

SISTEMA FOTOVOLTAICO MONOCRISTALINO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA¹

CARLOS ALBERTO MACHADO MOREIRA²; ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM³ & LUIZ ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO⁴

RESUMO: Conseguir água própria para o consumo, preservar esta água 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. Isto ocorre principalmente em pequenas propriedades nas áreas rurais, em regiões isoladas e com baixa densidade demográfica. O bombeamento da água, quando ela é encontrada no local, 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 proposta por este trabalho. Para isto foi montado um sistema com dois painéis monocristalinos, composto por uma moto-bomba, duas caixas-d'água, dois sensores de nível e uma válvula solenóide para bombear água, utilizando uma bomba energizada por arranjos de painéis solares monocristalinos. O objetivo foi comparar dados de vazão e energia elétrica 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 do sistema. Durante quatro meses consecutivos, a partir de abril de 2009, arranjos com um ou dois painéis foram testados. Correlações matemáticas e curvas de ajustes foram usadas para interpretar os dados obtidos. No período analisado o sistema obedeceu a equações lineares com grande exatidão. O volume médio diário de água bombeada pelos arranjos testados variou entre 1.100 e 2.500 litros, suficiente para atender uma pequena propriedade rural. O sistema de bombeamento com dois painéis efetivamente apresentou volume maior de água bombeada, mas a utilização de apenas um painel pode ser uma solução econômica para um volume de água de até 1.500 litros diários. Não se caracterizou uma variação proporcional entre a quantidade de painéis fotovoltaicos e a vazão diária de água bombeada.

Palavras-chave: abastecimento de água, energia solar, painel fotovoltaico.

¹ Extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor intitulada: Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água

² Mestre em Agronomia - Energia na Agricultura – Faculdade de Ciências Agrônômicas/Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP, Brasil, fone (014)-91318506, moreira.carlos@ig.com.br

³ Doutor em Agronomia – Energia na Agricultura – Faculdade de Ciências Agrônômicas/Universidade Estadual Paulista. Professor do Departamento de Engenharia Rural - Energia na Agricultura - FCA/UNESP, Botucatu/SP, Brasil, seraphim@fca.unesp.br

⁴ Licenciado em Matemática, Doutor em Agronomia/Energia na Agricultura, Professor Assistente Doutor, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Tupã, Laboratório de Matemática Aplicada e Computacional. Fone: (0XX14) 3404-4200, gabrielfilho@tupa.unesp.br

WATER PUMPING WITH PHOTOVOLTAIC MONOCRYSTALLINE SYSTEM

***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. This is especially true for small properties in the countryside and in isolated areas with low demographic density. Pumping the water in those regions is a solution that rationalizes its use in domestic chores, in animal rearing and in the irrigation systems of cultivated areas. Making feasible local, renewable and non-polluted energetic alternatives is the aim for those areas that are usually far away from the public electric network. Using photovoltaic solar energy is the alternative now proposed. For this objective was built a system with two monocrystalline panels, one pump, two water tanks, two level sensors and a solenoid valve to pump water, using a pump powered an array of monocrystalline solar panels. The main goal was to compare their rate of water flow and their energy consumption. The use of one data acquisition equipment allowed collecting meteorological, electrical and hydraulic values, and also serving for the control and activation of the pumping system. During four months in a row as from April 2009, arrangements with one or two panels were tested. Mathematics correlations and adjustment lines were used to interpret the behavior of obtained dataset. During the analyzed period the system followed the linear equations with great accuracy. The daily average amount of water pumped by the several tested arrays stayed between 1,100 and 2,500 liters, and that is enough to supply a small rural property. The pumping system with two panels effectively showed the major amount of water, but a system with one panel can be an economical solution until 1,500 liters on day. It did not characterize a direct relationship between power or quantity of photovoltaic panels and daily outflow of water pumping.*

***Keywords:** Water supply, solar energy, photovoltaic panel.*

1 INTRODUÇÃO

Ainda hoje há uma grande parcela da população mundial que não consegue usufruir de dois recursos básicos: a água e a eletricidade. Até 2004, 10% dos brasileiros não tinham acesso à água potável. Conforme dados do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2009), ainda existiam 6,5 milhões

de brasileiros que não dispunham de energia elétrica em 2005. Esses números correspondem, em grande parte, às áreas rurais distantes dos grandes centros urbanos e pequenas populações dispersas em grandes áreas, como é o caso da Amazônia.

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), pode-se dimensionar para uma pequena propriedade rural onde vivem 6 pessoas que cuidam de 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e ainda tem uma área cultivada de 100 m² um consumo médio diário aproximado de 1.200 litros de água.

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 seja manual, com baixíssimo rendimento e alto consumo de energia humana, ou através de motores-bomba a diesel, caros, barulhentos e poluentes.

Atualmente a viabilização de soluções energéticas para as comunidades rurais isoladas ou em áreas remotas para facilitar o acesso à água é um grande desafio, pois esta é indispensável à sobrevivência do ser humano, de animais e plantas. Fedrizzi (2003) afirma que grande parte dessa população afetada não dispõe de energia para a captação e transporte da água. 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.

Conforme o Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito -CRESESB (2006), a radiação solar incidente na superfície da Terra 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. A grandeza que mede a radiação incidente sobre uma superfície é a irradiância, medida em W/m², enquanto que o fluxo de radiação acumulado no tempo recebe o nome de irradiação e é medido em MJ/m²d (VAREJÃO-SILVA, 2001).

O efeito da incidência desses raios solares sobre determinados elementos químicos, 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 dos sistemas solares fotovoltaicos para geração de energia elétrica (CRESESB, 2006).

As células fotovoltaicas geralmente são construídas com Silício. Seus tipos mais comuns são: monocristalina e policristalina, sendo que nas células monocristalinas, conforme o Cresesb (2006), o Silício com teor de pureza de 99,9999% é fundido junto com material dopante, produzindo-se um grande cilin-

dro, 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.

Segundo Siqueira (2005), o painel ou módulo fotovoltaico é composto de células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente em nível suficiente para o aproveitamento da energia elétrica gerada. 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. São disponíveis em diversos níveis de tensão e potência, sendo que as potências são medidas em Watt-pico (Wp), potência 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 °C. De acordo com Fedrizzi (2003), trata-se de uma tecnologia consolidada tecnicamente, de alta confiabilidade e com vida útil de mais de 25 anos.

Sistema solar fotovoltaico é um conjunto de painéis solares fotovoltaicos interligados transformando energia solar em elétrica diretamente. Um arranjo de painéis deve ser orientado de forma a maximizar a captação solar nos meses de inverno, quando a oferta solar é menor e o consumo muitas vezes é maior que o dos meses de verão. Nestes casos os painéis são normalmente orientados para o norte (no hemisfério Sul), com inclinação equivalente à latitude local acrescida de 10 a 15° (FEDRIZZI, 2003).

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).

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. Súrri 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.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho hidro-energético de um sistema de bombeamento de água acionado por energia solar fotovoltaica, utilizando arranjos de painéis monocristalinos, para aplicação em pequenas propriedades rurais no uso doméstico, para animais e plantações.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis do Laboratório de Energização Rural (NEAR), parte integrante do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de

Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, localizado na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu-SP. Esta localização tem como coordenadas geográficas 22° 51' 07" S de latitude, 48° 25' 57" W de longitude e altitude de 790 metros.

Conforme Figura 1, em uma estrutura metálica foram instalados: uma caixa-d'água inferior com capacidade para 150 L, para abastecer o sistema; uma caixa d'água superior com capacidade máxima para 100 L, limitada a armazenar 74,45 L por dois sensores de nível, inferior e superior, cujos circuitos elétricos controlaram seus processos de enchimento e esvaziamento. Tubos, luvas e curvas de PVC de ½" foram usados na tubulação de recalque e de ¾" para retorno da água, entre as caixas.



Figura 1 – Vista do sistema de bombeamento de água com painéis monocristalinos.

Foram utilizados dois piranômetros para medir a irradiância, um no plano horizontal e outro na inclinação dos painéis. Um pluviômetro foi usado para medidas da precipitação pluviométrica.

Para a operação de recalque da água foi utilizada uma moto-bomba de superfície, com as especificações contidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas da moto-bomba de superfície

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

A energia elétrica para alimentar esta moto-bomba foi gerada por painéis solares fotovoltaicos do tipo monocristalino (Tabela 2). Dois arranjos diferentes com os painéis foram testados. Durante os meses de abril, maio e julho/2009 o arranjo utilizou 2 painéis conectados em paralelo. Em junho apenas 1 painel alimentou o sistema de bombeamento. Estes painéis solares foram instalados com suas faces voltadas para o Norte geográfico e com uma inclinação de aproximadamente $32^{\circ} 51'$, equivalente à latitude local mais 10° .

Tabela 2 – Especificações técnicas de cada painel solar monocristalino

Característica	Especificação técnica
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 m ²

O processo de retorno da água da caixa superior para a inferior foi feito através de uma válvula solenóide do tipo normalmente fechada que se abria para a passagem de água assim que o sensor de nível superior indicava caixa cheia e desativava o circuito da moto-bomba. De forma semelhante ela se fechava para a passagem de água tão logo o sensor de nível inferior indicasse caixa vazia e ativasse o circuito da bomba para iniciar novo ciclo de bombeamento. O controle do acionamento automático da moto-bomba e da válvula solenóide foi feito por meio de dois relés automotivos de 12 VCC. Esses relés, ao terem suas bobinas energizadas ou desenergizadas, simultaneamente acionavam ou desativavam o circuito da moto-bomba e fechavam ou abriam a válvula solenóide.

Para a coleta de dados, cálculos, monitoramento de sinais enviados pelos sensores meteorológicos e elétricos, bem como para alimentação de sensores de nível, solenóide e relés, foi utilizado um equipamento de aquisição de dados (datalogger). Este era alimentado por uma fonte de energia externa ao sistema com tensão mantida aproximadamente em 12 VCC. Suas funções nesse experimento foram: fazer a varredura, a cada segundo, dos sensores que mediam os elementos meteorológicos e monitorar, a cada segundo, sinais elétricos dos sensores de nível inferior e superior da caixa-d'água, para energizar relés,

válvula solenóide e circuito de acionamento da bomba, ou seja, controlar o funcionamento do sistema de forma contínua e ininterrupta. A cada 5 minutos calculava o valor médio da radiação global no plano horizontal e no plano dos painéis, tensão, corrente e potência na saída dos painéis. Também efetuava totalizações horárias e diárias da potência gerada e da energia consumida pelo sistema. Os dados eram coletados periodicamente e transferidos para um microcomputador por meio de um software proprietário.

Os dados de bombeamento de água diário Q (L/dia), consumo de energia CE (Wh), potência P (W), tensão V (V), corrente I (A) e irradiância E (W/m^2) foram analisados para comparar a eficiência entre os arranjos de painéis monocristalinos testados.

A Figura 2 representa o diagrama hidráulico e a Figura 3, o diagrama elétrico do sistema de bombeamento utilizado.

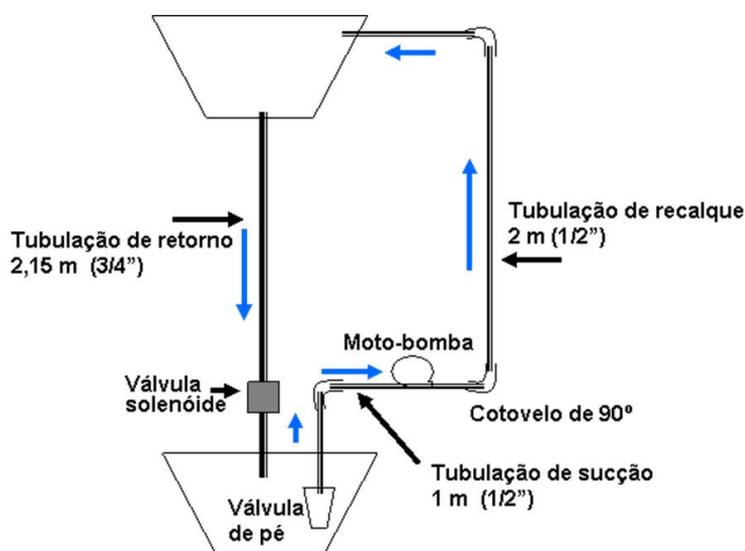


Figura 2 – Diagrama representativo das conexões e fluxos hidráulicos.

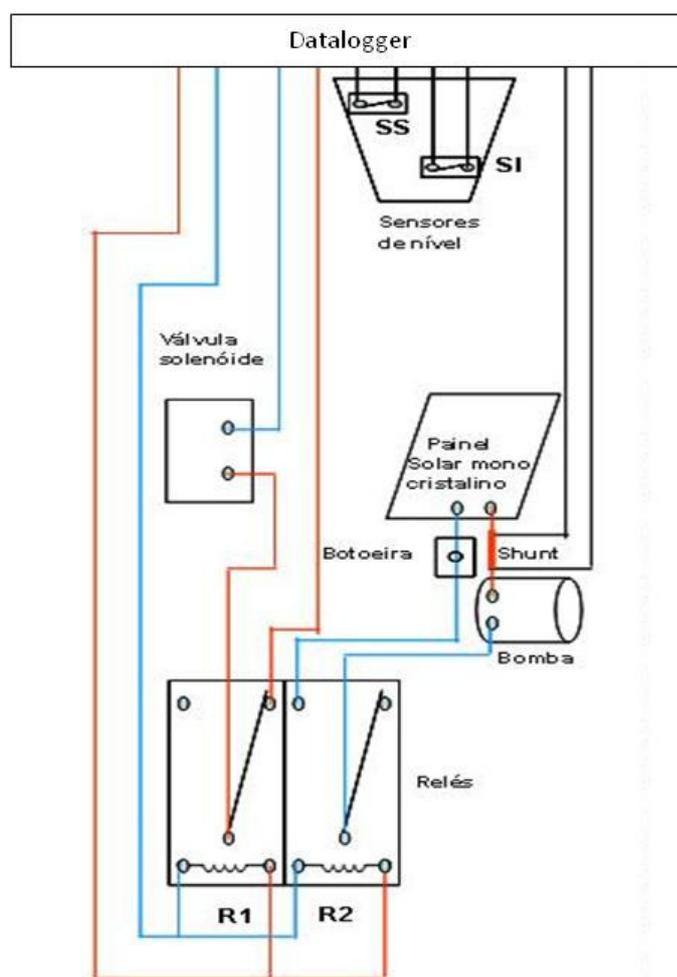


Figura 3 – Diagrama das conexões elétricas do sistema.

Como o processo de controle e medição do sistema era feito pelo datalogger de forma contínua e ininterrupta, 24 horas por dia, o funcionamento da moto-bomba dependia apenas da quantidade incidente de radiação solar nos painéis fotovoltaicos.

Todo o processo cíclico de enchimento e esvaziamento da caixa superior era comandado pela movimentação dos sensores de nível inferior (SI) e superior (SS). Quando o relé R1 ficava energizado, alimentado eletricamente por 12 V oriundos do datalogger, seus contatos fechavam o circuito que passa pela válvula solenóide, que então era acionada, alterando sua condição original de normalmente fechada para aberta, permitindo o escoamento da água da caixa superior. Ao mesmo tempo, o relé R2 também era acionado e seus contatos mantinham o circuito de acionamento da bomba desligado.

Ao terminar o esvaziamento da caixa superior o datalogger recebia um sinal de abertura dos contatos do sensor inferior (SI), indicando caixa vazia. Imediatamente após, o datalogger cortava a corrente para os relés R1 e R2, e assim alteravam-se as posições dos seus contatos, ou seja, os relés ligavam o cir-

cuito de acionamento da moto-bomba e fechavam a passagem de água pela válvula solenóide. Iniciava-se um novo ciclo de bombeamento de água (Figuras 2 e 3).

Para o datalogger, o sinal de fechamento dos contatos do sensor inferior indicava que o bombeamento de água da caixa inferior para a superior estava em andamento. Quando a água atingia o nível máximo da caixa superior, o datalogger recebia sinal de fechamento dos contatos do sensor de nível superior, indicando caixa cheia. Imediatamente ele enviava corrente para os relés para desligar o circuito de acionamento da moto-bomba, encerrando o bombeamento, e abrir a válvula solenóide, iniciando o esvaziamento da caixa. O datalogger, ao receber sinal de abertura dos contatos do sensor de nível superior, tinha a indicação que o esvaziamento da caixa superior estava em andamento, e essa etapa se encerrava quando também o sensor de nível inferior enviava um sinal de abertura de seus contatos, indicador de caixa vazia. A partir daí, o ciclo se repetia várias vezes ao dia, desde que houvesse geração fotovoltaica de energia. A interrupção do processo de bombeamento apenas ocorria quando faltava energia para a moto-bomba, normalmente à noite, ou durante o esvaziamento da caixa ou em condições de alta nebulosidade, sendo retomado tão logo cessassem essas condições desfavoráveis, sem nenhuma intervenção humana.

Como as caixas-d'água utilizadas eram de pequeno volume, o processo de enchimento ocorria várias vezes ao dia, seguido de um processo de esvaziamento, quando não havia aproveitamento da energia solar, que neste momento ficava como "energia ociosa". Estes tempos de esvaziamento representaram cerca de 20% do tempo gasto com os enchimentos.

A partir da tensão média [V] e da corrente média [I] coletadas nos últimos 5 minutos era calculada a potência média [P] na saída dos painéis, em Watts. Ao final de cada hora, o datalogger calculava o valor médio [Pm] para as potências instantâneas.

$$P_m = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^{3600} P_i \quad \text{onde} \quad P_i = V_i \times I_i \quad (1)$$

Dentro de cada hora era feita a integração da energia elétrica efetivamente consumida [EC], e energia esta utilizada pelos sistemas, na forma de corrente e tensão, em Wh.

$$EC = \int_{t=0}^{t=3600} P_i(t) \times dt \quad (2)$$

sendo [t] o tempo de consumo de energia.

O cálculo da irradiação global diária [RGd] era feito segundo a equação:

$$RGd = \int_{t=0}^{t=86400} Rg(t) \times dt \quad (3)$$

Os registros de acionamento dos sensores de nível coletados permitiram calcular:

- tempo de esvaziamento da caixa superior (não havia bombeamento);
- tempo para completar cada enchimento da caixa superior;
- número n de enchimentos que ocorria no dia.

O volume de água bombeado por dia [Q], em L/dia, é o produto da capacidade da caixa superior (74,45 L) por essa quantidade [n] de ocorrências, segundo a equação:

$$Q = 74,45 \times n \quad (4)$$

O Índice de Bombeamento Volumétrico [Ibv] foi calculado em função do volume de água bombeado [Q] e da Irradiância Global diária [E], segundo a equação:

$$Ibv = \frac{Q}{E} \quad (5)$$

Para validar os valores de vazão, irradiância e energia consumida foram traçadas curvas de regressão linear e determinadas suas respectivas equações, obtendo-se o coeficiente de correlação linear de Pearson [R]. Este coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas [E] e [Q] (GABRIEL FILHO, 2009). Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, porém inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação de Pearson é dado por:

$$R = \frac{\sum E \cdot Q - \frac{\sum E \sum Q}{n}}{\sqrt{\left(\sum E^2 - \frac{(\sum E)^2}{n} \right) \left(\sum Q^2 - \frac{(\sum Q)^2}{n} \right)}} \quad (6)$$

O mesmo foi feito também para obter o coeficiente de correlação linear de Pearson entre as variáveis quantitativas [EC] e [Q]:

$$R = \frac{\sum EC \cdot Q - \frac{\sum EC \sum Q}{n}}{\sqrt{\left(\sum EC^2 - \frac{(\sum EC)^2}{n}\right)\left(\sum Q^2 - \frac{(\sum Q)^2}{n}\right)}} \quad (7)$$

São pressupostos desta regressão linear uma distribuição normal dos resíduos e que são independentes e identicamente distribuídos (são aleatórios e com variância constante). Segundo Moreira (2009), tais pressupostos são válidos para o presente modelo proposto.

Por fim, para todas as análises realizadas, foi calculado também o coeficiente de determinação $[R^2]$, indicando em % a parte da variabilidade encontrada para y que é explicada por x , sendo o valor complementar restante relativo a outros fatores. Na presente análise, considerou-se como um bom ajuste do modelo valores de $[R^2]$ próximo de 1. Para coeficiente de determinação neste caso (próximos de 1), diz-se que a relação linear entre as duas variáveis é forte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados para cada mês em que ocorreram os testes. Para tanto, foram discutidos os itens: Irradiância e Energia Consumida em função da Vazão, isto é, do Volume de Água Bombeado por dia e mês, ajustando curvas de regressão para aproximar um modelo matemático das variáveis envolvidas.

A Tabela 3 mostra os valores médios diários e os totais médios mensais do volume bombeado $[Q]$, da irradiância $[E]$ e da energia consumida $[EC]$.

Tabela 3 – Valores médios diários e mensais do Volume Bombeado, da Irradiância e da Energia Consumida.

Dia	Abril			Maio			Junho			Julho		
	Q (L)	E (W/m ²)	EC (Wh)									
1	2.904	228,9	296	-	-	-	1.340	171,6	161	-	-	-
2	2.829	227,5	295	-	-	-	1.563	183,6	177	0	21,3	3
3	2.904	248,4	305	-	-	-	1.787	221,8	226	1.563	108,9	171
4	2.308	181,1	237	1.117	102,1	100	1.861	227,2	212	670	79,2	84
5	2.234	164,7	224	2.531	267,0	189	1.563	185,5	177	447	66,5	68
6	1.191	93,3	133	2.457	248,4	188	1.712	209,5	182	2.308	194,2	247
7	2.010	177,0	212	1.638	193,4	223	1.638	187,3	182	2.382	205,0	249
8	2.755	223,8	281	2.382	164,4	252	0	75,7	6	1.638	154,6	181
9	2.308	206,9	242	1.936	170,8	211	1.415	201,6	167	1.638	143,0	174
10	2.680	221,6	273	2.085	182,8	220	0	31,0	1	0	28,5	5
11	2.978	253,1	302	2.234	197,9	238	521	100,8	59	0	11,9	1
12	2.755	233,4	287	2.382	212,7	258	670	131,9	91	2.159	194,9	241
13	1.415	113,1	152	2.234	187,8	229	1.489	190,8	171	2.457	212,6	259
14	1.861	155,3	191	1.861	144,7	198	1.638	199,6	188	2.234	173,5	238
15	2.606	210,0	273	1.266	96,4	145	1.787	213,0	199	2.457	174,0	256
16	2.755	210,7	287	2.457	203,3	269	447	88,4	51	2.010	153,6	213
17	2.978	245,1	312	2.606	218,5	291	1.861	199,1	204	2.308	188,6	237
18	2.978	250,6	304	2.531	211,6	270	1.787	217,2	197	1.712	165,0	178
19	2.755	245,8	283	2.531	189,1	246	1.638	220,5	186	893	104,7	107
20	2.531	223,8	269	2.457	188,7	264	1.787	222,3	193	1.638	125,2	181
21	2.755	207,8	289	2.531	222,6	269	1.712	218,4	187	2.457	206,0	254
22	2.382	202,2	250	2.457	226,5	265	1.712	214,6	187	2.234	187,2	232
23	1.638	130,3	172	2.531	221,1	269	1.489	184,6	156	149	43,7	32
24	2.382	188,8	251	2.457	208,1	260	223	95,7	38	0	24,4	3
25	1.861	162,1	204	1.563	151,8	177	0	23,2	1	0	24,9	4
26	2.308	199,6	243	1.936	143,1	204	521	116,0	67	223	51,7	30
27	2.308	194,6	252	1.340	103,8	144	893	131,0	101	0	57,7	23
28	2.904	230,5	303	670	75,1	76	149	90,9	23	1.117	108,0	127
29	2.829	245,5	303	2.085	145,1	229	1.712	216,9	185	1.117	108,2	126
30	2.606	234,0	281	2.010	151,6	219	745	132,5	95	1.340	127,0	126
31	-	-	-	1.861	138,5	198	-	-	-	2.085	161,6	229
Média	2.457	203,6	-	2.077	177,4	-	1.189	163,4	-	1.308	120,2	-

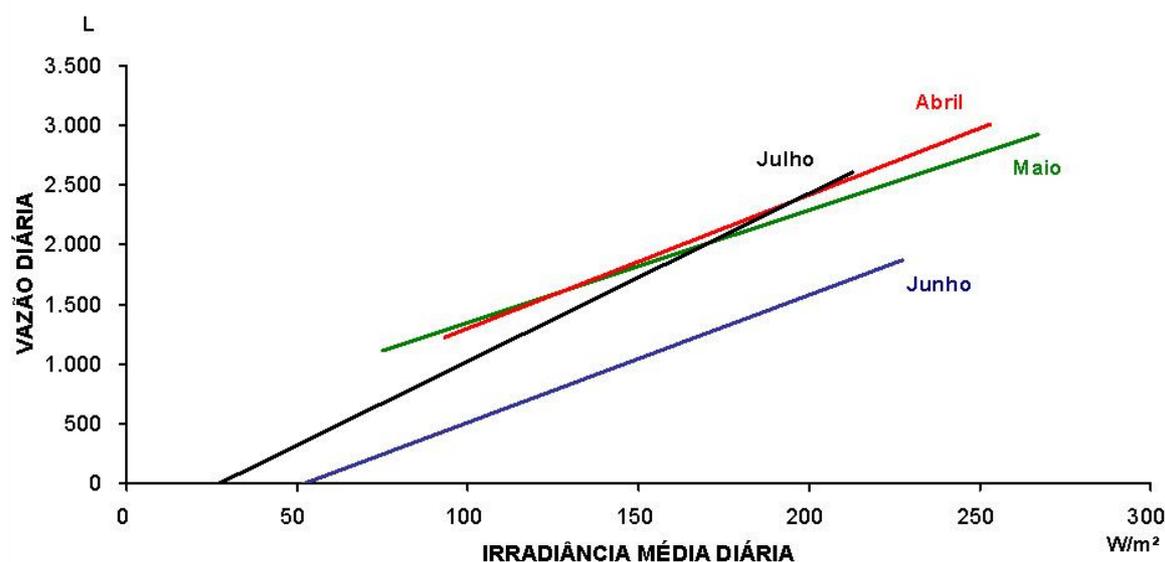
Os volumes médios bombeados e os índices de bombeamento volumétrico diários estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre arranjos dos painéis monocristalinos.

ITENS COMPARADOS	Abril	Maió	Junho	Julho
	2 painéis	2 painéis	1 painel	2 painéis
Volume médio diário (L)	2.457	2.077	1.189	1.308
Ibv (L/W/m2)	12,0	11,7	7,3	10,9

É possível observar, na Tabela 4, que o volume bombeado pelo arranjo com 2 painéis e o índice de bombeamento volumétrico foram maiores, mas não o dobro do encontrado para 1 painel monocristalino.

Aplicando regressão linear aos valores diários de vazão e irradiância média da Tabela 3, foi possível obter curvas de tendência para os meses de abril, maio, junho e julho, mostradas na Figura 4.

**Figura 4** – Vazão x irradiância média por dia.

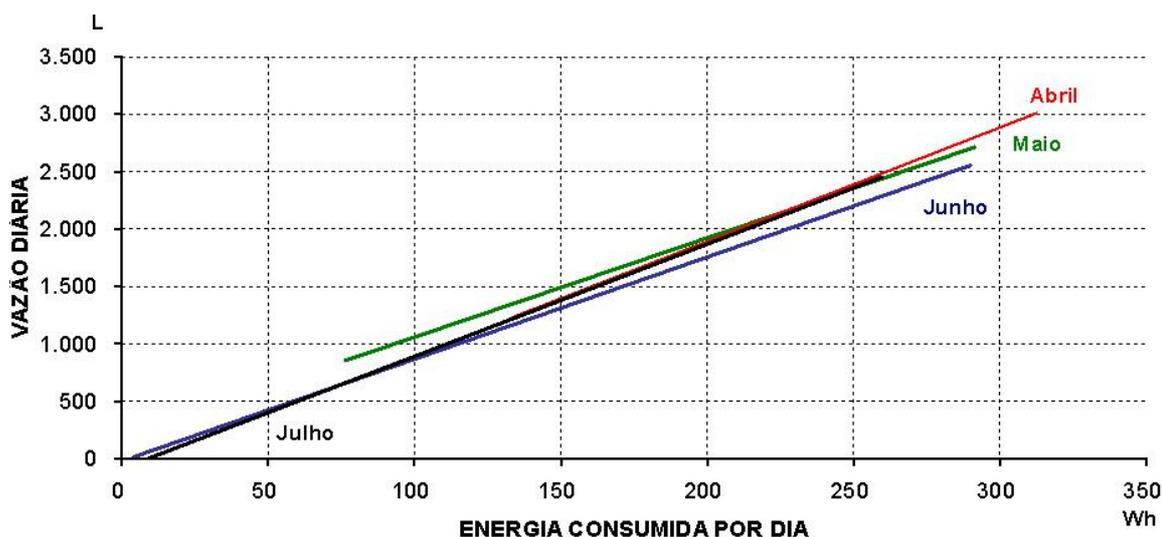
Observa-se uma diferença praticamente constante entre a vazão diária de abril e junho, independente da irradiância sem, entretanto dobrar o volume bombeado, apesar do dobro de painéis.

A Tabela 5 mostra as equações de regressão resultantes das linhas de tendência da Figura 4, onde Q = volume diário de água bombeado e E = irradiância média diária.

Tabela 5 – Equações de regressão (vazão x irradiância)

VAZÃO X IRRADIÂNCIA	Abril 2 painéis	Maio 2 painéis	Junho 1 painel	Julho 2 painéis
Coefficiente de Pearson	0,97	0,88	0,97	0,98
Equação de Regressão	$Q = 11,166.E + 183,12$	$Q = 9,4225.E + 405,13$	$Q = 10,681.E - 556,65$	$Q = 14,054.E - 381,34$
R ²	0,93	0,77	0,95	0,96

A Figura 5 apresenta a variação do volume de água bombeado em função da energia consumida pelo sistema e mostra também o resultado da comparação entre cada arranjo testado, através de regressão linear e do traçado de suas curvas de tendência.

**Figura 5** – Vazão x energia consumida por dia.

As equações de regressão resultantes para essas linhas de tendência traçadas estão expressas na Tabela 6, onde Q = Vazão em L e EC = Energia Consumida em Wh.

Tabela 6 – Equações de regressão (vazão x energia consumida)

VAZÃO X ENERGIA CONSUMIDA	Abril 2 painéis	Maió 2 painéis	Junho 1 painel	Julho 2 painéis
Coeficiente de Pearson	0,99	0,90	0,99	0,99
Equação de Regressão	$Q = 9,9336.EC - 95,332$	$Q = 8,6406.EC + 196,33$	$Q = 9,1532.EC - 53,856$	$Q = 9,8183.EC - 89,696$
R ²	0,99	0,81	0,99	0,99

A comparação entre os quatro arranjos utilizados no experimento permite mostrar a tendência linear entre valores médios diários de vazão, irradiância e energia consumida.

Pela Tabela 6, para os meses de abril, junho e julho, tem-se $R^2 = 0,99$, o que significa que 99% da variabilidade encontrada para Q é explicada por EC e apenas os restantes 1% se devem a outros fatores. Ainda, como o coeficiente de determinação é bastante elevado (muito próximo de 1), podemos concluir que a relação linear entre as duas variáveis é forte. Considerações análogas para o mês de maio, considerando $R^2 = 0,81$.

Pelas linhas de tendência por regressão linear, observa-se que seus coeficientes angulares são muito próximos (Tabela 6 e Figuras 4 e 5). Pode-se observar pela Figura 5, 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.

4 CONCLUSÕES

A variação dos sistemas de bombeamento testados obedece a equações lineares com grande exatidão, conforme relacionamentos as correlações obtidas entre volume de água bombeado, irradiância média diária 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 quatro meses variou entre 1.100 e 2.500 litros. Com a 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 o bombeamento.

A energia consumida pela carga apresentou pouca variação 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 sistema de bombeamento com 2 painéis efetivamente apresenta volume maior de água, no entanto a utilização de apenas 1 painel pode ser uma solução econômica se o volume de água for de até 1.500 L diários.

5 REFERÊNCIAS

CRESESEB. **Tutorial de energia solar fotovoltaica: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão**. 2003. 174 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Instituto de Eletrotécnica e Energia/Escola Politécnica/Instituto de Física/Faculdade de Economia e Administração), São Paulo, 2003.

FIORENTINO, J. J. **Análise do desempenho de um conjunto de módulos fotovoltaicos aplicados para energização rural**. 2004, 143 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

GABRIEL FILHO, L. R. A. ; GABRIEL, L. R. A. ; CREMASCO, C. P. **Bioestatística e suas aplicações**. 1. ed. Adamantina: Espaço Cultural do Brasil, 2009. v. 1. 198 p.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; SERAPHIM, O. J. Análise diferencial da potência máxima gerada por um sistema solar fotovoltaico. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 2, 2010. Disponível em: <<http://200.145.140.50/index.php/energia/article/view/60>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

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.

MOREIRA, C. A. M. **Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Relatório de desenvolvimento humano 2007/2008**. Disponível em <<http://www.pnud.org.br/idh/>>. Acesso em 1 jul. 2009.

SIQUEIRA, J. A. C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. 176 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

SÚRI, M. et al. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. **Solar Energy**, Ispra, v. 81, p. 1295–1305, 2007.

TIAGO FILHO, G. L. **Carneiro hidráulico: o que é e como construí-lo**. Itajubá, 2002. Disponível em: <<http://tecnociencia.inf.br/comunidade/arqautor/diversos/bombacarneiro.swf>>. Acesso em: 1 dez. 2009.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Brasília, DF: INEMET; Pax, 2001. 532 p.