

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES**

TESE DE DOUTORADO

**ANÁLISE DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO
NORDESTE, UTILIZANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR
GERADORES FOTOVOLTAICOS COM CONCENTRADORES TIPO V**

JOSÉ BIONE DE MELO FILHO

**RECIFE
2006**

JOSÉ BIONE DE MELO FILHO

***ANÁLISE DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO
NORDESTE, UTILIZANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR
GERADORES FOTOVOLTAICOS COM CONCENTRADORES TIPO V***

Tese submetida ao programa de pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

ORIENTADOR: PROF. DR. NAUM FRAIDENRAICH

CO-ORIENTADORA: PROF. DRA. OLGA DE CASTRO VILELA

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL

AGOSTO – 2006

M528a Melo Filho, José Bione de

Análise do sistema de irrigação na Região Semi-Árida do Nordeste, utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentrado tipo V / José Bione Melo Filho. - Recife: O Autor, 2006.

xxi, 167 f. : il. (algumas color.), gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Dpto. de Energia Nuclear. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2006.

Inclui referências bibliográficas.

1. Energia Nuclear. 2. Sistema fotovoltaico. 3. Irrigação – Bombeamento fotovoltaico – Semi-Árido Nordeste. 4. Energia solar fotovoltaica. I. Título.

**ANÁLISE DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA
DO NORDESTE, UTILIZANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA
ACIONADO POR GERADORES FOTOVOLTAICOS COM
CONCENTRADORES TIPO V**

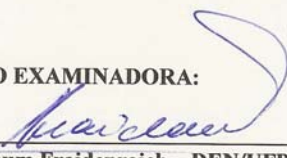
José Bione de Melo Filho

APROVADO EM: 04.08.2006

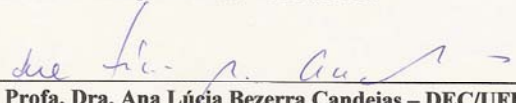
ORIENTADOR: Prof. Dr. Naum Fraidenraich

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela

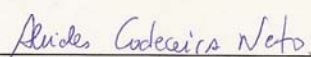
COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Naum Fraidenraich – DEN/UFPE


Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE


Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias – DEC/UFPE


Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho – DEQ/UFPE


Prof. Dr. Alcides Codeceira Neto – DEE/UPE

Visto e permitida a impressão


Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

A minha esposa Silvana Buarque de Melo, e aos meus
filhos José Bione de Melo Neto e Júlia Maria Buarque
Bione de Melo, eles queridos de afeição,
encorajamento e compreensão.

Dedico.

Aos meus pais, José Bione de Melo e Maria Louzene
Cavalcante de Melo (in memorian), Zélia Meira Bione,
exemplos de dignidade e perseverança.

Minha homenagem e
minha gratidão.

A minha irmã Silvana Cavalcante e a meu tio Edvaldo
Bione de Melo (in memorian), pela ajuda, incentivo e
apoio por esses anos de trabalho.

Dedicação Especial.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, em especial ao Departamento de Energia Nuclear pela oportunidade.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – Chesf, em especial a Divisão de Fontes Alternativas de Geração – DEFA, pela aceitação da flexibilização de nossa jornada de trabalho.

Ao Prof. Naum Fraidenraich, pela orientação, o estímulo e a amizade.

A Prof^a. Olga de Castro Vilela, pelo apoio, confiança e amizade.

Aos professores Chigeru Tiba, Rômulo e Mauricio pelas valiosas sugestões.

À professora Elielza Moura pela oportunidade de conhecer a importância dos trabalhos desenvolvidos pelo grupo FAE (Fontes Alternativas de Energia), para o desenvolvimento de localidades do Semi-Árido Nordeste (projeto Xingó).

Aos colegas Bráulio, Adalberto, Rinaldo, Milton, Sílvia, Gilmário, Carlos e Tito pelas valiosas sugestões, atenção e amizade.

Aos integrantes do Grupo FAE (Marcelo, Erick, Djanira e Àguiar) pelo estímulo e amizade.

A todos os amigos do DEN pela atenção e convivência agradável durante a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xvi
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Justificativa e objetivos da tese	3
Objetivos da tese.....	5
1.3 Descrição da tese.....	6
1.4 Desenvolvimento do trabalho	8
1.4.1 Descrição do sistema físico.....	8
Gerador fotovoltaico.....	9
Sistema de bombeamento.....	9
Sistema de irrigação	10
Principais vantagens da irrigação localizada.....	14
Principais desvantagens da irrigação localizada.....	15
1.4.2 Armazenamento de água.....	16
1.4.3 Captação de água.....	16
1.4.4 Escolha da cultura.....	17
1.5 Revisão bibliográfica.....	19

1.5.1	Sistemas fotovoltaicos combinados com concentradores tipo V.....	19
1.5.2	Características óticas das cavidades tipo V.....	20
1.5.3	Agricultura irrigada no Nordeste.....	21
1.5.4	Antecedentes relativos à tecnologia fotovoltaica aplicada na irrigação.....	22
1.5.5	Recurso hídrico.....	24
1.5.6	Eletrificação rural no Brasil.....	25
1.5.7	Agricultura familiar.....	26
	A agricultura familiar no Brasil.....	28
	A agricultura familiar no Nordeste.....	31
2	POTENCIAL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO PARA IRRIGAÇÃO DA CULTURA DE UVA	32
2.1	Introdução.....	32
2.2	Região Nordeste do Brasil.....	34
2.2.1	Característica política.....	34
2.2.2	Região semi-árida no Nordeste do Brasil.....	35
2.3	Água no Nordeste.....	37
2.3.1	Água superficial no Nordeste.....	37
2.3.2	Água subterrânea no Nordeste.....	39
2.3.3	Qualidade das águas subterrâneas.....	42
2.4	Escolha da cultura.....	44
2.5	Irrigação no Nordeste.....	44
2.5.1	Potencial hídrico para irrigação.....	45

2.6	Escolha do sistema de irrigação.....	47
2.6.1	Sistemas de irrigação localizada por fitas gotejadoras.....	48
2.6.1.1	Descrição de um sistema de irrigação localizada por fita gotejadora.....	49
2.7	Tipos de solos para irrigação na região Nordeste	52
2.8	Conclusões.....	53
3	ANÁLISE DO CONCENTRADOR DE CAVIDADE TIPO V.....	54
3.1	Introdução.....	54
3.2	A concepção da cavidade do concentrador tipo V.....	55
3.3	Geometria das cavidades tipo V.....	56
3.4	Propriedades óticas da cavidade tipo V.....	57
3.5	Concentração efetiva.....	61
3.6	Resultados e conclusões da performance ótica da cavidade do tipo V.....	65
4	DESEMPENHO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA COM GERADORES FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS AO CONCENTRADOR TIPO V.....	68
4.1	Introdução.....	68
4.2	Descrição do sistema experimental.....	75
4.2.1	Gerador fotovoltaico com concentrador tipo V	75
4.2.2	Sistema de rastreamento	77
4.2.3	Quadro de comando com inversor de frequência.....	78
4.2.4	Conjunto motobomba.....	79
4.2.5	Bancada de teste para simulação da carga hidráulica.....	79

4.2.6	Instrumentação.....	81
4.2.7	Aquisição de dados.....	84
4.3	Metodologia experimental.....	85
4.3.1	Representação do comportamento do sistema para os três modos operacionais.....	87
4.4	Resultados experimentais e discussão.....	89
4.4.1	Sistema com concentração.....	89
4.4.2	Relação de benefício para sistemas com concentração.....	91
4.4.3	Comportamento do volume de água bombeado a longo prazo.....	92
4.4.4	Comparação do custo do volume de água bombeado pelos sistemas fixo, rastreamento e com concentrador.....	94
4.5	Conclusões	96
5	SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DA CULTURA DE UVA USANDO UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM CONCENTRADOR V.....	98
5.1	Introdução.....	98
5.2	Balanço hídrico.....	99
5.2.1	Consumo mensal de água da cultura.....	101
	Evapotranspiração da cultura e coeficiente de cultura.....	102
	Evapotranspiração potencial.....	104
	Fator de cobertura.....	107
5.2.2	Volume de água bombeado pelo sistema fotovoltaico com concentrador V.....	108

5.2.3	Água armazenada no solo.....	113
5.3	Metodologia usada para o balanço hídrico.....	115
5.4	Superfície máxima irrigada.....	118
5.5	Conclusões.....	122
6	PROPOSTA DE UM PROJETO DE IRRIGAÇÃO PARA A CULTURA DA UVA COM CAPTAÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM CONCENTRADOR V.....	123
6.1	Introdução.....	123
6.2	Critérios de projeto.....	125
6.2.1	Roteiro para projeto de irrigação atendido por sistema de bombeamento fotovoltaico.....	125
6.3	Exemplo de um projeto de irrigação por gotejamento para a cultura da uva, atendido por um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador V.....	127
6.3.1	Caracterização da propriedade.....	127
	Estudo do solo.....	127
	Recursos hídricos.....	128
	Clima.....	128
	Cultura.....	128
6.3.2	Planejamento agrônomo da irrigação.....	129
	Plano de exploração, produção e comercialização.....	129
	Necessidade de água na irrigação para o período de um mês.....	131
	Parâmetros para manejo de irrigação diária.....	133

Dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V.....	136
6.3.3 Dimensionamento do sistema de irrigação.....	139
6.4 Análise econômica.....	141
6.4.1 Roteiro para elaboração do fluxo financeiro de um empreendimento...	142
6.5 Conclusões da avaliação econômica do cultivo de uva pelo método do valor atual.....	151
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	154
7.1 Conclusões.....	154
7.2 Trabalhos futuros.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158
I Trabalhos elaborados durante a elaboração desta Tese.....	165
II Projeto elaborado e aprovado durante a elaboração desta Tese.....	167

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Configuração do sistema de irrigação com bombeamento acionado por gerador fotovoltaico com rastreamento solar e concentradores tipo V....	8
Figura 2 - (a) Sistema de irrigação por gotejamento (b) Sistema por aspersão.....	12
Figura 3 - Cabeçal de controle de um sistema de irrigação instalado em Taiobeiras-MG.....	13
Figura 4 - Mapa político da Região Nordeste.....	34
Figura 5 - Mapa da região semi-árida do Nordeste.....	36
Figura 6 - Distribuição das Bacias Sedimentares e Cristalinas no Nordeste do Brasil.....	41
Figura 7 - Distribuição das Bacias Sedimentares em Pernambuco.....	46
Figura 8 - Seção transversal do concentrador de cavidade V.....	57
Figura 9 - Geometria do concentrador tipo V.....	58
Figura 10 - Função de aceitação angular da cavidade tipo V com $C=2,2$ e $\Psi=30^\circ$	59
Figura 11 - Posicionamento dos radiômetros na abertura da cavidade.....	62
Figura 12 - Valores teóricos e experimentais da concentração efetiva da cavidade tipo V versus (I_{dA}/I_A)	66
Figura 13 - Curva característica de um sistema de bombeamento fotovoltaico.....	69
Figura 14 - Radiação solar coletada no plano do rastreador, radiação solar coletada em um plano fixo inclinado de (-20°) e radiação solar difusa.....	71
Figura 15- Radiação solar coletada no plano do concentrador, no plano do	

rastreador, radiação solar coletada em um plano fixo inclinado de (-20°) e radiação solar difusa.....	72
Figura 16 - Comparativo entre energia útil e água bombeada.....	73
Figura 17 - Esquema do Sistema de Bombeamento Fotovoltaico: (a) Vista do concentrador fotovoltaico, (b) Sistema condicionador de potência, (c) Foto da bomba submersa, e (d) Simulador da carga hidráulica.....	74
Figura 18 - Vista geral do concentrador fotovoltaico tipo V.....	76
Figura 19 - (a) Motor CC e o braço mecânico do tipo telescópico, (b) Sensor Fotodiodo (LDR).....	77
Figura 20 - Inversor de frequência instalado no quadro de comando.....	78
Figura 21 - Conjunto motobomba.....	79
Figura 22 - Bancada de Teste para simulação de coluna d'água.....	80
Figura 23 - Sensor de vazão da marca Krohne Conaut.....	80
Figura 24 - Posicionamento dos sensores na cavidade do concentrador V.....	81
Figura 25 - Radiação coletada no plano de 20°	82
Figura 26 - Piranômetro de marca Eppley para medição da radiação total.....	82
Figura 27 - Piranômetro de marca Eppley e banda de sombra para medição da radiação difusa.....	83
Figura 28 - Sensor fotovoltaico para medição da radiação difusa na abertura da cavidade tipo V.....	83
Figura 29 - Dispositivo de aquisição do sinal de corrente (Shunt).....	84
Figura 30 - Datalogger.....	85
Figura 31 - Curva característica de um sistema de bombeamento fotovoltaico com	

concentrador tipo V para uma altura de recalque de 32 m.....	87
Figura 32 - Volume de água diário bombeado pelo sistema com cavidades tipo V em função da energia solar coletada.....	89
Figura 33 - Volume de água diário bombeado pelo sistema com cavidades tipo V, rastreamento e fixo em função da energia solar coletada no plano fixo...	90
Figura 34 - Balanço hídrico de uma cultura irrigada (S=sim e N=não).....	116
Figura 35 - Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 2,11 ha, usando um sistema PVP com concentrador V como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $FC=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$	120
Figura 36 - Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 2,11 ha, usando um sistema fixo FV como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $FC=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$	120
Figura 37 - Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 1,20 ha, usando um sistema fixo FV como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $FC=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$	121
Figura 38 - Comparação de um hectare de uva irrigado com bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V por área plantada.....	141
Figura 39 - Local escolhido para instalação do sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação da cultura da uva (Pão de Açúcar – AL).....	167

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – O número de propriedades sem eletrificação.....	26
Tabela 2 – Comparação dos modelos patronal e familiar de agricultura.....	27
Tabela 3 – Brasil – Número de Estabelecimentos, Área, Valor Bruto da Produção (VBP) e Financiamento Total (FT), segundo as Categorias de Agricultura.....	28
Tabela 4 – Brasil – Agricultura Familiar – Participação nos Estabelecimentos, na Área e Área Média, segundo os Grupos de Área Total (em ha).....	29
Tabela 5 – Percentual do Valor Bruto da Produção de Produtos Seleccionados Produzidos nos Estabelecimentos Familiares.....	29
Tabela 6 – Percentual da Participação de Produtos Seleccionados no Valor Bruto da Produção Total da Agricultura Familiar.....	30
Tabela 7 – Agricultura Familiar – Participação Percentual das Regiões no Número de Estabelecimentos, Área, Valor Bruto da Produção e Financiamento Total destinado aos Agricultores Familiares.....	31
Tabela 8 – Área e população dos estados do Nordeste.....	35
Tabela 9 – Dados da região no Semi-Árido.....	37
Tabela 10 – Características das Bacias no Nordeste do Brasil.....	40
Tabela 11 – Distribuição de poços pela qualidade da água na região semi-árida.....	43

Tabela 12 – Evolução da superfície irrigada no Brasil e no Nordeste (1950-2001).....	45
Tabela 13 – Características das Bacias Sedimentares do Estado de Pernambuco.....	47
Tabela 14 – Características do concentrador com cavidade do tipo V.....	75
Tabela 15 – Resultados experimentais da relação de benefício para a energia solar coletada (BR_H) e o volume de água bombeada (BR_V), entre as configurações do rastreador e concentrador tipo V comparadas com o sistema fixo.....	92
Tabela 16 – Resultados de longo prazo da relação de benefício para a energia solar coletada (RB_H) e o volume de água bombeada (RB_V), entre as configurações do rastreador e concentrador tipo V comparadas com o sistema fixo.....	93
Tabela 17 – Custo anual do m^3 de água bombeada por sistemas fixo, com rastreamento (R) e com concentração (CC) para uma altura manométrica de 32 m.....	96
Tabela 18 – Características da cultura da uva (valores médios).....	108
Tabela 19 – Parâmetros hídricos para vários solos.....	114
Tabela 20 – Características da cultura.....	129
Tabela 21 – Plano de exploração da cultura de uva.....	129
Tabela 22 – Épocas de colheita de uvas nas diferentes regiões do Brasil.....	130
Tabela 23 – Plano de produção e comercialização.....	131
Tabela 24 – Demanda de água mensal para cultura da uva em 1 ha.....	132

Tabela 25 –	Parâmetros para manejo de irrigação – cultura: uva – 2,00 ha.....	135
Tabela 26 –	Parâmetros do sistema de geração fotovoltaico.....	138
Tabela 27 -	Informações técnicas do projeto.....	140
Tabela 28 –	Programa de vendas (receita) para uma área de 2 ha.....	143
Tabela 29 –	Custos operacionais para uma área de 2 ha.....	145
Tabela 30 –	Investimento fixo para uma área de 2 ha.....	147
Tabela 31 –	Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva com semente em região sedimentar para uma área de 2 ha (US\$).....	149
Tabela 32 –	Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva com semente em região cristalina para uma área de 2 ha (US\$).....	149
Tabela 33 –	Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva sem semente em região sedimentar para uma área de 2 ha (US\$).....	150
Tabela 34 –	Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva sem semente em região cristalina para uma área de 2 ha (US\$).....	150
Tabela 35 -	Comparação entre os projetos.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

FV	Fotovoltaico
BFV	Bombeamento fotovoltaico
FAE	Fontes Alternativas de Energia
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
BIRD	Banco Internacional para a Reconstrução e o Desenvolvimento
MME	Ministério de Minas e Energia
PNU	Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
MDA	Ministério do Desenvolvimento Agrário
Pronaf	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
CPRM	Companhia de Recursos Minerais
PVC	Poli Cloreto de Vinila
C	Relação de concentração
Ψ	Ângulo do vértice

K_t	Índice de transmitância atmosférica (claridade)
IP	Índice de proteção
CC	Sistema com concentração
R	Sistema com rastreamento
Fix	Sistema Fixo
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviço
IPi	Imposto sobre produtos industrializados
PIS	Programa de Integração Social

**ANÁLISE DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO
NORDESTE, UTILIZANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR
GERADORES FOTOVOLTAICOS COM CONCENTRADORES TIPO V**

José Bione de Melo Filho

RESUMO

Este trabalho analisa as possibilidades de implantação de culturas irrigadas no âmbito da agricultura familiar na região semi-árida do Nordeste do Brasil, em locais não supridos pelo serviço de energia elétrica. Analisa-se em particular o problema da água e da energia, mostrando que existem diversas alternativas para resolver o problema da água, basicamente através da exploração de reservas subterrâneas devidamente selecionadas. Experiências realizadas em pólos de desenvolvimento regional durante as últimas décadas mostram que o clima é perfeitamente propício para vários tipos de cultivo de alto valor agregado, uva entre eles. O balanço de água de um sistema de micro irrigação permite comprovar que é possível utilizar a tecnologia de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V para operar esses sistemas de forma tecnicamente viável, nos casos de empreendimentos de agricultura familiar. Ensaio realizado com sistemas fixos, com rastreamento e com concentradores tipo V mostram que para um mesmo arranjo fotovoltaico a superfície irrigada pelos três sistemas é igual a 1,2 ha, 1,6 ha e 2,11 ha, respectivamente. Uma análise econômica através do processo produtivo (Valor

Atualizado) mostra que os sistemas de irrigação para cultura de uva começam a dar retorno positivo a partir do terceiro ano. O estudo comprova, portanto, sua viabilidade, tanto do ponto de vista técnico como financeiro. A implantação desses sistemas poderá se traduzir em um aumento significativo no ingresso dos agricultores da região semi-árida.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Irrigação-bombeamento fotovoltaico, Energia solar fotovoltaica, Energia nuclear.

**ANÁLISE DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO
NORDESTE, UTILIZANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR
GERADORES FOTOVOLTAICOS COM CONCENTRADORES TIPO V**

José Bione de Melo Filho

ABSTRACT

This work analyzes the feasibility of establishing irrigated crops within family agriculture system in the semi-arid area of Northeastern Brazil and in places where electric power is not available. In particular, it analyzes the problem of water and energy, showing that there are several alternatives for solving the water problem, basically through the exploration of properly selected reservoirs. Studies carried out in centers of regional development during the last decades have shown that the climate is perfectly favorable for cultivating several types of fruits of high aggregated value, grape among them. The water balance of drip system irrigation proves that it is possible to use the technology of photovoltaic pumping with V-trough concentrator to operate these systems in a technically viable way, within family agriculture systems. A simulation carried out with fixed systems and the V-trough system showed that for the same photovoltaic arrangement the area that can be irrigated by these two systems is equal to 1.2 ha and 2.1 ha, respectively. An economical analysis of the productive system (Updated Value) shows that an irrigation system for grape begins to give positive

return starting from the third year. The study proves, therefore, its viability, both from the technical and the financial point of view. The implantation of these systems could bring a significant increase in the profitability of family farms in the semi-arid region of NE Brazil.

Keywords: Photovoltaic system; Photovoltaic irrigation-pumping; Photovoltaic solar energy; Nuclear energy.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Como resultado de um conjunto de condições favoráveis, como clima, solo, água, infra-estrutura, pesquisa tecnológica e recursos humanos, algumas áreas da região Semi-Árida Tropical vêm se consolidando como importante pólo de fruticultura irrigada. Um exemplo é o trecho sub-médio do rio São Francisco que, além destas condições, apresenta outros aspectos tais como o acesso ao crédito e condições adequadas de comercialização da colheita, fatores também essenciais para tornar as atividades agrícolas viáveis.

O desenvolvimento sustentável de uma região agrícola requer a seleção de sistemas de produção que atendam a condições ambientais diversificadas, e

conseqüentemente, a escolha de tecnologias apropriadas a esses ambientes, muitas vezes em regiões distantes da cidade e até mesmo longe da rede elétrica convencional. Devem, também, possuir características que propiciem critérios de estabilidade nas áreas ecológica, econômica e social da região.

A tecnologia fotovoltaica apresenta-se como opção viável para a satisfação desses critérios. Esta tecnologia é considerada limpa entre as energias renováveis, visto que, no processo de conversão de radiação em energia elétrica não dá origem a emissão de agentes poluentes. Adicionalmente, os sistemas fotovoltaicos que participam deste processo de conversão apresentam uma vida útil em torno de vinte e cinco anos e, se ligados diretamente à carga, sem nenhum sistema de armazenamento de energia (acumuladores), não somente proporcionam uma diminuição relativa de custo no processo de aquisição e instalação, como também na manutenção do conjunto. Além desses aspectos, deseja-se enfatizar que esta tecnologia apresenta a possibilidade de ser associada a sistemas produtivos em comunidades afastadas da rede elétrica, onde pode ser aplicada em propriedades rurais classificadas como agricultura familiar.

Uma forma habitual desta associação é constituída pelos sistemas de abastecimento de água, que além de atender a demanda do consumo humano e animal por parte das comunidades rurais, podem ser utilizados para irrigação de lavouras.

Ainda que limitada em sua difusão, por apresentar custos relativamente elevados, a utilização da energia fotovoltaica pode ser competitiva, quando aplicada em regiões

afastadas da rede de energia elétrica. Diversos caminhos estão sendo pesquisados visando a redução do custo da energia produzida, dentre os quais pode-se destacar o uso de rastreadores do movimento do sol e concentradores de radiação solar.

Este trabalho realiza um estudo da viabilidade técnica e econômica de sistemas de irrigação para uso na agricultura familiar, associados a sistemas de bombeamento de água acionados por geradores fotovoltaicos com concentração da radiação solar.

1.2 Justificativa e objetivos da tese

Poucos são os antecedentes mundiais relativos a culturas irrigadas com sistemas de bombeamento fotovoltaico. No deserto de Tarapacá, no Norte do Chile foram implantados, durante os anos 90, vários sistemas de irrigação com resultados altamente satisfatórios. Na década de 80 sistemas similares foram instalados, a título de demonstração, nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Pernambuco. Devido a prioridades de caráter social, e apesar do grande número de sistemas de bombeamento d'água instalados no Brasil, não se registram experiências com sistemas de irrigação mais recentes, daí o interesse na realização deste trabalho com o intuito de contribuir para a maior divulgação desta tecnologia e a viabilização em processos produtivos.

Do ponto de vista técnico as culturas irrigadas com sistemas de bombeamento fotovoltaico proporcionam uma vantagem que interessa mencionar. A demanda sazonal de

água apresenta um excelente casamento com relação à oferta do sistema de bombeamento. Ambas aumentam no período de verão e diminuem no período de inverno (FRAIDENRAICH e COSTA, 1988).

No que diz respeito ao uso de sistemas com concentração e rastreamento acionando sistemas de bombeamento fotovoltaico (BFV), constata-se que apesar de constituir configurações bastante complexas, tem capacidade para bombear água a menores custos por m³ de água que sistemas fotovoltaicos fixos, o que pode ser atraente para viabilizar lavouras de grande rentabilidade e valor agregado, como a fruticultura.

A aplicação de sistemas de BFV em cultivos desse tipo, no semi-árido nordestino, permitiria a realização dessa atividade produtiva em regiões sem acesso à rede elétrica convencional, com as vantagens de maior confiabilidade e facilidade de operação, quando comparados com os sistemas de bombeamento acionados por motores térmicos.

Do ponto de vista econômico, cabe prever que em sistemas produtivos complexos o insumo energético constitui uma pequena fração tanto dos custos de investimento como dos custos operacionais. Esta circunstância já se verifica em sistemas de menor complexidade como os sistemas de abastecimento de água e cabe supor que, em sistemas de irrigação constituídos por um número considerável de subsistemas, esta característica se acentue.

Objetivos da tese

O objetivo do presente trabalho consiste na avaliação do desempenho de um sistema de bombeamento acionado por um gerador fotovoltaico acoplado a um concentrador tipo V, utilizado para atender a demanda energética de sistemas de irrigação implantados em pequenas propriedades do Nordeste do Brasil. Para atingir o objetivo são propostas as seguintes metas:

- a) Determinar experimentalmente o desempenho de um sistema de bombeamento acionado por um gerador fotovoltaico acoplado a um concentrador tipo V;
- b) Simular o comportamento de um sistema de irrigação de pequeno e médio porte, utilizado na fruticultura, com sistemas de bombeamento fotovoltaico com concentração;
- c) Avaliar, técnica e economicamente, a aplicação de sistemas de bombeamento fotovoltaico com rastreamento e concentradores tipo V à irrigação de lavouras.

1.3 Descrição da tese

O trabalho de tese consta de sete capítulos. O Capítulo I apresenta a justificativa e os objetivos da tese, como também, uma descrição do sistema em estudo e uma revisão bibliográfica sobre os temas mais importantes que configuram o marco conceitual desta tese, além de quadro da região Semi-Árida Tropical do Nordeste Brasileiro, destacando o potencial dos sistemas de bombeamento fotovoltaico para contribuir na solução dos problemas expostos.

O Capítulo II retrata a potencialidade de água subterrânea no Semi-árido do Nordeste Brasileiro para irrigação de uva, ressaltando as formações geológicas: cristalina e sedimentar, mostrando suas características e a quantificação do recurso de água no Nordeste do Brasil, tendo como foco o estado de Pernambuco. Destaca-se ainda o potencial hídrico para irrigação, como também a definição de uma cultura que esteja adaptada às características da região Semi-árida.

O Capítulo III analisa o acoplamento do gerador fotovoltaico aos concentradores de cavidade tipo V, apresentando a concepção da cavidade do concentrador e suas propriedades óticas. Relaciona-se a concentração efetiva das cavidades com a fração da irradiação difusa coletada no plano de abertura.

A performance do sistema de bombeamento d'água com geradores fotovoltaicos acoplados ao concentrador tipo V é apresentada no Capítulo IV. Ensaios realizados com o

sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador permitiram uma comparação do volume de água bombeada entre os sistemas fixo, rastreamento e concentrador. Foi analisado também o acoplamento ótico entre concentrador e módulos fotovoltaicos.

O Capítulo V apresenta uma simulação do balanço hídrico da cultura de uva usando um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador V. Foi analisado o comportamento do consumo mensal de água da cultura de uva em comparação ao volume de água bombeado pelo sistema de bombeamento fotovoltaico, elaborando uma metodologia que permita calcular a superfície máxima irrigada por um determinado sistema fotovoltaico, ressaltando a utilização do solo como um armazenador natural de água.

O Capítulo VI descreve um projeto de irrigação para a cultura da uva através de um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador V, utilizando o procedimento para dimensionar sistemas de bombeamento fotovoltaico, apresentado na tese, além de uma análise de viabilidade econômica.

Finalmente, o Capítulo VII descreve as conclusões gerais e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Desenvolvimento do trabalho

1.4.1 Descrição do sistema físico

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos representando as partes mais importantes do sistema de irrigação com bombeamento fotovoltaico com concentrador V, e a seguir, são descritos os aspectos de maior interesse relativos a esta proposta referente a cada etapa do sistema físico.

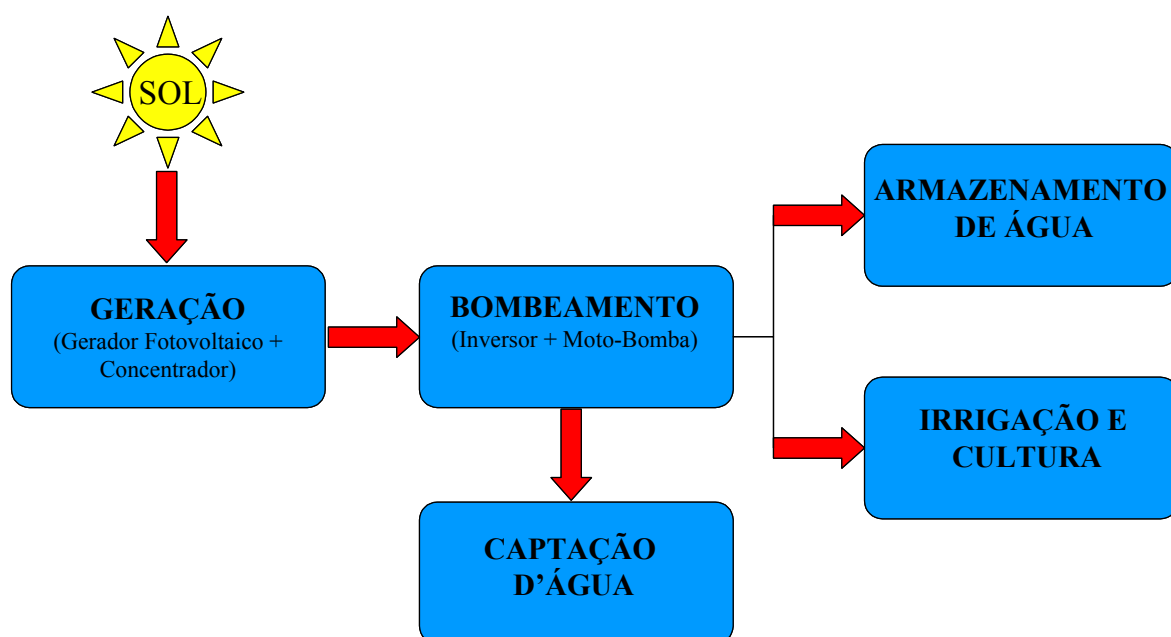


Figura 1 - Configuração do sistema de irrigação com bombeamento acionado por gerador fotovoltaico com rastreamento solar e concentradores tipo V

Gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico está constituído por um conjunto de módulos interligados em série-paralelo, montados sobre um rastreador solar e acoplados óticamente a um concentrador tipo V. A idéia é diminuir a quantidade de módulos fotovoltaicos, que são componentes caros, sem diminuir a geração de energia elétrica. Desta forma, a utilização de cavidades concentradoras, componentes de menor custo, associadas aos módulos fotovoltaicos, permite obter a mesma geração de energia elétrica com uma quantidade menor de módulos. Procura-se obter, com estes concentradores, a maior simplicidade construtiva aliada a um bom desempenho ótico, o que permite prever uma boa relação de custo benefício.

Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento deverá distribuir água no pé das plantas, dentro do possível, de maneira uniforme ao longo do dia. A variabilidade do recurso solar aparece como uma dificuldade para poder atender esta exigência de forma rigorosa. Assim, em dias totalmente claros, o perfil de radiação incidente sobre um plano fixo, ao longo do dia, é cossenoidal. Entretanto, com o uso do sistema de rastreamento, a distribuição de radiação coletada torna-se mais uniforme quando comparada com o sistema fixo, o que possibilita contar também com uma pressão mais padronizada na cabeceira das mangueiras (manifold de distribuição).

Outro efeito associado ao acompanhamento do sol (rastreamento) está relacionado com o que se convencionou chamar energia útil. Esta mede a fração de energia solar cujos valores de irradiância se encontram acima do valor mínimo necessário para que a bomba comece a bombear (nível de radiação crítico, I_C). Como resultado desta consideração a quantidade de água bombeada pelo sistema é aproximadamente proporcional ao produto do valor médio diário da irradiância ($\bar{I}$), vista pelos módulos fotovoltaicos, vezes o fator $(1 - \frac{I_C}{\bar{I}})$, associado à energia útil produzida pelo sistema. O aumento do valor de ($\bar{I}$), devido ao rastreamento e à concentração da radiação solar se traduz em um aumento de ambos os fatores já que o nível crítico de radiação (I_C) independe da configuração do gerador fotovoltaico, seja ele fixo, com rastreamento ou com concentração. Conseqüentemente, o volume de água bombeada aumentará com o aumento da irradiância média ($\bar{I}$).

Sistema de irrigação

Diversos sistemas de irrigação são utilizados no presente. A escolha do tipo de sistema depende de vários fatores, como: dimensões da superfície irrigada, solo, características físicas e químicas do tipo de cultura, disponibilidade de água e de energia. Por motivos que serão explicados a seguir, considera-se a irrigação por gotejamento uma escolha adequada.

Na irrigação por gotejamento a água é aplicada ao solo, diretamente sobre a região radicular, em pequenas quantidades, porém com alta frequência. Deste modo a umidade do solo na zona radicular permanece próxima à capacidade de campo. Com tal propósito, a aplicação da água é feita por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de equipamentos denominados gotejadores, conectadas em tubulações flexíveis de polietileno, trabalhando a pressões variando entre 0,5 e 2,5 atmosferas. A pressão de serviço da maioria dos tipos de gotejadores está em torno de uma atmosfera.

A irrigação localizada não deve ser considerada somente como uma nova técnica para suprir de água as culturas, mas como parte integrante de um conjunto de técnicas agrícolas nos cultivos de determinadas plantas, sob condições controladas de umidade do solo, adubação, salinidade, doença e variedades selecionadas, de modo que se obtenham efeitos significativos na produção por área e por água consumida, assim também, quanto à qualidade do produto (LEÃO e SOARES, 2000).

A aplicação d'água ao solo, na irrigação por gotejamento, é sob a forma de “ponto fonte”, ficando a superfície do solo com uma área molhada com forma circular e o volume do solo molhado com forma de um bulbo (Figura 2).

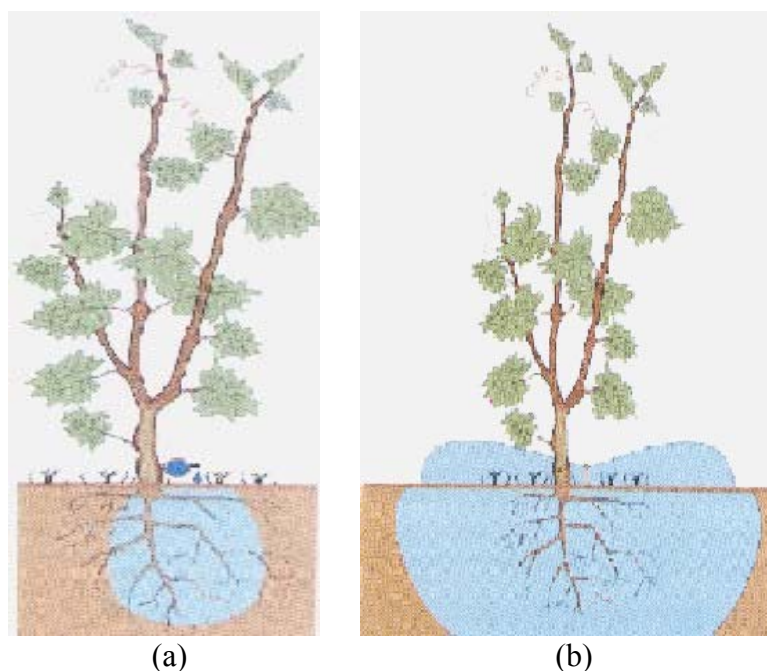


Figura 2 - (a) Sistema de irrigação por gotejamento (b) Sistema por aspersão

Fonte: (LEÃO e SOARES, 2000).

Quando os pontos de gotejamento são próximos uns dos outros, forma-se uma faixa molhada contínua. Sendo assim, somente uma porção da superfície do solo será molhada, o que diminui em muito a evaporação direta da água do solo para a atmosfera, quando comparada com a irrigação por aspersão e por superfície (Figura 2).

A irrigação localizada é usada, em geral, sob a forma de sistema fixo, ou seja, o sistema é constituído de tantas linhas laterais (parte da malha de irrigação que leva a água ao pé da planta) quantas forem necessárias para suprir toda a área, isto é, não há movimentação dessas linhas. Porém, somente determinado número de linhas laterais funciona por vez, a fim de minimizar a capacidade do cabeçal de controle (Figura 3), que

juntamente com os gotejadores constituem as principais partes de um sistema de irrigação por gotejamento. Ele fica situado após a motobomba, ou seja, no início da linha principal e é constituído, em geral, das seguintes partes:

- a) Filtro de areia, cartucho ou tela;
- b) Injetor de fertilizante;
- c) Válvula de controle de pressão;
- d) Registro e manômetro;
- e) Medidores de vazão;

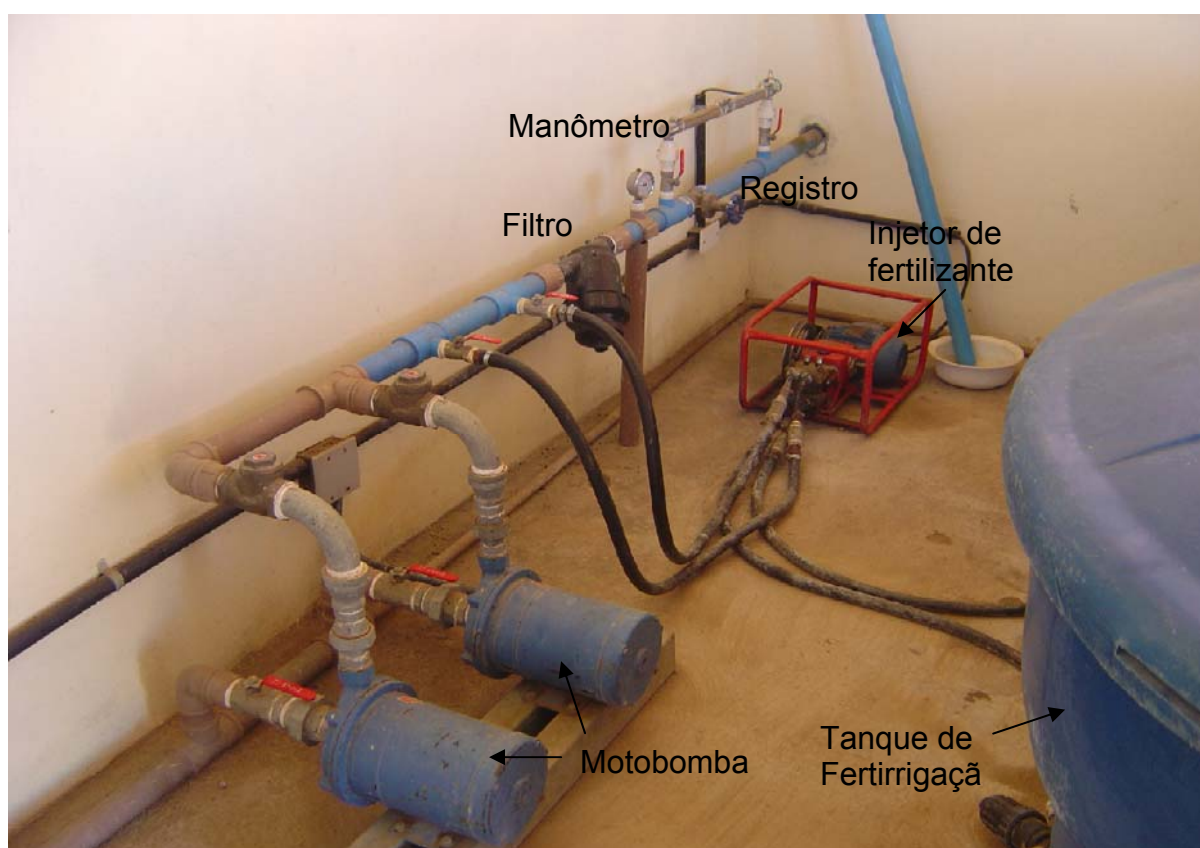


Figura 3 – Cabeçal de controle de um sistema de irrigação instalado em Taiobeiras-MG

Principais vantagens da irrigação localizada

- a) Maior eficiência no uso da água – Permite melhor controle da lâmina d'água aplicada, diminui as perdas por evaporação (pois não há movimento d'água no ar, não molha a superfície dos vegetais e não molha toda a superfície do solo), minimiza perdas por percolação e por escoamento superficial e permite maior eficiência de irrigação.
- b) Maior eficiência na adubação – A irrigação por gotejamento permite a fertirrigação e, em razão de concentrar o sistema radicular da cultura junto ao bulbo molhado, facilita a aplicação do adubo por cobertura;
- c) Maior eficiência no controle fitossanitário – A irrigação por gotejamento não irriga as ervas daninhas e não molha a parte aérea dos vegetais, o que facilita o controle das ervas daninhas, dos insetos e fungos, permitindo maior eficiência no uso de defensivos;
- d) Adapta-se a diferentes tipos de solos e topografia – Como é aplicada água em pequena intensidade, este método se adapta melhor de que qualquer outro a diferentes tipos de solos e topografia, mesmo em terreno com topografia irregular e acidentada;

Principais desvantagens da irrigação localizada

a) Entupimento – Uma das características gerais de qualquer tipo de gotejador é o fluxo d'água através de pequenos orifícios, cujo diâmetro varia com os diferentes modelos, em geral entre 0,5 e 1,5 mm. Sendo assim, a exigência de água limpa é uma característica inerente a este método de irrigação. A fim de minimizar a ocorrência de entupimento, a filtragem da água faz parte do próprio sistema, para evitar a obstrução dos gotejadores com partículas minerais ou orgânicas. Porém, continua o problema de entupimento em razão da precipitação de sais e/ou sedimentação dentro dos gotejadores, das partículas de argila, em suspensão na água de irrigação, e que não são retidas nos filtros comuns. Uma vez entupido, um gotejador dificilmente será recuperado exceto nos modelos com dispositivos próprios para desentupir;

b) Distribuição do sistema radicular – Em virtude da formação e manutenção de um volume constante de solo umedecido (bulbo molhado), as raízes dos vegetais tendem a concentrar-se nesta região, diminuindo a estabilidade das árvores frutíferas, podendo assim ocorrer tombamento destas árvores em regiões sujeitas a ventos com bastante intensidade.

1.4.2 Armazenamento de água

A demanda de água de sistemas de irrigação varia com a época do ano, sendo menor no período de chuvas e maior no período de estiagem, devido à variação na taxa de

evapotranspiração da cultura irrigada. A radiação solar apresenta variações sazonais similares, de forma que existe uma boa adequação entre a quantidade de água bombeada e a demanda de água da cultura. No período de chuvas deve ser acrescentada a contribuição das precipitações que aliviam ainda mais a exigência de demanda de água sobre o sistema de bombeamento, além do excedente, que pode realizar a drenagem do solo.

Durante períodos de maior demanda de água pode-se contar também com a contribuição natural da capacidade de armazenamento do solo, o que poderá reduzir, possivelmente, as dimensões do gerador fotovoltaico necessário para irrigar uma determinada superfície ou, inversamente, aumentar a superfície que pode ser irrigada com um determinado sistema.

1.4.3 Captação de água

A disponibilidade de água de boa qualidade e em quantidade suficiente define a viabilidade ou não do projeto que se descreve. Todas as formas de água disponíveis: grandes e pequenos açudes, poços, barragens superficiais, subterrâneas e coleta de água de chuva, podem ser utilizadas. Contudo, dar-se-á ênfase às águas subterrâneas. Ao mesmo tempo, a forma de utilização diz respeito ao uso mais eficiente desse recurso, seja na forma de sistemas de gotejamento ou microaspersão. A escolha do sistema de irrigação depende da cultura a ser tratada e do tipo de solo.

1.4.4 Escolha da cultura

Dentro da fruticultura, uma opção atraente é a cultura de uva, por apresentar elevadas taxas de rentabilidade e de geração de empregos diretos por hectare cultivado. É uma cultura muito exigente em seu trato, durante todo o ciclo de produção e, em consequência, de elevada taxa de ocupação de mão-de-obra, que pode chegar até seis pessoas por hectare (EVANS et al., 1993). A videira é uma cultura perene, com sistema radicular profundo, podendo ajustar-se, até certo ponto, a um suprimento limitado de água (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

O Nordeste Brasileiro apresenta uma produção de uva quase toda concentrada no Pólo Petrolina/Juazeiro, que também é a região pioneira no seu cultivo no semi-árido. Existem ainda algumas áreas esparsas de menor expressão quantitativa, como a do Perímetro irrigado de Pirapora, no Norte de Minas. A uva do Nordeste brasileiro é um produto de exportação que tira partido dos nichos de mercado determinados pela entressafra dos principais países exportadores.

As necessidades hídricas anuais da cultura estão acima dos 300 mm, dependendo do clima, da duração do ciclo fenológico, do cultivar utilizado, da estrutura e da profundidade do solo, das práticas culturais, da direção, do espaçamento e da largura das fileiras e da altura da latada (DOORENBOS e KASSAM, 1979; MANDELI, 1984; WILLIAMS e MATTHEWS, 1990; EVANS et al., 1993). Entretanto, o consumo hídrico do ciclo

vegetativo da uva de mesa varia entre 310 mm e 485 mm (BUCKS et al., 1985; EVANS et al., 1993). Não havendo excesso de precipitação pluvial, quanto maior for a temperatura do ar, maior será a concentração de açúcar e menor a de ácido málico nos frutos, o que favorece a adaptação desta cultura ao clima do Nordeste. Se há deficiência hídrica durante o período inicial de crescimento da parreira e na maturação das bagas, ocorrerá redução no tamanho dos frutos e atraso no seu amadurecimento, afetando sua coloração e favorecendo sua queima pela radiação solar. Por outro lado, o excesso de chuvas com temperaturas elevadas tornam a cultura muito susceptível a doenças fúngicas e a pragas, sendo conveniente que não ocorra excesso de precipitações durante o período vegetativo. Para evitar esses inconvenientes, é preferível que a cultura frutifique sob condições de seca, e que as necessidades hídricas sejam satisfeitas mediante irrigação por gotejamento ou por microaspersão.

1.5 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica faz referência às partes mais importantes do sistema analisado, inclusive a questão da água, bastante polêmica, e de sua viabilidade para a agricultura familiar.

1.5.1 Sistemas fotovoltaicos combinados com concentradores tipo V

Este tipo de concentrador, não-focal, de baixa relação de concentração (RABL,1976), apresenta extrema simplicidade construtiva, podendo ser utilizado com células solares convencionais, sendo compatível com sistemas de dissipação natural de calor. Concentradores tipo V foram utilizados por STACEY e MCCORMICK (1984) com células mono e policristalinas, obtendo bons resultados em termos de eficiência dos módulos, tendo como um fator limitante o aumento de temperatura nas células que compõem os módulos.

O desenvolvimento desses equipamentos tinha como objetivo principal minimizar o custo da geração de energia elétrica, quando comparados aos sistemas de coletores fixos. Contudo, esta associação demanda que sejam tomados cuidados relativos (BERRY et. al, 1982):

- Ao rastreamento da trajetória do sol ao longo do dia;
- Ao resfriamento das células solares;
- À uniformidade da iluminação dos módulos;
- À estrutura construtiva do concentrador.

1.5.2 Características óticas das cavidades tipo V

O trabalho pioneiro em sistemas fotovoltaicos acoplados a concentradores de cavidade tipo V foi apresentado por HOLLANDS (1971). Diversos estudos sobre sistemas fotovoltaicos com rastreamento e com concentração foram desenvolvidos por NANN, (1990); FRAIDENRAICH e ALMEIDA, (1991); FRAIDENRAICH, (1995); FREILICH e GORDON, (1991); GORDON et. al., (1991); LORENZO e MACAGNAN, (1994); RAUCH et. al., (1995); FRAIDENRAICH e BARBOSA, (1999); DOBÓN et. al., (2001).

As cavidades tipo V fazem parte da família de concentradores de baixa relação de concentração (RABL, 1976). Constituídas por duas paredes planas que se interceptam formando um ângulo igual a 2Ψ , permitem a utilização de espelhos comuns, amplamente disponíveis no mercado e cujo índice de refletividade se encontra em torno de 80%. Pode-se esperar, em consequência, eficiências óticas relativamente elevadas.

Uma característica que torna estes concentradores particularmente aptos para seu uso em combinação com sistemas fotovoltaicos é a propriedade que estas cavidades possuem, para certas combinações da relação de concentração (C) e do ângulo do vértice (Ψ), de iluminar uniformemente a região absorvedora (HOLLANDS, 1971; FRAIDENRAICH, 1995 e 1998). Isto permite um acoplamento ótico correto da cavidade a módulos fotovoltaicos comerciais, cujas células estão interligadas em série e ocupam a largura do absorvedor em número de três ou quatro. A não uniformidade da iluminação na região absorvedora faz com que a corrente gerada seja determinada pela região com menor fluxo de radiação incidente, prejudicando o desempenho de todo o gerador.

1.5.3 Agricultura irrigada no Nordeste

A atividade da agricultura irrigada no Nordeste é bastante recente na região. Os primeiros perímetros irrigados foram implantados nas décadas de 70 e 80 pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) nas cidades de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA). Mais recentemente chegaram a outras cidades da região.

Conforme SUASSUNA (1996) menos de 2% da área do Nordeste seria passível de irrigação (3.1 milhões de ha.). Até o ano de 2001 a superfície irrigada no Nordeste totalizava 663 mil ha. Apesar de se observar um significativo crescimento no uso dessa

tecnologia, existem, contudo, aspectos que devem ser analisados com vistas a lograr uma correta utilização dos sistemas de irrigação. A salinização do solo, despreparo do agricultor em lidar com a técnica, o não gerenciamento dos recursos hídricos, a escolha do cultivo correto e a deficiência de drenagem, são alguns dos problemas que aparecem no decorrer da implantação de projetos de irrigação.

1.5.4 Antecedentes relativos à tecnologia fotovoltaica aplicada na irrigação

A tecnologia fotovoltaica foi introduzida no Brasil na década de 70, basicamente para ser utilizada em sistemas de comunicações (estações repetidoras de microondas para redes de televisão). No começo dos anos 80 foram adotadas as primeiras iniciativas relativas a pequenos sistemas de irrigação com bombas alimentadas por geradores fotovoltaicos. Foram instalados sistemas de bombeamento fotovoltaico que variavam entre 400 e 600 Wp nos estados de Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte com a finalidade de irrigar culturas de uva, banana, melão, laranja, pinha, tomate e coco. Outros sistemas foram também instalados no estado da Bahia.

Tratava-se de experiências isoladas, para verificar a viabilidade técnica da proposta, que realmente foi confirmada. Entretanto, como resultado dos elevados preços dos equipamentos fotovoltaicos, provenientes de uma tecnologia que nessa época era pouco difundida, surgiu a iniciativa de reorientar as aplicações para necessidades mais urgentes. Nasce assim a política de eletrificação rural dirigida a atender, a princípio, a

necessidades individuais e, posteriormente, comunitárias como escolas e postos de saúde na área rural.

Poucos anos depois (década de 90), e com preços bem mais acessíveis, o uso da tecnologia de bombeamento fotovoltaico é reiniciado, porém com o objetivo de abastecimento de água das comunidades rurais. A proposta de irrigação com bombeamento fotovoltaico teria que esperar ainda uma década para ingressar no âmbito das atividades produtivas rurais. Vários fatores contribuem hoje para sua promoção:

- O crescimento das atividades de irrigação, acompanhadas de uma importante prosperidade econômica;
- A comprovação da adequação do clima regional para a produção de frutas e hortaliças, com possibilidades de duas safras por ano;
- A evolução da tecnologia de bombeamento, diversificada em termos de equipamentos disponíveis, maiores eficiências e menores custos;
- A possibilidade de substituição de equipamentos importados por equipamentos nacionais;
- Redução de preços de módulos fotovoltaicos no mercado nacional;
- Experiência com sistemas de bombeamento fotovoltaico para abastecimento de água no Brasil e em especial no Nordeste;
- Crescente interesse das autoridades em facilitar o uso de fontes subterrâneas de água;

- Estímulo, nacional e internacional, para promoção de atividades produtivas com tecnologia fotovoltaica no âmbito da agricultura familiar;

1.5.5 Recursos hídricos

Farto recurso, fraco aproveitamento. Não é de hoje que se diz que o problema da seca no Nordeste é mais político do que "natural". Afinal, já dispõe-se de conhecimento e tecnologia suficientes para saber que a região tem água bastante, senão para resolver a seca, pelo menos para amenizá-la.

Quando o uso das águas superficiais torna-se dificultado pela distância aos pontos de consumo, a utilização de águas subterrâneas é considerada como a mais barata para atendimento, inclusive irrigação, desde que o manancial tenha volumes compatíveis com a demanda a que se destina e se localize nas proximidades da área de consumo.

As reservas de águas subterrâneas são particularmente grandes em regiões de rocha sedimentar. Essas rochas, muito porosas, têm grande capacidade de absorção e armazenamento de água da chuva. No Brasil, elas ocupam cerca de 52% do território. O resto é formado por rochas cristalinas. A formação geológica denominada cristalino, ao contrário da sedimentar, é extremamente impermeável, fazendo com que a água escorra para outros locais, deixando o solo e o ar mais secos. Existem, entretanto, pontos de área

sedimentar em regiões de predominância do cristalino, que podem ser explorados para o abastecimento de água local e para irrigação.

O Nordeste Brasileiro tem o potencial médio de água doce da ordem de 186,2 km³/ano, correspondente a apenas 3% do total das disponibilidades hídricas do país (Ministério da Agricultura e Secretaria de Recursos Hídricos - SRC/MMA, EMBRAPA E BIRD).

Por sua vez, a região Nordeste é a segunda mais populosa do Brasil, resultando numa disponibilidade de água doce, nos rios, de 4.384 m³/habitante ano (SRH/MMA). Esse valor é quase o dobro dos encontrados na maioria dos países mais desenvolvidos da União Européia, e cerca de 12 vezes o volume de água de que dispõe um cidadão israelense (370 m³/habitante ano) (REBOUÇAS, 1999). Não obstante, como a distribuição espaço-temporal é heterogênea, principalmente na região semi-árida (Polígono das Secas), onde as precipitações pluviais variam entre 400 a 600 mm/ano, a efetiva implementação de um aparato gerencial capaz de tornar eficiente o uso dos recursos hídricos no Nordeste, poderá auxiliar na solução do problema de água e no desenvolvimento econômico-social da região. CARVALHO e EGLER (2003) informaram que as reservas exploráveis de água subterrânea no semi-árido do Nordeste são de 7×10^9 m³/ano.

1.5.6 Eletrificação rural no Brasil

O relatório elaborado pelo Banco Mundial em 2005 sobre eletrificação rural no Brasil, constatou que ainda há 10 milhões de brasileiros sem acesso à energia elétrica. Além deste fato, foi verificada uma substancial diferença entre as regiões, onde o Norte e Nordeste apresentam os maiores índices de propriedades não eletrificadas, seja na zona urbana ou na zona rural, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Número de propriedades sem eletrificação

Região	Área Urbana	(%)	Área Rural	(%)	Total	(%)
Norte	56.195	2,4	447.124	59,7	503.319	16,1
Nordeste	201.642	2,2	1.110.339	34,4	1.311.981	10,7
Sudeste	166.565	0,8	206.214	11,9	372.779	1,7
Sul	49.011	0,8	125.235	10,3	174.246	2,3
Centro Oeste	31.610	1,0	90.336	21,5	121.946	3,5
Brasil	505.023	1,2	1.979.249	27	2.484.271	5,2

Fonte: MME-PNU (dados do Censo 2000 com projeção para dezembro de 2002, incluindo as realizações do Programa Luz para Todos)

No âmbito dos diversos programas de eletrificação rural existentes no Brasil, merece destaque o programa Casa das Máquinas, que incentiva a utilização de sistemas de eletrificação rural descentralizados da rede elétrica convencional. O processo de geração de energia elétrica é realizado em sua maior parte por sistemas fotovoltaicos e a energia é utilizada para o consumo da propriedade, em mini-agro-indústria ou para mini-sistemas de irrigação em fruticultura. Na região Nordeste os estados da Bahia e do Ceará são os que apresentam o maior número de sistemas descentralizados de eletrificação rural, em torno de 11 mil (GOUVELLO et al., 2002).

1.5.7 Agricultura familiar

É necessário esclarecer o conceito de agricultura familiar, perante as noções de agricultura de subsistência e agricultura comercial. Alguns autores, por exemplo, conceituam agricultura familiar ou pequena agricultura como aquela realizada em propriedades de até 100 ha (TEIXEIRA et al., 1996), confundindo assim o modo de fazer a agricultura com o seu porte. Embora muitas vezes haja uma associação entre modo e porte, a falta de clareza nas abordagens pode levar a consequências no mínimo indesejáveis, quando se trata de políticas públicas.

A contraposição mais importante consiste em diferenciar-se o que seja agricultura patronal e agricultura familiar. Nesta última, o trabalho e a gestão estão intimamente relacionados e centrados no possuidor dos meios de produção; já no modelo patronal ocorre uma total separação entre gestão e trabalho, conforme a Tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Comparação dos modelos patronal e familiar de agricultura

Modelo Patronal	Modelo familiar
Completa separação entre gestão e trabalho	Trabalho e gestão intimamente relacionados
Organização centralizada	Direção do processo produtivo assegurada diretamente pelos proprietários
Ênfase na especialização	Ênfase na diversificação
Ênfase em práticas agrícolas padronizáveis	Ênfase na durabilidade dos recursos e na qualidade de vida
Trabalho assalariado predominante	Trabalho assalariado complementar
Tecnologias dirigidas à eliminação das decisões de momento (pouca flexibilidade)	Decisões imediatas, adequadas ao alto grau de imprevisibilidade do processo produtivo
Área média (ha) = 600	Área média (ha) = 50
Área ocupada (milhões ha)= 240	Área ocupada (milhões ha)= 108
Número de estabelecimentos (milhões) = 0,5	Número de estabelecimentos (milhões) = 4,1
Participação na área total = 68%	Participação na área total = 30%

Fonte: FAO (1994) e MDA/Pronaf (BRASIL, 1994).

De maneira geral, os produtores familiares que desenvolvem atividades diversificadas, estão mais voltados à produção para o mercado interno e, até por isso, necessitam de maior apoio governamental. A agricultura patronal, entretanto é mais concentrada em culturas voltadas à exportação dentro de uma visão empresarial do negócio.

A agricultura familiar no Brasil

Considerando a definição anteriormente apresentada tem-se, na Tabela 3, a distribuição dos estabelecimentos conforme as categorias sócio-econômicas e alguns indicadores que dão a medida da sua importância.

Tabela 3 – Brasil – Número de Estabelecimentos (Estab.), Área, Valor Bruto da Produção (VBP) e Financiamento Total (FT), segundo as Categorias de Agricultura

Categorias	Estab. Total	Estab. s/total (%)	Área Total (mil ha)	Área s/total (%)	VBP (R\$ mil)	VBP s/total (%)	FT (R\$ mil)	FT s/ total (%)
Familiar	4.139.369	85,2	107.768	30,5	18.117.725	37,9	937.828	25,3
Patronal	554.501	11,4	240.042	67,9	29.139.850	61,0	2.735.276	73,8
Instituições Religiosas.	7.143	0,2	263	0,1	72.327	0,1	2.716	0,1
Entidade Pública	158.719	3,2	5.530	1,5	465.608	1,0	31.280	0,8
Não Identificado	132	0,0	8	0,0	959	0,0	12	0,0
Total	4.859.864	100,0	353.611	100,0	47.796.469	100,0	3.707.112	100,0

Fonte: Censo Agropecuário 1995/96 IBGE (MDA/INCRA, 2000).

Destaca-se a grande participação da agricultura familiar no total de estabelecimentos agropecuários do país (85,2%), embora desproporcional à sua participação na área (30,5%) e nos financiamentos (25,3%). Por outro lado os estabelecimentos relativos à agricultura familiar participam no valor bruto da produção de uma forma mais significativa (37,9%).

A estrutura fundiária da agricultura familiar, repete a concentração observada na agricultura do país, de uma maneira geral. Conforme a Tabela 4 apresentada a seguir, 39,8% dos estabelecimentos familiares possuem menos de 5 ha e, em conjunto, detêm tão somente 3,0% dos 107.768 mil ha reportados na Tabela 3. Em média, são estabelecimentos de apenas 1,9 hectares. No extremo oposto, 5,9% dos estabelecimentos concentram 44,7% da área total, com uma média de 198 ha.

Tabela 4 – Brasil – Agricultura Familiar – Participação nos Estabelecimentos, na Área e Área Média, segundo os Grupos de Área Total (em ha)

Grupos de Área Total	Número de Estabelecimentos (%)	Área Percentual (%)	Área Média (ha)
Menos de 5 ha	39,8	3,0	1,9
5 a menos de 20 ha	29,6	12,2	10,7
20 a menos de 50 ha	17,2	20,4	31,0
50 a menos de 100 ha	7,6	19,7	67,8
Acima de 100 ha	5,9	44,7	198,0

Fonte: MDA/INCRA, 2000.

Enquanto a agricultura familiar participa, na média, com 37,9% do valor bruto da produção (participação essa bastante elevada, considerando que essa produção tem origem

em um número muito grande de pequenas propriedades), há produtos nos quais o papel da agricultura familiar é relevante, conforme pode ser visto na Tabela 5:

Tabela 5 – Percentual do Valor Bruto da Produção de Produtos Seleccionados Produzidos nos Estabelecimentos Familiares

Produto	Participação no VBP Total (%)
Fumo	97
Mandioca	84
Feijão	67
Suínos	58
Pecuária leiteira	52
Milho	49
Aves/ovos	40
Soja	32
Arroz	31
Café	25
Pecuária de corte	24

Fonte: (MDA/INCRA, 2000).

As culturas do fumo, mandioca e feijão despontam como quase que exclusivas da agricultura familiar. Chama a atenção os percentuais alcançados na pecuária de pequenos animais (suínos e aves/ovos), produção para qual o sistema de produção integrada deve estar contribuindo significamente. Observa-se que a fruticultura não faz parte do rol dos produtos que se destacam.

Examinando-se a questão pela ótica da agricultura familiar, interessa identificar quais os produtos que mais contribuem para o valor bruto da produção. Destacam-se a pecuária leiteira, aves/ovos, pecuária de corte, milho e soja (Tabela 6). É importante notar a discordância dessa cesta com a anterior (Tabela 5), ou seja, os produtos que mais

contribuem para a receita dos agricultores familiares não são aqueles os quais a maioria deles se dedica.

Tabela 6 – Percentual da Participação de Produtos Seleccionados no Valor Bruto da Produção Total da Agricultura Familiar

Produto	Participação no VBP da Agricultura Familiar (%)
Pecuária leiteira	13,3
Aves/ovos	10,0
Pecuária de corte	9,5
Milho	8,7
Soja	7,4
Suínos	5,6
Mandioca	5,5
Fumo	4,2
Feijão	3,8
Café	3,5
Arroz	2,7
Outros	25,4

Fonte: MDA/INCRA, 2000.

A agricultura familiar no Nordeste

O Nordeste é a região brasileira que detém a maior parcela dos estabelecimentos agrícolas familiares do país (49,7%), quando comparada com as demais regiões. Esses estabelecimentos detêm também a maior fração da área (31,6%), mas não há uma participação correspondente no valor bruto da produção (apenas 16,7%) nem no financiamento total (14,3%) (Tabela 7), estes valores indicam uma menor eficiência relativa e certamente, uma maior desarticulação (cabe mencionar, que os sistemas de produção integrada estão mais presentes nas regiões Sudeste e Sul do que no Nordeste).

Tabela 7 – Agricultura Familiar – Participação Percentual das Regiões no Número de Estabelecimentos, Área, Valor Bruto da Produção e Financiamento Total destinado aos Agricultores Familiares

Região	Estab. s/total (%)	Área s/total (%)	VBP s/total (%)	FT s/total (%)
Nordeste	49,7	31,6	16,7	14,3
Centro-Oeste	3,9	12,7	6,2	10,0
Norte	9,2	20,3	37,5	5,4
Sudeste	15,3	17,4	22,3	15,3
Sul	21,9	18,0	47,3	55,0
Brasil	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Censo Agropecuário 1995/96 IBGE (MDA/INCRA, 2000).

CAPÍTULO II

POTENCIAL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO PARA IRRIGAÇÃO DA CULTURA DA UVA

2.1 Introdução

De toda a água existente no planeta, 97% é de água salgada. Dos 3% restantes, 2% estão nas calotas polares e nas geleiras. Somente 1% da água existente na Terra pode ser aproveitada pelo homem, tanto para o seu consumo direto quanto para a utilização na irrigação. A maior parte da água potável encontra-se no subsolo e a única forma possível de alcançá-la é através da perfuração de poços (SUASSUNA, 1999).

O Brasil concentra cerca de 12% da água doce superficial disponível no planeta. Apresenta, contudo, grandes contrastes na sua distribuição. Por exemplo, a região Nordeste, com 29% da população, possui 3% dos recursos hídricos (CAMPANILI, 2003). Nenhuma região brasileira sente tanto os efeitos de falta d'água quanto o Semi-Árido do

Nordeste. Atualmente, a disponibilidade hídrica superficial per capita é insuficiente para os 15 milhões de pessoas que habitam na região rural (Censo Demográfico 2000 do IBGE).

O problema de abastecimento de água dessas comunidades tem sido resolvido através da construção de sistemas de acumulação (açudes), onde sua construção e localização estão muitas vezes vinculadas a interesses políticos, dificultando o acesso da população às fontes de abastecimento. Por outro lado, a insolação e os ventos na região provocam uma evaporação intensa, impedindo assegurar o abastecimento de água por longos períodos. Em alguns casos, quando os açudes são muito rasos e com grande área superficial, as perdas se aceleram, agravando a situação. A experiência sugere que sistemas individuais de armazenamento de água, como cisternas, por exemplo, podem constituir um complemento adequado para distribuir e armazenar por longos períodos a quantidade de água necessária para atender a demanda de uma família. Maiores volumes de água para o consumo de comunidades e irrigação de culturas podem ser fornecidos mediante a perfuração de poços.

É apresentada a seguir uma análise sobre a disponibilidade de água subterrânea na região Nordeste do Brasil. São também descritas as regiões semi-áridas do estado de Pernambuco, onde se supõe que existam condições favoráveis para se implantar sistemas de micro-irrigação para cultura de uva.

2.2 Região Nordeste do Brasil

2.2.1 Característica política

A região Nordeste do Brasil, formada pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, apresenta uma área total de 1.561.177 km² e uma população de 47.782.486 habitantes, que corresponde a 18,27% do território nacional e 28,12% da população nacional, respectivamente (Censo Demográfico 2000 do IBGE). Os principais centros urbanos da região são as cidades de Fortaleza, Recife e Salvador. A Figura 4 apresenta um mapa político-administrativo da Região Nordeste e a Tabela 8 relaciona os estados com suas áreas e respectivas populações, urbana e rural.



Figura 4 – Mapa político-administrativo da Região Nordeste (Fonte: IBGE, ano 2002)

Tabela 8 – Área e população dos estados do Nordeste

Estado	Área (Km ²)	População (habitantes)		
		Total	Urbana	Rural
Alagoas – AL	27.933	2.827.853	1.918.963	908.893
Bahia – BA	564.273	13.085.769	8.769.524	4.316.245
Ceará – CE	146.348	7.431.597	5.314.397	2.117.200
Maranhão – MA	331.918	5.657.553	3.363.108	2.294.445
Paraíba – PB	56.541	3.444.794	2.444.389	1.000.405
Pernambuco – PE	98.526,6	7.929.154	6.054.901	1.874.253
Piauí – PI	251.311,5	2.843.428	1.788.330	1.055.098
Rio Grande do Norte – RN	53.077	2.777.509	2.033.775	743.733
Sergipe – SE	21.962	1.784.829	1.272.573	512.255
Total	1.551.890,1	47.782.486	32.959.960	14.822.526

Dados Populacionais do Censo Demográfico 2000 do IBGE

2.2.2 Região semi-árida no Nordeste do Brasil

A Figura 5 apresenta a região do semi-árido com uma superfície total de 858.000 km², constituída por 1031 municípios habitados por uma população total de 18.466.697 pessoas (SUDENE, 1997). Os grandes problemas que afetam a região rural são a carência de água e a falta de energia elétrica. Acredita-se uma vez resolvidos estes problemas, existirão melhores condições para o desenvolvimento da agricultura familiar. Uma breve descrição das características da região semi-árida pode ajudar a adquirir uma adequada compreensão da problemática que enfrentam os seus habitantes.

A região do semi-árido ocupa, em sua maior parte, a região Nordeste, estendendo-se também à parte do Norte do estado de Minas Gerais. Caracteriza-se, basicamente, pelo regime de chuvas, definido por ser escasso, irregular e concentrado em um período de três a cinco meses ao ano. As precipitações variam entre 400 e 600 mm por ano.

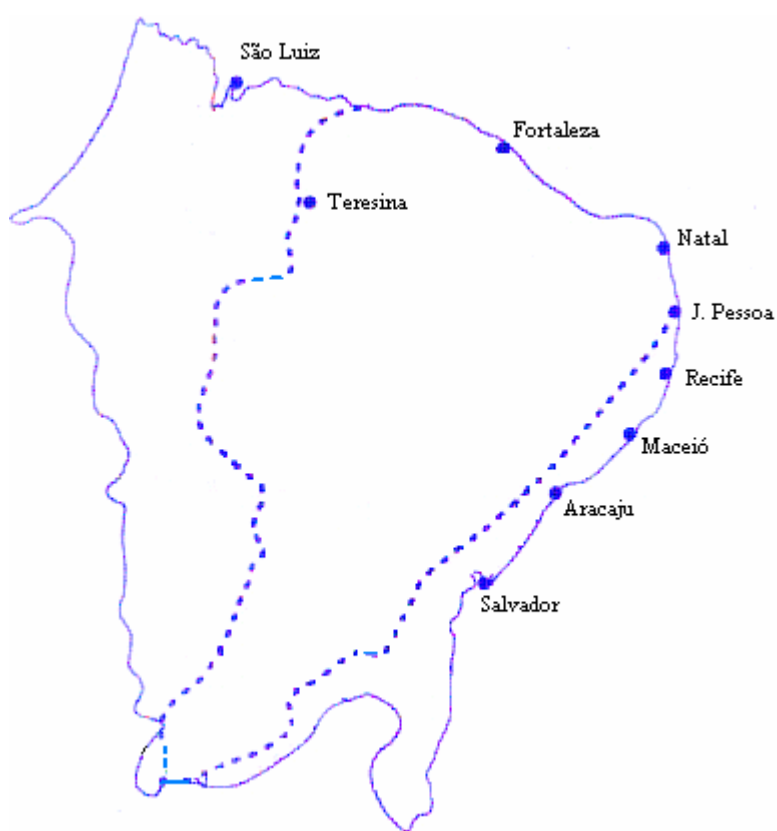


Figura 5 – Mapa da região semi-árida do Nordeste (Fonte: Atlas IBGE/SUDENE)

A temperatura é elevada durante o dia e relativamente baixa à noite. O nível de radiação médio anual é elevado: $5,5 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$, com valores médios mensais que variam entre $4,5$ e $6,0 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$, ao longo do ano (TIBA et al., 2000). Como consequência, a taxa de evaporação é elevada, na ordem de 2500 mm ao ano. Sua vegetação, denominada

Caatinga, é baixa, espinhosa e dispersa. Apesar de circunstâncias tão adversas, a região rural apresenta um número expressivo de 8.630.891 habitantes (Tabela 9).

Tabela 9 – Dados da região do Semi-Árido

Estados	Nº de Municípios	Área (km ²)	População		
			Total	Urbana	Rural
Piauí	109	126.274,4	805.250	310.170	495.080
Ceará	134	82.294,6	3.450.711	1.889.496	1.561.215
Rio Grande do Norte	140	48.443,0	1.418.575	918.969	499.606
Paraíba	170	48.788,9	1.917.961	1.150.193	767.768
Pernambuco	118	85.979,9	2.971.066	1.675.432	1.295.634
Alagoas	35	11.941,7	741.183	380.100	361.083
Sergipe	28	11.038,5	354.404	187.793	166.611
Bahia	257	388.567,9	6.222.175	3.025.285	3.196.890
Minas Gerais	40	54.670,4	585.372	298.368	287.004
Total	1.031	857.999,3	18.466.697	9.835.806	8.630.891

Fonte: SUDENE - Portaria nº 1.182/99 (Área Municipal, 1997 - IBGE e Contagem da População, 1996 - IBGE).

O problema mais grave que afeta a maior parte da região são as secas, cuja ocorrência periódica empobrece a população e desorganiza a produção, tanto agrícola quanto pecuária. A convivência com este fenômeno natural tem sido muito difícil, contribuindo para o êxodo rural.

2.3 Água no Nordeste

2.3.1 Água superficial no Nordeste

Historicamente, o abastecimento de água das comunidades rurais tem sido materializado através da construção de sistemas de acumulação (açudes), com restrições no que se refere à quantidade e qualidade desse recurso. Estima-se que existem na região semi-árida 70.000 reservatórios com capacidade para acumular 30 bilhões de m³ (REBOUÇAS, 2001)

Os pequenos e médios açudes, com volumes compreendidos entre 10.000 e 200.000 m³ representam 80% dos corpos de água nos estados do Nordeste. No estado de Pernambuco existem de 13 a 15 mil açudes desse porte, constituindo, se bem administrados, uma importante reserva de água para a região (SUASSUNA, 2005a). Estudos visando a utilização da água destes açudes para a produção de alimentos, através da irrigação, foram realizados por MOLLE e CADIER (1992), orientando os produtores a utilizar esse recurso, independentemente da existência de reservas de água para abastecimento da população e animais. Propostas como esta só podem ser consideradas válidas, exclusivamente quando a reserva de água do açude ou outras fontes de água estejam disponíveis durante o ano todo, para atender a demanda da população. Neste contexto, é necessário mencionar que as perdas de água devido à evaporação dos pequenos e médios açudes chegam a ser da ordem de 40% do volume armazenado por ano (SUASSUNA, 2005a).

Em torno dos grandes açudes, construídos pelo poder público, se desenvolvem atividades de piscicultura e irrigação, nos denominados perímetros irrigados, provendo também o serviço de abastecimento de água às populações locais. Apesar de estarem

sujeitos a um processo de evaporação intensiva, é possível, através da construção de uma adequada infra-estrutura e gerenciamento, criar condições propícias para um bom aproveitamento dessa reserva de água, muitas vezes não materializado pela ausência dos fatores mencionados (FONTES et al., 2003).

Enquanto soluções integradas não são implementadas os períodos de seca se sucedem e o abastecimento da população entra em colapso. Em caráter de emergência se recorre preferencialmente à distribuição de água com caminhões tanque e em menor medida outras soluções, tais como poços e cisternas.

2.3.2 Água Subterrânea no Nordeste

A utilização de águas subterrâneas é considerada como a mais barata para atendimento das necessidades humanas, inclusive irrigação, desde que o manancial tenha volumes compatíveis com a demanda a que se destina (SILVA PAZ et al., 2000). Apesar do clima semi-árido, predominante em várias partes da região, há reservas de águas subterrâneas (aqüíferos) suficientes para resolver grande parte dos problemas de abastecimento.

A hidrologia do Nordeste, fortemente dependente do contexto geológico da região, reconhece a existência de duas estruturas básicas: a formação cristalina e a sedimentar. O embasamento sedimentar se caracteriza por ser muito poroso, ter grande capacidade de absorção e armazenamento de água de chuva. Entretanto, a formação

cristalina prevalece em boa parte da região semi-árida. Ao contrário da sedimentar, é extremamente impermeável, fazendo com que a água escorra para outros locais, deixando o solo e o ar mais secos. A região Nordeste está constituída por 48% de rochas de formação cristalina e 52% de formação sedimentar. Estas últimas estão concentradas nos estados do Maranhão, Piauí e parte da Bahia. A região cristalina predomina no interior da maior parte dos estados, onde o clima é mais árido. A Tabela 10 ilustra o comportamento hidrológico das formações cristalina e sedimentar e a Figura 6 apresenta a distribuição das bacias no Nordeste.

Tabela 10 - Características das Bacias no Nordeste do Brasil

Tipo de aquífero	Área (10 ³ km ²)	Vazão escoamento natural (10 ⁶ m ³ /ano)	Recursos permanentes (10 ⁶ m ³)	Reservas exploráveis (10 ⁶ m ³ /ano)	Número de anos exploráveis
Terreno cristalino	720	50 a 250	-	50 a 250	1
Aluviões cristalino	35	100	5.000	1.000 a 2.000	2,5 a 5
Subtotal	755				
Bacia Sedimentar do Parnaíba	450	3000	2.000.000	10.000	2000
Bacia Sedimentar do Potiguar	22	-	75.000	750	100
Bacia Sedimentar Tucano-Jatobá	56	151	1.310.000	3.100	435
Bacia Sedimentar do Salitre-Jacaré	70	15	100.000	1.000	100
Bacia Sedimentar do São Francisco	160	700	300.000	3.000	300
Bacia Sedimentar do PB-PE	25	30	50000	-	
Bacia Sedimentar do Araripe	11,5	40	2.000.000	20.000	100
Subtotal	794,5			37.850	

Fonte: Possibilidades hidrogeológicas no Nordeste do Brasil, Rebouças e Gaspary.

Constata-se na região sedimentar um número de anos bastante significativo em que o aquífero poderá ser explorável, sem considerar a taxa de reposição, que poderá estender consideravelmente esse período.

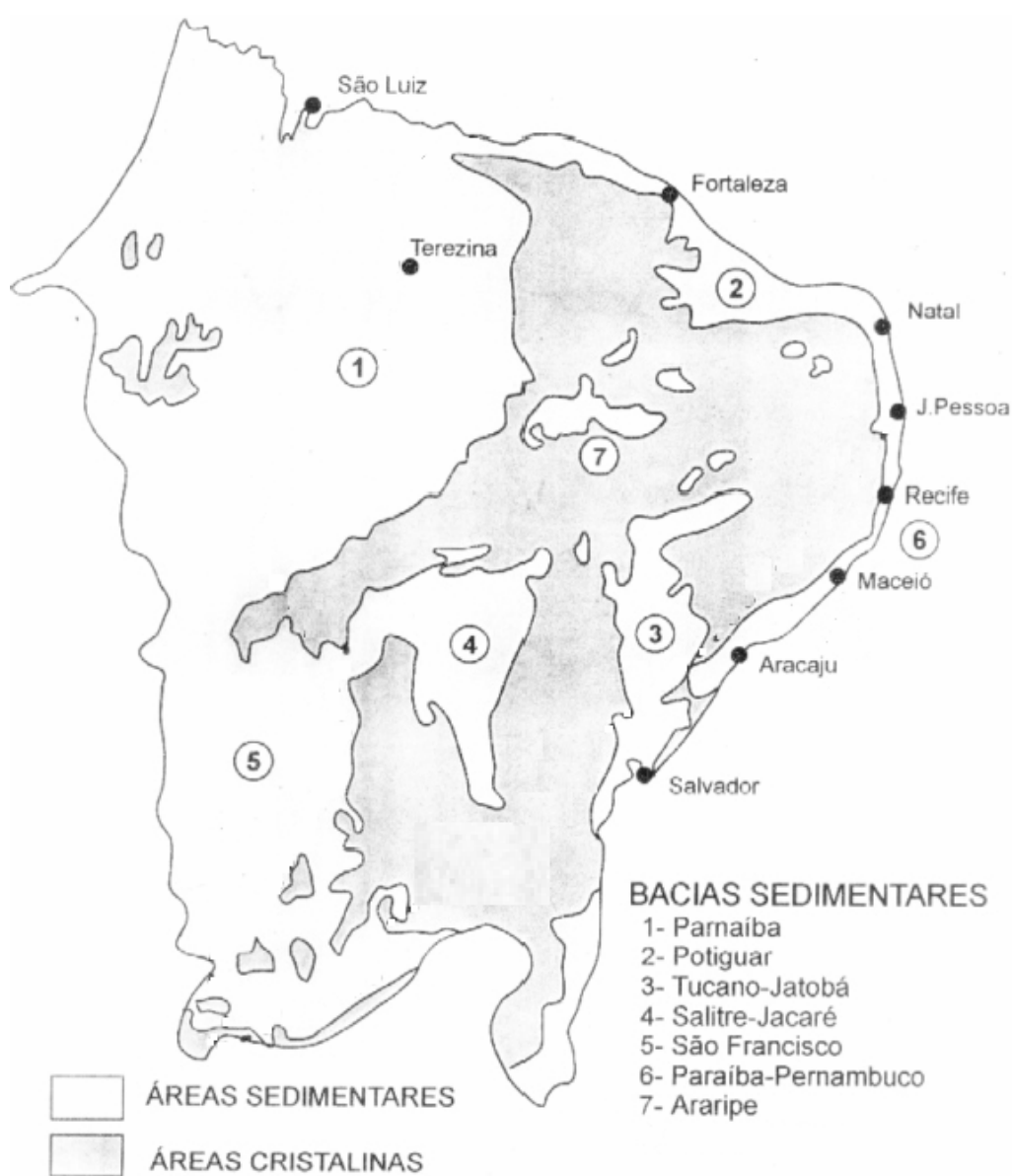


Figura 6 – Distribuição das Bacias Sedimentares e Cristalinas no Nordeste do Brasil

(Fonte: Atlas IBGE/SUDENE)

2.3.3 Qualidade das águas subterrâneas

Uma correta interpretação da qualidade da água para irrigação requer que os parâmetros analisados estejam relacionados com os efeitos no solo, nos cultivos e com o manejo da irrigação. Pode-se afirmar que qualquer tipo de água pode degradar o solo, se os devidos cuidados quanto ao manejo da irrigação não forem tomados. Por isto, quando se admite determinada qualidade de água para irrigação, subentende-se que se trata do manejo agrônômico adequado para cada tipo de água em relação ao tipo de solo e a pluviometria do lugar em questão.

As águas que provêm das planícies sedimentares, principalmente em áreas de aluvião são, de maneira geral, de boa qualidade. Os recursos hídricos que têm origem nas formações cristalinas se caracterizam por serem de baixa qualidade, aparecem em forma descontínua e são armazenados em aquíferos fissurais. São águas bastante cloradas, com alto teor de sal dissolvido.

Uma informação preliminar do projeto “Cadastro da Infra-estrutura Hídrica do Nordeste” realizado pelo Ministério de Minas e Energia, oferece uma idéia bastante representativa do comportamento regional. A Tabela 11 mostra um perfil da salinidade da água obtida no levantamento de 15.338 poços tubulares localizados, em sua maior parte, na região semi-árida.

Tabela 11 - Distribuição de poços tubulares pela qualidade da água na região semi-árida

Classificação	Referência	Número de poços
Água doce	< 501 mg/l de STD*	3851 (25%)
Salobra	501 a 1500 mg/l de STD	5120 (33%)
Salgada	>1500 mg/l de STD	6367 (42%)
Total		15338 (100%)

*STD: Sólidos Totais Dissolvidos

Fonte: <http://www.cprm.gov.br/rehi/projeto.pdf>. “Relatório preliminar, 1a etapa, 225.000 km²”.

Apesar da prevalência dos poços com qualidade salina, existe um número expressivo (25%) com qualidade de água adequada para atender as necessidades da população.

Cabe mencionar que na região de formação cristalina podem ser encontrados também aquíferos com água de boa qualidade. Formações de origem sedimentar, ilhadas no interior da região de formação cristalina que poderiam ser igualmente exploradas para o abastecimento de água das comunidades locais. Por exemplo, verifica-se no estado de Pernambuco, a ocorrência de bacias de boa qualidade em diversos locais, apesar de se encontrar assentada sobre uma formação eminentemente cristalina.

A existência de água para abastecimento humano e a disponibilidade de um suprimento de energia possibilitarão o estabelecimento de políticas regionais que permitam associar as condições naturais e infra-estrutura, à distribuição espacial da população, proporcionando melhores condições de vida.

2.4 Escolha da cultura

A definição pelo cultivo da uva baseia-se no fato de ser um produto adaptado à região, que tem como referência o Pólo de Petrolina em Pernambuco. A videira é uma cultura perene, com sistema radicular profundo, podendo ajustar-se, até certo ponto, a um suprimento limitado de água.

A cultura de uva apresenta elevadas taxas de rentabilidade e de geração de empregos diretos por hectare cultivado. É uma cultura muito exigente em seu trato, durante todo o ciclo de produção, e, em consequência, de elevada taxa de ocupação de mão-de-obra, que pode chegar até seis pessoas por hectare.

Sua exportação beneficia-se dos nichos de mercado determinados pela entressafra dos principais países exportadores.

2.5 Irrigação no Nordeste

O clima da região semi-árida do Nordeste, com seu elevado nível de radiação, é altamente propício para o desenvolvimento de cultivos irrigados, procedimento que aparece como uma forma de superar a ausência de precipitações regulares e abundantes o suficiente para atender sua demanda de água. A irrigação é um tema polêmico, devido aos

problemas de salinização dos solos a que pode dar origem se não forem adotados todos os cuidados necessários, especialmente drenagem. A superfície irrigada tem crescido consideravelmente nas últimas décadas, tal como pode ser visto na seguinte Tabela 12.

Tabela 12 – Evolução da superfície irrigada no Brasil e no Nordeste (1950-2001)

PERÍODO	BRASIL (ha)	NORDESTE (ha)
Até 1950	64000	100
Até 1960	320.000	28.600
Até 1970	796.000	116.000
Até 1975	1.100.000	163.400
Até 1980	1.600.000	261.400
Até 1985	2.100.000	335.800
Até 1990	2.700.000	-
Até 1998	2.870.000	495.000
Até 2001	3.149.000	663.672

Fonte: (CHRISTOFIDIS, 2001; CODEVASF, internet acesso agosto 2005).

Deve-se destacar que se trata de um tipo de irrigação com alto insumo tecnológico, elevado consumo de água e energia, procedimento que não é adequado para o objetivo básico deste estudo, que focaliza essencialmente a agricultura familiar.

2.5.1 Potencial hídrico para irrigação

A região Nordeste apresenta baixo índice pluviométrico, além de ter seus recursos hídricos concentrados. O complemento hídrico para atender ao consumo da

cultura poderia provir do potencial de águas subterrâneas da região. Tomando-se como referência as bacias sedimentares do estado de Pernambuco, cujo nível estático varia entre 7 e 100 metros, verifica-se que as designadas com os números 3 a 10 (Figura 7) encontram-se dentro da região semi-árida, sete delas concentradas no Norte do estado e uma nas proximidades do Rio São Francisco.

Na Tabela 13 são apresentadas as reservas permanentes e exploráveis dos aquíferos principais de sete bacias sedimentares da região semi-árida do Estado de Pernambuco. Destaca-se também a capacidade de produção dos poços, visto que essa informação serve inicialmente como parâmetro de referência, para avaliar o potencial de utilização em culturas irrigadas.



Designação das Bacias Sedimentares

- | | | |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1- Bacia PE-PB | 4- Bacia do Araripe | 7- Bacia de Mirandiba |
| 2- Bacia do Cabo | 5- Bacia do Cedro | 8- Bacia de Carnaubeira |
| 3- Bacia do Jatobá | 6- Bacia de São José do Belmonte | 9- Bacia de Betânia |
| | | 10- Bacia de Fátima |

Figura 7 – Distribuição das Bacias Sedimentares em Pernambuco (Fonte: CPRM)

Tabela 13 - Características das Bacias Sedimentares do Estado de Pernambuco

Bacia Sedimentar	Aqüíferos Principais	Área (km²)	Reservas Permanentes (milhões de m³)	Reservas Exploráveis (milhões de m³/ano)	Capacidade de Produção (m³/h/poço)
Jatobá	São Sebastião	1.550	46.500	93	5-30
	Inajá	2.700	70.000	142,2	5-250
Fátima	Tacarutu	270	500	2.000	20-70
Mirandiba	Tacarutu	70	55	200	5-70
Betânia	Tacarutu	175	140	500	5-70
Belmonte	Tacarutu	700	580	2.300	5-70
Cedro	Mauriti	275	320	500	15
Araripe	Missão Velha	2500	2.500	10.000	5-150

Fonte: CPRM

No trabalho publicado por FRAIDENRAICH e COSTA (1988), verificou-se que o consumo hídrico médio diário exigido para o cultivo da videira na região do Submédio São Francisco era de 20 m³/ha dia. Observando a coluna da capacidade de produção do poço, na Tabela 13, e considerando que um sistema de bombeamento fotovoltaico trabalhe durante 5 horas por dia, verifica-se que a vazão disponível na situação mais crítica (5 m³/h/poço) pode suprir, ainda, a demanda de água de 1 ha de cultura irrigada.

2.6 Escolha do sistema de irrigação

A irrigação pode ser feita por distintos métodos e sistemas, cada um com características próprias. Os principais métodos de irrigação são por superfície, aspersão e

irrigação localizada. Na irrigação por superfície, os sistemas de inundação e sulcos são mais comuns. Estes sistemas não são adequados para áreas com terrenos bastante acidentados, devido à dificuldade de estabelecer o sistema, para áreas com terrenos arenosos, onde a taxa de infiltração é alta. São os sistemas que mais consomem água.

O método de irrigação por aspersão é composto pelos sistemas de aspersão convencional (podendo ser tanto sobre, como sub-copa) e, principalmente, pelos pivôs centrais. Estes sistemas normalmente gastam menos água que o método anterior, mas necessitam de investimentos na aquisição de equipamentos e têm um custo de operação considerado elevado, uma vez que trabalham a altas pressões, necessitando de motores de grande porte.

Os principais sistemas que compõem o método de irrigação localizada são a microaspersão, o gotejamento e recentemente as fitas gotejadoras. São os sistemas que consomem menos energia e água, pois se caracterizam pela baixa pressão de serviço e também por molhar apenas parte da superfície do solo. Seu uso tem sido bastante incrementado nos últimos anos. A prática da fertirrigação, neste sistema localizado, é bastante utilizada, levando à uma maior economia e eficiência dos fertilizantes.

2.6.1 Sistemas de irrigação localizada por fitas gotejadoras

Compreende a aplicação de água em apenas uma fração da área cultivada, em alta frequência e baixo volume, mantendo o solo na zona radicular das plantas sob alto regime de umidade. A área mínima molhada deve ser de aproximadamente $1/3$ da área sombreada (ou projeção da copa das plantas no solo). A área de solo molhado exposto à atmosfera fica bem reduzida e, conseqüentemente, a perda de água por evaporação direta do solo é menor. A água aplicada por estes sistemas penetra no solo e se redistribui formando um bulbo molhado, cuja forma e tamanho dependem da vazão aplicada, do tipo de emissor, da duração da irrigação e do tipo de solo. A infiltração ocorre em todas as direções, porém, no sentido vertical é mais pronunciada quando o solo apresenta características arenosas.

Algumas características importantes deste tipo de irrigação são: (a) O gotejamento aplica água em pontos, utilizando emissores denominados gotejadores; (b) As vazões atingem até 20 l/h em cada ponto de emissão; (c) Os gotejadores operam sob pressões inferiores a 10 mca.

Pode-se concluir portanto que o sistema de gotejamento apresenta características adequadas à sua integração com sistemas de bombeamento fotovoltaico.

2.6.1.1 Descrição de um sistema de irrigação localizada por fita gotejadora

Um sistema completo é composto das seguintes partes: emissores (gotejadores ou microtubos), tubulações (linhas laterais, secundárias e de derivação) para distribuição da

água e cabeçal de controle (conjunto motobomba, sistema de filtragem, injetores de fertilizantes, sistema de controle de pressão e vazão), além de acessórios e conexões indispensáveis para operação e manejo do sistema no campo.

Esquema físico

1) Emissores: Os emissores são dispositivos que controlam a saída de água, desde as linhas laterais, em pontos discretos ou contínuos. Distinguem-se em mangueiras ou tubulações de gotejadores (tubo gotejador, mangueira porosa, mangueira perfurada). As características fundamentais que deve apresentar um emissor, e que definem sua escolha, referem-se à uniformidade e constância da vazão, reduzida sensibilidade a obstruções, elevada uniformidade de fabricação, resistência à agressividade química e ambiental, estabilidade da relação pressão-vazão, reduzida perda de carga nos sistemas de conexão, resistência ao ataque de insetos e/ou roedores e baixo custo de aquisição.

2) Tubulações e mangueiras: Em sistemas de irrigação localizada as tubulações são normalmente de polietileno (baixa e média densidade) ou de PVC (linha principal), de acordo com a ordem de funcionamento. Devem ser muito bem dimensionadas, atendendo às condições hidráulicas e de operação requeridas. No custo do sistema de irrigação, correspondem de 60 a 70% do valor total.

Linhas laterais - são as tubulações de última ordem no sistema, sobre as quais são conectados os emissores. Devem ser dimensionadas de forma a permitir que os emissores

distribuem a água com um adequado grau de uniformidade, minimizando a variação de vazão ao longo do seu comprimento.

Linhas de derivação - são tubulações que alimentam as linhas laterais; hidraulicamente são iguais a essas, pois são de múltiplas saídas, dimensionadas de forma que permitam uma pressão adequada no início de cada lateral, derivando a vazão necessária para cada uma delas.

Linhas secundárias - estas linhas abastecem as de derivação e nem sempre são necessárias. Entretanto, quando a área irrigada é grande, exigindo sua divisão em várias subunidades de irrigação, agrupam as subunidades que funcionam simultaneamente, alimentando-as com uma tubulação denominada linha secundária. O dimensionamento das tubulações deve se basear em critérios econômicos, cujos diâmetros mais comuns se encontram na faixa de 20 a 80 mm e podem ser de polietileno ou PVC.

Linha principal - é a tubulação que conduz a água da motobomba, passando pelo cabeçal de controle, até as linhas secundárias. Podem ser de PVC ou até mesmo de polietileno de alta densidade, dependendo das condições de pressão a qual será submetida.

3) Cabeçal de controle: Denomina-se cabeçal de controle ao conjunto de elementos que permite o tratamento da água de irrigação, sua filtragem, medição, controle de pressão e aplicação de fertilizantes. Sua composição pode variar em muitos casos. Por exemplo, há instalações em que os fertilizantes são aplicados a partir do cabeçal de controle; entretanto,

em outras, as aplicações são realizadas nas unidades de irrigação. Muitas vezes a água apresenta alguns problemas de qualidade que limitam o seu uso em sistemas localizados, podendo provocar a obstrução dos emissores. Em alguns casos antes da filtragem é necessário tratamento químico para eliminação de algas, utilizando-se oxidantes como hipoclorito de sódio. Outro caso é a aplicação de ácidos para evitar a formação de precipitados de cálcio.

Os filtros de areia são elementos típicos e indispensáveis para a eliminação de algas, impurezas orgânicas e vegetais e retenção de partículas minerais. Sempre é conveniente a instalação de dois filtros, facilitando a limpeza, sem parada de todo o sistema. Os filtros de tela são sempre necessários logo após o equipamento de fertirrigação para eliminar impurezas, provenientes dos adubos dissolvidos. A maioria dos filtros disponíveis no mercado são providos de mecanismos que facilitam a limpeza. Obrigatoriamente, o equipamento de fertirrigação não poderá ser instalado antes dos filtros de areia.

2.7 Tipos de solo para irrigação na região Nordeste

A videira pode ser cultivada em, praticamente, todos os tipos de solos. Deve-se, entretanto, evitar solos rasos, extremamente arenosos ou argilosos, solos com camada adensada ou compactada. CHRISTOFIDIS (1999) informa que o Nordeste tem 1104×10^3 hectares de solos aptos à irrigação. Dentre os solos predominantemente utilizados nas áreas irrigadas da região Nordeste, destacam-se:

- 1) Areias Quartzosas com 90% de areia;

- 2) Latossolos com teor de areia variando em torno de 78%;
- 3) Vertissolos com teor de argila em torno de 70%.

A importância na obtenção das características do solo visa auxiliar na definição do manejo agrícola, como também, na especificação do sistema de irrigação.

2.8 Conclusões

Observa-se que importantes áreas da região Semi-árida do Nordeste contam com expressivas reservas de água de origem sedimentar.

Pernambuco apresenta um potencial de águas subterrâneas que pode ser aproveitado em sistemas de irrigação acionados pela tecnologia de bombeamento fotovoltaico.

Propôs-se integrar o cultivo da uva a sistemas BFV, por ser uma cultura adaptada à região semi-árida e apresentar elevadas taxas de ocupação de mão-de-obra e de valor agregado.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DO CONCENTRADOR DE CAVIDADE TIPO V

3.1 Introdução

O uso de concentradores tipo V acoplados a geradores fotovoltaicos foi adotado devido ao fato destes apresentarem extrema simplicidade construtiva, podendo ser utilizados com células solares convencionais, além de serem compatíveis com sistemas de dissipação natural de calor, e de garantirem uma distribuição de luz uniforme.

A utilização dos concentradores tipo V requer o conhecimento detalhado de suas propriedades óticas. Entre elas pode-se mencionar o perfil de iluminação na região absorvedora, a identificação das cavidades com iluminação uniforme e o cálculo da eficiência ótica.

A radiação incidente na sua abertura desdobra-se em uma fração que atinge o absorvedor, denominada radiação aceita, e uma fração que retorna à abertura, denominada radiação rejeitada (FRAIDENRAICH e ALMEIDA, 1991; FRAIDENRAICH, 1992). É apresentado de forma unificada o comportamento da cavidade com relação a ambas frações de radiação. A estrutura ótica é analisada categorizando os raios incidentes na sua abertura

de acordo com o número de reflexões experimentadas ao longo de sua trajetória no interior da cavidade.

Em primeiro lugar serão descritos a concepção da cavidade e aspectos relativos à sua geometria e ótica. Posteriormente, serão apresentadas soluções analíticas que permitem calcular a função de aceitação angular, a eficiência ótica da cavidade e a concentração efetiva.

3.2 A concepção da cavidade do concentrador tipo V

Um procedimento otimizado para determinar os parâmetros de cavidade tipo V acoplados a módulos fotovoltaicos é descrito por FRAIDENRAICH (1998). Os critérios que devem satisfazer às cavidades do concentrador são:

- (a) Distribuição de luz uniforme sobre a superfície dos módulos;
- (b) O aquecimento na região absorvedora deve ser dissipado de forma natural;
- (c) Pequenos desvios no alinhamento do rastreador são permitidos, desde que, a iluminação do absorvedor (módulos) satisfaça o critério estabelecido no item (a).

3.3 Geometria das cavidades tipo V

As cavidades tipo V dependem de dois parâmetros: o ângulo do vértice (Ψ) e a relação de concentração (C), definida como

$$C = \frac{A}{a} \quad (1)$$

onde (A) e (a) são a largura da abertura e do absorvedor, respectivamente (Figura 8).

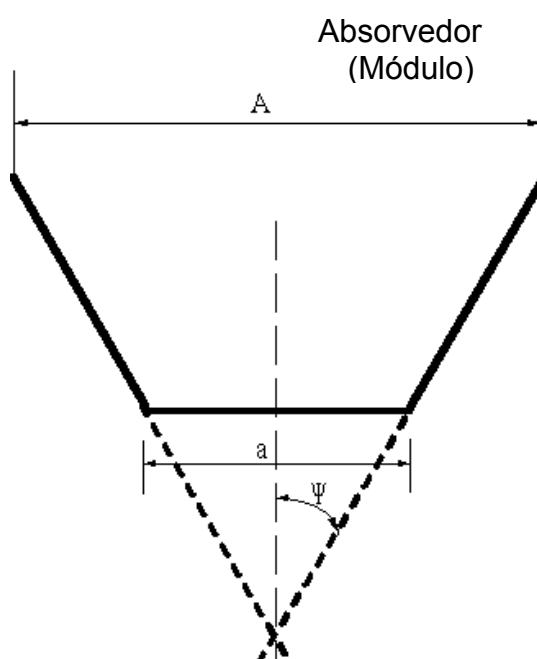


Figura 8 - Seção transversal do concentrador de cavidade V.

Se o concentrador é utilizado em conjunto com módulos fotovoltaicos para produzir energia elétrica, a relação de concentração (C) e o ângulo do vértice (Ψ) podem ser escolhidos de forma tal que minimizem o custo de energia produzida. Para o clima local (Recife, latitude 8,05 sul, $K_t=0.55$) os parâmetros geométricos que satisfazem tal condição são $C = 2.2$ e $\Psi = 30^\circ$ (FRAIDENRAICH, 1998).

3.4 Propriedades óticas da cavidade tipo V

O comportamento ótico da cavidade está definido pela função de aceitação angular, $F(\theta_i)$, que expressa a fração de radiação, incidente sobre a abertura da cavidade com um ângulo θ_i , capaz de alcançar o absorvedor. Parte dos raios que incidem na abertura com esse ângulo podem se propagar ao longo da cavidade e retornar ao exterior. O ângulo θ_i (Figura 9) é formado pela projeção da radiação direta no plano transversal da cavidade com a normal à superfície dos módulos. A função $F(\theta_i)$, para uma cavidade com iluminação uniforme no absorvedor, é ilustrada na Figura 10.

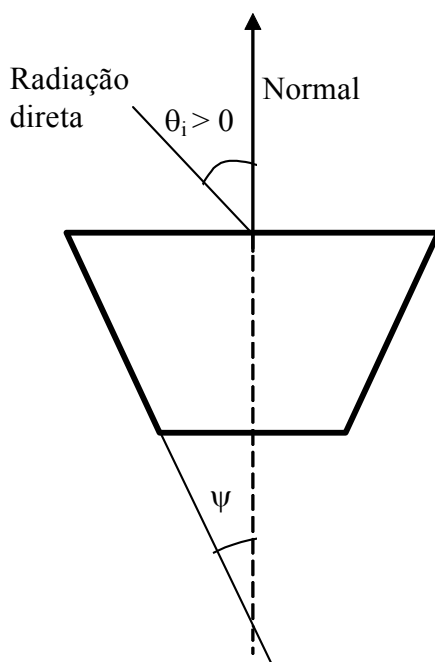


Figura 9 – Geometria do concentrador tipo V

As propriedades da cavidade são simétricas com respeito a ângulos positivos e negativos. Ou seja, que $F(\theta_i) = F(-\theta_i)$. No que segue, tem-se referência às propriedades da função $F(\theta_i)$, só para ângulos positivos.

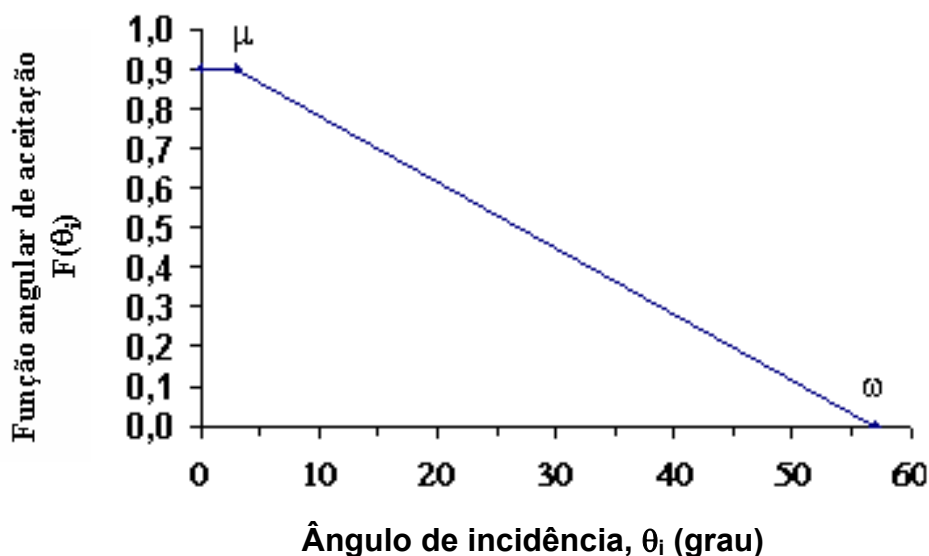


Figura 10 - Função de aceitação angular da cavidade tipo V com $C=2.2$ e $\Psi=30^\circ$.

De maneira geral a função $F(\theta_i)$ é menor que 1 (Figura 10), ou seja, uma fração dos raios incidentes em todo o intervalo de aceitação angular é rejeitada pela cavidade. Essa fração aumenta com o ângulo de incidência. No limite de aceitação angular (ω) a função é igual a zero.

Para ângulos incidentes $|\theta_i| \leq \mu$ (Figura 10) a iluminação na região do absorvedor, onde os módulos fotovoltaicos estão localizados, é uniforme. O ângulo μ é um parâmetro

de projeto, permitindo um desvio da incidência normal dos raios luminosos sem alterar a uniformidade da iluminação. FRAINDENRAICH (1998) obteve a seguinte expressão para tangente do ângulo μ em função do C e ψ

$$\tan \mu = - \frac{\frac{2}{C-1} \sin(\psi) \cdot \cos(2\psi) - \sin(\psi)}{\frac{2}{C-1} \sin(\psi) \cdot \sin(2\psi) + \cos(\psi)} \quad (2)$$

Para $C=2.2$ e $\psi = 30^\circ$, o intervalo definido pelo ângulo μ é igual a 3° , o que possibilita 12 minutos de desvio do sol em relação ao plano de simetria do concentrador, tanto antes como depois desse plano (-3° a 3°).

Como pode ser observado na Figura 10 a função de aceitação angular na origem é menor que 1. Isto significa que uma fração dos raios com incidência próxima da normal à cavidade são rejeitados. Para ângulos de incidência $\theta_i \leq \mu$ a função $F(\theta_i)$ pode ser calculada como

$$F(\theta_i) = \frac{1 + 2 \cos(2\psi)}{C} \quad \theta_i \leq \mu \quad (3)$$

Para $C=2.2$ e $\psi=30^\circ$, determina-se o valor de 0,909. A rejeição dos raios luminosos é o preço pago pelo benefício da uniformidade de iluminação dentro do

intervalo angular $\theta_i \leq \mu$. Quanto maior for o valor do intervalo angular de uniformidade de iluminação (μ), maior será a fração de raios rejeitados ($1 - F(\theta_i)$).

Finalmente, o ângulo (ω) pode ser calculado como

$$\tan \omega = \frac{C + 1}{C - 1} \tan \psi \quad (4)$$

para $C = 2,2$ e $\psi = 30^\circ$, (ω) é igual a 57° .

A eficiência óptica da cavidade é limitada pelo valor de $F(\theta_i)$ no intervalo $\theta_i \leq \mu$. Para o cálculo da eficiência óptica da cavidade (η_V), devem ser consideradas também as perdas no espelho.

$$\eta_V = F(\theta_i) \cdot \eta_m \quad \theta_i \leq \mu \quad (5)$$

onde (η_m) é a eficiência óptica das paredes do espelho das cavidades.

3.5 Concentração efetiva

As propriedades mencionadas na seção anterior se referem a raios luminosos que têm uma direção bem definida (θ_i) que no caso da radiação solar está representada pela radiação direta.

Entretanto, a componente difusa assim como o albedo atingem a abertura da cavidade e se propagam no seu interior, uma fração desses raios alcança o absorvedor.

Nesta seção estima-se a irradiância total (I_a) que atinge o absorvedor da cavidade quando a irradiância (I_A), constituída por uma componente direta (I_{bA}) e uma componente difusa (I_{dA}) incidem na sua abertura. A componente direta (I_{bA}) pode ser calculada em função da irradiância total (I_A) e a irradiância difusa (I_{dA}).

$$I_{bA} = I_A - I_{dA} \quad (6)$$

Ambos valores foram obtidos experimentalmente, no concentrador localizado na área de teste do Grupo de Fontes Alternativas de Energia da UFPE descrito no Capítulo IV, utilizando-se radiômetros instalados na parte superior, próximos da abertura da cavidade (Figura 11).



Figura 11 – Posicionamento dos radiômetros na abertura da cavidade.

A relação entre a irradiância no absorvedor da cavidade (I_a) e abertura (I_A) define a concentração efetiva da cavidade ($C_{ef} = I_a/I_A$).

Este parâmetro varia em função da componente difusa da radiação incidente na abertura. Com o propósito de estimar a relação existente entre a C_{ef} e I_a/I_A , analisou-se o comportamento da cavidade para as componentes direta e difusa da radiação solar incidente na sua abertura.

Denominou-se $P_0(0)$ a fração dos raios luminosos que incide normalmente na abertura da cavidade e se propagam ao longo da mesma cavidade alcançando o absorvedor sem reflexão. Pode-se verificar que para raios com incidência normal a fração $P_0(0)$ é igual a $1/C$. Analogamente, a fração dos raios luminosos que incidem na abertura da cavidade com incidência normal e atinge o absorvedor, após fazer uma reflexão no espelho direito da cavidade, é chamada $P_1(0)$ (FRAIDENRAICH, 1992), e é definida pela expressão

$$P_1(0) = \frac{2 \cos 2\psi}{C} \quad (7)$$

Admite-se que o máximo número de reflexões que os raios luminosos fazem no seu percurso da abertura até o absorvedor é igual a um. Portanto, dada a radiação direta na abertura (I_{bA}), o fluxo luminoso que alcança o absorvedor (I_{ba}) pode ser estimado como

$$A_a \cdot I_{ba} = A_A \cdot I_{bA} [P_0(0) + P_1(0)\rho] \quad (8)$$

ou

$$I_{ba} = C \cdot I_{bA} \cdot \eta_V \quad (9)$$

onde (A_a) e (I_{ba}) são a área do absorvedor e a irradiância direta na região do absorvedor, respectivamente. (A_A) e (I_{bA}) são a área da abertura do concentrador e a irradiância direta na abertura da cavidade, (ρ) a refletividade do espelho e (η_V) a eficiência ótica da cavidade para radiação direta, definida como

$$\eta_V = P_0(0) + P_1(0)\rho \quad (10)$$

De forma análoga, a radiação difusa que alcança o absorvedor pode ser escrita como

$$I_{da} = C \cdot I_{dA} \cdot E_{Aa} \quad (11)$$

onde (E_{Aa}) define a fração da radiação difusa incidente na abertura que atinge o absorvedor (fator de intercâmbio radiante).

A radiação no absorvedor (I_a) , em função da irradiância direta e difusa na abertura do concentrador, pode portanto ser escrita como

$$I_a = C [I_{bA} \cdot \eta_V + E_{Aa} \cdot I_{dA}] \quad (12)$$

Substituindo (I_{bA}) por ($I_A - I_{dA}$), a Equação (12) resulta igual a

$$\frac{I_a}{I_A} = C \cdot \eta_V \cdot \left[1 - \frac{I_{dA}}{I_A} \left(\frac{\eta_V - E_{Aa}}{\eta_V} \right) \right] \quad (13)$$

onde a relação (I_a/I_A) é a concentração efetiva (C_{ef}).

Os valores que correspondem aos parâmetros $P_0(0)$ e $P_1(0)$ são iguais a $(1/C)$ (Eq. 7). Considerando-se espelhos comerciais formados por uma lâmina de vidro de 3 mm com cobertura de prata na face posterior. Raios com incidência normal na abertura atingem as paredes do concentrador com ângulo de incidência igual a 60° . Para essa estrutura do espelho foi estimada uma refletividade igual a 0,80 (refletividade da prata igual a 0,90). A eficiência ótica (η_V) resulta portanto igual a 0,82. O fator de intercâmbio radiante entre abertura e absorvedor (E_{Aa}), considerando as perdas por reflexão nas paredes do espelho, é igual a 0,455 (FRAIDENRAICH, 1995). Introduzindo valores numéricos na Equação (13), obtém-se

$$\frac{I_a}{I_A} = 1,80 - 0,86 \frac{I_{dA}}{I_A} \quad (14)$$

3.6 Resultados e conclusões da performance ótica da cavidade do tipo V

Os valores teóricos da Equação (14) e os resultados experimentais obtidos com o concentrador instalado no Grupo FAE, para a concentração efetiva das cavidades ($C_{ef} =$

I_a/I_A), são representadas na Figura 12, para uma variação da fração da irradiação difusa coletada no plano de abertura (I_{dA}/I_A).

Verifica-se que a concentração efetiva varia entre 1,60, para uma relação de I_{dA}/I_A igual a 0,15 e 1,13, para $I_{dA}/I_A = 0,80$. Os resultados obtidos com a Equação (14) ficam bem dentro dos limites de variabilidade dos valores medidos, com uma pequena diferença entre a medida experimental e a estimada.

Esta verificação permite afirmar que as cavidades constituídas satisfazem os critérios de projeto no que se refere tanto à sua geometria quanto ao seu desempenho ótico, em todas as situações físicas que o sistema atravessa ao longo do seu movimento diário.

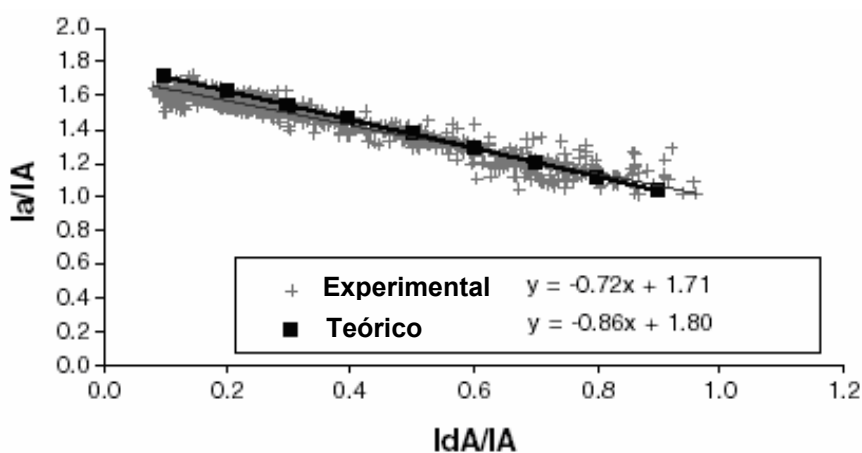


Figura 12 – Valores teóricos e experimentais da concentração efetiva da cavidade tipo V versus (I_{dA}/I_A).

A validade da Eq. (14) permite fazer estimativas e simulações relativas ao comportamento do gerador fotovoltaico acoplado à cavidade tipo V, instalado na área de

testes do Grupo FAE, a partir de medidas de irradiância total e difusa na abertura da cavidade.

CAPÍTULO IV

DESEMPENHO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA COM GERADORES FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS AO CONCENTRADOR TIPO V

4.1 Introdução

Arranjos fotovoltaicos dispostos sobre sistemas de rastreamento solar, acoplados a cavidades tipo V, têm sido propostos com a finalidade de proporcionar um acréscimo na energia gerada por esses sistemas (NANN, 1990; FREILICH e GORDON, 1991; KLOTZ, 1995; FRAIDENRAICH, 1998). Entretanto, outras aplicações, tais como as relativas a sistemas de bombeamento acionados por geradores fotovoltaicos com concentradores tipo V, só são encontradas em publicações recentes (BIONE et al, 2004).

O comportamento do sistema de bombeamento fotovoltaico (BFV) pode ser analisado através da relação existente entre a vazão de água bombeada e radiação solar coletada ($\dot{V}$ vs. I_{col}), relação denominada curva característica (Figura 13). Do ponto de vista analítico pode ser representada por um polinômio de segundo grau, que constitui uma boa aproximação para as curvas características de vários tipos de bomba, e.g. centrifugas e de cavidade progressiva

(LOXSON e DURONGKAVEROJ, 1994; VILELA, 1996; FRAIDENRAICH e VILELA, 1999).

O volume diário de água bombeada por sistemas de bombeamento fotovoltaico depende significativamente do nível crítico de radiação solar (valor mínimo de irradiância, (I_C), a partir do qual o sistema começa a bombear). Durante o período que a radiação é menor que (I_C) o sistema não bombeia. Níveis críticos elevados reduzem o tempo operacional diário e, conseqüentemente, o volume de água bombeada. Para contornarmos este problema, em um determinado sistema de bombeamento operando com uma altura de recalque definida, pode-se aumentar a potência do gerador fotovoltaico ou recorrer a rastreadores solares e concentradores.

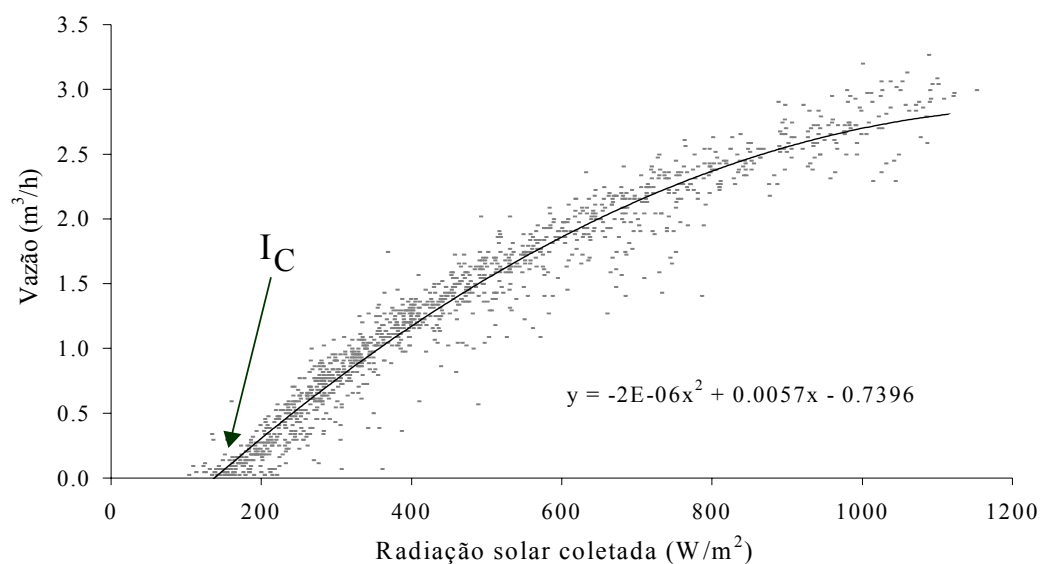


Figura 13 – Curva característica de um sistema de bombeamento fotovoltaico

Para um determinado sistema de bombeamento, a curva característica independe do tipo de gerador fotovoltaico, seja este fixo, com rastreamento ou concentração. Ela depende exclusivamente da irradiância coletada no plano do gerador.

Na Figura 14 está representada a radiação coletada por um sistema fixo e por um sistema com rastreamento. Está indicado também, o nível de irradiância crítica (I_c). Valores de irradiância superiores a este último, haverão de se traduzir em água bombeada. Observa-se que o sistema com rastreamento gera valores superiores a (I_c) durante um período de tempo maior que o sistema fixo. Ao mesmo tempo, e como outra manifestação do efeito de rastreamento, a radiação coletada pelo rastreador é maior que a radiação coletada pelo sistema fixo.

Concluindo, o rastreamento se traduz não só em um aumento do tempo de operação do sistema, mas também no volume de água bombeada. Os concentradores de radiação solar aumentam estes benefícios.

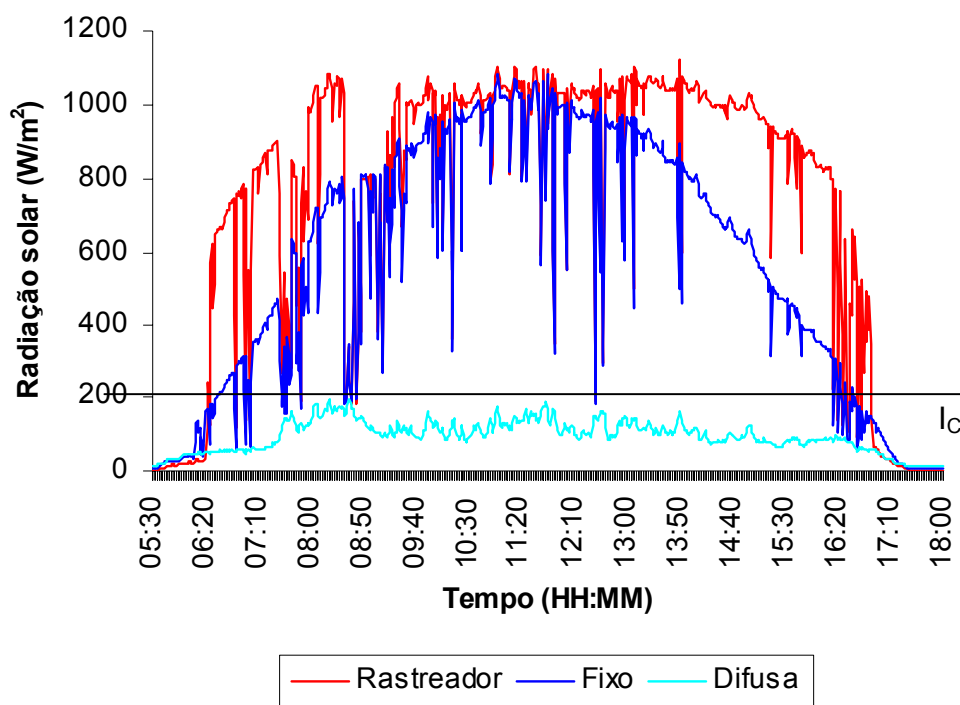


Figura 14 - Radiação solar coletada no plano do rastreador, radiação solar coletada em um plano fixo inclinado de (-20°) e radiação solar difusa.

A Figura 15 mostra a radiação coletada por um plano fixo ($\beta = -20^\circ$), um rastreador e a radiação coletada no plano do absorvedor de uma cavidade tipo V acoplada a módulos fotovoltaicos. Observa-se o efeito de concentração da cavidade (ao meio dia este valor é da ordem de 1,6) e de uma certa assimetria na hora de iniciar e encerrar a coleção por parte do concentrador, devido, a este último, às características estruturais do sistema de rastreamento sobre o qual está montado o sistema de cavidades tipo V.

Pode-se apreciar também, na mesma figura, o benefício potencial decorrente do uso de concentradores quando comparados com sistemas de rastreamento ou sistemas fixos devido à diminuição relativa de (I_c) perante os valores de (I_{col}) que experimentam os sistemas mencionados.

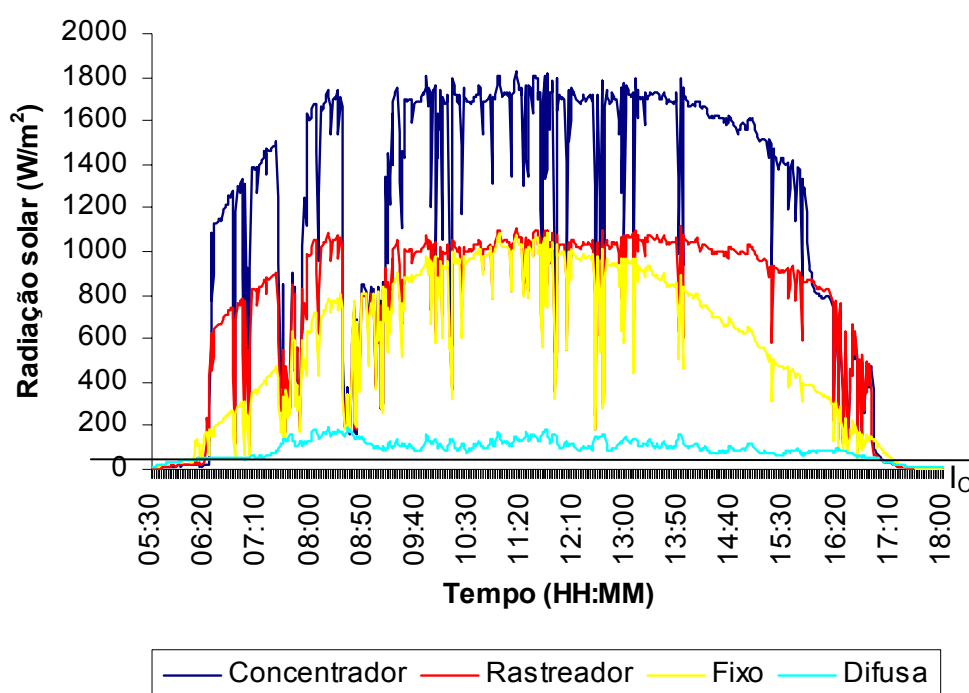


Figura 15 - Radiação solar coletada no plano do concentrador, no plano do rastreador, radiação solar coletada em um plano fixo inclinado de (-20°). Na parte inferior da figura registra-se também a radiação solar difusa.

O registro do volume diário bombeado nos três modos operacionais (Figura 16) permite verificar o benefício do rastreamento e da concentração de radiação solar, especialmente nas primeiras e últimas horas do dia. Este efeito pode se resumir expressando

que o aumento de energia útil, energia disponível para bombear água, é maior que o aumento de radiação coletada.

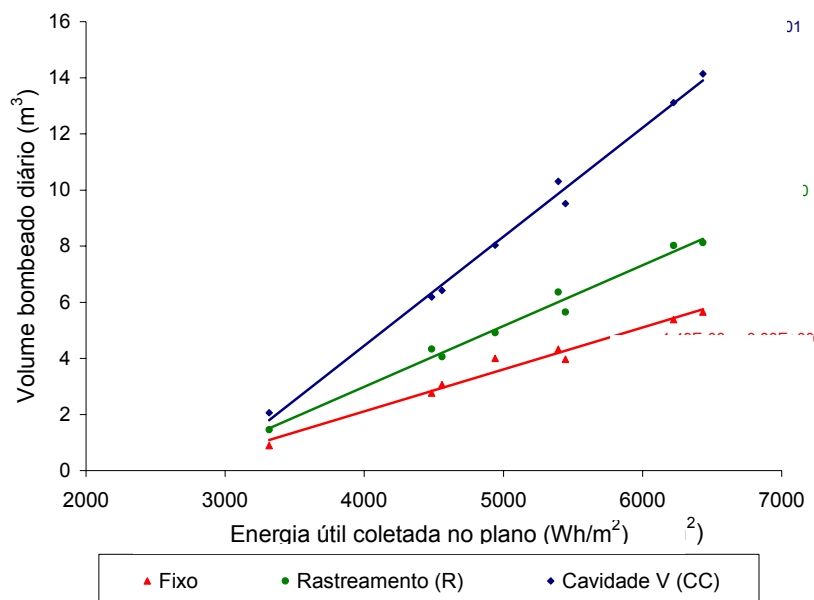


Figura 16 - Comparativo entre energia útil e água bombeada.

Conforme o Capítulo 3, as cavidades tipo V são particularmente adequadas para serem utilizadas com módulos fotovoltaicos já que, para determinadas combinações da relação de concentração (C) e ângulo do vértice (Ψ), proporcionam iluminação uniforme na região absorvedora, onde os módulos estão localizados. Esta condição deve ser satisfeita rigorosamente para que o acoplamento módulo-concentrador seja opticamente correto.

Neste capítulo, são apresentados resultados obtidos com um sistema de bombeamento FV, operando com um gerador fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V. São simulados também os resultados que seriam obtidos com um gerador fotovoltaico fixo e com um gerador fotovoltaico acoplado a um sistema de rastreamento. A comparação dos resultados para as três

configurações, mostra que o benefício em água bombeada, do sistema com rastreamento e do sistema com concentração em relação ao sistema fixo pode ser bem maior que o benefício resultante da maior coleção de radiação solar, devido basicamente à existência de um nível crítico de radiação.

A Figura 17 apresenta o esquema do sistema de bombeamento fotovoltaico utilizado, que será descrito na próxima seção.

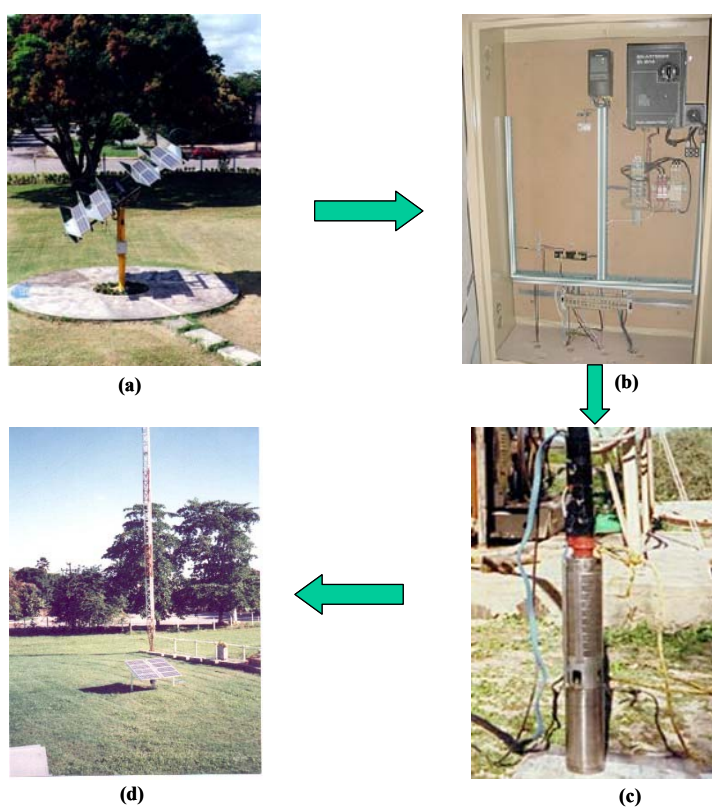


Figura 17 – Esquema do Sistema de Bombeamento Fotovoltaico: (a) Vista do concentrador fotovoltaico, (b) Sistema condicionador de potência, (c) Foto da bomba submersa, e (d) Simulador da carga hidráulica.

4.2 Descrição do sistema experimental

A composição do sistema experimental é formada pelos seguintes equipamentos e instrumentos:

1. Gerador fotovoltaico com concentrador tipo V;
2. Sistema de rastreamento;
3. Quadro de comando com o inversor de frequência;
4. Conjunto motobomba;
5. Bancada de teste para simulação da carga hidráulica;
6. Instrumentação: piranômetros, sensores de temperatura, divisor de tensão, shunt e datalogger.

4.2.1 Gerador fotovoltaico com concentrador tipo V

O gerador fotovoltaico acoplado a cavidades tipo V, possui as seguintes características

Tabela 14 – Características do concentrador com cavidade do tipo V

CAVIDADE CONCENTRADORA		GERADOR FOTOVOLTAICO	
Relação de concentração:	2,2	Nº de cavidades	4
Semiângulo do vértice:	30°	Nº de módulos	8 (2 módulos/cavidade)
Abertura da cavidade:	0,77 m	Largura	4,06 m
Comprimento:	3,00 m	Comprimento	3,00 m
Área de abertura	2,31m ²	Área de abertura total	12,18 m ²

O arranjo fotovoltaico está composto por 8 módulos monocristalinos de 53Wp (potência nominal) conectados em série. As características dos módulos fornecidas pelo fabricante são: tensão de máxima potência (V_{mp}) de 17,4 V, corrente de máxima potência (I_{mp}) de 3,05 A, tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 21,7 V e corrente de curto (I_{cc}) de 3,4 A.

Uma fotografia do concentrador tipo V com módulos fotovoltaicos, utilizado neste trabalho de Tese, é mostrada na Figura 18.



Figura 18 -Vista geral do concentrador fotovoltaico tipo V.

4.2.2 Sistema de rastreamento

O sistema de rastreamento consiste de uma estrutura metálica controlada por um circuito eletrônico formado por um sensor fotodiodo interligado a um motor CC com escovas e potência de $\frac{1}{4}$ CV. Através de um sistema de engrenagens, o motor aciona um braço mecânico do tipo telescópico, que realiza o movimento leste-oeste do rastreador (Figura 19).



Figura 19 – (a) Motor CC e o braço mecânico do tipo telescópico, (b) Sensor Fotodiodo (LDR).

O rastreador é do tipo ativo que pode envolver o uso de um ou mais motores elétricos em cada eixo de rastreamento do painel fotovoltaico. Com base nos experimentos e medições realizadas durante vários anos pelo grupo FAE (FRAINDENRAICH E BARBOSA, 1999); decidiu-se fazer um rastreador em apenas um eixo, pois com o concentrador do tipo V, o ganho em energia coletada pelo uso de dois eixos não foi julgado compensador em vista da

maior complexidade e custo em relação ao rastreamento em dois eixos. O motor é controlado por meio de um circuito eletrônico que recebe dados da posição do sol por meio de dois sensores do tipo LDR (resistores dependentes de luz), que são fixados em uma mesma estrutura. Esta estrutura tem forma tal que, com o movimento do sol, o **LDR 1** fica sombreado pela estrutura (sombreador), enquanto o **LDR 2** permanece iluminado pelo sol. O circuito de controle percebe esta condição e comanda o acionamento do motor para realinhar o painel fotovoltaico, para que ambos os sensores fiquem igualmente iluminados.

4.2.3 Quadro de comando com inversor de frequência

Montou-se um quadro de comando (Figura 20), onde reuniu-se todos os dispositivos de acionamento da moto-bomba. Este esquema de ligação facilita o manuseio do sistema, bem como, a identificação de defeitos e o acesso para medições das grandezas de tensão e corrente. O inversor utilizado é da marca GRUNDFOS modelo SA 1500, com dispositivo para busca de máxima potência.



Figura 20 – Inversor de frequência instalado no quadro de comando.

4.2.4 Conjunto motobomba

O conjunto moto-bomba (Figura 21) é composto por uma bomba centrífuga de dez estágios, do tipo submersa, marca Grundfos; e um motor assíncrono de 2 (dois) pólos do tipo gaiola de esquilo, 50 Hz, 3 x 65V, 550 W, corrente nominal de 8,8A e um fator de potência igual a 0,8. O conjunto motobomba opera com corrente alternada, sendo acionado pelo gerador fotovoltaico através de um inversor de 1500 W de potência nominal.



Figura 21 – Conjunto motobomba.

4.2.5 Bancada de teste para simulação da carga hidráulica

Para a realização das experiências, foi utilizada a Bancada de Teste de Bombeamento do grupo FAE da Universidade Federal de Pernambuco, que é composta por uma torre

metálica de 42 metros (Figura 22), tubulação de PVC de 2 polegadas e dois sensores de vazão da marca Krohne Conaut (IP 67, 5 VA, 4 – 20 mA) (Figura 23).



Figura 22 - Bancada de Teste para simulação de coluna d'água.



Figura 23– Sensor de vazão da marca Krohne Conaut.

4.2.6 Instrumentação

Todo o sistema de bombeamento fotovoltaico foi monitorado através de sensores localizados em pontos estratégicos. Todos os sinais gerados pelos sensores foram de corrente e tensão, transmitidos por cabos de sinais ao dispositivo de aquisição de dados (datalogger). As medidas foram realizadas em intervalos de tempo de 1 minuto.

Os sensores utilizados foram: Três piranômetros da marca Licor ($80\mu\text{A}$ por 1000 W/m^2), para medição da radiação: a) no absorvedor da cavidade, b) no plano da abertura do concentrador (Figura 24), e c) no plano fixo com inclinação de -20° (Figura 25);



Figura 24 – Posicionamento dos sensores na cavidade do concentrador V.

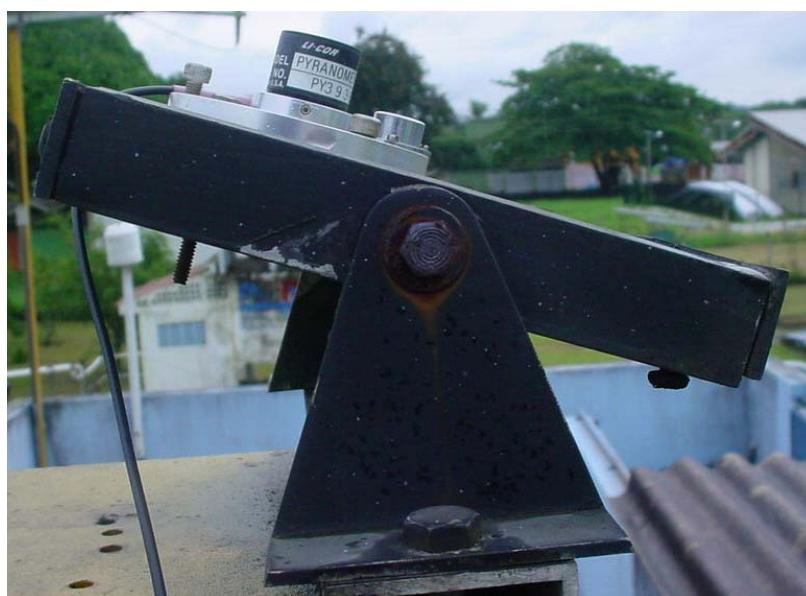


Figura 25 – Radiação coletada no plano de 20°.

- Dois piranômetros espectrais de 180° da marca Eppley ($9 \mu\text{V}/\text{m}^2$, 650Ω , 1 s), para medição da radiação total (Figura 26) e difusa no plano horizontal fixo (Figura 27);



Figura 26 – Piranômetro de marca Eppley para medição da radiação total.



Figura 27 – Piranômetro de marca Eppley e banda de sombra para medição da radiação difusa.

- Um piranômetro com sensor fotovoltaico, para medição da radiação difusa na abertura da cavidade do concentrador (Figura 28);



Figura 28 – Sensor fotovoltaico para medição da radiação difusa na abertura da cavidade tipo V.

- Oito sensores LM 35 de temperatura, para monitorar a variação da temperatura nos módulos;
- Divisor de tensão, para obtenção do sinal de tensão produzido pelo gerador;
- Banda de sombra para piranômetro de 180° exposto a latitudes de 0° - 60° para o hemisfério Norte ou Sul (Figura 27);

- Shunt de 10 A – 300 mV (Figura 29), dispositivo utilizado na aquisição do sinal de corrente.



Figura 29 – Dispositivo de aquisição do sinal de corrente (Shunt).

4.2.7 Aquisição de dados

Foi utilizado um Datalogger (Figura 30) que é o equipamento de aquisição de dados, onde todo o instrumental é acoplado. Recebe os sinais emitidos pelos sensores e posteriormente realiza o processamento. Interligado ao datalogger tem-se um computador, o qual permite a visualização em tempo real das grandezas monitoradas, permitindo desta forma o acompanhamento do funcionamento do sistema.



Figura 30 – Datallogger.

4.3 Metodologia experimental

Os trabalhos a serem descritos tiveram como objetivo quantificar os benefícios decorrentes do uso de sistemas fotovoltaicos com rastreamento e sistemas fotovoltaicos com concentração quando comparados com sistemas fixos de bombeamento de água.

Partindo do fato que a relação volume bombeado/dia versus radiação coletada no plano dos módulos fotovoltaicos é o mesmo, independentemente dos meios utilizados para iluminar os módulos, e desde que a radiação que atinge sua superfície esteja distribuída uniformemente, propõe-se a seguinte metodologia:

- a) Medir o volume de água bombeado por gerador fotovoltaico com concentrador tipo V.

- b) Determinar a relação existente entre a radiação coletada pelos módulos do gerador FV com concentração, a radiação coletada por um sistema com rastreamento e um sistema fixo.
- c) Expressar o volume bombeado pelas três configurações do gerador em função da radiação coletada pelo plano fixo, utilizado neste caso como plano de referência.

Uma vez que, para uma dada radiação coletada pelos módulos pertencentes à configuração fixa, a radiação coletada pelos módulos com rastreamento e os módulos com concentração é maior, é de se esperar também um crescente volume de água bombeada. O tipo de representação proposta em c) coloca em evidência o desempenho diferenciado das três configurações e permite com uma única experiência, por exemplo, com o gerador FV com concentração, a relação água bombeada versus radiação coletada, obtendo o desempenho das três configurações.

Para efeito de comparação do desempenho do concentrador com a geometria fixa e de rastreamento, foram monitoradas a radiação solar coletada nos seguintes planos:

- a) na abertura do gerador FV (Figura 24);
- b) na região absorvedora, onde estão localizados os módulos (Figura 24);
- c) no plano fixo inclinado de (-20°) (Figura 25);
- d) no plano horizontal (Figura 26).

Juntamente com as medidas de radiação solar hemisférica nos planos citados e a medida de radiação difusa no plano horizontal, foram realizadas medidas de vazão de água bombeada, corrente elétrica e tensão na saída do gerador fotovoltaico.

4.3.1 Representação do comportamento do sistema para os três modos operacionais

O procedimento proposto para realizar estas estimativas utiliza a relação entre vazão de água bombeada pelo sistema ($\dot{V}$) em função da radiação solar coletada (I_{col}), ou seja, a curva característica do sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V. Essa relação foi obtida de forma experimental, medindo a vazão de água e a irradiância, coletada no plano do absorvedor (Figura 31).

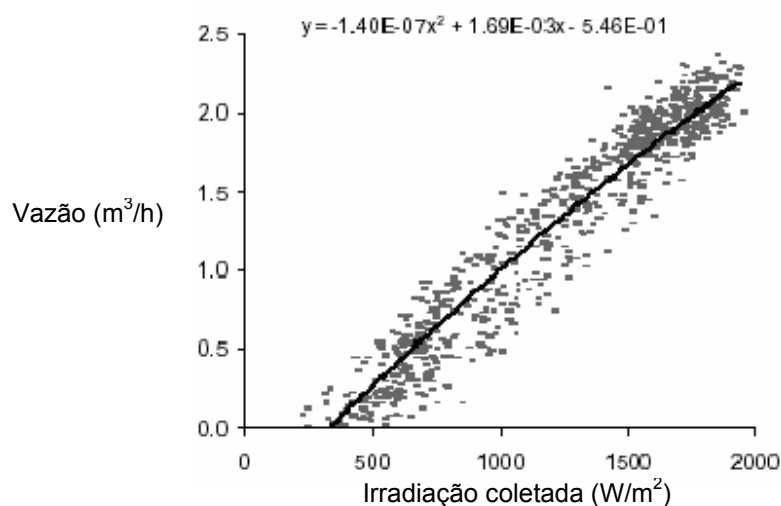


Figura 31 – Curva característica de um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V para uma altura de recalque de 32 m.

Embora a quantidade de água bombeada pelo sistema operando nos modos fixo, com rastreamento ou com concentração seja diferente, devido aos diferentes valores de energia solar coletada em cada modo, as relações entre vazão de água bombeada e radiação solar coletada, vista pelos módulos fotovoltaicos, para um mesmo sistema de bombeamento, deverão ser as mesmas, desde que seja mantida a mesma altura de recalque.

Ou seja, a curva característica é única para os 3 (três) modos operacionais. A partir desta consideração, pode-se estimar os valores diários de volume de água bombeada para os sistemas fixo e com rastreamento, partindo-se da curva característica obtida através dos ensaios realizados com o sistema com concentração e dos valores de radiação solar medidos nos planos fixo, no plano de abertura do rastreador e na base (absorvedor) do concentrador.

Por exemplo, aplicando-se a curva característica do sistema aos valores de radiação solar coletada no plano do rastreador, minuto a minuto, podem ser obtidos valores de vazão de água para o sistema com rastreamento. Da mesma forma, aplicando-se a mesma curva aos valores de radiação solar medidos no plano fixo, obtêm-se os valores de vazão para o sistema operando em modo fixo. Os valores de vazão, posteriormente integrados, dão origem aos valores diários de volume de água bombeada para cada modo de operação.

4.4 Resultados experimentais e discussão

Inicialmente foi realizado um teste com os módulos antes da montagem do gerador. O mesmo mostrou que a potência pico dos módulos, em condições de operação, apresenta um valor médio em torno de 48,5 Wp. Assim, a potência real do arranjo fotovoltaico, quando iluminado por um sol, é de 388 Wp.

4.4.1 Sistema com concentração - resultados

Os valores de volume de água bombeada para o sistema com concentração (valores experimentais), rastreamento e fixo (valores estimados) são apresentados na Figura 32 em função dos valores de energia solar diária coletada em cada plano.

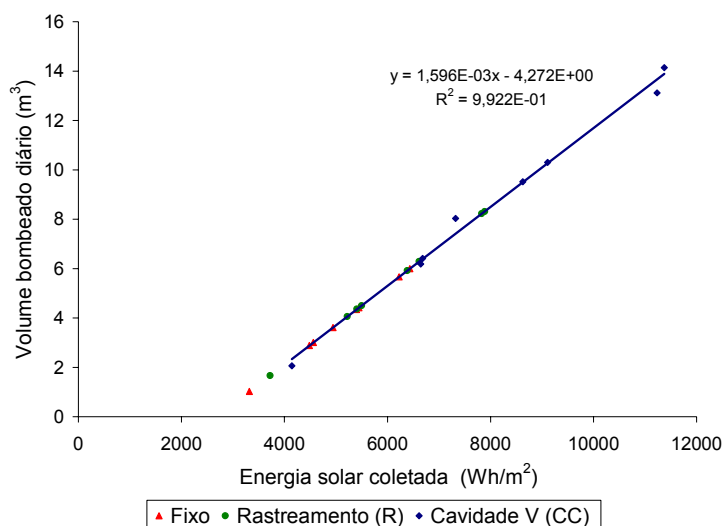


Figura 32 - Volume de água diário bombeado pelo sistema com cavidades tipo V em função da energia solar coletada.

Assim como a curva característica do sistema (vazão vs. radiação solar coletada) é a mesma para os três modos, um comportamento idêntico pode ser observado para os valores diários de volume de água bombeada em função dos valores respectivos de energia solar coletada. A relação linear mostrada na Figura 32 é válida para os três tipos de geometrias de gerador estudadas neste trabalho. Para colocar em evidência a diferença no comportamento dos três sistemas, no que diz respeito ao volume de água bombeada, os valores diários devem ser representados já não em função da radiação coletada por cada um deles, mas em função, por exemplo, da radiação coletada no plano fixo.

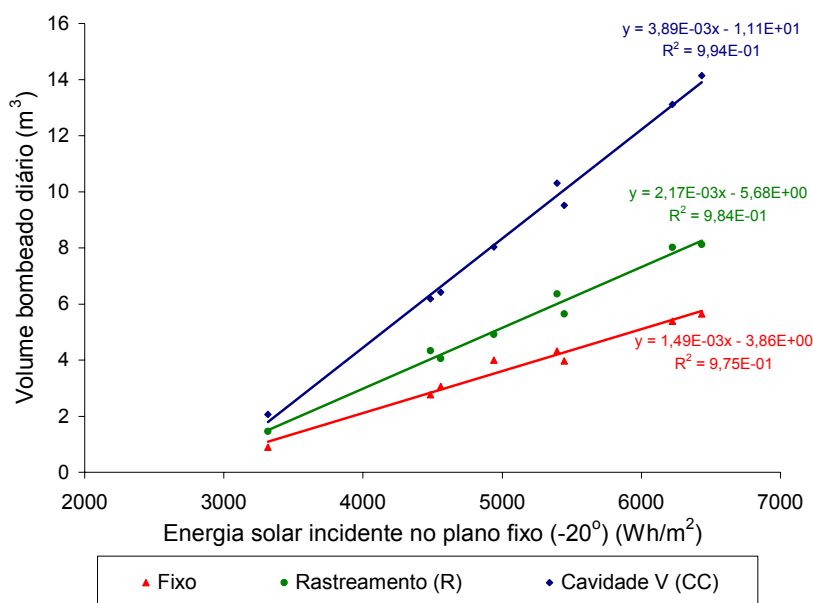


Figura 33 - Volume de água diário bombeado pelo sistema com cavidades tipo V, rastreamento e fixo em função da energia solar coletada no plano fixo.

A representação do volume bombeado em função da radiação coletada no plano fixo, mostrado na Figura 33, permite visualizar os ganhos obtidos nos diferentes modos. Verifica-se por exemplo que, para a maior energia solar coletada no plano fixo, o sistema fixo (Fix) bombeia cerca de 5,7 m³/dia, o sistema com rastreamento (R) bombeia 8,1 m³/dia enquanto que o sistema com concentração (CC) atinge 14,1m³/dia.

4.4.2 Relação de benefício para sistemas com concentração

As relações de benefício (RB) da radiação coletada (H) sobre o absorvedor no sistema com concentração (CC) e rastreamento (R) com relação a sistemas fixos (Fix) são expressas pelas Equações 15 e 16.

$$RB_H (R - Fix) = \frac{H_R}{H_{Fix}} \quad (15)$$

$$RB_H (CC - Fix) = \frac{H_{CC}}{H_{Fix}} \quad (16)$$

De maneira similar, as relações de benefício para o volume de água bombeado serão expressas da seguinte maneira: a) Para o sistema com rastreamento em relação ao fixo como

RB_V (R-Fix); b) Para o sistema com concentração (CC) com relação ao sistema fixo (Fix), como RB_V (CC-Fix).

A comparação do desempenho dos sistemas, por meio das relações de benefício na radiação solar coletada e no volume bombeado é mostrada na Tabela 15

Tabela 15 – Resultados experimentais da relação de benefício para a energia solar coletada (RB_H) e o volume de água bombeada (RB_V), entre as configurações do rastreador e concentrador tipo V comparadas com o sistema fixo.

H_h (Wh/m ²)	RB_H (R-FIX) $\left(\frac{H_R}{H_{Fix}}\right)$	RB_H (CC-FIX) $\left(\frac{H_{CC}}{H_{Fix}}\right)$	RB_V (R-FIX) $\left(\frac{V_R}{V_{Fix}}\right)$	RB_V (CC-FIX) $\left(\frac{V_{CC}}{V_{Fix}}\right)$
4000	1,03	1,10	1,11	1,37
4500	1,10	1,33	1,25	1,79
5000	1,16	1,52	1,35	2,08
5500	1,21	1,68	1,42	2,28
6000	1,25	1,81	1,47	2,44
6500	1,28	1,92	1,51	2,56
7000	1,31	2,01	1,54	2,66

Como podem ser observadas as relações de benefício para o volume de água bombeada são maiores que as obtidas para energia solar coletada. Comparando o sistema de concentração (CC) com o sistema fixo (Fix), para um valor de energia solar no plano horizontal igual a 5500 Wh/m² (aproximadamente a média anual para Recife), a relação de benefício concentração-fixos é de (2,28) para o volume de água bombeada, enquanto que para a energia solar coletada este valor é de (1,68).

4.4.3 Comportamento do volume de água bombeado em longo prazo

O volume de água ($\bar{V}$) bombeado em longo prazo pelas três configurações tem sido estimado pelo método da utilizabilidade (FRAIDENRAICH E VILELA, 2000), que será apresentado no Capítulo 5. A função de utilizabilidade proposta por ZARMI (1987) tem sido usada para estimar o volume de água para os sistemas fotovoltaicos de bombeamento fixo, com rastreador e com concentrador.

As relações de benefícios em longo prazo são apresentadas na Tabela 16. A relação de benefício anual para a radiação solar coletada pelo sistema de rastreamento ($RB_{H(R-FIX)}$), obtida para a cidade do Recife é de 1,23 e para o volume de água bombeado $RB_{V(R-FIX)}$ de 1,41. Os mesmos parâmetros para o sistema com o concentrador tipo V são 1,74 e 2,49 respectivamente.

Tabela 16 - Resultados de longo prazo da relação de benefício para a energia solar coletada (RB_H) e o volume de água bombeada (RB_V), entre as configurações do rastreador e concentrador tipo V comparadas com o sistema fixo.

Mês	$\bar{H}_{FIX}$ (Wh/m ²)	$\bar{RB}_{H(R-FIX)}$	$\bar{RB}_{H(CC-FIX)}$	$\bar{RB}_{V(R-FIX)}$	$\bar{RB}_{V(CC-FIX)}$
Janeiro	5417	1,29	1,81	1,47	2,53
Fevereiro	5427	1,27	1,76	1,46	2,47
Março	5361	1,25	1,73	1,47	2,46
Abril	4962	1,18	1,68	1,36	2,44
Mai	4617	1,17	1,65	1,34	2,45
Junho	4257	1,16	1,63	1,33	2,48
Julho	4294	1,16	1,63	1,34	2,48
Agosto	5296	1,19	1,72	1,36	2,45
Setembro	5621	1,22	1,77	1,40	2,50

Outubro	5727	1,28	1,80	1,47	2,50
Novembro	5619	1,30	1,83	1,48	2,54
Dezembro	5281	1,30	1,81	1,47	2,55
Anual	5157	1,23	1,74	1,41	2,49

4.4.4 Comparação do custo do volume de água bombeado pelos sistemas fixo, com rastreamento e concentrador

Para comparar os custos de investimento em sistemas fotovoltaicos fixos (Fix), com rastreamento (R) e com concentração (CC), foi estimado um custo inicial do sistema de bombeamento em dólares por m³ de água anual bombeada. O custo do volume de água bombeado (CVB), Equação 17, foi calculado através do custo do ciclo de vida anualizado (CCVA), Equação 18, da instalação, considerando, além do custo inicial do sistema, os custos de manutenção ao longo de sua vida útil (FEDRIZZI e SAUER, 1998).

$$CVB = CCVA / VB \quad (17)$$

$$CCVA = [(P_G + P_{RV}) \cdot (A / P, r, n_1)] + [(P_{MB} + P_{CON}) \cdot (A / P, r, n_2)] + P_{TK} \cdot (A / P, r, n_3) + P_{MAN} \quad (18)$$

onde

VB	volume de água bombeada por ano (m ³ /ano)
P _G	custo do gerador (US\$)
P _{MB}	custo do conjunto motobomba (US\$)
P _{TK}	custo do tracker (US\$)

P_{CON}	custo do concentrador (US\$)
P_{MAN}	custo de manutenção anual (US\$)
P_{RV}	custo do reservatório (US\$)
$A/P, r, n_i$	Fator de recuperação de capital, ou seja, a anualidade correspondente a um capital unitário inicial, (r) a taxa de desconto e (n) o número de anos em que o investidor espera recuperar o capital. Neste caso (n) pode ser igual ao tempo de vida do equipamento.

Os cálculos consideraram o custo do gerador da ordem de US\$7/Wp, o preço do rastreador da ordem de US\$400, o preço dos espelhos e estrutura do concentrador na faixa de US\$50/m². O preço do concentrador, com uma área total de espelhos de 10,56 m² é igual a US\$ 528 e o preço do subsistema (inversor/motobomba) igual a US\$1200. A instalação do sistema foi estimada em 20% do custo do arranjo fotovoltaico, também foi incluído um reservatório de US\$ 380.

Utilizou-se uma taxa de desconto de 6% ao ano no cálculo dos custos. Assumiu-se uma vida útil de 20 anos para os geradores, 10 anos para os subsistemas conversor-motobomba e concentrador, e 5 anos para o sistema de rastreamento. Foi considerada uma taxa de 5% do custo global para a manutenção anual. Os valores de $(A/P, r, n_i)$ calculado para os equipamentos com vida útil de 20, 10 e 5 anos foram 0,087185 , 0,135868 , 0,237396 , respectivamente.

A Tabela 17 mostra o custo de investimento por m³ de água bombeada ao longo de um ano, para cada tipo de sistema. O volume anual de água bombeada pelo sistema ensaiado foi utilizado como base de cálculo.

Tabela 17 – Custo anual do m³ de água bombeada por sistemas fixo (Fix), com rastreamento (R) e com concentração (CC) para uma altura manométrica de 32 m.

	Fixo	Com rastreamento	Com concentração
Custo do ciclo de vida anualizado (US\$/ano)	734,36	849,32	947,46
Volume anual bombeado (m ³ /ano)	1193	1695	2972
Custo da água bombeada (US\$/m ³)	0,62	0,50	0,32

Verifica-se que, no caso do sistema considerado, o custo de investimento por m³ de água bombeada (um ano) com a utilização do rastreamento solar é 23% menor que para o sistema fixo. Para o sistema com concentração o custo é 47% menor.

4.5 Conclusões

Foi determinada a relação entre volume de água bombeada e energia solar coletada para um sistema de bombeamento acionado por um gerador fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V.

O procedimento experimental utilizado, medindo o volume de água bombeada e a radiação solar coletada nos planos fixo, no plano de abertura do gerador e na região absorvedora do concentrador, permite fazer estudos comparativos do comportamento do

sistema de bombeamento acionado por geradores fotovoltaicos fixos, com rastreamento e com concentração.

As relações de benefício para a radiação solar e para o volume de água bombeada foram calculadas para todos os casos estudados. Verificando-se que, para um valor de radiação solar no plano horizontal igual a 5500 Wh/m^2 (aproximadamente a média anual para Recife), a relação de benefício em volume de água bombeada obtida, com a utilização do concentrador V com relação ao sistema com rastreamento, é da ordem de 1,68, e com relação ao sistema fixo, da ordem de 2,28.

Os custos de investimento nos três tipos de sistema foram comparados tomando-se como base o volume anual de água bombeada pelo sistema ensaiado. Verificou-se que para um sistema com as características do estudado, pode haver uma economia de 23% no custo de investimento por m^3 de água bombeada quando se utiliza rastreamento solar e de 47% quando se utiliza um concentrador tipo V.

A utilização de rastreadores solares com concentração apresenta-se como uma alternativa interessante para aumentar a quantidade de água bombeada.

CAPÍTULO V

SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DA CULTURA DE UVA USANDO UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM CONCENTRADOR TIPO V

5.1 Introdução

Neste capítulo, foi estudado o comportamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V integrado a um sistema de irrigação por gotejamento para cultura de uva, a fim de atender as suas necessidades hídricas.

Tanto a deficiência como o excesso hídrico afetam de maneira marcante o comportamento dos estágios fenológicos da cultura da videira. A deficiência, quando ocorre durante o período inicial de crescimento das bagas, produz uma redução na multiplicação

celular e, quando acontece durante a maturação, condiciona redução no tamanho das células e, conseqüentemente, a redução do tamanho das bagas, além de favorecer a queima dos frutos pelo sol. O excesso hídrico, combinado com temperaturas elevadas, torna a cultura da videira muito susceptível a doenças fúngicas e pragas (WINKLER et al., 1974). TEIXEIRA e AZEVEDO (1996) constataram que, para uma boa produtividade da cultura da videira, é recomendável que o desenvolvimento vegetativo da planta ocorra sob condições de déficit hídrico e que as necessidades hídricas de cada fase fenológica sejam satisfeitas através de irrigação.

Definiu-se uma superfície máxima que pode ser irrigada por um sistema especificado, situada na cidade de Petrolina (Pernambuco-Brasil), adotando o critério que nenhum déficit de água aconteça ao longo do ano. A análise que segue considera a interação dos seguintes fatores: o clima local, sistema de bombeamento, sistema de irrigação e característica física do solo (densidade) .

5.2 Balanço hídrico

Após pesquisas junto às empresas que realizam projetos de irrigação na região de Petrolina, constatou-se que os dados utilizados em projetos de irrigação para o cálculo da evapotranspiração eram os apresentados pela MINTER/SUDENE – dados climatológicos básicos (HARGREAVES, 1974). Verificou-se que estes dados de referência já tinham uma

certa antiguidade e poderiam ser substituídos por modelos mais atualizados. Desta forma, foi adotado o modelo definido pela FAO, o qual utiliza a equação de Penman-Monteith para definir a evapotranspiração da cultura, que permite por sua vez determinar o volume de água que a cultura necessita.

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água do solo e resulta da aplicação do princípio de conservação de massa para a água num volume de solo vegetado (PEREIRA et al., 1997). Segundo esses autores, a variação do armazenamento, num intervalo de tempo, representa o balanço entre parâmetros de entradas e saídas para a água da região de controle, os quais basicamente são quatro para as entradas: chuva, orvalho, ascensão capilar e irrigação, e três para as saídas: evapotranspiração; escoamento superficial e drenagem. O balanço hídrico da cultura é importante para o manejo, planejamento e práticas agrícolas (plantio, colheita e irrigação), considerando as diferentes necessidades hídricas das culturas.

O cálculo da superfície que pode ser irrigada por um sistema fotovoltaico foi determinado através do balanço hídrico com base mensal (FRAIDENRAICH E COSTA, 1988). No balanço hídrico foram considerados os fatores mais relevantes, ou seja, consumo da cultura, disponibilidade de água para irrigação (volume bombeado), armazenamento de água no solo, precipitação pluviométrica e área a ser irrigada, inter-relacionados pela equação de conservação (Equação 19) (o subscrito *i* indica o mês que está sendo analisado).

$$WC_i = V_B + R_i \cdot A + W_a A \quad (19)$$

onde:

WC_i consumo mensal de água da cultura

V_B volume de água bombeado pelo sistema fotovoltaico

R_i índice de precipitação da chuva

W_a água armazenada no solo

A área a ser irrigada.

A seguir será apresentado o procedimento utilizado no cálculo de (WC_i) , (V_B) e (W_a) .

5.2.1 Consumo mensal de água da cultura

O consumo de água para cada mês (WC_i) é calculado considerando a evapotranspiração da cultura (ET_{ci}) e o fator de cobertura (C_i) , da seguinte forma:

$$WC_i = ET_{ci} \cdot C_i \quad (20)$$

Denomina-se evapotranspiração à perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas. Este mecanismo é importante para o balanço hídrico agrícola, que poderá envolver o cálculo da necessidade de irrigação. Este conceito relaciona o solo, as plantas e a atmosfera como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual os vários processos de fluxo estão interligados como os elos de uma corrente.

Diversos fatores são essenciais na determinação da evapotranspiração, como temperatura, grau de umidade relativa do ar atmosférico, vento, radiação solar, pressão barométrica e salinidade da água.

O fator de cobertura (C_i) depende do sistema de irrigação utilizado e expressa a fração de área molhada em relação à área total irrigada.

Evapotranspiração da cultura e coeficiente de cultura

Desde o plantio até a colheita, uma cultura vai progressivamente crescendo e ocupando a área disponível. Nessas condições ocorre a evapotranspiração, denominada evapotranspiração da cultura (ETc). O conhecimento da ETc é fundamental em projetos de

irrigação, pois ela representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais.

Sabe-se que para dar bons resultados, a irrigação deve ser bem quantificada. Caso contrário, se as regas forem leves, insuficientes e freqüentes, repõem a água apenas nas camadas superficiais do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Por isso elas se tornam superficiais e incapazes de explorar o volume de solo disponível. Em consequência, diminui consideravelmente a reserva hídrica útil do solo, prejudicando as plantas, desperdiçando recursos valiosos e aumentando os custos da água aplicada. Irrigação em quantidades insuficientes de água agrava os problemas de salinização do solo nas zonas áridas e semi-áridas, intensificados pelo emprego de água com alto teor de sais.

Regas excessivas também são contra indicadas, pois acarretam perdas de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes, além de favorecer a proliferação de microorganismos patogênicos. Em casos de terrenos mal drenados, com impedimentos à percolação, o solo ficará saturado prejudicando as raízes, que poderão perecer por falta de arejamento (BUCKS et al., 1985).

Para contornar essas dificuldades, utilizam-se estimativas da evapotranspiração potencial (ou de referência), corrigidas por um coeficiente de cultura (K_c). Esse coeficiente origina-se da razão entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, e

depende do estágio de desenvolvimento da cultura, do sistema de irrigação, da configuração de plantio e das condições meteorológicas reinantes. Quando já estiverem sido determinados para a cultura de interesse, esses coeficientes podem ser utilizados na estimativa da evapotranspiração da cultura, necessitando-se apenas de dados meteorológicos referentes à demanda atmosférica. A obtenção dos coeficientes de cultura é feita sob condições de não limitação, seja hídrica ou de qualquer outro fator climático ou fisiológico (WRIGHT, 1988).

Analiticamente, pode ser expressa como

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (21)$$

Para cultura de uva o valor médio de K_c pode ser considerado como 0,65, para a região de Petrolina, em Pernambuco (ÁVILA-NETTO et al., 2000).

Evapotranspiração potencial

O conceito de evapotranspiração potencial (ET_p) foi introduzido por THORNTHWAITE (1944) com a intenção de se chegar à um parâmetro meteorológico que representasse a necessidade de água da vegetação, em condições similares à da água fornecida pela precipitação pluvial, e quantificar racionalmente o fator umidade, no clima. Visa,

portanto, aplicar a teoria em trabalhos climatológicos ligados à geografia, à agricultura e à hidrologia e, principalmente, desenvolver uma nova classificação climática, considerada racional, usando como parâmetros hídricos e térmicos os elementos resultantes do balanço hídrico.

A evapotranspiração potencial é um elemento climatológico fundamental que corresponde ao processo oposto da chuva (THORNTHWAITE, 1946) sendo expressa na mesma unidade de medida (mm). Este processo corresponde à transferência da água do solo para a atmosfera, ou a passagem da água do estado líquido para o gasoso. Tal processo requer suprimento de energia, e a única fonte disponível para isso é a radiação solar. A evapotranspiração potencial, portanto, é mais elevada no verão, quando os dias são mais longos e a radiação solar é maior. Nos trópicos, a energia solar e a evapotranspiração potencial, no curso do ano, são significativamente mais elevadas que em clima temperado.

Quando a umidade no solo é suficiente, a evapotranspiração potencial depende apenas do suprimento de energia solar. Se faltar água no solo a evapotranspiração ficará reduzida, deixando de ser potencial; ocorrerá, então, a evapotranspiração real, que constitui a perda de água de uma superfície natural, em diversas condições de umidade e de cobertura vegetal.

Com o assessoramento de pesquisadores de diferentes países, Doorenbos e Pruitt (1975) publicaram o boletim 24 da FAO (“Food and Agriculture Organization of the United Nations”), com o título “Riego y Drenaje”. Nesse trabalho, o termo evapotranspiração de referência (ET_0) tem o mesmo significado que a evapotranspiração potencial de Thornthwaite (ET_P). Foram então escolhidos quatro modelos para estimar a ET_P : o modelo de Blaney e Criddle, modificado pela FAO; o modelo de radiação solar; o modelo de Penman e o modelo do tanque “Classe A”.

No presente, e objetivando a padronização para a determinação da evapotranspiração de referência, a FAO recomenda o uso da equação de Penman-Monteith, o que permite a comparação da evapotranspiração para períodos diferentes do ano e para outras regiões.

A evapotranspiração de referência (ET_0), depende de parâmetros meteorológicos e características do solo, sendo calculada pela equação de Penman–Monteith, (Equação 22).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (H_h - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34) u_2} \quad (22)$$

onde:

ET_0 evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}],

H_h irradiação solar no plano horizontal [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],

G	densidade de fluxo de calor no solo [MJ m ⁻² dia ⁻¹],
T	temperatura do ar a 2 m de altura [°C],
u ₂	velocidade do vento a 2 m de altura [m s ⁻¹],
e _s	pressão de vapor saturado [kPa],
e _a	pressão de vapor [kPa],
Δ	inclinação da curva de pressão de vapor [kPa °C ⁻¹],
γ	constante psicrométrica [kPa °C ⁻¹].

Fator de cobertura

É o percentual de área molhada em relação à área total irrigada, podendo ser calculado para dois casos; quando se irriga uma faixa contínua de solo ou quando se irriga por árvore (mais adequada ao cultivo da videira). Neste último caso, não se formará uma faixa molhada, mas sim áreas molhadas e o fator de cobertura pode ser definido como

$$C = \frac{A_c}{E_L \cdot E_p} \quad (23)$$

C - fator de cobertura do solo

A_c - área média de projeção da copa (m²)

E_L - espaçamento entre linhas de plantio (m)

E_p - espaçamento entre plantas na linha de plantio (m)

Na Tabela 18 são apresentados os valores padrões médios para os espaçamentos entre linhas e plantas, como também, os coeficientes K_c , C e profundidade da raiz (D_p).

Tabela 18 – Características da cultura da uva (valores médios)

CULTURA	ESPAÇAMENTO		COEFICIENTES		
	E_L (m)	E_p (m)	K_c	C	D_p (mm)
UVA	3	2	0,65	0,5	600

Fonte: Manual do Sistema de Irrigação Xiquexique – (SUDENE, 1982)

5.2.2 Volume de água bombeado pelo sistema fotovoltaico com concentrador tipo V

O volume médio mensal de água bombeada (V_B) a longo prazo é determinado pelo método de utilizabilidade, que tem sido tradicionalmente utilizado para prever o desempenho a longo prazo de sistemas solares térmicos (LIU e JORDAN, 1963; KLEIN, 1978; COLLARES-PEREIRA e RABL, 1979). Mesmo assim, pode-se encontrar na literatura técnica, com menor frequência, a aplicação desta metodologia em sistemas de bombeamento fotovoltaico (FRAIDENRAICH e COSTA, 1988; LOXSOM E DURONGKAVEROJ, 1994).

Utilizabilidade é a fração da energia solar coletada, acima de um determinado nível crítico de radiação (I_c) (apenas níveis de radiação solar maiores que (I_c) produzem energia

útil). Este conceito pode ser utilizado para estimar o valor médio, a longo prazo, da energia útil produzida por um sistema solar com uma capacidade de armazenamento infinita, desde que o valor crítico de radiação solar permaneça aproximadamente constante, ao longo do período de operação considerado. Vários sistemas satisfazem essa condição, entre eles, os sistemas de bombeamento fotovoltaico.

A função de utilizabilidade é definida pela Equação 24:

$$\Phi(I_c) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{1}^n \int_{-t_c}^{+t_c} (I_{col} - I_c)^+ dt}{\frac{1}{n} \sum_{1}^n \int_{-t_c}^{+t_c} I_{col} dt} \quad (24)$$

onde:

n número de dias do período considerado;

I_{col} valores horários da radiação incidente no plano do coletor;

I_c limiar ou nível crítico da radiação;

$-t_c$ e $+t_c$ hora do nascer e por do sol para o coletor;

sinal (+) considera só os valores positivos.

Médias a longo prazo da energia útil produzida por um sistema solar, podem ser calculadas pela expressão

$$E_u = A_G \bar{\eta}_t \bar{H}_{col} \Phi(X_C) \quad (25)$$

onde:

E_u é a energia útil diária, média mensal ou anual [J]

A_G é a área do gerador fotovoltaico [m²];

$\bar{\eta}_t$ é a eficiência global do sistema (energia solar para mecânica, elétrica ou térmica), obtida como o produto das eficiências dos vários processos de conversão que fazem parte do sistema solar;

$\bar{H}_{col}$ é a energia solar diária, média mensal, incidente no plano do gerador [J/m²];

$\Phi(X_C)$ é a função utilizabilidade mensal ou anual, onde X_C é um parâmetro adimensional que relaciona o nível crítico de radiação solar (I_C) com o valor médio da radiação solar coletada ($\bar{I}_{col}$).

A Equação 25 é válida para sistemas em que a energia útil varia linearmente com a irradiação coletada (I_{col}). Entretanto, o sistema de bombeamento fotovoltaico é um sistema

cujo comportamento é não linear. Caracterizado pela relação entre vazão de água ($\dot{V}_B$) e (I_{col}), seja para alturas manométricas constantes ou variáveis, essa relação define o comportamento do sistema quando não existem restrições devido ao sistema de armazenamento (o sistema de controle interrompe o funcionamento da bomba quando o tanque de água está cheio). A relação entre vazão de água ($\dot{V}_B$) e o valor da radiação coletada (I_{col}) é denominada curva característica (Figura 13 do Capítulo 4).

Em diversos casos a curva característica pode ser representada por um polinômio de segundo grau que expressa em função das raízes, distintas e reais, e pode ser definida pela Equação 26.

$$\dot{F}(X) = K_2 (X - X_C) \frac{(X_M - X)}{(X_M - X_C)} \quad (26)$$

Os símbolos X_C e X_M representam as raízes I_C e I_M da curva característica do sistema de bombeamento e são expressas adimensionalmente

$$X_C = \frac{I_c}{\bar{I}_{col}} \quad \text{e} \quad X_M = \frac{I_M}{\bar{I}_{col}} \quad (27)$$

Uma estimativa do volume bombeado, valor médio a longo prazo, para um sistema representado pela Eq. (28), pode ser descrita pela Equação 28.

$$\bar{V} = \dot{V}_0 \bar{H}_{coll} \left[\Phi(X_C) - \frac{2}{X_M - X_C} \times \int_{X_C}^{X_{coll,max}} \Phi(X) dX \right] \quad (28)$$

onde $\Phi(X)$ é a função utilizabilidade para valores diversos da variável adimensional (X) .

São muitas as expressões que definem a função $\Phi(X)$. Neste trabalho foi utilizada a expressão proposta por ZARMI (1987), a qual reproduz bem o comportamento do $\Phi(X)$ para valores de (X)

$$\Phi(X) = \left(1 - \frac{X}{X_{coll,max}} \right)^{X_{coll,max}} \quad (29)$$

Introduzindo a Equação 29 na Equação 28, obtém-se a expressão que permite calcular o volume de água bombeado (FRAIDENRAICH e VILELA, 2000)

$$\bar{V} = \dot{V}_0 \bar{H}_{coll} \Phi(X_C) \left(1 - \frac{2}{X_M - X_C} \times \frac{X_{coll,max} - X_C}{X_{coll,max} + 1} \right) \quad (30)$$

A correção para a não linearidade (curva característica de segundo grau) é dada pelo segundo termo entre parênteses. É importante dizer que a não linearidade introduz um fator de correção mesmo no caso em que X_C é igual a zero, como pode ser observado substituindo-se $X_C = 0$ na Equação 30.

5.2.3 Água armazenada no solo

O termo capacidade de campo (CF) representa a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso é drenado livremente durante 48 horas, enquanto o ponto de murcha permanente (PMP) representa o limite mínimo do conteúdo de água no solo, abaixo do qual a planta não se recupera mais. A profundidade efetiva do sistema radicular (D_p) refere-se à profundidade em que se concentram aproximadamente 80% das raízes. A densidade aparente do solo (d_a) é determinada em laboratório. Aqui, cabe ressaltar o cuidado que se deve ter em coletar amostras de solo e de se realizar as análises para fins de fertilidade e de irrigação.

A capacidade máxima de armazenamento disponível no solo pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$W_{a_{MAX}} = A \frac{CF - PMP}{100} d_a D_p C \quad (31)$$

onde

PMP é o ponto de murcha permanente [%];

A área [m²];

d_a densidade aparente do solo [kg/m³];

D_p profundidade da raiz [m];

C coeficiente de cobertura;

CF capacidade de campo [%].

Valores para CF, PMP, d_a, D_p e C estão disponíveis na literatura técnica (FRAIDENRAICH e COSTA, 1988). Os coeficientes D_p e C dependem do estágio de desenvolvimento da planta e devem ser escolhidos em correspondência com o período para o qual a cultura já está estabilizada. A capacidade de campo (CF), o ponto de murcha permanente (PMP) e a densidade do solo (d_a) usados neste trabalho correspondem a solos com textura média (Tabela 19). Para evitar o PMP, o ponto mínimo de água armazenada no solo não deve ser inferior a 20% da capacidade máxima do solo.

Tabela 19 – Parâmetros hídricos para vários solos

ESPECIFICAÇÕES	UNID	SOLO LEVE	SOLO MÉDIO	SOLO PESADO
Capacidade de Campo – CF	%	6 a 12	12 a 25	25 a 35
Ponto de murcha permanente – PWP	%	3 a 6	6 a 11	11 a 17
Densidade do solo – da	Kg/m ³	1,6	1,4	1,3

Fonte: Manual do Sistema de Irrigação Xiquexique – (SUDENE, 1982)

O solo não é um reservatório passivo, isto é, à medida que vai secando a água fica mais fortemente retida sendo, portanto, cada vez mais difícil extraí-la de seu interior. Isso significa que as plantas têm que gastar mais energia na captura dessa água, e este gasto explica a redução no crescimento e na produção de plantas sob condições de restrição de água no solo.

5.3 Metodologia usada para o balanço hídrico

O balanço de água depende do consumo de água da cultura, da disponibilidade de água para irrigação e do armazenamento de água no solo. Este último é determinado pelo limite superior, definido como capacidade de campo e o limite inferior, denominado ponto de murcha permanente da cultura (PMP). Baseado nestes condicionantes, elaborou-se um fluxograma para ser utilizado na análise do balanço hídrico, sendo representado na Figura 34.

O fluxograma considera o balanço de água resultante das diversas contribuições, as perdas na região de controle e a superfície a ser irrigada.

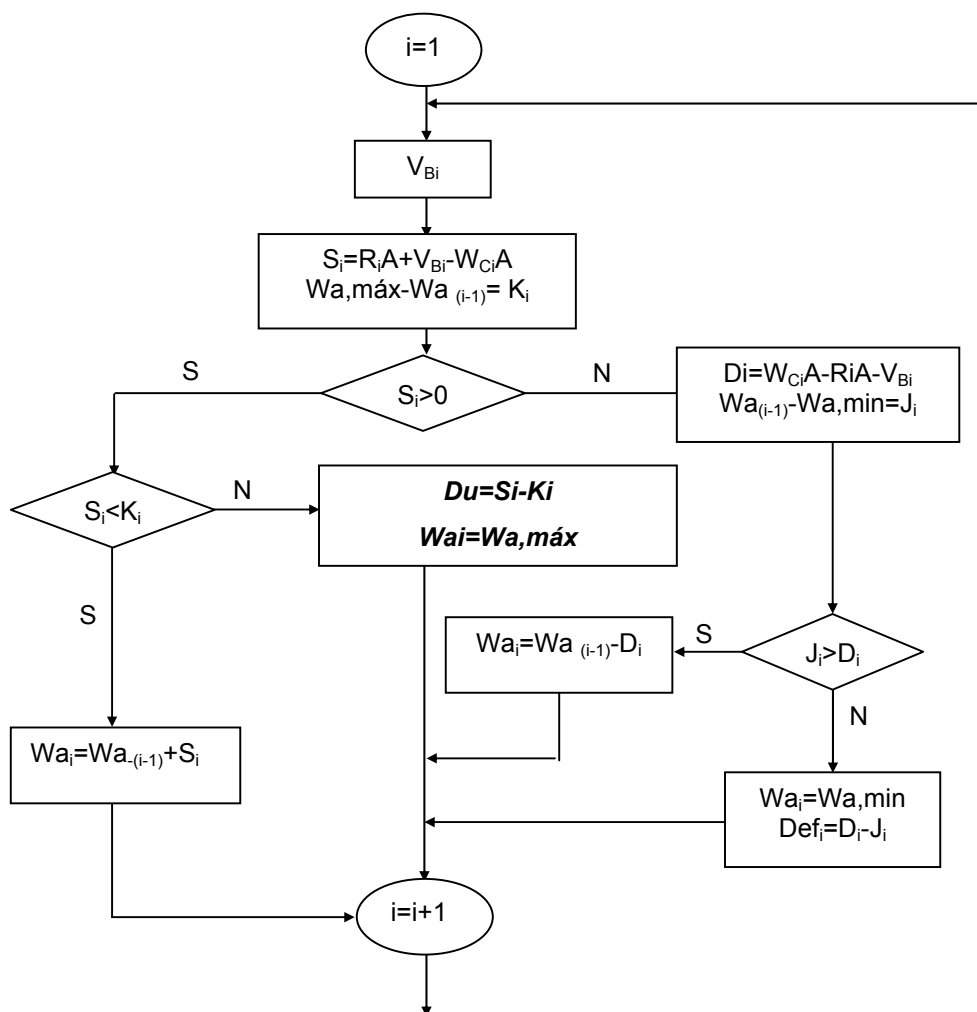


Figura 34 - Balanço hídrico de uma cultura irrigada (S = sim e N = não).

Deve-se considerar duas situações para a análise do armazenamento de água: excesso ou déficit de água disponível para irrigação (S_i), que pode ser calculado pela Equação 32.

$$S_i = V_{Bi} + R_i A - W_{Ci} A \quad (32)$$

onde (V_B) é o volume de água bombeado. O índice de precipitação da chuva (R_i) e o consumo de água (WC_i) são calculados por unidade de superfície (m^2) e multiplicados pela área irrigada (A). Se houver água em excesso ($S_i > 0$), a variação de água disponível depende da diferença (K_i) entre a quantidade máxima de água que pode ser armazenada no solo e a água armazenada no momento. Se K_i for maior que o excesso de água disponível ($S_i < K_i$), a água armazenada aumentará como

$$W_{a_i} = W_{a_{(i-1)}} + S_i \quad (33)$$

Por outro lado, se $S_i > K_i$, só uma parte da água será armazenada (K_i). O excedente (D_u) pode ser usado para lavar a terra (drenagem), evitando problemas como a salinização e o stress hídrico.

$$D_u = S_i - K_i \quad (34)$$

Se há déficit ($S_i < 0$), a água será provida para o solo. Outra vez, duas situações poderão ocorrer. A primeira, onde a quantidade disponível no solo (J_i) é suficiente para atender a demanda ($J_i > |S_i|$). A água armazenada no solo diminuirá para valores maiores ou iguais ao mínimo aceitável ($W_{a_{min}}$). Caso contrário, se a água disponível no solo não é suficiente para atender a demanda ($J_i < |S_i|$), um déficit efetivo no abastecimento de água à

planta aparecerá ($Def_i = |S_i| - J_i$). Não haverá mais água disponível no solo e a água armazenada, Wa_i , alcançará o seu nível mínimo, Wa_{min} .

5.4 Superfície máxima irrigada

Usando a superfície irrigada (A) como uma variável, no modelo de simulação, é possível encontrar a área máxima que pode ser irrigada por um dado sistema BFV. O critério adotado foi que o déficit de água deveria, no mês mais solicitado, ser igual a zero. Adotou-se, para realização da simulação, a cidade de Petrolina [PE-Brasil; latitude (-9°)]. Os dados de entrada referentes ao clima foram obtidos do arquivo de dados da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).

Para a irrigação da cultura de uva adotou-se o sistema de irrigação por gotejamento, o qual permite um coeficiente de cobertura (C) da ordem de 0,5 com a vantagem de consumir menos água, reduzindo custo, menor incidência de fungos na folhagem e maior flexibilidade no uso da fertirrigação.

O gerador fotovoltaico utilizado na simulação é constituído por módulos de silício monocristalino (C-Si) com 1,3 kW pico, acionando um motor trifásico AC acoplado à uma bomba centrífuga com 10 estágios. A altura de bombeamento considerada foi de 40 m. Dois

tipos de sistemas fotovoltaicos foram utilizados para simular o acionamento do mesmo conjunto inversor-motor-bomba: o sistema fixo sem concentração e o sistema com rastreador e concentrador tipo V.

O ângulo de inclinação do gerador na configuração fixa tem que ser escolhido para minimizar a relação entre a oferta e demanda de água, A simulação indica uma inclinação igual a (-10°) .

Para sistemas com cavidade tipo V observou-se que a área máxima a ser irrigada sem déficit é igual a 2,11 ha (Figura 35). Como pode ser visto na Figura 36, usando o sistema fixo para irrigação da mesma área, verifica-se a existência de déficit de água ao longo do período que vai de julho a novembro, prejudicando naturalmente o desenvolvimento da cultura de uva. Calcula-se então a área máxima que pode ser irrigada sem déficit, para sistema fixo com o mesmo arranjo fotovoltaico, o que resulta 1,20 ha (Figura 37). Isto significa que, o sistema com concentrador V é capaz de irrigar uma área 76% maior que a do sistema fixo.

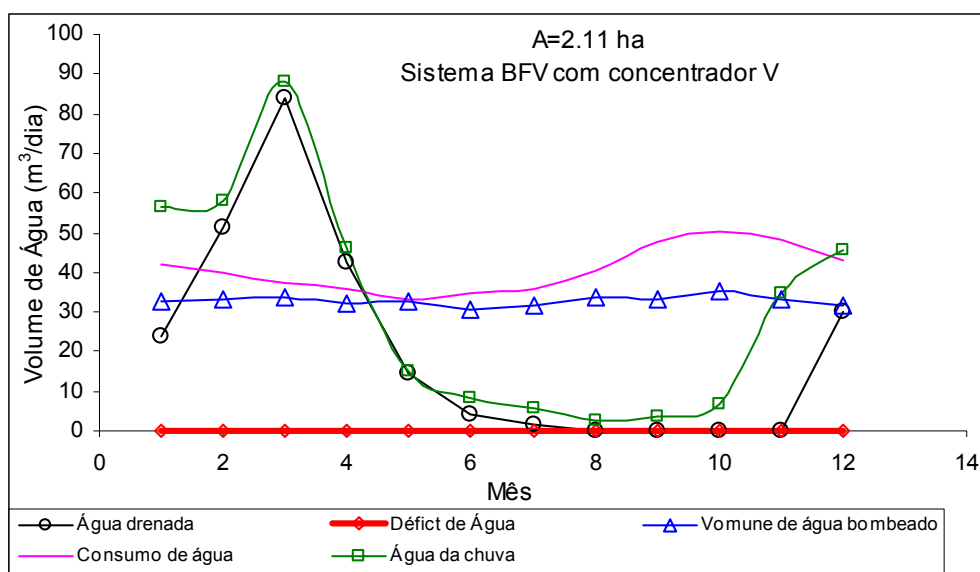


Figura 35 – Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 2,11 ha, usando um sistema PVP com concentrador V como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $CF=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$.

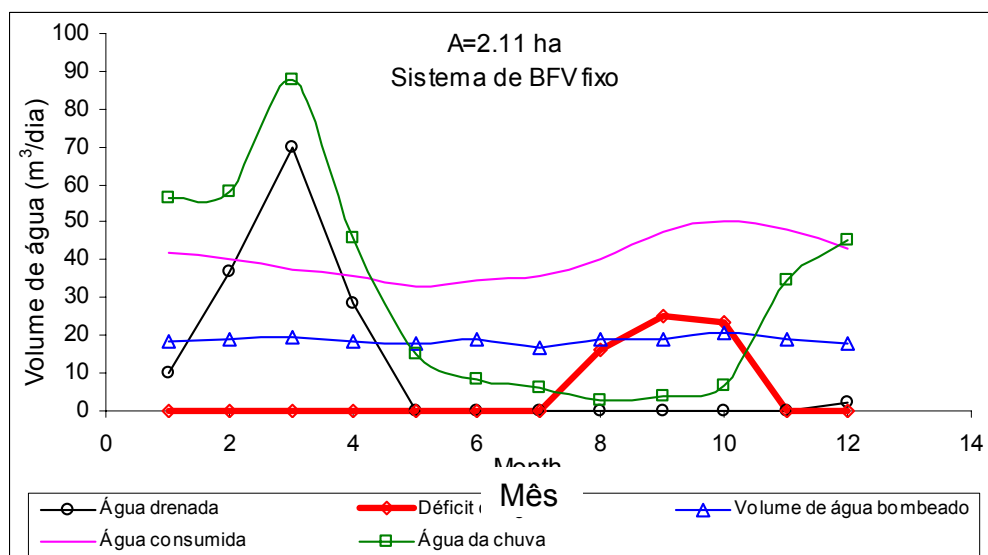


Figura 36 - Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 2,11 ha, usando um sistema fixo BFV como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $CF=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$.

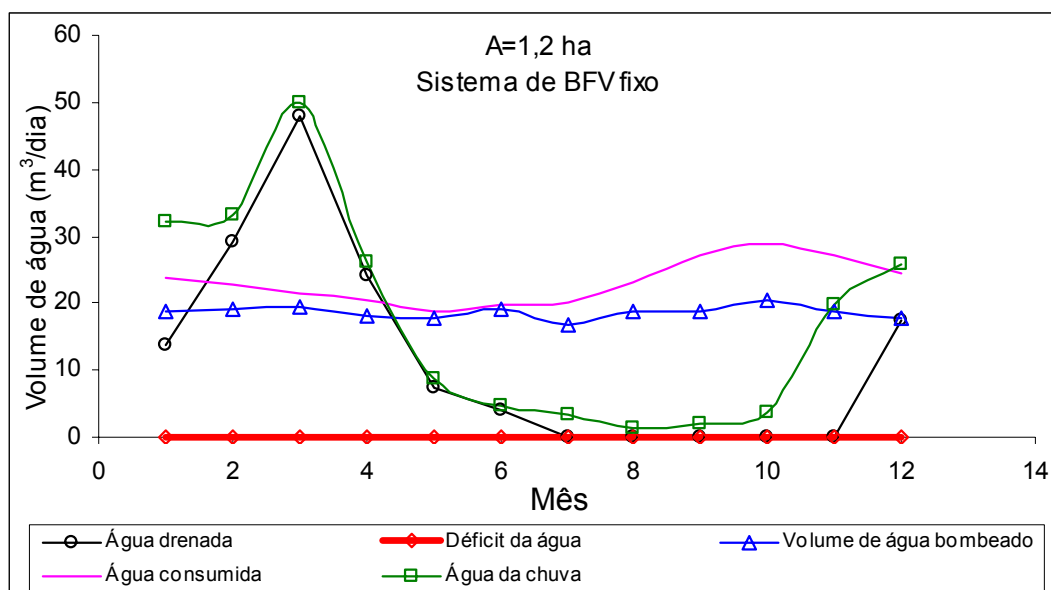


Figura 37 - Balanço hídrico de uma cultura de uva irrigada de 1,20 ha, usando um sistema fixo FV como fonte de água. Coeficientes: $C=0,5$; $d_a=1400 \text{ kg/m}^3$; $CF=18,5\%$; $PWP=8,5\%$; $D_p=0,6\text{m}$.

As simulações feitas sem considerar o armazenamento de água no solo mostraram que sistema fotovoltaico com concentrador V pode irrigar uma área de 1,59 ha. No caso de sistemas fixos a área irrigada resultante é igual a 0,90 ha. Para ambos os casos, a água armazenada contribui com um aumento de 33% da área irrigada, quando comparada com os casos onde esta contribuição não foi considerada.

5.5 Conclusões

O sistema de irrigação por gotejamento localizado na cidade de Petrolina-PE, Brasil, foi simulado e foi determinada a superfície máxima que pode ser irrigada por um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V, sendo estimada a performance do balanço de água com base mensal. O desempenho do sistema de irrigação foi estimado mediante a realização de um balanço de água mensal.

Com um arranjo de 1,3 kWp verificou-se que o sistema é capaz de irrigar uma área de 2,11 ha. Um equipamento PVP fixo, com o mesmo arranjo fotovoltaico, é capaz de irrigar uma área de 1,20 ha. Em ambos os casos, o armazenamento de água no solo contribui com um aumento de 33% na área irrigada. Os resultados foram obtidos assumindo que não ocorre déficit de água ao longo do ano.

O uso do concentrador V como concentrador para sistemas fotovoltaicos de bombeamento aumenta a área máxima irrigada em 76%, quando comparado com o sistema fixo com o mesmo arranjo fotovoltaico.

No próximo capítulo descreve-se a metodologia de projeto executivo de um sistema de irrigação com bombeamento fotovoltaico.

CAPÍTULO VI

PROJETO E ANÁLISE ECONÔMICA PARA A CULTURA DE UVA COM CAPTAÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM CONCENTRADOR TIPO V

6.1 Introdução

Uma irrigação não pode e não deve ser entendida, única e exclusivamente, como um procedimento artificial para atender às condições de umidade de solo visando a melhoria da produção agrícola, tanto em quantidade como em qualidade.

Na realidade, ela constitui um conjunto de operações destinadas ao atendimento das necessidades de água para as plantas que transcendem a relação solo-água-planta, pura e simplesmente, devendo se agregar o clima, o solo, a geologia, o homem, a vegetação, a cultura e a economia do local em que se pretende implantar o projeto de irrigação.

A arte da irrigação, como definida, é bastante abrangente e interdisciplinar, passando pelo campo das ciências agrárias, exatas (engenharia hidráulica, civil, elétrica), sociais (economia, sociologia, política). Como a mais recente, temos a engenharia solar, cujos conhecimentos estamos utilizando associados à tecnologia de irrigação. Nenhuma delas é mais importante que a outra, pois quando da decisão final quanto ao uso da água, todos esses fatores conjuntamente têm que ser levados em conta.

Assim, a escolha de variedades adaptadas a uma região, bem como espaçamentos de plantio adequados, adubação que satisfaça às condições de alta produtividade, controle fitossanitário, combate à erosão, captação de água, a fonte energética a ser utilizada, aplicação correta da água na irrigação e finalmente a colheita e a comercialização, devem fazer parte de um único sistema de produção e não devem ser consideradas atividades isoladas. Neste projeto definiu-se a uva como a cultura a ser irrigada mediante motivos já apresentados no Capítulo 2.

A grande fonte de preocupação é o questionamento de quando e quanto irrigar. Saber o momento certo de iniciar as irrigações e quanto de água se deve aplicar é o objetivo do manejo racional da irrigação. Nos dias atuais tem-se verificado não somente uma elevação dos custos da energia, mas também a escassez do recurso de água. Portanto, o manejo racional da irrigação associado ao recurso da tecnologia de bombeamento fotovoltaico passa necessariamente pela análise dos aspectos econômicos envolvidos no processo.

6.2 Critérios de projeto

A elaboração de um projeto completo de irrigação inclui dados de água, solo, clima, disponibilidade de mão-de-obra e energia. Além disto, deve contemplar um programa anual de cultivo, demanda d'água, balanço hídrico, lâminas de água, frequência e calendário anual de irrigação. Portanto, o primeiro passo a ser realizado é definir e levantar os dados do local onde se pretende implantar a agricultura irrigada. A próxima atividade seria o dimensionamento das grandezas e dos equipamentos utilizados no projeto e sua análise econômica.

6.2.1 Roteiro para projeto de irrigação atendido por sistema de bombeamento fotovoltaico

1. Definição da precipitação ou lâmina a ser aplicada na área: esta precipitação varia em função, principalmente, da cultura (cada cultura apresenta uma evapotranspiração e, portanto, um consumo de água) e da região geográfica em que a área se situa (de região para região as condições climáticas, como as chuvas, evaporação e ventos, podem variar significativamente);

2. Seleção do equipamento mais adequado ou das alternativas dos equipamentos para a área: esta seleção leva em consideração a cultura plantada ou a ser plantada, a topografia da área, o tamanho da área e a disponibilidade de água;
3. Cálculo do turno de rega e tempo de funcionamento por posição: para fazer estes cálculos leva-se em conta, principalmente, o consumo diário de água que a cultura necessita, a profundidade do sistema radicular, a resistência que a planta apresenta ao "déficit" de água e as características físicas do solo, principalmente, quanto à sua capacidade de armazenamento de água;
4. Cálculo do volume: esse cálculo refere-se à vazão total do equipamento e baseia-se na área a ser irrigada, na precipitação definida e o número de horas de trabalho diário;
5. Dimensionamento hidráulico: o dimensionamento das tubulações e dos acessórios, tais como: válvulas, hidrantes, cotovelos de derivação e outros, baseia-se na vazão total, na altura manométrica necessária e na velocidade da água no interior dos tubos. Uma vez selecionadas as tubulações e acessórios, procede-se a locação dos mesmos na área;
6. Dimensionamento do conjunto motobomba: o dimensionamento deste conjunto também baseia-se na vazão, na altura manométrica e na potência necessária. Na escolha da bomba, além dos itens anteriormente citados, deve-se atentar para que a bomba escolhida trabalhe no ponto de máximo rendimento ou o mais próximo possível dele e com altura máxima de sucção. A definição do conjunto motobomba permite a escolha do sistema fotovoltaico com concentrador tipo V;

7. Elaboração de planta ou croqui: efetuados os cálculos deve ser elaborada uma planta ou croqui, onde são locados o ponto de captação, a linha mestra, as linhas laterais, os acessórios e o posicionamento do equipamento;
8. O roteiro prossegue com a análise econômica do projeto e outros itens, tais como custos, receitas, fluxo de caixa, comercialização, conforme exigência do caso analisado.

6.3 Exemplo de um projeto de irrigação por gotejamento para a cultura da uva, sendo atendido por um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador V

6.3.1 Caracterização da propriedade

PROPRIETÁRIO	: FAE
MUNICIPIO	: Petrolina
ÁREA	: 2,0 ha
CULTURA	: UVA
ESPAÇAMENTOS	: 4,0 x 2,5m
FONTE D'ÁGUA	: POÇO
FONTE DE ENERGIA	: SOLAR

Estudo do solo

Considerou-se que a descrição físico-química do solo em questão e os estudos planialtimétricos escala 1:1000 já foram realizados, apresentando condições favoráveis para o projeto.

Recursos hídricos

O estudo dos recursos hídricos é aqui omitido em face de ser esta propriedade inscrita na bacia do Rio São Francisco, sendo abastecida por água proveniente de poço. Suas características sob os aspectos qualitativos já são conhecidas, não havendo até hoje restrições quanto ao seu uso na irrigação.

Clima

As características climáticas da área, como também, todos os dados relacionados ao fator clima foram estudados no Capítulo 5.

Cultura

Os dados referentes à cultura, necessários à elaboração do projeto, estão resumidos na Tabela 20, a seguir:

Tabela 20 – Características da cultura

Características	
Cultura	Uva
Espaçamento (m)	4,0 x 2,5
Profundidade efetiva das raízes (m)	0,6
Coeficiente da cultura máximo (Kc)	0,65
Coeficiente de cobertura	50%
Ciclo	Permanente
Eficiência de irrigação (E):	95%
Nº de dias de trabalho no mês(D):	30
Horas de trabalho por dia (h):	8,0
Área a Irrigar (ha):	2,0
Energia:	Solar
Sistema de irrigação:	Gotejamento

6.3.2 Planejamento agrônômico da irrigação

Plano de exploração, produção e comercialização

A referida propriedade pode ser explorada o ano inteiro, conforme a Tabela 21. Dependerá todavia do plano de comercialização adotado. Segundo SILVA et al. (1998), os principais pólos de produção e comercialização de uvas no Brasil são os descritos na

Tabela (22). Todos estes pólos escoam sua produção para o mercado local, regional e extra-regional (nacional), sendo que alguns destes, como é o caso da região do Submédio São Francisco também comercializa seu produto no mercado internacional.

Tabela 21 – Plano de exploração da cultura de uva

CULTURA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Uva	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	Xxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
					x							

O nível de ocupação da área irrigada será de 100% o ano inteiro.

Tabela 22 – Épocas de colheita de uvas nas diferentes regiões do Brasil.

Estado	Região	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT
RS	Alto Uruguai		xxx	xxx	xxx	xxx							
SC	Vale do Rio do Peixe		xxx	xxx	xxx	xxx							
PR	Central		xxx	xxx									
PR	Londrina, Marialva		xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			
SP	Jundiaí, Indaiatuba		xxx	xxx	xxx								
SP	Porto Velho, São Miguel		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx						
SP	Jales, Tupi										xxx	xxx	Xxx
PE e BA	Submédio São Francisco	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	Xxx

Fonte: CD - Manejo de uvas sem sementes, autor César Mashima, publicado pelo SEBRAE em 2004.

É observado que a principal vantagem da viticultura do Submédio São Francisco em relação às demais regiões produtoras do país, advém, principalmente, da possibilidade

de obtenção de ciclos sucessivos de produção, possibilitando colheitas em qualquer época do ano. Isto permite aproveitar as melhores oportunidades de preços, ocupando as “janelas” de mercados externo e interno.

O mercado externo para uva de mesa brasileira é um mercado de contra-estação voltado para o consumo “**winter fruit**” dos países importadores do hemisfério Norte, onde se destacam dois importantes mercados: a União Européia e os Estados Unidos. Existem durante o ano duas janelas bem claras para a exportação da uva brasileira, uma que vai de abril a junho, quando se comercializa um terço das exportações e outra que inicia em outubro e finaliza em dezembro, quando se embarcam os dois terços restantes.

Mediante o exposto acima, definiu-se o plano de produção e comercialização conforme a Tabela (23).

Tabela 23 – Plano de produção e comercialização.

CULTURA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Uva												

- Produção
 - Comercialização

Necessidade de água na irrigação para o período de um mês

A Tabela 24 apresenta os valores que determinam a quantidade de água mensal para cultura de uva em uma área de um hectare. Estes valores são calculados a partir dos procedimentos utilizados no Capítulo 5 e das equações apresentadas a seguir:

$$NIL = ET_c - PE \quad (35)$$

$$NIB = \frac{NIL}{\eta_{irrig}} \cdot 100 \quad (36)$$

$$Dm = NIB \cdot 10 \quad (37)$$

onde:

NIL necessidade de irrigação líquida (mm/mês)

PE precipitação efetiva (mm/mês)

NIB necessidade de irrigação bruta (mm/mês)

η_{irrig} eficiência do sistema de irrigação adotado (%)

Dm demanda mensal d'água para um hectare (m³/ha.mês)

O coeficiente da cultura representa um percentual de consumo de água em relação à evapotranspiração de referência, e que varia com o estado fenológico da cultura, adotamos o valor de 0,65 para o projeto, pois corresponde ao estado de crescimento do fruto, fase em que a planta requer o maior volume de água.

Tabela 24 – Demanda de água mensal para cultura da uva em 1 ha.

Mês	Eto (mm/mês)	Kc	Etc (mm/mês)	PE (mm/mês)	NIL (mm/mês)	NIB (mm/mês)	Dm (m ³ /ha.mês)
JAN	189,11	0,65	122,92	83,21	39,71	41,80	418,01
FEV	163,65	0,65	106,37	77,13	29,24	30,78	307,84
MAR	169,55	0,65	110,21	129,20	-18,99	-19,99	-199,88
ABR	156,37	0,65	101,64	65,41	36,23	38,14	381,37
MAI	150,16	0,65	97,60	22,13	75,47	79,44	794,42
JUN	151,57	0,65	98,52	11,58	86,94	91,52	915,21
JUL	161,14	0,65	104,74	8,65	96,09	101,15	1011,52
AGO	182,79	0,65	118,81	3,82	115,00	121,05	1210,48
SET	207,92	0,65	135,15	5,26	129,88	136,72	1367,20
OUT	227,86	0,65	148,11	9,74	138,37	145,65	1456,49
NOV	209,77	0,65	136,35	49,33	87,03	91,61	916,06
DEZ	194,86	0,65	126,66	66,72	59,94	63,09	630,91

De acordo com a Tabela 24, o mês de outubro apresenta os maiores índices para os parâmetros de Necessidades de Irrigação Bruta (NIB), tornando-se o mês crítico para a cultura de uva, ou seja, o mês em que a cultura mais precisa de água.

Porém, seguindo o plano de produção e comercialização, no mês de outubro estará ocorrendo a comercialização do cultivo, ou seja, a terra deverá estar em repouso; então o mês que apresenta o maior consumo de água e que se encontra no período de produção é o mês de setembro, fazendo com que o seu valor de NIB máximo seja o utilizado no dimensionamento do sistema de irrigação.

Cabe destacar que, durante esses meses, ocorrem elevados níveis de radiação solar.

Parâmetros para manejo de irrigação diária

A Tabela 25, que apresenta os valores calculados dos parâmetros para manejo de irrigação, foi elaborada utilizando os resultados obtidos na Tabela 24 com as seguintes equações:

$$NIL_{diário} = \frac{NIL}{D} \quad (38)$$

$$Ll = NIL \cdot TR \quad (39)$$

$$Lb = \frac{Ll + Lv}{E} \cdot 100 \quad (40)$$

$$Dm_{p/ha} = Lb \cdot C \cdot 10 \quad (41)$$

$$Dm_{Total} = Dm_{p/ha} \cdot A \quad (42)$$

$$T = \frac{k \cdot Lb \cdot D}{n \cdot q} \quad (43)$$

$$\dot{V}_B = Dm_{Total} / T \quad (44)$$

onde:

LI	lâmina líquida de irrigação (mm)
NIL _{diário}	necessidade de irrigação líquida diária (mm/dia)
Dm _{p/ha}	demanda diária total de água para irrigação por hectare (m ³ /dia/ha)
Dm _{Total}	demanda diária total de água para irrigação para área irrigada (m ³ /dia)
TR	turno de rega (dia)
Lb	lâmina bruta de irrigação com lavagem dos sais (mm)
Lv	lâmina de lavagem dos sais (mm)
C	coeficiente de cobertura para uva com irrigação por gotejamento, igual a 0,5
A	área irrigada (ha)
T	hora de funcionamento/unidade de rega
n	número de emissores / ha
q	vazão do emissor (l/h)
k	igual a 333, constante para 30 dias de trabalho por mês
$\dot{V}_B$	vazão de bombeamento (m ³ /h)
D	número de dias trabalhados.

Tabela 25 – Parâmetros para manejo de irrigação - cultura: uva – 2,00 ha.

Mês	$Nl_{diário}$ (mm/dia)	TR (dia)	LI (mm)	Lb (mm)	$Dm_{p/ha}$ (m ³ /dia/ha)	Dm_{Total} (m ³ /dia)	T (hora)	$\dot{V}_B$ (m ³ /h)
JAN	1,32	1,00	1,32	2,45	12,23	24,46	2,57	9,51
FEV	0,97	1,00	0,97	2,08	10,40	20,79	2,19	9,51
MAR	-0,63	1,00	-0,63	0,39	1,93	3,86	0,41	9,51
ABR	1,21	1,00	1,21	2,32	11,62	23,24	2,44	9,51
MAI	2,52	1,00	2,52	3,70	18,50	37,01	3,89	9,51
JUN	2,90	1,00	2,90	4,10	20,51	41,03	4,31	9,51
JUL	3,20	1,00	3,20	4,42	22,12	44,24	4,65	9,51
AGO	3,83	1,00	3,83	5,09	25,44	50,88	5,35	9,51
SET	4,33	1,00	4,33	5,61	28,05	56,10	5,90	9,51
OUT	4,61	1,00	4,61	5,91	29,54	59,08	6,21	9,51
NOV	2,90	1,00	2,90	4,11	20,53	41,06	4,32	9,51
DEZ	2,00	1,00	2,00	3,16	15,78	31,56	3,32	9,51

Na elaboração da Tabela 25, considerando uma área de 2 ha com um espaçamento 4 m por fileira e 2,5 m por planta, adotou-se um valor padrão para sistemas de irrigação por gotejamento de 5.000 emissores por hectare.

Adotou-se 1 mm de lâmina de lavagem dos sais (L_v), valor padrão adotado para projetos de irrigação, além de definir a vazão dos emissores em 1,2 l/h, o qual assegura o tempo de rego por emissor ser igual às horas trabalhadas por dia por um sistema fotovoltaico (6 horas), no mês de maior necessidade hídrica para a cultura no período de produção (mês de setembro).

Por outro lado, escolheu-se o turno de rega igual a 1 dia para garantir as vantagens inerentes ao método de irrigação solar localizada, e não perder dias de energia solar disponível.

Para o cálculo da lâmina líquida de irrigação (LI), considerou-se a equação $LI = Nil \times TR$, que só é válida quando os valores obtidos são inferiores ou iguais à capacidade de armazenamento dos solos.

Dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V

A seguir são apresentadas as expressões de cálculo de um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V.

A potência hidráulica produzida pela bomba pode ser escrita em função da radiação solar coletada, como segue:

$$P_h = A_G \cdot I_{col} \cdot \eta_{FV} \cdot \eta_{mb} = \rho \cdot g \cdot H_m \cdot \dot{V}_b \quad (45)$$

onde

P_h potência hidráulica produzida (W)

A_G área do módulo fotovoltaico(m²)

I_{col}	radiação solar horária coletada (W/m^2)
η_{FV}	eficiência do gerador fotovoltaico (12 %)
η_{mb}	eficiência do conjunto motobomba (25 %)
ρ	densidade da água (1000 kg/m^3)
g	aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$)
H_m	altura total manométrica (m)
$\dot{V}_B$	vazão de água bombeada (m^3/s)

Por outro lado, a potência do gerador fotovoltaico pode ser calculada a partir da seguinte forma:

$$P_{FV} = A_G \cdot I_{col} \cdot \eta_{FV} \quad (46)$$

Considerando a potência nominal do gerador fotovoltaico ($P_{FV,nom}$) correspondente a uma radiação solar (I_{col}) igual a 1600 W/m^2 para um sistema com concentrador tipo V (Capítulo 3), pode-se dizer que:

$$A_G \cdot \eta_{FV} = \frac{P_{FV,nom}}{1600} \quad (47)$$

Substituindo a Equação 47 na Equação 45 e integrando a equação resultante ao longo de todo o dia, tem-se a Equação 48, que relaciona a energia solar coletada H_{col} (Joule/m²) com a energia hidráulica:

$$\frac{H_{col} \cdot P_{FV,nom} \cdot \eta_{mb}}{1600} = \rho \cdot g \cdot H_m \cdot V_B \quad (48)$$

onde V_B é o volume de água bombeado ou a demanda hídrica da cultura a ser irrigada, e através do método de Collares-Pereira, foi determinado o valor da radiação solar coletada (H_{col}) no plano do absorvedor para o caso de concentradores tipo V, utilizando o valor médio mensal de 9,297 kWh/m² nos cálculos efetuados.

Considerou-se também, o nível crítico do sistema de bombeamento, que deve ser aplicado na Equação 48, reduzindo o valor da radiação coletada (H_{col}). Baseado em resultados experimentais foi adotado o valor de 100 W/m² para o nível crítico.

Após a determinação do sistema de geração fotovoltaico, deve-se dividir pelo fator de 1,6 que representa o benefício proporcionado pelo uso do concentrador tipo V, determinado no Capítulo 3.

A Tabela 26 apresenta o resumo do dimensionamento do sistema de geração fotovoltaico.

Tabela 26 – Parâmetros do sistema de geração fotovoltaico.

Hcol (kWh/m ²)	Hcol (MJ/m ²)	Energia Hidráulica (MJ)	P _{FV,nom} (kW)	P _{FV,nom} concentrador tipo V (kW)	com	Nº de módulos (Potência do módulo - 53 Wp)
9,297	33,469	24,740	5,046	3,154		59,507

6.3.3. Dimensionamento do sistema de irrigação

O sistema foi dimensionado com base nos dados obtidos no item 6.3.2, levando em conta ainda informações complementares, estabelecidas pelos fabricantes dos equipamentos de irrigação e projetistas:

1. Variação máxima de pressão no sistema de 20% da pressão de serviço do emissor;
2. A variação máxima de vazão no sistema não superior a 10%;
3. A bomba submersa é definida utilizando os dados de vazão (Tabela 25) e altura manométrica total;
4. Velocidade máxima nas tubulações nunca superior a 2,5m/s.

O dimensionamento do sistema foi resumido na Tabela 27, a seguir:

Tabela 27 – Informações técnicas do projeto.

Sistema de irrigação.....	Gotejamento
Cultura.....	Uva
Área irrigada (ha).....	2,00
Espaçamento (m x m).....	4,0 x 2,5
Eficiência de sistema de irrigação (%).....	95
Parâmetros para manejo do sistema	
Necessidade de irrigação bruta (mm/dia).....	5,61
Número de emissores por hectare.....	5.000
Vazão do emissor (l/h).....	1,9
Volume máximo aplicado por planta/dia (m ³ /dia).....	0,28
Turno de rega (dia).....	1,0
Nº unidade de rega.....	1,0
Dias de trabalhos no mês.....	30
Características dos emissores	
Marca.....	Netafim
Modelo.....	Tiran
Diâmetro da linha porta emissor (mm).....	16,0
Espaçamento dos emissores na linha (m).....	0,5
Vazão do emissor (l/h).....	1,9
Pressão média de serviços (mca).....	10,0
Cálculo de altura manométrica	
Pressão média serviço (m).....	10,0
Perda carga da linha emissor (m).....	1,0
Perda carga da tubulação secundária (m).....	0,7
Perda carga localizada (m).....	0,8
Perda carga filtros (m).....	0,5
Perda carga da tubulação recalque poço (m).....	27
Altura manométrica total (Hm).....	45
Dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico	
Demanda total de água diária para o mês mais crítico (m ³ /dia)	56,10
Número de unidades de bombeio.....	1
Tipo de bomba e modelo.....	Submersa
Marca e modelo.....	Dancor 11.2 S – 11
Número de estágios.....	11
Vazão média (m ³ /h).....	9,51
Módulo fotovoltaico.....	Monocristalino de 53 Wp
Número de módulos.....	60
Radiação total média disponível na superfície do absorvedor em kWh/m ²	9,297
Potência do sistema fotovoltaico com concentrador V (kWp)	3,18

6.4 Análise econômica

Neste item são apresentados procedimentos para uma análise de investimento referente a projetos de irrigação de uva utilizando o concentrador V em localidades remotas. Foi realizado um estudo comparativo do custo de um hectare irrigado com BFV para uma faixa de dois a nove hectares de área plantada nas regiões cristalina e sedimentar (Figura 38), verificando que, quanto maior for a área irrigada, menor o custo por hectare, além da maior aproximação entre as regiões cristalina e sedimentar. Escolheu-se uma área de dois hectares para análise da viabilidade econômica. Tais procedimentos devem ser vistos como contribuições ao processo de decisão, uma vez que outros fatores como os aspectos sociais, ambientais e culturais também devem ser considerados.

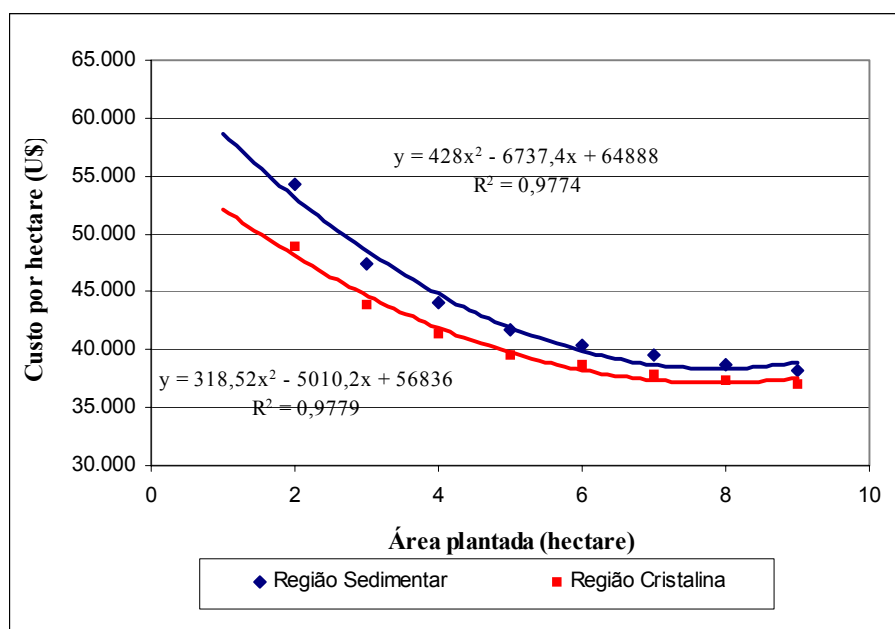


Figura 38 – Comparação do custo de implantação de um hectare de uva irrigada com bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V por área plantada.

Esta análise, em geral, utiliza-se de índices econômicos que permitem traduzir a atratividade de um investimento. Dentre estes índices pode-se destacar o valor presente líquido (VPL), o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital. Para a execução de tais análises procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite utilizar-se de certas equações já definidas na literatura e, assim, avaliar economicamente o projeto.

6.4.1 Roteiro para elaboração do fluxo financeiro de um empreendimento

Para elaboração do fluxo financeiro se faz necessário a formatação de planilhas que auxiliam na escolha do empreendimento; a primeira planilha a ser montada é a do programa de vendas, ou seja, a receita que será obtida em seu projeto. Para efeito de análise econômica do projeto considera-se apenas a receita operacional, que é definida pela quantidade do produto produzido pelo preço. Nesse trabalho adotou-se um valor médio de produção de 7.500 kg/ha para a primeira colheita e de 15.000 kg/ha para segunda colheita. Para o caso de uva sem semente há uma redução de um terço na produção. Os valores comerciais do quilo da uva foram os aplicados pela Frutti Vale Exportações S/A em dezembro de 2005. A receita está sendo calculada para dois tipos de produtos: produto A (uva com semente) e produto B (uva sem semente), adotando um horizonte de receita por três anos e realizando duas colheitas (C) por ano. A Tabela 28 representa o modelo do programa de vendas adotado no projeto.

Tabela 28 – Programa de vendas (receita) para uma área de 2 ha.

Descrição	Ano1		Ano 2		Ano3	
	1° C	2° C	3° C	4° C	5° C	6° C
Quantidade vendida (kg)						
Produto A	15.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Produto B	10.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Preço unitário (US\$/kg)						
Produto A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produto B	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Receita de Vendas (US\$)						
Produto A	15.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Produto B	25.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000

A segunda planilha representa os custos operacionais do projeto, que engloba os custos variáveis e os custos fixos da produção, como também, as despesas gerais variáveis e fixas. Primeiramente, é importante definir estes conceitos para que se possa classificar o numerário corretamente.

O custo é um gasto relativo ao bem ou serviço utilizado na produção de outros bens ou serviços, e são classificados em variáveis e fixos.

Os custos variáveis são aqueles que variam de acordo com a quantidade produzida. Os principais custos variáveis de produção são os seguintes:

- Insumos: defensores agrícola, material para adubação, embalagens e material para manutenção da latada;
- Fretes (transporte de material e produção);

- Mão-de-obra direta: serviços de aração, adubação, pulverização, capinação, podas, pinicados, raleio dos frutos, colheita e embalagem;
- Água;
- Combustível;
- Depreciação de equipamentos da produção (pulverizador, trator e carreta agrícola).

Os custos fixos normalmente não variam proporcionalmente à produção. Os principais são os seguintes:

- Mão-de-Obra Indireta: transporte dos trabalhadores, assistência técnica e administração;
- Manutenção dos equipamentos utilizados e da latada;
- Seguros da colheita, de acidente de trabalho e dos equipamentos.

A despesa é um gasto relativo ao bem ou serviços consumidos para obtenção de receitas. Por exemplo, salários da administração geral, depreciação de ativos fora da produção, comissão de vendedores. O custo de produção torna-se despesa quando o produto é vendido, mas costuma-se chamá-lo de custo do produto vendido.

Tabela 29 – Custos operacionais para uma área de 2 ha.

Descrição	Ano 1		Ano 2		Ano 3	
	1º C	2º C	3º C	4º C	5º C	6º C
Custo Variável de Produção (US\$)						
Adubação	2.545,74	2.291,17	2.291,17	2.291,17	2.291,17	2.291,17
Combustível	800,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
Mão de obra direta	7.763,48	3.000,00	3.000,00	3.000,00	3.000,00	3.000,00

Depreciação de equipamentos (taxa 10% aa)	1.228,26	1.228,26	1.228,26	1.228,26	1.228,26	1.228,26
Eventuais (2%)	222,18	117,82	117,82	117,82	117,82	117,82
Total Parcial	12.559,66	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25
Custo Fixo de Produção						
Manutenção	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Mão de obra indireta	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Seguro	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Eventuais (2%)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Total Parcial	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00
Despesa Geral Variável						
Despesas financeiras (1%)	125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
Total Parcial	125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
Despesa Geral Fixa						
Despesas Administrativas (5%)	108,28	105,62	105,62	105,62	105,62	105,62
Impostos fixos (IPTU e taxas) (5%)	173,91	173,91	173,91	173,91	173,91	173,91
Total Parcial	282,19	279,53	279,53	279,53	279,53	279,53
Custo global	15.007,45	9.629,15	9.629,15	9.629,15	9.629,15	9.629,15

Por fim, não menos importante, o gasto com o investimento que é definido como gasto ativado em função de sua vida útil ou de benefícios atribuíveis a futuros períodos. Cita-se como exemplo: estoques, aplicações, máquinas e equipamentos, construções civis, marcas e patentes, ações de outras empresas.

O investimento pode ser classificado da seguinte forma: investimento fixo e de capital de giro.

O investimento fixo é composto por equipamentos, terrenos, construções civis, instalações rurais, móveis, etc.

O investimento em giro é o capital necessário para por em marcha o projeto, ou seja, disponibilidades, estoques, e os recursos requeridos para sustentar as vendas a prazo.

A descrição dos itens que compõem o investimento fixo para o projeto é apresentada na Tabela 30. A sua ocorrência se concentra no ano zero, ou seja, quando da implantação do projeto. Já o investimento em giro para projetos com uva não foi considerado, pois é um cultivo que não permite processo de estocagem e sua comercialização é praticamente realizada à vista.

Tabela 30 – Investimento fixo para uma área de 2 ha.

Descrição	Ano 0			
	Quantidade	Unidade	Valor (US\$)	Total (US\$)
Terrenos	2	Hectare	1.739,13	3.478,26
Construções				
Latada (100 m x 100 m)	2	Unidade	5.584,75	11.169,50
Sistema de irrigação	1	Unidade	4.063,18	4.063,18
Poço semi artesiano				
Região cristalina	1	Unidade	2.666,67	2.666,67
Região sedimentar	1	Unidade	13.333,33	13.333,33
Complementos				
Mudas	2000	Unidade	0,78	1.565,22
Sist. De bomb. com V	1	Unidade	26.945,16	26.945,16
Equipamentos	1	Unidade	24.565,22	24.565,22
Total do investimento (US\$)				
Região sedimentar				85.119,87
Região cristalina				74.453,21

Verificou-se que a diferença no investimento entre a região sedimentar e cristalina está no valor do poço semi-artesiano e que o sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador tipo V corresponde a 31,6 % e 36 % do investimento total nas regiões sedimentar e cristalina, respectivamente.

Para um melhor entendimento dos quadros do fluxo financeiro do empreendimento que são apresentados a seguir, ainda é necessário conhecer alguns termos usados na área econômica:

1. **Gasto:** conceito amplo que significa sacrifício financeiro de uma maneira geral. O sacrifício é representado por entrega ou promessa de entrega de dinheiro ou outros ativos. Engloba, portanto, investimento, custo, despesa e perda;
2. **Perda:** gasto com bem ou serviço consumidos de forma anormal e involuntária. Não é um sacrifício feito com a intenção de obtenção de receitas. Ex: valor dos danos provocados por incêndios ou enchentes, obsolescência de estoques, gasto com mão de obra durante uma greve, refugos anormais, unidades defeituosas;
3. **Impostos proporcionais:** São os impostos proporcionais à Receita Bruta de Vendas como: ICMS, IPI e PIS/FINSOCIAL. A Receita Líquida de Vendas é obtida subtraindo estes impostos da Receita Bruta.

Foram elaboradas quatro planilhas apresentando o fluxo financeiro do empreendimento para uva nas seguintes condições: uva com semente em região sedimentar

(Tabela 31), uva com semente em região cristalina (Tabela 32), uva sem semente em região sedimentar (Tabela 33) e uva sem semente em região cristalina (Tabela 34). Teve-se como objetivo mostrar a viabilidade de implantação desta proposta em diversas situações.

Os itens que compõem a coluna de descrição nas planilhas 4 a 7 têm sua composição de preço mais detalhada no Anexo 2. Adotou-se um período de três anos para análise financeira. Escolheu-se a moeda Americana (dólar) para ser empregada, pois a uva é comercializada em dólar, desta forma, evitando as flutuações do câmbio. Os percentuais aplicados foram coletados junto a produtores de uva na região do Submédio do São Francisco.

Ressalta-se também, que o modelo adotado para apresentar o fluxo financeiro, é o mesmo adotado pelos órgãos financiadores de projeto desta natureza, o que permite uma análise o mais real possível.

Tabela 31 - Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva com semente em região sedimentar para uma área de 2 ha (US\$).

	ANO 0	ANO 1		ANO 2		ANO 3	
Descrição		1º C	2º C	1º C	2º C	1º C	2º C
Receita Bruta		15.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00
(-) Impostos Prop. (2,5%)		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Receita Líquida		14.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00
(-)Custo Variável Produção		12.559,66	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25
(-)Custo Fixo Produção		2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00
Lucro Bruto		25,34	20.347,75	20.347,75	20.347,75	20.347,75	20.347,75
(-)Despesa Geral Variável		125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
(-)Despesa Geral Fixa		282,19	279,53	279,53	279,53	279,53	279,53
Lucro		-382,45	19.995,85	19.995,85	19.995,85	19.995,85	19.995,85
Exercício anterior		-85.119,87	-85.502,32	-65.506,47	-45.510,63	-25.514,78	-5.518,93
(-) Investimentos	-85.119,87						
Fluxo de Caixa Empresa	-85.119,87	-85.502,32	-65.506,47	-45.510,63	-25.514,78	-5.518,93	14.476,91

Tabela 32 - Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva com semente em região cristalina para uma área de 2 ha (US\$).

	ANO 0	ANO1		ANO 2		ANO 3	
Descrição		1º C	2º C	1º C	2º C	1º C	2º C
Receita Bruta		15.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00
(-) Impostos Prop. (2,5%)		375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Receita Líquida		14.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00	29.625,00
(-)Custo Variável Produção		12.559,66	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25	7.237,25
(-)Custo Fixo Produção		2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00
Lucro Bruto		25,34	20.347,75	20.347,75	20.347,75	20.347,75	20.347,75
(-)Despesa Geral Variável		125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
(-)Despesa Geral Fixa		282,19	279,53	279,53	279,53	279,53	279,53
Lucro		-382,45	19.995,85	19.995,85	19.995,85	19.995,85	19.995,85
Exercício anterior		-74.453,21	-74.835,66	-54.839,81	-34.843,97	-14.848,12	5.147,73
(-) Investimentos	-74.453,21						
Fluxo de Caixa Empresa	-74.453,21	-74.835,66	-54.839,81	-34.843,97	-14.848,12	5.147,73	25.143,57

Tabela 33 - Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva sem semente em região sedimentar para uma área de 2 ha (US\$).

	ANO 0	ANO 1		ANO 2		ANO 3	
Descrição		1º C	2º C	1º C	2º C	1º C	2º C
Receita Bruta		25.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
(-) Impostos Prop. (2,5%)		625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00
Receita Líquida		24.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00
(-)Custo Variável Produção		16.327,56	9.408,42	9.408,42	9.408,42	9.408,42	9.408,42
(-)Custo Fixo Produção		2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00
Lucro Bruto		6.007,44	37.926,58	37.926,58	37.926,58	37.926,58	37.926,58
(-)Despesa Geral Variável		125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
(-)Despesa Geral Fixa		282,19	279,53	279,53	279,53	279,53	279,53
Lucro		5.599,65	37.574,67	37.574,67	37.574,67	37.574,67	37.574,67
Exercício anterior		-85.119,87	-79.520,22	-41.945,55	-4.370,88	33.203,80	70.778,47
(-) Investimentos	-85.119,87						
Fluxo de Caixa Empresa	-85.119,87	-79.520,22	-41.945,55	-4.370,88	33.203,80	70.778,47	108.353,14

Tabela 34 - Fluxo Financeiro do Empreendimento para uva sem semente em região cristalina para uma área de 2 ha (US\$).

	ANO 0	ANO 1		ANO 2		ANO 3	
Descrição		1º C	2º C	1º C	2º C	1º C	2º C
Receita Bruta		25.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
(-) Impostos Prop. (2,5%)		625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00
Receita Líquida		24.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00	49.375,00
(-)Custo Variável Produção		21.225,83	12.230,95	12.230,95	12.230,95	12.230,95	12.230,95
(-)Custo Fixo Produção		2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00	2.040,00
Lucro Bruto		1.109,17	35.104,05	35.104,05	35.104,05	35.104,05	35.104,05
(-)Despesa Geral Variável		125,60	72,37	72,37	72,37	72,37	72,37
(-)Despesa Geral Fixa		282,19	279,53	279,53	279,53	279,53	279,53
Lucro		701,38	34.752,14	34.752,14	34.752,14	34.752,14	34.752,14
Exercício anterior		-74.453,21	-73.751,83	-38.999,68	-4.247,54	30.504,61	65.256,75
(-) Investimentos	-74.453,21						
Fluxo de Caixa Empresa	-74.453,21	-73.751,83	-38.999,68	-4.247,54	30.504,61	65.256,75	100.008,89

Após o período de 3 anos, analisou-se as opções apresentadas no projeto, e verificou-se que o plantio de uva com semente em região sedimentar apresenta o menor fluxo de caixa, tornando-se positivo após a segunda colheita do terceiro ano; já para as uvas sem semente em região cristalina ou sedimentar, o fluxo de caixa torna-se positivo após a segunda colheita do segundo ano, destacando a uva sem semente em região cristalina que mostrou o melhor fluxo de caixa.

6.5 Conclusões da avaliação econômica do cultivo de uva pelo método do valor atual

Mediante estudo de comparação entre os métodos, para definir o mais adequado ao processo produtivo definido no trabalho, aplicou-se o indicador Valor Presente Líquido (VPL) na escolha da melhor opção para o projeto. Definido pela Equação (49) (PUCCINI, 1999), como sendo a soma algébrica de todos os fluxos de caixa descontados para o instante presente, à uma determinada taxa de juros “i”.

$$VPL_{(i)} = \sum_{j=0}^{n_p} \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (49)$$

Onde:

i taxa de desconto (%)

j período genérico que percorre todo fluxo de caixa (dia, mês ou ano)

FC_j fluxo genérico, podendo ser positivo (receita) ou negativo (custo) (R\$)

n_p número de períodos (dia, mês ou ano)

A taxa do VPL é baseada no método da Taxa Interna de Retorno (TIR) que é definida como o percentual de retorno obtido sobre o saldo investido e ainda não recuperado em um projeto de investimento. Matematicamente, a Taxa Interna de Retorno é a taxa de juros que torna o valor presente das entradas de caixa igual ao valor presente das saídas de caixa do projeto de investimento.

A Taxa Interna de Retorno de um investimento pode ser:

- Maior do que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA – são taxas de mercado, sem risco para o monetário): significa que o investimento é economicamente atrativo;
- Igual à Taxa Mínima de Atratividade: o investimento está economicamente numa situação de indiferença;
- Menor do que a Taxa Mínima de Atratividade: o investimento não é economicamente atrativo, seu retorno é superado pelo retorno do investimento sem risco.

Pode-se tomar como exemplo de TMA, o rendimento da poupança anual, que varia a uma taxa entre 7 a 8% aa. Se comparada com as taxas obtidas pelo Valor Atual (VA) na Tabela 35, verifica-se que o projeto de uva com semente em região sedimentar, iguala-se à taxa de poupança, tornando esta opção não atrativa.

Tabela 35 - Comparação entre os projetos.

Dados para análise	Região Sedimentar		Região Cristalina	
	Uva com semente	Uva sem semente	Uva com semente	Uva sem semente
Período (ano)	3	3	3	3
Valor Atual (% aa)	7,45	49,38	14,37	50,68

As taxas obtidas para o Valor Atual tornam-se atrativas quando os índices de VA começam a ficar positivos. Verificou-se que a melhor condição para o projeto proposto é a plantação de uva sem semente na região cristalina. Contudo, esta região apresenta uma alta probabilidade de ter água imprópria para o uso em sistemas de irrigação, o que propicia a opção do cultivo de uva sem semente em regiões sedimentares, que apresenta água de boa qualidade. Sabe-se ainda que esse tipo de uva requer um maior cuidado em seu manejo.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

O abastecimento de água para atender ao consumo humano ou sistemas produtivos (irrigação) é um problema ainda não resolvido para uma grande parcela da população mundial, principalmente nos países chamados em desenvolvimento. Tendo em vista que o abastecimento de água está diretamente relacionado com o acesso a energia, e que, principalmente para as populações rurais isoladas, a extensão da rede elétrica é onerosa, as formas de geração autônoma de energia podem contribuir significativamente para a solução deste problema.

Este trabalho de bombeamento de água com tecnologia solar fotovoltaica e concentrador tipo V aplicado em sistemas de irrigação, apresenta-se como uma proposta atrativa para atender a demanda de água dos agricultores que têm sua propriedade afastada

da rede elétrica convencional, propiciando a sua inclusão em processos produtivos, com o objetivo de melhorar seus ingressos e condição de vida.

A primeira análise realizada permitiu mostrar que existem importantes áreas da região Semi-árida do Nordeste que contam com expressivas reservas de água de origem sedimentar. Em particular, foi verificado que o estado de Pernambuco apresenta um potencial de águas subterrâneas que podem ser aproveitadas em sistemas de irrigação acionados pela tecnologia de bombeamento fotovoltaico.

Foi proposto também, integrar o cultivo da uva a sistemas BFV através da irrigação por gotejo, por ser uma cultura adaptada à região semi-árida e apresentar elevadas taxas de ocupação de mão-de-obra e de valor agregado.

Realizou-se estudos comparativos do comportamento do sistema de bombeamento acionado por geradores fotovoltaicos fixos, com rastreamento e com concentração através de procedimentos experimentais, medindo o volume de água bombeada e a radiação solar coletada nos planos fixo, no plano de abertura do gerador e na região absorvedora do concentrador. As relações de benefício para a radiação solar e para o volume de água bombeada foram calculadas para todos os casos estudados. Verificou-se que, para um valor de radiação solar no plano horizontal igual a 5500 Wh/m^2 (aproximadamente a média anual para Recife), a relação de benefício em volume de água bombeada obtida, com a utilização do concentrador V com relação ao sistema com rastreamento, é da ordem de 1,68, e com relação ao sistema fixo, é da ordem de 2,28.

Os custos de investimento nos três tipos de sistema foram comparados tomando-se como base o volume anual de água bombeada pelo sistema ensaiado. Constatou-se que para um sistema com as características do estudado, pode haver uma economia de 23% no custo de investimento por m³ de água bombeada quando se utiliza rastreamento solar e de 47% quando se utiliza um concentrador tipo V.

Foi determinado o balanço de água com base mensal de um sistema de irrigação por gotejamento localizado na cidade de Petrolina-PE, Brasil, e estimada a superfície máxima que pode ser irrigada por um sistema de bombeamento fotovoltaico com concentrador V. Com um arranjo de 1,3 kWp verificou-se que o sistema é capaz de irrigar uma área de 2,11 ha. Um equipamento BFV fixo, com o mesmo arranjo fotovoltaico, é capaz de irrigar uma área de 1,20 ha. Em ambos os casos, o armazenamento de água no solo contribui com um aumento de 33% na área irrigada. Os resultados foram obtidos assumindo que não ocorre déficit de água ao longo do ano.

O uso do concentrador tipo V como concentrador para sistemas fotovoltaicos de bombeamento aumenta a área máxima irrigada em 76% (2,11 ha), quando comparado com o sistema fixo (1,2 ha) com o mesmo arranjo fotovoltaico.

A análise financeira feita para o caso específico, proporciona informação para uma primeira aproximação e comparação dos custos para as opções consideradas, e mostra também de forma bastante detalhada, como os diversos parâmetros envolvidos interferem

nos custos finais dos projetos. Ou seja, não se pode dizer a simples vista que um sistema de BFV é mais apropriado do que o outro. Deve ser feito um estudo de todas as possibilidades e variáveis existentes, segundo as condições específicas de cada local.

Aplicou-se o método de análise do processo produtivo e o de Valor Atual (VA) que estão baseados na Taxa Interna de Retorno. Verificou-se que a melhor condição para o projeto proposto é a plantação de uva sem semente na região cristalina; contudo, esta região apresenta uma alta probabilidade de ter água imprópria para o uso em sistemas de irrigação, o que sugere a opção pelo cultivo de uva sem semente em regiões sedimentares, que apresentam água de boa qualidade. O cultivo de uva sem semente requer cuidados extremos na sua implantação, pelo que se recomenda iniciar o cultivo de uva com semente na região sedimentar, que também apresenta boa taxa de retorno no período de três anos.

7.2 Trabalhos futuros

Esta Tese não esgota a análise de viabilidade de sistemas de bombeamento com energia solar fotovoltaica utilizada na irrigação. A aplicação desta tecnologia em escala comercial é relativamente nova e existem muitos aspectos que merecem ser desenvolvidos não só no Brasil, mas no mundo todo.

Como trabalhos futuros sugere-se:

1. Elaboração de um texto técnico para irrigação com sistema de BFV;
2. Integrar outras técnicas de irrigação ao sistema de BFV;
3. Realizar um estudo diário do balanço hídrico para a cultura da uva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁVILA-NETTO J.; AZEVEDO P. V.; SILVA B. B.; SOARES J. M.; TEIXEIRA A. H. C. Table grape water requiremts in the submedium São Francisco region. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 8, p. 1559-1566, ago, 2000.
- BERRY, J. P.; ESTEVE, D.; FOLLEA, D.; VIALARET, G. Photovoltaic generators with concentration. *Solar Energy*, v. 29, n. 3, p. 235-243, 1982.
- BIONE, J., FRAIDENRAICH, N. VILELA, O. C. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by .xed, tracking and V-trough generators. *Solar Energy*, v. 76, p. 703-711, 2004.
- BUCKS, D. A.; FRENCH, O. F.; NAKAYAMA, F. F.; FANGMEIER, D. D. Trickle irrigation management f or grape production. In: *INTERNATIONAL DRIP*, 1985.
- CAMPANILI, M. No Brasil, há déficit no meio de abundância. *Jornal Estado de São Paulo*, São Paulo, 16 mar, 2003.
- CARVALHO, O.; EGLER, C. A. G. Alternativas de Desenvolvimento para o Nordeste Semi-Árido. Ministério da Fazenda, Banco do Nordeste do Brasil, p. 204, 2003.
- CHRISTOFIDIS, D. Recursos Hídricos e Irrigação no Brasil. Brasília: CDS – UnB, 1999.
- CHRISTOFIDIS, D. Olhares sobre a Política de Recursos Hídricos no Brasil: o caso da bacia do Rio São Francisco. Tese de Doutorado, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- CODEVASF. Histórico e vantagens. Disponível em ([http://www codevasf.gov .br/menu/os_vales/histórico](http://www.codevasf.gov.br/menu/os_vales/histórico)). Acesso em: 25 ago. 2005.

- COLLARES-PEREIRA M., RABL A. The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between hourly and insolation values. *Solar Energy*, v. 22, p. 115, 1979.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste. Relatório preliminar – 1ª etapa - 225.000 km². Disponível em: (<http://www.cprm.gov.br/rehi/projeto.pdf>). Acesso em: 25 ago. 2005.
- DOBÓN, F.; ACOSTA, L. E OSUNA, R. Very low concentration system. In: *Anais of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munique, Alemanha, p. 22-26, 2001.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das Culturas. In: *Encontro da FAO, Roma, Itália, Anais*, n.33, p. 306, 1979.
- EVANS, R. G.; SPAYD, S. E.; WAMPLE, R. L.; KROEGER, M. W.; MAHAN, M. O. Water use of *Vitis vinifera* grapes. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 23, p. 109-124, 1993.
- FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L. Pequenos sistemas de bombeamento fotovoltaico: análise da competitividade com outras opções. *III Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, São Paulo, junho, 1998.
- FONTES, A. S.; OLIVEIRA, J. I. R.; MEDEIROS, Y. D. P. A evaporação em açudes no semi-árido nordestino do Brasil e a gestão das águas. In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba, Paraná, 2003.
- FRAIDENRAICH, N.; COSTA, H. S. Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system. *Solar and Wind Technology*, v. 5, n. 2, p. 121-126, 1988.

- FRAIDENRAICH, N.; ALMEIDA, G. J. Optical properties of V-trough concentrators. *Solar Energy*, v. 47, n. 3, p. 147-155, 1991.
- FRAIDENRAICH, N. Analytic solutions for the optical properties of V-trough concentrators. *Applied Optics*, v. 31, n. 12, p. 131–139, 1992.
- FRAIDENRAICH, N. Analytic solutions for the optical and radiative properties of nonaccepted light radiation of V-trough concentrators. *Applied Optics*, v. 34, n. 22, p. 4800-4810, 1995.
- FRAIDENRAICH, N. Design Procedure of V-trough cavities for photovoltaic systems. *Applied Optics*, v. 6, n. 10, p. 43-54, 1998.
- FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E. M. Experimental performance of a PV V-trough system. In: *ISES Solar World Congress*, Jerusalém, Israel, 1999.
- FRAIDENRAICH N.; VILELA O. C. Performance of solar systems with non linear behavior calculated by the utilizability method. Application to PV solar pumps. *Solar Energy* v. 69, p. 131-137, 2000.
- FREILICH J.; GORDON J.M.. Case study of a central-station grid intertie photovoltaic system with V-trough concentration, *Solar Energy*, v. 46, p. 267-273, 1991.
- GOSWAMI, D.Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. *Principles of Solar Engineering*. Taylor & Francis Publishing, Segunda edição, Philadelphia, Estados Unidos, 2000.
- GOUVELLO, CH. DE; REICHE, K. D.; RYSANKOVA, E. E. Bolivia: The difficulty in establishing coherence between the sectoral policy and local initiatives. In: *Decentralised Rural Eletrification*. Paris: Systemes Solaires, 2000.

- GORDON, J. M.; KREIDER, J. F.; REEVES P. Tracking and stationary flat plate solar collectors: yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications. *Solar Energy*, v. 47, n. 4, p. 245-252, 1991.
- HARGREAVES, G.H. Precipitation dependability and potentials for an agricultural production for Northeast Brazil. In: EMBRAPA e Utah State University, p. 123, 1974.
- HOLLANDS, K. G. T., A concentrator for thin-film solar cells. *Solar Energy*, v. 13, p. 149-163, 1971.
- KLEIN S. A. Calculation of flat-plate collector utilizability. *Solar Energy*, v. 21, p. 393-402 1978.
- KLOTZ F. H. PV systems with V-trough concentration and passive tracking. Concept and economic potential in Europe. In: 13th European photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Nice, France, 1995.
- Leão, P. C. S.; Soares, J. M. A viticultura no semi-árido brasileiro. Editado: Embrapa Semi-Árido, Petrolina, PE, 2000.
- LIU B. Y. H.; JORDAN R. C. The long term average performance of flat plate solar heat collectors. *Solar Energy*, v. 7, p. 53 1963.
- LORENZO E.; MACAGNAN M. H. Considerations in the design of a one-axis tracking photovoltaic system. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 2, p. 45-55, 1994.
- LOXSOM F.; DURONGKAVEROJ P. Estimating the performance of a photovoltaic pumping system. *Solar Energy*, v. 52, p. 215-219 1994.

- MILLO J. L.; CUNHA J. B. Manual do sistema de irrigação do xique-xique. Editado: Ministério do Interior – SUDENE, 1982.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO / INCRA. Novo retrato da agricultura familiar. O Brasil redescoberto. Brasília: MDA/INCRA, p. 74, 2000.
- MANDELI, F. Comportamento fisiológico das principais cultivares *Vitis vinifera* para região de Bento Gonçalves-RS. Piracicaba, ESALQ, p. 125, 1984.
- MOLLE, F.; CADIER, E. Manual do pequeno açude: construir, conservar e aproveitar pequenos açudes no Nordeste brasileiro. Sudene, Recife, 1992.
- NANN, S. Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates. *Solar Energy*, v. 45, n. 6, p. 385-393, 1990.
- PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A. Paes. An analysis of the criticism of the Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.46, p.149-157, 1997.
- PUCCINI, A. L. Matemática Financeira. Objetiva e Aplicada. São Paulo: Saraiva, 1999.
- RAUH, H. U.; DREB, A.; PRUSCHEK, R. Annually generated electricity of one and two axes solar tracking systems. In: 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Nice, France, outubro, 1995.
- RABL, A. Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*, v. 18, p. 93-111, 1976.
- REBOUÇAS, ALDO. Água doce no mundo e no Brasil. Águas Doces no Brasil. São Paulo, Instituto de Estudos Avançados da USP, São Paulo, 1999.
- STACEY, R. W.; MCCORMICK, P. G. Effect of concentration on the performance of flat plate photovoltaic modules. *Solar Energy*, v. 33, n. 6, p. 565-569, 1984.

- SILVA PAZ, V. P.; FRANCO R.; CAMPOS F. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. Revista Brasileira de Engº. Agrícola e Ambiental , v. 4, n. 3. 2000.
- SUASSUNA, J. A salinidade de águas do Nordeste Semi-árido. 4º Reunião Especial da SBPC, Feira de Santana-BA, Novembro 1996.
- SUASSUNA, J. A má distribuição da água no Brasil”. Site: www.riosvivos.org.br/canal.php?canal=34&mat_id=3318, (1999).
- SUASSUNA, J. A Pequena e media açudagem no semi-árido nordestino: uso da água na produção de alimentos”. Disponível em: (<http://www.fundaj.gov.br/docs/texttrop.html>). Acesso em: ago. 2005.
- SUDENE - Portaria no 1.182/99 (Área Municipal, 1997-FIBGE e Contagem da População, 1996 – FIBGE), (1997) Site: <http://www.valedosaofrancisco.com.br/Municípios/EstadosAreasMunicipios01.asp>
- TEIXEIRA, A.H. DE; AZEVEDO, P. V. DE. Zoneamento agroclimático para a videira europeia no Estado de Pernambuco, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, p.139-145, 1996.
- TEXEIRA, E. C.; AGUIAR, D. R. D.; VIEIRA, W. DA D. Agricultura comercial e familiar num contexto de abertura econômica. In: Reforma da política agrícola e abertura econômica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, p. 210, 1996.
- THORNTHWAITE, C.W.; Wilm, H.G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration. In: Transactions of the American Geophysical Union, Washington, D.C., v. 17, p. 686-693, 1944.
- THORNTHWAITE, C.W. The moisture factor in climate. In: Transactions of the American Geographical Union, Washington, D.C., v. 27, p. 41-48, 1946.

- TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F.J.M.; NOGUEIRA, A.M.B.; GROSSI, H. G. ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL – Banco de Dados Terrestres, Ed. Universitária, UFPE, 2000.
- VILELA O. C.; FRAIDENRAICH N. A methodology for the design of PV water supply systems. In: Progress Photovoltaics, v. 9, p. 349-361, 2001.
- ZARMI Y. Fluctuations in long-term performance of solar devices: The single pass, open-loop hot water system example. Solar Energy, v. 38, p. 323-326, 1987.
- WILLIAMS, L. E.; MATTHEWS, M. A. Grapevine. In: Stewart, B. A.; Nilsen, D. R. (Ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison : American Society of Agronomy, p. 1019-1055, 1990.
- WINKLER, A.J.; COOK, J.A.; KLIEWER, W.M.; LIIDER, L.A. General viticulture. Segunda edição,. Berkeley, University of California Press., p. 710 , 1974.
- WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. Journal of Irrigation and Drainage Division, New York, v. 108, n. IR2, p. 57-74, 1982.

I – Trabalhos elaborados durante a elaboração desta Tese

Artigos publicados em periódicos (Completo)

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, p. 703-711, 2004.

VILELA, O. C.; BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N. Simulation of grape culture irrigation with photovoltaic V-trough pumping systems. Renewable Energy, v. 29, p. 1697-1705, 2004.

Trabalhos em eventos (Completo)

BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Technical and economical analysis of a grape irrigated culture in the northeast of Brazil driven by a V-trough photovoltaic water pumping system. In: Congresso Interacional Rio 5 – World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, 2005.

BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Potencial da região semi-árida do nordeste do Brasil para a implantação de culturas irrigadas com bombeamento fotovoltaico. In: XII Congresso Iberico y VII Iberoamericano de Energía Solar, 2004, Vigo, 2004.

VILELA, O. C.; BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N. Modelo diário de sistemas de microirrigação utilizando geradores fotovoltaicos fixos, com rastreamento e com concentradores tipo V. In: XII Congresso Iberico y VII Iberoamericano de Energía Solar, 2004, Vigo. XII Congresso Iberico y VII Iberoamericano de Energía Solar, 2004.

VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N.; BIONE, J. Long term performance of water pumping systems driven by photovoltaic V-trough generators. In: ISES Solar World Congress 2003, 2003, Göteborg. Proceedings of ISES 2003. Göteborg : International Solar Energy Society-Solar Energy Association of Sweden.

VILELA, O. C.; MELO FILHO, J. B.; FRAIDENRAICH, N. Comportamento operacional de sistemas de bombeamento com geradores fotovoltaicos acoplados a concentradores tipo V. In: XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, 2002, Vilamoura - Algarve. Anais do XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, 2002.

II – Projeto elaborado e aprovado durante a elaboração desta Tese

Título: Geração de energia com tecnologia renováveis no semi-árido do Nordeste.

Entidade financiadora: Ministério de Minas e Energia

Vigência: 23/12/04 à 30/12/2007.

Metas do projeto:

- 1- Irrigação por bombeamento fotovoltaico visando à produção de frutas com alto valor agregado (Figura 39);
- 2- Inserção da tecnologia de sistema fotovoltaico interligado à rede ou autônomos em locais com empreendimentos produtivos.



Figura 39 – Local escolhido para instalação do sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação da cultura da uva (Município de Pão de Açúcar-AL).