UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRO-ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZADOS NO BOMBEAMENTO DE ÁGUA

CARLOS ALBERTO MACHADO MOREIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Dezembro – 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRO-ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZADOS NO BOMBEAMENTO DE ÁGUA

CARLOS ALBERTO MACHADO MOREIRA

Orientador: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

Co-orientador: Dr. Antonio Ribeiro da Cunha

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Dezembro – 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO – SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Moreira, Carlos Alberto Machado, 1946-
M838a Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água / Carlos Alberto Machado Moreira. – Botucatu : [s.n.], 2009.
xii, 116 f. : il. color., tabs., gráfs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2009
Orientador: Odivaldo José Seraphim
Co-orientador: Antonio Ribeiro da Cunha
Inclui bibliografia.

1. Fotovoltaico. 2. Bombeamento de água. 3. Painéis. 4. Energia. I. Seraphim, Odivaldo José. II. Cunha, Antonio Ribeiro. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **"AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRO-ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTÁICOS UTILIZADOS NO BOMBEAMENTO DE ÁGUA"**

ALUNO: CARLOS ALBERTO MACHADO MOREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON

PROF. DR. LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Data da Realização: 14 de dezembro de 2009.

Dedico este trabalho a minha esposa Wilma
pelo companheirismo e pela aceitação no
compartilhamento do tempo.

Agradeço ao Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim
pelos ensinamentos e pela acolhida no
Programa de Pós-graduação.

Agradeço ao Dr. Antonio Ribeiro da Cunha
pela paciência amiga na condução dos
trabalhos de co-orientação.

Agradeço enfim a todos os amigos que, de
alguma forma, contribuíram para chegar até
este momento.

“Se você quer que aconteça diferente, então faça diferente!”

(autor desconhecido)

S U M Á R I O

Página

LISTA DE FIGURAS VIII
LISTA DE TABELAS XI
RESUMO 1
SUMMARY 3
1 INTRODUÇÃO 5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
2.1 Energia Solar 8
2.2 Energia Solar Fotovoltaica 9
2.2.1 Semicondutores 9
2.2.2 Célula Solar Fotovoltaica 11
2.2.3 Painel Solar Fotovoltaico 13
2.2.4 Sistema Solar Fotovoltaico 17
2.2.5 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos 19
2.2.6 A Energia Solar Fotovoltaica no Mundo 21
2.3 Energização Rural e o Abastecimento de Água 23
2.4 Sistema de Bombeamento Fotovoltaico 28
3 MATERIAL 32
3.1 Localização do Laboratório 32
3.2 Características Climáticas 33
3.3 Materiais e Equipamentos 34
3.4 Medições Meteorológicas 36
3.4.1 Velocidade e Direção do Vento 36
3.4.2 Radiação Solar 37
3.4.3 Temperatura Ambiente e Umidade Relativa 38
3.4.4 Índice Pluviométrico 39
3.5 Sistema de Bombeamento Fotovoltaico – Monocristalino (Sm) 39
3.5.1 Sistema Hidráulico 40
3.5.2 Equipamentos Elétricos 42

3.6 Material para a Operação do Sistema Policristalino - Sp 46
3.7 Monitoramento e Coleta de Dados 48
3.7.1 Sistema de Aquisição de Dados 48
3.7.2 Microcomputador 49
3.7.3 Software Proprietário do Equipamento Datalogger 50
3.7.4 Coleta de Dados 50
3.8 Disposição Final dos Sistemas de Geração Fotovoltaica 52
4 MÉTODOS 54
4.1 Determinação da Altura Manométrica 55
4.2 Diagrama Hidráulico dos Sistemas Sm e Sp 56
4.3 Diagrama Elétrico dos Sistemas Sm e Sp 56
4.4 Etapas do Processo de Bombeamento 57
4.5 Coleta dos Dados Meteorológicos e Elétricos 60
4.6 Forma e Relação dos Dados Coletados 61
4.7 Cálculo de Valores Elétricos e Hidráulicos 64
4.8 Avaliações e Comparações entre os Sistemas 67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 68
5.1 Radiação Solar e Índice Pluviométrico 68
5.1.1 Irradiância 71
5.2 Energia Disponível e Consumida 77
5.3 Volume de Água Bombeado (Vazão) 84
5.3.1 Vazão Média Diária 84
5.3.2 Vazão em Função da Irradiância 89
5.3.3 Vazão em Função Energia Disponível 92
5.3.4 Vazão em Função da Energia Consumida 95
5.4 Avaliação Geral dos Arranjos 98
6 CONCLUSÃO 100
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102
8 APÊNDICE 1 – Programa para coleta de dados no datalogger. 107

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 – Parte da tabela periódica dos elementos químicos. 10
Figura 2 – Efeito do campo elétrico em uma junção PN. 11
Figura 3 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica. 12
Figura 4 – Fotos de célula monocristalina (a) e policristalina (b). 13
Figura 5 – Painel solar fotovoltaico (Laboratório NEAR/FCA/UNESP) 14
Figura 6 – Estrutura básica do encapsulamento de um painel solar fotovoltaico 14
Figura 7 – Arranjo em série das células de um painel solar fotovoltaico. 15
Figura 8 – Parâmetros de potência máxima (Vmp e Imp) 16
Figura 9 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico. 17
Figura 10 – Esquema de um sistema isolado. 19
Figura 11 – Esquema de um sistema híbrido. 20
Figura 12 – Esquema de um sistema conectado à rede elétrica. 21
Figura 13 – Panorama da utilização da energia fotovoltaica e taxa de crescimento. 22
Figura 14 – Foto da tabela de eficiência energética para painéis fotovoltaicos. 22
Figura 15 – Etiqueta INMETRO de eficiência energética para módulos fotovoltaicos. 23
Figura 16 – Estrutura da oferta interna de energia no Brasil (2008) e no Mundo (2006). 26
Figura 17 – Bomba d'água manual 29
Figura 18 – Exemplo de uma bomba de diafragma. 30
Figura 19 – Exemplo de uma bomba centrífuga. 30
Figura 20 – Esquema de uma bomba volumétrica com indicação de fluxo. 31
Figura 21 – Instalações do NEAR (Depto. Engenharia Rural/FCA/UNESP). 32
Figura 22 – Sistemas Sm (painéis monocristalinos) e Sp (painéis policristalinos). 34
Figura 23 – Anemômetro. 37
Figura 24 – Piranômetro no plano horizontal. 37
Figura 25 – Piranômetro na mesma inclinação dos painéis solares. 38
Figura 26 – Termo-higrômetro. 38
Figura 27 – Pluviômetro. 39
Figura 28 – Vista da disposição física do sistema Sm. 39

Figura 29 – Estrutura metálica para Sistema Sm. 40
Figura 30 – Caixa-d'água inferior. 40
Figura 31 – Caixa-d'água superior. 41
Figura 32 – Sensores de nível. 41
Figura 33 – Sistema hidráulico. 42
Figura 34 – Moto-bomba. 42
Figura 35 – Válvula solenóide. 43
Figura 36 – Relé automotivo de 12 VCC. 44
Figura 37 – Resistor "shunt". 44
Figura 38 – Painéis solares fotovoltaicos monocristalinos. 45
Figura 39 – Botoeira. 46
Figura 40 – Estrutura metálica de sustentação do Sistema Sp. 46
Figura 41 – Painéis solares fotovoltaicos policristalinos. 47
Figura 42 – CR23X Micrologger (a), Interface com RS232 (b). 48
Figura 43 – Microcomputador do NEAR. 49
Figura 44 – Tela inicial do software PC208W – versão 3.3. 50
Figura 45 – CR23X Micrologger. 51
Figura 46 – Sistemas Monocristalino - Sm (esquerda) e Policristalino - Sp (direita). 52
Figura 47 – Distância geométrica entre as caixas-d'água inferior e superior. 52
Figura 48 – Ângulo de inclinação β dos painéis com o plano horizontal. 53
Figura 49 – Componentes para o cálculo da altura manométrica. 55
Figura 50 – Diagrama representativo das conexões e fluxos hidráulicos. 56
Figura 51 – Diagrama das conexões elétricas dos sistemas Sm e Sp. 57
Figura 52 – Etapas do controle de esvaziamento/bombeamento da caixa superior. 58
Figura 53 – Divisores de tensão VDIV 10:1. 60
Figura 54 – Imagem do arquivo de dados coletado pelo datalogger. 61
Figura 55 – Irradiação e índice pluviométrico diários - abril/2009. 69
Figura 56 – Irradiação e índice pluviométrico diários - maio/2009. 69
Figura 57 – Irradiação e índice pluviométrico diários - junho/2009. 70
Figura 58 – Irradiação e índice pluviométrico diários - julho/2009. 70
Figura 59 – Irradiância medida no dia 06/abril/2009. 72

Figura 60 – Irradiância medida no dia 18/abril/2009. 72
Figura 61 – Irradiância medida no dia 05/maio/2009....73
Figura 62 – Irradiância medida no dia 28/maio/2009....73
Figura 63 – Irradiância medida no dia 03/junho/2009. 74
Figura 64 – Irradiância medida no dia 25/junho/2009. 74
Figura 65 – Irradiância medida no dia 02/julho/2009. 75
Figura 66 – Irradiância medida no dia 13/julho/2009. 75
Figura 67 – Energia disponível e energia consumida diárias – abril/2009....80
Figura 68 – Energia disponível e energia consumida diárias – maio/2009. 81
Figura 69 – Energia disponível e energia consumida diárias – junho/2009. 82
Figura 70 – Energia disponível e energia consumida diárias – julho/2009. 83
Figura 71 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - abril/2009. 86
Figura 72 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - maio/2009....86
Figura 73 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - junho/2009. 87
Figura 74 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp – julho/2009....87
Figura 75 – Vazão x irradiância média por dia - abril/2009....89
Figura 76 – Vazão x irradiância média por dia - maio/2009. 89
Figura 77 – Vazão x irradiância média por dia - junho/2009. 90
Figura 78 – Vazão x irradiância média por dia – julho/2009. 90
Figura 79 – Vazão x energia disponível por dia - abril/2009. 93
Figura 80 – Vazão x energia disponível por dia - maio/2009. 93
Figura 81 – Vazão x energia disponível por dia - junho/2009. 94
Figura 82 – Vazão x energia disponível por dia – julho/2009....94
Figura 83 – Vazão x energia consumida por dia - abril/2009. 95
Figura 84 – Vazão x energia consumida por dia - maio/2009. 95
Figura 85 – Vazão x energia consumida por dia - junho/2009....96
Figura 86 – Vazão x energia consumida por dia – julho/2009. 96
Figura 87 – Vazão x irradiância por dia (abril-maio-junho-julho/2009). 98
Figura 88 – Vazão x energia disponível por dia (abril-maio-junho-julho/2009). 98
Figura 89 – Vazão x energia consumida por dia (abril-maio-junho-julho/2009). 99

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 – Consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural. 24
Tabela 2 – Dados climáticos normais da estação meteorológica da FCA/UNESP 33
Tabela 3 – Materiais e equipamentos para medições meteorológicas. 34
Tabela 4 – Materiais e equipamentos para operação do sistema de bombeamento Sm. 35
Tabela 5 – Materiais e equipamentos para operação do sistema de bombeamento Sp. 35
Tabela 6 – Materiais e equipamentos para coleta e monitoramento dos dados dos sistemas 35
Tabela 7 – Especificação dos sensores usados nas medidas meteorológicas. 36
Tabela 8 – Especificações técnicas da bomba de recalque. 43
Tabela 9 – Especificações técnicas da válvula solenóide. 43
Tabela 10 – Especificações técnicas de cada painel solar monocristalino. 45
Tabela 11 – Especificações técnicas de cada painel solar fotovoltaico policristalino 47
Tabela 12 – Especificações técnicas do microcomputador. 49
Tabela 13 – Equipamento de aquisição de dados CR23X Micrologger. 51
Tabela 14 – Composição dos arranjos elétricos. 54
Tabela 15 – Valores médios mensais de Irradiação global e índice pluviométrico 71
Tabela 16 – Valores médios diários e mensais da Irradiação [Rg] e da Irradiância [E] 76
Tabela 17 – Valores médios diários e totais mensais de Energia Disponível (ED) 78
Tabela 18 – Valores médios diários e totais mensais de Energia Consumida (EC) 79
Tabela 19 – Comparação entre arranjos. 84
Tabela 20 – Volume médio diário de água bombeada para os quatro arranjos. 88
Tabela 21 – Equações de regressão (vazão x irradiância) 91
Tabela 22 – Equações de regressão (vazão x energia disponível) 92
Tabela 23 – Equações de regressão (vazão x energia consumida) 97

RESUMO

Conseguir água própria para o consumo, mantê-la limpa e fazer com que ela chegue até cada ser humano, para que possa ser utilizada em suas necessidades diárias, é um enorme desafio a todos os povos do mundo desde a antiguidade. Principalmente em pequenas propriedades nas áreas rurais, em regiões isoladas e com baixa densidade demográfica, essa necessidade de água para consumo, higiene ou irrigação é atendida precariamente e com muito esforço.

O bombeamento da água encontrada é uma solução que racionaliza seu uso nas atividades domésticas, na criação de animais e nos sistemas de irrigação de áreas cultivadas. Viabilizar alternativas energéticas locais, renováveis e não-poluentes é a meta perseguida para essas regiões que geralmente estão distantes das redes públicas de energia elétrica. Utilizar a energia solar fotovoltaica é a alternativa agora proposta.

Avaliar, para este cenário, o desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água é o objetivo desse trabalho. Para tanto, foram montados em campo dois sistemas de bombeamento alimentados por energia fotovoltaica, compostos por quatro pares de arranjos diferentes de ligação dos painéis monocristalinos e policristalinos. Cada sistema é composto por uma moto-bomba, duas caixas-d'água, sensores de nível e uma válvula solenóide. Para avaliação dos desempenhos hidro-energético entre os arranjos fotovoltaicos foram comparados dados de vazão, energia solar disponível e energia consumida pelas bombas. A utilização de um equipamento de aquisição

de dados permitiu coletar valores meteorológicos, elétricos e hidráulicos, servindo também para controle e acionamento dos dois sistemas de bombeamento, durante um período de 4 meses.

Correlações matemáticas e curvas de ajustes foram usadas para interpretar o comportamento dos sistemas de bombeamento testados. Os sistemas obedecem a equações lineares com grande exatidão. O volume médio de água bombeado é suficiente para atender uma pequena propriedade rural, sendo que a energia consumida apresentou diferenças muito pequenas entre os vários arranjos testados. Os sistemas com 2 painéis monocristalinos apresentaram melhor desempenho, mas a utilização de apenas um painel policristalino pode ser uma solução econômica para consumos de até 1.500 L diários. Não se caracterizou uma variação proporcional entre a potência ou quantidade de painéis fotovoltaicos e a vazão diária de água bombeada.

HYDROENERGETIC PERFORMANCE EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USED IN WATER PUMPING.

Botucatu, 2009. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Carlos Alberto Machado Moreira

Adviser: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

Co-adviser: Dr. Antonio Ribeiro da Cunha

SUMMARY

Since ancient times, it has been a huge challenge to all people around the world to manage to get their fresh water, keeping it clean and providing it to every human being, so that it can be used for their daily needs. Mainly in small properties in the countryside, in isolated areas with low demographic density, this demand for fresh water for consumption, hygiene or irrigation is poorly supplied and takes lots of efforts.

The found water pumping is a solution that rationalizes its use in domestic chores, in animal rearings and in the irrigation systems of cultivated areas. Making feasible local, renewable and non-polluted energetic alternatives is the aim pursued for those areas that are usually far away from the public electric network. Using photovoltaic solar energy is the alternative now proposed.

Evaluating, for this scenery, the hidroenergetic performance of the photovoltaic systems used in the water pumping, it is the purpose of this study. Therefore, two pumping systems fed by photovoltaic energy were built in the workplace, with four pairs of different arrangement connections of monocrystalline and polycrystalline solar panels. Each system is composed by one moto-pump, two water tanks, level sensors and a solenoid valve. For evaluation of hidroenergetic performances between those photovoltaic arrangements were compared their rate of water flow, solar energy available and their pumps consumption of energy. The use of a data acquisition equipment allowed to collect meteorological, electrical

and hydraulics values, also serving for the control and activation of the two pumping systems during a four months period of time.

Mathematics correlations and adjustment lines were used to interpret the behavior of tested pumping systems. The systems follow the linear equations with great precision. The average amount of water pumped is enough to supply a small rural property, and they can notice that the energy used presented very little differences between the several arrangements tested. The 2 monocrystalline panel systems presented the best performance, but the use of the only one monocrystalline panel system can be an economical solution for consumption under 1.500 L daily. It did not characterize a direct relationship between power or quantity of photovoltaic panels and daily outflow of water pumping.

Key-words: photovoltaic, water pumping, panels, energy.

1 INTRODUÇÃO

Água potável e energia elétrica são dois recursos finitos, mas indispensáveis para a sobrevivência do ser humano. E, não raro, esses dois recursos são utilizados conjuntamente para satisfazer as necessidades básicas do homem. A água vem se tornando, cada vez mais, um motivo de preocupação por ser um recurso escasso, irregularmente distribuído pelo globo terrestre e, infelizmente, utilizado de maneira desordenada e até irresponsável pelas populações que tem a ventura de tê-la com razoável abundância.

Conseguir água própria para o consumo, mantê-la limpa e fazer com que ela chegue até cada ser humano para que possa ser utilizada para suas necessidades diárias é um enorme desafio para todas as nações do mundo moderno. Aquedutos, fontes históricas e sistemas simples ou complexos de distribuição de água são a história viva dessa preocupação que cruza os tempos através de séculos e milênios. Essa dificuldade e a importância fundamental de superá-la para melhorar as condições de vida e de saúde dos habitantes do planeta motivaram a Organização Mundial de Saúde para que incluísse entre as suas "8 Metas para o Desenvolvimento do Milênio", na Conferência realizada pela Organização das Nações Unidas, em 2000, o seguinte propósito: reduzir à metade, até 2015, o número de pessoas sem acesso à água potável que, em 2003, representava cerca de 1,2 dos 6 bilhões de habitantes do planeta (WHO, 2009).

É comum observar, principalmente nas regiões mais afastadas dos grandes centros, nas áreas rurais, em regiões isoladas e com baixa densidade demográfica, em especial em locais distantes das redes de energia elétrica, que essa necessidade de água para consumo, higiene ou irrigação é atendida precariamente e com muito esforço. São necessárias longas caminhadas até açudes, lagoas ou rios geralmente distantes; em outros casos o atendimento é feito esporadicamente em caros e inconstantes caminhões-pipa. É a população mais necessitada, mais desprovida de recursos, que é mais uma vez sacrificada na busca de um recurso vital: a água potável.

Quando ocorre dessas populações estarem em regiões sobre lençóis subterrâneos de água, o bombeamento dessa água aflorada em poços surge como a solução salvadora. Mas a grande distância de redes de distribuição de eletricidade faz com que esse bombeamento, ou seja manual, com baixíssimo rendimento e alto consumo de energia humana, ou seja através de motores-bomba a diesel, caros, barulhentos e poluentes.

Do total da água disponível no mundo, 97,5% estão nos oceanos, isto é, água salgada; 2,493% são de água potável de difícil aproveitamento pois, ou estão congeladas ou se localizam em depósitos subterrâneos profundos. Apenas os 0,007% restantes são de água acessível ao consumo e que são utilizados em três finalidades básicas: 8% para uso individual em locais como residências, escritórios, clubes etc.; 22% nas indústrias e 70% na agricultura (WRI, 2009).

Viabilizar soluções energéticas para comunidades rurais isoladas e áreas remotas que possibilitem o acesso à água é o grande desafio a vencer. Isto ocorre principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, ora devido às dimensões territoriais desses países, ora consequência de gigantescas disparidades sócio-econômicas que marcam suas sociedades. Fedrizzi (2003) afirma que grande parte dessa população afetada não dispõe de energia para captação e transporte de água potável. Para aproveitar melhor esse bem e dar melhor qualidade de vida a essas pessoas, necessitariam ser instalados dispositivos usados em regiões mais desenvolvidas, tais como bombas de água, reservatórios, chuveiros, sistemas de irrigação e pontos adequados para consumo.

Levar energia elétrica até essas comunidades pelos meios “convencionais”, como a expansão da rede elétrica, é uma solução cara e praticamente impossível em alguns casos. E a conscientização ambiental prevalente nos dias atuais aponta

que a utilização de combustíveis fósseis é ecologicamente não recomendável. Surge então como proposta tecnológica a utilização de sistemas de suprimento de energia alternativa descentralizados, aproveitando algum tipo de energia “limpa” gerada por recursos renováveis.

Apesar da energia solar fotovoltaica ser ainda uma solução cara, ela poderá se viabilizar se houver mais incentivos para a fabricação, na forma de subsídios, o que certamente reduzirá os preços dos equipamentos. Avanços tecnológicos alcançados na área fotovoltaica, com o aumento da eficiência das células, com novas formas e geometrias dos painéis e com perspectivas de redução de custos ainda maiores com o aumento da demanda, estão colocando a energia fotovoltaica entre as opções economicamente viáveis para uma série de aplicações (FIORENTINO, 2004).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o melhor desempenho hidro-energético de sistemas de bombeamento de água acionados por energia solar fotovoltaica, utilizando painéis mono e policristalinos, visando sua aplicação em locais remotos, para benefício de populações de pequenas propriedades rurais. Os sistemas avaliados utilizam bomba de superfície e são alimentados alternadamente por 4 pares de arranjos de painéis solares fotovoltaicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Solar

A energia vinda do Sol é a responsável por inúmeros fenômenos naturais que ocorrem na Terra. É praticamente a origem de todas as formas de energia que o homem vem utilizando durante sua história e pode ainda ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro.

A formação das zonas de altas pressões, responsáveis pelos fluxos de vento, é provocada pelo Sol. O petróleo, o gás natural e o carvão também se formaram em consequência dos resíduos de plantas e animais que sobreviveram devido a um ciclo em que o Sol foi fundamental. As reações químicas no processo de decomposição da matéria orgânica no solo e o ciclo das águas, que permite seu represamento, são outras manifestações da influência do Sol. Percebe-se então que a energia do Sol é a responsável de forma indireta por praticamente toda a energia na terra (ANEEL, 2007).

Portanto, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar representa uma fonte inesgotável de energia, disponibilizando um enorme potencial ($1{,}5 \times 10^{18}$ kWh anualmente) que pode ser captado e convertido em outras formas de energia (CRESESB/CEPEL, 2009).

Toda a energia emitida pelo Sol e que atinge a superfície da Terra na forma de partículas recebe o nome de radiação. O fluxo de radiação acumulado no tempo

recebe o nome de irradiação, que normalmente é medida em MJ/m²dia. A grandeza que mede a radiação incidente sobre uma superfície é a irradiância, medida em W/m². (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Silva e Seraphim (2005), nos países em desenvolvimento, como o Brasil, essa fonte de energia deve ser aproveitada ao máximo. Normalmente esses países apresentam elevadas extensões territoriais e estão localizados em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação solar, tornando viável o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia elétrica, térmica, química, mecânica, etc.

Frente a esta realidade, é importante conhecer tecnicamente mais o processo de conversão e aproveitamento dessa fonte de energia, limpa, inesgotável e gratuita, em energia elétrica.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito da incidência dos raios solares sobre determinados elementos químicos, mais tarde chamado de efeito fotovoltaico, foi relatado pela primeira vez pelo físico francês *Alexandre Edmond Becquerel*, em 1839. Ele constatou o aparecimento de uma diferença de potencial entre os extremos de uma estrutura de material semicondutor, resultante da absorção da luz solar. Esse fato permitiu que se produzisse alguns anos depois a célula solar fotovoltaica, unidade fundamental desse processo de conversão de energia (CRESESB/CEPEL, 2005).

2.2.1 Semicondutores

Semicondutores são materiais sólidos, com formato cristalino, que eletricamente se situam entre os condutores e os isolantes. Se tratados quimicamente eles podem transmitir ou mesmo controlar a passagem da corrente elétrica. Com esse processo químico, chamado dopagem, obtém-se um semicondutor adicionando a certos elementos,

fracamente condutores, átomos livres de outro elemento químico. Hoje, a maioria dos semicondutores é produzida com *Silício* (Si), que é um dos elementos químicos mais abundantes na superfície da Terra, encontrado especialmente na areia e no quartzo.

Uma parte da tabela periódica dos elementos onde aparece o Si se encontra na Figura 1. O número que aparece na parte superior é o número atômico do elemento e os números inferiores indicam as quantidades de elétrons que circulam em suas camadas.

5 **B** Boro 2,3	6 **C** Carbono 2,4	7 **N** Nitrogênio 2,5
13 **Al** Alumínio 2, 8, 3	14 **Si** Silício 2, 8, 4	15 **P** Fósforo 2, 8, 5
31 **Ga** Gálio 2, 8, 18, 3	32 **Ge** Germânio 2, 8, 18, 4	33 **As** Arsênio 2, 8, 18, 5

Figura 1 – Parte da tabela periódica dos elementos químicos.

É possível perceber que *Carbono*, *Silício* e *Germânio* tem uma característica única e comum, todos possuem 4 elétrons em sua última camada (Figura 1). Isto permite, por exemplo, que cada átomo de Si se ligue perfeitamente a outros 4 átomos vizinhos de Si, formando uma estrutura equilibrada eletricamente, chamada cristal. Como não sobram elétrons livres, não haverá condução de eletricidade. Entretanto, cientistas observaram que a substituição de alguns de seus átomos por pequenas quantidades de certas substâncias, por exemplo, alguns átomos de *Fósforo* ou *Boro*, pode alterar consideravelmente suas características elétricas.

Os átomos acrescentados são conhecidos como impurezas e o processo químico utilizado é conhecido como dopagem. Existem dois tipos de impurezas resultantes do processo de dopagem:

O primeiro é a impureza doadora de elétrons: quando alguns poucos átomos de Fósforo ou Arsênio, elementos com 5 elétrons na última camada, são acrescentados ao Si, 4 de seus elétrons se ligam aos do Si e um fica livre, transformando-o em semicondutor do Tipo N (negativo, por causa da carga do elétron). Elétrons livres tendem a se mover de uma área negativa para uma positiva.

O segundo tipo é a impureza aceitadora de elétrons: quando a dopagem é feita com átomos de Boro ou Gálio, que possuem 3 elétrons em sua última camada, estes vão se unir a 3 elétrons do Si e vai faltar um. Diz-se então que é um semicondutor do Tipo P (positivo, porque vai haver próton a mais ou uma lacuna onde deveria haver um elétron). Neste caso, as lacunas parecem se deslocar do positivo para o negativo, e um elétron de um átomo vizinho pode se deslocar e ser aceito pelo semicondutor.

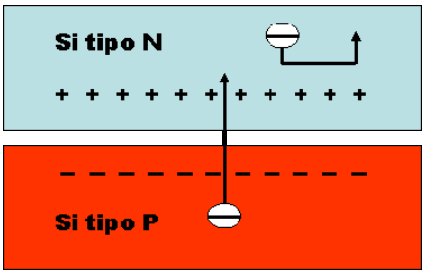


Figura 2 – Efeito do campo elétrico em uma junção PN.

A junção de Si tipo N com Si tipo P, forma a chamada junção PN. Ela se caracteriza pela presença de elétrons em duas bandas de energia, denominadas banda de valência e banda de condução, separadas por uma banda vazia denominada gap de energia, criando-se entre elas um campo elétrico, conforme desenho da Figura 2.

Como em uma montanha, o elétron pode descer facilmente para o lado N mas não consegue subir para o lado P.

2.2.2 Célula Solar Fotovoltaica

A junção PN é a estrutura básica da microeletrônica, a partir da qual se constroem diodo, transistor, circuito integrado e a célula fotovoltaica. Quando esta junção PN

é excitada pela luz solar (Figura 3), na forma de fótons, com energia superior à do gap, estes fótons transmitem a sua energia para elétrons da banda de valência, fazendo-os saltar para a banda de condução. Os elétrons excitados são arrastados pelo campo elétrico inerente à junção PN, de forma a produzir uma corrente elétrica através da junção (CRESESB/CEPEL, 2009).

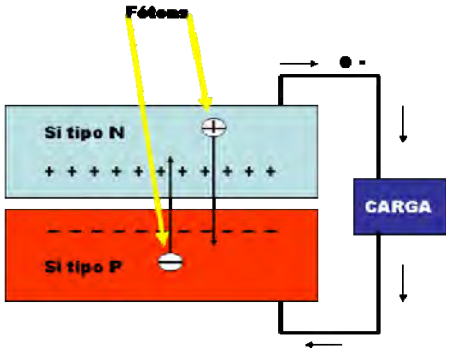


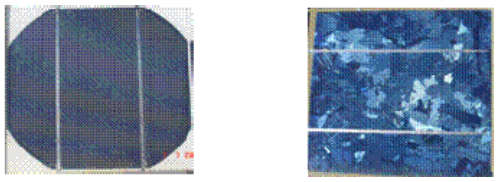
Figura 3 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Essa é a base de funcionamento de uma célula solar fotovoltaica, sendo que as células fotovoltaicas geralmente são construídas com Silício. Seus tipos mais comuns são: monocristalina (mono-Si), policristalina (poly-Si) ou amorfa (a-Si). Atualmente as duas primeiras tecnologias são as mais comumente utilizadas. Existem ainda outros materiais e tecnologias empregados na construção de células fotovoltaicas, mas estes são, até o presente momento, utilizados em escala experimental ou muito reduzida (PRESENÇO, 2007).

Conforme o Cresesb/Cepel (2009), para a fabricação das células monocristalinas (Figura 4-a) o Si com teor de pureza de 99,9999% é fundido junto com material dopante, produzindo-se um grande cilindro, com 50 a 150 cm² de seção, que é cortado em fatias de aproximadamente 0,3 mm de espessura. Apresentam maior eficiência que os demais tipos, apesar de seu processo de fabricação ter maior custo. As fotocélulas comerciais obtidas com esta tecnologia atingem uma eficiência de até 15%, podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

“As células de Silício monocristalino são historicamente as mais comumente utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade; os demais tipos de células fotovoltaicas possuem comportamento elétrico semelhante”. (FIORENTINO, 2004)

As células de Silício policristalino (Figura 4-b) são mais baratas que as de Silício monocristalino, por exigirem menos cuidados e menos controles no processo de fabricação. A eficiência, no entanto, é ainda um pouco inferior, em comparação com as células de Silício monocristalino (FIORENTINO, 2004). Segundo o Cresesb/Cepel (2009) "já se alcançou até 12,5% de eficiência em escalas industriais".



(a) (b)

Figura 4 – Fotos de célula monocristalina (a) e policristalina (b).

As células de Silício amorfo hidrogenadas (a-Si) utilizam tecnologia fotovoltaica em filmes finos (película delgada com 0,0001 mm) comercialmente viável. Essas foram empregadas pela primeira vez em células solares em meados da década de 70, e imediatamente essa tecnologia despontou como ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos (CRESESB/CEPEL, 2009). Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células se mostraram extremamente eficientes sob iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes), com eficiência nestes casos superior à do Silício cristalino (MONTENEGRO, 2000).

2.2.3 Painel Solar Fotovoltaico

A conversão direta da energia solar em energia elétrica é feita através de módulos fotovoltaicos e é denominada Energia Solar Fotovoltaica. Conforme Siqueira (2005), "o módulo fotovoltaico é composto de células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente em nível suficiente para o aproveitamento da energia elétrica gerada"

O módulo ou painel fotovoltaico (Figura 5) é a unidade básica comercialmente disponível, proporcionando proteção mecânica e ambiental às células e permitindo a sua utilização exposta às intempéries. É geralmente composto de 36 células encapsuladas e conectadas eletricamente, em série e/ou em paralelo, produzindo níveis de tensão e corrente adequados à utilização.

Figura 5 – Painel solar fotovoltaico (Laboratório NEAR/FCA/UNESP).

As células solares que formam um painel requerem um encapsulamento (Figura 6) para proporcionar proteção contra intempéries, ação de pássaros e atos de vandalismo e para rigidez mecânica devido à fragilidade das células e à flexibilidade dos contatos que as interligam.

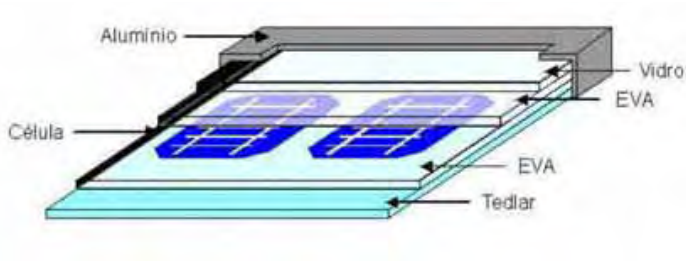


Figura 6 – Estrutura básica do encapsulamento de um painel solar fotovoltaico.
Fonte: CBSOLAR – PUC/RS

Os painéis solares fotovoltaicos são protegidos por vidro temperado resistente a impactos e com alta transparência. Como o Si é um material muito brilhante e para evitar que os fótons sejam refletidos, existe logo abaixo do vidro um revestimento anti-reflexo de acetato de vinil etilênico (EVA). As células são colocadas e interligadas entre si sobre outra

camada de EVA e, como base, um revestimento com vidro ou com um filme de fluoreto de polivinila (Tedlar) e, finalmente, uma moldura de alumínio anodizado enquadra o conjunto e dá mais resistência mecânica ao painel (BPSOLAR, 2001).

São disponíveis em diversos níveis de tensão e potência, sendo que as potências são medidas em Watt-pico (Wp). Watt-pico é a unidade utilizada para definir a potência nominal de uma célula fotovoltaica. Esta potência está disponível quando a célula é exposta a condições padrão de teste (*STC* - Standard Test Conditions) de irradiação solar de 1000 W/m² e a uma temperatura de 25 ºC.

Comercialmente são disponíveis painéis na faixa de 10 Wp a 300 Wp. Os painéis fotovoltaicos são dispositivos bastante confiáveis e de grande durabilidade, sendo que a maioria dos fabricantes oferece uma garantia de 20 anos. De acordo com Fedrizzi (2003), trata-se de uma tecnologia consolidada tecnicamente, de alta confiabilidade e com vida útil de mais de 25 anos.

Em função da baixa tensão e corrente de saída produzidas por uma célula fotovoltaica, é necessário agrupá-las formando os painéis. O arranjo das células nos painéis pode ser feito conectando-as em série e/ou em paralelo. Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes e a tensão do painel é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3 A e tensão muito baixa, em torno de 0,7 V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais (CRESESB/CEPEL, 2009).

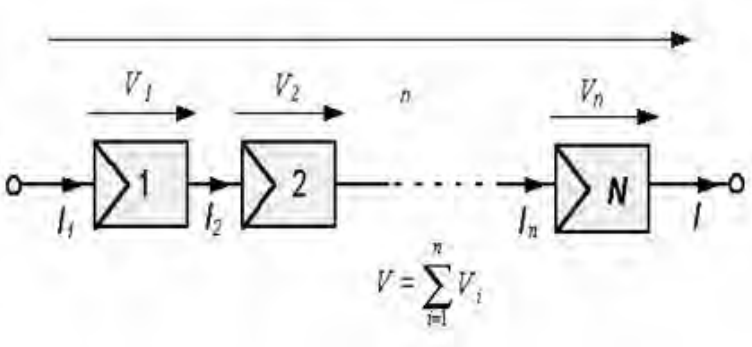


Figura 7 – Arranjo em série das células de um painel solar fotovoltaico.
Fonte: Creseb/Cepel, 2009

Geralmente um painel é constituído pela conexão em série das células (Figura 7). Nesse caso a tensão resultante será a soma das tensões de cada célula do agrupamento. Comumente os painéis atingem um valor final de 12 V, o que permite carregar baterias que também funcionam com 12 V.

No caso em que se utiliza uma configuração em série deve-se observar que se uma célula fotovoltaica qualquer dentro do painel, por algum motivo, estiver encoberta a potência final de saída do módulo cairá drasticamente, comprometendo o desempenho do mesmo.

As curvas características de tensão versus corrente de um painel são definidas, conforme manual dos fabricantes, para as condições padrão (STC - Standard Test Conditions). Estas condições são: irradiação de 1000 W/m^2 (radiação solar recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia) e uma temperatura de 25 ºC na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).

Em função do formato da curva I versus V do painel fotovoltaico, existe um ponto de potência máxima que pode ser gerada, conforme Figura 8.

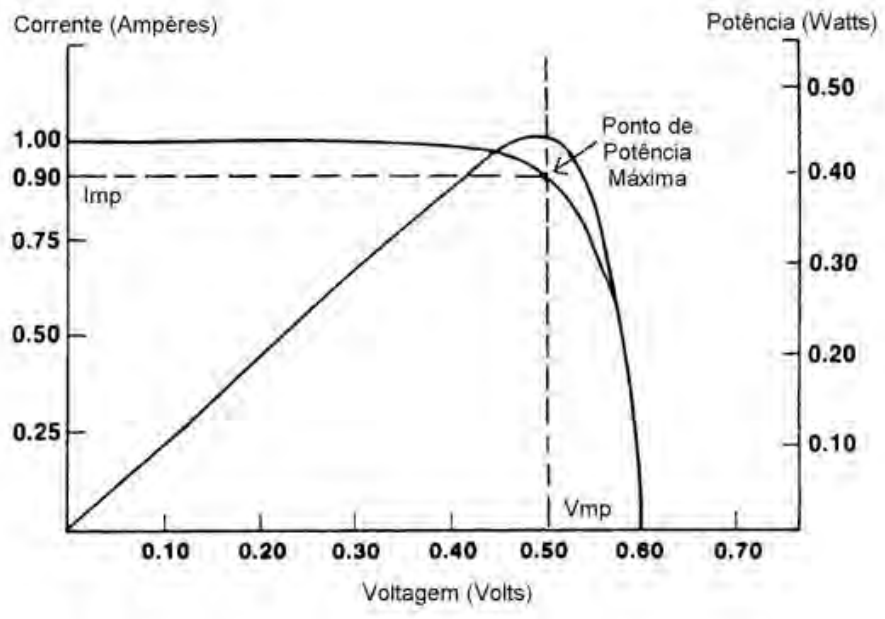


Figura 8 – Parâmetros de potência máxima (Vmp e Imp).
Fonte: Creseb/Cepel, 2009

É desejável que o painel opere sempre o mais próximo possível desta condição. A potência nominal (Wp) de um painel solar fotovoltaico é o produto da tensão para a máxima potência Vmp pela corrente para a máxima potência Imp medidas nas condições padrão (STC).

2.2.4 Sistema Solar Fotovoltaico

Sistema solar fotovoltaico é o conjunto de elementos capazes de converter a energia radiante solar em energia utilizável pelo usuário, mediante o emprego de células solares fotovoltaicas, ou seja, é um conjunto de painéis solares fotovoltaicos interligados transformando energia solar em elétrica diretamente, mostrado na Figura 9. O controlador de carga, o banco de baterias e o inversor são opcionais no sistema.

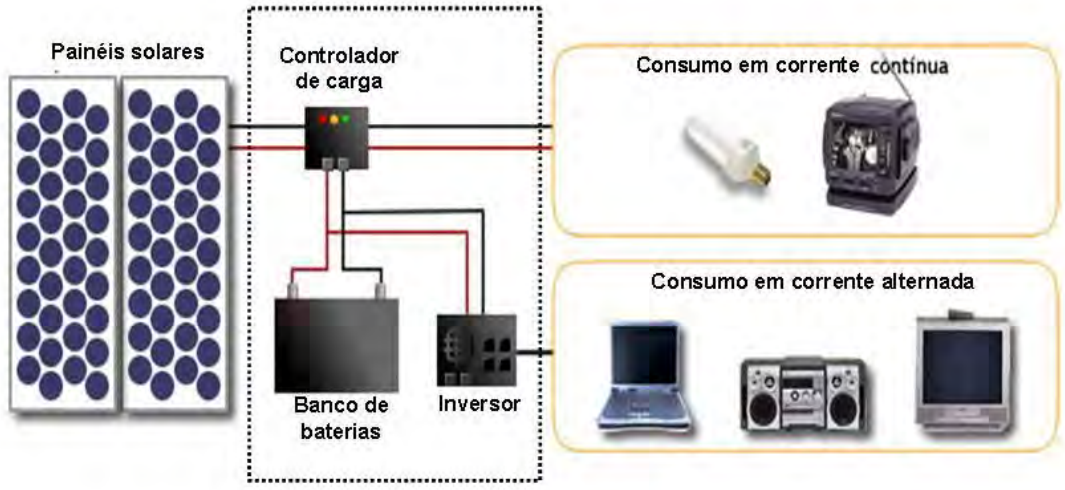


Figura 9 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico.
Fonte: Heliodinâmica, 2004, adaptada pelo autor.

Em uma instalação fotovoltaica, os painéis solares podem ser montados com uma orientação fixa, ou podem estar acoplados a uma estrutura que permita, em um ou dois eixos, o acompanhamento do deslocamento relativo do Sol ("*tracking systems*"). Em sistemas fotovoltaicos autônomos de orientação fixa, quase sempre o arranjo de

painéis é orientado de forma a maximizar a captação solar nos meses de inverno, quando a oferta solar é menor e o consumo muitas vezes maior que o dos meses de verão (perfil de consumo sazonal). Nestes casos os painéis fotovoltaicos são normalmente orientados para o norte (no hemisfério Sul), com inclinação equivalente à latitude local acrescida de 10 a 15º (FEDRIZZI, 2003). Nos "*tracking systems*" deve se proceder uma análise cuidadosa para verificar se os custos envolvidos em seguir o movimento do Sol compensam a energia extra gerada, e também a introdução de peças móveis no sistema, o que acarreta maior manutenção do mesmo.

Inicialmente o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica apoiou-se nas empresas do setor de telecomunicações, que buscavam fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador, em 1958, foi a "corrida espacial". A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço. A "crise do petróleo" de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas usadas em explorações espaciais.

Segundo Silva (2000), um dos fatores que impossibilitava a utilização de energia solar fotovoltaica em larga escala seria o alto custo das células. As primeiras células foram produzidas com o custo de US$ 600,00/W, para programa espacial. Para Montenegro (2000), com a implementação do mercado e várias empresas voltadas para produção de células, este valor tem se reduzido ao longo dos anos, podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, ao custo médio de US$ 8,00/W. Pesquisa atual aponta que os menores preços de mercado estão em torno de US$ 4,50/W (SOLARBUZZ, 2009).

Por isso, a utilização da energia fotovoltaica se restringe ainda ao atendimento de comunidades remotas ou áreas de difícil acesso, distantes da rede elétrica convencional. No Brasil observam-se iniciativas governamentais ou de concessionárias que financiam a instalação de sistemas fotovoltaicos autônomos como os Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares e os Sistemas de Bombeamento de Água.

De acordo com Marini e Rossi (2005), "um sistema solar fotovoltaico oferece muitas vantagens: não possui partes rotativas, tem longa vida útil, a manutenção é

mínima, não gera poluição ou ruído, não requer combustível, exceto o Sol, é modular ou expansível, é leve e fácil de transportar e está disponível o ano todo".

Súri *et al*. (2007) defendem que há 4 fatores que determinam a vantagem econômica de um sistema de energia solar fotovoltaica: a quantidade de energia solar que chega à superfície da terra, o custo final por watt-pico instalado, o tempo de vida útil do sistema e o seu custo operacional total.

2.2.5 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema solar fotovoltaico pode se classificar em três tipos, quanto a sua forma de utilização básica: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede elétrica.

- Sistemas isolados

Atendem a uma determinada carga utilizando exclusivamente a energia solar fotovoltaica. Sua configuração básica compreende, além do painel solar, a unidade de controle e, quando necessário, baterias como unidade de armazenamento de energia. Se a carga for em CA, também será necessário um inversor. A figura 10 representa este tipo de sistema.

A ordem de grandeza da potência instalada neste tipo de sistema varia tipicamente de centenas de Wp a unidades de kWp.

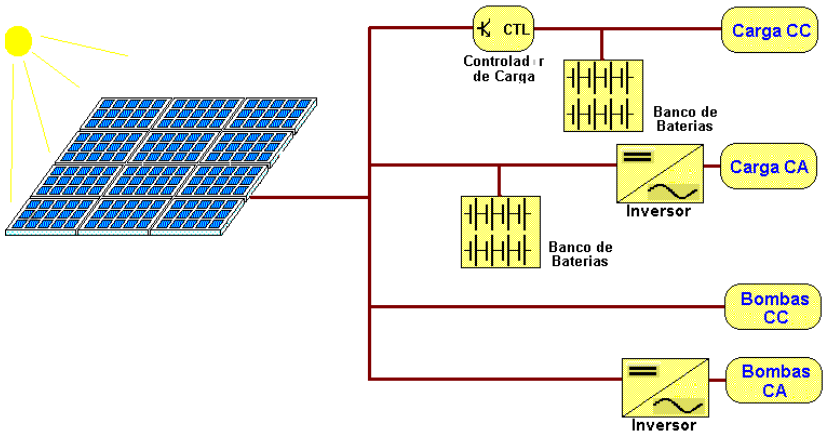


Figura 10 – Esquema de um sistema isolado.
Fonte: CRESESB, 2009.

Duas aplicações mais comuns são os sistemas de geração de energia elétrica e os sistemas para bombeamento de água.

- Sistemas híbridos

São aqueles que, desconectados da rede elétrica convencional, utilizam simultaneamente várias fontes de energia como, por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel e módulos fotovoltaicos, entre outras, com o objetivo de atender a uma carga. Esquematicamente estão representados na Figura 11.

A ordem de grandeza da potência fotovoltaica instalada deste tipo de sistema é tipicamente de dezenas de kWp.

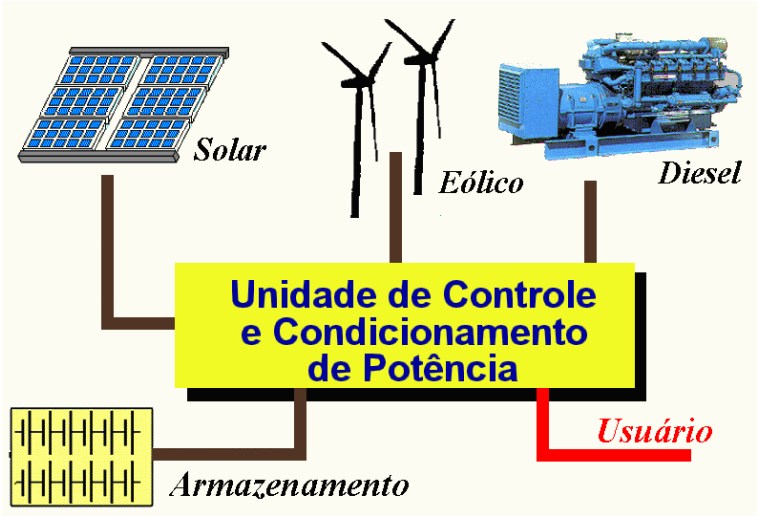


Figura 11 – Esquema de um sistema híbrido.
Fonte: CRESESB, 2009.

- Sistemas conectados à rede elétrica

Segundo Montenegro (2000), estes sistemas dispensam o uso de acumuladores, pois atuam como usinas geradoras de energia elétrica em paralelo às grandes centrais geradoras.

Podem ser do tipo central fotovoltaica ou integradas a prédio urbano. No primeiro tipo, a "planta" fotovoltaica está normalmente situada em áreas relativamente afastadas dos centros urbanos como ocorre com usinas geradoras de eletricidade

convencionais, pois as relativamente grandes superfícies envolvidas requerem áreas de baixo custo para que a instalação seja economicamente viável. Áreas desertas são muitas vezes utilizadas neste tipo de instalação. Representação esquemática pode ser vista na Figura 12.

Os sistemas integrados a prédios urbanos, por outro lado, são incorporados à fachada ou ao telhado do prédio, de modo que virtualmente não ocupam espaço algum, sendo o único pré-requisito uma orientação solar favorável.

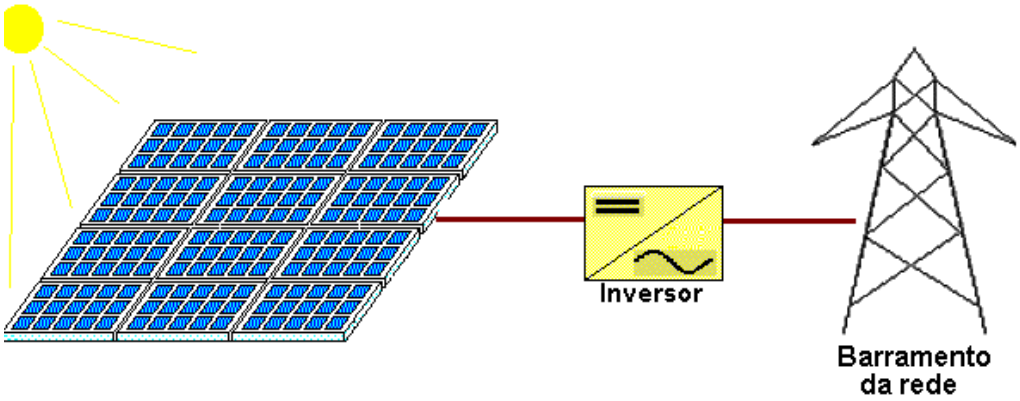


Figura 12 – Esquema de um sistema conectado à rede elétrica.
Fonte: CRESESB, 2009.

2.2.6 A Energia Solar Fotovoltaica no Mundo

Dados atuais ressaltam o crescimento da energia solar: a potência instalada no mundo chegou a 13.791 MWp no final de 2008, conforme gráfico da Figura 13. O mesmo gráfico detalha onde cresceu esta potência de 2007 para 2008, bem como a linha de evolução percentual deste crescimento a partir de 2000. Durante o ano de 2008 a indústria fotovoltaica gerou 37,1 bilhões de dólares em receitas globais (EQUIPE CRESESB, 2008).

"No Brasil, a potência fotovoltaica instalada ainda é pequena, mas tenderá a crescer na medida em que novas instalações forem sendo realizadas no âmbito do Programa Luz para Todos, conduzido pelo Ministério das Minas e Energia-MME" (EQUIPE CRESESB).

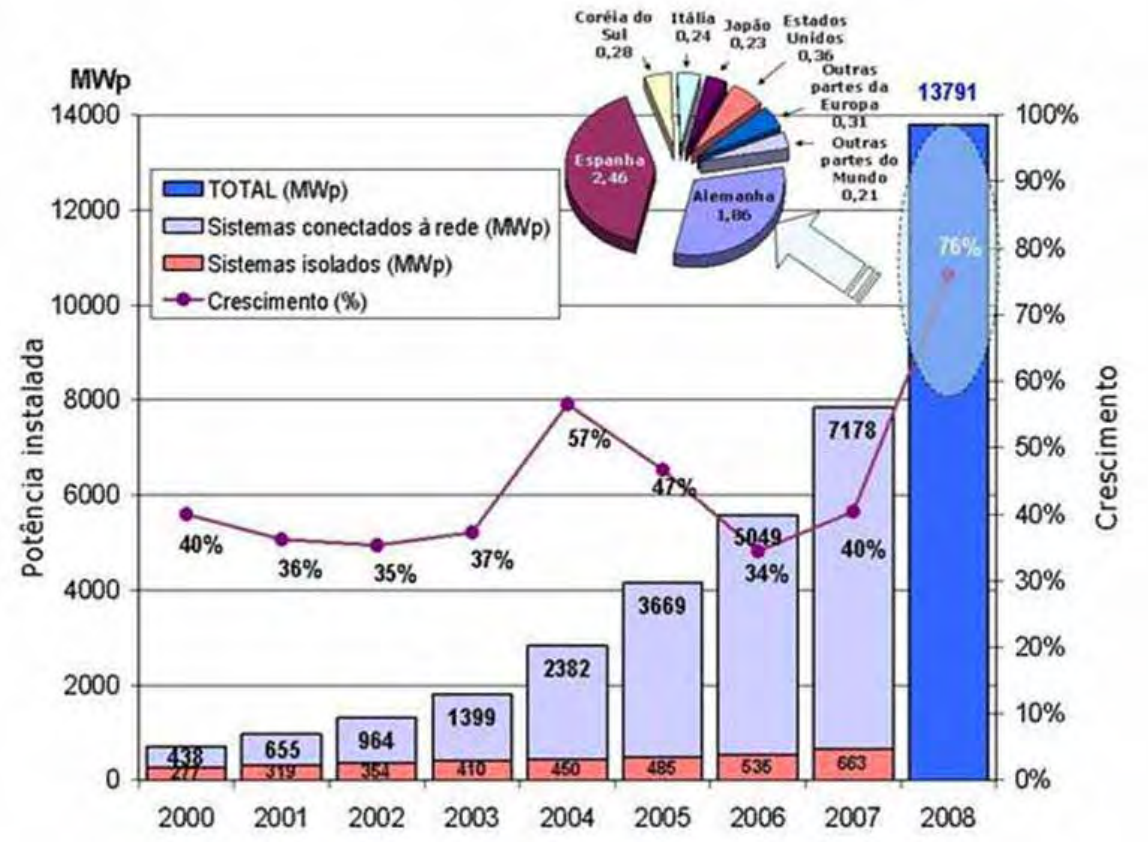


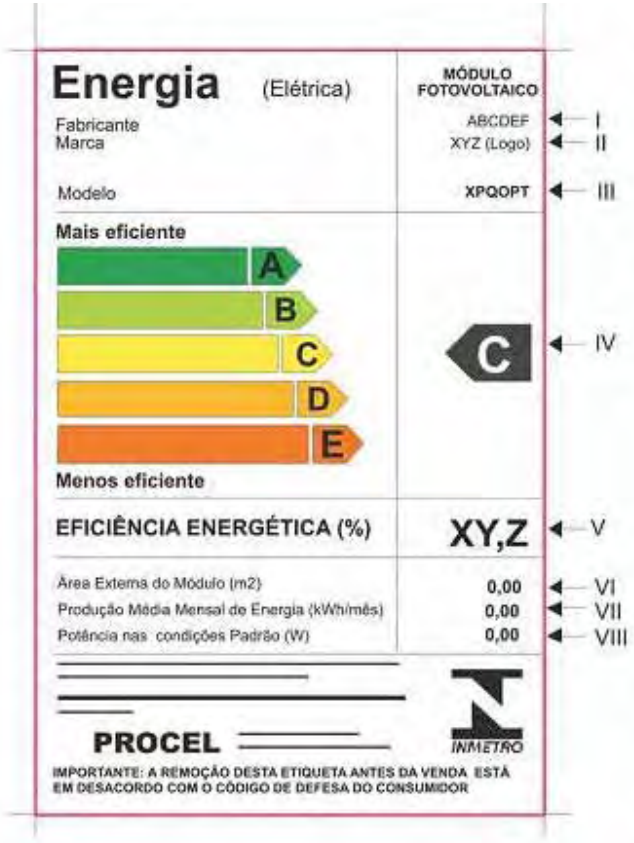
Figura 13 – Panorama da utilização da energia fotovoltaica e taxa de crescimento.
Fonte: Equipe CRESESB, 2008 (adaptado pelo autor).

Já existe até uma tabela com classes de eficiência de energia para painéis fotovoltaicos, conforme foto reproduzida na Figura 14, divulgada pelo INMETRO (GALDINO *et al*., 2008).

Classes de Eficiência Energética
A > 13,5%
13% < B < 13,5%
12% < C < 13%
11% < D < 12%
E < 11%

Figura 14 – Foto da tabela de eficiência energética para painéis fotovoltaicos.
Fonte: Galdino *et al*. (2008).

Parece haver um grande desejo de crescimento dessa indústria, visto que em junho de 2008 foram lançadas as normas para etiquetagem de sistemas fotovoltaicos e seus componentes, junto com a primeira etiqueta do INMETRO para painéis fotovoltaicos, também com a foto reproduzida na Figura 15.



Campos	Preenchimento
I	Nome do fabricante
II	Marca comercial (ou logomarca)
III	Modelo do módulo
IV	Letra (A,B,C.....E) correspondente à eficiência energética do módulo, em alinhamento com a seta correspondente
V	Eficiência máxima nas condições padrão (STC)
VI	Área externa do módulo (m^2)
VII	Produção Média de Energia (kWh/mês)
VIII	Potência nas Condições Padrão, em W

Figura 15 – Etiqueta INMETRO de eficiência energética para módulos fotovoltaicos.
Fonte: Galdino *et al*. (2008).

2.3 Energização Rural e o Abastecimento de Água

Apesar da história relatar que os povos da antiguidade dominavam as questões de abastecimento de água com tecnologias avançadas para a época, hoje esta é ainda uma questão não resolvida para uma considerável parcela da humanidade. “E, na maioria das vezes a falta de disponibilidade de energia elétrica é a causa maior que impede o atendimento destas populações” (FEDRIZZI, 2003).

O mundo tem, ainda hoje, uma grande parcela de sua população que não consegue usufruir desses dois recursos básicos. Segundo dados disponíveis, em 2004, 17% da população mundial não tinham acesso a "uma fonte de água melhorada". No Brasil a água potável não chegava a 10% de seus habitantes. Ainda os mesmos dados mostram que, em 2005, 1,6 bilhões de pessoas não tinham acesso à energia elétrica, sendo desse total 6,5 milhões de brasileiros (PNUD, 2009). No Brasil esses números atingem principalmente as áreas rurais distantes dos grandes centros urbanos e pequenas populações dispersas em grandes áreas, como é o caso da Amazônia, onde há regiões extensas com baixa densidade demográfica.

Muitas propriedades e comunidades rurais no Brasil, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, não são atendidas com energia elétrica, pois estão distantes das centrais de geração e de distribuição de eletricidade. Nesses casos, a energização em sua forma convencional, se torna inviável pela grande dispersão geográfica dessa população, baixo nível de consumo, alto investimento necessário por consumidor e elevado custo operacional. Estudos comparativos com a eletrificação urbana apontam baixo retorno ou até mesmo prejuízo financeiro para a concessionária de energia elétrica (FEDRIZZI, 2003).

É importante considerar que a água pode funcionar como uma grande força de fixação do homem no campo. Dispor de água potável para uso doméstico, de seus animais e de sua plantação é um forte reforço de cidadania. Conforme Tiago Filho (2002), o consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural pode ser dimensionado com os dados da Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural.

Especificação	Litros por dia
Sede da propriedade – por pessoa	70 a 100
Aves – por cabeça	0,2 a 0,3
Suínos + higiene – por cabeça	12 a 15
Bovinos - por cabeça	30 a 35
Eqüinos – por cabeça	35 a 50
Horta e jardim – por m²	3 a 5

Considerando uma pequena propriedade rural típica onde vivem 6 pessoas que cuidam de 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e ainda tem uma área cultivada de 100 m², utilizando valores médios de consumo da tabela, pode-se estimar um consumo médio diário aproximado de 1.200 litros de água. Entretanto, para quebrar a paradoxal situação comumente encontrada de não dispor dessa água, mas estar ao mesmo tempo morando sobre lençóis subterrâneos, é fundamental a utilização de um sistema de bombeamento de água.

Levar energia às áreas isoladas e rurais surge como um desafio, uma conquista de cidadania, dentro de uma sociedade com desigualdades sociais e econômicas. Esse princípio norteia hoje os programas oficiais de eletrificação de comunidades isoladas no Brasil (SERPA, 2001). Uma das formas de garantir o suprimento de energia elétrica nessas propriedades ou comunidades rurais isoladas seria a implantação de sistemas energéticos que tivessem como base fontes alternativas e renováveis de energia.

Energias alternativas e renováveis podem ser entendidas como aquelas geradas por fontes cuja reposição é feita pela natureza de modo mais rápido que seu consumo pelo Homem. São exemplos mais comuns: a hidráulica, a eólica, a solar e a de biomassa, que são também energias ditas “limpas”, por não causarem poluição ambiental nem agredirem o ecossistema do planeta.

Várias dessas alternativas já provaram ser economicamente viáveis e tecnicamente possíveis, e segundo Fedrizzi (2003), “as tecnologias para o aproveitamento das energias renováveis (fotovoltaica, eólica, pequenos aproveitamentos hidroelétricos) tem alcançado bons níveis de maturidade e confiabilidade, o que as torna opções viáveis para a solução deste tipo de problema no meio rural”. Além disto, conforme Presenço (2007), “a utilização de sistemas energéticos alternativos, nos dias atuais, é uma necessidade de caráter urgente devido aos problemas que o planeta vem enfrentando, como o aquecimento global, efeito estufa e a perda da camada de ozônio”. Entretanto, a sociedade contemporânea ainda enfrenta um grande dilema: a necessidade de energia é cada vez maior e ainda há uma grande dependência dos recursos não-renováveis, que têm no petróleo a sua principal fonte.

Melicio e Mendes (2007) citam que, na grande maioria dos países, os combustíveis fósseis são utilizados em grande escala para satisfazer as suas necessidades energéticas, conforme pode ser visto na Figura 16.

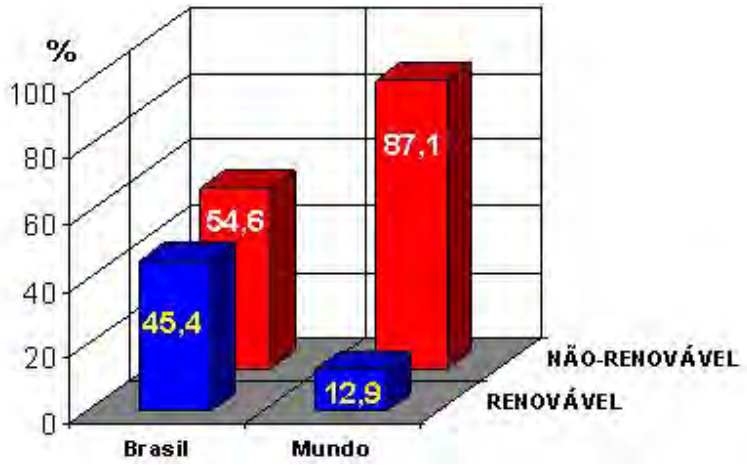


Figura 16 – Estrutura da oferta interna de energia no Brasil (2008) e no Mundo (2006).
Fonte: MME – BEN (2009)

Segundo Januário (2007), a inserção de fontes alternativas de energia na matriz energética brasileira vem sendo cada vez mais incentivada, principalmente a partir de políticas de governo como a criação do PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia. Este incentivo vem provocando um crescimento ainda lento, como mostram os últimos dados publicados pelo MME – Ministério das Minas e Energia, pois de 2007 para 2008 a demanda de energia no país cresceu 5,38%, mas a participação das energias renováveis na matriz energética, mesmo crescendo, caiu de 45,9 para 45,4% (MME-BEN, 2009).

Para proteger o meio-ambiente, grande preocupação desse novo século, utilizar formas de energia não poluentes e renováveis deve ser a postura de todo cidadão, por enquanto por consciência, antes que tenha que ser por necessidade. Como consequência aumentam de volume e de velocidade as pesquisas sobre energias alternativas, que são aquelas criadas como soluções para diminuir o impacto ambiental e para contornar o uso de matéria-prima, que normalmente é não renovável, como o carvão e o petróleo (WATANABE, 2007).

Como proposta de energia renovável destaca-se a energia solar fotovoltaica. Sua fonte, o Sol, está sempre disponível, em especial em regiões tropicais, como é o caso de grande parte do território brasileiro, onde é encontrado em abundância. Além de ser uma fonte renovável, seu processo de geração de energia elétrica não produz poluição.

Segundo o Cresesb/Cepel (2009), “o sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre 1,5 x 10^{18} kWh de energia, tratando-se de um valor considerável, e correspondendo a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período”.

A chegada de uma fonte de energia elétrica para essas localidades carentes vai permitir que a água de rios, poços ou açudes possa ser bombeada para reservatórios comunitários, domésticos ou mesmo diretamente para a irrigação de plantações. Entretanto, segundo Fedrizzi (2003), a energia elétrica convencional, por redes de distribuição, tem reduzida probabilidade de chegar por se tratar de regiões remotas. Também o uso de combustíveis fósseis para geração de energia local é caro e é difícil o acesso para o transporte desse combustível. Nestas circunstâncias, alternativas tecnológicas, como a energia solar fotovoltaica, começam a se tornar uma solução interessante para áreas remotas com muita radiação solar e sem eletricidade.

As consequências danosas para o meio-ambiente apontadas por diversas entidades ambientalistas e, segundo Silva (2003), a escassez das fontes convencionais de geração de energia, tem estimulado o uso de fontes energéticas renováveis, com as seguintes vantagens: permitem o uso de mão-de-obra local, não prejudicam o meio-ambiente e possibilitam a produção econômica de energia útil em pequena escala, para aplicações como ligação de aparelhos elétricos e, também para o bombeamento de água. Ainda Silva (2003) destaca a difusão crescente de fontes alternativas e renováveis de energia, como a biomassa, a energia eólica e a energia solar.

O aproveitamento dos recursos locais disponíveis é uma importante vantagem da eletrificação com energias renováveis. Outras vantagens podem ser encontradas no contexto das aplicações de diferentes opções tecnológicas, como geradores fotovoltaicos, geradores eólicos, PCH’s, biodigestores, gaseificadores de biomassa, com combinações dessas opções e o menu de esquemas disponíveis (SERPA, 2001).

Utilizar sistemas fotovoltaicos para gerar energia elétrica para o bombeamento de água, refrigeração, iluminação, telecomunicações, etc. está se tornando, cada vez mais, uma opção interessante à medida que os sistemas ficam tecnicamente confiáveis e o custo por watt diminui (MARINI; ROSSI, 2005).

Conforme Fedrizzi (2003), a tecnologia da conversão fotovoltaica da energia solar já é aplicada na eletrificação rural há mais de três décadas. Sua principal

utilização comunitária é o bombeamento de água e, de acordo com Presenço (2007), uma considerável quantidade de dinheiro poder ser poupada quando se bombeia água usando sistemas fotovoltaicos. A vantagem do bombeamento durante um período de radiação solar elevada é que a água pode ser armazenada em reservatórios para o seu aproveitamento máximo, porque nem toda energia solar captada é requerida no momento.

2.4 Sistema de Bombeamento Fotovoltaico

Para Kolling *et al*. (2004), "um sistema fotovoltaico de bombeamento diretamente acoplado é constituído de três componentes principais: um conjunto fotovoltaico, um motor de corrente contínua e uma bomba-d'água. O painel fotovoltaico converte energia solar em corrente elétrica que alimenta o motor, o qual é acoplado à bomba d'água. Quando o painel supre o motor com potência elétrica suficiente, ele produz torque mecânico e a bomba começa a trabalhar". A este conjunto de componentes obviamente deve-se acrescentar um reservatório para a água, ou seja, uma caixa-d'água. Segundo Hamidat e Benyoucef (2007), geralmente um sistema de bombeamento funciona sem baterias para armazenamento de energia. O armazenamento da água em reservatórios é a solução mais comumente adotada na maioria das aplicações de bombeamento.

Araújo (2003) conceitua as bombas-d'água como "máquinas operatrizes hidráulicas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto ao outro. Recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte desta energia ao fluido, sob a forma de energia de pressão, cinética ou ambas". Conforme Hamidat e Benyoucef (2007), "a bomba é a responsável pela conversão da energia mecânica em energia hidráulica".

Um bombeamento de água, na sua forma mais simples pode ser feito com a utilização de uma bomba manual como a da Figura 17, onde a fonte motora é o trabalho humano. Ela é de utilização simples e indicada para zona rural em locais desprovidos de energia elétrica e outros recursos básicos. É um equipamento de baixo custo, com tecnologia simples, de fácil manutenção, que não requer combustível, mas precisa de muito tempo e esforço humano para produzir um baixo fluxo de água.

Figura 17 – Bomba d'água manual.
Fonte: Falconpr75, 2008.

Um substituto de baixo custo inicial, fácil instalação e que é utilizado em larga escala é a bomba alimentada por um motor movido a óleo diesel. Suas desvantagens estão todas na "lista negra" dos movimentos ambientalistas mundiais: ruído, fumaça, poluição, tudo isto com alto custo de transporte e uso do combustível.

A energia solar fotovoltaica surge como a fonte ideal para mover o motor que acionará a bomba hidráulica. "Apesar de ser uma tecnologia relativamente nova, foi graças a projetos de grande envergadura, na maioria das vezes implantados em zonas rurais de países em desenvolvimento, com o suporte dos países produtores dos equipamentos, que os ganhos tecnológicos foram alcançados, em função da necessidade de adaptação às condições de campo" (FEDRIZZI, 2003).

Um sistema fotovoltaico de bombeamento apresenta como características positivas: baixa necessidade de manutenção, possibilidade de operação desassistida, durabilidade, confiabilidade e uso de energia não-poluente, sem custo e renovável. Custo inicial elevado e baixa produtividade nos dias nublados são fatores negativos do sistema.

Os tipos de bomba mais comumente utilizados são: de diafragma, centrífuga e volumétrica. O funcionamento da bomba de diafragma (Figura 18) se baseia na diminuição e aumento de pressão sobre uma membrana plástica, o que permite a aspiração e a saída da água. É utilizada com frequência em sistemas solares de bombeamento de água pelo fato de operar normalmente mesmo quando sujeita a variações na tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

Figura 18 – Exemplo de uma bomba de diafragma.
Fonte: Foto do autor.

Na bomba centrífuga (Figura 19) uma fonte externa à bomba, causa o giro de rotores dentro do corpo da mesma, movimentando o líquido e criando a força centrífuga que se transforma em energia de pressão para expulsá-lo. Indicada para maiores volumes de água e menores alturas de bombeamento.

Figura 19 – Exemplo de uma bomba centrífuga.
Fonte: Foto do autor.

A bomba volumétrica (Figura 20) funciona impulsionando o fluido pela diminuição do volume numa câmara ou passagem. Recomendada para menores volumes de água e maiores alturas de bombeamento.

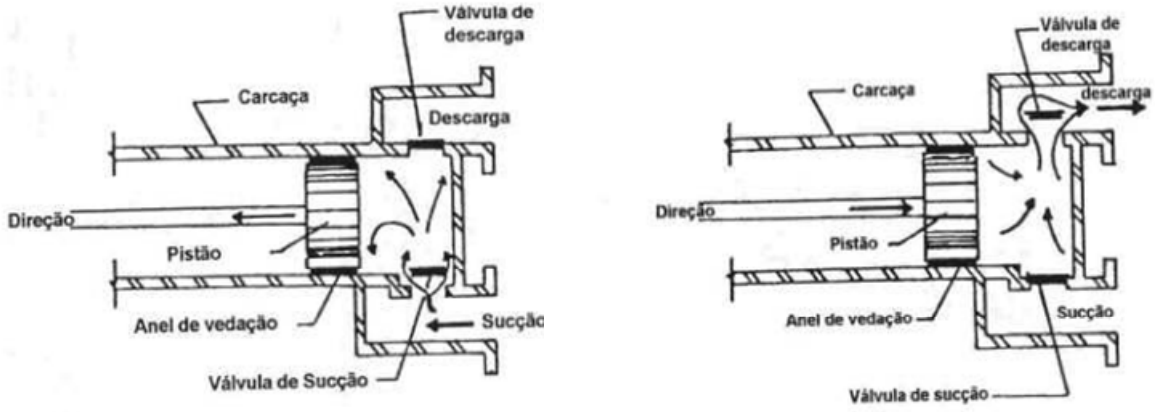


Figura 20 – Esquema de uma bomba volumétrica com indicação de fluxo.
Fonte: Pereira e Melo (2009)

”O motor é a máquina que transforma a energia elétrica em energia mecânica” (HAMIDAT e BENYOUCEF, 2007). Para a movimentação de uma bomba em um sistema fotovoltaico de bombeamento d’água pode-se utilizar, tanto um motor de corrente contínua (CC) diretamente conectado aos painéis solares, quanto um motor de corrente alternada (CA). Neste segundo caso é necessário um inversor entre o motor e o painel para conversão da corrente contínua gerada pelo painel em corrente alternada consumida pela bomba. Geralmente o motor forma uma única peça com a bomba e é conhecido como moto-bomba, apesar de ser comumente chamado de bomba.

Quanto à localização das moto-bombas em um sistema de bombeamento existem modelos para instalação em superfície, tanto em terra como em flutuadores sobre lâminas d’água e modelos para instalações submersas, dentro de poços.

Segundo Fedrizzi (2003), a utilização comercial do bombeamento fotovoltaico só começou por volta de 1978, na ilha de Córsega, apesar de algumas aplicações observadas na década de 50. Ainda conforme a mesma autora, os primeiros sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no Brasil datam de 1981. Com um crescimento inicial baixo, o setor só experimentou um crescimento mais acelerado quando o Ministério de Minas e Energia implantou o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), em dezembro de 1994.

3 MATERIAL

3.1 Localização do Laboratório

O presente trabalho foi desenvolvido no NEAR – Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis, do Laboratório de Energização Rural, visto na Figura 21, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista (FCA/UNESP) – Câmpus de Botucatu.

Figura 21 – Instalações do NEAR (Depto. Engenharia Rural/FCA/UNESP).

O NEAR está situado na Fazenda Experimental Lageado, em Botucatu-SP. Tem como coordenadas geográficas 22° 51' 07" de Latitude Sul (S) e 48° 25' 57" de Longitude Oeste (W), e altitude de 790 metros. Esses valores foram determinados por leitura de GPS (Global Positioning System) em 07/07/2009.

3.2 Características Climáticas

O clima de Botucatu-SP, segundo a classificação climática de *Köppen* é definido como *Cfa*, caracterizado por ter clima temperado quente (mesotérmico) úmido e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 ºC. Segundo a classificação de *Thornthwaite* é identificado como $B_2rB'_3a'$ (clima úmido com pequena deficiência hídrica em abril, julho e agosto, mesotérmico, com evapotranspiração potencial anual de 945,15 mm e concentração da evapotranspiração potencial no verão de 33%) (CUNHA e MARTINS, 2009). Os valores climáticos históricos locais estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados climáticos normais da estação meteorológica da FCA/UNESP
Local: Campus de Botucatu, SP, no período de 1971 a 2007.

Mês	T (ºC)	UR (%)	V (m/s)	n (h/d)	Rg (MJ/m^2d)	P (mm)
Jan	22,7	76,7	4,2	6,2	13,6	266,9
Fev	23,1	76,7	4,3	6,7	15,2	205,6
Mar	22,6	75,5	4,0	6,9	13,3	177,8
Abr	21,0	73,4	4,4	7,7	12,9	69,8
Mai	18,2	72,4	3,8	7,3	10,6	82,7
Jun	17,2	69,3	3,9	6,9	10,3	56,7
Jul	17,1	66,7	4,3	7,7	10,7	42,5
Ago	18,6	63,2	4,6	8,0	12,2	37,0
Set	19,2	67,8	5,5	6,8	12,9	87,7
Out	20,8	69,5	5,2	7,2	14,1	113,0
Nov	21,6	70,1	5,3	7,5	15,9	144,1
Dez	22,2	74,1	4,7	6,5	14,5	211,9
Anual	20,4	71,3	4,5	7,1	13,0	1495,7

T = temperatura do ar; UR = umidade relativa do ar; V = velocidade do vento a 2 m altura; n = insolação; Rg = radiação solar global; P = precipitação pluviométrica.

3.3 Materiais e Equipamentos

Para o desenvolvimento do trabalho foram montados 2 sistemas de bombeamento de água independentes entre si, conforme pode ser visto na Figura 22. Um deles alimentado por painéis solares fotovoltaicos monocristalinos, identificado por Sm. O outro alimentado por painéis policristalinos, identificado por Sp.

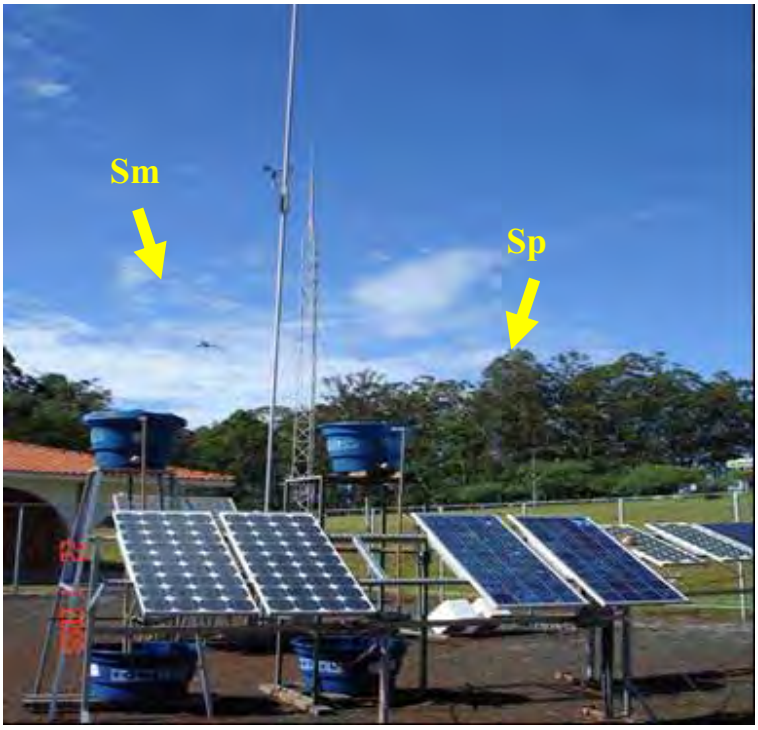


Figura 22 – Sistemas Sm (painéis monocristalinos) e Sp (painéis policristalinos).

Foi usado o material relacionado nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, a seguir.

Tabela 3 – Materiais e equipamentos para medições meteorológicas.

Material	Quantidade
Anemômetro	1
Piranômetro	2
Termo higrômetro	1
Pluviômetro	1

Tabela 4 – Materiais e equipamentos para operação do sistema de bombeamento Sm.

Material	Quantidade
Caixa-d'água inferior para 150 L	1
Caixa-d'água superior para 100 L	1
Sensor de nível na caixa-d'água superior	2
Moto-bomba de diafragma	1
Válvula solenóide	1
Tubulação de PVC (canos, luvas e curvas)	necessária
Relé de 12 VCC	2
Resistor shunt (15 A/150 mV)	1
Painel solar monocristalino de 65 Wp	2
Botoeira liga-desliga	1

Tabela 5 – Materiais e equipamentos para operação do sistema de bombeamento Sp.

Material	Quantidade
Caixa-d'água inferior para 150 L	1
Caixa-d'água superior para 100 L	1
Sensor de nível na caixa-d'água superior	2
Moto bomba de diafragma	1
Válvula solenóide	1
Tubulação de PVC (canos, luvas e curvas)	necessária
Relé de 12 V CC	2
Resistor shunt (15 A/150 mV)	1
Painel solar policristalino de 70 Wp	2
Botoeira liga-desliga	1

Tabela 6 – Materiais e equipamentos para coleta e monitoramento dos dados dos sistemas.

Material	Quantidade
Microcomputador	1
Sistema de comunicação	1
Software proprietário do equipamento de coleta de dados	1
Equipamento de coleta de dados (CR23X-Micrologger)	1

Cada um dos materiais e equipamentos listados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 está descrito em detalhes nos itens que se seguem.

3.4 Medições Meteorológicas

O experimento utilizará como base para discutir os resultados a estação meteorológica já existente no NEAR.

Em uma torre de alumínio de base triangular, com a altura de 10 m, encontram-se instalados os seguintes equipamentos, detalhados na Tabela 7:

- 1 anemômetro
- 1 piranômetro e
- 1 termo higrômetro.

Além destes há também:

- 1 pluviômetro próximo desta torre e
- 1 piranômetro fixado na estrutura que suporta os painéis solares.

Tabela 7 – Especificação dos sensores usados nas medidas meteorológicas.

Equipamento	Elemento sensor	Resolução	Fabricante	Modelo	Figura
Anemômetro	4 hélices de polipropileno	1,0 m/s	R.M. Young	05103	23
Piranômetro	Termopilha	0,01 %	Kipp & Zonen	CM3	24, 25
Termômetro	Termistor	0,1 ºC	Vaisala	HMP45C	26
Higrômetro	Capacitor	0,2 %	Vaisala	HMP45C	26
Pluviômetro	Pulso eletrônico	0,254 mm	Campbell Scientific	TB4-L	27

3.4.1 Velocidade e Direção do Vento

Para medir a direção e a velocidade instantâneas do vento foi utilizado um anemômetro instalado no topo da torre da estação meteorológica, conforme Figura 23. Este equipamento mede a velocidade do vento, em m/s, na altura de 10 m do solo e também a sua direção, em graus, a cada segundo.

Figura 23 – Anemômetro.

3.4.2 Radiação Solar

Para medir a incidência da radiação solar foram utilizados 2 piranômetros, um para medir a irradiância no plano horizontal, mostrado na Figura 24, instalado na torre da estação e outro, a irradiância na inclinação dos painéis solares dos 2 sistemas. Encontra-se fixado junto aos painéis, como mostra a Figura 25 e com a mesma inclinação em relação ao plano horizontal.

Figura 24 – Piranômetro no plano horizontal.

Figura 25 – Piranômetro na mesma inclinação dos painéis solares.

3.4.3 Temperatura Ambiente e Umidade Relativa

Através de um termo-higrômetro, foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar. Este sensor, visto na Figura 26, está contido em abrigo próprio, para proteção contra a incidência direta de raios solares, chuva e vento excessivo.

Figura 26 – Termo-higrômetro.

3.4.4 Índice Pluviométrico

Foi utilizado um pluviômetro para medir a precipitação pluviométrica no local. A Figura 27 mostra em (a) o equipamento instalado e em (b) desenho esquemático que permite ver seu mecanismo interno, que é acionado pela coleta da água da chuva.

(a) (b)

Figura 27 – Pluviômetro.

3.5 Sistema de Bombeamento Fotovoltaico – Monocristalino (Sm)

O sistema Sm, visto na Figura 28, visa bombear água entre duas caixas, utilizando uma bomba energizada por arranjos de painéis solares monocristalinos.

Figura 28 – Vista da disposição física do sistema Sm.

3.5.1 Sistema Hidráulico

A parte hidráulica do sistema foi montada em uma estrutura metálica em forma de tronco de pirâmide, disponível no Laboratório (Figura 29).

Figura 29 – Estrutura metálica para Sistema Sm.

- **Caixa-d'água inferior –** Com capacidade para 150 L, foi utilizada para abastecer o sistema (Figura 30).

Figura 30 – Caixa-d'água inferior.

- **Caixa-d'água superior –** Situada na mesma estrutura metálica, na parte superior, a 2,15 m da base, com capacidade máxima para 100 L, contendo 2 sensores de nível, um na parte inferior e outro na parte superior da caixa (Figura 31). Esta caixa foi utilizada como depósito do volume de água bombeado.

O volume máximo de água medido entre os dois sensores de nível é de 74,45 L, que foi utilizado em todos os cálculos que envolveram volume de água bombeado.

Figura 31 – Caixa-d'água superior.

- **Sensores de nível –** Monitoram o nível mínimo (sensor inferior – SI) e o nível máximo (sensor superior – SS) de água na caixa-d'água superior. Isto é feito com abertura ou fechamento de contatos do circuito elétrico dos sensores de nível, auxiliando no controle dos processos de enchimento e esvaziamento da caixa superior (Figura 32).

Figura 32 – Sensores de nível.

- **Tubulações de PVC (tubos, luvas e curvas) -** Para o recalque da água, da caixa inferior para a superior, foram utilizados tubos de PVC, luvas e curvas de ½", na quantidade necessária para interligar caixa inferior até moto-bomba e desta até caixa superior. Para o processo de esvaziamento da caixa superior foram utilizados tubos, válvula de pé com crivo e luvas com diâmetro de ¾", na quantidade necessária para interligar a caixa superior até a válvula solenóide e desta até a caixa inferior (Figura 33).

Figura 33 – Sistema hidráulico.

3.5.2 Equipamentos Elétricos

- **Moto bomba -** Para o recalque da água foi utilizada uma bomba de superfície marca Shurflo (Figura 34), com sistema de bombeamento positivo através de câmaras com diafragma, cujas especificações técnicas estão na Tabela 8.

Figura 34 – Moto-bomba.

Tabela 8 – Especificações técnicas da bomba de recalque.

Característica	Especificação técnica
Modelo	8000-443-136
Voltagem nominal	12 VCC
Corrente nominal	7,0 A
Vazão nominal	6,5 L/min
Pressão nominal	60 PSI
Peso	2,07 Kg

- **Válvula solenóide -** O processo de retorno da água da caixa superior é feito através de uma válvula solenóide (Figura 35) que abre para a passagem de água assim que a caixa superior estiver cheia e cessar o bombeamento, definido pelos sensores de nível inferior e superior. De forma semelhante ela se fechará para a passagem de água tão logo a caixa superior atinja seu nível mínimo e se inicie novo ciclo de bombeamento. Suas especificações técnicas estão na Tabela 9.

Figura 35 – Válvula solenóide.

Tabela 9 – Especificações técnicas da válvula solenóide.

Característica	Especificação técnica
Modelo	8210D095
Voltagem nominal	12 VCC
Corpo	Latão
Característica de funcionamento	2 vias normalmente fechada
Fluido	Ar, gás ou água
Pressão nominal	7 Kgf/cm^2
Conexão	¾” NPT

- **Relé de 12 VCC –** O controle do acionamento automático da moto-bomba e da válvula solenóide é feito por meio de 2 relés automotivos de 12 VCC (Figura 36). Esses relés, ao terem suas bobinas energizadas ou desenergizadas, irão simultaneamente acionar a moto-bomba e fechar a válvula solenóide no processo de recalque ou, inversamente, desligar a bomba e abrir a solenóide no processo de esvaziamento da caixa superior.

Figura 36 – Relé automotivo de 12 VCC.

- **Resistor "shunt" -** Como o equipamento de coleta de dados (datalogger) trabalha somente com tensões e de valores inferiores a 5 V, foi necessário instalar um resistor "shunt" (Figura 37) para converter a corrente em tensão, na saída dos módulos fotovoltaicos, para ser lida pelo datalogger. O "shunt" é um elemento resistivo calculado de modo a manter a tensão proporcional à corrente que passa por ele. Foi utilizado um shunt com relação igual a 15 A/150 mV.

Figura 37 – Resistor "shunt".

- **Painel Solar Monocristalino -** A energia elétrica para alimentar a moto-bomba que faz o recalque de água da caixa inferior para a superior foi gerada por painéis solares fotovoltaicos do tipo monocristalino (Figura 38), fabricados pela Siemens Solar Industries (Índia).

Dois arranjos foram experimentados: Sm1 - apenas 1 painel alimentando o sistema de bombeamento ou Sm2 – com os 2 painéis com suas saídas conectadas em paralelo alimentando o bombeamento.

Figura 38 – Painéis solares fotovoltaicos monocristalinos.

Na tabela 10 estão transcritas as especificações técnicas de cada painel, individualmente.

Tabela 10 – Especificações técnicas de cada painel solar monocristalino.

Característica	Especificação técnica
Modelo	SP65
Potência nominal	65 Wp
Corrente nominal	3,95 A
Corrente de curto-circuito	4,50 A
Tensão nominal	16,5 V
Tensão de circuito aberto	21,4 V
Nº de células de silício monocristalino	36
Dimensões (C x L x h) em mm	1198 x 528 x 5
Área útil para geração de energia	0,52 m²

- **Botoeira –** Existe no sistema um interruptor liga-desliga (Figura 39) que deve ser usado apenas no início do primeiro processo de bombeamento de água. A partir desse momento, essa botoeira só será usada novamente se houver necessidade de parada para manutenção nos equipamentos.

Figura 39 – Botoeira.

3.6 Material para a Operação do Sistema Policristalino - Sp

O sistema hidro-energético Sp, foi montado seguindo as mesmas características do Sistema Sm. Difere apenas na estrutura metálica de sustentação na forma de paralelepípedo (Figura 40) e nos painéis solares fotovoltaicos que são do tipo policristalino.

Figura 40 – Estrutura metálica de sustentação do Sistema Sp.

- **Painel Solar Policristalino** - A energia elétrica que proporciona o bombeamento de água da caixa inferior para a superior foi gerada por painéis solares fotovoltaicos do tipo policristalino (Figura 41), de fabricação da Shell Solar Energy.

Também dois arranjos foram experimentados: Sp1 - apenas 1 painel alimentando o sistema de bombeamento ou Sp2 – com os 2 painéis com suas saídas conectadas em paralelo alimentando o bombeamento.

Figura 41 – Painéis solares fotovoltaicos policristalinos.

As especificações técnicas desses módulos fotovoltaicos estão descritas na tabela 11.

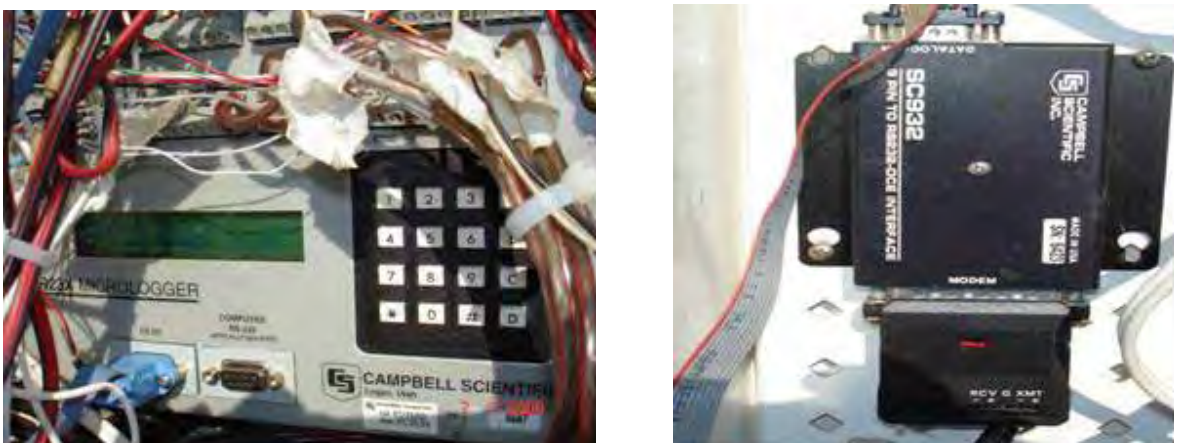
Tabela 11 – Especificações técnicas de cada painel solar fotovoltaico policristalino.

Característica	Especificação técnica
Modelo	RSM 70
Potência nominal	70 Wp
Tensão nominal	17 V
Tensão em aberto	21,2 V
Corrente nominal	2,9 A
Nº de células de silício policristalino	36
Dimensões (C x L x h) em mm	1218 x 580 x 5
Área útil para geração de energia	0,54 m²

3.7 Monitoramento e Coleta de Dados

3.7.1 Sistema de Aquisição de Dados

Para a coleta de dados, monitoramento de sinais enviados pelos sensores meteorológicos e elétricos, bem como para o funcionamento dos Sistemas Sm e Sp, foi utilizado um equipamento de aquisição de dados (datalogger), da Campbell Scientific, modelo CR23X Micrologger (Figura 42-a). Esse equipamento é alimentado por uma fonte de energia externa ao sistema, oriunda de um sistema solar fotovoltaico, com tensão mantida aproximadamente em 12 VCC.



(a) (b)

Figura 42 – CR23X Micrologger (a), Interface com RS232 (b).

Os dados coletados são inicialmente armazenados na própria memória do equipamento de coleta e, periodicamente são transferidos da memória do coletor para um microcomputador, instalado no NEAR, utilizando uma interface (Figura 42-b) com a porta RS232 do computador.

3.7.2 Microcomputador

Um computador (Figura 43) instalado no NEAR está preparado para a leitura periódica dos dados coletados, através de um software proprietário que acompanha o equipamento de aquisição de dados.

Figura 43 – Microcomputador do NEAR.

Na Tabela 12 estão as características técnicas do computador utilizado no processo de coleta dos dados.

Tabela 12 – Especificações técnicas do microcomputador.

Característica	Especificação técnica
Processador	AMD Sempron
Clock	2,11 GHz
Memória RAM	896 Mb
Disco rígido	76 Gb
Sistema Operacional	Windows XP

3.7.3 Software Proprietário do Equipamento Datalogger

O software PC208W, versão 3.3, permite a interação entre PC e o equipamento coletor de dados. Através dele é possível, no microcomputador, criar e transferir programas para o coletor, monitorar dados coletados em tempo real, transferir para o PC dados armazenados no coletor e gerar relatórios simples destes dados. Sua tela inicial permite acessar suas diversas facilidades (Figura 44).

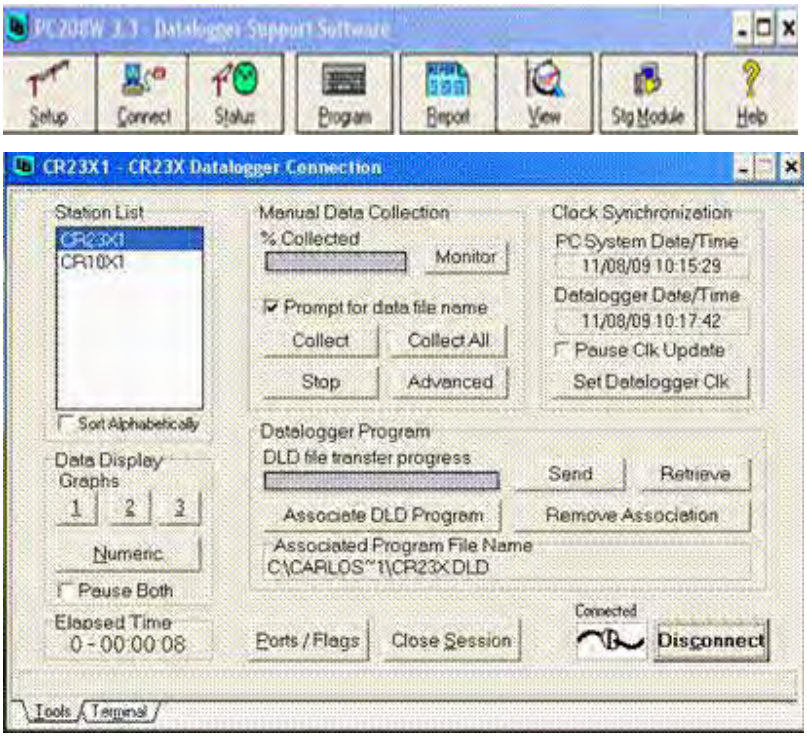


Figura 44 – Tela inicial do software PC208W – versão 3.3.

3.7.4 Coleta de Dados

O coletor de dados CR23X Micrologger, efetua cálculos, controla e faz medições (Figura 45). Possui display e teclado. Utiliza fonte de alimentação externa aos sistemas Sm e Sp, via sistema solar fotovoltaico, cuja tensão está em torno de 12 VCC. Tem

duas saídas de 9 pinos para comunicação com periféricos e 72 portas para funções diversas entre analógicas, digitais e de energia.

Figura 45 – CR23X Micrologger.

Suas funções nesse experimento são: fazer a varredura, uma vez por segundo, dos dados meteorológicos e dos dados elétricos dos sistemas Sm e Sp; monitorar, uma vez a cada segundo, os sensores de nível inferior e superior da caixa-d'água superior desses sistemas; receber sinais desses sensores e acionar os relés, válvula solenóide e bomba desses sistemas (controle de enchimento e esvaziamento das caixas), Tabela 13.

Tabela 13 – Equipamento de aquisição de dados CR23X Micrologger.

Característica	Especificação técnica
Entradas analógicas	12 entradas diferenciais ou 24 em terminal único. Precisão: ± 0,025% de 0 a 40ºC; ± 0,05% de -25 a 50ºC Faixa de tensão: ± 5000 mV
Saídas analógicas	4 saídas ligadas, ativas somente durante a medição, uma de cada vez; 2 contínuas. Precisão: ± 5 mVde 0 a 40ºC
Medidas de resistência	Precisão: ± 0,015% de 0 a 40ºC
Portas digitais	Faixa de tensão: 5 V ± 0,1 V Resistência de saída: 500 Ω Resistência de entrada: 100 kΩ
Teclado	Com 16 caracteres para a entrada de programas, comandos e dados.
Display	LCD com 24 caracteres x 2 linhas
Consumo de energia	Tensão: 11 a 16 VCC

3.8 Disposição Final dos Sistemas de Geração Fotovoltaica

Os Sistemas estão posicionados um ao lado do outro, mas são independentes quanto ao fornecimento de energia à moto-bomba e ao controle dos níveis para enchimento e esvaziamento das caixas (Figura 46).

Figura 46 – Sistemas Monocristalino - Sm (esquerda) e Policristalino - Sp (direita).

As estruturas de apoio, apesar de geometricamente diferentes, foram preparadas para deixar as caixas-d'água exatamente nas mesmas alturas. A distância medida entre suas bases inferiores é de 2,15 m (Figura 47).

Figura 47 – Distância geométrica entre as caixas-d'água inferior e superior.

Além disso, os painéis solares foram instalados com suas faces voltadas para o Norte geográfico, como ilustra a Figura 48. Há uma inclinação **β** em relação ao plano horizontal de aproximadamente 32º 51', o que equivale à latitude local mais 10º (22º 51' 07" + 10º). Conforme Fiorentino (2004) "este direcionamento e inclinação dos módulos têm como objetivo receber a maior irradiância no mês de julho, que é o mês crítico para essa localização".

Figura 48 – Ângulo de inclinação β dos painéis com o plano horizontal.

4 MÉTODOS

Para a avaliação e comparação do desempenho hidro-energético dos dois 2 sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água foram configurados 4 pares de arranjos elétricos identificados na Tabela 14. Durante cada mês foi utilizada uma configuração com 2 pares, identificados pela seguinte codificação:

XX-Stn, onde:

XX – indica o número identificador do mês (04 = abr.; 05 = maio; 06 = jun. e 07 = jul.);

S – significando Sistema de Bombeamento;

t – correspondente ao tipo de painel (m = monocristalino; p = policristalino);

n – número de painéis conectados no arranjo (1 ou 2). No arranjo onde há 2 painéis, os mesmos foram conectados em paralelo.

Tabela 14 – Composição dos arranjos elétricos.

PERÍODO DE 2009	ARRANJOS	PAINÉIS Monocristalinos	PAINÉIS Policristalinos
ABRIL	04-Sm2 e 04-Sp2	2	2
MAIO	05-Sm2 e 05-Sp1	2	1
JUNHO	06-Sm1 e 06-Sp2	1	2
JULHO	07-Sm2 e 07-Sp2	2	2

Os dados de bombeamento de água diário (L/dia), consumo de energia (Wh), potência (W), tensão (V), corrente (A), irradiância (W/m²), foram comparados para verificar a eficiência entre os 2 arranjos, em cada período de bombeamento. Os dados são armazenados por um datalogger que coleta os valores a cada segundo e calcula um valor médio para cada intervalo de monitoração (5 minutos), durante as 24 horas do dia. Portanto, utiliza 300 leituras para os cálculos no intervalo de 5 minutos. Faz também totalizações horárias e diárias de algumas grandezas.

4.1 Determinação da Altura Manométrica

Altura manométrica (H_m) de um sistema hidráulico é a soma de sua altura geométrica (H_g) com as perdas que ocorrem nas tubulações de sucção e recalque, transformadas em comprimentos equivalentes (H_p). Os Sistemas Sm e Sp foram concebidos para uma altura manométrica fixa, conforme mostra o esquema da Figura 49.

Portanto, $H_m = H_g + H_p$. Considerando valores tabelados para os vários componentes da tubulação:

H_p (sucção) = 0,52 m

H_p (recalque) = 0,35 m

H_p (3 m de tubulação) = 0,15 m

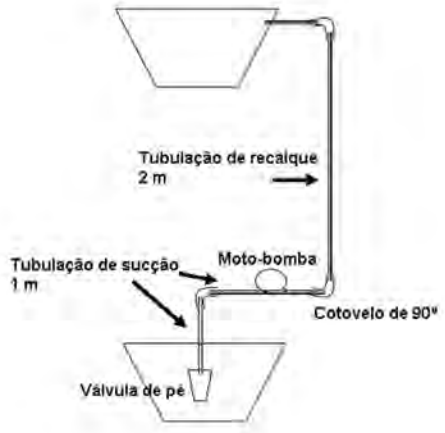


Figura 49 – Componentes para o cálculo da altura manométrica.

$H_p = 0,52 + 0,35 + 0,15 = 1,02$ m

A altura manométrica será, portanto:

$H_m = 2,15 + 1,02$

$H_m = 3,17$ m

4.2 Diagrama Hidráulico dos Sistemas Sm e Sp

O diagrama do circuito hidráulico e seu respectivo fluxo está representado na Figura 50, servindo para os 4 pares de arranjos.

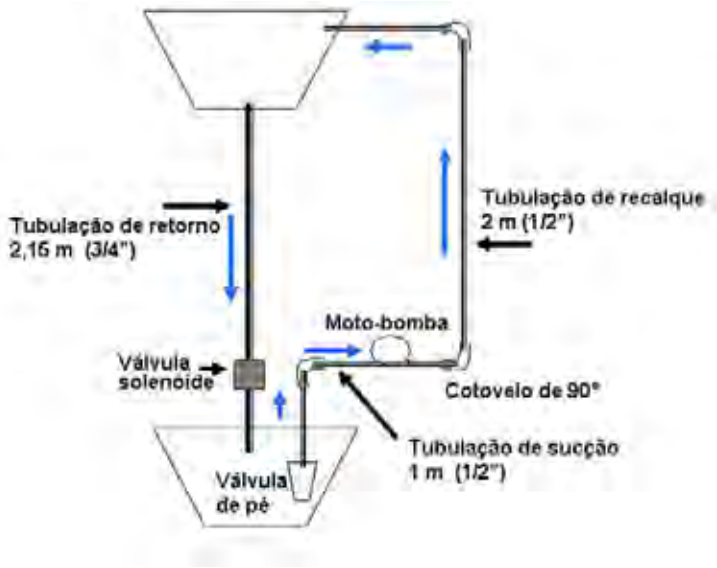


Figura 50 – Diagrama representativo das conexões e fluxos hidráulicos.

4.3 Diagrama Elétrico dos Sistemas Sm e Sp

O diagrama elétrico de funcionamento e coleta de dados referente aos arranjos da Tabela 13, para os Sistemas de Bombeamento Sm e Sp, encontra-se representado na Figura 51, sendo que o datalogger CR23X é alimentado continuamente por uma fonte de energia elétrica externa ao experimento, na tensão de 12 VCC.

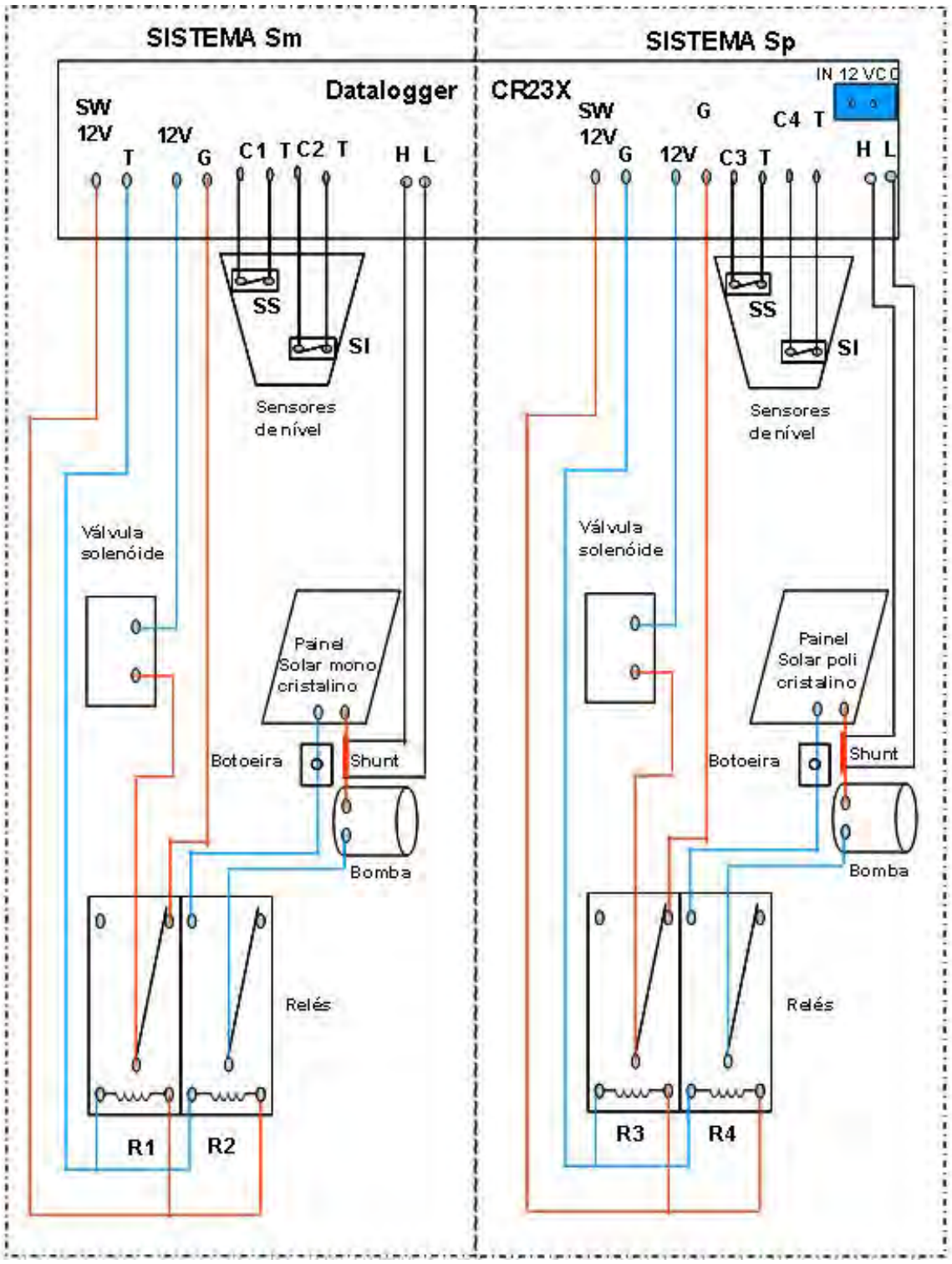


Figura 51 – Diagrama das conexões elétricas dos sistemas Sm e Sp.

4.4 Etapas do Processo de Bombeamento

O início do processo de bombeamento de água é dado a partir de uma botoeira liga-desliga existente na saída dos painéis, em cada um dos sistemas, ou seja, ligando a moto-bomba e começando o bombeamento. A partir desse momento, as botoeiras só serão usadas quando houver necessidade de manutenção nos equipamentos. Isto significa que o funcionamento contínuo e ininterrupto dos 2 Sistemas de bombeamento depende exclusivamente do datalogger, o qual faz o controle mediante os sensores de níveis da caixa superior, em cada sistema.

Todo o processo cíclico de enchimento e esvaziamento da caixa superior é comandado pela movimentação dos sensores de nível inferior (SI) e superior (SS) existentes na caixa-d'água superior de cada sistema. Nos arranjos com o Sistema Sm, o relé R1 fica energizado, alimentado eletricamente por 12V oriundos do datalogger. Em consequência, seus contatos fecham o circuito que passa pela válvula solenóide, que é então acionada, alterando sua condição original de normalmente fechada para aberta, permitindo assim o escoamento da água da caixa superior. Ao mesmo tempo, o relé R2 também é acionado e a nova posição de seus contatos mantém a bomba desligada. Em situação semelhante, o mesmo acontece com os relés R3 e R4, nos arranjos com o Sistema Sp.

Os dois sistemas de bombeamento são totalmente independentes neste controle feito pelo datalogger que é mostrado em 4 etapas na Figura 52.

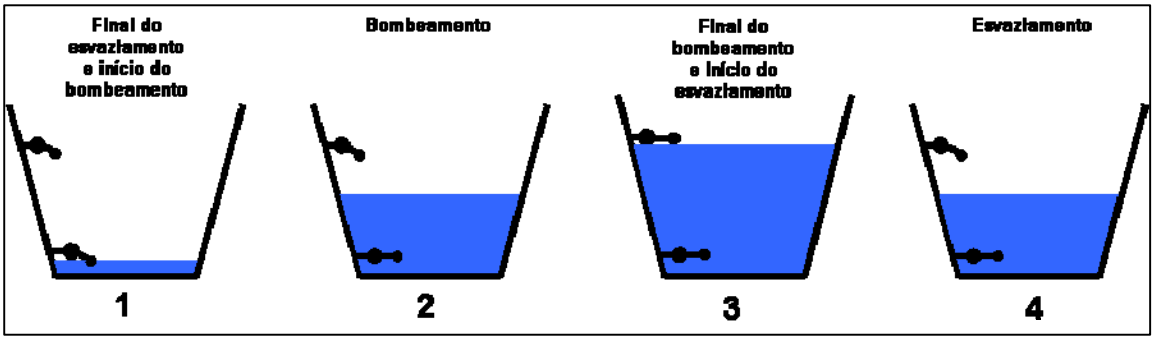


Figura 52 – Etapas do controle de esvaziamento/bombeamento da caixa superior.

- **Etapa 1 –** Ao terminar o esvaziamento da caixa superior o datalogger vai receber, via registro de tensão, sinal de abertura dos contatos do sensor inferior (SI) dessa caixa, indicando caixa vazia (SImin). Registra também o horário dessa ocorrência (HMINSImin). Imediatamente o datalogger corta a corrente para os relés R1 e R2 (Sistema Sm) ou R3 e R4 (Sistema Sp). Ao trocar seus contatos de posição, os relés ligam a moto-bomba e fecham a passagem de água pela válvula solenóide. Inicia-se novo bombeamento de água.

- **Etapa 2 –** O recebimento de sinal de fechamento dos contatos do sensor inferior (SImax) indica que o bombeamento de água da caixa inferior para a superior está em andamento. O datalogger registra também o horário dessa ocorrência (HMINSImax). Assim vai continuar até a água atingir o nível máximo na caixa superior.

- **Etapa 3 –** Quando a água atingir o nível máximo da caixa superior, o datalogger recebe sinal de fechamento dos contatos do sensor de nível superior dessa caixa, indicando caixa cheia (SSmax) e registra o tempo em que isto ocorreu (HMINSSmax). Imediatamente vai enviar corrente para os relés para desligar a moto-bomba, encerrando o bombeamento, e abrir passagem de água pela válvula solenóide, iniciando o esvaziamento da caixa.

- **Etapa 4 –** Ao receber sinal de abertura dos contatos do sensor de nível superior (SSmin), o datalogger tem a indicação que o esvaziamento da caixa superior está em andamento. Registra também cronologicamente essa ocorrência (HMINSSmin). Essa etapa se encerra quando o sensor de nível inferior enviar ao datalogger sinal de abertura de seus contatos, indicador de caixa vazia (SSmin). O processo volta novamente para a etapa 1.

A partir daí o processo se repete várias vezes ao dia, desde que haja geração fotovoltaica de energia. A interrupção do processo de bombeamento só irá ocorrer se faltar energia para a moto-bomba, o que acontece à noite ou em condições de alta nebulosidade, mas é retomado imediatamente após cessarem essas condições adversas, sem nenhuma ação humana.

O datalogger registra, a cada segundo, a eventual ocorrência de níveis máximos e mínimos de água através dos sensores de nível da caixa superior, para os dois sistemas, bem como o horário de suas ocorrências.

4.5 Coleta dos Dados Meteorológicos e Elétricos

A medição e a coleta dos dados meteorológicos são feitas sem interrupção, 24 horas por dia e independem do funcionamento dos Sistemas Sm e Sp. Dados são coletados, consolidados e calculados através de processamentos do datalogger.

Tanto os dados meteorológicos, quanto os elétricos coletados são inicialmente armazenados na própria memória do equipamento de coleta e, quando há necessidade, são transferidos de sua memória para um microcomputador, instalado no NEAR. Os dados transferidos estão no formato "*.dat" e são, em seguida, convertidos para o formato de arquivos Excel, para serem manipulados conforme os objetivos desejados.

A tensão elétrica na saída dos painéis fotovoltaicos é lida, nos dois sistemas, diretamente pelo datalogger através de divisores de tensão, modelo VDIV 10:1, que estão em destaque na Figura 53. Esses divisores de tensão reduzem, na proporção de 10 para 1, os valores reais da tensão para níveis adequados suportáveis pelo equipamento (± 5000 mV). O programa utilizado pelo datalogger exprime essas tensões V1 e V2 já em valores reais, corrigidos após a leitura da tensão.

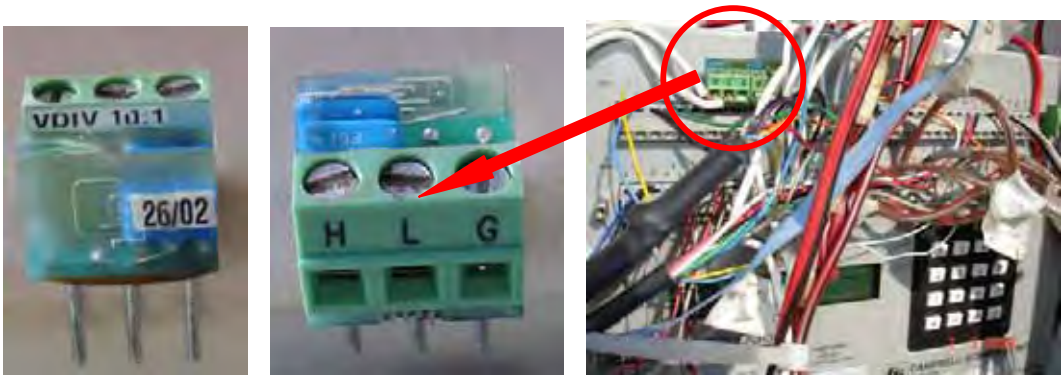


Figura 53 – Divisores de tensão VDIV 10:1.

Para medir a corrente elétrica na saída dos painéis fotovoltaicos foram usados derivadores de corrente ou "*shunts*" que, por manterem a proporcionalidade entre tensão e corrente circulantes, permitem que se trabalhe com tensão, que é a variável medida pelo datalogger. Da mesma forma que acontece com as tensões, tanto a coleta da corrente

elétrica I1 no Sistema Sm, quanto a I2 no Sistema Sp são feitas pelo datalogger e são armazenadas em Amperes em sua memória.

4.6 Forma e Relação dos Dados Coletados

A coleta de dados dos 2 Sistemas, bem como dados meteorológicos, tais como: temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento a 10 m de altura, precipitação pluviométrica e radiação solar global são disponibilizados pelo datalogger, em arquivos no formato "*.dat", conforme imagem mostrada na Figura 54. São 3 tipos de linhas ou registros de dados: 111, 222 e 333, gerados pelo programa do Apêndice 1.

```
111,2009,233,2340,10.52,2335,50.5,10.52,2339,14.5,4974,2335,31.5,4976,2338,46.5,9.86,87.5,3.91,104.
6,0,0,0,0,0,0,0,0,.006,0,0,0,0
111,2009,233,2345,10.52,2341,30.5,10.52,2340,22.5,4975,2342,56.5,4975,2340,38.5,9.85,87.5,2.945,104
.8,0,0,0,0,0,0,0,0,.006,0,0,0,0
111,2009,233,2350,10.52,2345,1.5,10.52,2348,18.5,4975,2345,36.5,4975,2348,20.5,9.86,87.5,4.499,102.
9,0,0,0,0,0,0,0,0,.006,0,0,0,0
111,2009,233,2355,10.52,2350,1.5,10.52,2353,58.5,4975,2350,10.5,4976,2354,7.5,9.88,87.1,3.371,101,0,
0,0,0,0,0,0,0,.006,0,0,0,0
111,2009,233,2400,10.52,2358,30.5,10.52,2355,1.5,4975,2358,34.5,4975,2355,12.5,9.85,86.8,4.116,101.
6,0,0,0,0,0,0,0,0,.007,0,0,0,0
222,2009,233,2400,0,0,0,0
333,2009,233,2400,20.73,1553,101.7,856,9.66,2358,72.8,1526,12.05,2338,1.702,98.9,23.23,.2,9.13,13.03
,10.82,12.11
```

Figura 54 – Imagem do arquivo de dados coletado pelo datalogger.

Os dados de cada linha do relatório, identificados pelo código 111 na primeira posição, são valores coletados e consolidados em um determinado intervalo de tempo que, neste caso é a cada 5 minutos.

- ANO – ano;
- DJ – dia juliano;
- HMIN – horas e minutos, a cada 5 minutos;
- SImin – valor mínimo em milivolts do sensor de nível inferior da caixa-d'água superior do Sistema Sm;
- HMINSImin – horas e minutos da leitura de SImin;
- SEGSImin – segundos da leitura de SImin;

- SImax - valor máximo em milivolts do sensor de nível inferior da caixa-d'água superior do Sistema Sm;
- HMINSImax – horas e minutos da leitura de SImax;
- SEGSImax – segundos da leitura de SImax;
- SSmin – valor mínimo em milivolts do sensor de nível superior da caixa-d'água superior do Sistema Sm;
- HMINSSmin – horas e minutos da leitura de SSmin;
- SEGSSmin – segundos da leitura de SSmin;
- SSmax - valor máximo em milivolts do sensor de nível superior da caixa-d'água superior do Sistema Sm;
- HMINSSmax – horas e minutos da leitura de SSmax;
- SEGSSmax – segundos da leitura de SSmax;
- Tar – temperatura média do ar, em °C;
- URar – umidade relativa média do ar, em %;
- Vvento10 – velocidade média do vento, em m/s, a 10 m de altura;
- Dvento10 – direção resultante do vento, a 10 m de altura, em graus;
- Pp – precipitação pluviométrica em mm;
- Rgh – radiação solar global média incidente no plano horizontal, em W/m²;
- Rgi_2 – radiação solar global média incidente na inclinação dos painéis solares dos Sistemas Sm e Sp, em W/m²;
- V_1 – tensão média na saída dos painéis do Sistema Sm, em V;
- V_2 – tensão média na saída dos painéis do Sistema Sp, em V;
- I_1 – corrente média na saída dos painéis do sistema Sm, em A;
- I_2 – corrente média na saída dos painéis do sistema Sp, em A;
- P_1 – potência média gerada na saída dos painéis do Sistema Sm, em W;
- P_2 – potência média gerada na saída dos painéis do Sistema Sp, em W.

Os dados cuja linha é identificada pelo código 222 em sua primeira posição resultam de uma consolidação dos dados coletados. Essa consolidação ocorre ao se completar cada hora inteira.

- ANO – ano;
- DJ – dia juliano;
- HMIN – horas e minutos a cada hora;
- P_S_1 – valor médio, em W, da potência gerada a cada hora, para o Sistema Sm;
- P_S_2 – valor médio, em W, da potência gerada a cada hora, para o Sistema Sp;
- EC_S_1 – valor integrado na hora, em Wh, em função da potência, para o Sistema Sm;
- EC_S_2 – valor integrado na hora, em Wh, em função da potência, para o Sistema Sp.

Quando a primeira posição de cada linha do relatório é identificada pelo código 333, os dados nela dispostos indicam a consolidação, ao final de cada dia, dos valores coletados.

- ANO – ano;
- DJ – dia juliano;
- HMIN – horas e minutos a cada 24 horas;
- Tmax – temperatura máxima do dia, em ºC;
- HMIN_TMax – horas e minutos em que ocorreu a temperatura máxima;
- URmax – umidade relativa máxima do dia, em %;
- HMIN_URMax – horas e minutos em que ocorreu a umidade relativa máxima;
- Tmin – temperatura mínima do dia, em ºC;
- HMIN_TMin – horas e minutos em que ocorreu a temperatura mínima;

- URmin – umidade relativa mínima do dia, em %;
- HMIN_URMin – horas e minutos em que ocorreu a umidade relativa mínima;
- Vmax – velocidade máxima do vento, diário, em m/s;
- HMIN_VMax – horas e minutos em que ocorreu a velocidade máxima do vento;
- Vmed – velocidade média do vento diário, em m/s;
- Dres – direção resultante do dia, em graus;
- Pp – precipitação pluviométrica diária, em mm;
- RgH – radiação solar global, horizontal, integrada durante o dia, em MJ/m^2;
- RgI_2 – radiação solar global, na inclinação do plano dos painéis solares dos Sistemas Sm e Sp, integrada durante o dia, em MJ/m^2;
- Vbat – tensão média diária, em V, da bateria externa que alimenta o datalogger.

4.7 Cálculo de Valores Elétricos e Hidráulicos

O datalogger foi programado para calcular potência elétrica gerada e energia elétrica consumida nos 2 sistemas. A partir da tensão média (V_1) e da corrente média (I_1) coletadas nos últimos 5 minutos é calculada a potência média P_1 na saída dos painéis no Sistema Sm e P_2, na saída dos painéis do Sistema Sp, em Watts.

$$P_1 = V_1 \times I_1 \quad (1)$$

$$P_2 = V_2 \times I_2 \quad (2)$$

Ao final de cada hora, o datalogger calcula o valor médio P_S_1 e P_S_2 para as potências instantâneas calculadas durante a última hora, também em Watts.

$$P_S_1 = \frac{\sum_{1}^{3600} P_{i1}}{3600} \qquad \text{onde} \quad P_{i1} = V_{i1} \times I_{i1} \tag{3}$$

$$P_S_2 = \frac{\sum_{1}^{3600} P_{i2}}{3600} \qquad \text{onde} \quad P_{i2} = V_{i2} \times I_{i2} \tag{4}$$

Para o mesmo período de uma hora é feita a integração da energia elétrica efetivamente consumida em cada um dos sistemas (EC_S_1 e EC_S_2). Energia consumida é a energia utilizada pelos sistemas, na forma de corrente e tensão. Esse valor é armazenado em Watt.hora.

$$EC_S_1 = \int_{t=0}^{t=3600} P_1(t) \times dt \tag{5}$$

$$EC_S_2 = \int_{t=0}^{t=3600} P_2(t) \times dt \tag{6}$$

sendo t o tempo de consumo de energia.

Através da conversão fotovoltaica, cada Sistema disponibiliza para consumo uma quantidade de energia elétrica calculada da seguinte forma:

- Transformação da irradiação incidente (RgI) durante todo o dia em irradiância (E), em Watts por metro quadrado, conforme Oliveira (2002):

$$E = RgI \times 11{,}6 \tag{7}$$

- Transformação da irradiância em potência disponível (PDi) multiplicando pela área do painel (A) onde há incidência solar, em Watts:

$$PDi = E \times A \tag{8}$$

- Determinação da energia disponível (ED), multiplicando a potência disponível (PDi) pelo tempo de insolação útil para geração dessa energia (Tg), em Wattshora. Este tempo (Tg) considera desde a primeira até a última geração de corrente e tensão no circuito, no dia. Mesmo que a potência resultante não seja suficiente para produzir trabalho de bombeamento.

$$ED = PDi \times Tg \tag{9}$$

O cálculo da irradiação global diária (RGd) é a integração das irradiações coletadas durante o dia:

$$RGd = \int_{t=0}^{t=86400} Rg(t) \times dt \tag{10}$$

Os registros de acionamento dos sensores de nível coletados em cada um dos sistemas permitem, com a exportação desses dados para o Excel, calcular:

- tempo de esvaziamento da caixa superior, período em que não há bombeamento;
- tempo para completar cada enchimento da caixa superior;
- número de enchimentos que ocorre no dia (n).

O volume de água bombeado por dia (V/dia), em Litros, é o produto da capacidade da caixa superior (74,45 L) por essa quantidade n de ocorrências.

$$V/dia = 74{,}45 \times n \tag{11}$$

O rendimento médio de um arranjo fotovoltaico (η) foi determinado pela relação entre a energia consumida pela carga alimentada por esse arranjo (EC) e a energia disponibilizada por ele (ED).

$$\eta = \frac{EC}{ED} \tag{12}$$

O Índice de Bombeamento Volumétrico (Ibv) foi calculado em função da Irradiância Global diária para os 2 Sistemas de bombeamento:

$$Ibv = \frac{VAZÃO}{IRRADIÂNCIA} \tag{13}$$

O Coeficiente de Pearson (R) determinado quando da definição das equações de regressão é um índice que reflete o grau de relação linear entre 2 conjuntos de dados, um conjunto de valores independentes e um conjunto de valores dependentes. Varia de -1,0 a 1,0. Quanto mais próximo de -1,0 ou de 1,0, mais forte é a correlação entre as variáveis envolvidas. Se positivo, quando uma variável aumenta a outra também aumenta. Se negativo, as variáveis caminham em sentidos opostos. Aproximando de zero, indica que não há relação entre elas.

4.8 Avaliações e Comparações entre os Sistemas

Foram comparados os dados relacionados a seguir, para definir qual o melhor arranjo em função dos parâmetros analisados:

- volume em L bombeado, por dia e por mês;
- energia solar disponível incidente nos painéis, por dia e por mês;
- energia elétrica consumida no bombeamento, por dia e por mês;
- relação entre volume bombeado e irradiância;
- relação entre energia disponível e volume bombeado;
- relação entre energia consumida e volume bombeado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados para cada mês em que ocorreram os testes e depois comparando todos os 4 pares de arranjos fotovoltaicos propostos. Para tanto, serão discutidos os itens: Radiação Solar e Índice Pluviométrico, Energia Consumida e Disponível em função da Vazão, isto é, Volume de Água Bombeado por dia e mensal ajustando curvas de regressão para aproximar um modelo matemático das variáveis envolvidas.

Por necessidades operacionais e de manutenção, em maio foram desconsideradas as coletas de dados dos 3 primeiros dias do mês e em julho, foram descartadas as coletas do primeiro dia.

5.1 Radiação Solar e Índice Pluviométrico

As Figuras de 55 a 58 mostram valores diários dos índices pluviométricos e os valores médios calculados da irradiação solar global, respectivamente para os meses de abril, maio, junho e julho de 2009.

A comparação dos valores médios mensais da irradiação global incidente e do índice de precipitação pluviométrica históricos com os valores medidos no mês está na Tabela 15.

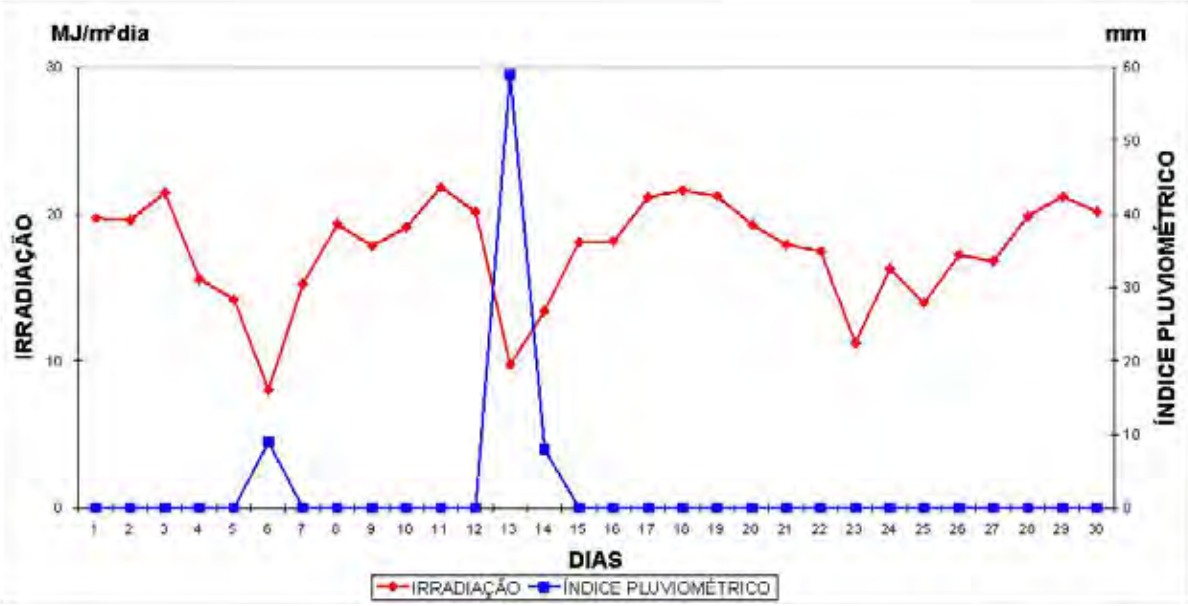


Figura 55 – Irradiação e índice pluviométrico diários - abril/2009.

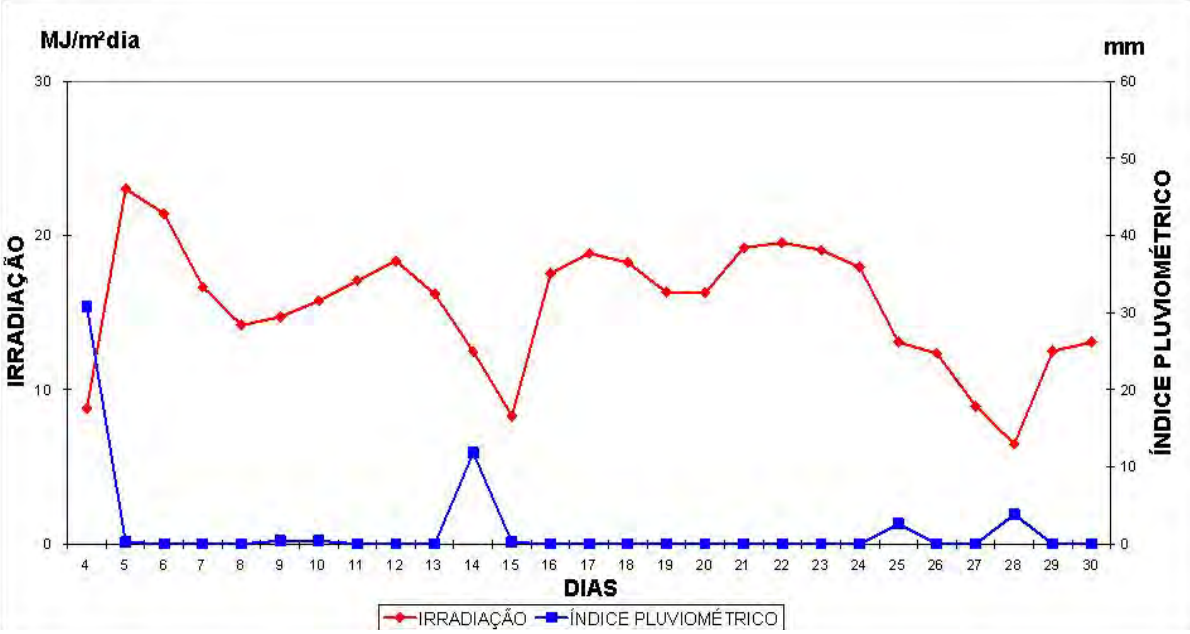


Figura 56 – Irradiação e índice pluviométrico diários - maio/2009.

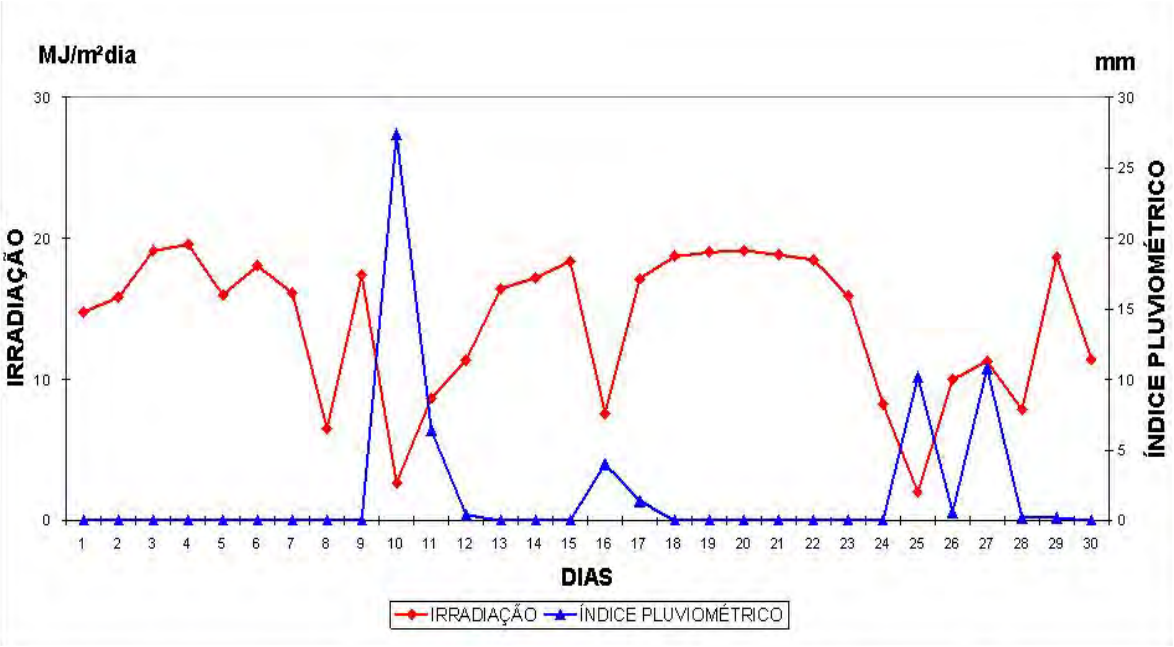


Figura 57 – Irradiação e índice pluviométrico diários - junho/2009.

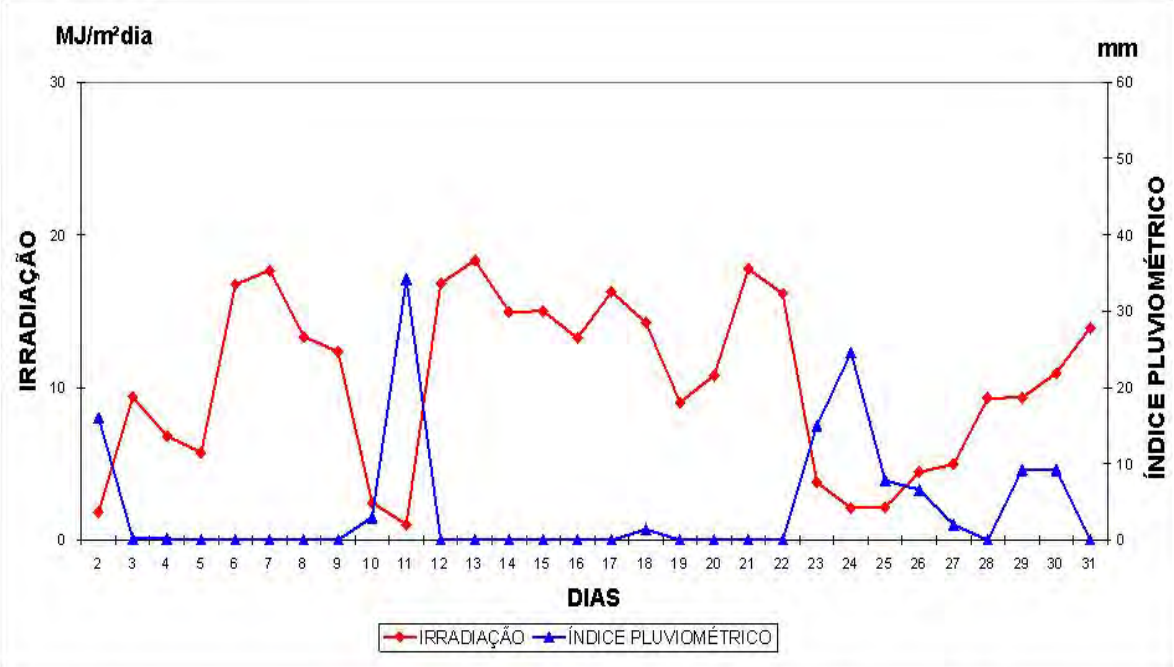


Figura 58 – Irradiação e índice pluviométrico diários - julho/2009.

Pode-se notar um aumento geral da irradiação solar em relação aos valores históricos, em torno de 35% em abril (de 12,9 para 17,6) e junho (de 10,3 para 14,1) e 65% em maio (de 10,6 para 15,3).

Comparativamente houve uma tendência de maior bombeamento em abril e menor em julho, mostrando com isso, que os dois sistemas de bombeamento solar fotovoltaico, instalados nessa região do experimento foram beneficiados com esse aumento de irradiação solar.

Com relação ao índice pluviométrico chama atenção o mês de julho onde esse índice triplicou, passando de 42,5 para 129,4 mm, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Valores médios mensais de Irradiação global e índice pluviométrico

Mês/2009	Irradiação Solar Global Média (MJ/m²d)		Índice de Precipitação Pluviométrica (mm)	
	Histórico	Medido	Histórico	Medido
Abril	12,9	17,6	69,8	76,0
Maio	10,6	15,3	82,7	50,2
Junho	10,3	14,1	56,7	61,6
Julho	10,7	10,4	42,5	129,4

5.1.1 Irradiância

A irradiância medida no período de um dia pode ser comparada nas Figuras 59 a 66. Foram escolhidos como exemplos os gráficos de incidência diária de irradiância em dois dias para cada mês. Essa escolha contemplou em cada mês um dia típico de pouca irradiação e um dia com alta incidência de irradiação solar.

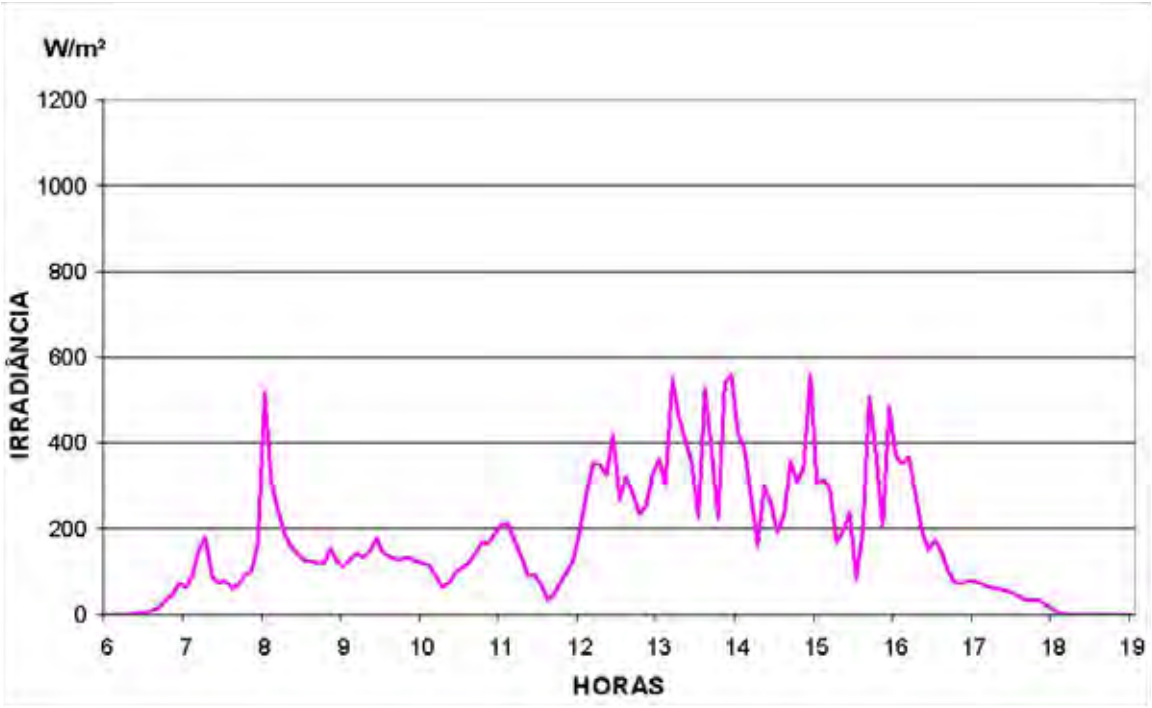


Figura 59 – Irradiância medida no dia 06/abril/2009.

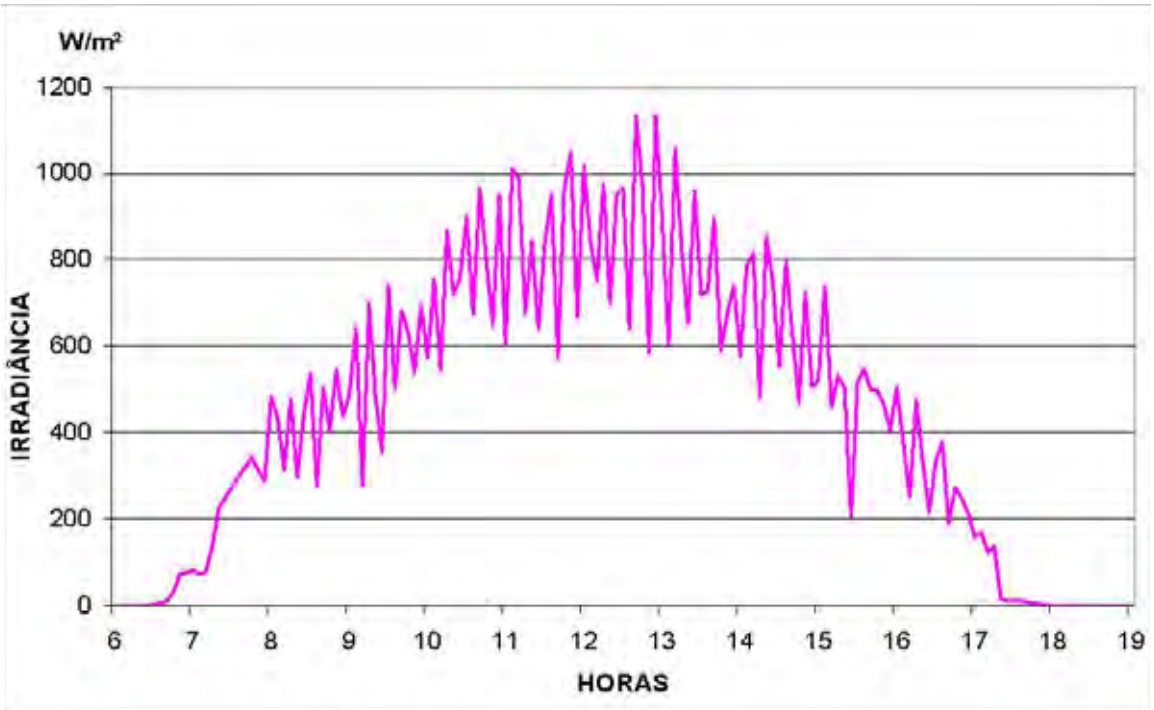


Figura 60 – Irradiância medida no dia 18/abril/2009.

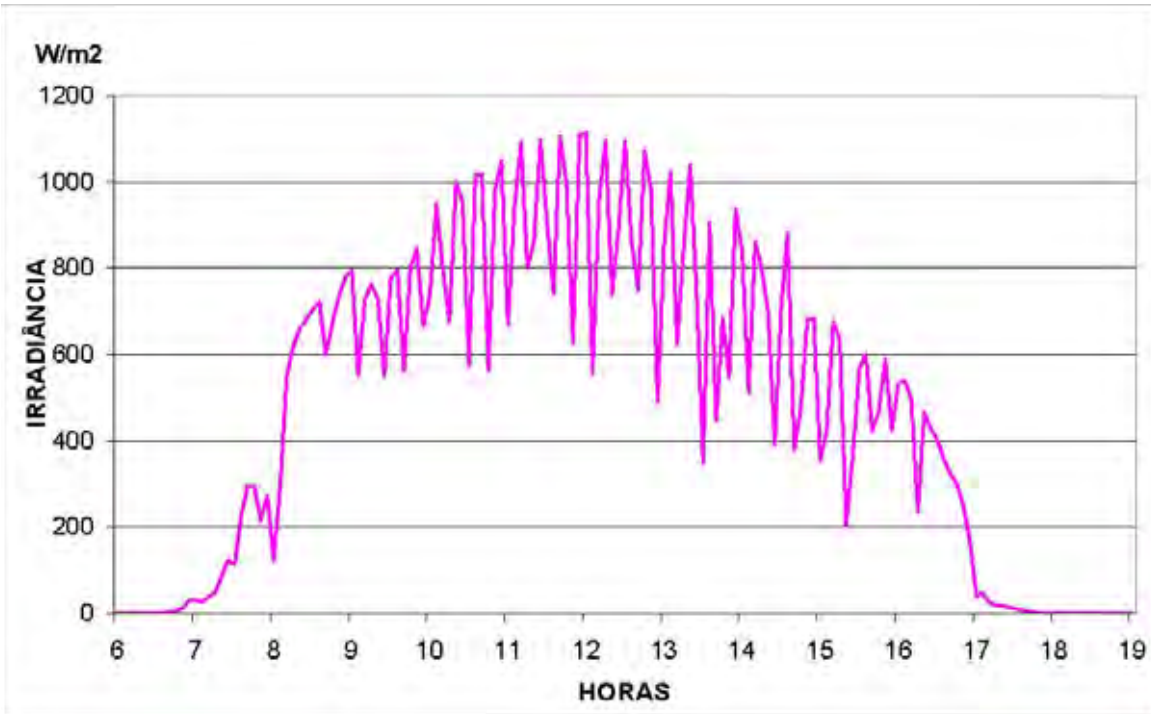


Figura 61 – Irradiância medida no dia 05/maio/2009.

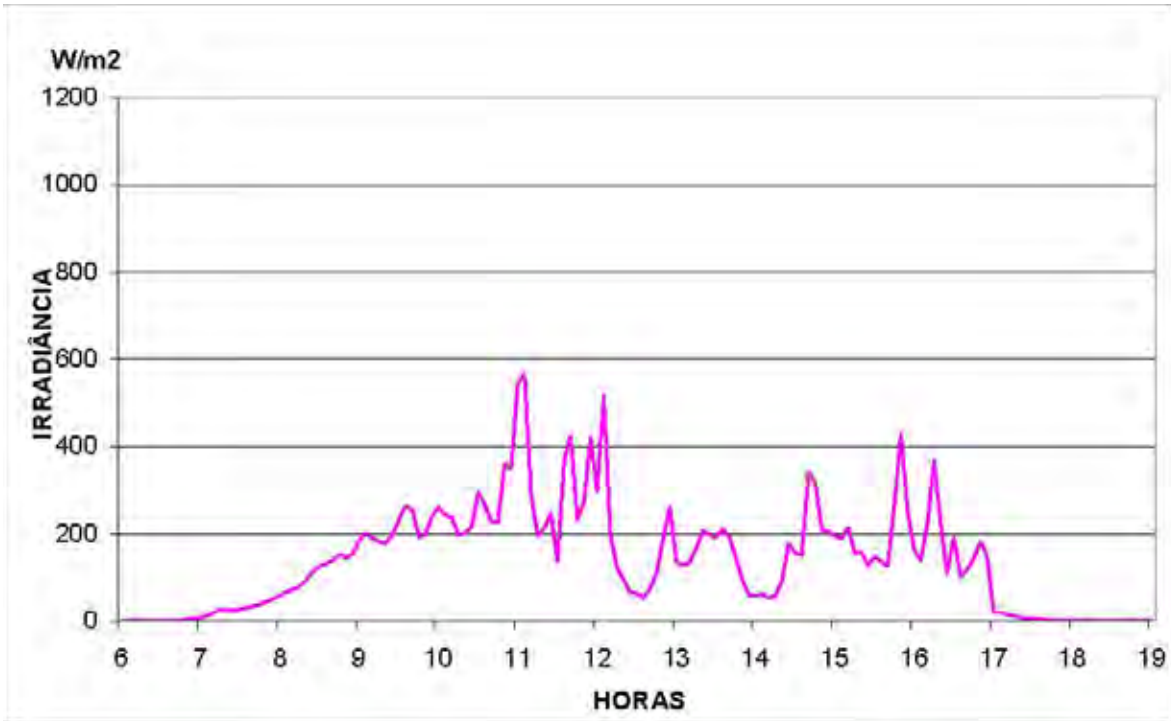


Figura 62 – Irradiância medida no dia 28/maio/2009.

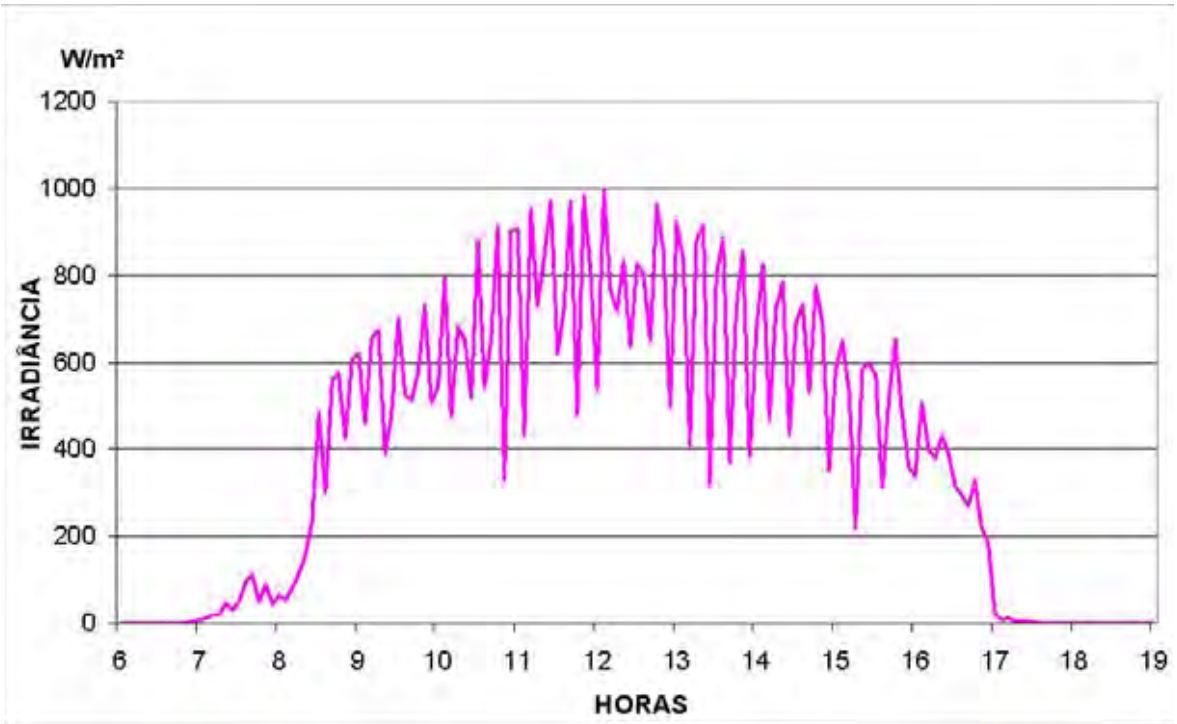


Figura 63 – Irradiância medida no dia 03/junho/2009.

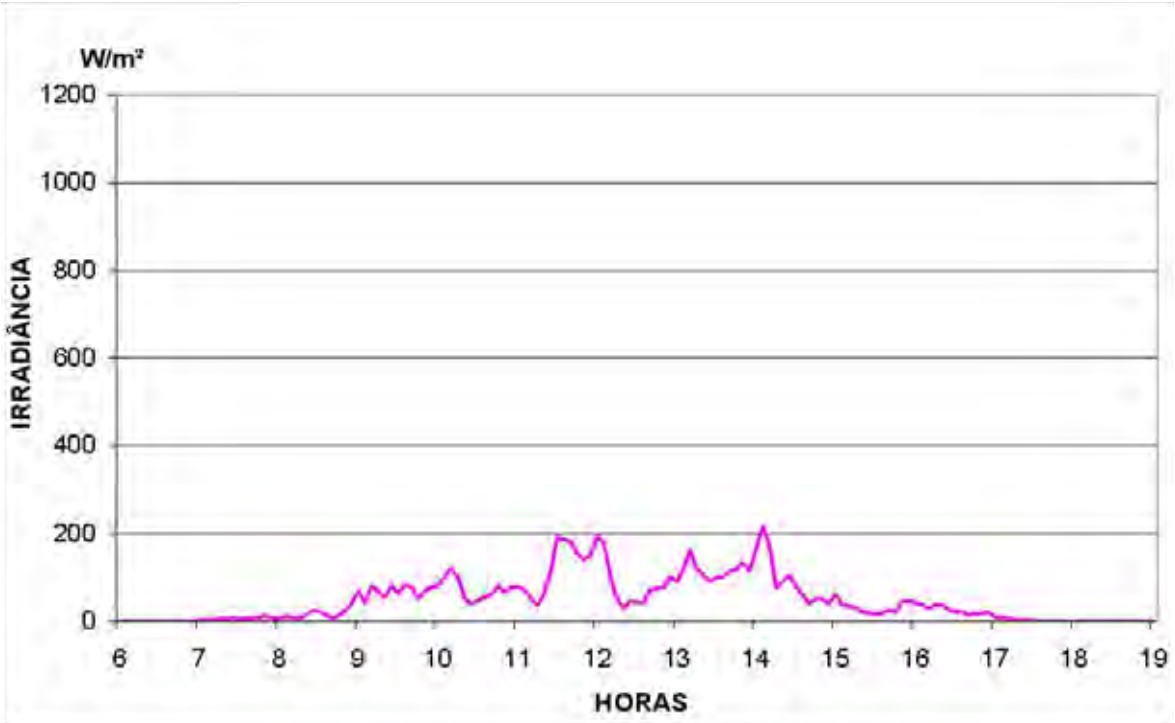


Figura 64 – Irradiância medida no dia 25/junho/2009.

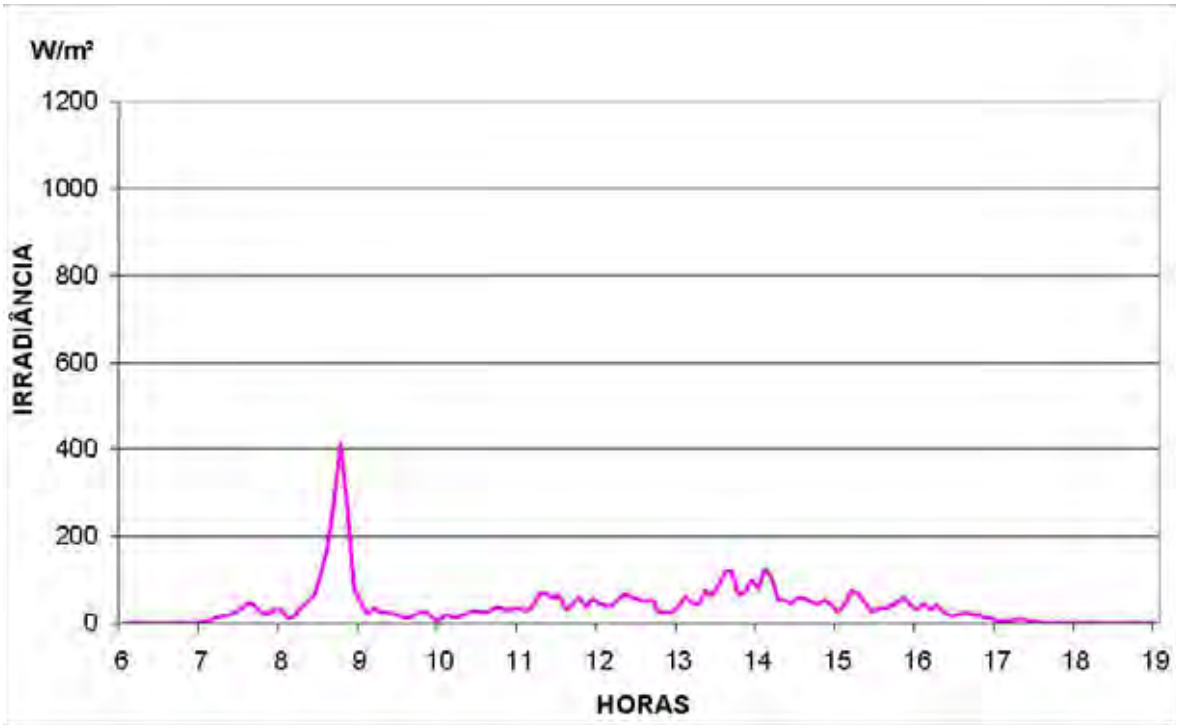


Figura 65 – Irradiância medida no dia 02/julho/2009.

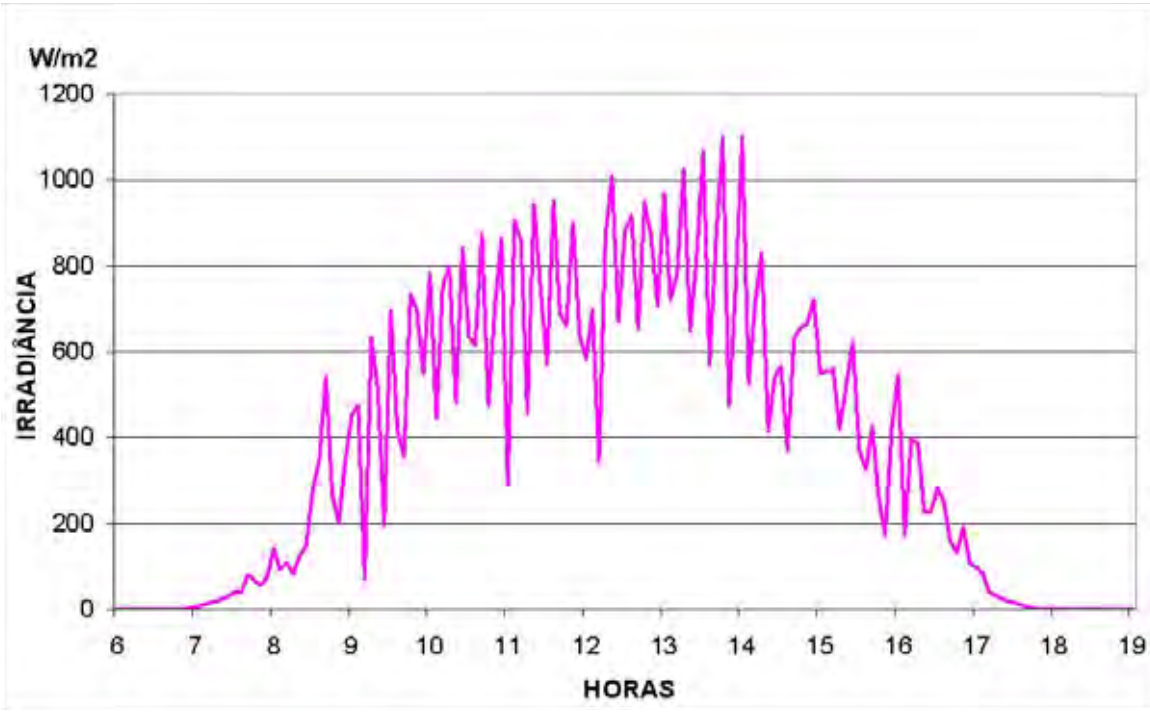


Figura 66 – Irradiância medida no dia 13/julho/2009.

Tabela 16 – Valores médios diários e mensais da Irradiação [Rg] e da Irradiância [E]

Dia	Abril		Maio		Junho		Julho	
	[Rg] (MJ/m²dia)	[E] (W/m²)	[Rg] (MJ/m²dia)	[E] (W/m²)	[Rg] (MJ/m²dia)	[E] (W/m²)	[Rg] (MJ/m²dia)	[E] (W/m²)
1	19,7	228,9	-	-	14,8	171,6	-	-
2	19,6	227,5	-	-	15,8	183,6	1,84	21,3
3	21,4	248,4	-	-	19,1	221,8	9,39	108,9
4	15,6	181,1	8,80	102,1	19,6	227,2	6,83	79,2
5	14,2	164,7	23,02	267,0	16,0	185,5	5,73	66,5
6	8,0	93,3	21,41	248,4	18,1	209,5	16,74	194,2
7	15,3	177,0	16,67	193,4	16,2	187,3	17,67	205,0
8	19,3	223,8	14,17	164,4	6,5	75,7	13,33	154,6
9	17,8	206,9	14,72	170,8	17,4	201,6	12,33	143,0
10	19,1	221,6	15,76	182,8	2,7	31,0	2,46	28,5
11	21,8	253,1	17,06	197,9	8,7	100,8	1,03	11,9
12	20,1	233,4	18,34	212,7	11,4	131,9	16,80	194,9
13	9,8	113,1	16,19	187,8	16,5	190,8	18,33	212,6
14	13,4	155,3	12,47	144,7	17,2	199,6	14,96	173,5
15	18,1	210,0	8,31	96,4	18,4	213,0	15,00	174,0
16	18,2	210,7	17,53	203,3	7,6	88,4	13,24	153,6
17	21,1	245,1	18,84	218,5	17,2	199,1	16,26	188,6
18	21,6	250,6	18,24	211,6	18,7	217,2	14,22	165,0
19	21,2	245,8	16,30	189,1	19,0	220,5	9,03	104,7
20	19,3	223,8	16,27	188,7	19,2	222,3	10,79	125,2
21	17,9	207,8	19,19	222,6	18,8	218,4	17,76	206,0
22	17,4	202,2	19,53	226,5	18,5	214,6	16,14	187,2
23	11,2	130,3	19,06	221,1	15,9	184,6	3,77	43,7
24	16,3	188,8	17,94	208,1	8,3	95,7	2,10	24,4
25	14,0	162,1	13,09	151,8	2,0	23,2	2,15	24,9
26	17,2	199,6	12,34	143,1	10,0	116,0	4,46	51,7
27	16,8	194,6	8,95	103,8	11,3	131,0	4,97	57,7
28	19,9	230,5	6,47	75,1	7,8	90,9	9,31	108,0
29	21,2	245,5	12,51	145,1	18,7	216,9	9,33	108,2
30	20,2	234,0	13,07	151,6	11,4	132,5	10,95	127,0
31	-	-	11,94	138,5	-	-	13,93	161,6
Média	17.6	203.6	15,3	177,4	14,1	163,4	10,4	120,2

Por exemplo, durante o mês de abril o dia que apresentou menores valores de irradiância foi o dia 06, e o que apresentou maiores valores foi o dia 18, atingindo irradiância em torno de 1.000 W/m², valor este considerado excelente para geração de energia fotovoltaica.

Em maio, o dia 5 teve alta irradiância durante boa parte do tempo, enquanto que no dia 28 ocorria o contrário.

No mês de junho, os dias mais típicos foram 3, com maior incidência e 25, com menor.

Já o mês de julho, teve baixíssima irradiância durante todo o dia 2 e o melhor desempenho no dia 13.

A Tabela 16 relaciona os valores médios diários de irradiação solar (Rg) na mesma inclinação dos painéis e os valores médios diários de irradiância incidente em cada m² (E).

Os valores médios mensais dessas grandezas confirmam que os maiores valores ocorreram em abril, mês que foi mais favorável para geração de energia fotovoltaica e, consequentemente, para volume de água bombeado.

Observa-se também um decréscimo contínuo e acentuado dessas médias até julho, fato este que pode ter sido causado pela mudança de estação. Porém, pode-se esperar que nos períodos correspondentes às estações da primavera e verão, ocorra uma significativa elevação nesses valores.

5.2 Energia Disponível e Consumida

Considerando a energia solar disponível (ED) fornecida pela irradiância sobre a área útil dos painéis e a energia efetiva consumida pela bomba (EC), pode-se obter de maneira simplificada, sem grande exatidão, a eficiência energética dos arranjos fotovoltaicos. Estes valores serão discutidos em função do volume diário de água bombeado com os dados comparativos relatados nas Tabelas 17 e 18 e Figuras 67 a 70.

Tabela 17 – Valores médios diários e totais mensais de Energia Disponível (ED)

	Energia Disponível (Wh) Abril		Energia Disponível (Wh) Maio		Energia Disponível (Wh) Junho		Energia Disponível (Wh) Julho	
	04-Sm2	**04-Sp2**	**05-Sm2**	**05-Sp1**	**06-Sm1**	**06-Sp2**	**07-Sm2**	**07-Sp2**
1	2.817	2.925	-	-	937	1.961	-	-
2	2.799	2.907	-	-	1.019	2.165	231	240
3	3.056	3.174	-	-	1.240	2.615	1.218	1.265
4	2.228	2.314	1.177	602	1.260	2.659	886	920
5	1.999	2.075	3.101	1.586	1.037	2.187	749	778
6	1.132	1.175	2.863	1.464	1.162	2.451	2.205	2.289
7	2.163	2.246	2.229	1.140	1.047	2.209	2.327	2.417
8	2.734	2.840	1.895	969	407	852	1.769	1.837
9	2.511	2.607	1.953	999	1.118	2.359	1.599	1.661
10	2.707	2.812	2.107	1.078	168	354	317	329
11	3.093	3.212	2.298	1.176	550	1.161	125	130
12	2.832	2.941	2.452	1.254	709	1.508	2.213	2.298
13	1.206	1.252	2.165	1.107	1.058	2.233	2.414	2.507
14	1.817	1.887	1.642	840	1.081	2.300	1.985	2.062
15	2.529	2.627	1.069	547	1.181	2.473	1.945	2.020
16	2.538	2.635	2.273	1.162	463	963	1.744	1.811
17	2.953	3.066	2.500	1.278	1.095	2.329	2.141	2.224
18	2.997	3.112	2.421	1.238	1.195	2.482	1.858	1.930
19	2.940	3.053	2.163	1.106	1.223	2.540	1.162	1.207
20	2.676	2.779	2.159	1.104	1.223	2.620	1.410	1.464
21	2.485	2.580	2.547	1.302	1.202	2.536	2.339	2.429
22	2.418	2.511	2.592	1.325	1.181	2.511	2.142	2.224
23	1.524	1.583	2.510	1.283	1.016	2.159	493	512
24	2.259	2.345	2.363	1.208	514	1.102	258	267
25	1.924	1.998	1.750	895	120	257	268	278
26	2.370	2.462	1.613	825	613	1.326	569	591
27	2.294	2.382	1.161	593	687	1.426	655	680
28	2.737	2.842	846	432	485	1.007	1.207	1.254
29	2.893	3.004	1.660	849	1.203	2.499	1.229	1.276
30	2.758	2.864	1.682	860	712	1.526	1.442	1.498
31	-	-	1.536	785	-	-	1.877	1.949
Total	73.389	76.212	56.727	29.007	26.907	56.769	40.776	42.344

Tabela 18 – Valores médios diários e totais mensais de Energia Consumida (EC)

	Energia Consumida (Wh) Abril		**Energia Consumida (Wh) Maio**		**Energia Consumida (Wh) Junho**		**Energia Consumida (Wh) Julho**	
	04-Sm2	**04-Sp2**	**05-Sm2**	**05-Sp1**	**06-Sm1**	**06-Sp2**	**07-Sm2**	**07-Sp2**
1	296	274	-	-	161	209	-	-
2	295	271	-	-	177	234	3	6
3	305	278	-	-	226	290	171	136
4	237	210	100	67	212	273	84	72
5	224	188	189	214	177	235	68	51
6	133	97	188	195	182	238	247	221
7	212	182	223	157	182	253	249	223
8	281	253	252	142	6	52	181	161
9	242	216	211	149	167	224	174	149
10	273	251	220	159	1	5	5	5
11	302	272	238	165	59	96	1	1
12	287	259	258	190	91	144	241	219
13	152	131	229	170	171	232	259	247
14	191	166	198	121	188	243	238	213
15	273	254	145	52	199	245	256	237
16	287	255	269	191	51	88	213	188
17	312	287	291	215	204	246	237	215
18	304	276	270	202	197	247	178	166
19	283	260	246	194	186	245	107	98
20	269	247	264	189	193	244	181	158
21	289	262	269	204	187	233	254	244
22	250	226	265	207	187	230	232	218
23	172	147	269	203	156	212	32	27
24	251	219	260	198	38	96	3	3
25	204	174	177	138	1	4	4	4
26	243	213	204	132	67	136	30	24
27	252	217	144	56	101	79	23	19
28	303	264	76	21	23	26	127	110
29	303	240	229	124	185	214	126	104
30	281	224	219	131	95	142	126	104
31	-	-	198	108	-	-	229	212
Total	7.708	6.815	6.098	4.293	4.073	5.417	4.278	3.835

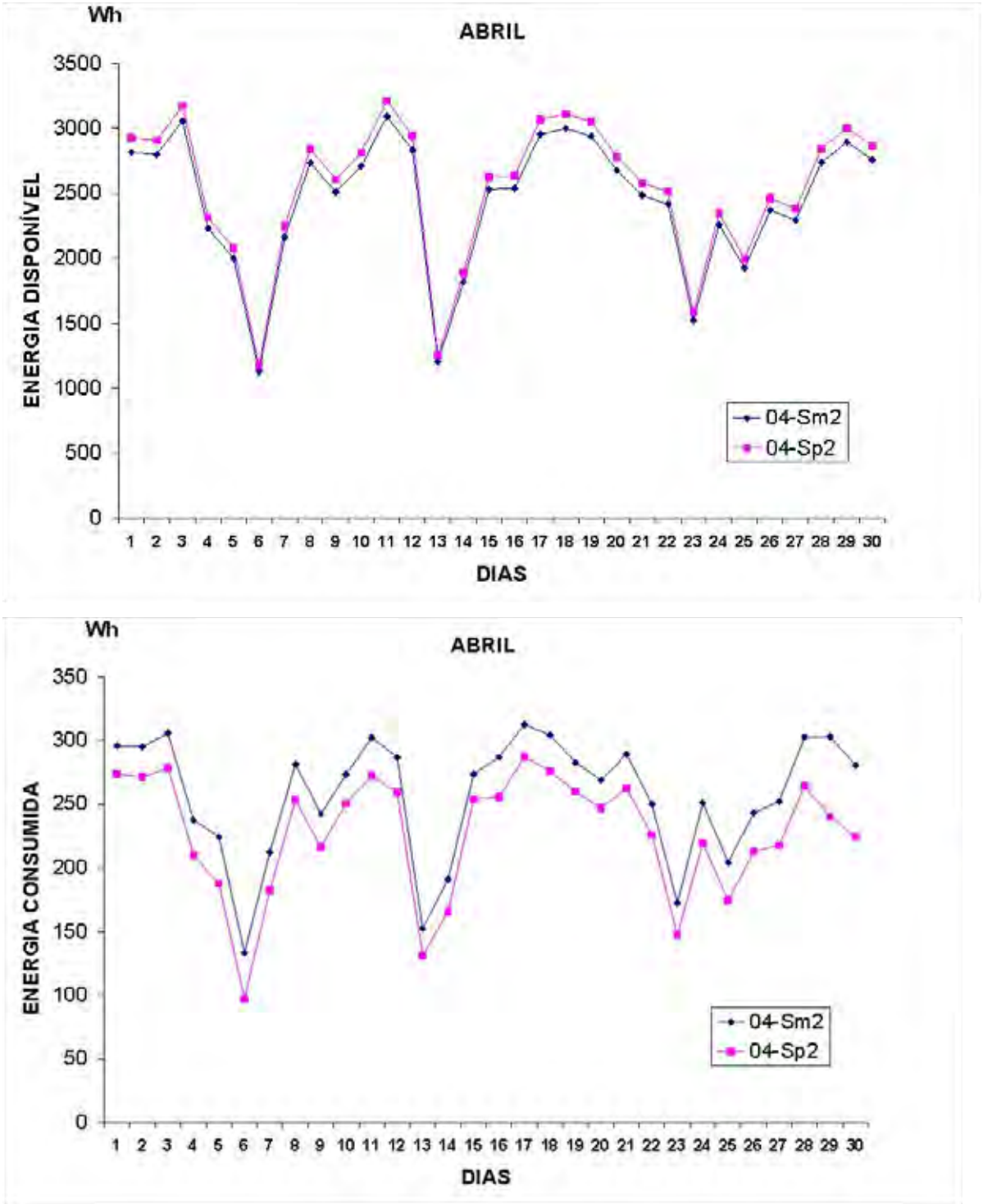


Figura 67 – Energia disponível e energia consumida diárias – abril/2009.

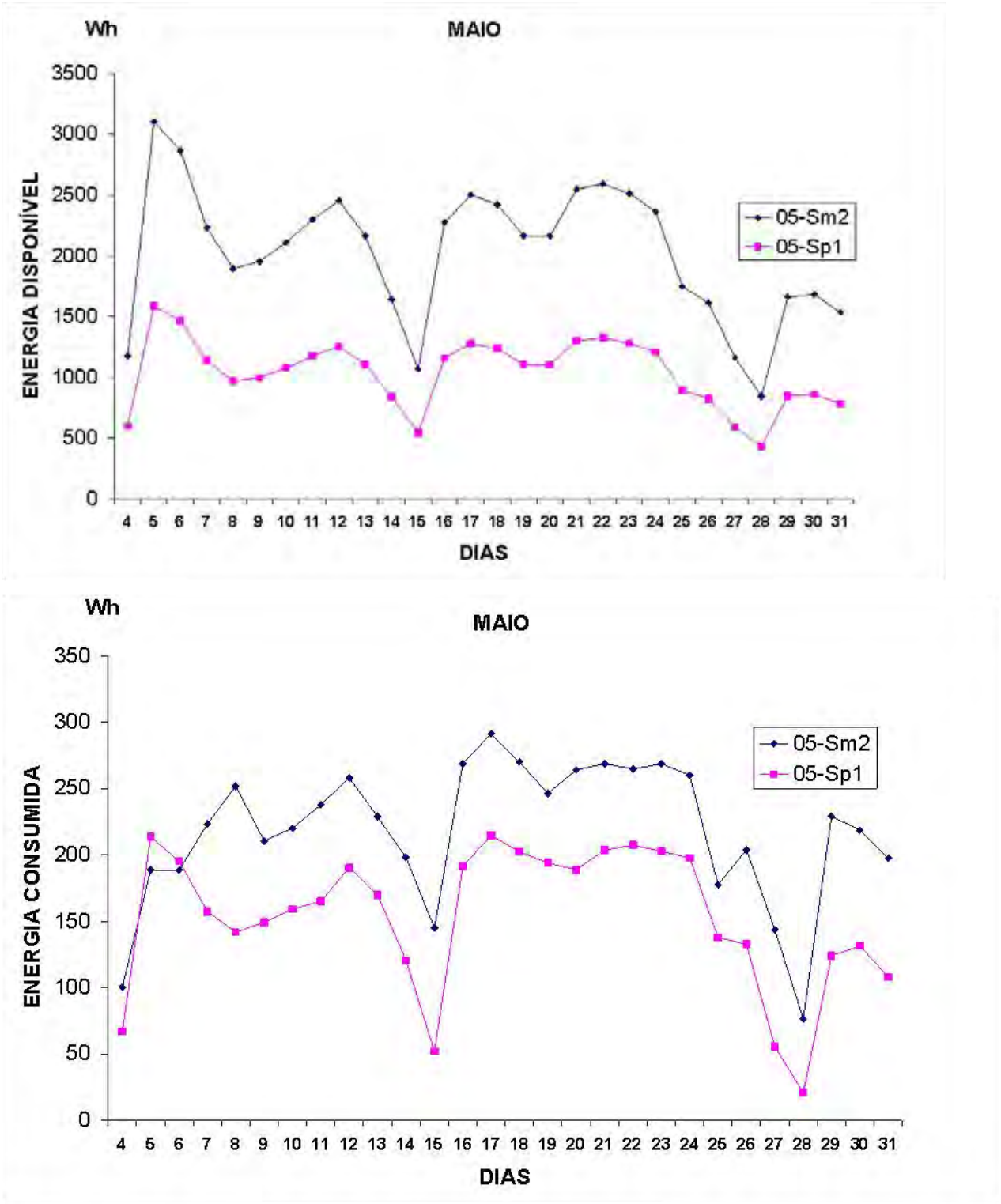


Figura 68 – Energia disponível e energia consumida diárias – maio/2009.

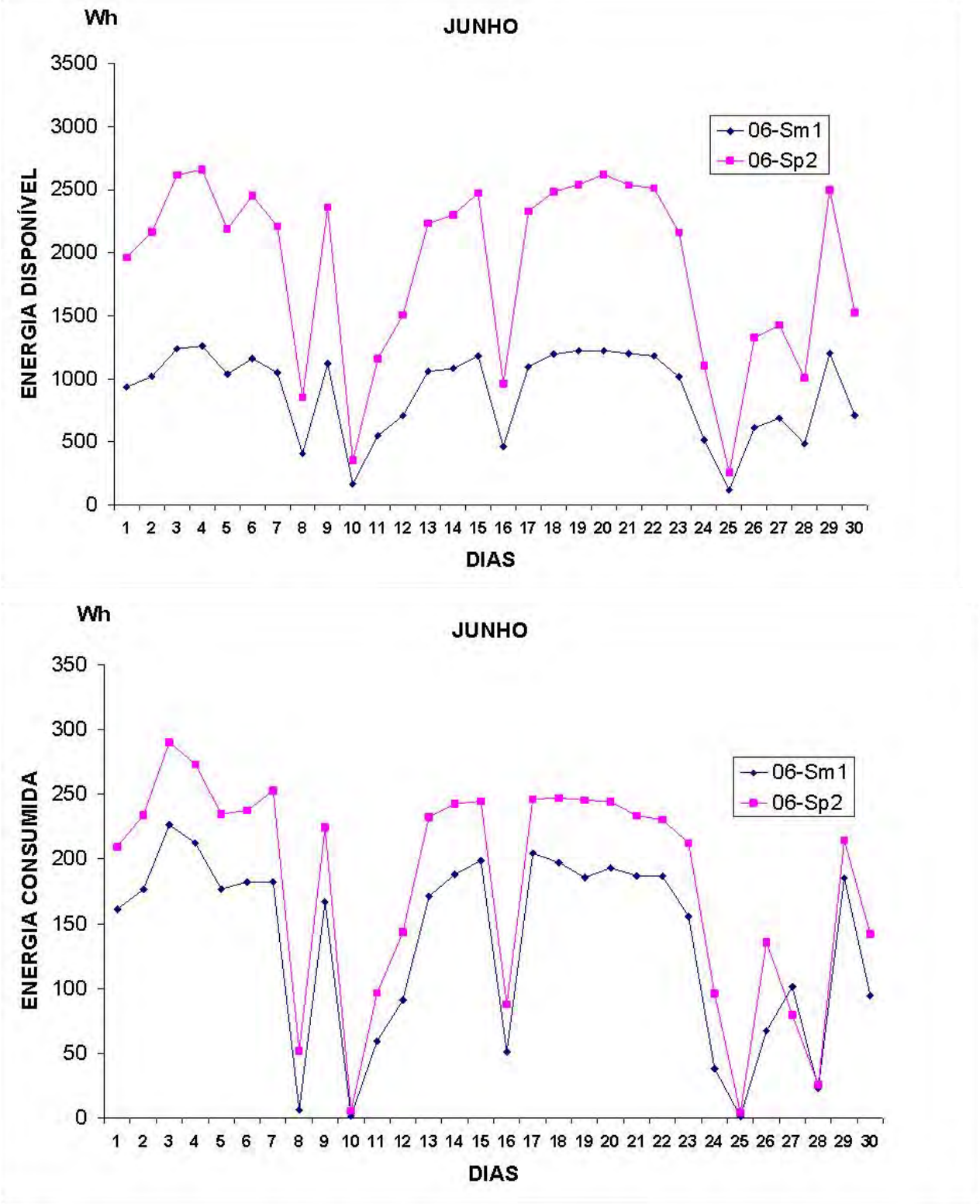


Figura 69 – Energia disponível e energia consumida diárias – junho/2009.

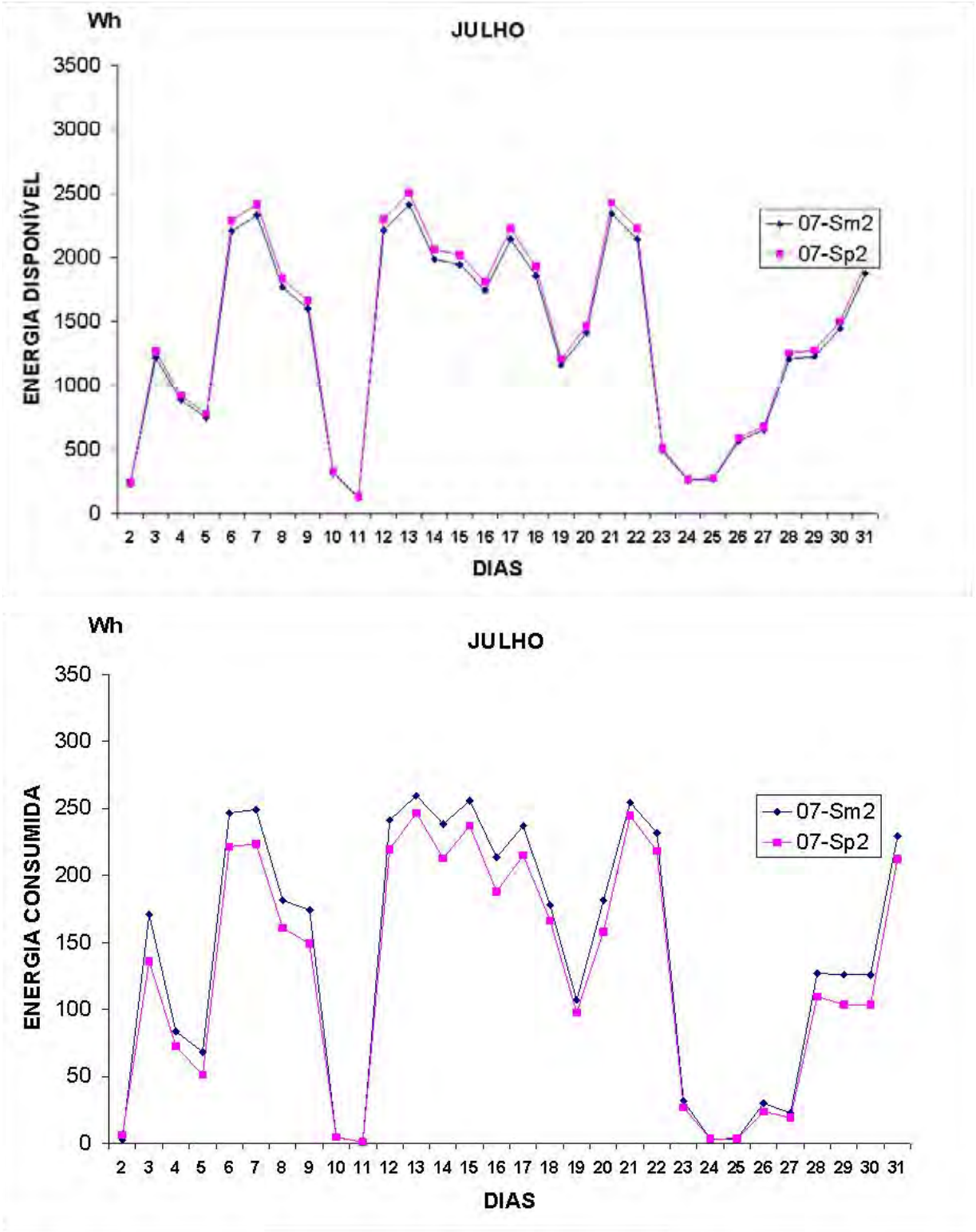


Figura 70 – Energia disponível e energia consumida diárias – julho/2009.

5.3 Volume de Água Bombeado (Vazão)

Como foram utilizadas caixas-d'água de pequeno volume, o processo de enchimento ocorria várias vezes ao dia, seguido de um processo de esvaziamento, sem aproveitamento da energia solar, que neste momento ficava como "energia ociosa". Este tempo de esvaziamento representou cerca de 20% do tempo gasto para enchimento.

5.3.1 Vazão Média Diária

Os valores obtidos permitem comparar a eficiência energética entre arranjos testados, volumes médios diários bombeados e índice de bombeamento volumétrico (Ibv) em função da irradiância [W/m^2] e do volume da água bombeado [L], na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação entre arranjos.
- abril/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	04-Sm2	**04-Sp2**
Rendimento médio (η)	10,6%	9,0%
Volume médio diário (L)	2457	1985
Ibv (L/W/m2)	12,0	9,7

- maio/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	05-Sm2	**05-Sp1**
Rendimento médio (η)	11,0%	14,3%
Volume médio diário (L)	2077	1324
Ibv (L/W/m2)	11,7	7,5

- junho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	06-Sm1	**06-Sp2**
Rendimento médio (η)	13,4%	8,8%
Volume médio diário (L)	1189	1583
Ibv (L/W/m2)	7,3	9,7

- julho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	07-Sm2	**07-Sp2**
Rendimento médio (η)	8,7%	7,5%
Volume médio diário (L)	1308	1137
Ibv (L/W/m2)	10,9	9,5

A partir dos resultados obtidos observa-se que em abril o arranjo de painéis monocristalinos apresenta uma tendência de melhor desempenho, com um rendimento cerca de 15% maior, bombeando 20% a mais de litros por dia, com um índice de bombeamento volumétrico por unidade de irradiância 20% maior, apesar de possuir uma área útil 4% menor e ter potência nominal 7% inferior aos painéis policristalinos.

Conforme Tabela 20, em maio, pode-se observar que o volume total bombeado pelo arranjo com painéis monocristalinos foi 36% superior ao policristalino. Apesar de haver o dobro de painéis, o volume bombeado não teve o mesmo acréscimo. Mesmo bombeando cerca de 36% a mais de água, observa-se que os 2 painéis monocristalinos perdem em rendimento energético para o único policristalino (Tabela 19), podendo-se entender que os mesmos entram em um ponto de saturação, onde a energia gerada não é totalmente transformada em trabalho pela carga.

Durante o mês de junho a Tabela 20 permite observar que o volume bombeado pelo arranjo com 2 painéis policristalinos foi maior, mas não o dobro do encontrado para 1 monocristalino. Observa-se pelos resultados que o arranjo com 1 painel monocristalino apresenta uma tendência de melhor aproveitamento energético, bombeando mais água com menos energia disponível, com um rendimento cerca de 35% maior. Entretanto, para valores de energia maiores, 2 painéis policristalinos tendem a bombear maior volume em litros.

Julho, mês de menor incidência de radiação e com maior índice pluviométrico, deixou registrada a ocorrência de 6 dias sem qualquer bombeamento. O arranjo com painéis monocristalinos bombeou 13% a mais de água que o com policristalinos. Mas foi um bombeamento inferior aos 20% obtidos no mês de abril para os mesmos arranjos. O arranjo de painéis monocristalinos apresentou novamente tendência de melhor desempenho, com rendimento cerca de 14% maior, bombeando 13% a mais de litros por dia, apesar da área útil e potência nominal inferior aos policristalinos. O nível de irradiação menor é um indício de menor volume de bombeamento. E resultou também em um rendimento elétrico cerca de 2 pontos percentuais inferior.

Com o volume diário de água bombeada é possível também verificar graficamente o comportamento dos arranjos testados, conforme as Figuras de 71 a 74.

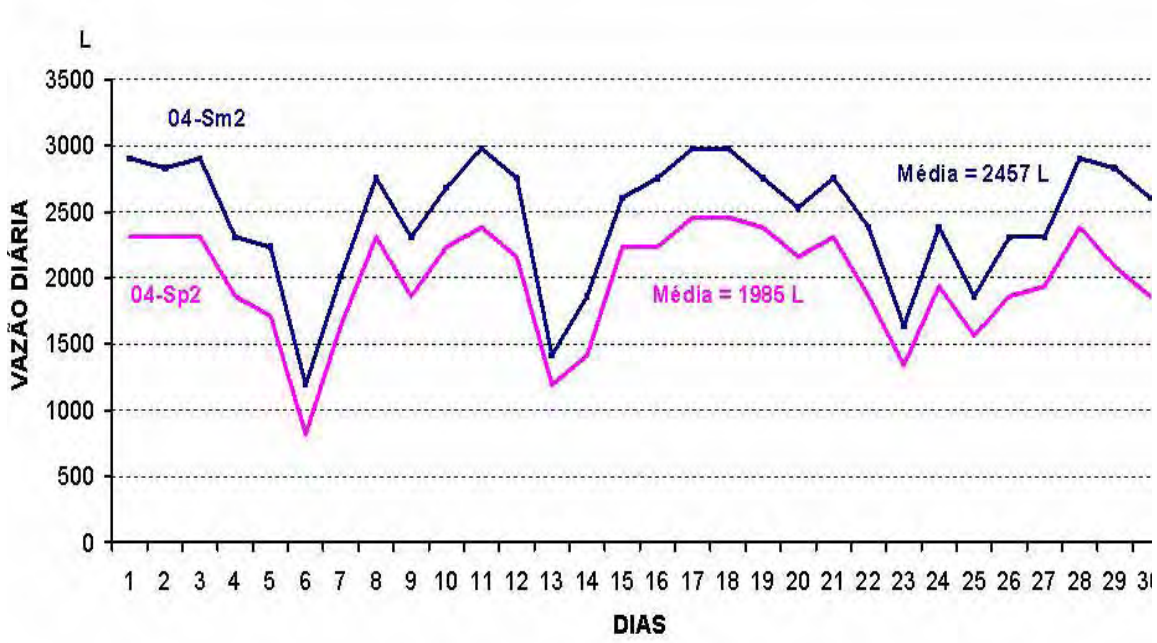


Figura 71 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - abril/2009.

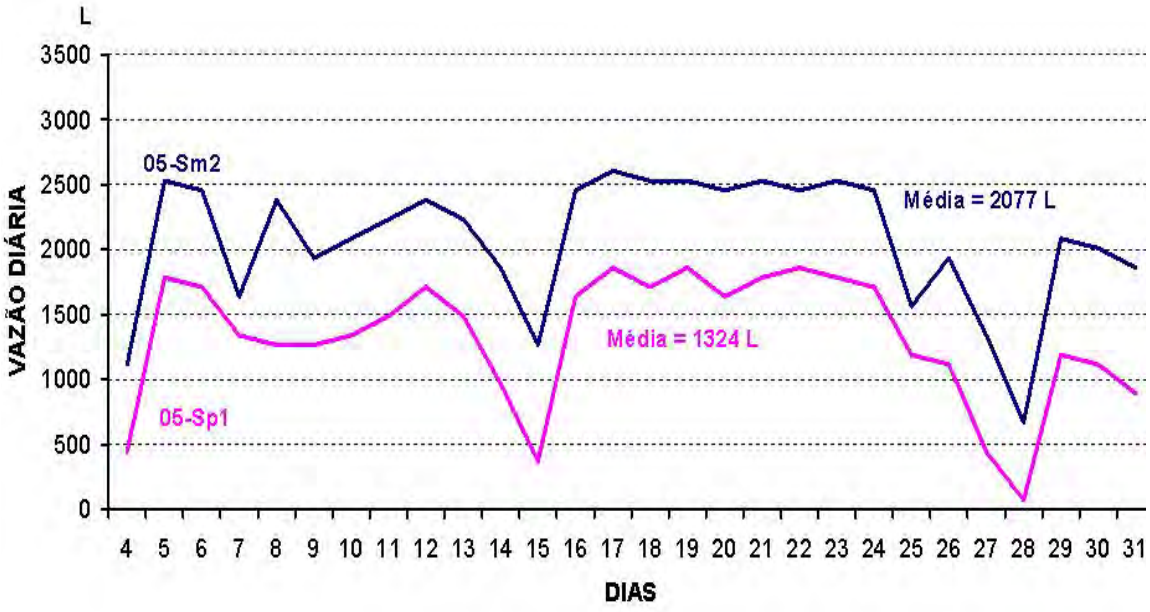


Figura 72 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - maio/2009.

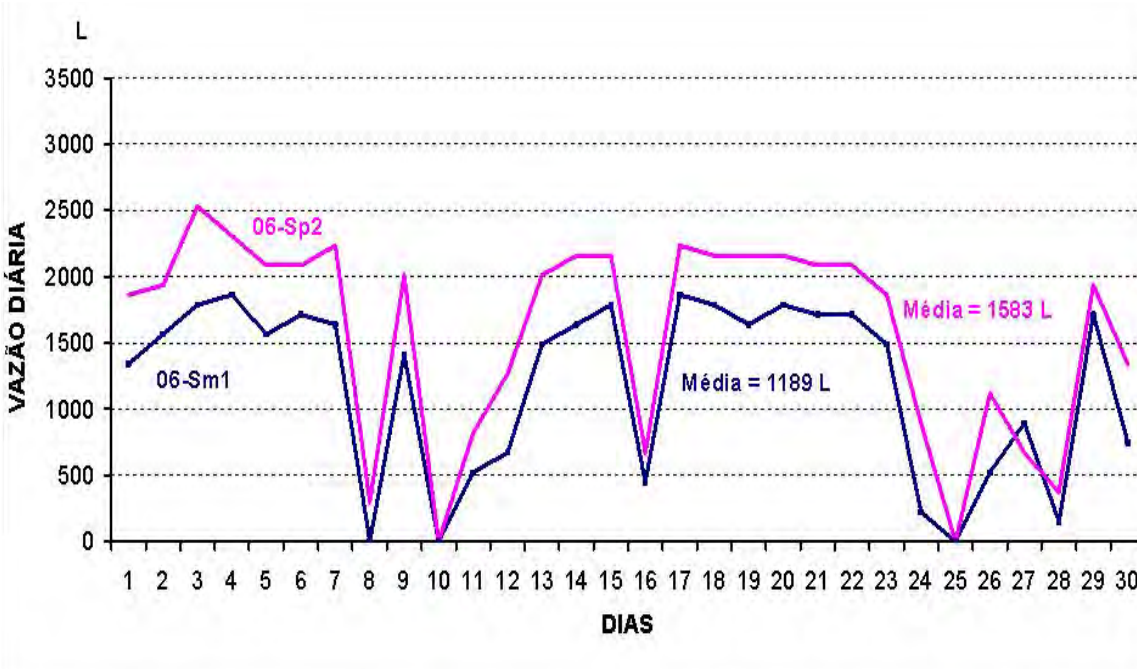


Figura 73 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp - junho/2009.

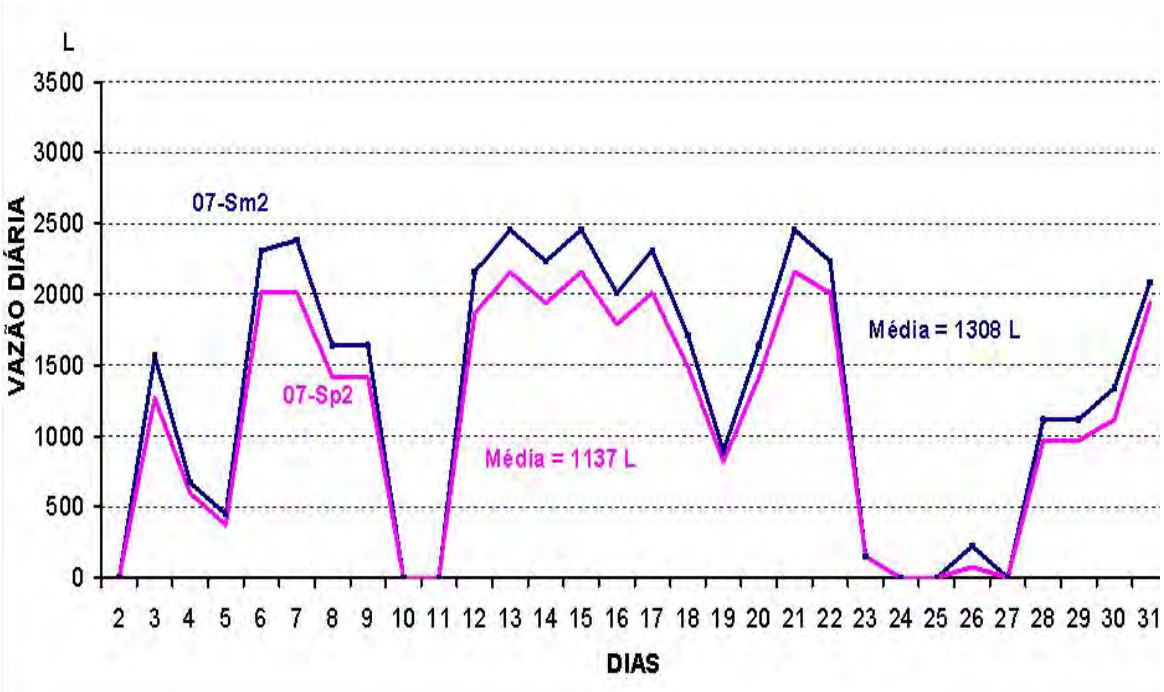


Figura 74 – Vazão diária dos sistemas Sm e Sp – julho/2009.

Tabela 20 – Volume médio diário de água bombeada para os quatro arranjos.

	Volume bombeado (litros) Abril		Volume bombeado (litros) Maio		Volume bombeado (litros) Junho		Volume bombeado (litros) Julho	
	04-Sm2	**04-Sp2**	**05-Sm2**	**05-Sp1**	**06-Sm1**	**06-Sp2**	**07-Sm2**	**07-Sp2**
1	2.904	2.308	-	-	1340	1861	-	-
2	2.829	2.308	-	-	1563	1936	0	0
3	2.904	2.308	-	-	1787	2531	1.563	1.266
4	2.308	1.861	1.117	447	1861	2308	670	596
5	2.234	1.712	2.531	1.787	1563	2085	447	372
6	1.191	819	2.457	1.712	1712	2085	2.308	2.010
7	2.010	1.638	1.638	1.340	1638	2234	2.382	2.010
8	2.755	2.308	2.382	1.266	0	298	1.638	1.415
9	2.308	1.861	1.936	1.266	1415	2010	1.638	1.415
10	2.680	2.234	2.085	1.340	0	0	0	0
11	2.978	2.382	2.234	1.489	521	819	0	0
12	2.755	2.159	2.382	1.712	670	1266	2.159	1.861
13	1.415	1.191	2.234	1.489	1489	2010	2.457	2.159
14	1.861	1.415	1.861	968	1638	2159	2.234	1.936
15	2.606	2.234	1.266	372	1787	2159	2.457	2.159
16	2.755	2.234	2.457	1.638	447	670	2.010	1.787
17	2.978	2.457	2.606	1.861	1861	2234	2.308	2.010
18	2.978	2.457	2.531	1.712	1787	2159	1.712	1.489
19	2.755	2.382	2.531	1.861	1638	2159	893	819
20	2.531	2.159	2.457	1.638	1787	2159	1.638	1.415
21	2.755	2.308	2.531	1.787	1712	2085	2.457	2.159
22	2.382	1.861	2.457	1.861	1712	2085	2.234	2.010
23	1.638	1.340	2.531	1.787	1489	1861	149	149
24	2.382	1.936	2.457	1.712	223	893	0	0
25	1.861	1.563	1.563	1.191	0	0	0	0
26	2.308	1.861	1.936	1.117	521	1117	223	74
27	2.308	1.936	1.340	447	893	670	0	0
28	2.904	2.382	670	74	149	372	1.117	968
29	2.829	2.085	2.085	1.191	1712	1936	1.117	968
30	2.606	1.861	2.010	1.117	745	1340	1.340	1.117
31	-	-	1.861	893	-	-	2.085	1.936
Total	73.706	59.560	58.145	37.076	35.662	47.499	39.235	34.098

5.3.2 Vazão em Função da Irradiância

Aplicando regressão linear aos valores diários de vazão e irradiância média, as curvas de tendência resultantes terão as disposições mostradas nas Figuras 75 a 78.

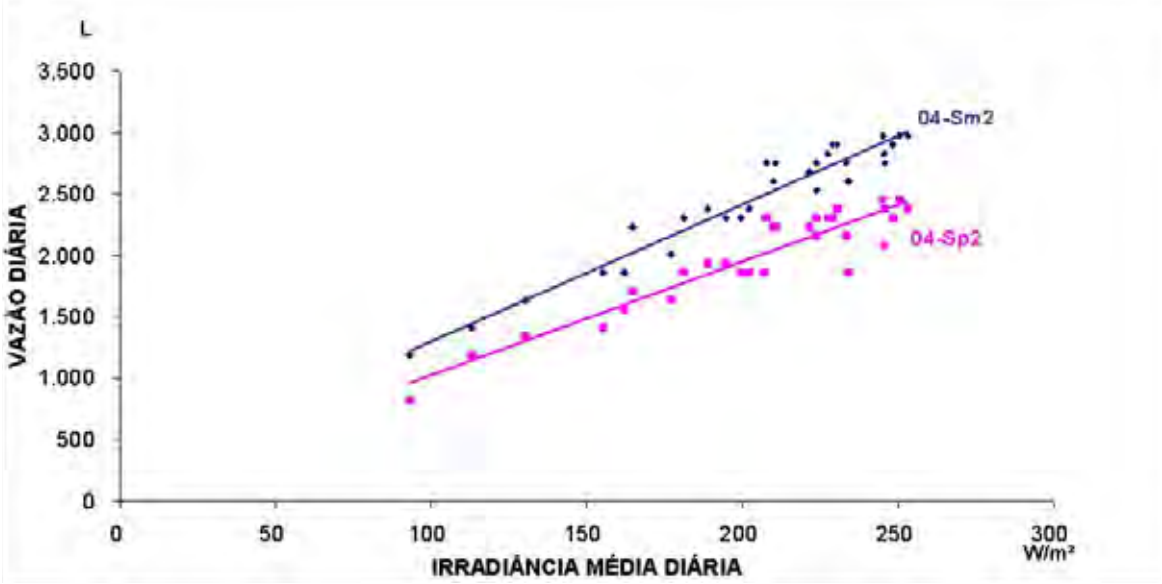


Figura 75 – Vazão x irradiância média por dia - abril/2009.

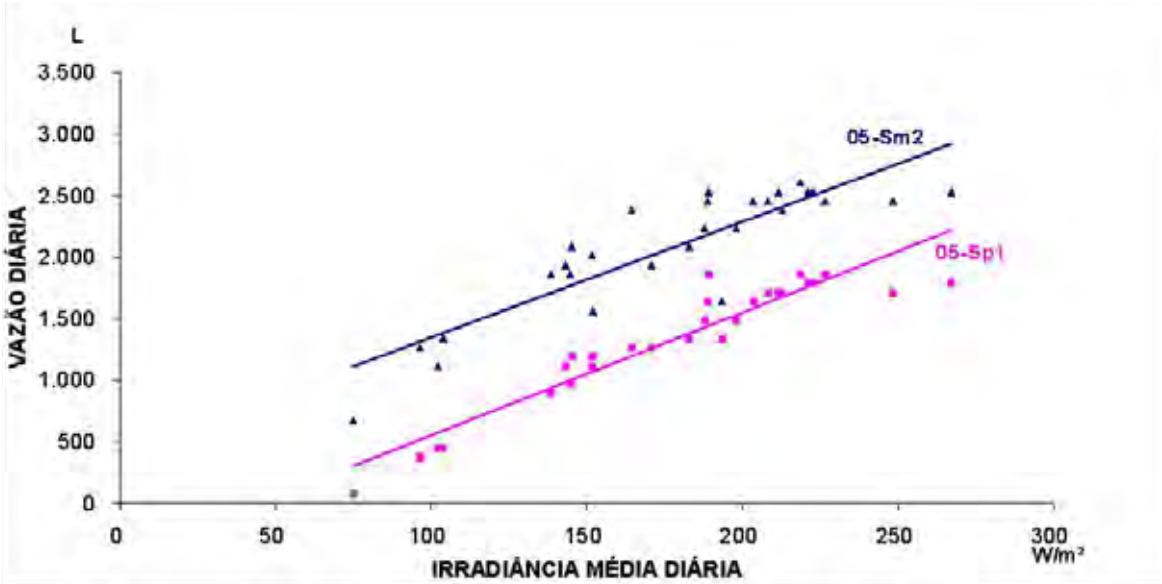


Figura 76 – Vazão x irradiância média por dia - maio/2009.

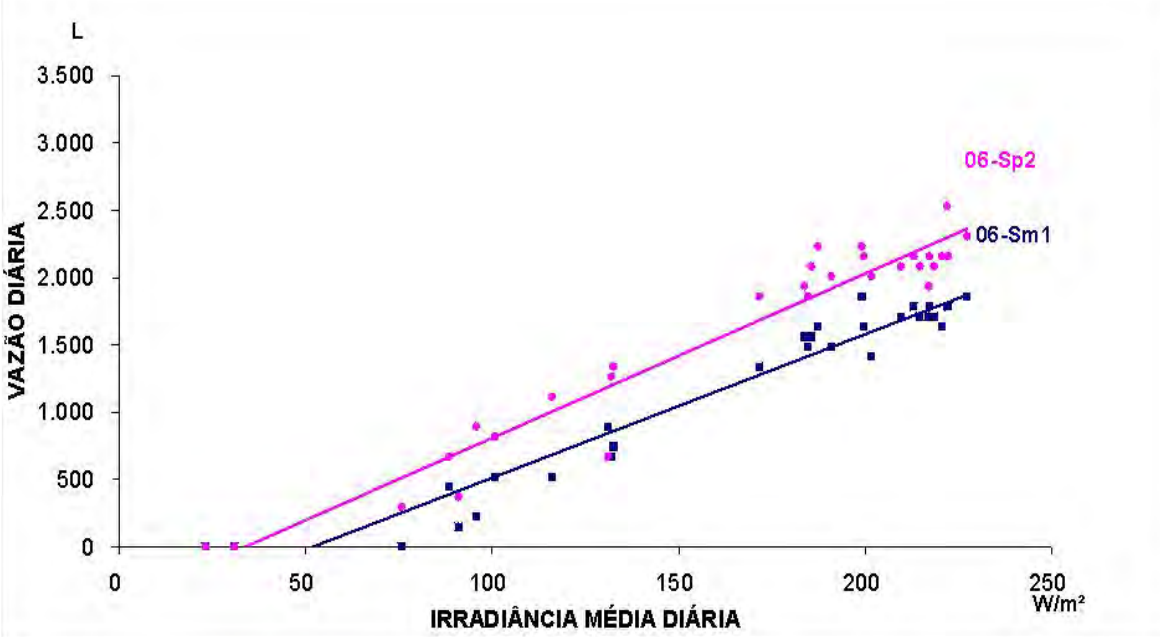


Figura 77 – Vazão x irradiância média por dia - junho/2009.

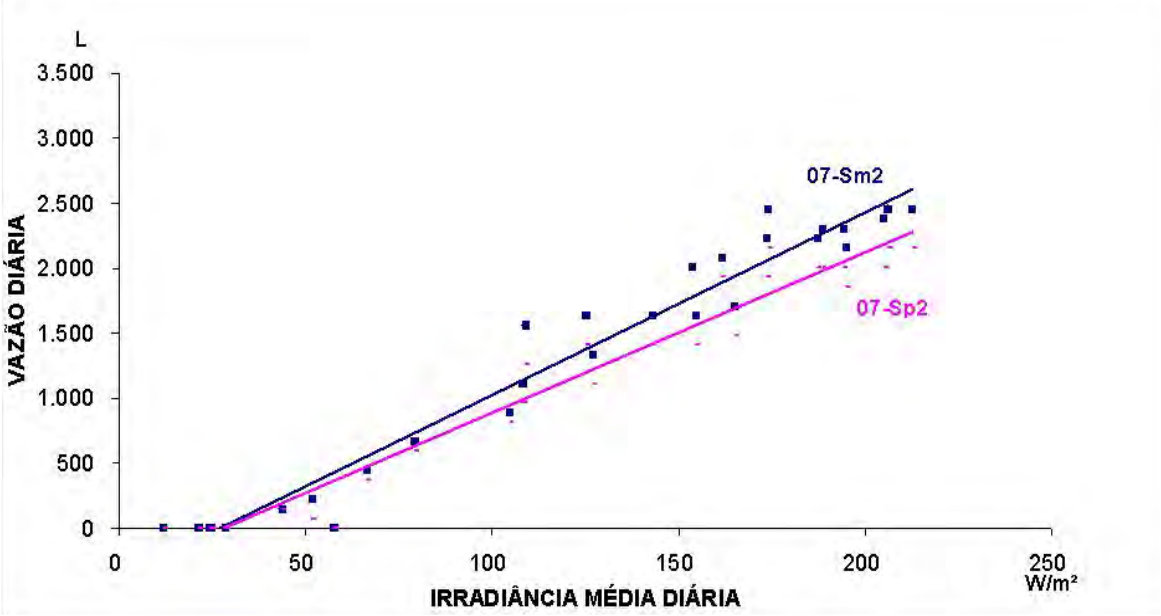


Figura 78 – Vazão x irradiância média por dia – julho/2009.

Observa-se em abril, na Figura 75, que um aumento da irradiância, da energia disponível ou da energia consumida no arranjo monocristalino tende a provocar um incremento maior no volume bombeado do que o mesmo aumento provocaria no arranjo policristalino. Em maio, na Figura 76, essa tendência se inverte. As linhas da Figura 77 apontam que em junho um aumento Δi na irradiância tende a provocar um aumento Δv maior na vazão, para o arranjo policristalino. O gráfico de julho, mostrado na Figura 78, tende a manter as mesmas características de abril.

A Tabela 21 mostra as equações de regressão resultantes das linhas de tendência das Figuras 75 a 78.

Tabela 21 – Equações de regressão (vazão x irradiância)
- abril/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	04-Sm2	**04-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,97	0,94
Equação de Regressão	V = 11,166.Ir + 183,12	V = 9,2627.Ir + 99,093
R²	0,93	0,87

- maio/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	05-Sm2	**05-Sp1**
Coeficiente de Pearson	0,88	0,94
Equação de Regressão	V = 9,4225.Ir + 405,13	V = 9,9893.Ir - 447,86
R²	0,77	0,89

- junho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	06-Sm1	**06-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,97	0,97
Equação de Regressão	V =10,681.Ir - 556,65	V = 12,223.Ir - 413,95
R²	0,95	0,94

- julho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	07-Sm2	**07-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,98	0,98
Equação de Regressão	V =14,054.Ir - 381,34	V = 12,354.Ir - 348,31
R²	0,96	0,96

5.3.3 Vazão em Função Energia Disponível

Na Tabela 22 estão as equações de regressão correspondentes às linhas de tendência traçadas nas Figuras 79 a 82, sendo V = vazão em L e ED = energia solar disponível em Wh.

Tabela 22 – Equações de regressão (vazão x energia disponível)

- abril/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	04-Sm2	**04-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,97	0,94
Equação de Regressão	V = 0,8949.ED + 267,54	V = 0,7152.ED + 168,46
R^2	0,94	0,88

- maio/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	05-Sm2	**05-Sp1**
Coeficiente de Pearson	0,87	0,94
Equação de Regressão	V = 0,7989.ED + 458,11	V = 1,6643.ED - 400,07
R^2	0,76	0,88

- junho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	06-Sm1	**06-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,98	0,97
Equação de Regressão	V = 1,8975.ED - 513,18	V = 1,0352.ED - 375,65
R^2	0,95	0,95

- julho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	07-Sm2	**07-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,98	0,98
Equação de Regressão	V = 1,223.ED - 359,46	V = 1,032.ED - 328,41
R^2	0,96	0,96

As Figuras 79 a 82 mostram a comparação entre os 2 arranjos testados, com o traçado das curvas de tendência lineares para os valores diários da energia solar disponível *versus* volume em litros bombeados.

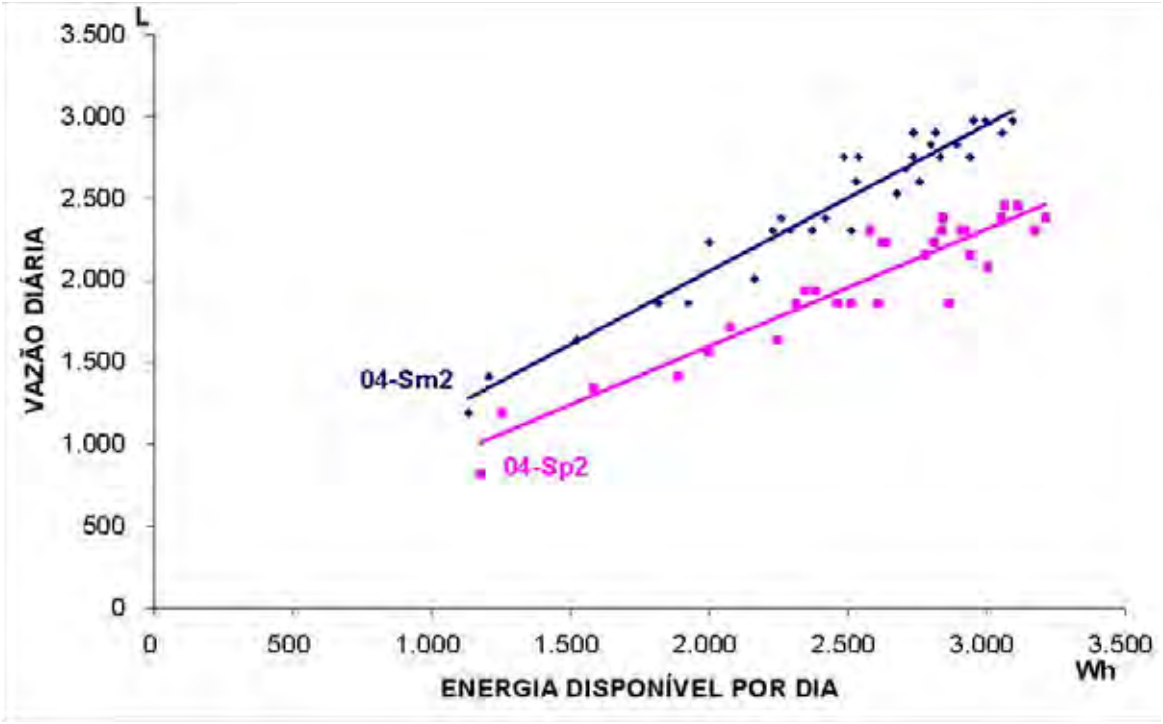


Figura 79 – Vazão x energia disponível por dia - abril/2009.

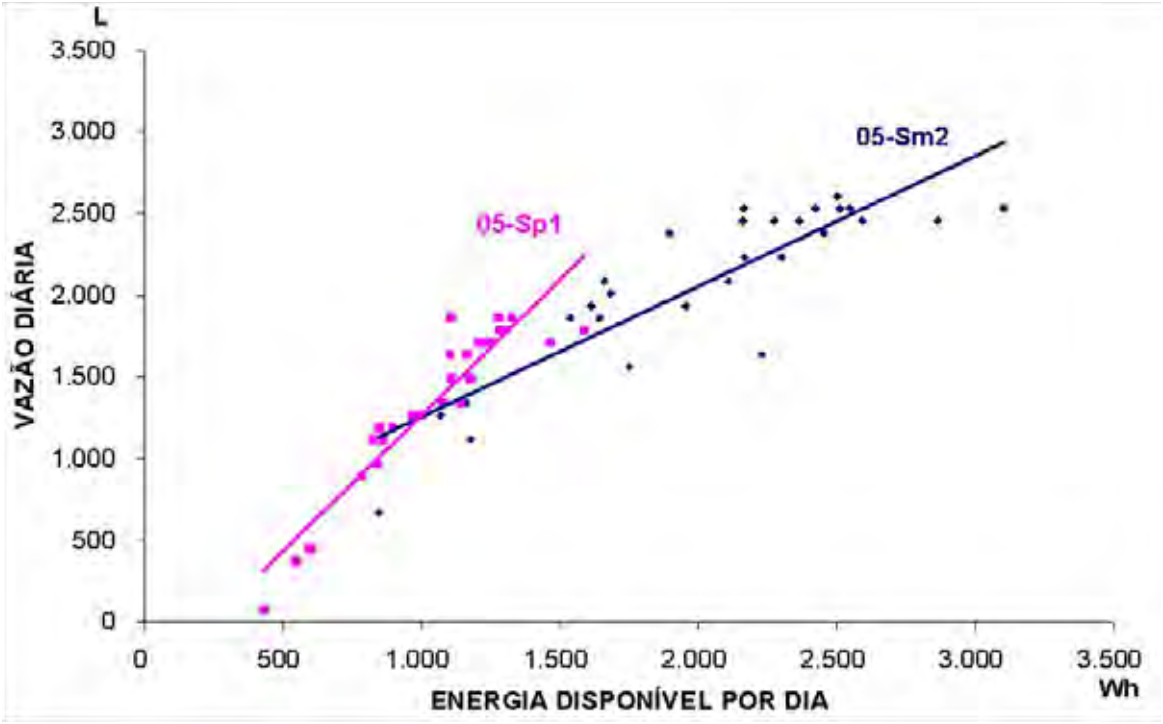


Figura 80 – Vazão x energia disponível por dia - maio/2009.

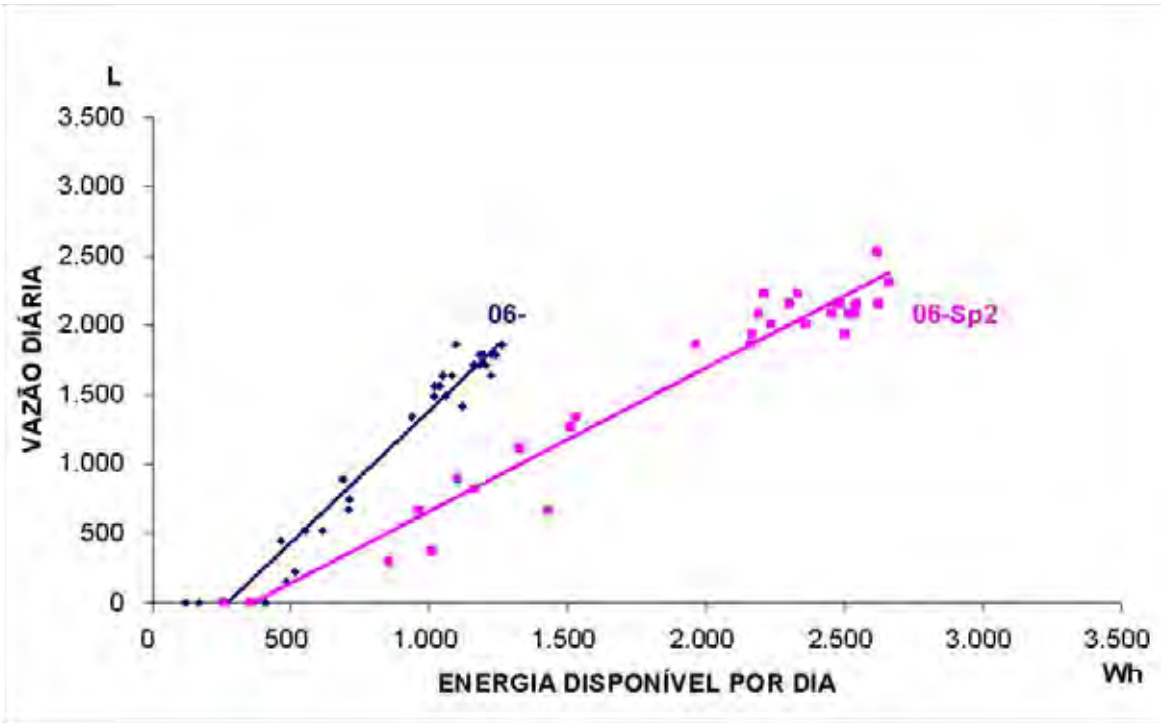


Figura 81 – Vazão x energia disponível por dia - junho/2009.

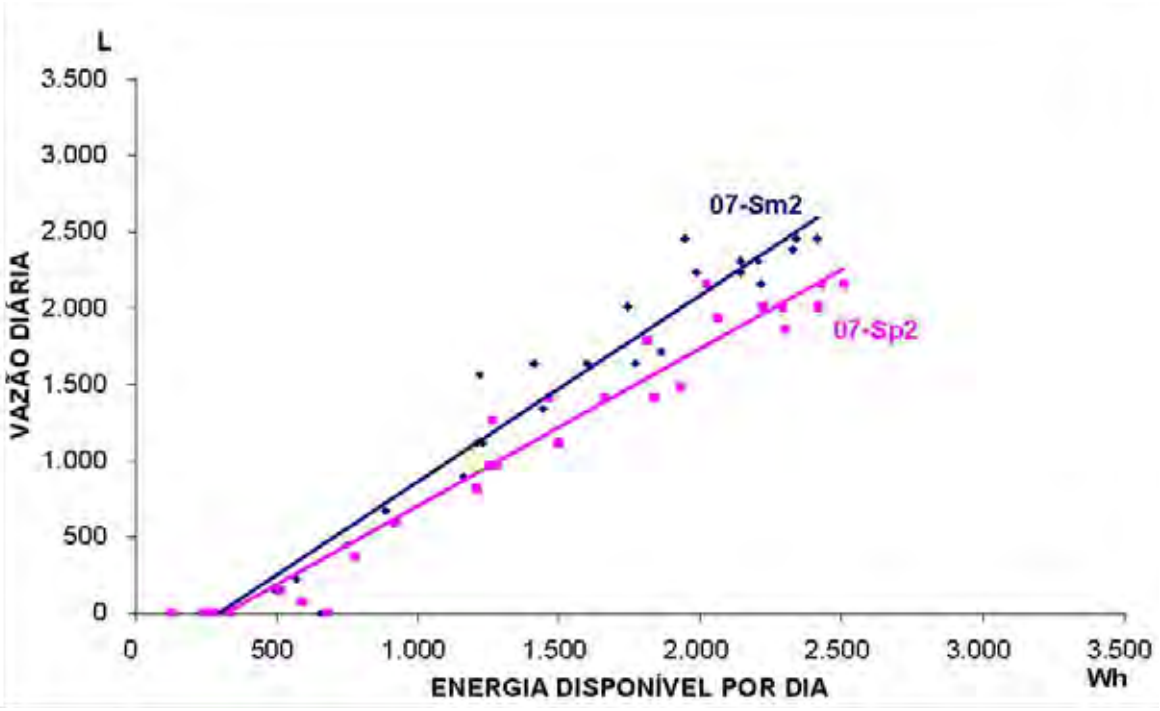


Figura 82 – Vazão x energia disponível por dia – julho/2009.

5.3.4 Vazão em Função da Energia Consumida

Esta comparação avalia o comportamento do volume de água bombeado em função da energia consumida pelos sistemas.

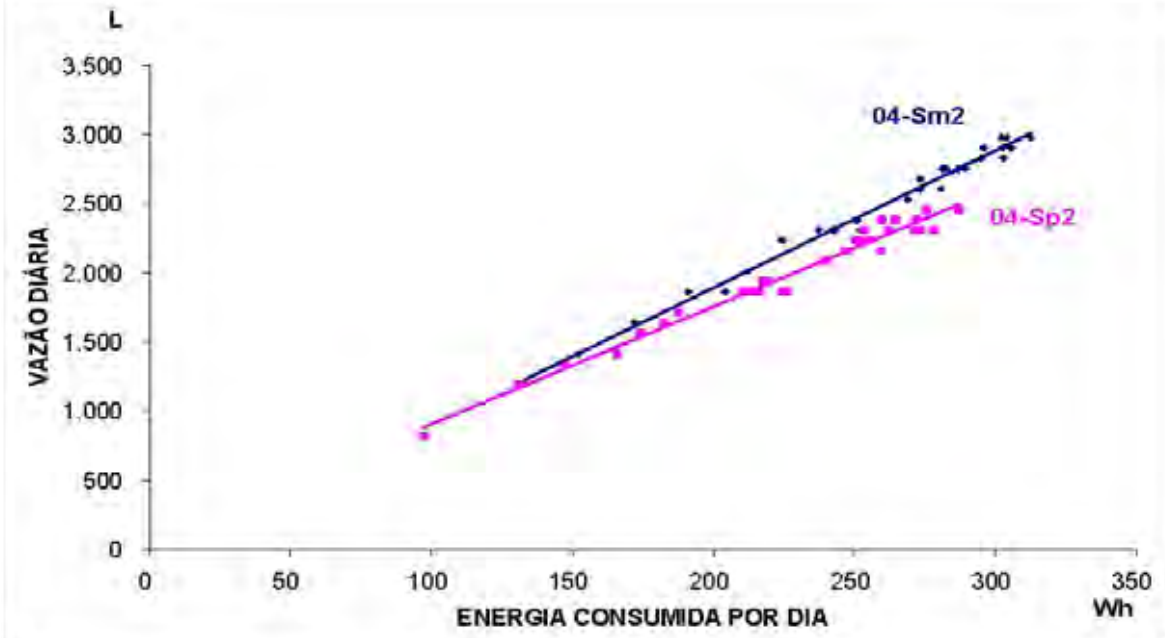


Figura 83 – Vazão x energia consumida por dia - abril/2009.

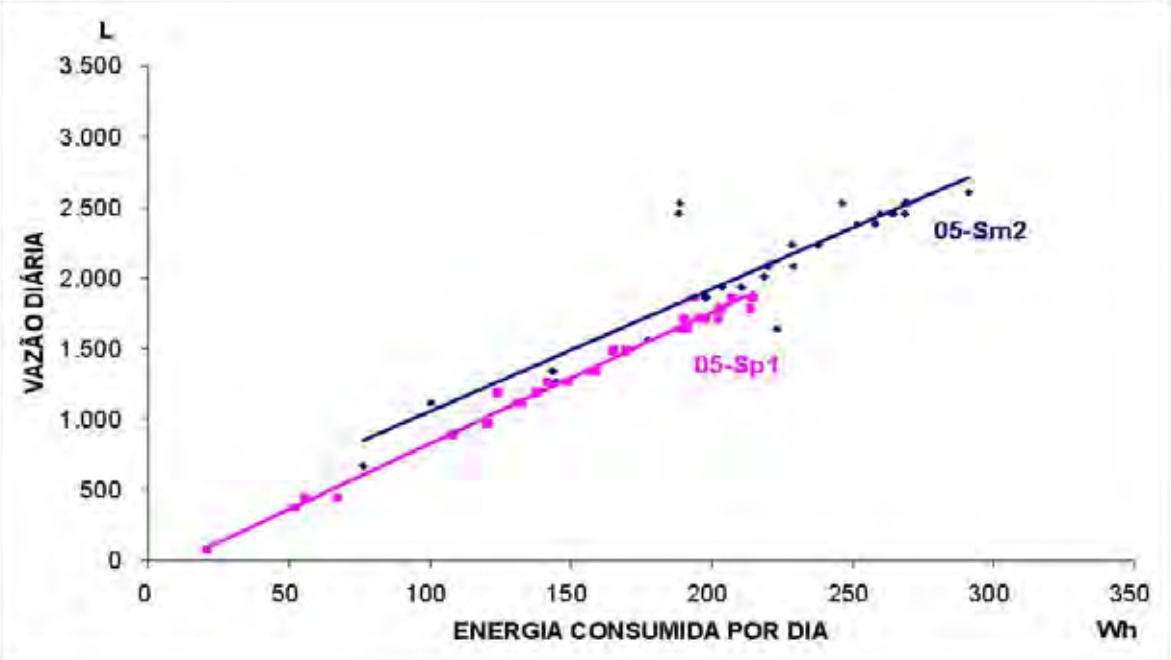


Figura 84 – Vazão x energia consumida por dia - maio/2009.

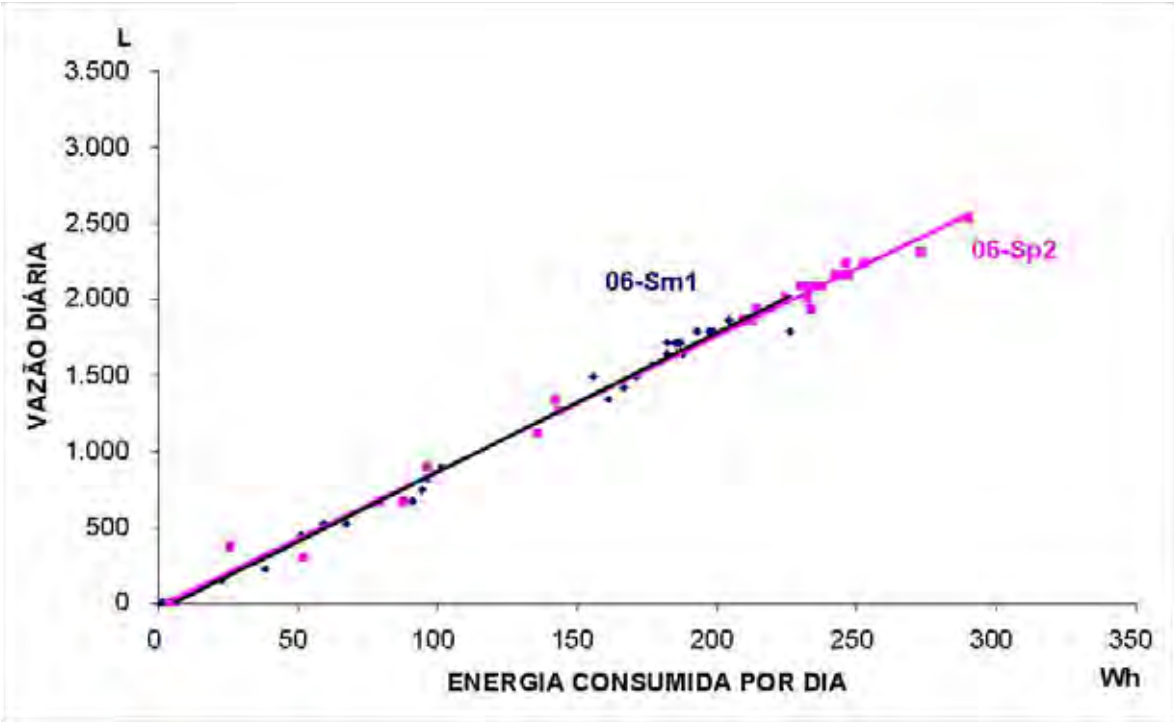


Figura 85 – Vazão x energia consumida por dia - junho/2009.

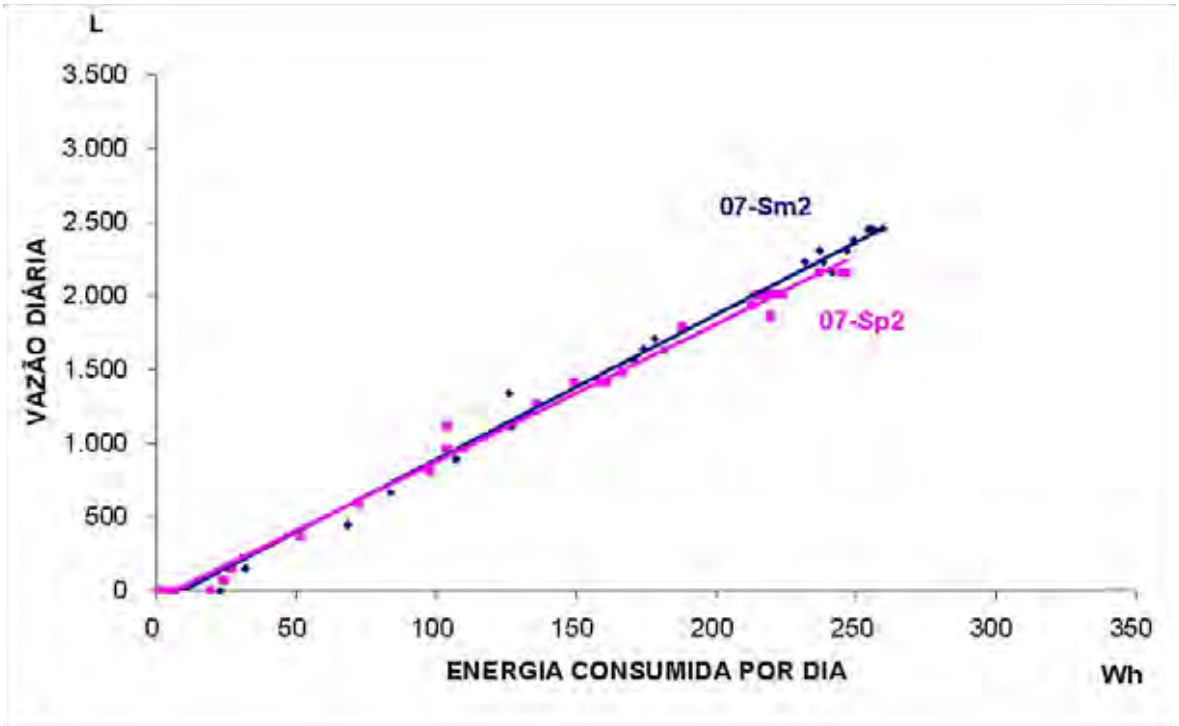


Figura 86 – Vazão x energia consumida por dia – julho/2009.

As Figuras 83 a 86 apresentam o resultado da comparação entre cada conjunto de 2 arranjos testados, através de regressão linear e do traçado de suas curvas de tendência.

As equações de regressão resultantes para essas linhas de tendência traçadas estão expressas na Tabela 23, onde V = Vazão em L e EC = Energia Consumida em Wh.

Tabela 23 – Equações de regressão (vazão x energia consumida)

- abril/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	04-Sm2	**04-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,99	0,99
Equação de Regressão	V = 9,9336.Ec - 95,332	V = 8,4982.Ec + 54,761
R^2	0,99	0,98

- maio/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	05-Sm2	**05-Sp1**
Coeficiente de Pearson	0,90	0,99
Equação de Regressão	V = 8,6406.Ec + 196,33	V = 9,2982.Ec - 101,11
R^2	0,81	0,99

- junho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	06-Sm1	**06-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,99	0,99
Equação de Regressão	V = 9,1532.Ec - 53,856	V = 8,8919.Ec - 22,423
R^2	0,99	0,99

- julho/2009.

RESULTADOS	**SISTEMAS**	
	07-Sm2	**07-Sp2**
Coeficiente de Pearson	0,99	0,99
Equação de Regressão	V = 9,8183.Ec - 89,696	V = 9,3276.Ec - 56,121
R^2	0,99	0,99

5.4 Avaliação Geral dos Arranjos

Os resultados da comparação entre os quatro conjuntos de arranjos utilizados estão nas Figuras 87, 88 e 89.

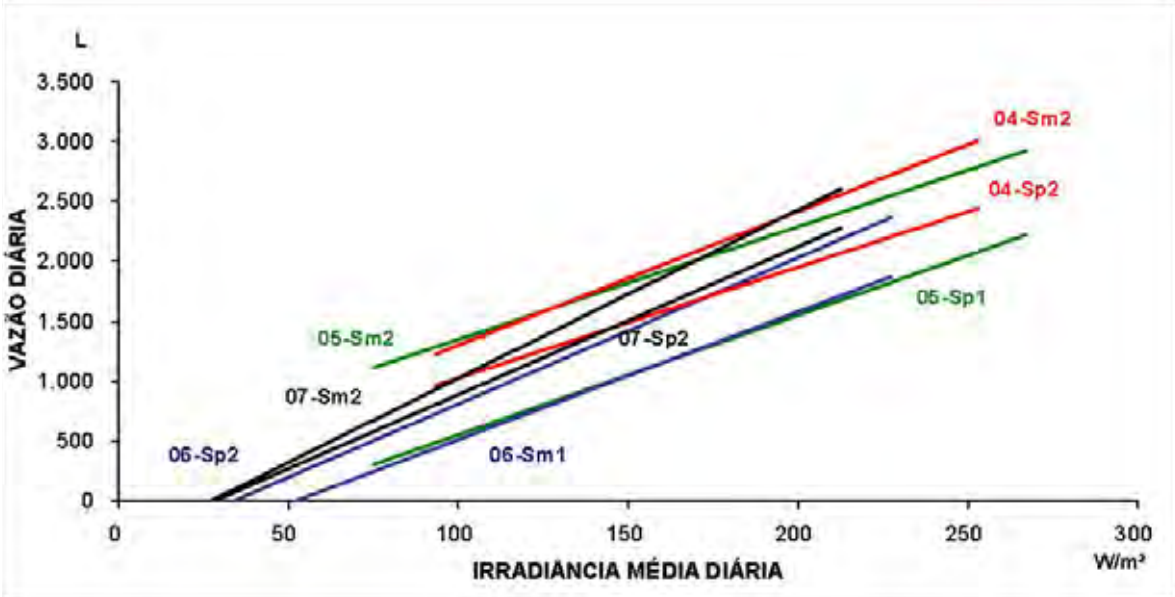


Figura 87 – Vazão x irradiância por dia (abril-maio-junho-julho/2009).

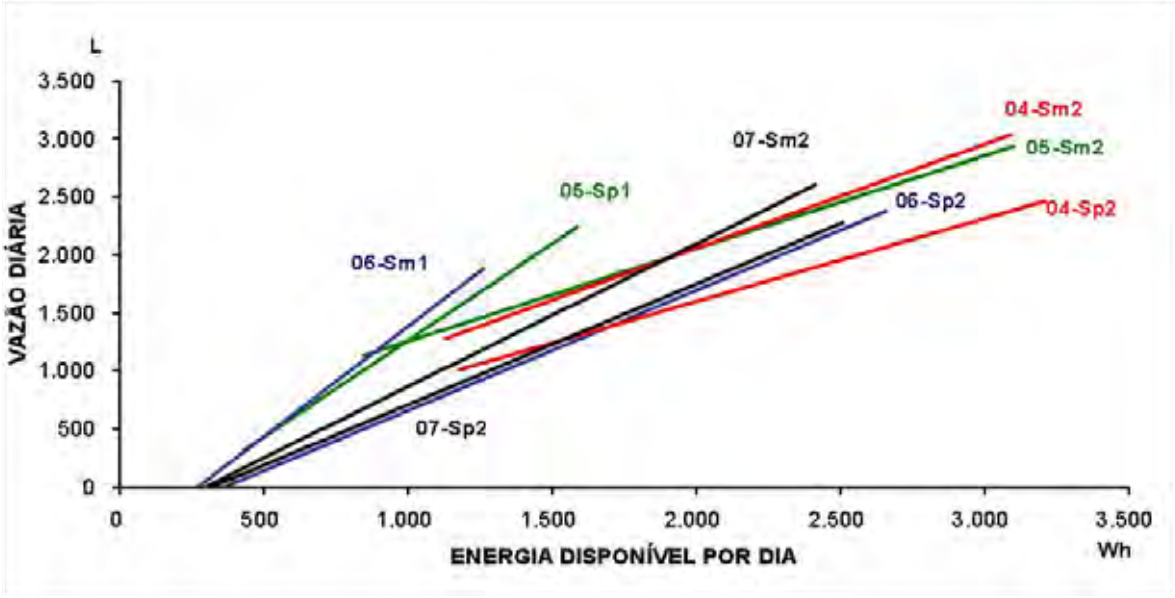


Figura 88 – Vazão x energia disponível por dia (abril-maio-junho-julho/2009).

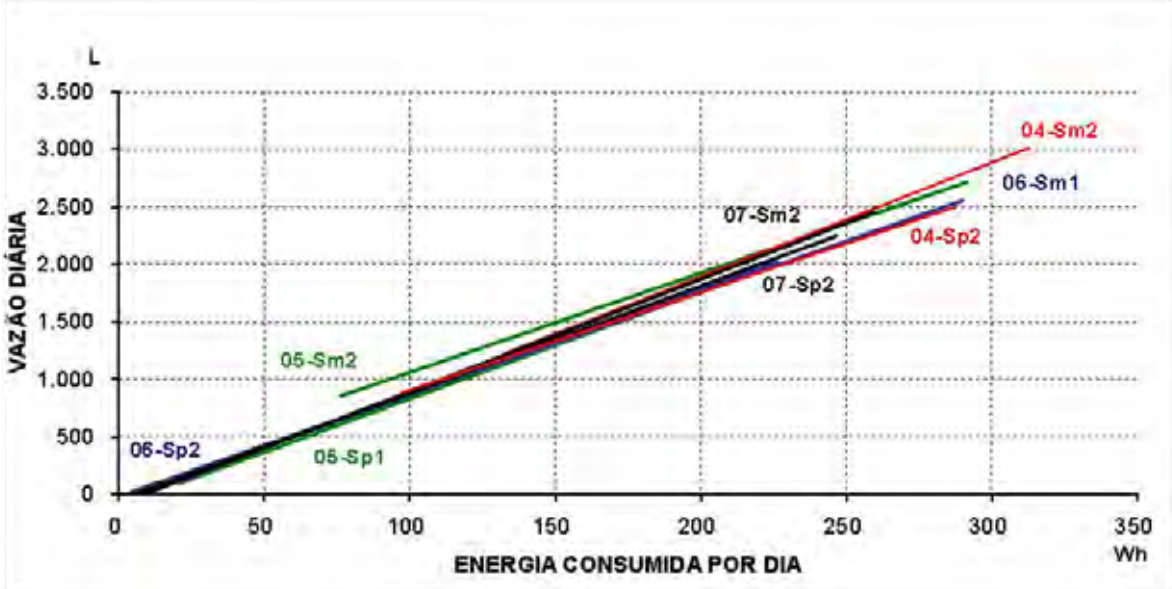


Figura 89 – Vazão x energia consumida por dia (abril-maio-junho-julho/2009).

A comparação entre os quatro conjuntos de arranjos utilizados no experimento permite mostrar a tendência linear entre valores médios diários de vazão, irradiância e energia consumida. Isto pode ser observado através das linhas de tendência por regressão linear, as quais mantêm os coeficientes angulares próximos, conforme Figuras 87 e 89.

Porém, este fato não pode ser considerado quando a comparação é feita com energia disponível e vazão, conforme pode ser observado na Figura 88. Cada arranjo testado aproveita a energia disponibilizada pelo Sol de forma diferente, em função do tipo, da área útil e da quantidade de painéis utilizados.

Pode-se observar pela Figura 89, que cada 1.000 litros de água bombeados em cada arranjo consomem aproximadamente 100 Wh de energia. Portanto, o consumo de energia cresce linearmente para cada litro adicional bombeado e é praticamente igual em qualquer dos arranjos testados. Quanto à energia disponível não se pode fazer qualquer tipo de relação.

6 CONCLUSÃO

O comportamento dos sistemas de bombeamento testados obedece equações lineares com grande exatidão, conforme relacionamentos observados entre volume de água bombeado, irradiância média diária, energia solar disponível e energia elétrica consumida.

O volume de água bombeado é suficiente para as necessidades básicas de uma pequena propriedade rural. O volume médio diário de água bombeada pelos vários arranjos testados durante os 4 meses variou entre 1.100 e 2.500 litros. Com utilização de reservatórios maiores pode-se reduzir ou mesmo eliminar o tempo de "energia ociosa", aumentando esse volume com o acréscimo de cerca de 20% no tempo gasto para bombeamento.

A energia consumida pela carga apresentou diferenças muito pequenas entre os vários arranjos testados. As bombas aproveitaram a energia necessária para a realização do bombeamento e potências superiores a sua capacidade não tiveram influência no volume bombeado.

O arranjo policristalino pode ser dimensionado adequadamente para uma determinada carga e obter melhor desempenho que um monocristalino super-dimensionado.

O sistema de bombeamento com 2 painéis efetivamente apresenta volume maior de água, sendo o arranjo com painéis monocristalinos o que apresenta melhor

desempenho. A utilização de apenas 1 painel pode ser uma solução econômica se o volume de água for de até 1.500 L diários. Nestas condições o arranjo utilizado em maio, com 1 painel policristalino apresentou melhor desempenho.

O experimento não permitiu caracterizar uma variação proporcional entre tipos e quantidades de painéis *versus* volume de água bombeado.

A repetição deste experimento em estudos mais longos e em vários períodos do ano permitirá confirmar e refinar os modelos matemáticos utilizados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABL – **Academia Brasileira de Letras:** ABL responde. Disponível em: <academia@academia.org.br>. Acesso em: 08 jul. 2009.

ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 25 out. 2007.

ARAÚJO, J. A. B. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica em sistema de irrigação por aspersão.** Botucatu, 2003. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.

BPSOLAR. **Catálogo de produtos de energia solar.** Versão 1. Rio de Janeiro. 2001.

CBSOLAR – **Centro brasileiro para desenvolvimento da energia solar fotovoltaica**. Faculdade de Física-PUCRS. Disponível em < http://www.pucrs.br/cbsolar/ntsolar/index.htm >. Acesso em 07 jul. 2009.

CRESESB/CEPEL - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito/ Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Energia solar:** Princípios e aplicações. 2007. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 05 jul. 2009.

EQUIPE CRESESB. **Informe CRESESB.** ANO XII, Nº 13, p. 3. Dezembro – 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 05 jul. 2009.

FALCONPR75. **Bomba d'água manual.** 2008. Disponível em: <http://www.flickr.com/photos/falconpr75/2350231909/>. Acesso em: 05 dez. 2009.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário**: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. São Paulo, 2003. 174p. Tese (Doutorado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-graduação da Universidade de São Paulo.

FIORENTINO, J. J. **Análise do desempenho de um conjunto de módulos fotovoltaicos aplicados para energização rural**. Botucatu, 2004, 143 p. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.

GALDINO, M. A.; NOVGORODCEV, A.; GONÇALVES A. R. **Componentes para sistemas fotovoltaicos de energia estão certificados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem.** Informe CRESESB**.** ANO XII, Nº 13, p. 8,9. Dezembro – 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 05 jul. 2009.

HAMIDAT, A.; BENYOUCEF, B. **Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems.** Renew Energy. 2007. Disponível em: www.sciensedirect.com. Acesso em: 18 nov. 2007.

HELIODINÂMICA. **Energia solar FV**: componentes. 2004. Disponível em: <www.heliodinamica.com.br>. Acesso em: 18 set. 2009.

JANUÁRIO, A. C. V. **O Mercado de energia elétrica de fontes incentivadas para sua expansão e implicações na câmara de comercialização de energia elétrica**. São Paulo, 2007, 121 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). USP/SP

KOLLING, E. M.; SOUZA, S. N. M., RICIERI, Reinaldo P., SAMPAIO, Silvio C., DALLACORT, R**. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.3, p.527-535, set./dez. 2004

MARINI, J. A.; ROSSI, L. A. **Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.67-75, jan./abr. 2005

MELICIO, R.; MENDES, V. M. F. **Simulación de convertidores de potencia em sistemas eólicos.** Información Tecnológica, v. 18, n. 4, p. 25-34, 2007.

MME – Ministério das Minas e Energia. **BEN - Balanço Energético Nacional:** Resenha Energética Brasileira (2008). Versão preliminar de abril/2009. Disponível no site <www.mme. gov.br>. Acessado em 04 maio 2009.

MONTENEGRO, A. A., **Fontes não convencionais de energia**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2000. 208p.

OLIVEIRA, A. S. **Fundamentos de meteorologia e climatologia.** Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS)/UFRB. 2002.

PEREIRA, S.; MELO B. **Fertirrigação, adubação e nutrição das culturas do abacaxizeiro e maracujazeiro.** Disponível em http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/ fertirrigacao.htm. Acesso em: 07 nov. 2009.

PNUD-Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Relatório de Desenvolvimento Humano 2007/2008.** Disponível em <www.pnud.org.br/idh/>. Acesso em 01 jul. 2009.

PRESENÇO, J. F. **Desenvolvimento de um sistema de controle para avaliação de fontes de energias renováveis no bombeamento de água**. Botucatu, 2007, 150 p. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.

SERPA, N. P. M., "**Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos socioculturais"**. Tese de Doutorado. Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2001.

SILVA, C. D. **Avaliação do potencial das energias solar e eólica para acionamento de pequenos sistemas de bombeamento na Fazenda Lageado**. Botucatu, 2000. 98p. Dissertação (mestrado em Agronomia). UNESP/FCA.

SILVA, C. D. **Eficiência da conversão de radiação solar em energia elétrica por módulos fotovoltaicos**. Botucatu, 2003. 166 p. Tese (doutorado em Agronomia). UNESP/FCA.

SILVA, C. D.; SERAPHIM, O. J. **Eficiência da conversão de radiação solar em energia elétrica por módulo fotovoltaico.** Energia na agricultura. Botucatu, v. 20, n. 2, 2005, 1 – 13.

SIQUEIRA, J. A. C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. Botucatu, 2005, 176 p. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.

SOLARBUZZ - **Portal to the World of Solar Energy.** Disponível em: <www.solarbuzz.com>. Acesso em 07 jul. 2009.

SÚRI, M.; HULD, T. A.; DUNLOP E. D.; OSSENBRINK, H. A. **Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries.** Solar Energy 81 ,1295–1305. 2007. Disponível em < http://www.sciencedirect.com/science>. Acesso em: 1 jul. 2009.

TIAGO FILHO, G. L. **Carneiro hidráulico:** o que é e como construí-lo. CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos. 2002. Disponível em: <http: //tecnociencia.inf.br/comunidade/arqautor/diversos/bombacarneiro.swf>. Acesso em: 01 dez. 2009.

WATANABE, R. **Como é o funcionamento de uma usina hidro-elétrica**. Disponível em: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/energia/ener7.htm>. Acesso em: 28 mar. 2007.

WHO – **World Health Organization**. Disponível em <http://www.who.int>. Acesso em 01 jul. 2009.

WRI – World Resources Institute. **Freshwater Resources 2005.** Disponível em < http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/food_water_2008.pdf. Acesso em 06 jul. 2009.

8 APÊNDICE 1 – Programa para coleta de dados no datalogger.

APÊNDICE 1

```
;{CR23X}
; * ENSAIO CARLOS * 18/02/2009 *
*Table 1 Program
  01: 1         Execution Interval (seconds)

1:  Batt Voltage (P10)
 1: 25        Loc [ Vbat      ]

2:  Do (P86)
 1: 41        Set Port 1 High

3:  Do (P86)
 1: 42        Set Port 2 High

4:  Volt (SE) (P1)
 1: 1         Reps
 2: 15        5000 mV, Fast Range
 3: 19        SE Channel
 4: 15        Loc [ SI        ]
 5: 1         Mult
 6: 0         Offset

5:  Volt (SE) (P1)
 1: 1         Reps
 2: 15        5000 mV, Fast Range
 3: 20        SE Channel
 4: 16        Loc [ SS        ]
 5: 1         Mult
 6: 0         Offset

6:  If (X<=>F) (P89)
 1: 15        X Loc [ SI        ]
 2: 3         >=
 3: 1000      F
 4: 30        Then Do

7:  Do (P86)
 1: 49        Turn On Switched 12V

8:  Else (P94)

9:  If (X<=>F) (P89)
 1: 16        X Loc [ SS        ]
 2: 4         <
 3: 100       F
 4: 30        Then Do

10:  Do (P86)
 1: 59        Turn Off Switched 12V

11:  End (P95)
```

```
12:  End (P95)

13:  Do (P86)
 1: 51       Set Port 1 Low

14:  Do (P86)
 1: 52       Set Port 2 Low

15:  Do (P86)
 1: 47       Set Port 7 High

16:  Delay w/Opt Excitation (P22)
 1: 1        Ex Channel
 2: 0        Delay W/Ex (units = 0.01 sec)
 3: 15       Delay After Ex (units = 0.01 sec)
 4: 0        mV Excitation

17:  Volt (SE) (P1)
 1: 1        Reps
 2: 25       5000 mV, 60 Hz Reject, Fast Range
 3: 1        SE Channel
 4: 1        Loc [ Tar       ]
 5: .1       Mult
 6: -40      Offset

18:  Volt (SE) (P1)
 1: 1        Reps
 2: 25       5000 mV, 60 Hz Reject, Fast Range
 3: 2        SE Channel
 4: 2        Loc [ URar      ]
 5: .1       Mult
 6: 0        Offset

19:  Do (P86)
 1: 57       Set Port 7 Low

20:  Pulse (P3)
 1: 1        Reps
 2: 1        Pulse Channel 1
 3: 21       Low Level AC, Output Hz
 4: 3        Loc [ Vvento10  ]
 5: .098     Mult
 6: 0        Offset

21:  Excite-Delay (SE) (P4)
 1: 1        Reps
 2: 25       5000 mV, 60 Hz Reject, Fast Range (Delay must be 0)
 3: 3        SE Channel
 4: 1        Excite all reps w/Exchan 1
 5: 15       Delay (units 0.01 sec)
 6: 5000     mV Excitation
 7: 4        Loc [ Dvento10  ]
 8: .071     Mult
 9: 0        Offset

22:  If (X<=>F) (P89)
```

```
 1: 4        X Loc [ Dvento10  ]
 2: 3        >=
 3: 360      F
 4: 30       Then Do

23:  Z=F (P30)
 1: 0        F
 2: 0        Exponent of 10
 3: 4        Z Loc [ Dvento10  ]

24:  End (P95)

25:  Pulse (P3)
 1: 1        Reps
 2: 2        Pulse Channel 2
 3: 2        Switch Closure, All Counts
 4: 5        Loc [ Pp        ]
 5: .2       Mult
 6: 0        Offset

26:  Volt (Diff) (P2)
 1: 1        Reps
 2: 23       200 mV, 60 Hz Reject, Slow Range
 3: 7        DIFF Channel
 4: 6        Loc [ RgHmV     ]
 5: 1        Mult
 6: 0        Offset

27:  If (X<=>F) (P89)
 1: 6        X Loc [ RgHmV     ]
 2: 4        <
 3: 0        F
 4: 30       Then Do

28:  Z=F (P30)
 1: 0        F
 2: 0        Exponent of 10
 3: 6        Z Loc [ RgHmV     ]

29:  End (P95)

30:  Volt (Diff) (P2)
 1: 1        Reps
 2: 23       200 mV, 60 Hz Reject, Slow Range
 3: 8        DIFF Channel
 4: 7        Loc [ RgI1mV    ]
 5: 1        Mult
 6: 0        Offset

31:  If (X<=>F) (P89)
 1: 7        X Loc [ RgI1mV    ]
 2: 4        <
 3: 0        F
 4: 30       Then Do

32:  Z=F (P30)
```

```
 1: 0        F
 2: 0        Exponent of 10
 3: 7        Z Loc [ RgI1mV    ]

33:  End (P95)

34:  Volt (Diff) (P2)
 1: 1        Reps
 2: 23       200 mV, 60 Hz Reject, Slow Range
 3: 9        DIFF Channel
 4: 8        Loc [ RgI2mV    ]
 5: 1        Mult
 6: 0        Offset

35:  If (X<=>F) (P89)
 1: 8        X Loc [ RgI2mV    ]
 2: 4        <
 3: 0        F
 4: 30       Then Do

36:  Z=F (P30)
 1: 0        F
 2: 0        Exponent of 10
 3: 8        Z Loc [ RgI2mV    ]

37:  End (P95)

38:  Z=X*F (P37)
 1: 6        X Loc [ RgHmV     ]
 2: 44.623   F
 3: 9        Z Loc [ RgHWm2    ]

39:  Z=X*F (P37)
 1: 7        X Loc [ RgI1mV    ]
 2: 46.211   F
 3: 10       Z Loc [ RgI1Wm2   ]

40:  Z=X*F (P37)
 1: 8        X Loc [ RgI2mV    ]
 2: 46.275   F
 3: 11       Z Loc [ RgI2Wm2   ]

41:  Z=F (P30)
 1: 4.4623   F
 2: -5       Exponent of 10
 3: 26       Z Loc [ fH        ]

42:  Z=X*Y (P36)
 1: 6        X Loc [ RgHmV     ]
 2: 26       Y Loc [ fH        ]
 3: 12       Z Loc [ RgHMJm2   ]

43:  Z=F (P30)
 1: 4.6211   F
 2: -5       Exponent of 10
 3: 27       Z Loc [ fI1       ]
```

```
44:  Z=X*Y (P36)
 1: 7        X Loc [ RgI1mV    ]
 2: 27       Y Loc [ fI1       ]
 3: 13       Z Loc [ RgI1MJm2  ]

45:  Z=F (P30)
 1: 4.6275   F
 2: -5       Exponent of 10
 3: 28       Z Loc [ fI2       ]

46:  Z=X*Y (P36)
 1: 8        X Loc [ RgI2mV    ]
 2: 28       Y Loc [ fI2       ]
 3: 14       Z Loc [ RgI2MJm2  ]

47:  Volt (Diff) (P2)
 1: 2        Reps
 2: 25       5000 mV, 60 Hz Reject, Fast Range
 3: 3        DIFF Channel
 4: 17       Loc [ V1        ]
 5: 0.01     Mult
 6: 0        Offset

48:  Volt (Diff) (P2)
 1: 2        Reps
 2: 25       5000 mV, 60 Hz Reject, Fast Range
 3: 5        DIFF Channel
 4: 19    -- Loc [ I1        ]
 5: 0.1      Mult
 6: 0.0      Offset

49:  If (X<=>F) (P89)
 1: 19    -- X Loc [ I1        ]
 2: 4        <
 3: 0        F
 4: 30       Then Do

50:  Z=F (P30)
 1: 0        F
 2: 0        Exponent of 10
 3: 19    -- Z Loc [ I1        ]

51:  End (P95)

52:  Z=X*Y (P36)
 1: 17       X Loc [ V1        ]
 2: 19       Y Loc [ I1        ]
 3: 21       Z Loc [ P_S1      ]

53:  Z=X*F (P37)
 1: 21       X Loc [ P_S1      ]
 2: .00027   F
 3: 23       Z Loc [ EC_S1     ]

54:  Z=X*Y (P36)
```

```
 1: 18       X Loc [ V2        ]
 2: 20       Y Loc [ I2        ]
 3: 22       Z Loc [ P_S2      ]

55:  Z=X*F (P37)
 1: 22       X Loc [ P_S2      ]
 2: .00027   F
 3: 24       Z Loc [ EC_S2     ]

56:  If time is (P92)
 1: 0        Minutes (Seconds --) into a
 2: 5        Interval (same units as above)
 3: 10       Set Output Flag High (Flag 0)

57:  Set Active Storage Area (P80)^21555
 1: 1        Final Storage Area 1
 2: 111      Array ID

58:  Real Time (P77)^469
 1: 1220     Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

59:  Minimum (P74)^2044
 1: 1        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 15       Loc [ SI        ]

60:  Maximum (P73)^7593
 1: 1        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 15       Loc [ SI        ]

61:  Minimum (P74)^32025
 1: 1        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 16       Loc [ SS        ]

62:  Maximum (P73)^23616
 1: 1        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 16       Loc [ SS        ]

63:  Average (P71)^12052
 1: 2        Reps
 2: 1     -- Loc [ Tar       ]

64:  Wind Vector (P69)^25334
 1: 1        Reps
 2: 0        Samples per Sub-Interval
 3: 1        S, é1 Polar
 4: 3        Wind Speed/East Loc [ Vvento10  ]
 5: 4        Wind Direction/North Loc [ Dvento10  ]

65:  Totalize (P72)^16162
 1: 1        Reps
 2: 5        Loc [ Pp        ]
```

```
66:  Average (P71)^1007
 1: 3        Reps
 2: 9     -- Loc [ RgHWm2    ]

67:  Average (P71)^107
 1: 3        Reps
 2: 6     -- Loc [ RgHmV     ]

68:  Average (P71)^17708
 1: 2        Reps
 2: 17    -- Loc [ V1        ]

69:  Average (P71)^3125
 1: 2        Reps
 2: 19    -- Loc [ I1        ]

70:  Average (P71)^31034
 1: 2        Reps
 2: 21    -- Loc [ P_S1      ]

71:  If time is (P92)
 1: 0        Minutes (Seconds --) into a
 2: 60       Interval (same units as above)
 3: 10       Set Output Flag High (Flag 0)

72:  Set Active Storage Area (P80)^16381
 1: 1        Final Storage Area 1
 2: 222      Array ID

73:  Real Time (P77)^17242
 1: 1220     Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

74:  Average (P71)^5903
 1: 2        Reps
 2: 21    -- Loc [ P_S1      ]

75:  Totalize (P72)^12085
 1: 2        Reps
 2: 23    -- Loc [ EC_S1     ]

76:  If time is (P92)
 1: 0        Minutes (Seconds --) into a
 2: 1440     Interval (same units as above)
 3: 10       Set Output Flag High (Flag 0)

77:  Set Active Storage Area (P80)^22488
 1: 1        Final Storage Area 1
 2: 333      Array ID

78:  Real Time (P77)^9557
 1: 1220     Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

79:  Maximum (P73)^13021
 1: 2        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 1     -- Loc [ Tar       ]
```

```
80:  Minimum (P74)^16787
 1: 2        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 1     -- Loc [ Tar       ]

81:  Maximum (P73)^7613
 1: 1        Reps
 2: 10       Value with Hr-Min
 3: 3        Loc [ Vvento10  ]

82:  Wind Vector (P69)^28669
 1: 1        Reps
 2: 0        Samples per Sub-Interval
 3: 0        S, é1, & å(é1) Polar
 4: 3        Wind Speed/East Loc [ Vvento10  ]
 5: 4        Wind Direction/North Loc [ Dvento10  ]

83:  Totalize (P72)^4207
 1: 1        Reps
 2: 5        Loc [ Pp        ]

84:  Totalize (P72)^32443
 1: 3        Reps
 2: 12    -- Loc [ RgHMJm2   ]

85:  Average (P71)^15720
 1: 1        Reps
 2: 25       Loc [ Vbat      ]

86:  Serial Out (P96)
 1: 71       Destination Output

*Table 2 Program
  01: 0.0000    Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 Tar       1 3 1
2 URar      1 3 1
3 Vvento10  1 3 1
4 Dvento10  1 3 2
5 Pp        1 2 1
6 RgHmV     1 4 2
7 RgI1mV    1 4 2
8 RgI2mV    1 4 2
9 RgHWm2    1 1 1
10 RgI1Wm2   1 1 1
11 RgI2Wm2   1 1 1
12 RgHMJm2   1 1 1
13 RgI1MJm2  1 1 1
14 RgI2MJm2  1 1 1
15 SI        1 3 1
```

```
16 SS        1 3 1
17 V1        5 2 1
18 V2        17 2 1
19 I1        7 3 2
20 I2        19 2 1
21 P_S1      7 3 1
22 P_S2      19 2 1
23 EC_S1     7 1 1
24 EC_S2     19 1 1
25 Vbat      1 2 1
26 fH        1 1 1
27 fI1       1 1 1
28 fI2       1 1 1
-Program Security-
```