistemas instalados 6 se encontravam avariados e 4 foram roubados até 2002 e que, lamentavelmente, em 2005 só 4 sistemas estavam em funcionamento.

Em resumo, Fedrizzi (2003, p 41), que também fez um estudo da situação, comenta em relação aos problemas o seguinte:

[...] constatou-se que os problemas têm as mais diversas causas, desde o tipo de concepção dos projetos até questões burocráticas e de interação entre as instituições envolvidas, infraestrutura local, armazenamento, transporte, qualidade dos diversos materiais, equipamentos e serviços, equipamentos complementares, peculiaridades culturais, geográficas e hidrológicas das comunidades receptoras, forma de introdução da nova tecnologia, falta de uma estrutura de serviço de assistência técnica, entre outros.

## **4.2 Sistemas fotovoltaicos de irrigação visitados durante a elaboração do trabalho**

Com fim de conhecer algumas experiências de implementação de sistemas fotovoltaicos de irrigação na América do Sul, foram visitados dois projetos com SFVI, um no Chile e outro no Peru.

### **4.2.1 PVP Irrigation Pilot Project (Chile)**

A Agência de Cooperação Alemã, *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ) começou o programa “PVP” em vários países para determinar a viabilidade técnica e econômica dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Entre 1998 e 2002, foi implementado um programa similar com aplicações de irrigação, *PVP Irrigation Pilot Project*. No âmbito do programa, foram instalados 10 SFVI no Chile, Egito e Jordânia, com o objetivo de observar em que condições estes sistemas podem ser mais vantajosos do que os sistemas com diesel na irrigação de culturas.

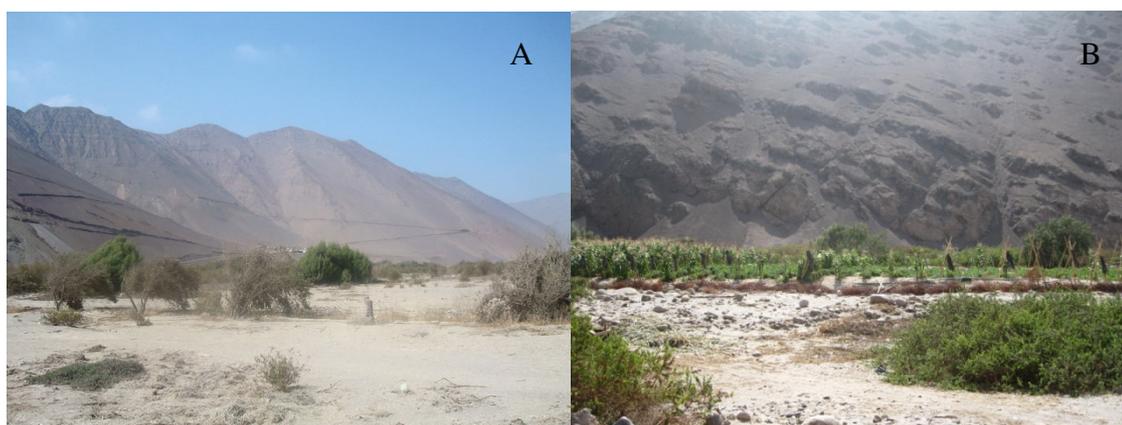
Uma das regiões de implementação do projeto corresponde à província de Arica, região XV do Chile, no extremo norte do país. A região caracteriza-se por ser de clima árido com constantes períodos de seca e alta irradiação solar. Devido à escassez de água, os agricultores dos vales costeiros de Arica usam a agricultura irrigada localizada (gotejamento e microaspersão) para a produção de frutas e verduras.

No Chile, foram instalados quatro SFVI usando duas configurações. Em uma delas, o sistema

de irrigação está conectado diretamente ao sistema de bombeamento e na outra, o sistema de irrigação está conectado a um tanque elevado, e este ao conjunto motobomba. As atividades de instalação e monitoramento contaram com a participação de instituições locais como a Universidade de Tarapacá (UTA) e a ONG *Corporación para el desarrollo de la Ingeniería* (CODIG). O financiamento do projeto foi feito pela GTZ e os sistemas foram emprestados aos agricultores, realizando-se capacitações e um continuo seguimento do estado dos sistemas.

Em julho de 2010, foi realizada uma visita a dois sistemas de irrigação e um sistema de abastecimento de água comunitário. Os sistemas de irrigação encontram-se no vale de Vitor (aproximadamente a 40 minutos de automóvel da cidade de Arica). O sistema comunitário encontra-se no vale de Codpa (aproximadamente a 3 horas de automóvel da cidade de Arica).

O vale de Vitor é um vale no meio do deserto próximo a um pequeno porto de pescadores, onde moram varias famílias dedicadas à agricultura e sem acesso à eletricidade nas casas. Em razão do clima árido, utilizam poços subterrâneos onde a extração de água se realiza com bombas diesel, o que cria uma série de contrastes na paisagem, pois privilegia a vegetação nos lugares com acesso a essa água subterrânea. (Figura 27).



**Figura 27 - Paisagens típicas do vale de Vitor: A. Vale sem irrigação. B. Vale com irrigação**

O sistema de irrigação visitado, com uma potência instalada de 1.155 Wp, conectado a um tanque elevado esteve funcionando até há alguns anos. A bomba, modelo GRUNDFOS GF 1500 SP2A-15, perdeu-se num tremor e devido à profundidade do poço (30 a 40 metros) até o momento não foi resgatada. Em entrevista com o agricultor, ele se mostrou contente com o período em que o SFVI esteve em funcionamento, devido à economia que representava a

redução de consumo de diesel para o bombeamento. Apesar do tempo decorrido, a maior parte dos equipamentos do sistema fotovoltaico ainda está em boas condições e o sistema somente necessita de uma bomba nova para continuar com sua operação (Figura 28).



**Figura 28 - Sistema fotovoltaico de irrigação com tanque elevado**

No SFVI sem reservatório de água, a água bombeada vai quase diretamente ao sistema de irrigação localizado, havendo apenas um sistema de filtragem prévio. Em um primeiro momento, o sistema foi instalado em outro vale de Arica, mas devido a problemas com seu uso, a equipe encarregada decidiu transladar o sistema ao vale de Vitor. O beneficiário deste sistema comentou durante a visita que o sistema, mesmo sem possuir o reservatório, resulta muito proveitoso para a produção (Figura 29).



**Figura 29 - Sistema fotovoltaico de irrigação sem reservatório de água**

No caso do sistema fotovoltaico de bombeamento conectado diretamente ao sistema de irrigação, o agricultor continua usando o gerador diesel para fornecer água nos momentos que a bomba não funciona em razão da baixa irradiância (Figura 30).



**Figura 30 - Vista do poço do sistema sem reservatório com presença de um gerador diesel auxiliar**

O cabeçal de irrigação do sistema possui um sistema de filtragem para evitar o entupimento dos tubos. Esse sistema também pode ser aproveitado para fazer fertirrigação com uréia (Figura 31).



**Figura 31 – Cabeçal de irrigação com sistema de filtragem e sistema de fertirrigação**

As fitas de irrigação têm um tempo de vida médio de três anos. Para fazer a limpeza das fitas o agricultor usa ácido fosfórico. As culturas produzidas com este SFVI são cebola, milho, melão, feijão, batata doce, abóbora e ervilha, entre outras plantas (Figura 32).



**Figura 32 - Fitas de irrigação usadas na produção de cebola**

#### **4.2.2 Projeto Piloto em Turripampa, Huarmey – Peru**

A Universidade de *Massachusetts Lowell* tem há vários anos um programa de cooperação no Peru denominado *Village Empowerment*. Até o momento, o programa já instalou vários sistemas baseados em energias renováveis (sistemas fotovoltaico para eletrificação de clínicas, igrejas, sistemas de telecomunicações e bombeamento de água potável)<sup>21</sup>. No momento da visita, dois deles (cata-vento e biodigestor com excrementos de porquinhos-da-índia) não estavam em operação (Figura 33).



**Figura 33 - Cata-vento e biodigestor com excrementos de porquinho-da-índia**

No marco desse programa, um sistema fotovoltaico de irrigação foi instalado no início de

<sup>21</sup> Maiores informações sobre o projetos desenvolvidos pelo programa *Village Empowerment* até o momento pode ser encontrada no site do projeto: <http://energy.caeds.eng.uml.edu/peru-07/Equipment.htm>

2008 no Vale de Turripampa, Huarney (Peru). Com ajuda do sistema a horta produz principalmente aspargos, uma planta cultivada com fins de exportação e cujo cultivo é massivo na região.

Na visita de campo comprovou-se a poluição existente pelo uso de motores de combustão interna para bombeamento de água. A figura 34, na esquerda, mostra uma motobomba diesel dentro do poço com vazamentos de combustível. A figura 34, na direita, mostra embalagens de óleo diesel e lubrificante, usadas na operação dos geradores, descartadas nas proximidades poluindo o solo e provavelmente as águas subterrâneas.



**Figura 34 - Exemplos da poluição produzida pelo uso de motores de combustão interna**

O sistema de geração está composto por um arranjo de cinco módulos marca Arco Solar que formam um conjunto de 250 Wp. O sistema está montado em uma estrutura fixa sobre a casa que guarda os equipamentos de controle de potência, as baterias e o sistema de pressurização e filtragem. O gerador tem uma inclinação aproximada de nove graus, que coincide com a latitude do lugar (Figura 35).



**Figura 35 - Gerador fotovoltaico de 250 Wp**

A bomba é volumétrica de diafragma da marca Shurflo, modelo Pro baitmaster 4901 6202, que trabalha em 12 V CC. Este equipamento está instalado sobre um sistema flutuante construído com madeira e garrafas de plástico (Figura 36).



**Figura 36 - Conjunto motobomba**

A figura 37 mostra a casa de força do sistema onde se encontram o sistema de condicionamento de potência, as baterias e um sistema de aquisição de dados pertencente a uma estação meteorológica também instalada pelo projeto.



**Figura 37 - Sistema de condicionamento de potência e baterias**

Dentro da casa de força encontra-se também o cabeçal de irrigação que inclui um sistema de regulação da pressão e um filtro de areia (Figura 38).



**Figura 38 - Cabeçal de irrigação com sistema de pressurização e filtragem**

Os dois reservatórios de água se encontram localizados na ladeira de uma colina. Os reservatórios têm uma capacidade de 10.000 e de 20.000 litros, com uma elevação de 16 m (Figura 39). A água é filtrada por um filtro de disco antes de ser entregue ao reservatório.



**Figura 39 - Reservatórios elevados**

A área de cultivo é de aproximadamente de 2 a 3 hectares. Os agricultores, além do aspargo, estão tentando o cultivo de abacate (Figura 40)



**Figura 40 - Sistema de irrigação por gotejamento para aspargo e abacate**

O sistema fotovoltaico de irrigação foi vendido ao usuário e é pago em parcelas, já que o projeto conta com um fundo rotativo. É importante ressaltar que os módulos fotovoltaicos vendidos eram usados, razão pela qual o custo do sistema foi consideravelmente menor. Segundo a página web do projeto, os bons resultados do sistema descrito permitiram replicar o sistema em outras comunidades de Huarney, existindo na atualidade já quatro SFVI.

### **4.3 Experiências com sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil**

Como já foi comentado na seção 3.2, houve diversas experiências com SFVI no Brasil. As informações a seguir foram obtidas com base em pesquisa bibliográfica preliminar e

complementadas com os dados obtidos através de questionários enviados (detalhes no anexo A) às diferentes instituições participantes desses projetos.

#### **4.3.1 Projeto do açude do Rio de Peixe em Capim Grosso (BA)<sup>22</sup>**

A atividade principal da comunidade do Açude do Rio de Peixe (município de Capim Grosso, estado da Bahia) é a horticultura, complementada com pesca e, só em alguns casos, também com a criação de gado. Como consequência da escassez do recurso hídrico, antes da implementação do projeto usava-se terra encharcada dos leitos secos do açude ou em casos extremos a irrigação manual com baldes. Em ambos os casos, a produtividade era baixa devido a pouca área aproveitável (limitada aos leitos secos) e ao trabalho pesado requerido para transportar a água em baldes.

Neste contexto, foi formada a Associação dos Produtores e Horticultores do Açude do Rio de Peixe (APHARP). Tempo depois, em 1995, a Coordenação de irrigação da Secretaria de Agricultura e Irrigação do estado de Bahia (SEAGRI) selecionou a comunidade para utilizar os sistemas fotovoltaicos de irrigação, devido a sua pobreza extrema, incapacidade de produzir alimentos sem água suficiente e por possuir uma organização coletiva forte.

O projeto, que teve um caráter de piloto – demonstrativo, foi parte de um programa de cooperação entre o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) com a participação da SEAGRI.

Foram instalados, no total nove SFVI. Cada um deles era composto por 16 módulos fotovoltaicos de 55 Wp (totalizando uma potência de 880 Wp por sistema) e uma motobomba centrífuga instalada sobre uma balsa flutuante, devido às variações do nível da água no açude (Figura 41). Apesar da quantidade de associados ser superior a nove, os sistemas instalados só favoreceram nove famílias, que foram escolhidas pela comunidade. Adicionalmente foi doado um sistema de geração a diesel para utilização em área comunitária.

---

<sup>22</sup> Informação baseada no artigo de Santos (2006)



**Figura 41 - Sistema fotovoltaico de bombeamento sobre base flutuante instalado em Capim Grosso**

Fonte: (CRESESB/CEPEL, 1996)

Cada uma das instituições mencionadas enviou profissionais para realizar os trabalhos de instalação e capacitação de técnicos e usuários. Depois da instalação, a Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola (EBDA) prestou, até o ano 2000, assistência técnica na área agrícola, enquanto a COELBA encarregou-se da manutenção e reparação dos SFVI até o ano 2001, quando foi privatizada.

Após o ano 2002 (aproximadamente cinco anos depois de serem instalados os últimos SFVI), as motobombas começaram a falhar sem possibilidade de serem reparadas, devido a que as escovas de carvão não eram mais produzidas no México. Tentou-se, sem êxito, substituir essa peça por uma similar de origem nacional. Alguns produtores adquiriram geradores a diesel, mas abandonaram a produção de frutas pelo alto consumo e custo da água. Tempo depois e devido à ocorrência de furtos, decidiu-se repartir os cem módulos pertencentes aos SFVI entre os associados para iluminação das moradias.

Santos (2006) relata os benefícios atingidos com a implementação do projeto. No plano econômico, os SFVI e a assistência agrícola permitiram o aumento da produção das lavouras, a diversidade de cultivos (com a possibilidade de plantar feijão, milho, abobora, melancia, goiaba, banana e maracujá), aumento da renda pela comercialização do excedente da produção em cidades próximas, aumento do nível de emprego e da capacidade de consumo dos produtores como consequência da capitalização que permitiu a compra de animais, eletrodomésticos e alimentos processados. Houve benefícios em outras áreas como o

fortalecimento da organização coletiva, na saúde (melhora da qualidade de alimentação), na educação (construção de uma escola de ensino fundamental com os ganhos gerados com os SFVI) e no bem-estar dos pequenos produtores. Porém, o número limitado de beneficiários criou diferenças na comunidade entre as pessoas que podiam produzir mais com os SFVI e as que continuaram usando a água do leiteo.

Na parte técnica, foi constatada a importância de se usar equipamentos com material de reposição disponível no mercado. É provável que os sistemas pudessem ser utilizados mais uns anos se a escova de carvão pudesse ser trocada. A assistência técnica teve um papel importante nos benefícios obtidos, enquanto esta durou.

#### 4.3.2 Projeto H2SOL na comunidade de Traíras (AL)<sup>23</sup>

O projeto H2SOL é uma parceria entre o Instituto ECO-ENGENHO, a Fundação Norteamericana Fiorello La Guardia e a Companhia Energética de Alagoas (CEAL), com o apoio da USAID e do *United Kingdom's Foreign and Commonwealth Office*. O Projeto H2Sol, que instalou um sistema demonstrativo de organoponia<sup>24</sup> com sistemas fotovoltaicos para produtos de alto valor agregado em sítio Baixas no município de São José da Tapera, Alagoas (Figura 42).



**Figura 42 - Sistema fotovoltaico de bombeamento organopônico em Baixas (AL)**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO ECOENGENHO)

Após a experiência em Baixas, surgiu a possibilidade de trabalhar com a mesma proposta de

---

<sup>23</sup> Informação baseada na comunicação via e-mail com José Roberto Fonseca e informação proporcionada no site do projeto.

<sup>24</sup> A Organoponia é uma técnica que mistura a técnica de hidroponia com o uso de substrato orgânico.

projeto na comunidade de Sítio Traíras, localizada às margens do Rio São Francisco, no município de Pão de Açúcar, também em Alagoas. A nova comunidade guardava as mesmas características de ausência completa de infraestrutura e pobreza crônica, mas com a possibilidade de usar a água do rio para produção agrícola, em lugar de depender das chuvas temporárias da região (Figura 43).



**Figura 43 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado em Traíras (AL)**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO ECOENGENHO)

O sistema fotovoltaico de irrigação consta de um gerador fotovoltaico de aproximadamente 1.6 kWp, uma motobomba GRUNDFOS com capacidade de bombeamento de 40.000 litros por dia a uma altura manométrica de 30 m, dois reservatórios de 10.000 litros cada, e um sistema de irrigação por gotejamento para irrigar uma horta de 1 hectare.

Com o sistema foi possível plantar melancia, melão, mamão Havaí, feijão, milho, mandioca e 200 pés de Aroeira (pimenta rosa) usando as técnicas de permacultura consorciada com culturas de ciclo curto (Figura 44).



**Figura 44 - Beneficiários com a melancia produzida com o SFVI**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO ECOENGENHO)

Lamentavelmente, em 2009, a bomba quebrou após quatro anos de operação sendo economicamente inviável para a comunidade comprar uma nova. Desde então, o projeto está parado pela falta de recursos.

#### **4.3.3 Projeto: “Energia solar, uma alternativa para a pequena irrigação”(PB)<sup>25</sup>**

O projeto: “Energia solar, uma alternativa para a pequena irrigação” é uma iniciativa da Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba (EMEPA) para o desenvolvimento agrícola do semiárido paraibano. O projeto consta de três unidades piloto de SFVI localizadas nas comunidades de Cruz da Menina (PATOS-PB), Barroão e Veludo (ITAPORANGA-PB), e Condado (CONDADO-PB), na Região do Pólo do Alto Piranhas e o Vale do Piancó, no estado de Paraíba. O projeto começou em 2002.

Além da EMEPA, também participaram a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural da Paraíba (EMATER-PB), o Centro de Saúde e Tecnologia Rural da Universidade Federal de Campina Grande (CSTR - UFCG) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária de Campina Grande (EMBRAPA-CNPA). O Fundo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNDECI) do Banco do Nordeste financiou o custo das três unidades.

---

<sup>25</sup> Informação baseada na comunicação via e-mail com Lazaro Souza da EMEPA e o artigo Santos et al. (2007)

Os sistemas foram administrados e gerenciados pela EMEPA contando com a participação ativa das comunidades na seleção de áreas agrícolas, operação e manutenção do sistema, coleta de dados e outras atividades afins.

Os sistemas fotovoltaicos de irrigação estão constituídos por dois módulos SIEMENS SP 65 conectados em série, diretamente ou através de um acionador eletrônico, ao conjunto motobomba SHURFLO 8000 ou SHURFLO 2088 (ambas são bombas de diafragma 12 V CC) e um reservatório de 3.000 litros sobre base de madeira a 5 m do solo (Figuras 45, 46 e 47). Não houve problemas técnicos significativos com os sistemas fotovoltaicos durante o projeto, mas as escovas de carvão foram trocadas em razão do seu desgaste natural. A troca foi rápida porque se contava com fornecedores na região.



**Figura 45 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na estação experimental de Veludo, Itaporanga (PB)**

Fonte: (Arquivo gráfico da EMEPA)



**Figura 46 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade de Condado (PB)**

Fonte: (Arquivo gráfico da EMEPA)

A irrigação nos três sistemas é feita por gotejamento em áreas de 0,25 hectares. Durante a implementação das unidades piloto foram testados diversos consórcios de plantas como a banana – feijão, goiaba – maracujá – melão, goiaba - melão – maracujá – feijão e graviola - maracujá - jerimum – feijão. Todos os consórcios mencionados apresentaram bons resultados desde o ponto de vista técnico e econômico.

Segundo a equipe técnica do projeto, os benefícios do uso de SFVI foram o aproveitamento da mão de obra familiar, o aumento da produtividade e a redução de gastos com energia elétrica, com consequente redução de custo de produção e maior rentabilidade.

Uma avaliação dos sistemas piloto (SANTOS et al., 2007) mostrou que o investimento feito podia ser recuperado a partir do terceiro ano com a produção consorciada de frutíferas de ciclo curto com culturas de subsistência.



**Figura 47 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade Cruz da Menina, Patos (PB)**

Fonte: (Arquivo gráfico da EMEPA)

#### **4.3.4. Projeto “Adapta sertão”<sup>26</sup> (BA)**

Adapta Sertão é um projeto de empreendedorismo social que nasce como uma incubadora de centros de revenda de tecnologias de irrigação para a agricultura familiar na região semiárida e, dessa maneira, busca diminuir o desmatamento da caatinga. Com essa finalidade, o projeto testou varias tecnologias de irrigação, para ver quais são as mais rentáveis e viáveis para a agricultura familiar.

O projeto atualmente está presente nos municípios de Pintadas, Baixa Grande, Quixambeira e Brumado, no estado da Bahia. Em cada município de atuação se escolheu uma cooperativa que funciona como revendedora de tecnologias, centro de capacitação técnica local e monitoramento. Segundo os membros da equipe do projeto, o objetivo é que num prazo variável de um a três anos, as cooperativas tornem-se rentáveis e independentes. A estratégia do projeto surgiu da constatação de que sem ter uma equipe local permanente que entenda da tecnologia utilizada e que possa fornecer peças de reposição não é possível ter sustentabilidade nas atividades propostas.

Entre 2006 e 2008 instalaram-se sete sistemas de irrigação eficiente, dos quais cinco são do

---

<sup>26</sup> Informação baseada na comunicação via e-mail com Daniele Cezano e informação proporcionada no site do projeto.

tipo localizado (gotejamento) e dois do tipo organopônico. Dos cinco sistemas de irrigação por gotejamento, um deles utiliza a energia solar como fonte de energia. Os beneficiários foram selecionados com critérios predefinidos:

- baixos ingressos econômicos,
- espírito empreendedor,
- jovens e prioridade para o gênero feminino.

Os sistemas são financiados através do fundo rotativo “Adapta Sertão”, no qual o sistema é vendido a crédito. Quando o dinheiro das parcelas retorna novamente ao fundo pode ser emprestado a outro beneficiário. Até o momento são aproximadamente 50 agricultores beneficiados com este projeto.

A seleção da tecnologia é feita com base em parâmetros técnicos (disponibilidade e demanda da água) e socioeconômicos (existência de empréstimos anteriores, capacidade de pagamento do empréstimo, garantias, etc.). O usuário é quem decide onde será instalado o sistema e se participa ou não da instalação (a mão de obra é descontada do pagamento a ser feito pelo usuário). Uma vez instalado o sistema, o agricultor toma conta da operação e manutenção do sistema, contando com um pouco de apoio técnico das cooperativas. Foi reportado que os beneficiários não ofereceram resistência às novas tecnologias, mas existiu dificuldade para incorporá-los à prática no dia a dia e quebrar os velhos hábitos.

O sistema fotovoltaico de irrigação instalado em Pintadas possui um gerador composto por duas placas de 85 Wp KYOCERA KC 85, uma bomba fotovoltaica SHURFLO, modelo 2088-433-144 (diafragma 12 V CC), e uma caixa de fibra de vidro de 3.000 litros (Figura 48). Embora, o sistema não possuísse um sistema de armazenamento com baterias no momento da instalação, o beneficiário adaptou um carregador de baterias para ter eletricidade na casa.

Segundo um membro da equipe, o produtor médio da região ganha entre R\$ 800 a R\$ 1.200 por ano e já que o custo do sistema é superior a essa quantidade, o uso da bomba FV não é viável economicamente mesmo em parcelas. O fundo teve de aceitar uma redução de 35% do valor do empréstimo para que o agricultor pudesse pagar o sistema, mesmo que isso significasse um prejuízo para o fundo. Por esse motivo, a equipe do projeto acha difícil implementar outra vez essa tecnologia.



**Figura 48 - Sistema fotovoltaico de irrigação instalado na comunidade Pintadas (BA)**  
 Fonte: (Arquivo gráfico do Projeto ADAPTA SERTÃO)

#### **4.3.5 Projeto de irrigação no Centro de Referência em Agricultura Urbana Sustentável (CE)<sup>27</sup>**

Em 2006, o instituto Joazeiro decidiu implementar o Centro de Referência em Agricultura Urbana Sustentável no bairro de Itaoca, regional IV, Fortaleza, estado de Ceará, como uma alternativa para melhorar a qualidade de vida dos moradores dessa região urbana. O financiamento do projeto foi feito pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico da Prefeitura Municipal de Fortaleza.

Para atingir os objetivos de aumentar a renda das famílias mediante a produção e venda de produtos medicinais (sabonetes e pomadas) de origem vegetal e de alimentos, e de melhorar a alimentação com a produção de hortaliças, instalou-se um sistema fotovoltaico de irrigação. Paralelamente, construíram-se canteiros com pneus e garrafas de refrigerantes (PET), com a finalidade de sensibilizar a população no aproveitamento de material reciclável, redução de custos com material de construção para instalação de canteiros e redução de focos para proliferação do mosquito da dengue.

Mesmo sendo uma comunidade urbana contando com o serviço de energia elétrica e de água, os membros da equipe do Instituto Joazeiro comentam que decidiram aproveitar as águas subterrâneas para a irrigação, para reduzir o consumo de água fornecida pela companhia local

<sup>27</sup> Informação baseada na comunicação via e-mail com Paulo Carvalho e informação proporcionada no site do instituto.

e usar a energia fotovoltaica por ser uma fonte limpa e disponível durante o ano todo.

O sistema fotovoltaico é composto por um módulo KYOCERA KC85 acoplado diretamente ao conjunto motobomba marca SHURFLO 8000 conectada a um reservatório de água. O sistema bombeia aproximadamente 2.000 litros por dia a uma altura manométrica total de 10 m (Figura 49). A área irrigada é de 0,5 hectares e nela são produzidas plantas medicinais. O projeto foi encerrado em outubro de 2006, mas o centro continua em atividade, favorecendo 32 famílias, principalmente da renda produzida com a venda dos produtos (Figura 50).



**Figura 49 - Instalação do sistema fotovoltaico de irrigação no Centro de Referência em Agricultura Urbana Sustentável**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO JOAZEIRO)



**Figura 50 - Horta abastecida pelo SFVI e venda das mercadorias**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO JOAZEIRO)

O Instituto Joazeiro instalou também um sistema fotovoltaico de irrigação no Centro de Referência em Alimentação Sustentável para Redução de Desnutrição Infantil, localizado no bairro de Pici, Fortaleza, CE. A construção do centro só foi possível devido ao apoio econômico do programa CRESCER da PEPSICO do Brasil, da Pastoral da Criança da

Arquidiocese de Fortaleza, da Associação de Moradores do Parque Universitário e da Secretaria de Desenvolvimento Econômico da Prefeitura Municipal de Fortaleza (Figura 51).



**Figura 51 - SFVI no Centro de Referência em Alimentação Sustentável para Redução de Desnutrição Infantil**

Fonte: (Arquivo gráfico do INSTITUTO JOAZEIRO)

#### **4.3.6 Projeto de irrigação para produção de alimentos orgânicos da Associação de Moradores do assentamento do imóvel de Maceió (CE)<sup>28</sup>**

Em 2003, a ONG IDER (Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis) em ação conjunta com a ONG NEPA (Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação) decidiu criar um projeto para a produção de alimentos orgânicos com o uso de fontes renováveis de energia para irrigação e secagem. Segundo membros da IDER, foi proposto o projeto a onze comunidades pertencentes ao município de Itapipoca (Ceará), explicando a filosofia e metodologia de trabalho do projeto. Finalmente, selecionou-se a Comunidade de Bom Jesus, pois cumpria os critérios de seleção do projeto (vocação de trabalho das pessoas pela atividade agrícola, a existência de condições técnicas e de potencialidade do lugar para atividade). Em razão de vários fatores internos da comunidade (seleção da área de trabalho e indefinição da comunidade) e externos (existência de chuvas que ilharam a comunidade) o processo pedagógico e de capacitação durou três meses.

O sistema foi doado à comunidade, sendo o custo total<sup>29</sup> (aproximadamente US\$ 48.000) pago pela agência americana USAID (United States Agency for International Development).

<sup>28</sup> Informação baseada na comunicação via e-mail com Thomson Souza do IDER e informação disponível no site do projeto.

<sup>29</sup> O custo total do sistema inclui o investimento dos componentes do SFVI, componentes para o preparo da terra, um caminhão para transporte dos produtos, fertilizantes e sementes. Precisou-se de um capital maior para cobrir os gastos de manutenção, monitoração, avaliação e assistência de marketing dos produtos.

O sistema é constituído por 30 módulos fotovoltaicos de 50 Wp, motobomba centrífuga marca GRUNDFOS SQF de 1 cv e inversor CC-CA GRUNDFOS (Figuras 52 e 53). A água bombeada é armazenada em dois reservatórios de 5.000 litros cada um. O sistema serve para irrigar água por aspersão num campo de um hectare.



**Figura 52 - Gerador fotovoltaico**

Fonte: (Arquivo gráfico do IDER)



**Figura 53 - Caixa de conexões, inversor e reservatório de água**

Fonte: (Arquivo gráfico do IDER)

Até o momento o sistema não apresentou falhas. Porém, em 2007, 6 módulos fotovoltaicos foram roubados. Quando isso aconteceu, o IDER pagou os custos de reposição dos módulos perdidos.

O sistema trouxe importantes mudanças na vida dos agricultores, principalmente pelo aumento da produtividade da agricultura irrigada. As instituições encarregadas do projeto inseriram a horticultura orgânica como novo meio de produção, sendo necessário um longo

processo de treinamento (Figura 54).



**Figura 54 - Horta abastecida pelo SFVI**  
Fonte: (Arquivo gráfico do IDER)

## **CAPÍTULO 5 – BENEFÍCIOS, BARREIRAS E POTENCIALIDADES ENCONTRADAS DURANTE A IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE IRRIGAÇÃO**

Este capítulo apresenta os principais benefícios dos sistemas fotovoltaicos de irrigação, assim como as barreiras e potencialidades existentes no Brasil para a implementação desses sistemas.

### **5.1 Benefícios encontrados com os sistemas fotovoltaicos de irrigação**

Não se reportou nenhum impacto negativo do uso dos SFVI nos casos estudados. No entanto, valer destacar o caso da seção 4.3.1, no qual houve um problema social entre as pessoas que receberam o SFVI e os que não. Nas seguintes seções são descritos os principais benefícios proporcionados com a implantação de SFVI.

#### **5.1.1 Redução de custos de operação**

O uso de combustíveis fósseis para bombeamento tem um impacto forte nos custos de produção dos agricultores. Nos casos descritos nas seções 4.3.1 e 4.3.2, os SFVI substituíram sistemas de geração a diesel, cujo custo de operação representava uma boa parcela do gasto mensal dos produtores.

#### **5.1.2 Mitigação dos riscos de perda de safra**

Os agricultores citados na seção 4.3.1 se arriscaram a produzir árvores frutíferas, cujo período de crescimento é de um a vários anos acreditando que um regime prolongado de estiagem não ia afetar suas colheitas em razão do fornecimento constante de água com o SFVI.

#### **5.1.3 Incremento da produção**

O acesso à água de forma confiável permitiu incrementar a produção agrícola nos casos 4.3.1 e 4.3.6.

#### **5.1.4 Diversificação de culturas**

O acesso à água de maneira constante permitiu que os agricultores dos casos descritos nas seções 4.3.1 e 4.3.2 cultivassem novas plantas com melhor valor no mercado, incrementando, assim, a renda familiar.

#### **5.1.5 Criação de empregos**

O caso da seção 4.3.5 mostrou que o uso de SFVI permite a criação de empregos diretos (pessoas que trabalham na lavoura) e indiretos (pessoas que processam e comercializam as ervas medicinais) em virtude ao aumento do período de cultivo e a oferta de novos produtos.

#### **5.1.6 Redução do tempo necessário para bombear água**

Com o uso de reservatório de água, os SFVI do caso da seção 4.3.1 permitiram a automatização das atividades de bombeamento. Isso permitiu o aproveitamento do tempo em outras atividades complementares de geração de renda (por exemplo, a criação de animais menores como bodes e galinhas, processamento de alimentos, etc.) e trabalhos domésticos (cuidado melhor das crianças, consertos em casa, etc.).

#### **5.1.7 Redução de impactos ambientais**

O uso de sistemas fotovoltaicos em lugar de motores de combustão interna evita a emissão de gases de poluição local e geradores de efeito estufa. Também evita a poluição de poços e solos por vazamentos de combustíveis como foi mostrado na seção 4.2.2, além de reduzir a quantidade de resíduos plásticos na propriedade, como é no caso das embalagens de combustíveis e lubrificantes.

O uso de técnicas de irrigação como a inundação pode causar erosão e salinização nos solos, inutilizando as terras de cultivos. A mudança para técnicas de irrigação localizada reduzem a infiltração e contaminação dos solos e do lençol freático.

Além disso, as técnicas de inundação precisam de uma grande quantidade de água, razão pela qual, muitos poços são sobre-explorados dificultando a reposição natural da suas águas. O uso

de técnicas de irrigação localizada reduz o consumo de água, reduzindo, assim, os impactos sobre o recurso hídrico.

### **5.1.8 Diminuição do êxodo rural**

A falta de oportunidades para o desenvolvimento de muitas regiões rurais induz um grande contingente de pessoas a se deslocar para zonas urbanas na esperança de ter uma melhor qualidade de vida. O problema reside no fato dessa migração provocar uma série de problemas nas zonas urbanas (desemprego, violência, sobrecarga dos serviços públicos básicos, etc.). Com a implementação do SFVI, os beneficiários podem melhorar sua qualidade de vida sem a necessidade de deslocar-se.

### **5.1.9 Segurança alimentar**

O alvo de segurança alimentar dos beneficiários pode ser atingido mediante o aumento da produção e da variedade de alimentos e o incremento da renda, que permita diversificar a cesta básica familiar e comprar produtos que não podem ser produzidos localmente. O caso apresentado por Burney et al (2010) exemplifica a importância deste impacto.

## **5.2 Barreiras encontradas para a implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento na irrigação**

Tal como acontece com outros tipos de tecnologias baseadas em energias renováveis (eólica, minihidráulica ou biomassa moderna) e de outras aplicações de energia solar fotovoltaica (eletrificação domiciliar ou comunitária), o uso da energia fotovoltaica na irrigação também apresenta várias barreiras para sua inserção e implementação em grande escala. Estas barreiras são resumidas em cinco grupos: econômicas/financeiras, informativas, técnicas, institucionais/regulatórias e comerciais.

### **5.2.1 Barreiras econômicas e financeiras**

As barreiras financeiras para a difusão dos SFVI são os altos custos de investimento inicial e a falta de esquemas de financiamento adequados para sua introdução. O custo de investimento para a aquisição de sistemas fotovoltaicos é geralmente maior do que das outras opções

existentes. Já que a energia é insumo para a produção de bens e serviços, o custo da energia é repassado geralmente ao custo do produto, o que pode fazer com que o produto não seja competitivo no mercado se este custo for muito alto. Por essa razão, deve-se estudar sob quais condições o investimento dos SFVI é economicamente competitivo frente a outras opções de geração de energia.

Embora existam políticas de subvenção para alguns equipamentos dos sistemas fotovoltaicos por parte dos governos estaduais e federal, essas subvenções não permitem ainda uma total competitividade em relação a outros sistemas de geração local. Em relação à isenção de tributos para a aquisição de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, só alguns equipamentos estão isentos do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI).

Mediante o convênio ICMS 101/97<sup>30</sup>, os seguintes equipamentos do SFVI são isentos do pagamento do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS): Bomba para líquidos, para uso em sistema de energia solar fotovoltaico em corrente contínua, com potência não superior a 2 cv (NCM 8413.81.00) células solares não montadas (NCM 8541.40.16), células solares em módulos ou painéis (NCM 8541.40.32), gerador fotovoltaico para potências até 750 Wp (NCM 8501.31.20), para potências entre 750W e 75kW (NCM 8501.32.20), para potências entre 75kW e 375kW (NCM 8501.33.20) e para potências superiores a 375 kWp (NCM 8501.34.20). Mediante o Decreto 3827/01 os equipamentos e acessórios destinados à geração de energia elétrica, incluindo os módulos fotovoltaicos são isentos do Imposto sobre Produtos Industrializados.

Os altos custos de investimento inicial dos SFVI poderiam não ser um problema tão grande se o agricultor, cuja renda não permite a aquisição desta tecnologia, contasse com um sistema de crédito adequado. Esses esquemas de financiamento devem estar desenhados tomando em conta as possibilidades econômicas do produtor e sua disponibilidade de pagamento.

Um esquema de financiamento ideal deveria permitir não só a aquisição das equipamentos dos SFVI, mas também a compra de matérias-primas (sementes de boa qualidade, fertilizantes, etc.) maquinário (semeadeiras, colheitadeiras, fumigadores, tratores, etc.), e de

---

<sup>30</sup> O Convênio ICMS 101/97 foi prorrogado mediante o convênio ICMS 124/10 até 31/12/2013.

outros ativos fixos. No Brasil existe o sistema de crédito do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar - PRONAF<sup>31</sup> para benefício dos pequenos agricultores rurais, mas em nenhum dos casos estudados o agricultor utilizou o programa para aquisição dos SFVI<sup>32</sup>.

### **5.2.2 Barreiras informativas**

A falta de informação adequada sobre as possibilidades que podem ser oferecidas pelos SFVI é outra das barreiras comuns para a implementação de projetos com esta tecnologia. Esta falta de informação não é só por parte dos usuários potenciais, senão também pode abarcar as pessoas que tomam as decisões sobre os projetos (representantes de governo, agentes bancários e investidores), que podem não conhecer a existência deste tipo de tecnologia ou acreditar que ela representa um investimento de excessivo risco. Esta falta de informação obstaculiza a adoção e a aquisição dos SFVI, porque, sem o conhecimento necessário, os empreendedores locais não têm a capacidade de implementar projetos que incluam seu uso ou podem adquirir equipamentos inadequados para suas necessidades, gerando problemas que podem repercutir na confiança de novos investidores e provocar ceticismo e, por tanto, medo de usar SFVI.

### **5.2.3 Barreiras técnicas**

A maior parte dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento (módulos fotovoltaicos e motobombas) é importada, sendo às vezes muito difícil encontrar ou adquirir em regiões rurais certos equipamentos e seus materiais de reposição. Disponibilidade de equipamentos adequados para o SFVI e falta de um sistema de certificação mais abrangente e de recursos humanos capacitados são as principais barreiras técnicas para a adoção dos SFVI.

Como a finalidade desses equipamentos é o bombeamento para a irrigação, a falha de algum de seus equipamentos pode parar a produção por longos períodos até sua reposição, com impactos negativos na renda do produtor. Também é comum que a informação fornecida

---

<sup>31</sup> Ver maiores detalhes sobre o crédito PRONAF em : <http://portal.mda.gov.br/portal/saf/programas/pronaf>

<sup>32</sup> A razão merece um análise além do escopo deste trabalho. O Censo agropecuário de 2006 (IBGE, 2007) mostrou que dos estabelecimentos familiares que não obtiveram financiamento nesse ano, 21% não o obteve devido ao medo de contrair dívidas, 8% devido a razões burocráticas e mais de 50% responderam que “não precisavam” do financiamento.

pelos catálogos comerciais sobre desempenho dos equipamentos seja diferente dos resultados obtidos em campo, pela que se cria uma discrepância entre os valores esperados e os valores reais.

Pelas razões mencionadas, é importante a existência de um sistema de avaliação e certificação que respalde o bom desempenho dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos de irrigação. Atualmente no Brasil, dentro do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, são avaliados módulos fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores para sistemas domiciliares. Embora existam algumas instituições que fazem ensaios com motobombas (Tabela 7), estes testes não estão incluídos no Regulamento de Avaliação de Conformidade do PBE. Também não existem ainda instituições que avaliem o desempenho dos equipamentos condicionadores de potência.

Tabela 7 - Lista de instituições que avaliam equipamentos dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Equipamento	Instituição	Localização
Módulo fotovoltaico <sup>33</sup>	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – Instituto de Eletrotécnica e Energia /Universidade de São Paulo	SP
	Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal de Rio Grande do Sul.	RS
	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – GREEN	MG
Conversor para uso em SFVB	Não há	-
Inversor para uso em SFVB	Não há	-
Conversor de frequência para uso em SFVB	Não há	-
Motobomba para SFVB	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – Instituto de Eletrotécnica e Energia /Universidade de São Paulo	SP
	Grupo de pesquisas em fontes alternativas renováveis - Universidade Federal de Pernambuco	PE

Fonte: Elaboração própria

<sup>33</sup> Avaliação segundo a norma ABNT NBR 12300:1991

Outro problema técnico é a falta de recursos humanos capacitados para o planejamento, operação e manutenção dos SFVI, afetando a sustentabilidade dos projetos. No Brasil, são poucas as universidades, centros de pesquisa e instituições que têm programas de capacitação e treinamento para a formação de profissionais para esse trabalho e se conta com poucos institutos dedicados ao estudo de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, em especial com uso aplicado na irrigação. Em razão dessa falta de recursos humanos, é necessário que mais instituições educativas formem pesquisadores e incluam disciplinas relacionadas à tecnologia fotovoltaica. Da literatura encontrada, pode-se ver que até o momento só as seguintes instituições de ensino trabalharam direta ou indiretamente em algum projeto com esta tecnologia (Tabela 8):

Tabela 8 - Participação de instituições educativas brasileiras na pesquisa sobre SFVI

Estado	Instituição	Forma de participação
PE	Universidade Federal de Pernambuco	Elaboração de artigos, dissertações e Teses Participação no projeto “Água do Sol”
CE	Universidade Federal de Ceará	Participação na implementação de dois projetos em centros demonstrativos.
RG	Universidade Federal de Santa Maria	Elaboração de artigos, dissertações e Teses/ Participação no projeto piloto de bombeamento eólico e fotovoltaico.
SP	Universidade de São Paulo	Elaboração de artigos e dissertações.

Fonte: Elaboração própria.

#### 5.2.4 Barreiras institucionais e regulatórias

Em vários estados não existem instituições locais (de caráter governamental ou privadas) que ajudem a promover as tecnologias baseadas em energias renováveis ou se existem, o impacto de suas ações é reduzido. A existência deste tipo de instituição é fundamental para superar as barreiras técnicas e informativas descritas anteriormente. Elas podem atuar como difusoras da viabilidade técnica e econômica dos SFVI, assim como seus benefícios e limitações. Outra função dessas instituições é a formação e qualificação de profissionais para planejamento, instalação, operação e monitoramento dos SFVI, de maneira que se possa criar uma massa crítica de recursos humanos. Adicionalmente, em muitos estados faltam entidades que avaliem e certifiquem o desempenho de equipamentos e acessórios de sistemas fotovoltaicos de irrigação sob as condições de trabalho locais.

Da mesma forma, percebe-se a falta de políticas governamentais que promovam o uso deste

tipo de tecnologias. Essas políticas de governo devem permitir a existência de benefícios econômicos e tributários para a aquisição dessas tecnologias, a adoção dos SFVI dentro dos programas de desenvolvimento econômico do país e a criação de leis e regulamentos que assegurem o marco legal necessário para a compra e venda de serviços relacionados aos SFVI.

Ainda que não seja parte da realidade atual do Brasil, a falta de estabilidade macroeconômica da região (característica de muitos países pobres) poderia criar um ambiente desfavorável para que a atividade econômica e a introdução de tecnologias com SFVI possam desenvolver-se com naturalidade. Nesse sentido, é necessário poder contar também com instituições financeiras dedicadas parcial ou totalmente às energias renováveis e que ofereçam empréstimos ou ajudas a pessoas e empresas que queiram adquirir esses tipos de tecnologias.

### **5.2.5 Barreiras comerciais**

A indústria fotovoltaica tem pouco alcance de difusão em comparação com outras indústrias de fontes de energia convencionais no Brasil. Por isso, não existe em muitos lugares a infraestrutura adequada para a comercialização, promoção, assistência técnica e manutenção dos equipamentos dos SFV (módulos, inversores, controladores, motobombas, etc.). O baixo desenvolvimento desses mercados provoca falta de competitividade nos preços (monopólios) e na qualidade dos produtos, assim como falta de opções para o possível comprador.

Além disso, do ponto de vista do produtor rural, existem problemas de logística (transporte e armazenamento) para levar os produtos produzidos nas comunidades rurais até os potenciais compradores dos produtos.

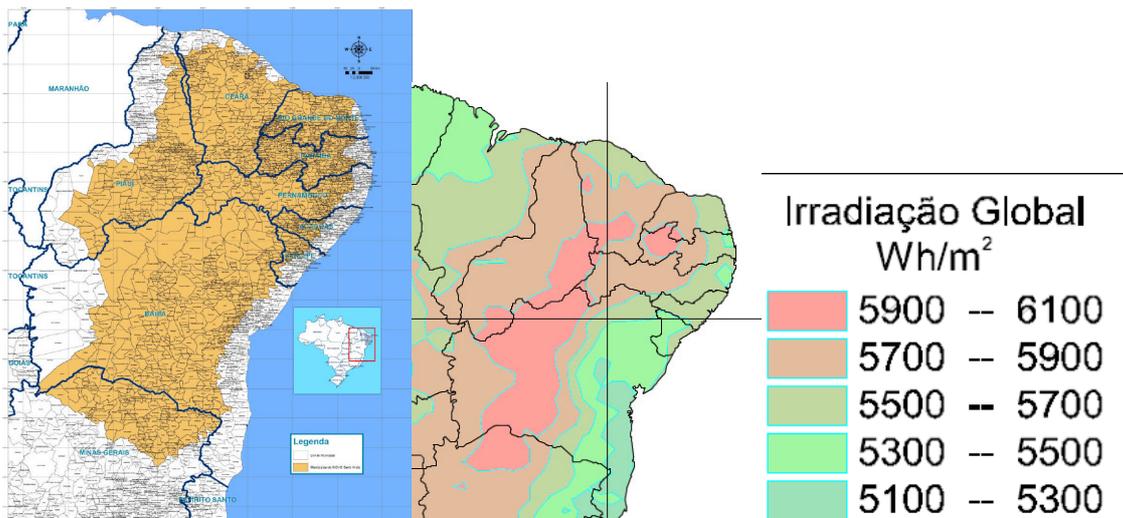
## **5.3 Potencialidades para a implementação de sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil**

### **5.3.1 Recurso solar e existência de dados confiáveis sobre o recurso**

A existência de dados confiáveis e disponíveis sobre recursos renováveis permite estimar com maior precisão a produção elétrica dos sistemas fotovoltaicos. No Brasil essas fontes são: o Atlas de Irradiação Solar no Brasil (COLLE; PEREIRA, 1998), o Atlas Solarimétrico do

Brasil (TIBA, 2000) e o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2006).

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2006) os valores de irradiação global diária média anual são : Norte: 5,5 kWh/m<sup>2</sup>, Nordeste: 5,9 kWh/m<sup>2</sup>, Centro Oeste: 5,7 kWh/m<sup>2</sup>, Sudeste: 5,6 kWh/m<sup>2</sup> e Sul 5,2 kWh/m<sup>2</sup>. Dos dados apresentados, pode-se ver que a região Nordeste, na qual está maior parte do “polígono das secas” apresenta valores de irradiação médias muito favoráveis para a utilização dos SFVI (Figura 55).



**Figura 55 - Polígono das secas e mapa de irradiação solar na mesma região**

Fonte: (CARVALHO, 2006; COLLE e PEREIRA, 1998)

### 5.3.2 Existência de lugares sem acesso à rede elétrica e/ou com problemas de manutenção das bombas diesel e de fornecimento de combustíveis para sua operação

Em razão da variedade geográfica do Brasil e de outros fatores comentados na seção 1.2, existem muitos lugares ainda sem acesso à rede ou com problemas de fornecimento de combustíveis. Em razão do baixo investimento inicial e de operação, assim como de uma maior variedade de motobombas e materiais de reposição, é preferível o uso de rede elétrica quando esta está disponível. Mas em muitas regiões rurais brasileiras, a extensão da rede elétrica pode ser inviável, em razão das restrições técnicas, econômicas ou ambientais, tornando a geração local com sistemas de combustão interna ou fotovoltaicos como as únicas soluções possíveis.

A competitividade de uma ou outra opção depende da existência de subsídios para a compra de combustíveis ou dos módulos, do recurso solar existente, da configuração do sistema, do modo de operação, da taxa de juros do financiamento, da vida útil dos equipamentos

individuais do sistema e do grau de utilização do sistema. Diversos estudos mostram a competitividade dos sistemas fotovoltaicos de irrigação no Brasil sob certas condições. (FEDRIZZI; SAUER; ZILLES, 1996; SANTOS et al., 2007; FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009).

### **5.3.3 Diversificação da oferta local de sistemas fotovoltaicos de bombeamento e diminuição dos preços dos sistemas no mercado local**

A maior parte da produção dos módulos fotovoltaicos concentra-se em países como os membros da comunidade europeia, Japão, China, Taiwan e os Estados Unidos (KAUTTO e JÄGER - WALDAU, 2009). No passado, existiram iniciativas para a produção de módulos a nível nacional como da Companhia Heliodinâmica, e na atualidade há novas iniciativas por parte do Centro Brasileiro para o Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica – CB - SOLAR da Faculdade de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e da companhia TECNOMETAL ENERGIA SOLAR. Mesmo assim, praticamente a totalidade dos módulos comercializados no Brasil é importada. Em relação ao preço dos sistemas fotovoltaicos, o preço das células fotovoltaicas estão na faixa de 2 a 3 US\$/Wp (TANAKA, 2010). No Brasil, o preço médio de comercialização de módulos por Wp encontra-se na faixa de R\$ 6 a R\$ 8 em maio do 2011<sup>34</sup>.

Os avanços tecnológicos na fabricação de motobombas e equipamentos de condicionamento de potência permitem o aumento da oferta de produtos com melhor desempenho e custo, alguns deles fabricados no Brasil<sup>35</sup>. A configuração proposta por Brito (2006) possibilita o uso de motobombas centrífugas trifásicas convencionais e de um conversor de frequência de uso na indústria, ambos de fabricação brasileira.

Com mais equipamentos produzidos no país, é também maior a possibilidade de substituição de equipamentos de origem externa por equipamentos nacionais. Em contrapartida, ainda precisa-se de apoio governamental para estimular a oferta em todas as regiões (muitos fabricantes concentram sua oferta nas regiões sul e sudeste) e a criação de laboratórios de

---

<sup>34</sup> R\$ 1 = US\$ 0,625 (31 de maio de 2011).

<sup>35</sup> A companhia brasileira ANAUGER está comercializando dois modelos de bombas vibratórias de pequeno porte para uso com SFV. Maiores informações em: [http://www.anauger.com.br/imagens/MANUAL\\_P100-R100\\_versao\\_OUTUBRO\\_2010.pdf](http://www.anauger.com.br/imagens/MANUAL_P100-R100_versao_OUTUBRO_2010.pdf)

qualificação dos equipamentos, para garantir o bom desempenho desses produtos.

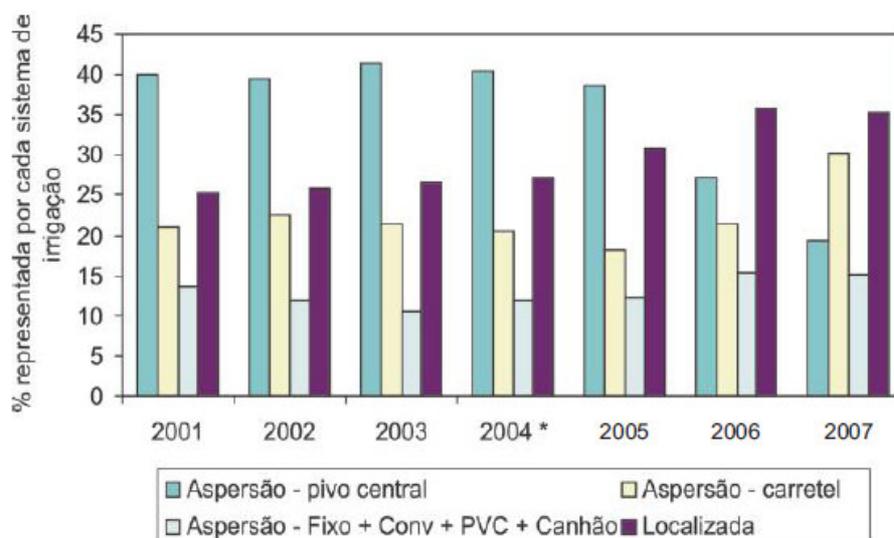
#### **5.3.4 Existência de experiência com sistemas fotovoltaicos de bombeamento no Brasil**

Os 3.255 sistemas fotovoltaicos de bombeamento instalados até o ano de 2002 no Brasil e as experiências citadas na seção 3.2 constituem um referencial de base para o melhor desenvolvimento desta tecnologia. Ainda que nem todas as experiências tenham sido exitosas, esses projetos deixaram muita informação sobre o que fazer e o que não fazer para implementação desta tecnologia.

#### **5.3.5 Aumento do uso de técnicas de irrigação localizada**

Como foi descrito no segundo capítulo, existem três tipos básicos de irrigação: superficial, aspersão e localizada. Segundo Andrade (2001), a eficiência de irrigação com os métodos de irrigação superficiais está dentro da faixa dos 30 a 80%, com os métodos de aspersão entre os 75 a 90%, e com os métodos de irrigação localizada entre os 80 a 95%. Como a quantidade de água bombeada influencia no custo do sistema, a competitividade dos SFVI cai quanto maior for a quantidade da água necessária. Nessas condições é preferível usar algum método de irrigação localizada com os sistemas fotovoltaicos.

Em virtude da necessidade de economizar água e de outras vantagens técnicas (adaptabilidade a diversos cultivos e relevos), existe uma tendência no Brasil de aumentar o uso de sistemas localizados, como se observa na figura 56.



**Figura 56 - Porcentagem relativa à comercialização de diferentes sistemas de irrigação pressurizados, no período de 2001 a 2007**

Fonte: (Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (CSEI) da ABIMAQ apud Pires et al., 2008)

A tabela 9 mostra a importância que a irrigação localizada tem na região Nordeste com uma participação percentual em torno de 25%. Estados como Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte contam com uma participação da irrigação localizada superior a 25%.

**Tabela 9 - Área (hectares) irrigada segundo o método de irrigação no Nordeste**

	Superfície	Aspers. conv.	Pivô central	Localizada	Total
Maranhão	24.240	12.010	3.630	8.360	48.240
Piauí	10.360	7.360	880	8.180	26.780
Ceará	34.038	18.238	2.513	21.351	76.140
Rio G. Norte	220	2.850	1.160	13.990	18.220
Paraíba	30.016	8.420	1.980	8.184	48.600
Pernambuco	31.640	44.200	9.820	12.820	98.480
Alagoas	7.140	58.500	6.060	3.380	75.080
Sergipe	30.445	8.825	310	9.390	48.970
Bahia	39.260	77.820	84.150	91.100	292.330
Nordeste	207.359	238.223	110.503	176.755	732.840
Brasil	1.729.834	662.328	710.553	337.755	3.440.470

Fonte: Christofidis, 2006.

O aumento da irrigação localizada favorece o crescimento de seu mercado, garantindo uma maior disponibilidade de produtos com melhor preço, além de reduzir a desconfiança do produtor ao usar uma técnica de irrigação diferente da atual. Este fato propicia as condições de contorno que favorecem a introdução dos sistemas fotovoltaicos de irrigação.

### **5.3.6 Uso de fontes subterrâneas**

Fontes de águas subterrâneas estão distribuídas em regiões extensas do território brasileiro, apresentando-se como uma alternativa para o fornecimento hídrico quando fontes superficiais não são disponíveis. Em razão de serem menos vulneráveis a mudanças sazonais e à evaporação, seu uso é necessário quando ocorre estiagem prolongada e as fontes superficiais não são disponíveis ou estão esgotadas.

A presença de rochas sedimentares no Nordeste brasileiro permite a acumulação de água da chuva, a qual apresenta uma boa qualidade para uso na agricultura. Também existe potencial de uso de bacias com rochas cristalinas, porém seu uso é limitado em virtude do alto conteúdo de sais.

No Nordeste brasileiro, pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos da água poderiam ser extraídos por ano de fontes subterrâneas sem risco de esgotamento dos mananciais, segundo dados da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) (Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 1995)

### **5.3.7 Potencialidade de desenvolvimento da produção agrícola familiar no Nordeste**

Sem contar a irregularidade do regime de chuvas, o clima do semiárido é propício para a produção de vários tipos de culturas. Um trabalho feito por Heinze (2002) mostra uma lista de 25 culturas que, sob regime de irrigação, apresentam uma boa produtividade no Nordeste. Entre as culturas encontram-se uva, abacaxi, limão, manga, banana, feijão e cebola.

Se o SFVI for pago pelo agricultor (à vista ou em parcelas), ele precisará que o investimento inicial tenha o menor tempo de retorno possível. Isso só será possível se o produto tiver um alto valor agregado e um mercado garantido que compre a produção completa a um bom preço (frutas, hortaliças, condimentos, etc.). Produtos como os orgânicos têm uma demanda crescente e um bom valor no mercado, embora, em razão dos quesitos de produção próprios de este tipo de alimentos, eles sejam produzidos em menores quantidades. O caso relatado em 4.3.6 em Itapipoca mostra que é possível e viável a produção de este tipo de produtos com SFVI.

O tamanho da área de cultivo da chamada “agricultura familiar”<sup>36</sup> é compatível com alguns parâmetros que tornam viável o investimento em SFVI (área de cultivo pequena, utilização constante do terreno e moderado consumo de água)<sup>37</sup>. Só no Nordeste existem 2.187.295 estabelecimentos familiares que equivalem a 28.332.599 hectares (IBGE, 2007).

---

<sup>36</sup> O conceito de agricultura familiar é definido pela Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Entre os parâmetros que definem o agricultor familiar estão propriedade de menos de quatro módulos fiscais, utilização predominantemente de mão de obra da própria família, renda gerada desta atividade e a direção do empreendimento com a família.

<sup>37</sup> As dimensões do campo de cultivo (além de suas características como relevo e capacidade de drenagem) determinam a quantidade de plantas e, em consequência, a demanda hídrica. Quanto maior for a demanda hídrica, menos competitivo será o uso de SFVI.

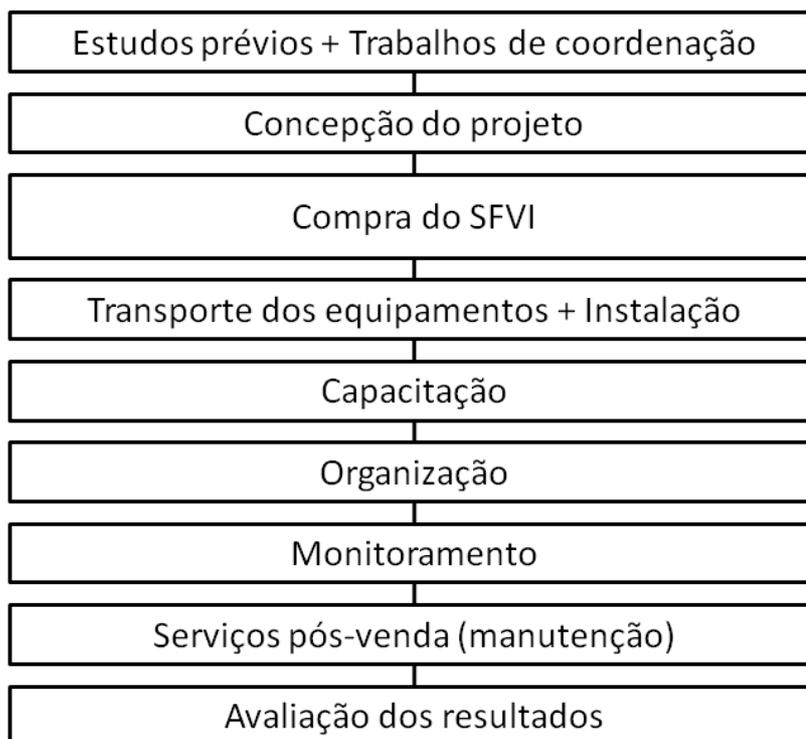
## CAPÍTULO 6 – RECOMENDAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO

No presente capítulo são sugeridas algumas recomendações para a implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento visando sua aplicação para geração de renda e a obtenção dos benefícios relatados no capítulo anterior.

A seção 6.1 apresenta sete recomendações gerais para a implementação do projeto. Já nas seções posteriores são apresentadas recomendações para a seleção da configuração do sistema e dos componentes, instalação do sistema, manutenção dos equipamentos, capacitação dos beneficiários e técnicos, gestão e administração do sistema, escolha do sistema de financiamento, monitoramento e assistência técnica, avaliação dos resultados e difusão da tecnologia.

### 6.1 Recomendações gerais para concepção do projeto com SFVI

Para a concepção do projeto é recomendável prever as etapas mostradas na figura 57:



**Figura 57 – Etapas do projeto**

Fonte: Elaboração própria.

O planejamento é peça chave da sustentabilidade do projeto. Planejar significa prever o que pode acontecer com o sistema e que medidas são necessárias para evitar ou mitigar possíveis problemas no futuro. O planejamento significa criar planos de contingência que permitam a adaptabilidade do projeto para as diversas situações que podem acontecer. Precisa-se planejar, por exemplo, a necessidade de obras hidráulicas para o uso dos poços, a factibilidade de transporte dos equipamentos dos SFVI por rios, caminhos rurais, em lombo de animais se for o caso, a possibilidade de roubos, o deslocamento dos SFVI, a troca de equipamentos, a capacitação de mais técnicos, o futuro do SFVI se a rede elétrica chegar e a saída da equipe quando o projeto acabar.

Para a concepção do projeto com sistemas fotovoltaicos de irrigação é necessário conhecer o contexto pré-existente dos futuros usuários, suas peculiaridades e aspirações, os problemas e as possibilidades existentes. Visitas de campo para obtenção desses dados são fundamentais para a compreensão da situação da comunidade (organização, demandas, valores, costumes, etc.). É aconselhável também consultar com os atores externos que participaram ou participam do desenvolvimento da comunidade (professores, médicos, representantes de instituições religiosas e filantrópicas, representantes de ONGs, etc.) para obter uma visão completa da situação atual da comunidade. Recomenda-se avaliar os seguintes fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais para planejar melhor o projeto em base ao contexto existente (Tabela 10).

Tabela 10 - Fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais

Tipo de fator	• Descrição
Fatores técnicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de recurso solar abundante e de fontes hídricas adequadas para a agricultura no local.</li> <li>• Existência de direitos para o uso de águas e solos.</li> <li>• Possibilidade de implantação de sistemas de irrigação localizada no lugar.</li> <li>• Estudo dos períodos de irrigação segundo as culturas (sazonais ou permanentes) e da utilização do SFVI fora desses períodos.</li> <li>• Existência de serviços de fornecimento e reparação dos equipamentos do SFVI.</li> <li>• Existência de infraestrutura organizativa para a operação e manutenção do SFVI.</li> </ul>
Fatores econômicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependência e afinidade da população à atividade agrícola.</li> <li>• Existência de mercados compatíveis com a oferta e suas possíveis melhoras em termos de qualidade e quantidade.</li> <li>• Existência de problemas de produção e logística na cadeia</li> </ul>

	<p>produtiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de serviços de fornecimento de insumos (fertilizantes, sementes, etc.), mão de obra, maquinaria e serviços afins a preços razoáveis.</li> <li>• Existência de uma cultura empreendedora dos futuros beneficiários.</li> <li>• Condições e vontade de pagamento por parte dos usuários.</li> </ul>
Fatores sociais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceitação do projeto por parte dos futuros usuários.</li> <li>• Existência de projetos complementares e seus resultados.</li> <li>• Existência de uma organização de usuários.</li> <li>• Existência de conflitos internos entre os beneficiários que possam atrapalhar o desenvolvimento do projeto.</li> <li>• Possíveis impactos na comunidade segundo o percentual de beneficiários.</li> </ul>
Fatores ambientais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impactos ambientais das obras necessárias para a implantação do SFVI.</li> <li>• Impactos ambientais no recurso hídrico, no solo e no ecossistema agrícola (uso de agroquímicos, introdução de novas espécies, desmatamento).</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria.

Na continuação são apresentadas sete pautas gerais importantes na concepção e planejamento do projeto com SFVI. Essas pautas implicam a multidisciplinaridade da equipe projetista, o trabalho em conjunto com os usuários e as entidades locais afins, a solução de problemas logísticos e de organização da cadeia produtiva, a formulação de regras claras com os usuários, o uso de equipamentos robustos, o aproveitamento de experiências similares anteriores e o planejamento da cada etapa do projeto.

### 6.1.1 Equipes multidisciplinares para a elaboração do projeto

É desejável que projetos com SFVI sejam trabalhados por equipes multidisciplinares e entidades multisetoriais, para possibilitar que a equipe projetista satisfaça em maior medida as necessidades da cadeia produtiva. Na implementação de sistemas fotovoltaicos de irrigação é salutar contar com recursos humanos de formações diversas, como das ciências exatas (engenheiros eletricitas, eletrônicos, civis), sociais (sociólogos, educadores, administradores, economistas, etc.) e agrícolas (agrônomos, técnicos em extensão rural, etc.).

Os profissionais da área agrícola poderão definir uma possível mudança na produção atual segundo as novas possibilidades de fornecimento de água, assim como fazer um dimensionamento adequado das necessidades hídricas do cultivo e identificar possíveis

problemas de pragas e más técnicas agrícolas que possam diminuir os benefícios do SFVI. Os profissionais da tecnologia fotovoltaica serão os encarregados de dimensionar e configurar o sistema fotovoltaico de irrigação, assim como selecionar com critério os equipamentos desse sistema. Também é possível que eles façam a capacitação técnica das pessoas encarregadas pelo serviço técnico.

Sociólogos, educadores e pessoas com experiência em transferência de tecnologias podem conscientizar e consolidar os beneficiários do projeto e do cumprimento dos compromissos (manutenção do sistema, reposição de equipamentos e pagamentos periódicos se necessário). Economistas ou administradores poderão articular melhor a cadeia produtiva.

Em razão da variedade de profissionais e pontos de vista criados, é necessária a interação entre as equipes, para a elaboração adequada do projeto. As diferentes visões adquiridas durante a formação dos profissionais podem ser divergentes, razão pela qual o coordenador do projeto terá de encontrar um ponto de equilíbrio entre elas que seja compatível com as metas do projeto.

### **6.1.2 Trabalho em conjunto com os futuros usuários**

Segundo Foster (1964), é importante que os projetos de transferência de tecnologias sejam elaborados em conjunto com os futuros usuários. A opinião deles é fundamental para a adaptação da tecnologia ao contexto sociocultural (valores, cultura e percepção da realidade local) e a procura de soluções realistas para seus problemas. Neste sentido, é fundamental, compreender a visão dos usuários em relação ao mundo. Muitas sociedades agrícolas têm medos, crenças e superstições que deverão ser respeitadas ou eliminadas paulatinamente durante a implementação do projeto.

A interação com os usuários pode ajudar a compreender como a situação da comunidade pode mudar com a introdução da tecnologia. Por isso, é importante a implementação de metodologias participativas que permitam a interação com os usuários e evitem a exclusão social ou de gênero. A presença de monitores permite fortalecer os laços entre os beneficiários e a equipe do projeto.

### **6.1.3 Trabalho em conjunto com entidades locais relacionadas com os setores agrícola, energético e afins**

Muitos projetos são levados a cabo de maneira isolada sem planejamento conjunto com entidades locais do setor agrícola ou energético. Em função dessa falta de interação, é possível ver em muitos locais uma sobreposição de projetos de âmbito comuns, por exemplo, comunidades sendo eletrificadas com sistemas fotovoltaicos por uma ONG quando elas já estão próximas de ser eletrificadas pela empresa elétrica local.

A sobreposição de projetos afins é sinônimo de falta de planejamento porque os esforços individuais de cada projeto podem interferir no desenvolvimento de outros se não existir metas comuns. Além disso, a interação entre entidades de âmbito afim possibilita a formalização e criação de alianças estratégicas para compartilhar as experiências adquiridas por cada equipe de trabalho, assim como a otimização dos recursos.

### **6.1.4 Regras claras e atingíveis com os beneficiários**

É importante não criar falsas expectativas para os usuários quanto às possibilidades da tecnologia e às metas de projeto. Os beneficiários devem estar conscientes dos compromissos que estão assumindo com a implementação do projeto (pagamentos, trabalhos de manutenção, etc.). Em consequência, esses compromissos devem ser realistas e claros para que o usuário tenha a capacidade de cumpri-los.

As capacitações desempenham um papel importante neste aspecto, porque com elas os beneficiários podem compreender a importância de cumprir com uma determinada responsabilidade. Por exemplo, se o usuário deve pagar uma mensalidade, é necessário que ele saiba a razão do pagamento, os benefícios atingidos com esse pagamento e os possíveis impactos que poderiam ocorrer se ele deixar de pagar.

### **6.1.5 Análise da cadeia produtiva, identificação de barreiras e solução dos problemas de logística e organização**

É comum que os técnicos que elaboram projetos com sistemas fotovoltaicos privilegiem a elaboração da parte técnica do sistema, esquecendo que não é suficiente fornecer energia de

qualidade para esperar um aumento da renda dos beneficiários. Muitas vezes os problemas com projetos de uso produtivo da energia residem mais na logística necessária para interagir com os mercados e organizar o processo de produção do que na manutenção do desempenho máximo do sistema. Em outras palavras, se bem solucionar os problemas de engenharia é parte importante na sustentabilidade do projeto, também o é solucionar os problemas de produção, transporte e relação com os mercados. Não adianta melhorar a produção local com os SFVI, se o produto não tiver um mercado garantido ou não puder chegar até ele.

A produção agrícola não é só limitada pela falta de água senão também por outros fatores inerentes à atividade e ao mercado<sup>38</sup>. Embora o produtor tenha “em teoria” a experiência necessária para saber o que produzir e quando produzir, é sempre bom revisar todas as restrições e as possíveis alternativas de novos produtos e mercados potenciais. Existem várias metodologias para analisar e ponderar os fatores internos e externos. Uma delas é descrita por Vilckas (2004).

A análise dos fatores internos de produção deve levar em conta a dependência da atividade dos recursos naturais (clima, nutrição do solo, acesso à água), dos recursos humanos (qualidade e quantidade necessária para o trabalho e afinidade para a atividade produtiva), dos recursos tecnológicos e infraestrutura existentes, e dos recursos financeiros disponíveis. A análise dos fatores externos deve estudar as características do mercado onde o produto será comercializado (níveis de concorrência e de demanda) e a existência de serviços de apoio (acesso a insumos, assistência técnica, crédito, meios de transporte de mercadorias e serviços de segurança para produzir, armazenar, transportar e comercializar os bens).

Além da falta de água, más práticas agrícolas, como o uso de sementes, fertilizantes e pesticidas inadequados ou a inexistência de capacidade para o processamento, armazenamento, empacotamento e controle de qualidade segundo os padrões de exigência do mercado alvo, também reduzem a capacidade de produção. Outro problema comum é o fato de que os agricultores rurais vendam seus produtos isoladamente a terceiros, perdendo assim a capacidade de negociação que lhes corresponde como produtores. A formação de cooperativas e associações de produtores permite negociar melhor os preços dos produtos, reduzir os gastos de transporte e os custos de aquisição de insumos.

---

<sup>38</sup> Recomenda-se a leitura do “Livro dos pobres rurais”, disponível em <http://www.polanlacki.com.br/agrobr/indice.html>, para uma análise mais aprofundada do tema.

Por essas razões, é necessário estudar adequadamente a cadeia produtiva como um todo, estudar os gargalos e conceber possíveis soluções dos problemas críticos da cadeia. Alguns desses problemas podem ser solucionados com o sistema fotovoltaico. Por exemplo, na produção de tomates orgânicos<sup>39</sup>, não se pode utilizar agrotóxicos no processo. Por isso, pode-se utilizar alternativamente armadilhas de luz cuja energia pode ser fornecida pelo sistema fotovoltaico, contra a presença do inseto traça-de-tomateiro (*Tuta absoluta*).

### **6.1.6 Uso de lições já aprendidas em projetos anteriores e criação de uma base para projetos futuros**

Ainda que cada projeto tenha características próprias que as diferenciam de outros, muitas lições aprendidas nesses projetos devem ser tomadas em conta. Como foi visto, nas diversas experiências no Brasil e no resto do mundo, sabe-se que a motobomba é a parte eletromecânica mais sensível do sistema fotovoltaico de irrigação, sendo assim necessária uma adequada seleção e manutenção para prolongar sua vida útil. Lições similares sobre formas adequadas de transferir a tecnologia para comunidades rurais, técnicas de capacitação, configurações do sistema podem ser obtidas com a análise de experiências passadas.

Durante a elaboração do presente trabalho, observou-se a falta de documentação sobre os projetos instalados no Brasil. Muitas das entidades que participaram da implementação, desconheciam dados importantes como o tipo de sistema instalado, características dos equipamentos ou o estado atual dos sistemas. Geralmente, como consequência da mudança de equipes e a má prática de não documentar e publicar o aprendido.

É importante pelos motivos mencionados, que os projetistas documentem as diversas atividades feitas durante a implementação do projeto para analisar os acertos, erros e as possíveis melhoras. O material pode servir como base para futuros projetos, com a finalidade de evitar a repetição de erros e facilitar a implementação da tecnologia.

---

<sup>39</sup> Uma definição simples de alimentos orgânicos é que eles são produtos de origem vegetal ou animal que estão livres de produtos químicos (agrotóxicos) durante sua produção. Uma definição mais exata é estabelecida pela lei 10.831 de 23 de dezembro de 2003 ([http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/2003/L10.831.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2003/L10.831.htm)).

### **6.1.7 Utilização de equipamentos robustos e manutenção contínua.**

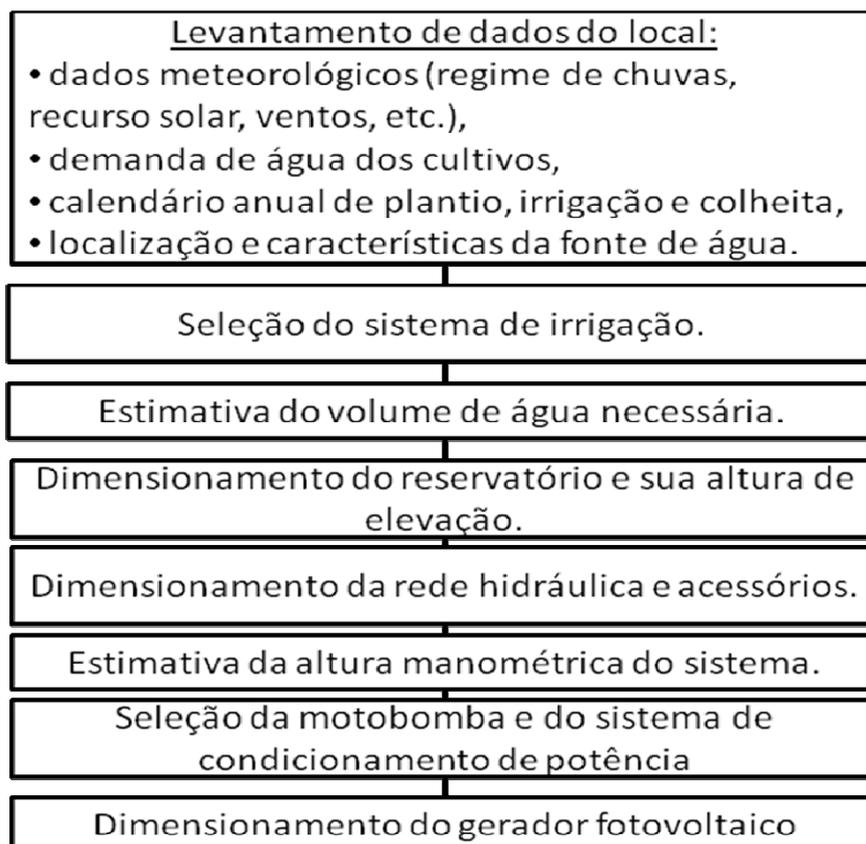
A tecnologia fotovoltaica de bombeamento tem demonstrado bom desempenho em diversos projetos implantados ao redor do mundo. Porém, também existe registro de sucateamento de projetos como consequência da seleção de equipamentos inadequados para as condições de trabalho locais ou da sua falta de manutenção.

O uso de equipamentos de boa qualidade técnica diminui o risco de falhas e paralisações do sistema. Por isso, é importante que eles sejam avaliados em laboratório, para garantir seu bom desempenho. Ensaios simplificados e facilmente reproduzíveis podem ser replicados em laboratórios pequenos, de modo que possam se tornar parte das ferramentas para garantir a boa qualidade dos sistemas instalados.

Mesmo assim, é necessário também criar uma organização adequada que possa realizar os trabalhos de manutenção preventiva e corretiva com a finalidade de que os equipamentos possam ter uma vida útil mais longa.

## **6.2 Recomendações para seleção da configuração do sistema e dos equipamentos**

A seleção da configuração do sistema e dos equipamentos é um tema que depende do critério da equipe projetista, já que nenhuma configuração é ótima para todas as situações. Para isso é importante conhecer bem o local de instalação e suas características, as características da fonte de água, da cultura e da produção, etc. Para configurar o sistema recomenda-se adotar os seguintes passos, mostrados na figura 58.



**Figura 58 - Passos para a configuração do SFVI**

Fonte: Elaboração própria.

Os passos mostrados na figura 58 não são sequenciais e muitas vezes é necessário fazer um procedimento iterativo para ajustar os valores obtidos às condições reais de trabalho.

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico de irrigação é importante saber que a demanda hídrica das plantas é variável e muitas vezes concentrada em um período específico do ano. A variabilidade sazonal pode fazer com que o sistema tenha que ser sobredimensionado para satisfazer a demanda de um período específico, sendo subutilizado durante o resto do ano. Nessas condições, os sistemas de geração diesel podem ser mais convenientes porque, diferentemente dos SFVI, eles se tornam mais competitivos quanto menor for o grau de utilização. Por esse motivo, é importante a rotação de culturas que permita o uso durante o ano todo do sistema ou, alternativamente, o uso de culturas de produção contínua. Alternativamente também pode-se usar o sistema em outras atividades, como o bombeamento de água para consumo doméstico ou de animais de criação.

No caso da implantação de uma grande quantidade de sistemas, é comum que os projetistas

optem pela padronização do sistema. A padronização permite reduzir os custos de compra e envio de equipamentos e materiais de reposição, além de padronizar as técnicas de instalação, operação e manutenção, simplificando assim, o trabalho dos técnicos. Por outro lado, a padronização pode dificultar a adaptação dos sistemas às características locais de demanda como já aconteceu em projetos como o PRODEEM e, ainda, reduzir a vida útil dos equipamentos se eles não estiverem adequados às condições locais. Neste sentido, pode-se trabalhar com várias configurações que permitam satisfazer as diferentes características da demanda hídrica (fonte de água, tipo de culturas, práticas agrícolas), tal como foi feito nos SFVB para consumo humano no programa MEDA (POZA, 2008).

Como já foi comentado, é recomendável que na configuração do sistema se selecionem configurações simples, equipamentos robustos e equipamentos de fácil operação, manutenção e reposição. Sistemas complexos podem atingir melhores eficiências e desempenhos, mas aumentam o risco de não poderem ser reparados rapidamente pelos usuários e de necessitarem maior manutenção. No longo prazo, os custos de operação e manutenção podem repercutir mais sobre o custo de ciclo de vida do projeto que as economias obtidas pela eficiência do sistema. Em lugares onde a reposição de equipamentos é uma tarefa complicada pelas condições geográficas do lugar ou por falta de capacidade técnica, é essencial selecionar equipamentos de alta confiabilidade e durabilidade.

Neste sentido, é importante conhecer a reputação dos fabricantes e as condições de garantia dos equipamentos antes de serem adquiridos, usar equipamentos e configurações já testados em similares condições ou que já passaram por algum controle de qualidade em laboratório. A avaliação dos equipamentos fotovoltaicos torna-se importante para evitar futuros problemas no fornecimento e na qualidade do serviço. A avaliação dos equipamentos sob condições anômalas e extremas permitirá saber se equipamentos de origem estrangeiro podem trabalhar sob as condições de trabalho locais e segundo as informações fornecidas pelo fabricante.

Os equipamentos a serem selecionados devem estar disponíveis localmente e seus acessórios devem ser fáceis de encontrar no mercado. É muito comum que os projetos fiquem paralisados por semanas e até meses pelas dificuldades de importar novamente um produto que não se encontra disponível no mercado local. Isso foi evidenciado, por exemplo, no caso de Capim Grosso, no qual o projeto falhou pela falta de escovas adequadas para as motobombas de fabricação mexicana. Também é recomendável ter como mínimo um estoque

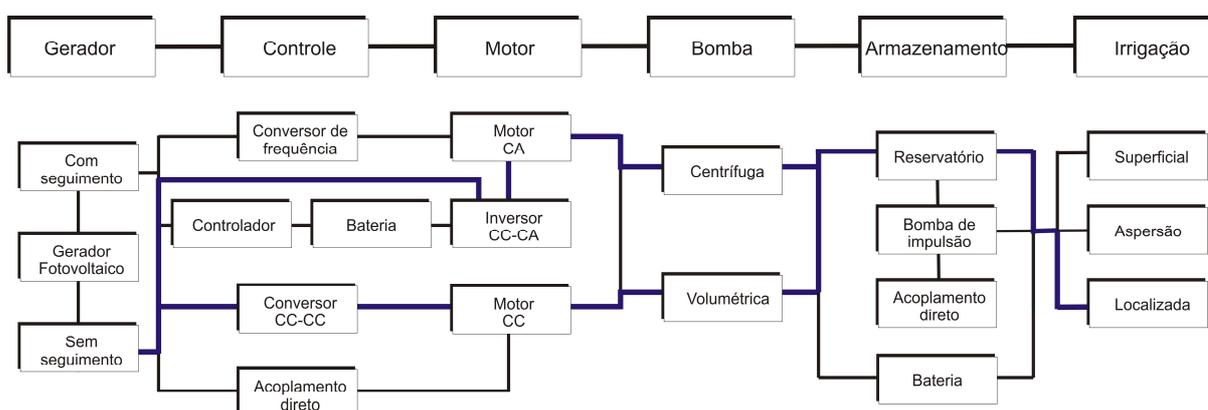
de peças de reposição de equipamentos de curta vida útil e cujo custo não é tão grande quanto os prejuízos produzidos pela falta deles (escovas da bomba, fusíveis, etc.).

Muitas comunidades têm suas próprias tradições e formas de realizar sua atividade produtiva. Mudanças radicais ou incompatíveis com esses costumes podem gerar rejeições e resistências por parte dos usuários. Por isso, é importante que os equipamentos sejam compatíveis com esses costumes ou ver a possibilidade de serem adaptados para evitar rejeições. Por exemplo, Burney (2010) descreve que durante a implementação de um projeto de um SFVI em Benin foi necessário usar sistemas não metálicos na toma da água de um riacho em virtude das crenças locais de não se poder perturbar os crocodilos com objetos metálicos<sup>40</sup>.

Nas seções 6.2.1 a 6.2.9 são apresentadas algumas recomendações associadas a seleção da configuração do sistema e escolha dos equipamentos do SFVI.

### 6.2.1 Seleção da configuração e dos equipamentos do SFVI

No capítulo 3 descreveram-se as distintas configurações para SFVI, cujo leque de opções é resumido na figura 59.



**Figura 59 - Configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água para irrigação**

Fonte: Elaboração própria baseada no trabalho de Koner (1993).

Para simplificar as diversas combinações possíveis, costuma-se dividir as diferentes configurações dos sistemas de bombeamento pela potência necessária para seu funcionamento

<sup>40</sup> Crocodilos, leopardos, panteras e outros animais são considerados sagrados por algumas tribos africanas.

(Tabela 11). Em baixas potências (50 a 400 Wp) costuma-se trabalhar com motores CC e bombas de deslocamento positivo ou centrífugas conectadas diretamente, ou mediante um conversor CC-CC, ao gerador fotovoltaico. Em potências intermediárias (400 a 1.500 Wp) pode-se trabalhar com sistemas em corrente contínua com motobombas CC conectadas com conversores CC - CC ao gerador fotovoltaico ou com sistemas em CA conectando uma bomba a um inversor CC - CA. Em geral, sistemas com potências superiores a 1.500 W utilizam motobombas CA.

Tabela 11 - Configurações mais comuns de motobombas e sistemas de condicionamento de potência para varias faixas de potência.

Potência do gerador (Wp)	Sistema de condicionamento de potência	Conjunto motobomba
< 400	Acoplamento direto Conversor CC – CC	Motobomba CC
400 – 1.500	Conversor CC – CC Inversor CC – CA	Motobomba CC Motobomba CA
> 1.500	Inversor CC – CA Conversor de frequência.	Motobomba CA Motobomba CA centrífuga multiestágios

Fonte: Elaboração própria.

Recomenda-se o uso de conversores CC - CC com MPT em sistemas menores que 400 Wp, por ser a configuração que permite geralmente obter melhores desempenhos com menores custos de investimento. Recomenda-se o uso de conversores de frequência e motobombas centrífugas para sistemas grandes (> 1.500 Wp) já que essa configuração permite o uso de motobombas de uso convencional e seus custos são menores que os sistemas com inversores e motobombas fotovoltaicas (FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009). Em potências intermediárias (400 – 1.500 Wp) pode-se usar qualquer das duas configurações mencionadas.

As configurações de acoplamento do sistema de bombeamento ao sistema de irrigação dependem dos parâmetros de trabalho dos emissores (pressão e vazão) e da altura do reservatório. A tabela 12 apresenta as configurações de acoplamento entre as duas partes.

Tabela 12 - Configurações mais comuns de acoplamento entre o reservatório de água e o sistema de irrigação localizada

Posição do reservatório em relação ao fornecimento de água nas condições de trabalho do emissor	Tipo de acoplamento
Reservatório elevado a uma altura suficiente	Acoplamento direto
Reservatório elevado sem altura suficiente	Motobomba adicional
Sem reservatório	Acoplamento direto da motobomba ao sistema de irrigação
	Motobomba compressora adicional

Fonte: Elaboração própria.

A configuração de acoplamento direto do reservatório elevado ao sistema de irrigação é mais utilizada de todas em razão de sua simplicidade, facilidade de operação, fornecimento constante de pressão e vazão, e sua independência do recurso solar para irrigar. Em caso de se dispor de orçamento suficiente recomenda-se o uso dessa configuração.

Por outro lado, pode-se trabalhar também sem reservatório conectando-se diretamente a motobomba ao sistema de irrigação. Esta configuração reduz os custos do sistema em cerca de 35%, mas precisa de mudanças na forma de trabalho do agricultor (necessidade de irrigar quando o recurso solar o permite, fornecimento de pressões e vazões variáveis, etc.) e não é indicada para locais com alta nebulosidade.

### 6.2.2 Seleção do sistema de geração

Como foi visto anteriormente, a potência do sistema de geração depende do recurso solar disponível, da demanda hídrica do cultivo, da eficiência do sistema de irrigação, do tamanho do terreno e das condições de pressão e vazão de bombeamento. Uma metodologia simples para o dimensionamento do sistema de geração é descrita no anexo B.

Para dar versatilidade e permitir o crescimento da demanda, Poza (2008) sugere o sobredimensionamento do gerador. No entanto, o sobredimensionamento requer um investimento maior e, conseqüentemente, é necessário se analisar se o benefício merece esse investimento adicional.

### 6.2.3 Seleção do tipo de estrutura

Recomenda-se para a seleção da estrutura:

- usar sistemas fixos já que apresentam facilidade de instalação e precisam de pouca manutenção. Sistemas com seguimento solar podem reduzir a potência necessária, mas também aumentam a complexidade do sistema, reduzem a confiabilidade e podem apresentar problemas com algumas condições climáticas,
- utilizar técnicas de alvenaria para o apoio e fixação da base ao solo,
- utilizar estruturas de alumínio, pelo menos na parte superior, possibilita uma melhor fixação dos módulos aos postes e aumenta a durabilidade da estrutura,
- tomar providências para proteger a estrutura contra corrosão,
- visar que a estrutura permita a instalação adequada dos módulos e conexões elétricas, e possibilite os trabalhos de inspeção e limpeza dos módulos.

#### **6.2.4 Seleção do sistema de bombeamento**

A seleção do tipo de motobomba depende dos custos, das características da fonte de água (bombas superficiais, submersíveis ou flutuantes), da altura manométrica e da vazão de bombeamento (deslocamento positivo ou centrífuga). Recomenda-se para a seleção do sistema de bombeamento:

- verificar se a capacidade de bombeamento da motobomba é compatível com a capacidade de regeneração do poço, a fim de evitar que a extração de água seja maior do que a capacidade de reposição em condições padrão de trabalho do gerador,
- conferir se as motobombas estão protegidas contra a falta de água mediante algum dispositivo, como detector de nível de água ou de velocidade de giro da bomba,
- conferir se a motobomba possui proteções adequadas para prevenir a corrosão,
- permitir a visualização de parâmetros como o estado do reservatório, falta de água no poço, bloqueio do motor, baixa potência CC.

#### **6.2.5 Seleção do sistema de condicionamento de potência e dispositivos de controle**

A seleção do sistema de condicionamento de potência depende da potência instalada e das características da motobomba. Geralmente, esses equipamentos são vendidos em conjunto com a motobomba, com exceção das motobombas convencionais usadas com conversores de frequência.

É recomendável que o equipamento de condicionamento de potência apresente proteções da motobomba contra poço seco e sobretensões e, se possível, seguimento do ponto de máxima potência.

### **6.2.6 Seleção do sistema de armazenamento**

Recomenda-se para a seleção do sistema de armazenamento:

- selecionar como sistema de armazenamento o reservatório de água por ser uma opção mais econômica, simples e que necessita de menor manutenção do que as baterias,
- avaliar a possibilidade de dimensionar o reservatório de água visando armazenar a água excedente para uso em período de maior consumo,
- elevar o reservatório a uma altura suficiente que permita fornecer água nas condições de trabalho dos emissores. Quando possível, é recomendável aproveitar as características do terreno para elevar o reservatório,
- mesmo com a existência de filtros, propiciar a decantação da areia e outros materiais trazidos pela água separando a saída de água em alguns centímetros da entrada de água.
- avaliar a possibilidade de incluir um reservatório adicional para a captação e armazenamento de água de chuva.

### **6.2.7 Seleção da cultura e do tamanho da área de cultivo**

Recomenda-se para a seleção da cultura e do tamanho da área de cultivo:

- usar a assessoria de um engenheiro agrônomo para avaliar que tipo de culturas são mais adequadas para as condições locais,
- se a produção for focada para a venda, selecionar culturas que tenham um mercado garantido e um alto valor agregado, mas sugere-se não parar de produzir cultivos para a subsistência familiar,
- ver a possibilidade de produzir culturas de baixo consumo hídrico e adaptáveis as condições de seca do lugar,

- incluir técnicas agroecológicas, como o consórcio de culturas<sup>41</sup> e a rotação de culturas<sup>42</sup>. Essas técnicas permitem uma maior utilização do sistema ao longo do ano e uma melhor produtividade do solo,
- usar áreas menores a dois hectares, por estas serem em média, do tamanho máximo que viabiliza os sistemas fotovoltaicos em relação a outras opções de bombeamento, como foi visto nos casos estudados<sup>43</sup>.

### 6.2.8 Seleção do sistema de irrigação

Recomenda-se para a seleção do sistema da irrigação:

- utilizar preferentemente um sistema de irrigação de tipo localizado (gotejamento, microaspersão, xique-xique, etc.),
- a tubulação deve ser resistente ao desgaste provocado pela radiação solar, agentes químicos e ação da temperatura. No caso dos tubos de polietileno, estes devem seguir as diretrizes da norma ABNT NBR 11795:2008,
- o emissor deve ser estável em relação à vazão e pressão segundo as diretrizes da norma ABNT/CE 04:015.08-016 .2005,
- a tubulação e os emissores devem ser fáceis de limpar.

### 6.2.9 Outros elementos

Recomenda-se na seleção de outros elementos:

- não descuidar a qualidade dos equipamentos complementares (tubulações, fios e cabos, conectores, suporte dos módulos, instrumentos para o controle de água e

---

<sup>41</sup> O consórcio de culturas é a produção de duas ou mais espécies em uma mesma área ao mesmo tempo. Nessa associação, as plantas não necessariamente são semeadas ao mesmo tempo, mas compartilham o solo em alguma etapa de seu crescimento. O consórcio de culturas permite um melhor aproveitamento da área de cultivo, dos recursos naturais (luz, água, nutrientes do solo) e da mão de obra, além de permitir a diversificação da produção. A viabilidade técnica e econômica do consórcio de culturas foi demonstrada no projeto descrito na seção 4.3.3.

<sup>42</sup> A rotação de culturas é a prática na qual são alternados os cultivos de plantas de diferentes famílias e de necessidades nutritivas diferentes com a finalidade de manter a produtividade do solo, evitar a permanência de pragas e doenças, controlar as ervas daninhas e manter a quantidade de matéria orgânica e nitrogênio. A rotação de culturas é compatível com os sistemas fotovoltaicos de irrigação porque permite a utilização constante do sistema, o que o torna mais competitivo em relação ao uso de geradores a diesel.

<sup>43</sup> Existem várias metodologias para encontrar a área máxima de cultivo com SFVI, como as apresentadas por Fraidenraich e Costa (1988) e Cuadros et al.(2004).

- pressão, etc.) porque eles também podem apresentar maior quantidade de falhas,
- os equipamentos elétricos do sistema precisam ter proteções necessárias contra curto-circuito, sobrecargas e sobretensões,
  - os equipamentos sujeitos às intempéries (tubulações, fios, estruturas) precisam contar com proteções contra os efeitos do meio ambiente (umidade, radiação solar, temperaturas altas e baixas), segundo as condições climáticas locais,
  - avaliar a possibilidade de usar equipamentos locais (suportes, estruturas, etc.) para diminuir os custos de transporte e facilitar a reposição destes equipamentos,
  - sistema de proteção à terra são necessários, dependendo da tensão do sistema,
  - utilizar, quando for possível, equipamentos de medição (hidrômetros, sensores, etc.) para avaliar o desempenho do sistema,
  - implementar elementos indicadores e de alarme para facilitar a operação e manutenção por parte do usuário,
  - disponibilizar peças de reposição (chaves, registros, conectores, etc.) e ferramentas (chaves de fenda, alicates, etc.) aos usuários,
  - implementar algum sistema de proteção contra furtos (contrato de um vigilante, instalação de dispositivos antifurto, cercas)<sup>44</sup>,
  - etiquetar os equipamentos (módulos, condicionadores de potência, motobombas) para sua identificação por parte do usuário.

### **6.3 Recomendações para a instalação do sistema**

Muitos problemas encontrados nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento tiveram origem por causa de instalações deficientes. A equipe responsável pela instalação precisa ter experiência em campo ou estar bem treinada e é recomendável que usuários e técnicos participem do processo de instalação.

A instalação do sistema deve ser planejada previamente, com estimativas do tempo necessário, das ferramentas, do número de ajudantes, das condições climáticas no momento de instalação, do estado da fonte de água e das obras civis necessárias para instalação do

---

<sup>44</sup> Existem medidas simples de prevenção antifurtos como a escolha de locais para o poço que estejam perto da casa do usuário ou longe de rodovias, marcar os módulos com tinta indelével com o nome do usuário ou colocar anúncios de que os módulos não podem ser usados em outros sistemas em razão de sua alta tensão. Essas medidas podem ser paliativas em casos não tão severos de criminalidade.

sistema hidráulico e elétrico.

Quando acabada, a instalação deve ser testada para conferir o bom desempenho do sistema (funcionamento dos equipamentos, comparações dos valores dos parâmetros elétricos e hidráulicos reais com os esperados, localização correta dos equipamentos, medidas de segurança, etc.). Essa verificação deve ser feita imediatamente após a conclusão da instalação.

Nas seções 6.3.1 a 6.3.6 são apresentadas algumas recomendações associadas à instalação dos equipamentos do SFVI.

### **6.3.1 Instalação dos módulos**

Recomenda-se para a instalação dos módulos:

- instalar os módulos sobre uma estrutura estável e que permita sua fixação. Sistemas com seguimento ou concentração só são recomendáveis em projetos com orçamento suficiente para um contínuo e longo monitoramento,
- instalar os módulos em lugares sem sombras,
- orientar os módulos em direção ao norte no hemisfério sul e vice-versa,
- instalar os módulos com uma inclinação fixa com um ângulo que permita otimizar a captação de radiação solar durante os meses que apresentem maior demanda hídrica e menor radiação solar. Quanto mais inclinados estiverem os módulos, menor será o acúmulo de sujeira, por isso sugere-se inclinações superiores a 10 graus,
- caso a captação de água seja feita de um rio, o gerador pode ser instalado sobre uma plataforma flutuante.

### **6.3.2 Instalação do condicionador de potência e da motobomba**

Para a instalação do condicionador de potência e da motobomba, recomenda-se:

- instalar os equipamentos de controle elétrico (sistema de condicionamento de potência, medidores elétricos, armazenador de dados, etc.) em uma caixa à prova de água, umidade, poeira e insetos,

- instalar a motobomba seguindo as recomendações do fabricante,
- proteger os cabos do motor contra as partes afiadas do poço, se for o caso.

### **6.3.3 Instalação do reservatório de água**

Para a instalação do reservatório de água, recomenda-se:

- aproveitar o relevo, se possível, para elevar o reservatório de água,
- proteger a estrutura de elevação do reservatório contra as intempéries climáticas locais (temperatura, umidade e ventos),
- usar uma cobertura para reduzir a evaporação e aumento da temperatura da água.

### **6.3.5 Instalação do sistema de irrigação**

Para a instalação do sistema de irrigação, recomenda-se:

- dividir o terreno segundo as necessidades de cada cultivo e dos parâmetros de fornecimento de água (vazão e pressão disponíveis),
- incluir filtros para evitar sujeira e entupimento dos tubos e emissores,
- incluir registros e uniões que permitam o isolamento das seções e sua manutenção,

### **6.3.6 Instalação de outros equipamentos**

Para a instalação de outros equipamentos, recomenda-se:

- garantir que os cabos elétricos e tubulações estejam protegidos contra a radiação solar,
- proteger o sistema com cercas,
- instalar pontos de conexão do sistema hidráulico (registros, cotovelos, conexões, etc.) em lugares acessíveis para sua inspeção e manutenção.

## **6.4 Recomendações para a manutenção dos equipamentos**

A manutenção é um trabalho importante para garantir o bom desempenho do sistema. A

complexidade das tarefas de manutenção depende muito do tipo de componente. Por isso a importância de se escolher equipamentos de boa qualidade e que não exijam grandes manutenções. Por exemplo, a limpeza dos módulos fotovoltaicos é simples e pode ser feita pelos usuários, enquanto a manutenção de motores precisa de pessoas capacitadas.

Para garantir a manutenção dos equipamentos, é importante capacitar os usuários e técnicos dos serviços de manutenção preventiva e corretiva, equipar os técnicos com peças de reposição (chaves, registros, conectores, etc.) e ferramentas (chaves de fenda, alicates, multímetro, etc.), e fornecer aos técnicos e usuários um manual que esclareça os princípios de manutenção, medidas de segurança e procedimentos em caso de problemas.

Nas seções 6.4.1 e 6.4.2 são apresentadas algumas recomendações em relação à manutenção preventiva e corretiva.

#### **6.4.1 Manutenção preventiva**

A manutenção preventiva é o conjunto de operações realizadas pelo usuário e/ou técnico que permitam garantir o funcionamento e durabilidade do sistema. Esse trabalho é, principalmente, de inspeção visual e limpeza dos equipamentos e sua frequência deve ser vistoriada pela equipe em cada visita.

As operações de manutenção preventiva devem ser ensinadas e praticadas reiteradamente durante as capacitações. Recomenda-se a elaboração de relatórios ou de registros de manutenção por parte do usuário.

Entre as tarefas que podem ser feitas pelo usuário encontram-se:

- verificação do desempenho do sistema,
- inspeção da qualidade e nível da água,
- inspeção visual dos equipamentos elétricos (cabos soltos, corrosão, presença de insetos, sujeira nos módulos fotovoltaicos, etc.),
- inspeção visual dos equipamentos mecânicos e hidráulicos (vazamentos, vibrações incomuns da motobomba, corrosão, presença de algas no poço e no reservatório),
- limpeza dos módulos, reservatórios, filtros e tubos de irrigação.

Entre as tarefas que podem ser feitas pelo técnico encontram-se:

- verificação do desempenho do sistema,
- revisão dos parâmetros elétricos e hidráulicos do sistema com o uso de ferramentas apropriadas (multímetros).

#### **6.4.2 Manutenção corretiva**

As tarefas de manutenção corretiva são realizadas quando é detectado algum problema no funcionamento do sistema. Entre as tarefas da manutenção corretiva encontram-se:

- reparação, manutenção e troca das partes desgastadas da motobomba (borrachas, escovas, impulsores, selo, etc.),
- troca dos equipamentos estragados (condicionador de potência, módulos, etc.).

#### **6.5 Recomendações para capacitação de usuários e técnicos**

A introdução de uma tecnologia pode encontrar resistências por parte dos possíveis usuários em virtude do apego de valores culturais, sociais e psicológicos “inerentes” a ela e aos agentes de transferência<sup>45</sup>. Deve-se conferir também a existência de organizações associativas, de dependência a alguma forma de assistência externa, de conflitos atuais ou potenciais na comunidade e das expectativas da comunidade.

A capacitação é uma parte importante do processo de transferência de tecnologia. A capacitação para a introdução de uma tecnologia pode ter vários níveis de profundidade e diversos fins segundo o rol do usuário, de modo que se possam formar pessoas que operem o sistema, técnicos que realizem tarefas simples de manutenção e reparação, e até profissionais que podem criar e apoiarem novos projetos.

Nas seções 6.5.1 e 6.5.2 são mostradas algumas recomendações para a capacitação de usuários e técnicos.

---

<sup>45</sup> Recomenda-se a leitura do livro de Foster (1964) para melhor compreensão da dinâmica das mudanças e da maneira para induzi-las.

### 6.5.1 Capacitação dos usuários

A capacitação dos usuários pode, além de fortalecer os laços entre a equipe do projeto e os beneficiários, como permitir eliminar medos e esclarecer dúvidas dos beneficiários em relação à tecnologia. A capacitação inadequada ou a falta de capacitação já foi causa da ruína de muitos projetos. Por esse motivo recomenda-se:

- levar em conta o nível de alfabetização e educação do público-alvo e seu conhecimento prévio sobre o assunto,
- aproveitar a semelhança de atividades similares feitas pelos usuários com as que deverão ser realizadas com o sistema,
- incluir cursos que melhorem o conhecimento do agricultor sobre a cadeia produtiva das culturas com bom potencial de produção da região, a qualidade do produto, o aperfeiçoamento das técnicas de irrigação localizada, o controle de pragas e doenças, o desenvolvimento agrícola sustentável e o uso racional da água,
- complementar as capacitações na área agrícola com outras capacitações que promovam ou reforcem o desenvolvimento das competências e habilidades de gestão para o crescimento e consolidação da atividade produtiva. Essas capacitações podem abranger temas da área de marketing, administração, vendas, etc.,
- sugere-se o uso das seguintes atividades na capacitação: oficinas, cursos, palestras, campanhas, dinâmicas sobre os temas mencionados com o uso conjunto de material informativo durante as capacitações (cartilhas, textos, artigos de jornais, manuais de operação) e apresentação de vídeos. Se for possível, deve-se realizar visitas a outros empreendimentos com sistemas fotovoltaicos de irrigação,
- sugere-se também o uso de atividades como debates e dinâmicas, que fomentem a reflexão sobre os impactos diretos e indiretos do uso do sistema fotovoltaico de irrigação,
- as capacitações devem ajudar a compreender as possíveis vantagens do uso da nova tecnologia mesmo que as vantagens sejam “evidentes” para os técnicos do projeto (economias a longo prazo pela redução do consumo de combustíveis, custo de oportunidade<sup>46</sup>, diminuição dos impactos ambientais).

---

<sup>46</sup> O custo de oportunidade é o custo econômico associado a uma determinada escolha e medido em termos da melhor oportunidade renunciada. No caso da produção agropecuária um custo de oportunidade que na maioria das vezes não é valorizado pelo agricultor é o do tempo perdido para coletar água y transportá-la até o campo. O

### **6.5.2 Capacitação dos técnicos locais**

Um critério básico de seleção do técnico é que a pessoa selecionada tenha um conhecimento básico de eletricidade e hidráulica, mas na ausência de tais conhecimentos pode-se escolher pessoas que possuem curiosidade natural e habilidades manuais, bem como a vontade e disponibilidade de tempo para atender o trabalho de manutenção. Na formação dos técnicos recomenda-se:

- capacitá-los para realizar trabalhos de manutenção preventiva e corretiva para reduzir o risco de falhas e paradas do sistema,
- treiná-los para que sejam capazes de identificar e solucionar as falhas do sistema que podem ocorrer por motivos esperados como reservatório cheio e falta de água no poço, além de outros motivos como bloqueio do motor, desconexão elétrica, falha de algum componente, etc,
- aproveitar a semelhança de atividades similares feitas pelos usuários com as que deverão ser realizadas para a manutenção do sistema,
- criar condições controladas em que os técnicos possam resolver diversos problemas relacionados com o sistema fotovoltaico de irrigação e executem os trabalhos de manutenção do sistema,
- analisar a possibilidade de remunerar os técnicos ou criar uma massa crítica de sistemas na região que permita manter a existência de uma oficina permanente,
- avaliar os técnicos após as capacitações para conferir o aprendizado.

### **6.6 Recomendações para a gestão e administração dos sistemas**

A gestão e administração podem variar segundo o número de beneficiários que compartilham a sistema e suas características (organização política, estrutura social e familiar). Na compreensão dessa estrutura é importante descobrir quais forças unem ou dividem a comunidade.

Para a gestão e administração dos sistemas recomenda-se:

---

agricultor não dá um valor a esse custo porque é um trabalho feito por ele mesmo ou pelas mulheres e crianças sem nenhuma retribuição econômica. Entretanto, esse investimento de tempo poderia ser aproveitado em outros trabalhos se o agricultor fosse capacitado e dotado das ferramentas necessárias para obter um lucro nesse tempo ganho.

- começar as atividades de gestão e administração desde os primeiros contatos com a comunidade. Tanto a gestão e a administração do sistema devem ser concebidas levando em conta as características econômicas e socioculturais locais. Portanto, devem ser consideradas as possíveis formas de gestão de acordo com as possibilidades e limitações da comunidade,
- criar um marco institucional com regras, benefícios e responsabilidades claras de cada usuário a fim de que se garanta seu cumprimento,
- continuar e reforçar com as formas de organização existentes na comunidade (cooperativas, associações de produtores, etc.) sempre que elas tenham uma visão coerente com os objetivos do projeto,
- estimar e fornecer a quantidade de recursos (financeiros e humanos) necessários lembrando que o processo de consolidação de um sistema de gestão local pode durar vários anos,
- criar uma associação de vários produtores pois essa forma de organização permite melhor negociação dos volumes e preços do produtos no mercado e a redução dos preços dos insumos (sementes de boa qualidade, fertilizantes, etc.) e de transporte.

### **6.7 Recomendações para a escolha do sistema de financiamento**

Um dos principais problemas dos SFVI é o alto custo inicial desta tecnologia. Em razão dessa situação em combinação com o baixo poder aquisitivo do agricultor, é necessário oferecer ao beneficiário um esquema de financiamento adequado.

O sistema de financiamento afeta a sustentabilidade do projeto. A sustentabilidade de um projeto, mesmo quando o sistema é totalmente subsidiado, será assegurada se no mínimo gerar lucro e também cobrir os custos de operação, manutenção e substituição do sistema.

Existem vários esquemas de financiamento. Os mais comuns são financiamento a fundo perdido, subvenção e crédito. Alternativamente também pode-se usar a venda à vista, o aluguel dos equipamentos, o *leasing*, e a cobrança do consumo elétrico ou de água.

Não é possível recomendar um sistema único de financiamento já que a viabilidade de cada um depende de fatores culturais, legais e financeiros. Tendo em vista os resultados dos casos apresentados no capítulo 4, sugere-se:

- levar em conta a capacidade e a vontade de pagamento dos usuários na hora de escolher um esquema de financiamento.
- reduzir, se possível, os custos de transação dos beneficiários em termos de tempo e dinheiro,
- permitir a redução de custos do sistema com o fornecimento de mão de obra por parte do usuário na instalação,
- criar procedimentos que possibilitem o acesso a financiamento por parte de pessoas com baixa escolaridade.

Em nenhum dos casos estudados foi realizada a venda à vista, fato que é compreensível em razão do alto custo de investimento do SFVI em relação a renda média do produtor rural. Caso seja necessário, recomenda-se:

- supervisionar o cumprimento dos termos de garantias e manutenção por parte dos vendedores,
- evitar, se possível, a comercialização de alternativas de baixa qualidade mesmo que sejam mais econômicas.

A doação ou fundo perdido era comumente usado em muitos programas de eletrificação rural como um meio para introduzir a tecnologia já que envolve a livre transferência de tecnologia para a comunidade mas agora é evitado em razão da falta de sustentabilidade a longo prazo. Como é observado nos casos apresentados, os sistemas doados ficaram paralisados após de que algum componente deixou de funcionar já que os usuários não contavam com meios para comprar novos equipamentos . Por isso, recomenda-se:

- evitar a doação como esquema de financiamento por não ser sustentável, sem um fundo de reposição de equipamentos, e por criar distorções no mercado,
- criar também um fundo de reposição de equipamentos a través de pagamentos dos beneficiários ou financiamento externo, caso seja necessário doar os equipamentos.

A subvenção é um incentivo fiscal que serve para cobrir parcialmente os custos de aquisição, operação e manutenção, quando não pode ser coberto pelo usuário. Recomenda-se:

- apenas usar subsídios se eles puderem criar as condições de escala de mercado,
- evitar seu uso prolongado porque eles podem inibir o desenvolvimento natural do mercado.

A venda em parcelas é um empréstimo de dinheiro que deve ser devolvido em um prazo estabelecido nas condições combinadas entre o credor e o devedor. O crédito pode ser oferecido, por exemplo, através de vendedores ou de entidades especializadas (bancos rurais ou cooperativas). Embora tenha sido necessária uma renegociação de uma parte da dívida de um sistema vendido em parcelas no caso 4.3.4., a venda em parcelas é uma das formas mais recomendáveis de financiamento dos SFVI. Por isso, recomenda-se:

- informar ao produtor o limite da linha de crédito, o período de carência e as garantias necessárias para adquirir o empréstimo assim como a cobertura dos pagamentos,
- aplicar juros baixos e permitir reajustes nos pagamentos se o usuário tiver a capacidade de reduzir o período de pagamento,
- ampliar o sistema de crédito para que o usuário possa adquirir também matérias-primas e outros equipamentos necessários para a produção,
- avaliar os meios para fornecer o crédito e receber os pagamentos (lojas de equipamentos, agências bancárias rurais, organizações locais ou diretamente através dos agentes do projeto).

### **6.8 Recomendações para o monitoramento e a assistência técnica**

As atividades de monitoramento devem se focar em vários temas incluindo os impactos técnicos, sociais, econômicos e ambientais do uso apropriado das tecnologias e suas aplicações. O monitoramento permite identificar e solucionar problemas numa fase inicial, por isso é uma peça-chave para garantir a continuidade e qualidade do serviço.

Os dados obtidos durante o monitoramento podem ser quantitativos ou qualitativos dependendo dos objetivos traçados e dos instrumentos utilizados para obter esses dados. Entre

os instrumentos que podem ser usados estão entrevistas aos usuários e outros atores do projeto, visitas de campo, monitoramento dos parâmetros elétricos, elaboração de relatórios por parte dos usuários, técnicos e encarregados do projeto, etc. A análise desses dados permite realizar ajustes durante a implementação do projeto. Por isso, recomenda-se:

- definir os alvos de monitoramento e os parâmetros a ser monitorados segundo esses alvos,
- elaborar relatórios com informação precisa segundo os alvos definidos pela equipe. Por exemplo, registro de consumos e avarias técnicas, e os gastos para repará-las,
- evitar a criação de relatórios extensos com informação que não seja compatível ou relevante segundo os objetivos traçados. Alternativamente, pode-se usar relatórios auxiliares que documentem outros fatos acontecidos e que possam servir como base para publicação acadêmica (dados antropológicos, mudanças ambientais, etc.),
- realizar um seguimento técnico permanente do estado e dos parâmetros técnicos (tensão e corrente do gerador, consumo elétrico da motobomba, quantidade de água bombeada e consumida) dos equipamentos instalados,
- realizar um seguimento da produção e da comercialização do produto.

Quando é detectado um problema durante o monitoramento, é importante fornecer assistência ao usuário para poder resolver o problema. A assistência técnica pode resolver problemas com o uso do SFVI (falhas do equipamento) e a logística necessária para a produção e comercialização do produto. Recomenda-se:

- fornecer assistência técnica local e contínua através dos técnicos para a solução de problemas com os equipamentos do SFVI,
- avaliar a possibilidade de dar assistência na produção e comercialização do produto quando detectado um problema,
- informar aos usuários as condições de assistência técnica (custos, frequência e tempo de duração da assistência).

## **6.9 Recomendações para a avaliação dos resultados**

A avaliação final é feita quando o projeto está prestes a expirar ou concluir. A avaliação do

projeto permite analisar se os objetivos foram atingidos e conhecer as condições de replicabilidade. O fim da avaliação é a elaboração de conclusões e recomendações para futuros projetos.

Para avaliar os resultados do projeto é importante criar um ponto de referência para analisar as mudanças ocorridas com o sistema e estabelecer os eixos a que devem ser avaliados e as metodologias de coleta e análise dos dados. Do ponto de vista social pode-se avaliar os critérios de seleção das comunidades, o diagnóstico do local, a seleção do problema, planejamento, implantação do sistema, efetividades das capacitações e a conquista dos impactos esperados. Do ponto de vista técnico, a elaboração do projeto pode ser avaliada segundo os seguintes critérios: desempenho do sistema (capacidade de bombeamento, satisfação das necessidades hídricas), confiabilidade, segurança, simplicidade de instalação, uso e manutenção.

#### **6.10 Recomendações para a difusão da tecnologia**

Para a difusão dos SFVI recomenda-se:

- criar redes de pesquisa compostas por membros de várias instituições, incluindo a indústria e os representantes do governo,
- investir em projetos piloto em centros demonstrativos e em zonas rurais,
- fomentar a discussão da importância dos SFVI através de debates e conferências,
- fornecer informação aos tomadores de decisões e usuários potenciais para fomentar o uso da tecnologia

## CONCLUSÕES

O acesso à energia moderna, em particular à energia elétrica, é um fator catalisador importante para o desenvolvimento humano. Nas regiões rurais, as formas de geração, transmissão e distribuição convencionais são muitas vezes inviáveis por razões econômicas, técnicas e ambientais. A falta de acesso a fontes modernas de energia desacelera o crescimento econômico das regiões rurais, como foi mostrado no capítulo 1.

Por outro lado, o uso de água na irrigação é de vital importância para o desenvolvimento das regiões rurais que dependem da atividade agrícola. A escassez de água reduz a capacidade de produção dos campos agrícolas e a possibilidade de mudança de produção para cultivos com melhor valor no mercado.

Os projetos estudados revelam o potencial dos SFVI e a tendência de incremento da competitividade da tecnologia. A partir das experiências estudadas constata-se a importância de se conhecer bem a tecnologia, suas opções de configuração, vantagens e limitações já que há várias possibilidades de configurações de SFVI e sua escolha depende do tipo e das características do empreendimento.

O Brasil apresenta várias condições que favorecem a adoção dos sistemas fotovoltaicos de irrigação (regiões com pluviometria irregular e bom recurso solar, experiência de uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento e aumento da oferta de produtos afins, disponibilidade de água em fontes subterrâneas e aumento do uso de sistemas de irrigação localizados). Porém, também existem barreiras técnicas, econômicas e financeiras, regulatórias e institucionais, informativas e comerciais, que podem ser superadas paulatinamente com uma maior participação do estado e instituições afins as atividades agrícolas e de desenvolvimento rural.

Do ponto de vista técnico, as diferentes configurações dos sistemas fotovoltaicos de irrigação mostraram que a tecnologia apresenta bom desempenho, simplicidade de uso e compatibilidade com as técnicas agrícolas locais. A análise dos casos apresentados mostra que os problemas dos sistemas fotovoltaicos de irrigação instalados no Brasil são consequência de uma má gestão dos sistemas e de uma seleção inadequada de equipamentos. Em muitos casos, os projetos acabaram logo depois da saída da equipe de implantação e monitoramento ou

quando alguma peça apresentou problemas, o que indica que os usuários não se apropriaram da tecnologia ou não foram criadas as bases para atingir a sustentabilidade do projeto.

A padronização de um grande número de sistemas numa região permite diminuir custos de aquisição e envio de equipamentos e materiais de reposição, além de padronizar as técnicas de instalação, operação e manutenção simplificando assim, o trabalho dos técnicos. Porém, é importante oferecer sistemas adequados à necessidade de cada produtor (potência, custo e compatibilidade com o tipo de produção). Por isso, recomenda-se trabalhar com duas ou três configurações, que permitam a flexibilidade na escolha para cada caso.

Do ponto de vista econômico, é importante garantir o aumento da renda dos produtores rurais. Os casos estudados mostraram diversos benefícios nas economias dos produtores como consequência do aumento da produção por hectares e do tamanho da área de cultivo, a mitigação de riscos de perda de safra, a diversificação de culturas e a mudança de produção para produtos de melhor valor no mercado, a redução do tempo necessário para bombear água entre outros fatores.

Embora os sistemas fotovoltaicos de irrigação, pelas características citadas, são uma alternativa factível para o fornecimento de água na agricultura, eles não são a panacéia para todos os problemas do setor rural. Nesse sentido, a introdução dessa tecnologia deve ser só um elemento de um conjunto de medidas que permitam a melhoria da produção. Tais medidas devem abranger a melhor escolha de cultivos orientados ao mercado, o uso de sementes de qualidade e de técnicas de produção adequadas assim como o fortalecimento da organização local para negociar preços e volumes no mercado.

Por essas razões, recomenda-se a formação de equipes projetistas multidisciplinares para poder articular melhor a cadeia produtiva e propor soluções para os diferentes problemas.

Adicionalmente, recomenda-se o fortalecimento das associações de produtores já que a associação de vários produtores permite negociar melhor os produtos no mercado (volumes e preços) e reduzir gastos de compra de insumos (sementes de boa qualidade, fertilizantes, etc.) e de transporte.

Como toda comunidade tem suas peculiaridades é difícil sugerir um sistema de financiamento único. Mesmo assim, a venda do sistema em parcelas (com ou sem subsídios) parece ser a mais adequada em termos de sustentabilidade. Recomenda-se que o sistema de pagamento deve levar em conta a capacidade de pagamento do beneficiário para determinar o período de carência, a taxa de juros e a frequência de pagamento. Recomenda-se aplicar baixos juros, permitir reajustes nos pagamentos se o usuário tiver a capacidade de reduzir o período de pagamento e ampliar o sistema de crédito para que o usuário possa adquirir também matérias-primas e outros equipamentos necessários para a produção.

Do ponto de vista social, qualquer mudança no sistema de organização ou a introdução de uma tecnologia pode causar rejeições por partes dos usuários. Se bem que os SFVI não foram rejeitados em nenhum dos casos estudados, é sempre recomendável não impor a tecnologia, e sim, adaptar ela ao contexto socioeconômico do usuário. Para isso, recomenda-se o trabalho em conjunto com os beneficiários na concepção, desenho e implementação já que sua participação os incentiva a estar presentes nas capacitações e permite uma melhor compreensão de suas prioridades e que as capacitações sejam parte importante do processo de transferência tecnológica para informar dos benefícios e compromissos assumidos com o projeto. É importante nesse sentido estabelecer metas e regras claras com os beneficiários.

Finalmente, pode-se afirmar que a tecnologia dos SFVI apresenta uma enorme potencialidade de uso, mas é necessário cautela na forma como são planejados e conduzidos os projetos. As orientações para a implementação dos SFVI sugeridas no presente trabalho não tem caráter obrigatório, mas sua adaptação na concepção do projeto poderia ajudar a obter melhores resultados no projeto.

Como trabalhos futuros sugerem-se:

- Estudo de outras técnicas de irrigação compatíveis com os SFVI como a hidropônia e a irrigação por capsulas porosas.
- Estudo da compatibilidade de emissores e tubos de irrigação comercializados localmente com os SFVI e as diferentes alturas de elevação do reservatório.
- Implementação de um SFVI sem reservatório para avaliar a compatibilidade desta configuração em relação aos costumes dos agricultores do sertão.

- Levantamento de dados dos lugares que são mais aptos para a implementação desta tecnologia.
- Estudo de culturas com melhor custo-benefício com a implementação do SFVI.
- Estudo da complementaridade do SFVI com outras aplicações agrícolas nos processos de produção, processamento e armazenamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALONSO - ABELLA, M. et al. Utilización de convertidores de frecuencia en sistemas de bombeo de agua con energia solar fotovoltaica. In: **Workshop Abastecimiento de agua en áreas rurales mediante bombeo fotovoltaico**. Espanha. 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.

ALVES, J. et al. Custo da energia elétrica na Irrigação. In: **XXXII Congresso Brasileiro de Energia Agrícola**. Associação Brasileira de Engenharia Agrícola. Goiânia, 2003.

ANDRADE, C. L. T. **Seleção do sistema de irrigação**. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, p. 1-16. 2001.

ARGAW, N.; FOSTER, R.; ELLIS, A. **Renewable Energy for Water Pumping applications in Rural Villages**. NREL. Colorado. 2003.

ASAWA, G. L. **Irrigation and water resources engineering**. New Age International, 2006. ISBN 812241673.

BANCO MUNDIAL. Impactos e externalidades sociais da irrigação no semi-árido brasileiro. In: **Série Água Brasil 5**. Brasília, 2004.

BANCO MUNDIAL. **World Development Report 2008: Agriculture for Development**. Banco Mundial. Washington DC, p. 3-4. 2007.

BEZERRA, P. Bombeamento de água fotovoltaico – problemas na implementação de um programa de utilização ampla: PRODEEM. In: **VIII Seminário Ibero-Americano de Energia Solar – Abastecimento de Água em Áreas Rurais Mediante Bombeamento Fotovoltaico**. Recife, 2002.

BIONE, J. **Análise do sistema de irrigação na região semi-árida do Nordeste, utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentrado tipo V**. Recife, 2006. 167p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2006.

BIONE, J.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. **Solar Energy**, v. 76, n. 6, p. 703-711, 2004.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M. D. Energia solar fotovoltaica no semi-árido: estudo de caso sobre a atuação do PRODEEM em Petrolina-PE. In: **6 Encontro de Energia no Meio Rural. AGRENER 2006**. Campinas. 2006.

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

BURNEY, J. et al. 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 enviromental and resources**, n. 30, p. 117-144, 2005.

CALIFORNIA SOLAR CENTER. World's largest solar irrigation pump dedicated in San Joaquin Valley. **Solar e-clips**, 2003. Disponível em: <<http://www.californiasolarcenter.org/solareclips/2003.04/20030408-1.html>>. Acesso em: Dezembro 2010.

CARVALHO, O. Nordeste semi-árido: nova delimitação. **Boletim regional - Informativo da Política Nacional de Desenvolvimento Regional**, Brasília, v. 1, p. 8-17, 2006.

CARVALHO, P. C. et al. Sistemas fotovoltaicos em projetos sociais urbanos: a experiência do Instituto Joazeiro. In: **I Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Fortaleza. 2007.

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.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília. 1998.

COSTA, H. Diagnóstico do estado de funcionamento de sistemas de bombeamento de água fotovoltaico (SBFV) instalados em Pernambucano. In: **6 Encontro de Energia no Meio Rural. AGRENER 2006**. Campinas. 2006.

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.

CUADROS, F. et al. A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes **Solar Energy**. v.76, n.4, p. 465-473, 2004.

CRESESB/CEPEL. Milho, quiabo, feijão-de-corda. um novo alento para o povo de sertão. **CRESESB informe**, Rio de Janeiro, n. 2, p. 1,7, Junho 1996.

DENTISTAS SOBRE RUEDAS. **Proyeto Huerto solar. Fase 1: Huerto Experimental Área Desarrollo de DSR.** ONG Dentistas sobre ruedas. Barcelona, p. 1-23. 2009.

DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **Energy for the poor. Underpinning the Millenium Development Goals.** Reino Unido, p. 27-28. 2002.

ESPERICUETA, A. D. C. et al. Ten-year reliability assessment of photovoltaic water pumping systems in Mexico. In: **American solar energy society conference.** Portland. 2004.

FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L.; ZILLES, R. Economic analysis of photovoltaic and gasoline pumping systems. **Renewable energy**, v. 8, n. 1-4, p. 424--427, 1996.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos: Dimensionamento Simplificado e Análise de Competitividade para Sistemas de Pequeno Porte.** São Paulo, 1997. 150p. Dissertação (Mestre em Energia) Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1997.

FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos. In: **4 Encontro de Energia no Meio Rural AGRENER-2002.** Campinas. 2002.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão.** São Paulo, 2003. 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. Bombeamento de água no meio rural, análise econômica de duas configurações fotovoltaicas e uma elétrica convencional. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – AVERMA, Argentina**, v. 13, 2009. ISSN 0329-5184.

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

FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. **Solar energy: Renewable Energy and the Environment.** CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-7566-3.

FRAENKEL, P. **Water-Pumping Devices: A Handbook for Users and Choosers.** FAO, ITDG. Londres. 1986.

FRAIDENRAICH, N.; COSTA, H. Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system. **Solar Wind Technology**. v.5, n.2, p. 121-126, 1988.

GLOBAL ENVIROMENT FACILITY (GEF) - SMALL GRANTS. Projetos diversos com sistemas fotovoltaicos de irrigação, 2003. Disponível em: <<http://sgp.undp.org/index.cfm?module=Projects&page=SearchResults&SearchText=&Count ryID=&RegionID=&FocalAreaIDs=All&OperationalProgramIDs=&FullGrant=&RecipientT>

ype=&SearchByDate=0&StartMonth=1&StartYear=1990&EndMonth=1&EndYear=2011&ShowMap=No&>. Acesso em: Dezembro 2010.

GTZ. **Photovoltaic Pumping systems (PVPS)**. Material do Seminário da GTZ na Universidad de Tarapacá. Arica. 1999.

GTZ. Resource-Conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems (PVP) in Chile. In: **IEA 16 Case Studies on the Deployment of Photovoltaic Technologies in Developing Countries, REPORT IEA PVPS T9-07: 2003**. p. 55-63. 2003.

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

HAGOS, F. et al. **Importance of irrigated agriculture to the Ethiopian economy: capturing the direct net benefits of irrigation**. International Water Management Institute. Colombo, p. 1-2. 2009.

HALCROW, W. **Small-Scale Solar Powered Irrigation Pumping Systems—Phase 1 Project Report, UNDP Project GLO/78/004**. Banco Mundial; ITDG. Londres. 1981.

HANSEN, V. E.; ISRAELSEN, O. W.; SRINGHAM, G. E. **Irrigation Principles and Practices**. 4. ed. John Wiley & Sons, 1979.

HEINZE, B. **Importância da agricultura irrigada para o desenvolvimento da Região Nordeste do Brasil**. Brasília, 2002. 59p. Monografia (MBA em Gestão sustentável da Agricultura Irrigada ) ECOBUSINESS SCHOOL/FGV. Brasília. 2002.

HERRERA, W. **Determinación de parámetros que influyen en el bombeo fotovoltaico, en dos sistemas de riego: directo a baja presión y con tanque elevado**. Lima, 2006. 146 p. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) Universidad Nacional La Molina. Lima. 2006.

IBGE. **Censos Agropecuário 2006. Resultados preliminares**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007.

IEA. **World energy outlook 2002**. International Energy Agency. Paris, p. 370-375. 2002.

IEA. **Key world energy statistics 2010**. International Energy Agency. Paris, p. 24. 2010 a

IEA. **World energy outlook 2010**. International Energy Agency. Paris, p. 130-133. 2010 b.

KAPADIA, K. **Productive uses of renewable energy: a review of four Bank - GEF projects**. Banco Mundial. 2004.

KAUNMUANG, P. et al. Assessment of photovoltaic pumping systems in Thailand—one decade experience. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 67, n. 1-4, p. 529-534, 2001.

KAUTTO, N.; JÄGER-WALDAU, A. **Renewable Energy Snapshots 2009**. European Commission, Euro-Report EUR 23819 EN. 2009. ISBN 978-92-79-12397-9.

KENDALL, H. W.; PIMENTEL, D. Constraints on the Expansion of the Global Food Supply. *Ambio*, v. 23, n. 3, p. 198-216, Maio 1994.

KONER, P.K. A review on the diversity of photovoltaic water pumping systems. **RERIC International Energy Journal**, v 15, n 2, p. 89–110. 1993

LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for Crop Production: design, operation, and management**. 1. ed. Elsevier Science. 2007.

LOSADA-VILLASANTE, A. **Riegos – Fundamentos hidrológicos, métodos de aplicación**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos - Universidad Politécnica de Madrid. Madri. 1992. ISBN 84.600-7900-7.

MATLIN, R. W. **Design Optimisation and Performance Characteristics of a Photovoltaic Micro-Irrigation System for use in Developing Countries**. MIT Lincoln Laboratory. Lexington, USA. 1997.

MEADOWS, K. et al. **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.

MÜLLER, H. P. **Theoretisch-experimentelle Untersuchungen zum Einsatz Von photovoltaisch betriebenen Pumpsystemen zur Feldbewässerung**. Universität Siegen. Alemanha. 1992.

MÜLLER, C. **Aprovechamiento de la energía solar para el mejoramiento de las condiciones de vida en el altiplano argentino**, 2004. Disponível em: < <http://www.hs-solar.de/Argentina%202003.pdf>>. Acesso em: Dezembro 2010.

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.

OLIVEIRA, R. et al. **Irrigação em pequenas e medias propriedades**. 1. ed. Centro de Produções Técnicas. Viscoça. 2007.

PEREIRA, E. B., et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE. 2006.

PEREIRA, L. S.; TROUT, T. J. Irrigation methods. In: VAN LIER, H. N.; PEREIRA, L. S.; STEINER, F. R. **CIGR Handbook of Agricultural Engineering**, vol. I: Land and Water. St. Joseph, Michigan: ASAE, v. I, p. 297-379, 1999.

PHOTON INTERNATIONAL. Cell production survey 2010. **Photon International**, n. 3, Março 2011.

PIMENTEL, D. et al. **Water Resources, Agriculture, and the Environment**. New York State College of Agriculture. Nova Iorque. 2004.

PIRES, R. C. M. et al. Agricultura irrigada. **Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, p. 98-111, 2008.

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

REDDY, K. Y.; SATYANARAYANA, T. V. Solar Powered Micro-irrigation for Sandy Tracts of Coastal Andhra Pradesh. **The Institution of Engineers(India) Journal-AG**, n. 89, p. 28-34, Dezembro 2008.

REN21. **Renewables 2010 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Paris, p. 19-20. 2010.

REN21. **Renewables 2011 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Paris, 2011.

ROCHIN, J.; ELLIS, A.; STRACHAN, J. **Solar system for use in agriculture with a case study: livestock and drip irrigation**. 3 International Symposium of Fertilization & Irrigation.. Guanajuato. p. 1-8, 1998.

SANTOS, E. C. et al. Energia solar na fruticultura irrigada familiar. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 1, n. 2, p. 1-7, 2007.

SANTOS, F. J. et al. **Irrigação localizada: microirrigação**. EMBRAPA-CNPAT/SEBRAE/CE. Fortaleza, CE, p. 48. 1997.

SANTOS, N. M.. Energia solar para irrigação no semi-árido baiano: o caso da Associação dos produtores e Horticultores do Açude do Rio do Peixe, Capim Grosso (BA). **Bahia Análise & Dados**, Bahia, v. 16, n. 1, p. 37-50, junho 2006.

SCHMIDT, R. et al. Riego tecnificado a muy baja presión por medio de bombas fotovoltaicas y estanques de acumulación. **Información Tecnológica**, v. 11, n. 6, p. 11-18, 2000.

SCHMIDT, R. et al. Desarrollo y experiencias de sistemas de bombeo fotovoltaico para aplicaciones de riego tecnificado en la agricultura, Data indefinida.

SHARMA, V. et al. Photovoltaic water pumping system: Part I—Principal characteristics of different components. **RERIC International Energy Journal**, v. 17, n. 2, p. 93–119, 1995.

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century**. Cambridge University Press Cambridge, 2003. ISBN 0521820855.

SHRESTHA, R. et al. **Application of Productive Uses of Renewable Energy for Small, Medium and Micro Enterprises**. School of Environment, Resources and Development - Asian Institute of Technology. Klong Luang, p. 6-8, 2005.

SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA. Água potável via energia solar. **Ciência hoje**, v. 19, n. 110, 1995

SUREK, T. Crystal growth and materials research in photovoltaics: progress and. **Journal of Crystal Growth**, v. 275, n. 1-2, p. 292-304, 2005.

TANAKA, N. **Technology Roadmap: Solar photovoltaic Energy**. International Energy Agency. Paris, p. 8. 2010.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Editora Universitária da UFPE. Recife. 2000.

UN-ENERGY. The Energy Challenge for Achieving the Millennium Development. UN-Energy. , p. 6. 2005.

UNEP/GRID-ARENDAL. Unsustainable water withdrawals for irrigation, 2005. Disponível em: <<http://maps.grida.no/go/graphic/unsustainable-water-withdrawals-for-irrigation>>. Acesso em: Dezembro 2010.

UNESCO. **Water for People - Water for Life, The United Nations World Water Development Report**. UNESCO. Paris, p. 19. 2003.

UNITED STATES GEOGRAPHICAL SURVEY. Map of the distribution of non-polar arid land, 1997. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/gip/deserts/what/world.html>>. Acesso em: Dezembro 2010.

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

VAN KOPPEN, B.; NAMARA, R. E.; SAFILIOS-ROTHSCHILD, C. **Reducing poverty through investments in Agricultural Water Management: Poverty and Gender Issues and Synthesis of Sub-Saharan Africa Case Study Reports**. International Water Management Institute. Colombo, p. 3-6. 2005.

VILELA, O.; FRAINDENRAICH, N.; TIBA, C. Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. Experiments and simulation. **Solar Energy**, v. 74, n. 1, p. 45-52, 2003. ISSN 0038-092.

WEC. **Survey of Energy Resources**. World Energy Council. Londres, p. 408. 2010. ISBN: 978 0 946121 021.

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

WENHAM, S. R. et al. **Applied Photovoltaics**. 2. ed.p. 215-248. Earthscan, 2007. ISBN 1844074013.

WHITE, R. **GEF/FAO Workshop on Productive Uses of Renewable Energy: Experience, Strategies, and Project Development**. GEF e FAO. Roma, p. 33. 2002.

## ANEXO A - QUESTIONÁRIO DE PESQUISA SOBRE PROJETOS DE IRRIGAÇÃO FOTOVOLTAICA

Nome do Projeto:	
Objetivos:	
Tipo (demonstrativo, pesquisa ou comercial):	
Estado do projeto (planejamento, monitoramento, finalizado):	
Ano de Início:	Ano de Finalização:

Localização geográfica:	
Nome da comunidade/ aldeia / município:	
Região/Departamento/ Estado:	
Pais:	
Nome da entidade participante:	Forma de participação:

Sistema de financiamento (pagamento à vista ou crédito pelos beneficiários, fundo perdido, empréstimo dos equipamentos):	
Os usuários pagam algum valor pelo custo do sistema, reposição ou consumo de água? Se afirmativo, quanto?	
As capacitações incluíram alguns dos seguintes aspectos? (Se possuir algum dos elementos mencionados, marcar com um X no quadro correspondente.)	
Operação dos equipamentos	Técnicas agrícolas
Manutenção dos equipamentos	Comercialização
Gestão de empresas	Outros
A forma de organização anterior ao projeto foi mantida? Qual foi o tipo de organização adotado para a administração do sistema? Em que consiste essa organização?	
Existe um sistema de monitoramento do projeto? Em que consiste esse sistema?	

Existiu participação dos beneficiários...	Sim?	Qual?
...na concepção do projeto?		
...na elaboração do projeto?		
... na implementação do projeto?		
...na finalização do projeto?		

Características do gerador fotovoltaico (potência, número de módulos, número de módulos em série e em paralelo, marca e modelo):					
Existe algum sistema de seguimento, concentração ou de geração auxiliar (híbrido)? (Características)					
Existe algum sistema de condicionamento de potência (controlador, conversor CC-CC, inversor, conversor de frequência, etc.? (Características: potência, marca e modelo)					
Existe algum sistema de armazenamento (reservatório ou baterias)? (Características: capacidade, marca e modelo):					
Características do conjunto motobomba (potência, marca e modelo):					
Quantidade de água bombeada (l/dia, m <sup>3</sup> /dia)		Altura manométrica total (m)		Área irrigada (m <sup>2</sup> , ha)	
Existiu (o existe) resistência por partes dos usuários para a utilização de sistemas fotovoltaicos? De que forma é demonstrada?					
Tipo de sistema de irrigação (localizado, superficial, aspersão)					
Tipo de agricultura (Agricultura de subsistência ou de mercado):					
Com quais culturas obtiveram os melhores resultados? Por quê?					
A atividade agrícola é a atividade econômica mais importante do lugar?					
Existiu (ou existe) resistência por partes dos usuários para a utilização do sistema de irrigação? De que forma é demonstrada?					

Existem incentivos para a aquisição do sistema fotovoltaico (como redução de impostos, subsídios, etc.)?			
O desempenho e a qualidade dos equipamentos foram avaliados antes de eles serem instalados? Foi utilizado alguma norma, procedimento ou regulamento técnico para essa avaliação? Quais?			
Quem é o responsável pela operação do sistema?			
Quem é o responsável pela manutenção do sistema?			
Se o sistema apresentou falhas, quais foram e como foram concertadas? Por quanto tempo o sistema permaneceu paralisado?			
Como se efetua (ou está previsto efetuar) a reposição de equipamentos? Existem distribuidores dos equipamentos na região?			
Existem as seguintes condições para o desenvolvimento favorável da atividade agrícola? ( <i>Se o sistema possuir alguns dos elementos mencionados, marcar com um X, no quadro correspondente.</i> )			
Acesso à créditos para a compra de matéria-prima e de capital de trabalho.	<input type="checkbox"/>	Mercados com demanda suficiente	<input type="checkbox"/>
Facilidade para a compra de equipamentos, ferramentas e maquinarias.	<input type="checkbox"/>	Estabilidade econômica da região	<input type="checkbox"/>
Disponibilidade de recursos humanos qualificados	<input type="checkbox"/>	Infraestrutura para o transporte e comercialização dos produtos (meios de transporte, rodovias) e Segurança local (polícia) contra roubos	<input type="checkbox"/>

Existiu algum impacto positivo na atividade agrícola proporcionado pelo projeto (aumento da produtividade/rendimento das colheitas, aumento da área de cultivo, aumento do numero de safras anuais, possibilidade de cultivar novas culturas, melhora da qualidade do produto, melhor uso dos recursos naturais, redução do trabalho pesado, etc.)? Explique.
---

Se o projeto substituiu outro sistema, como foram atingidos os benefícios econômicos do projeto (diminuição do custo de energia, água ou produção, incremento do preço de venda do produto, venda de produtos com melhor valor no mercado, etc.)? Esses benefícios podem ser quantificados?

Existe algum impacto positivo do projeto na qualidade de vida dos beneficiários. (saúde, educação, igualdade de gênero, eletrificação domiciliar, água e saneamento, conservação do meio ambiente, diminuição da migração rural, segurança alimentar, etc.)? Explique

Existe algum impacto negativo do projeto? Explique

Quais barreiras técnicas, financeiras, ambientais, legais ou sociais havia durante a implementação do projeto? Como elas foram superadas?

Quais dos resultados esperados foram obtidos com o projeto? Quais fatores foram chaves para a obtenção desses resultados? (participação dos beneficiários, sistema de capacitação, confiabilidade dos equipamentos, sistema de organização, sistema de monitoramento, sistema de manutenção, etc.)

Se o resultado não tiver sido satisfatório, dizer por qual razão tais resultados não foram obtidos?

Lições aprendidas e comentários finais

## **ANEXO B – DIMENSIONAMENTO SIMPLIFICADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE IRRIGAÇÃO**

Existem diversas metodologias para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico de irrigação (FRAIDENRAICH; COSTA, 1988, CUADROS et al., 2004 e GLASNOVIC; MARGETA, 2007), cada uma com maior complexidade e precisão. O método apresentado é uma versão simplificada, que é útil para estimativas prévias da potência do gerador:

### **B.1 Cálculo da demanda hídrica**

Para que uma planta se desenvolva adequadamente deve recuperar a quantidade de água perdida através do processo de evapotranspiração. Essa demanda hídrica da cultura depende principalmente do clima (temperatura, radiação solar, umidade e velocidade do vento), o tipo de cultura e o estágio de desenvolvimento da cultura.

A evapotranspiração de uma cultura ( $ET_c$ ) é obtida com a equação 1 e geralmente é expressa em unidades de mm/unidade de tempo.

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (1)$$

A influência do clima na demanda hídrica é determinada com o valor da evapotranspiração de referência. Quanto mais quente, mais seco, mais ensolarado e ventoso é o clima, maior será a demanda hídrica da cultura. O valor de Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) representa a evaporação potencial máxima de um cultivo de referência (grama) que se desenvolve em ótimas condições e sem limitações de água.

Existem vários métodos para determinar esse parâmetro; os experimentais como a evaporação do tanque classe “A” e os computacionais. Nessa última categoria, a FAO recomenda o uso do método de Penman-Monteith que determina o valor de  $ET_0$  em base de dados de temperatura, umidade, radiação solar e velocidade de vento. Programas computacionais como CROPWAT e SEVAP foram desenvolvidos para esse fim e são de uso gratuito.

Os valores médios de  $ET_0$  são apresentados na tabela B1.

Tabela B1 - ETo médio para varias regiões agroclimáticas em mm/dia

Região	Temperatura média diária (°C)		
	Frio (~ 10°C)	Moderado (20°C)	Quente (>30°C)
Trópicos e subtropicais			
- Úmido e semiúmido	2 – 3	3 – 5	5 – 7
- Árido e semiárido	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Clima temperado			
- Úmido e semiúmido	1 – 2	2 – 4	4 – 7
- Árido e semiárido	1 – 3	4 – 7	6 – 9

Fonte: ALLEN et al. 1998

O valor do coeficiente de cultura (Kc) varia segundo o clima e as características da cultura e seu estágio de desenvolvimento. Geralmente é estimado a partir da relação 1 para cada estágio de desenvolvimento da cultura. A tabela B2 apresenta alguns valores.

Tabela B2 - Valores médios do Coeficiente de cultura para diversas plantas

Cultura	Fase fonológica da cultura			
	Inicial	Crescimento vegetativo	Intermediário	Final
Alface/ Espinafre	0,45	0,60	1,00	0,90
Batata	0,45	0,75	1,15	0,85
Beterraba	0,45	0,80	1,15	0,80
Cebola	0,50	0,75	1,05	0,85
Cebolinha verde	0,50	0,70	1,00	1,00
Cenoura	0,45	0,75	1,05	0,90
Ervilha	0,45	0,80	1,15	1,05
Feijão (verde)	0,35	0,70	1,10	0,90
Feijão (maduro)	0,35	0,70	1,10	0,30
Lentilha	0,45	0,75	1,10	0,50
Melão	0,45	0,75	1,00	0,75
Milho doce	0,40	0,80	1,15	1,00
Milho	0,40	0,80	1,15	0,70
Pimentão	0,35	0,70	1,05	0,70
Rabanete	0,45	0,60	0,90	0,90
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,80

Fonte: DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H, 1979

Adicionalmente existem outros fatores de correção que servem para estimar com maior precisão o valor do ETc fora das condições ótimas.

A tabela B3 mostra valores indicativos de evapotranspiração de algumas culturas:

Tabela B3 - Valores indicativos de necessidade hídricas de algumas culturas

Cultura	Período de crescimento (dias)	Necessidade hídrica (mm/ período de crescimento)	Sensibilidade a seca
Alfafa	100-365	800-1600	Baixa – intermediaria
Banana	300-365	1200-2200	Alta
Batata	100-145	500-7005	Alta
Beterraba	160-230	550-750	Baixa – intermediaria
Cebola	150-210	350-550	Intermediaria – alta
Cítricos	240-365	900-1200	Baixa – intermediaria
Ervilha	90-100	350-500	Intermediaria – alta
Feijão	75-110	300-500	Intermediaria – alta
Melão	120-160	400-600	Intermediaria – alta
Milho	125-180	500-800	Intermediaria – alta
Pimentão	120-210	600-900	Intermediaria – alta
Repolho	120-140	350-500	Intermediaria – alta
Tomate	135-180	400-800	Intermediaria – alta

Fonte: DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H, 1979

O valor da necessidade de irrigação líquida (NLI), é obtido como a diferença entre a precipitação efetiva ( $P_e$ ) e o valor de Evapotranspiração de referência ( $ET_C$ ) (equação 2).

$$NLI = ET_C - P_e \quad (2)$$

Segundo Pozzebon et al (2003), a precipitação efetiva é a parcela de precipitação que se transforma em escoamento superficial e depende da intensidade da chuva, declividade do terreno, tipo, textura, estrutura e umidade do solo, sistema de cultivo e características da cultura.

O consumo médio mensal em  $m^3/mês$  é obtido através da equação 3:

$$V_C = \frac{10 \cdot NIL \cdot A}{E_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde  $A$  é área irrigada em hectares,  $NIL$  a necessidade de irrigação líquida em  $mm/mês$ , e  $E_i$  é a eficiência de irrigação. Segundo Pozzebon et al (2003) eficiência de microaspersão varia entre 75 – 90%, gotejamento entre 85-90% e de tubos perfurados 65-80%.

## B.2 Calculo da energia hidráulica diária

A energia hidráulica necessária diária ( $E_H$ ) é calculada com a equação (4)

$$E_H = Q_d \cdot AMT \cdot \frac{\rho \cdot g}{3600} = 2,725 \cdot Q_d \cdot AMT \quad (4)$$

Onde  $Q_d$ : volume diário projetado ( $m^3$ /dia);  $AMT$  é altura manométrica total (m),  $\rho$  é a densidade de água ( $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$  a  $0^\circ\text{C}$  e 1 bar) e  $g$ , a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

O volume diário é obtido com a equação (3). Para calcular a altura manométrica é necessário fazer uma serie de cálculos que podem ser vistos em Fedrizzi (1997).

## B.3. Calculo da potência do gerador

A energia requerida diariamente pelo sistema fotovoltaico ( $L$ ) pode ser calculada com a equação 5:

$$L = \frac{E_H}{\eta_b} \quad (5)$$

Onde  $E_H$  é a energia hidráulica diária (Wh/dia) e  $\eta_b$  é a eficiência da motobomba

Finalmente, a potência do gerador é calculada através da equação:

$$P = 1,25 \times \frac{L}{(HSP)_\beta} \quad (6)$$

Onde Hora solar pico (HSP) é o numero de horas de sol em média diário a uma intensidade de  $1000 \text{ W/m}^2$  ou  $3,6 \text{ MJ/m}^2$

O valor encontrado com a equação 6 deve ajustado de maneira que o gerador possa fornecer a tensão e corrente de trabalho da motobombas escolhida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G., et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Roma, 1998.

CUADROS, F. et al. A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes **Solar Energy**. v.76, n.4, p. 465-473, 2004.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO. Roma. 1979.

FRAIDENRAICH, N.; COSTA, H. Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system. **Solar Wind Technology**. v.5, n.2, p. 121-126, 1988.

GLASNOVIC, Z.; MARGETA, J. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems **Solar Energy**. v.81, n.7, p. 904-916, 2007.

POZZEBON, E.J. et al. Demanda Hídrica para agricultura irrigada e sua influência nas análises de pedidos de outorga de direito de uso de água. In: **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Curitiba 2003.

## **ANEXO C – TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO**

VALER, L.R. et al. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento para uso na agricultura. In: **8º Congresso Internacional sobre Gerção Distribuída e Energia no Meio Rural AGRENER, 2010**, Campinas, 2010.

Valer, L.R.; ZILLES, R.. Utilización de la energía fotovoltaica en pequeñas actividades productivas en zonas rurales. In: **IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES\_CLA)**, Cusco, 2010.