

ROSANA KRAUSS NIEDZIALKOSKI

**DESEMPENHO DE PAINÉIS SOLARES MONO E POLICRISTALINOS
EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
JUNHO- 2013

ROSANA KRAUSS NIEDZIALKOSKI

**DESEMPENHO DE PAINÉIS SOLARES MONO E POLICRISTALINOS
EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Co-orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
JUNHO- 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

N566d Niedzialkoski, Rosana Krauss
 Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água. / Rosana Krauss Niedzialkoski — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.
 57 p.

 Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
 Co-orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
 Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
 Bibliografia.

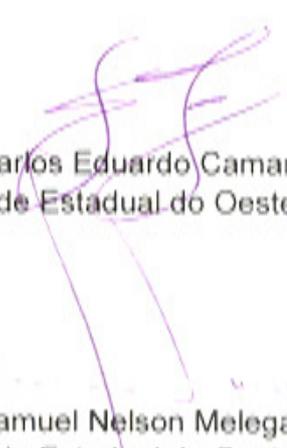
 1. Energia. 2. Eficiência energética. 3. Irradiação solar. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.7932

ROSANA KRAUSS NIEDZIALKOSKI

**"Desempenho de painéis solares mono e policristalinos
em um sistema de bombeamento de água"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:  Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

 Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

 Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza
Universidade Federal do Paraná – UFPR/Curitiba

Cascavel, 07 de junho de 2013.

À minha família, Valmir e Isabela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível!

Ao meu esposo Valmir, pela compreensão, incentivo e ajuda dispensada no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Nogueira, pelo apoio, orientação e paciência dedicados.

Ao Professor Jair Antônio Cruz Siqueira pela co-orientação, bem como a todos os demais professores que de alguma forma também deram sua contribuição.

Aos colegas Cleber Bezerra, Magno Vidotto e Angélica Buzinaro pela ajuda na montagem e desenvolvimento desta pesquisa.

À Unioeste e ao Programa de Pós Graduação "Mestrado em Energia na Agricultura" pela oportunidade e infra-estrutura cedidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/DS pela bolsa de estudos que possibilitou dedicação integral a este trabalho.

E, principalmente, aos meus pais, Fauri e Adelaide, que sempre me incentivaram e deram todo suporte necessário para ir em busca de meus objetivos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	6
Figura 2 – Células de silício monocristalino.	7
Figura 3 – Células de silício policristalino.	7
Figura 4– Células de silício amorfo.....	8
Figura 5 – Sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica.....	9
Figura 6 – Curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico (A) e curva típica de potência x tensão de um sistema fotovoltaico (B).	10
Figura 7 – Efeito causado pela variação da intensidade luminosa na curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico.	11
Figura 8 – Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico.	11
Figura 9 – Sistema de bombeamento fotovoltaico de água.	13
Figura 10 – visão geral do módulo fotovoltaico policristalino instalado.	17
Figura 11– visão geral do módulo fotovoltaico monocristalino instalado.	17
Figura 12 – Motobomba de superfície Shurflo 8000.....	18
Figura 13 – Estrutura metálica e demais componentes do sistema.	19
Figura 14 – Disjuntor bipolar de 25A.....	20
Figura 15 – Piranômetro Kipp & Zonen para medição da irradiação solar.....	21
Figura 16– Hidrômetro SAPPEL AQUARIUS.	21
Figura 17 – Datalogger Campbell e conexões.....	22
Figura 18 – Termopar tipo J.	23
Figura 19 – Divisor de tensão; resistência shunt.	23
Figura 20 – Esquema contendo os componentes do sistema de bombeamento utilizado.	24
Figura 21– Volume e irradiação solar média diária do sistema monocristalino.	32
Figura 22 – Volume e irradiação solar média diária do sistema policristalino.	32
Figura 23 – Vazão e irradiação solar para o sistema monocristalino.	33
Figura 24 – Vazão e irradiação solar para o sistema policristalino.	33
Figura 25 – Vazão e energia consumida para o sistema monocristalino.....	34
Figura 26 – Vazão e energia consumida para o sistema policristalino.....	34
Figura 27 – Energia disponível e Energia consumida ao longo do dia.	35
Figura 28 – Energia disponível e Energia consumida ao longo do dia.	36
Figura 29 – Energia disponível x Energia consumida para o sistema monocristalino.	37

Figura 30 – Energia disponível x Energia consumida para o sistema policristalino.....	37
Figura 31– Corrente x tensão para os sistemas monocristalino e policristalino.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados para operação do sistema de bombeamento.....	16
Tabela 2 - Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos KS50 da Solartec	17
Tabela 3 - Especificações técnicas do módulo fotovoltaico HG135 da Solarterra	18
Tabela 4 - Especificações técnicas da moto bomba Shurflo	19
Tabela 5 - Equipamentos utilizados para as medições e coleta de dados.....	20
Tabela 6 - Especificações do Piranômetro Kipp & Zonen	21
Tabela 7 – Principais especificações técnicas do sistema de aquisição de dados CR1000 Campbell Scientific.....	22
Tabela 8 – Eficiência de cada painel em função das faixas de temperatura.....	38
Tabela 9 – Eficiências.....	40

NIEDZIALKOSKI, Rosana Krauss MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Maio de 2013. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água.** Professor Orientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira. Professor Co-orientador Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

RESUMO

A energia solar constitui-se numa opção limpa e renovável de produção de energia, podendo ser utilizada para os mais diversos fins, tais como aquecimento de água, iluminação, energização rural, bombeamento de água, etc. Dentre essas utilizações, o bombeamento de água é uma das tecnologias mais disseminadas quanto ao emprego de energia solar fotovoltaica. O presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de avaliar um sistema de bombeamento de água acionado por painel fotovoltaico instalado nas dependências da Universidade Estadual do Oeste Paraná, Campus Cascavel - PR. Foram coletados dados de irradiação solar, volume de água bombeado, tensão e corrente elétrica que alimentam a motobomba, temperatura do painel para dois diferentes tipos de painéis fotovoltaicos (monocristalino e policristalino). Com os dados medidos foram determinados a vazão para cada tipo de painel, os valores de eficiência do painel, eficiência da motobomba, eficiência global e as relações entre vazão e irradiação solar, vazão e energia consumida, energia disponível e energia consumida, bem como a influência da temperatura na eficiência dos painéis fotovoltaicos. Analisaram-se, também, custos específicos do sistema de bombeamento como custo por litro de água bombeado e custo por energia consumida. O volume médio diário de água bombeado no sistema monocristalino foi de 3.536,45 litros e 4.182,55 litros no sistema policristalino. A eficiência dos painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalino foi de 9,40% e de 6,57%, respectivamente. O sistema policristalino apresentou maior eficiência global e menor custo por litro de água bombeado.

Palavras Chave: Energia, Eficiência energética, Irradiação solar

NIEDZIALKOSKI, Rosana Krauss MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. May, 2013. **Performance mono and polycrystalline solar panels in a water pumping system.** Advisor Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira. Co-supervisor Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

Solar energy is a clean and renewable energy production option and can be used for various purposes such as, water heating, lighting, rural energizing, water pumping, etc. Among these uses, water pumping is one of the most widespread technologies as the use of solar photovoltaics. This work was developed with the purpose of evaluating a water pumping system driven by photovoltaic panel located at State University of West Paraná, Campus Cascavel - PR. Data of solar radiation were collected, volume of water pumped, voltage and electric current that feeds the pump, panel temperature for two different types of photovoltaic panels (monocrystalline and polycrystalline). With measured data were determined for each type of flow panel values panel efficiency, effectiveness and overall efficiency of the pump and the relationship between flow rate and solar radiation, flow and consumed energy, energy available and energy consumed, as well as influence of temperature on the efficiency of photovoltaic panels. We analyzed also the specific costs of the pumping system as cost per liter of water pumped and cost per energy consumed. The average daily volume of water pumped into the system was 3536.45 liters monocrystalline and polycrystalline 4182.55 liters in the system. The efficiency of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels were 9.40% and 6.57%, respectively. The polycrystalline system showed greater overall efficiency and lower cost per liter of water pumped.

Keywords: Energy, Energy efficiency, Solar irradiation

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE.....	x
INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Energias renováveis.....	3
2.2 Energia solar.....	3
2.2.1. Avanço da energia solar.....	4
2.2.2. Instrumentos de medidas solarimétricas	5
2.3. Energia solar fotovoltaica.....	5
2.3.1. Células solares	6
2.3.2 Sistemas fotovoltaicos	9
2.4 Bombeamento de água	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Localização do experimento.....	16
3.2 Material	16
3.2 .1 Materiais utilizados na montagem do experimento	16
3.2.2 Equipamentos de Medições	20
3.2.2.1 Piranômetro	20
3.2.2.2 Hidrômetro	21
3.2.2.3 Datalogger	22
3.2.2.4 Termopar	22
3.2.2.5 Divisor de tensão e resistência Shunt	23
3.3 Métodos.....	24
3.3.1 Instalação e funcionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico.....	24
3.3.2 Sistema de Aquisição e processamento dos dados	25
3.3.2.1 Volume de água bombeado	25

3.3.2.2 Irradiação solar	25
3.3.2.3 Tensão e corrente.....	25
3.3.2.4 Temperatura.....	26
3.3.3 Parâmetros calculados.....	26
3.3.3.1 Potência	26
3.3.3.2 Determinação da Altura Manométrica	26
3.3.3.3 Vazão	26
3.3.3.4 Energia disponível e energia consumida	27
3.3.3.5 Eficiências	27
3.3.3.5 Custos específicos do sistema de bombeamento	28
3.3.4 Avaliações e comparações entre os diferentes tipos de células fotovoltaicas	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Considerações.....	31
4.2 Altura manométrica.....	31
4.3 Volume diário bombeado e irradiação solar	31
4.4 Vazão em função da irradiação solar	33
4.5 Vazão em função da energia consumida.....	34
4.6 Energia disponível e Energia consumida	35
4.7 Eficiências	38
4.8 Influência da temperatura na eficiência do painel fotovoltaico	38
4.9 Volume total bombeado/energia total disponível.....	39
4.10 Volume total bombeado/ energia total consumida.....	39
4.11 Custos específicos do sistema de bombeamento.....	40
4.12 Tabela-resumo das eficiências do sistema	40
5. CONCLUSÕES	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

INTRODUÇÃO

A oferta de suprimento energético para comunidades rurais isoladas e áreas remotas tem sido um constante desafio, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, devido às enormes disparidades econômicas e sociais. Visando solucionar este problema, vem-se empregando cada vez mais sistemas descentralizados de suprimento de energia alternativa, utilizando recursos renováveis (MARINI; ROSSI, 2005).

Além disso, segundo Basso et al. (2010) a conscientização da importância do meio ambiente também tem incentivado o estudo de novas fontes energéticas menos poluentes. Pode-se citar como exemplo a energia eólica, biomassa e energia solar, que além de serem consideradas energias limpas por não agredirem ao meio ambiente, também são renováveis, ou seja, a reposição natural de suas fontes no meio ocorre de forma mais rápida do que o seu consumo pelo homem.

O sol é incontestavelmente a maior fonte de energia para a humanidade, sendo a fonte primária da maior parte da energia disponível na Terra. O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras (OLIVEIRA et al., 2008).

O Brasil apresenta vantagens para a utilização da energia proveniente do sol devido a sua grande extensão territorial e também por possuir níveis elevados de irradiação solar durante praticamente o ano todo, devido a sua localização geográfica.

A energia solar pode ser utilizada no aquecimento de água, por meio dos coletores termossolares e para geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos. No meio rural a energia elétrica gerada por meio dos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada para uma série de finalidades, como iluminação, eletrificação rural, acionamento de motores e no bombeamento de água.

O bombeamento de água é uma das atividades mais difundidas quanto ao emprego da energia solar fotovoltaica (KOLLING et al., 2004). A água bombeada pode ser utilizada para abastecimento doméstico e higienização, bem como para irrigação, piscicultura e abastecimento em sistemas de criação de animais no setor agrícola.

O aproveitamento da energia solar, quando relacionado ao uso da água, pode contribuir para a fixação do homem no campo, principalmente tratando-se daquelas regiões que não dispõem de água potável, devido à falta de energia. Contudo para o funcionamento adequado dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, é necessário conhecer dados

da irradiação solar da região, características técnicas da motobomba e dos painéis fotovoltaicos a serem utilizados.

Teve-se por objetivo no presente trabalho analisar um sistema de bombeamento de água alimentado por painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalino, na região de Cascavel/PR, no período de novembro a dezembro de 2012. Os objetivos específicos foram:

- Determinar a eficiência dos painéis, da motobomba e a eficiência global do sistema;
- Determinar a influência da temperatura na eficiência dos painéis fotovoltaicos e,
- Calcular os custos específicos do sistema de bombeamento (R\$/ L e R\$/kWh), ao longo da vida útil do sistema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias renováveis

O suprimento energético às comunidades rurais, por meio de fontes convencionais de geração de energia, nem sempre é a melhor alternativa para satisfazer as necessidades do setor. Isto se deve em parte à descentralização das comunidades e ao fornecimento de energia que pode ter custo elevado. Segundo Presenço (2007), em algumas situações os custos do transporte e da distribuição de energia acabam se tornando mais significantes do que a própria geração de energia.

Neste cenário, as energias renováveis, tais como a energia solar, eólica e biomassa começam a disputar espaço com as tecnologias convencionais. Fiorentino e Seraphim (2005) comentam que a geração de energia elétrica em áreas rurais isoladas, por meio de recursos naturais renováveis disponíveis na propriedade rural, promoverá um aumento na produção de alimentos, elevação da renda e melhoria na qualidade de vida do homem do campo.

Além disso, as fontes de energia renováveis têm vantagens, tais como a redução na dependência dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a redução de emissões de carbono para a atmosfera (BAÑOS, et al, 2011).

2.2 Energia solar

O Sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a 10 mil vezes o consumo mundial anual de energia neste período. A fração de irradiação solar que atinge o solo é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. Se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá também uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (CRESESB/CEPEL, 1999).

A irradiação solar, além de ser responsável pela manutenção de vida na terra, é indiretamente responsável pelas demais fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis), constituindo-se em uma inesgotável fonte energética, podendo ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica ou ser convertida em energia elétrica.

A variável básica para o aproveitamento da energia solar é a irradiação solar incidente no sistema de geração de eletricidade. Segundo Reis (2003) os níveis de irradiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra variam com as estações do ano e também com a região, notadamente pelas diferenças de latitude, condições meteorológicas e altitude.

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais utilizados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, graças as características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica (ANEEL, 2005).

2.2.1. Avanço da energia solar

A energia solar está ganhando importância meio século depois de ser proposta. A princípio, os equipamentos de conversão de energia solar apoiavam-se na busca por empresas do setor de telecomunicações. O segundo grande incentivo ocorreu quando iniciaram os programas aeroespaciais. Até a década de 60 a maior parte dos sistemas existentes mantiveram como finalidade principal a geração de energia elétrica para satélites espaciais (CRESESB/CEPEL, 2008).

Com a crise energética, em 1973, o mundo percebeu sua dependência por combustíveis fósseis e a partir de então desenvolveram-se estudos direcionados para o aproveitamento de outras fontes de energia. Foi nesta época que iniciou, de fato, o desenvolvimento de sistemas de energia solar fotovoltaica para o uso residencial e comercial, em aplicações autônomas e conectadas à rede elétrica.

Segundo De Andrade et al. (2008) o sistema de bombeamento de água suprido por energia solar fotovoltaica começou a ser utilizado a partir de 1977 em vários países do mundo, principalmente na África, Ásia e América do Sul. No Brasil, as primeiras experiências com sistema de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica datam do início da década de 80.

Nos últimos anos inúmeras aplicações da energia solar vêm sendo desenvolvidas. Segundo o EREC (2009), foram instalados 7,2 GW de sistemas fotovoltaicos em todo o mundo e no início de 2010 mais de 22 GW de sistemas fotovoltaicos já tinham sido instalados.

Tudo que é acionado por eletricidade é passível de utilizar energia solar. A energia solar pode ser utilizada em sistemas de irrigação de culturas; refrigeração de alimentos, vacinas e remédios; aquecimento e iluminação artificial; conforto térmico e iluminação.

2.2.2. Instrumentos de medidas solarimétricas

As medidas solarimétricas são fundamentais para o estudo e previsão de funcionamento de sistemas alimentados por energia solar. Com um histórico das medidas é possível analisar a viabilidade de implantação de sistemas térmicos e/ou fotovoltaicos garantindo o máximo aproveitamento ao longo de seu funcionamento em virtude das variações da intensidade da irradiação solar.

Segundo o CRESESB/CEPEL (1999) são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos de acordo com as normas preestabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia): de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. As medições padrões são: irradiação global e difusa no plano horizontal e irradiação direta normal.

Segundo Riffel (2005), os principais instrumentos para medição de irradiação solar são:

- Pirâmetro – utilizado para medição da irradiação solar global (direta + difusa). A principal vantagem do pirâmetro é poder fazer medições em diversas escalas de tempo, dependendo do equipamento de aquisição de dados;
- Piroheliômetro – utilizado para medir a irradiação solar direta;
- Heliógrafo – usado para medir a duração da insolação;
- Actinógrafo – mede a irradiação total ou sua componente difusa.

2.3. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz do sol em eletricidade, o chamado efeito fotovoltaico. Tal efeito ocorre em materiais semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons, banda de valência, e de outra banda totalmente vazia, banda de condução (CRESESB/CEPEL, 1999).

O material mais utilizado na fabricação de células solares é o silício. Porém, devido à falta de elétrons livres, o silício puro não é um bom condutor de elétrons. Por este motivo, costuma-se acrescentar, por processo de dopagem, certa porcentagem de fósforo e boro ao mesmo.

O incremento de elementos de fósforo ao silício tem por objetivo criar uma camada de elétrons livres positivos (tipo P) e a de elementos de boro, criar camadas de elétrons

negativos (tipo N). Com a junção destes elementos, os elétrons livres de silício tipo N tendem a preencher os vazios da estrutura de silício formando um campo elétrico (Figura 1).

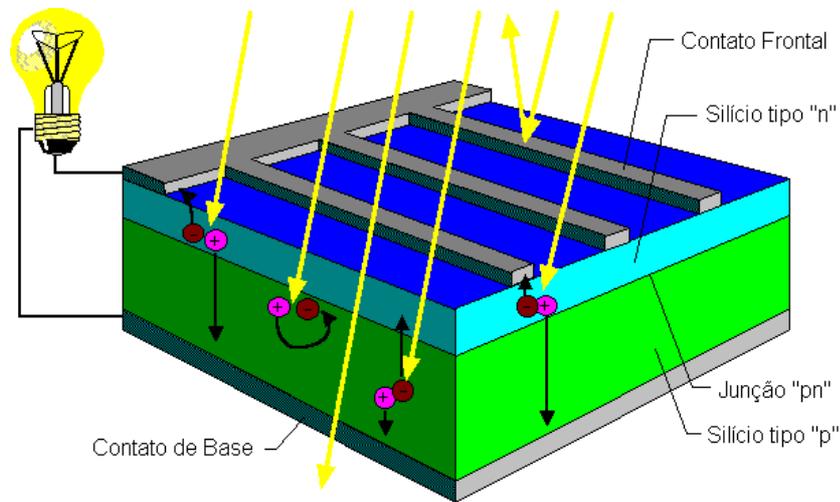


Figura 1 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.
Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

Segundo Tolmasquim (2003), quando a junção P-N é excitada pela luz solar, os fótons da luz se chocam com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Assim, devido ao campo elétrico, os elétrons fluem da camada P para a camada N, por meio de um condutor externo, gerando um fluxo de elétrons (corrente elétrica).

2.3.1. Células solares

Segundo Januzzi, Varella e Gomes (2009) as células fotovoltaicas disponibilizadas comercialmente são elaboradas à base de silício monocristalino, policristalino e amorfo, mas também há células fabricadas com outros materiais, como o disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe).

O silício é o material mais utilizado na fabricação de células solares, não somente pelo fato de ser o material mais abundante na Terra, mas pela larga experiência alcançada pela indústria de microeletrônica, por seu baixo índice de contaminação e por sua alta durabilidade (CECCHINI, 2003).

Segundo Tolmasquim (2003) as células de silício monocristalino (Figura 2) são produzidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino em fornos especiais. São obtidas por corte de barras em forma de pastilhas finas (300 μm de espessura). Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é da ordem de 15%.

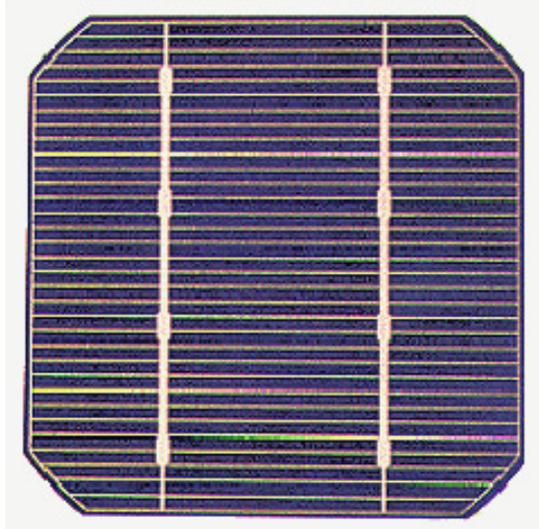


Figura 2 – Células de silício monocristalino.
Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

As células fotovoltaicas a base de silício monocristalino têm a desvantagem de apresentarem alto custo de produção, devido às quantidades de materiais utilizados e a energia envolvida na sua fabricação (CRESESB/CEPEL, 2008).

As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de porções de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício resfria lentamente e solidifica-se. A Figura 3 apresenta a estrutura de uma célula fotovoltaica de silício policristalino.

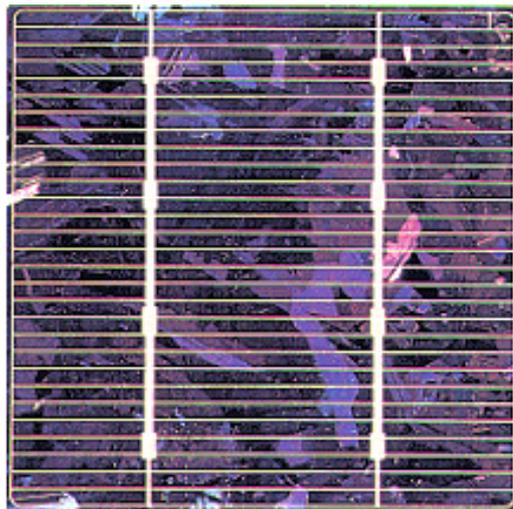


Figura 3 – Células de silício policristalino.
Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

Neste processo, os átomos não se organizam em um único cristal, formando assim uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na

conversão de luz solar em eletricidade é de aproximadamente 13%.

Para a produção das células policristalinas, a quantidade de material utilizado é praticamente a mesma utilizada na produção de células monocristalinas, porém, a energia necessária para produzi-las é significativamente reduzida (CRESESB/CEPEL, 2008).

No intuito de utilizar menor quantidade de material semicondutor na fabricação de células fotovoltaicas, inúmeros estudos com filmes finos vêm sendo desenvolvidos. O silício amorfo é um dos destaques nessa área (Figura 4).

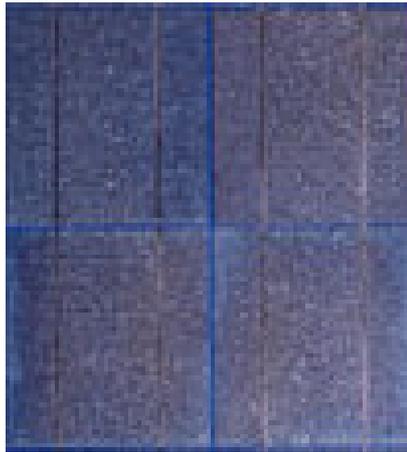


Figura 4– Células de silício amorfo
Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

As células de silício amorfo são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%.

Os principais obstáculos para a adoção dos filmes finos estão relacionados ao nível de confiabilidade quando comparados com células cristalinas. Segundo (CRESESB/CEPEL, 2008) no caso do silício amorfo, estes obstáculos estão relacionados principalmente com a estabilidade do material. No entanto, este efeito tem sido reduzido adotando-se células de múltiplas camadas.

Um enorme progresso tem sido feito em anos recentes no número de materiais fotovoltaicos e intervenções em termos de eficiência de conversão, eficiências na faixa de 18 a 24 % têm sido alcançadas na tradicional base de silício fabricado com ambos os materiais, mono e policristalino.

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico compreende o agrupamento de painéis fotovoltaicos interligados capazes de converter a energia solar, por meio das células solares, diretamente em energia elétrica, conforme a Figura 5. Outros equipamentos, tais como controlador de carga, sistema para armazenamento de energia (baterias) e inversor, dependendo do uso final, são opcionais.

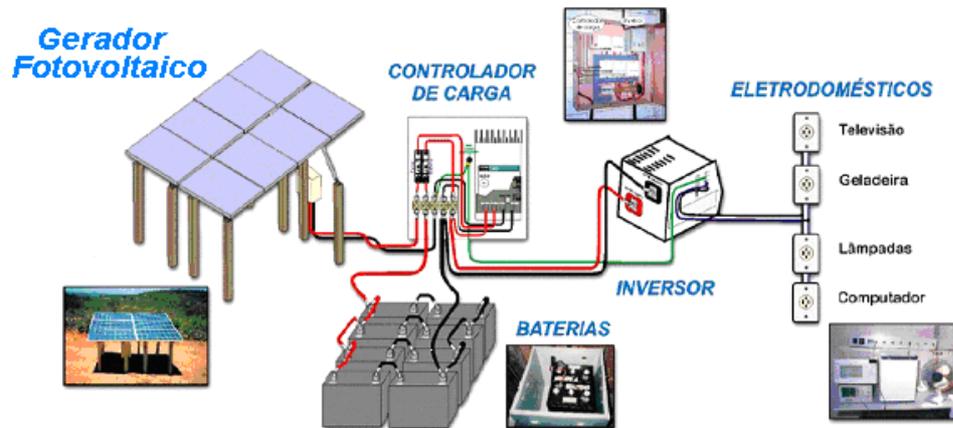


Figura 5 – Sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica.
Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

Segundo Greenpro (2004) a ligação de várias células na produção dos módulos fotovoltaicos se deve à reduzida potência das células solares. Assim, com o arranjo das células, são alcançados tensão e corrente em nível suficiente para o aproveitamento da energia elétrica gerada.

Segundo CRESESB/CEPEL (1999) as principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}): tensão entre os terminais de uma célula/módulo ou gerador fotovoltaico, quando a corrente em seus terminais é nula;
- Corrente de Curto Circuito (I_{cc}): corrente que circula por uma célula/módulo ou gerador fotovoltaico, quando a tensão em seus terminais é nula;
- Potência Máxima (P_{max}): Ponto da curva corrente *vs* tensão para o qual o produto tensão x corrente é máximo;

- Tensão de Potência Máxima (V_{mp}): tensão que produz o ponto da curva corrente vs tensão de máxima potência;
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp}): é a corrente que produz o ponto da curva corrente vs tensão de máxima potência.

A representação típica das características elétricas de saída de um dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, gerador) é apresentada na Figura 6.

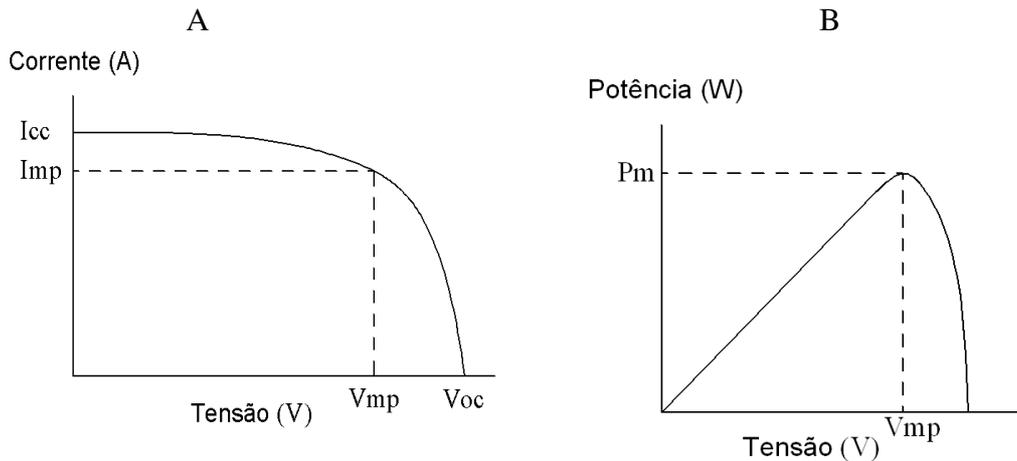


Figura 6 – Curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico (A) e curva típica de potência x tensão de um sistema fotovoltaico (B).

Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para irradiação de 1000Wm^{-2} (irradiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C na célula.

Os principais fatores que interferem no desempenho de um painel fotovoltaico são a intensidade luminosa e a temperatura das células. A corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento do nível de insolação na célula aumenta a temperatura da mesma e conseqüentemente faz com que a eficiência do módulo caia, conforme pode ser visto nas Figuras 7 e 8. (CRESESB/CEPEL, 2008).

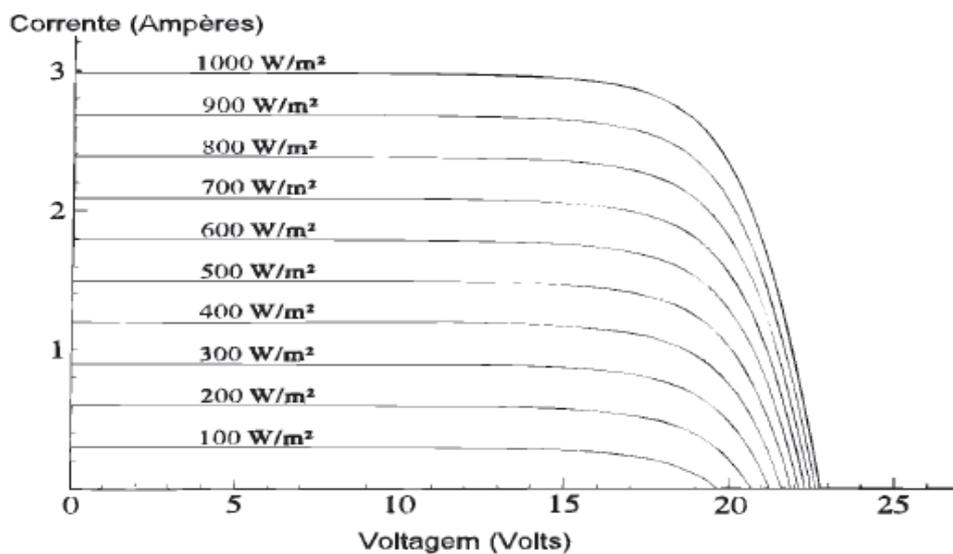


Figura 7 – Efeito causado pela variação da intensidade luminosa na curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico.

Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

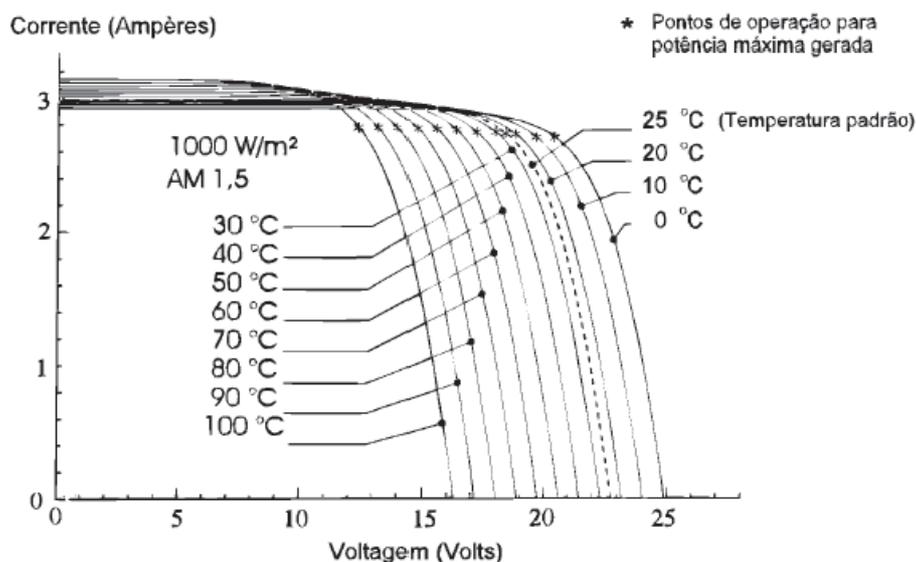


Figura 8 – Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica corrente x tensão de um sistema fotovoltaico.

Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

Silva e Seraphim (2005) avaliaram a eficiência energética de um módulo de silício policristalino de potência de pico 45 Wp, em função da disponibilidade da irradiação solar e da energia gerada por ele, e obtiveram um valor máximo de 6,5 % para a conversão em campo. Segundo os autores, o baixo rendimento do módulo quando instalado em campo está relacionado com a variação da irradiação solar diária incidente e com a temperatura de operação do painel fotovoltaico.

Fiorentino e Seraphim (2005) também determinaram a eficiência de um painel fotovoltaico monocristalino em condição particular de operação em campo e obtiveram o valor médio de eficiência de 13,32%, sendo que a eficiência indicada pelo fabricante é de 14%.

Gnoatto et al. (2008) analisaram a eficiência de um conjunto fotovoltaico, com células de silício policristalino, em condições reais de trabalho na região de Cascavel e concluíram que a eficiência do painel fotovoltaico aumenta com a diminuição da temperatura, tendo a média mensal oscilado entre 8,65 e 9,17%, com média anual de 8,84%. A eficiência do painel fotovoltaico calculada em campo foi 28,88% menor do que a determinada em laboratório.

Abdolzadeh e Ameri (2009) desenvolveram um sistema com pulverização de água sobre células fotovoltaicas para diminuir a temperatura das mesmas e assim melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico. Eles analisaram o desempenho de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água de 225 W e verificaram que a pulverização com *spray* de água aumentou a eficiência média da célula fotovoltaica em 3,23% e a eficiência total do sistema em 1,35%, comprovando que o aumento de temperatura nas células diminui a eficiência do sistema de bombeamento.

Santos e Michels (2011) analisaram o desempenho de um sistema fotovoltaico policristalino de bombeamento de água com dois painéis de 56 W cada, instalado na região de Medianeira/PR, em função da variação da temperatura e da irradiação solar e observaram que para um aumento da temperatura de 25°C para 40°C, dos painéis, a potência fornecida pelos painéis reduziu em média 5,55 %. Os autores observaram ainda que para o mesmo aumento de temperatura a vazão do sistema de bombeamento reduziu em média 4,23%.

2.4 Bombeamento de água

A energia solar fotovoltaica está difundida em várias localidades do Brasil, sendo aplicada para diversas finalidades. Por se tratar de fonte versátil, pode ser utilizada em locais remotos onde a rede elétrica não é compensatória, sendo uma opção para pequenos agricultores. Uma aplicação dessa forma de energia é o bombeamento de água, podendo representar uma solução importante para as famílias residentes em pequenas propriedades nas regiões áridas e semiáridas (MICHELS et al. 2009).

As principais aplicações para sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água são: uso residencial, consumo de água humano e animal em pequenas comunidades e sistemas de

irrigação (CRESESB, 2008). Segundo Moreira (2009) um volume médio diário de 1200 litros de água é capaz de atender uma pequena propriedade rural típica onde vivem em torno de 6 pessoas, 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e com uma área cultivada 100m².

Segundo Fedrizzi e Sauer (2002), um sistema de bombeamento fotovoltaico é constituído por um gerador fotovoltaico, mecanismo de acondicionamento de potência, conjunto motobomba e equipamentos complementares, conforme pode ser visto na Figura 9.

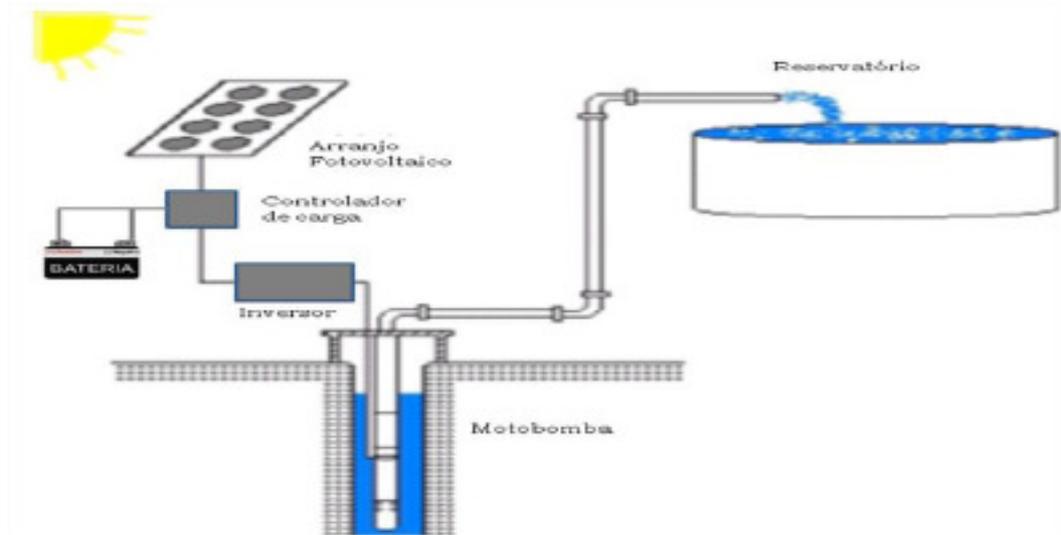


Figura 9 – Sistema de bombeamento fotovoltaico de água.
Fonte: SÁ, 2010

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 (KOLLING et al., 2004).

Segundo CRESESB/CEPEL (2008), em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água geralmente não são utilizadas baterias, pois o armazenamento é realizado em tanques. Nos casos em que o uso da água se faz necessário mesmo quando a energia do sol não está disponível, ou, para compensar os períodos de baixa irradiação solar, pode-se utilizar um tanque de armazenamento, que fará a distribuição da água por gravidade.

O bombeamento de água utilizando energia solar é uma tecnologia em potencial em locais onde há disponibilidade abundante de irradiação solar. Segundo Jafar (2000) os sistemas fotovoltaicos, em relação aos motores diesel e gasolina têm manutenção reduzida e vida útil mais longa. Eles não poluem, são silenciosos, não precisam de combustível e as

contaminações de solos e mares por derramamento são eliminadas. Porém, esta tecnologia é mais cara do que outros métodos de geração de eletricidade, tais como fonte de energia baseada em carvão, petróleo, gás natural e hidrelétrica convencional (MEAH; FLETCHER; ULA, 2008).

Segundo Shayani et al (2006), o custo para a implantação de um sistema de geração utilizando energia solar pode chegar a 50 vezes o custo de uma pequena central hidrelétrica. Entretanto, torna-se 10 vezes maior para sistemas isolados e 3 vezes maior para geração interligada à rede elétrica, quando se considera a vida útil do sistema, de aproximadamente 30 anos.

Segundo Fedrizzi e Sauer (2002), a maioria dos sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no Brasil não ultrapassa a potência de 2 kWp, com altura manométrica média por volta dos 60 m.c.a. e vazão inferior a 40 m³dia⁻¹, embora esta tecnologia permita inúmeras possibilidades em termos de potência.

Inúmeros trabalhos relacionados ao bombeamento fotovoltaico de água vêm sendo desenvolvidos. Kolling et al. (2004) avaliaram o comportamento de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água diretamente acoplado, sob diferentes condições de irradiação solar e submetido a diferentes alturas manométricas. O sistema foi composto de uma motobomba SHURFLO, modelo 2088, acionada por um painel fotovoltaico SOLARIS, modelo Ap6150, e as alturas manométricas empregadas foram 4, 7,5, 11, 13, 15 e 19 m. Os autores concluíram que a potência gerada pelo painel e a vazão fornecida pela motobomba estão diretamente relacionadas à irradiação solar e à altura manométrica e influenciam na eficiência do sistema. A vazão média encontrada variou de 6,52 a 10,91 Lmin⁻¹ e a máxima eficiência do painel foi de 8% para uma carga de bombeamento de 4 m, sendo que o sistema alcançou a eficiência global máxima de 2,3% para a condição de maior carga.

Odeh et al. (2006) compararam a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água com sistemas de bombeamento a diesel para sistemas de 2,8 kWp até a 15 kWp e concluíram que sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água de médio porte, acima de 11 kWp, além de serem alternativas viáveis, podem tornar-se economicamente rentáveis.

De Andrade et al. (2008) estudaram um sistema fotovoltaico de bombeamento de água composto por 15 módulos de silício policristalino, 75 Wp, motor de indução trifásico e bomba centrífuga submersa. O sistema testado bombeou 7.900 L/dia⁻¹ de água a uma altura manométrica total de 35 m e 12.000 L/dia⁻¹, a uma altura manométrica total de 18m, superando as expectativas do projeto.

Michels et al. (2009) analisando um sistema de bombeamento de água alimentado por dois painéis fotovoltaicos policristalinos, determinaram o rendimento e a potência do painel nos períodos de solstício. Uma bomba do tipo diafragma foi alimentada pelos dois painéis, 56 W cada, e bombeou água à altura de 20 m. O sistema testado em situação real apresentou eficiência máxima de 9,58% no solstício de inverno e valor mínimo de 8,57% no solstício de verão, levando-se em conta dias limpos, ou seja, sem a interferência de nuvens. Segundo os autores, a maior eficiência nos dias de inverno está ligada às menores temperaturas se comparada aos dias de verão, e o fator que provocou a maior vazão de água bombeada nos dias de verão está atrelado ao tempo de insolação, que é maior se comparado aos dias de inverno. O volume máximo de água bombeado pelo sistema estudado foi de 1.768,45 L dia⁻¹.

Moreira (2009) avaliou o desempenho hidro-energético de sistemas de bombeamento de água acionados por energia solar fotovoltaica, utilizando painéis mono e policristalinos. Os sistemas avaliados utilizaram bomba de superfície, modelo Shurflo 8000, e foram alimentados alternadamente por quatro pares de arranjos de painéis solares fotovoltaicos, sendo os painéis monocristalinos de 65 W cada e os policristalinos de 70 W cada. O volume médio diário de água bombeada pelos vários arranjos testados, durante quatro meses de experimento, variou entre 1.100 e 2.500 litros. Os sistemas com dois 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.

Nogueira (2009) verificou a viabilidade econômica de sistemas geradores de energia eólica e solar fotovoltaica para irrigação em propriedades rurais, em substituição aos motores diesel e elétrico. O sistema fotovoltaico implantado bombeou aproximadamente 5.000 m³/ha e se mostrou mais eficiente que o sistema eólico, tendo um custo de bombeamento de R\$ 1.400,00 ha/ano.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do experimento

O experimento foi desenvolvido no Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia (CASA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), localizado no município de Cascavel, Paraná, com localização geográfica definida pelas coordenadas 24°59' de Latitude Sul (S) e 53°27' de Longitude Oeste (W) e altitude de 753 metros acima do nível do mar.

3.2 Material

3.2 .1 Materiais utilizados na montagem do experimento

Os materiais utilizados durante o desenvolvimento do trabalho estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados para operação do sistema de bombeamento

Material/Equipamento	Quantidade
Estrutura metálica com 2,50 m de altura	1
Caixa d'água com capacidade para 100 L	2
Motobomba de diafragma	1
Painel solar policristalino de 50 W	3
Painel solar monocristalino de 135 W	1
Tubulação de PVC (canos e conexões)	necessária
Registro de esfera	1
Disjuntor bipolar de 25A	1

O módulo fotovoltaico composto por 3 painéis, em paralelo, com células de silício policristalino utilizado pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 – Visão geral do módulo fotovoltaico policristalino instalado.

As especificações técnicas de cada painel fotovoltaico são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos KS50 da Solartec

Característica	Especificação Técnica
Modelo	KS50
Massa	5,90 kg
Potência Máxima	50 W
Tensão de Potência Máxima	16,7 V
Corrente de Potência Máxima	3,00 A
Tensão de Circuito Aberto	21,5 V
Corrente de Curto Circuito	3,10 A
Dimensões	1280x344x36 mm

O painel fotovoltaico de silício monocristalino é apresentado na Figura 11.



Figura 11– visão geral do módulo fotovoltaico monocristalino instalado.

As especificações técnicas do painel fotovoltaico monocristalino são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações técnicas do módulo fotovoltaico HG135 da Solarterra

Característica	Especificação Técnica
Modelo	HG135
Massa	11,1 kg
Potência Máxima	135 W
Tensão de Potência Máxima	18,14 V
Corrente de Potência Máxima	7,45 A
Tensão de Circuito Aberto	21,74 V
Corrente de Curto Circuito	8,04 A
Dimensões	1460x660x35 mm

Para o recalque da água foi utilizada uma bomba de superfície marca Shurflo apresentada na Figura 12, com sistema de bombeamento positivo através de câmaras com diafragma, cujas especificações técnicas estão na Tabela 4.



Figura 12 – Motobomba de superfície Shurflo 8000

Tabela 4 - Especificações técnicas da moto bomba Shurflo

Característica	Especificação Técnica
Modelo	8000-443-136
Voltagem Nominal	12 VCC
Corrente Nominal	7,0 A
Vazão Nominal	6,5 L min ⁻¹
Pressão Nominal	4,13 x 10 ⁵ Pa
Massa	2,07 Kg

A parte hidráulica do sistema foi montada em uma estrutura metálica, com 2,50 m de altura, onde foram dispostas duas caixas d'água de 100 L cada, sendo uma na parte inferior e outra na parte superior da estrutura, conforme pode ser visto na Figura 13.

Para a sucção e recalque da água, da caixa inferior para a superior, foram utilizados tubos e conexões (luvas, curvas de 90°, reduções) de PVC de 1" para interligar a caixa inferior até a moto-bomba e desta até caixa superior. Para o processo de esvaziamento da caixa superior também foram utilizados tubos e conexões com diâmetro de 1" para interligar a caixa superior até a caixa inferior. Toda a água que foi bombeada para a caixa superior foi conduzida imediatamente pela tubulação, passando pelo hidrômetro, para a caixa inferior de onde foi bombeada novamente, formando um ciclo contínuo.

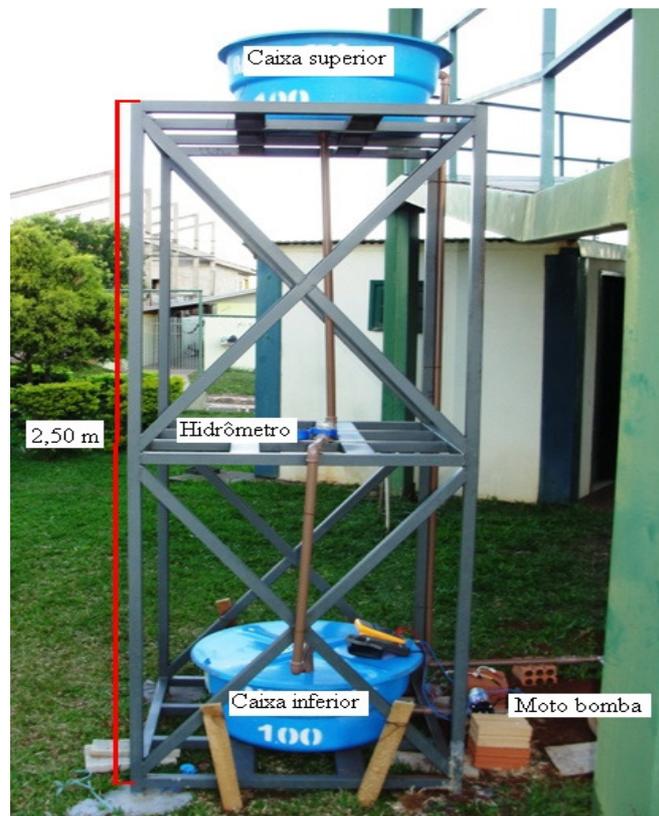


Figura 13 – Estrutura metálica e demais componentes do sistema.

Foi instalado no sistema um disjuntor bipolar de 25 A, conforme pode ser visto na Figura 14, que foi usado apenas no início do primeiro processo de bombeamento de água. Também foi instalado um registro de esfera de PVC de 1”, caso fosse necessário realizar alguma manutenção no sistema hidráulico.



Figura 14 – Disjuntor bipolar de 25A.

3.2.2 Equipamentos de Medições

Os equipamentos utilizados para as medições durante o desenvolvimento do trabalho estão relacionados na Tabela 5.

Tabela 5 - Equipamentos utilizados para as medições e coleta de dados

Material/Equipamento	Quantidade
Piranômetro	1
Hidrômetro ½”	1
Equipamento de coleta de dados (Datalogger)	1
Sensor de Temperatura	1
Divisor de tensão	1
Resistência Shunt	1

3.2.2.1 Piranômetro

As medidas de irradiação solar global foram feitas em um piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de $15,30 \mu\text{V W}^{-1}\text{m}^2$. A Figura 15 apresenta o piranômetro instalado e a Tabela 6 apresenta as suas especificações técnicas.



Figura 15 – Piranômetro Kipp & Zonen para medição da irradiação solar.

Tabela 6 - Especificações do Piranômetro Kipp & Zonen

Característica	Especificação Técnica
Modelo	CMP3
Dimensões	Ø 7,5 cm x 10 cm
Massa	543 g
Tempo de resposta 95%	18 s
Sensibilidade	5 a 15 $\mu\text{V W}^{-1}\text{m}^{-2}$
Temperatura de operação	- 40 °C a +80 °C
Máxima irradiância	2000 Wm^{-2}
Precisão	$\pm 5 \%$

3.2.2.2 Hidrômetro

Para medida do volume de água bombeado foi usado um hidrômetro da marca SAPPEL AQUARIUS, com a vazão Nominal de $0,75\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ e vazão Mínima de 15L h^{-1} demonstrado na Figura 16.



Figura 16– Hidrômetro SAPPEL AQUARIUS.

3.2.2.3 Datalogger

Para a coleta dos dados de irradiação foi utilizado um equipamento de aquisição de dados (datalogger), da Campbell Scientific, LoggerNet 3.4. A Figura 17 mostra o Datalogger em funcionamento e a Tabela 7 apresenta as especificações técnicas do equipamento.



Figura 17 – Datalogger Campbell e conexões.

Tabela 7 – Principais especificações técnicas do sistema de aquisição de dados CR1000 Campbell Scientific

Marca	Campbell Scientific
Modelo	CR1000
Dimensões	23,9 x 10,2 x 0,85 cm
Peso	1000 g
Alimentação	9,6 a 16 Vcc
Temperatura de operação	-25 °Ca 50 °C
Sensores suportados	Analógico tensão; Analógico atual (com um resistor shunt); Termopares; pontes resistivas; Pulso de saída; Período de saída; Frequência de saída; Serial sensores inteligentes;

3.2.2.4 Termopar

Para a coleta dos dados de temperatura foi utilizado um termopar, tipo J (Figura 18), interligado ao sistema de aquisição de dados e destinado ao monitoramento da temperatura do painel fotovoltaico. O sensor foi instalado próximo ao centro, na parte inferior do painel. Foi utilizado o mesmo sensor para o painel policristalino e monocristalino.



Figura 18 – Termopar tipo J.

Os termopares do tipo J são sensores que atuam numa faixa de temperatura de 0 a 750 °C, com resposta muito rápida e que têm um custo relativamente baixo. O modelo utilizado tem proteção metálica e isolamento mineral.

3.2.2.5 Divisor de tensão e resistência Shunt

Como o datalogger lê tensões de 0 a 5 V, foram utilizados um divisor de tensão e uma resistência shunt para fazer as leituras no equipamento e, posteriormente, obter os valores reais de tensão e corrente gerada. A Figura 19 apresenta, respectivamente, o divisor de tensão e a resistência shunt instalados.



Figura 19 – Divisor de tensão; resistência shunt.

Para a confecção do divisor de tensão foram utilizados dois resistores, ligados em série, um de 10 kΩ e outro de 47 kΩ, de forma a proporcionar uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada (equação 1):

$$V_s = \frac{V_e}{57} \cdot 10 \quad (1)$$

Onde:

V_s – tensão de saída (V);

V_e – tensão de entrada (V).

Para a montagem da resistência Shunt foram associados dois resistores de 1Ω cada, em paralelo. Pode-se determinar a corrente em função da tensão de saída, para esse caso, por meio da equação 2:

$$V_s = 0,5 \cdot I \quad (2)$$

Em que:

I – corrente, A.

3.3 Métodos

3.3.1 Instalação e funcionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico

Para o desenvolvimento do trabalho um sistema fotovoltaico de bombeamento de água foi montado, conforme Figura 20. A energia elétrica para alimentar a motobomba que fez o recalque de água da caixa inferior para a superior foi gerada por painéis fotovoltaicos. Inicialmente, o sistema foi alimentado por painéis solares policristalinos (período de 8 a 18 de Novembro) e, posteriormente, estes painéis foram substituídos por um painel monocristalino (período de 6 a 16 de Dezembro).

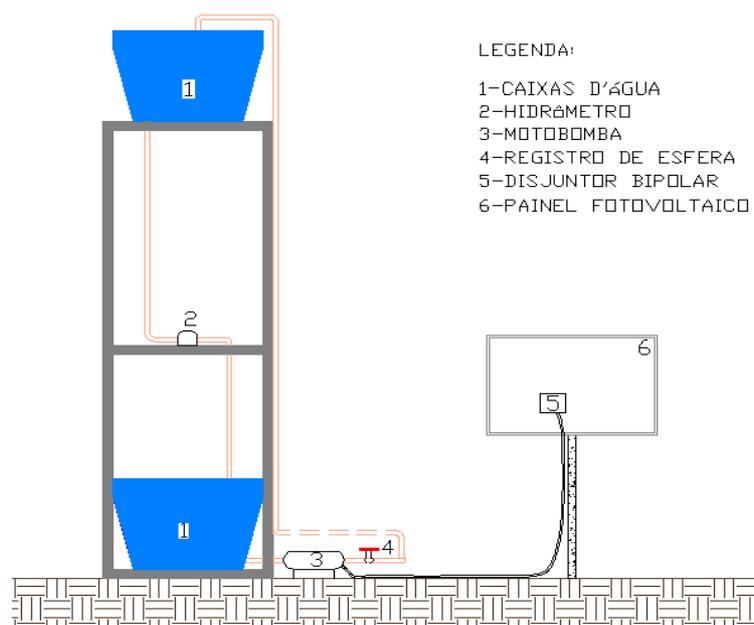


Figura 20 – Esquema contendo os componentes do sistema de bombeamento utilizado.

Os painéis fotovoltaicos foram instalados em um suporte voltado para o norte geográfico com inclinação de 35° nesta direção, correspondente à latitude local adicionada de 10°.

O sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos trabalhou sem banco de baterias para o armazenamento de energia elétrica, funcionando somente enquanto havia níveis de irradiação suficientes para acioná-lo.

É importante destacar que o hidrômetro instalado foi aferido para uma leitura correta. Para esta aferição foi marcado uma determinada altura na caixa superior (20 cm) e trancada a saída de água da mesma, para que não houvesse vazamento de água durante o enchimento da mesma. O sistema de bombeamento de água foi ligado e permaneceu bombeando água até o nível de água atingir a marca. Após o sistema ser desligado, foi aberta a saída de água da caixa superior, forçando todo o volume bombeado a passar pelo hidrômetro.

De posse dos dados referentes à altura da lâmina d'água e do diâmetro da caixa d'água, foi calculado o volume teórico e comparado com o volume registrado pelo hidrômetro, sendo que as duas determinações foram exatamente iguais: 72,05 L.

3.3.2 Sistema de Aquisição e processamento dos dados

3.3.2.1 Volume de água bombeado

A leitura do volume de água bombeado foi realizada diariamente e os valores foram lidos diretamente no hidrômetro com aproximação de cinco casas decimais. Como os valores lidos no hidrômetro foram cumulativos, o volume de água bombeado diariamente (em L) foi calculado fazendo-se a diferença entre a leitura do dia atual e a leitura do dia anterior.

3.3.2.2 Irradiação solar

O datalogger instalado registrou os valores coletados pelo piranômetro a cada segundo e, posteriormente, foram calculadas as médias horárias.

3.3.2.3 Tensão e corrente

As tensões medidas pelo divisor de tensão e da resistência shunt foram registradas no datalogger a cada segundo, em milivolts. Posteriormente, as tensões medidas pelo divisor de tensão e resistência shunt foram transformadas, respectivamente, em tensões (V) e correntes

(A) reais. A transformação foi realizada com as equações de ajuste obtidas em laboratório antes da instalação dos dispositivos.

Este processo se constitui basicamente em fornecer uma tensão de entrada conhecida e anotar os valores de tensão registrados no datalogger. De posse dos dados (reais e medidos) foram feitos dois gráficos, um para tensão e outro para corrente e, por meio destes, obteve-se as equações de ajuste para transformação dos dados.

3.3.2.4 Temperatura

Os dados de temperatura foram coletados pelo termopar e registrados a cada segundo pelo datalogger. Posteriormente também foram determinadas as médias horárias.

3.3.3 Parâmetros calculados

3.3.3.1 Potência

O cálculo da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos foi feito de acordo com a expressão:

$$P = V \cdot I \quad (3)$$

Em que:

P – potência (W);

V – tensão (V) e,

I – corrente (A).

3.3.3.2 Determinação da Altura Manométrica

A 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), conforme citou Moreira (2009). Portanto:

$$H_m = H_g + H_p \quad (4)$$

3.3.3.3 Vazão

A vazão é igual ao volume de água bombeado dividido pelo número de horas de funcionamento do sistema:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (5)$$

Onde:

Q – vazão (Lh^{-1});

v – volume de água (L);

t – tempo (h).

3.3.3.4 Energia disponível e energia consumida

As transformações da irradiação total em energia disponível e da potência em energia consumida foram feitas através das Equações 6 e 7, respectivamente.

$$Ed = Rt \cdot t \quad (6)$$

$$Ec = P \cdot t \quad (7)$$

Em que:

$$Rt = Rs \cdot A \quad (8)$$

Ed – energia disponível (Wh);

Ec – energia consumida, (Wh);

Rt – irradiação total (W);

t – tempo (h).;

P – potência (W);

Rs – irradiação solar global (Wm^{-2}), e

A – área útil do módulo (m^2).

3.3.3.5 Eficiências

A eficiência de cada painel fotovoltaico foi obtida por meio da Equação 9 (MOREIRA, 2009):

$$\eta_p = \left(\frac{Ec}{Ed} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Em que:

η_p – eficiência do painel (%);

Ec – energia consumida (Wh) e,

Ed – energia disponível, (Wh).

A eficiência da motobomba foi calculada pela equação seguinte (MANTOVANI et al., 2007):

$$\eta_{mb} = \frac{Q \cdot Hm \cdot 736}{75 \cdot U \cdot I} \cdot 100 \quad (10)$$

Em que:

η_{mb} – eficiência da motobomba (%);

Q – vazão (m^3h^{-1});

Hm – altura manométrica (m);

U – tensão (V) e,

I – corrente (A).

A eficiência global do sistema fotovoltaico de bombeamento foi obtida através do produto entre a eficiência do módulo fotovoltaico e a eficiência da motobomba, conforme segue na Equação 11:

$$\eta_g = \frac{\eta_p \cdot \eta_{mb}}{100} \quad (11)$$

Em que:

η_g – eficiência global (%);

η_p – eficiência do painel (%) e,

η_{mb} – eficiência da motobomba (%).

3.3.3.5 Custos específicos do sistema de bombeamento

Para o cálculo do custo anualizado de cada sistema foi necessário considerar o custo inicial e a vida útil de cada componente do sistema de bombeamento, conforme dados abaixo:

- I. Painel Monocristalino - R\$ 830,00 / 25 anos
- II. Painel Policristalino - R\$ 785,00 / 25 anos
- III. Motobomba Shurflo -R\$ 490,00 / 10 anos
- IV. Estrutura metálica – R\$ 600,00 / 25 anos
- V. Materiais hidráulicos - R\$ 300,00 / 25 anos

Além dos custos acima, foram acrescentados 10% ao custo anualizado, calculado conforme a Equação 12, em função dos gastos com estruturas para a sustentação dos painéis e instalações. A taxa de juros considerada foi de 10% ao ano.

$$Ca = Ci \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (12)$$

Para obter os custos específicos do sistema de bombeamento, primeiro calculou-se a energia consumida por ano e o volume de água bombeado por ano. Para isso, verificou-se em um atlas solarimétrico a irradiação total anual para a cidade de Cascavel, $1622,22 \text{ kWh.m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ (TIBA et al., 2000) e depois, dividiu-se essa irradiação total anual pela irradiação total de cada período estudado ($\text{kWh.m}^{-2} \text{ período estudado}^{-1}$), para os sistemas mono e policristalino. Os índices obtidos foram multiplicados pelos valores totais de energia consumida e volume de água bombeado em cada período estudado, fornecendo assim os totais anuais de energia consumida e volume bombeado.

De posse dos dados acima, os custos específicos foram determinados utilizando as equações 13 e 14:

$$\frac{\text{Custo (R\$)}}{\text{kWh}} = \frac{Ca}{Ec} \quad (13)$$

$$\frac{\text{Custo(R\$)}}{\text{Litro}} = \frac{Ca}{Vb} \quad (14)$$

Em que:

Ca – custo anualizado ($\text{R\$}.\text{ano}^{-1}$);

Ci – custo inicial (R\$);

i – taxa de juros ($i = 10\% \text{ aa}$);

n – vida útil (anos);

Ec – energia consumida ($\text{kWh}.\text{ano}^{-1}$) e,

Vb – volume de água bombeado ($\text{L}.\text{ano}^{-1}$)

3.3.4 Avaliações e comparações entre os diferentes tipos de células fotovoltaicas

Com os dados calculados nos subitens anteriores, foram analisados os seguintes parâmetros para os dois tipos de painéis:

- Vazão média bombeada em cada sistema;
- Relação entre vazão e irradiação solar;
- Relação entre vazão e energia consumida;

- Relação entre energia disponível e energia consumida;
- Eficiência média do painel, da motobomba e do sistema;
- Influência da temperatura na eficiência do painel.
- Custos específicos do sistema de bombeamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações

Todos os dados analisados levaram em consideração apenas o período de funcionamento da motobomba e, conseqüentemente, o funcionamento do sistema de bombeamento de água.

Os valores mínimos encontrados de irradiação e potência necessários para o funcionamento do sistema foram $48,80 \text{ Wm}^{-2}$ e $1,30 \text{ W}$, respectivamente.

4.2 Altura manométrica

A altura manométrica se manteve fixa para os sistemas monocristalino e policristalino.

Considerando valores tabelados para os vários componentes da tubulação temos que:

$$H_g = 2,50 \text{ m}$$

$$H_p (\text{sucção}) = 0,40 \text{ m}$$

$$H_p (\text{recalque}) = 3,93 \text{ m}$$

Portanto:

$$H_m = 2,50 + 0,40 + 3,93$$

$$H_m = 6,83 \text{ m}$$

4.3 Volume diário bombeado e irradiação solar

Com o volume diário de água bombeada e a irradiação solar média foi possível verificar graficamente o comportamento dos arranjos testados, conforme as Figuras 21 e 22.

Como se pode observar nas duas Figuras, o volume de água bombeado diariamente teve um comportamento similar ao da irradiação solar. Nos dias em que houve aumento da irradiação solar média também houve aumento no volume de água bombeado tanto para o sistema monocristalino quanto para o policristalino.

No sistema monocristalino, no dia 13 de dezembro, houve uma queda acentuada no volume de água bombeado em virtude da baixa irradiação incidente neste dia, em torno de 180 Wm^{-2} . No sistema policristalino, nos três primeiros dias foi bombeado um volume menor de água, visto que a irradiação solar média também foi menor nesses dias.

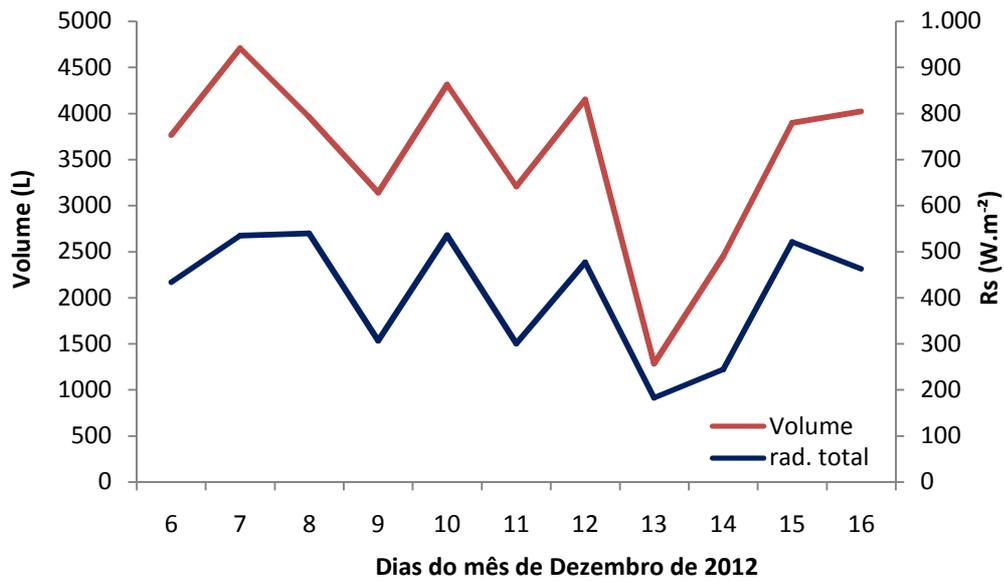


Figura 21– Volume e irradiação solar média diária do sistema monocristalino.

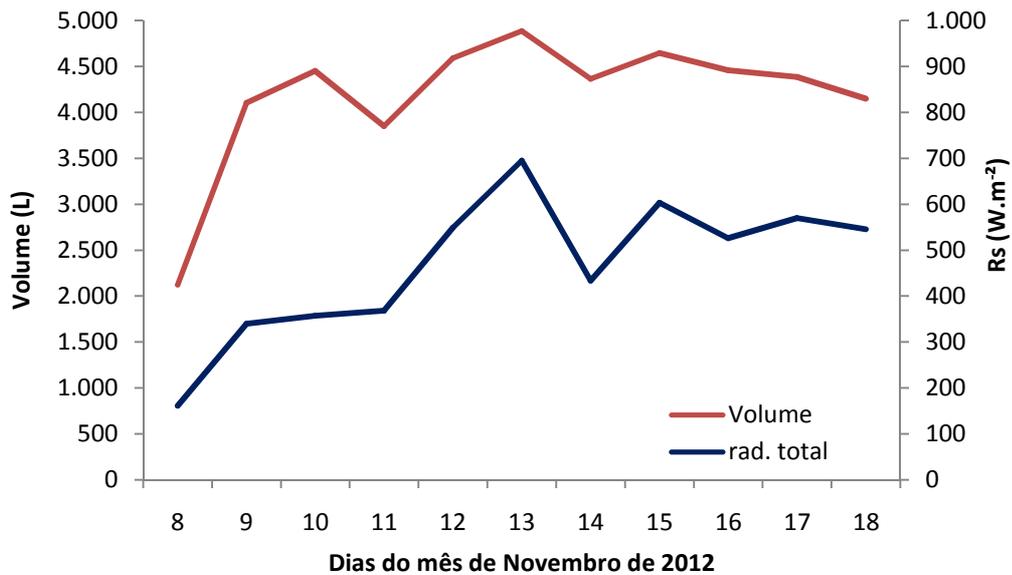


Figura 22 – Volume e irradiação solar média diária do sistema policristalino.

O volume médio de água bombeado por dia no sistema monocristalino foi de 3.536,45 litros, para uma irradiação média de 412,48 Wm², enquanto que no sistema policristalino foram bombeados em média 4.182,55 litros por dia, para uma irradiação média de 467,93 Wm².

Kolling (2001), utilizando painéis monocristalinos, com 150 Wp de potência, observou uma vazão de 4.941 Ldia⁻¹, porém a irradiação média observada por ele foi de 717 Wm².

4.4 Vazão em função da irradiação solar

As Figuras 23 e 24 apresentam o comportamento da vazão em função da irradiação solar e as respectivas curvas de tendência resultantes.

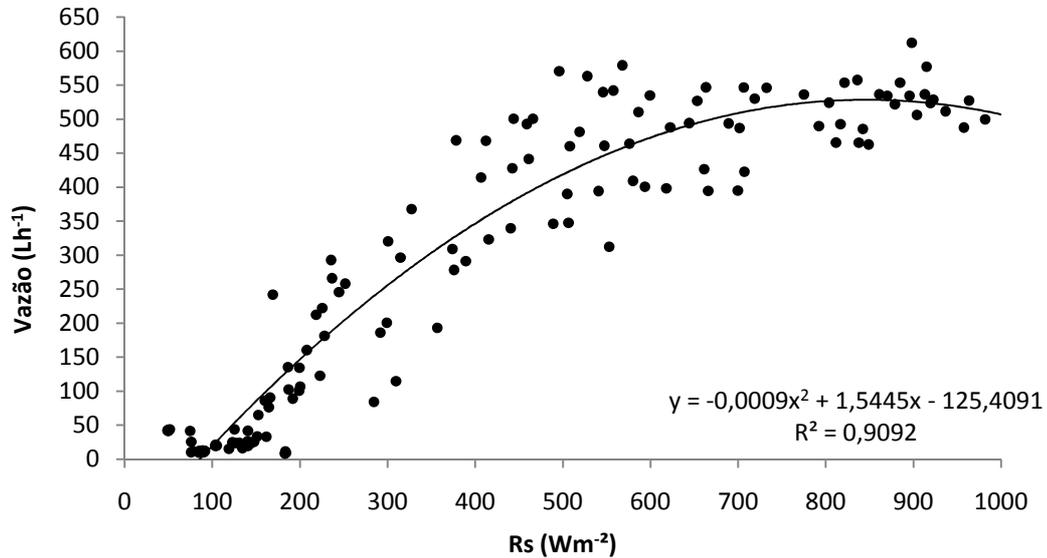


Figura 23 – Vazão e irradiação solar para o sistema monocristalino.

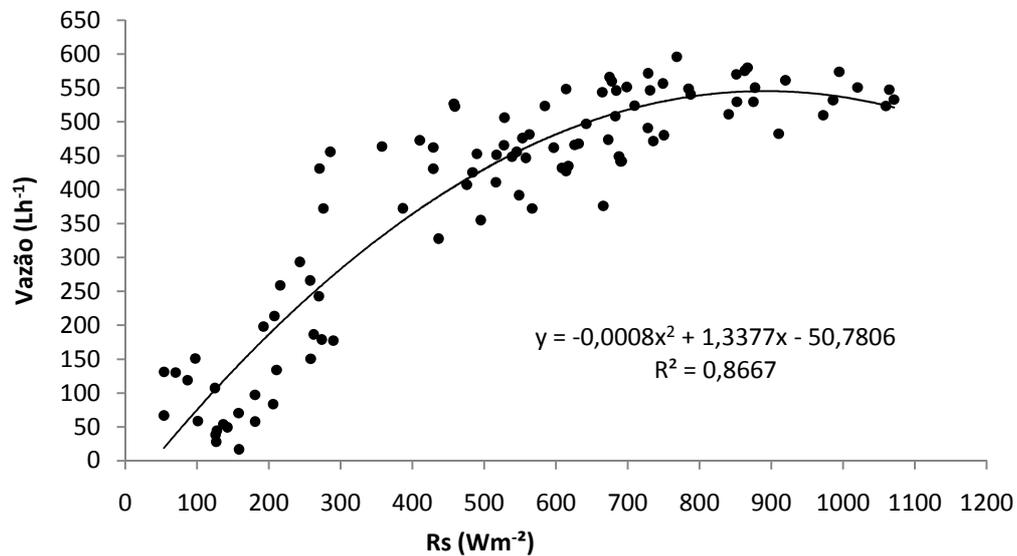


Figura 24 – Vazão e irradiação solar para o sistema policristalino.

Para os dois casos observou-se a tendência polinomial dos dados e o aumento da vazão em função do aumento da irradiação solar, conforme também observado por Moreira (2009). É importante ressaltar que a tendência polinomial é válida para valores de irradiação solar entre 0 e 900 Wm⁻². A partir desse valor de irradiação, a tendência da curva é manter-se horizontal e constante.

Com as equações obtidas no ajuste dos dados, foi possível calcular a vazão, em Lh^{-1} , em função da irradiação solar, em Wm^{-2} . Para um valor de irradiação de 600 Wm^{-2} , por exemplo, obteve-se uma vazão de $477,29 \text{ Lh}^{-1}$ para o sistema monocristalino e $463,84 \text{ Lh}^{-1}$ para o sistema policristalino.

Considerando a mesma irradiação solar, em Wm^{-2} , o sistema monocristalino bombeou um volume maior de água em relação ao sistema policristalino.

4.5 Vazão em função da energia consumida

Esta relação avaliou o comportamento da vazão de água bombeada em função da energia consumida pelos sistemas e é apresentada nas Figuras 25 e 26.

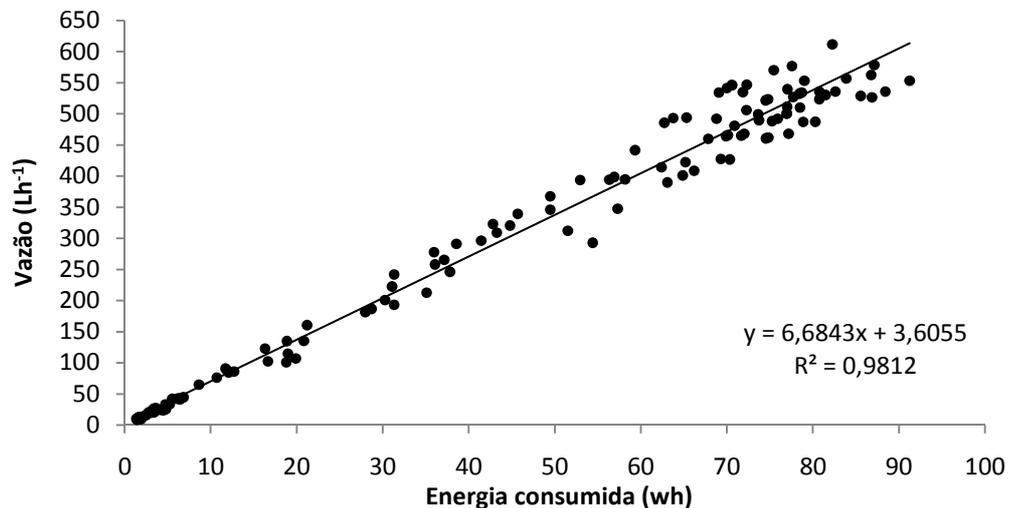


Figura 25 – Vazão e energia consumida para o sistema monocristalino.

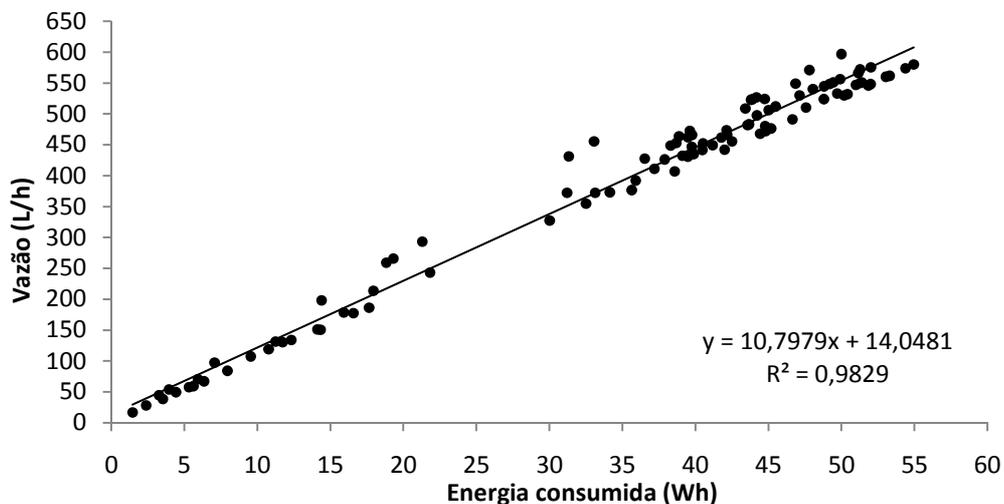


Figura 26 – Vazão e energia consumida para o sistema policristalino.

Analisando os dados apresentados verificou-se que para o consumo de 30 Wh tem-se uma vazão de aproximadamente 204 Lh^{-1} para o sistema monocristalino e de aproximadamente 338 Lh^{-1} para o sistema policristalino, ou seja, para um mesmo valor de energia consumida o sistema policristalino é capaz de bombear mais água em relação ao monocristalino.

Os dados do sistema monocristalino apresentaram tendência polinomial com R^2 igual a 0,983 enquanto que os dados do sistema policristalino apresentaram tendência exponencial com R^2 de 0,992. Através das equações apresentadas também é possível calcular a vazão (y), em (Lh^{-1}) , em função da energia consumida (x), em Wh.

4.6 Energia disponível e Energia consumida

As Figuras 27 e 28 apresentam os valores de Energia disponível e Energia consumida ao longo das horas do dia 12 de novembro e 16 de dezembro, para os sistemas policristalino e monocristalino, respectivamente.

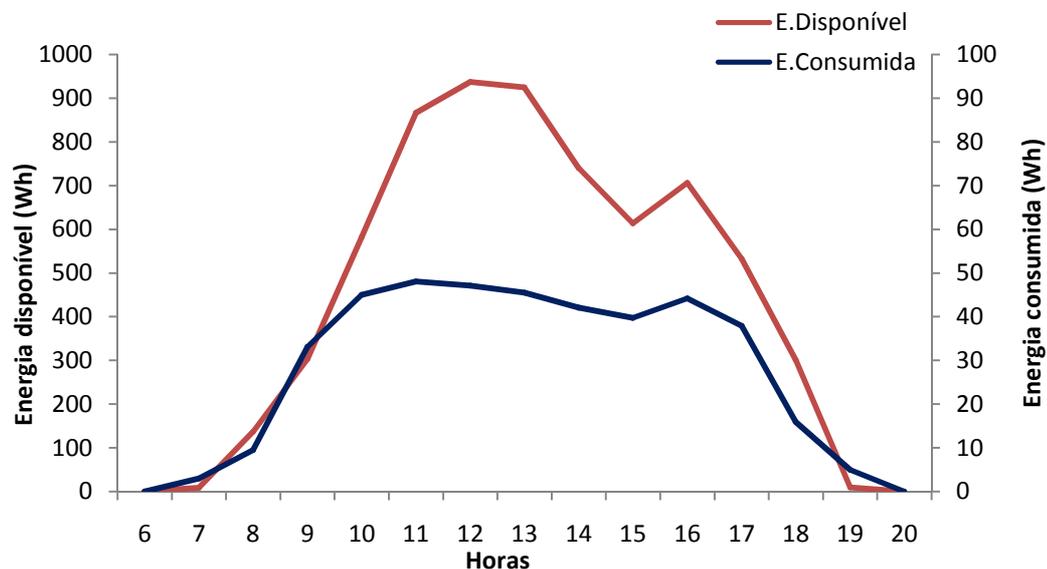


Figura 27 – Energia disponível e Energia consumida ao longo do dia.

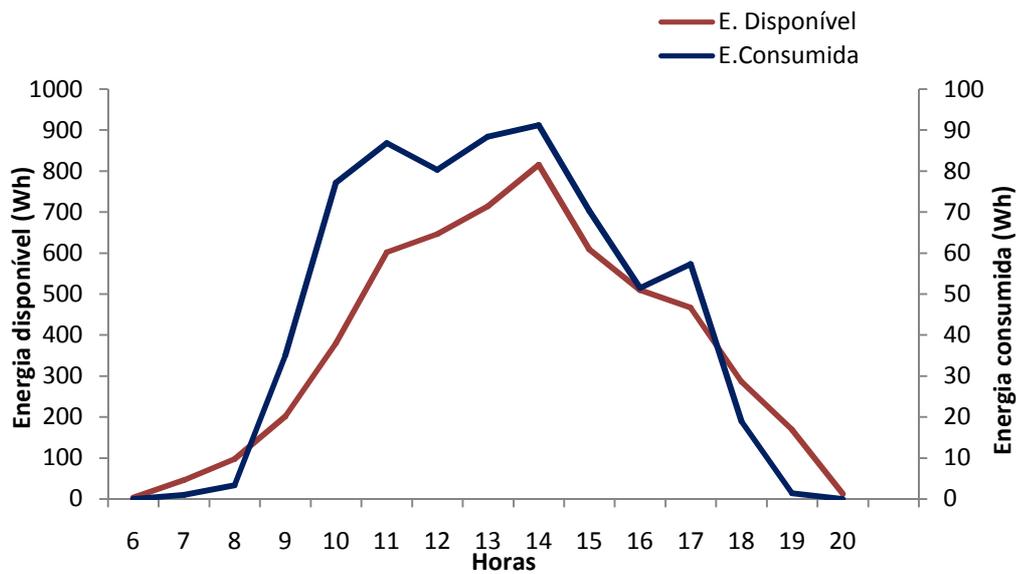


Figura 28 – Energia disponível e Energia consumida ao longo do dia.

Observou-se para os dois casos, que a energia disponível vai aumentando gradativamente a partir do início da manhã até atingir seu pico, e depois volta a decrescer no final da tarde. Considerando que a energia disponível é fornecida pela irradiação solar sobre a área útil dos painéis, as variações que ocorreram foram em função apenas da irradiação solar, visto que a área dos painéis se manteve constante.

De toda a energia disponível apenas parte dela foi consumida pela motobomba. A energia consumida apresentou comportamento semelhante ao da energia disponível.

Considerando a energia efetivamente consumida pela bomba (E_c) e a energia solar disponível (E_d) fornecida pela irradiação solar sobre a área útil dos painéis, pode-se ainda obter a eficiência do painel fotovoltaico. As Figuras 29 e 30 apresentam a relação entre energia disponível e energia consumida para cada um dos sistemas durante todo o período de funcionamento.

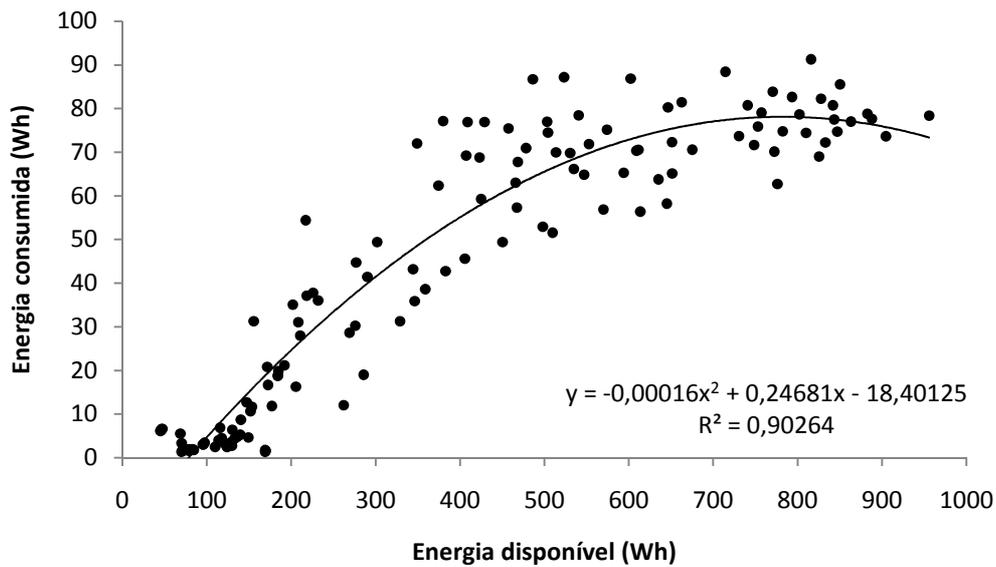


Figura 29 – Energia disponível x Energia consumida para o sistema monocristalino.

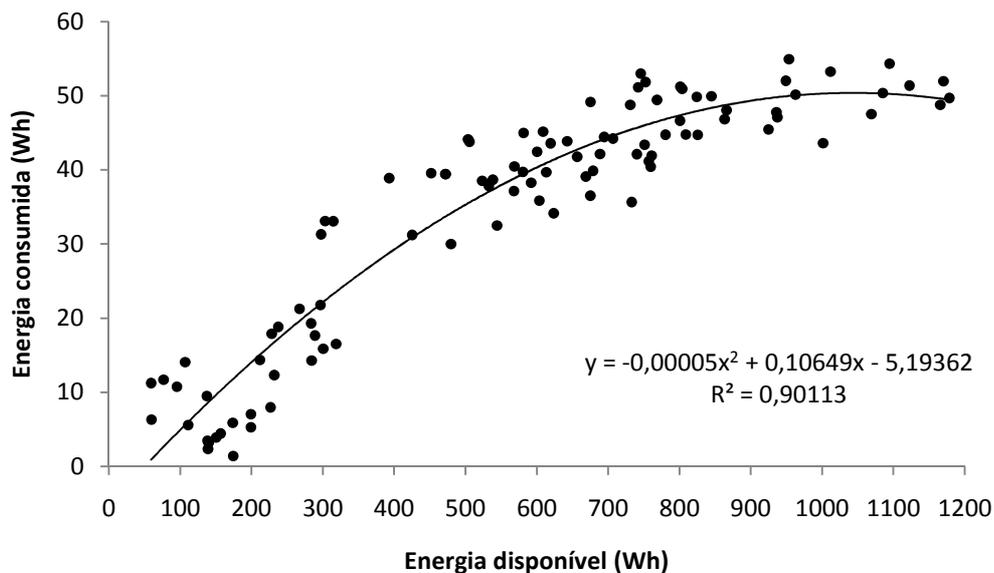


Figura 30 – Energia disponível x Energia consumida para o sistema policristalino.

Para um mesmo valor de energia disponível verificou-se que a motobomba consumiu mais energia no sistema monocristalino, mostrando-se mais eficiente para este sistema quando considerada apenas a relação entre energia disponível e energia consumida.

É importante ressaltar que a tendência polinomial, observada para os dois casos, é válida para valores de irradiação solar entre 0 e 750 Wm^{-2} para o sistema monocristalino e 0 e 1000 Wm^{-2} para o sistema policristalino. A partir desses valores de irradiação, a tendência da curva é manter-se horizontal e constante.

4.7 Eficiências

Para o cálculo da eficiência real dos painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalino foram primeiramente determinados os pontos máximos de energia disponível (E_d) e energia consumida (E_c) para cada um deles. Para encontrar tais pontos foram calculadas as derivadas das equações dos gráficos das Figuras 29 e 30, para o painel monocristalino e policristalino, respectivamente, e igualadas à zero. De posse dos valores máximos de E_c e E_d foram calculadas as eficiências, utilizando a Equação 9, em todos os pontos disponíveis inferiores a eles, sendo a eficiência real igual a média aritmética das eficiências calculadas ponto a ponto.

A eficiência média dos painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalino foi de 9,40% e de 6,57%, respectivamente. O painel monocristalino mostrou-se mais eficiente no aproveitamento da energia disponível em relação ao policristalino.

A motobomba apresentou uma eficiência de média 45,38% para o sistema monocristalino e de 76,07% para o sistema policristalino. Diferença esta resultante da melhor resposta de funcionamento da motobomba em função da tensão gerada durante o funcionamento do sistema policristalino, conforme já citado anteriormente.

A eficiência global média dos sistemas foi de 4,27% para o monocristalino e de 5,00% para o policristalino.

Os resultados encontrados para o sistema monocristalino foram superiores aos encontrados por Kolling (2001), que obteve uma eficiência máxima para o painel monocristalino de 8%, de 39% para a motobomba e máxima eficiência global de 2,3%. Já a eficiência do painel policristalino, 6,57%, foi praticamente a mesma encontrada por Silva e Seraphim (2005) que foi de 6,50%.

4.8 Influência da temperatura na eficiência do painel fotovoltaico

A Tabela 8 apresenta a eficiência dos painéis fotovoltaicos considerando as faixas de temperatura atingidas pelos mesmos.

Tabela 8 – Eficiência de cada painel em função das faixas de temperatura

Sistema	Eficiência (%)			
	20-25°C	25-30°C	30-35°C	35-40°C
Monocristalino	12	11	10	9
Policristalino	7	6	5	4

Para os dois sistemas analisados a eficiência do painel fotovoltaico apresentou maior valor enquanto a temperatura estava na faixa de 20-25°C e foi decrescendo com o aumento da mesma. A temperatura do painel fotovoltaico afetou diretamente a eficiência do sistema, ressaltando o que foi afirmado por Silva e Seraphim (2005), Gnoatto et al. (2008), Abdolzadeh e Ameri (2009) e Santos e Michels (2011).

4.9 Volume total bombeado/energia total disponível

Durante o funcionamento dos sistemas monocristalino e policristalino foram bombeados 728,12 e 797,79 litros de água por kWh de energia disponível, respectivamente. Baseando-se nesse índice o sistema de bombeamento composto pelo painel fotovoltaico policristalino foi mais eficiente em relação ao sistema monocristalino, pois bombeou um maior volume de água para cada kWh.

4.10 Volume total bombeado/ energia total consumida

O volume total de água bombeado em função da energia total consumida foi de 6.651,45 LkWh⁻¹ para o sistema monocristalino e de 13.310,86 LkWh⁻¹ para o sistema policristalino.

Apesar de ter sido utilizada a mesma motobomba para os dois sistemas observou-se uma diferença significativa na capacidade de bombeamento em função da energia consumida, sendo que o sistema policristalino mostrou-se mais eficiente quando comparado ao monocristalino. Tal fato pode ser explicado analisando-se a Figura 31, que apresenta a tendência da corrente e tensão para os dois sistemas.

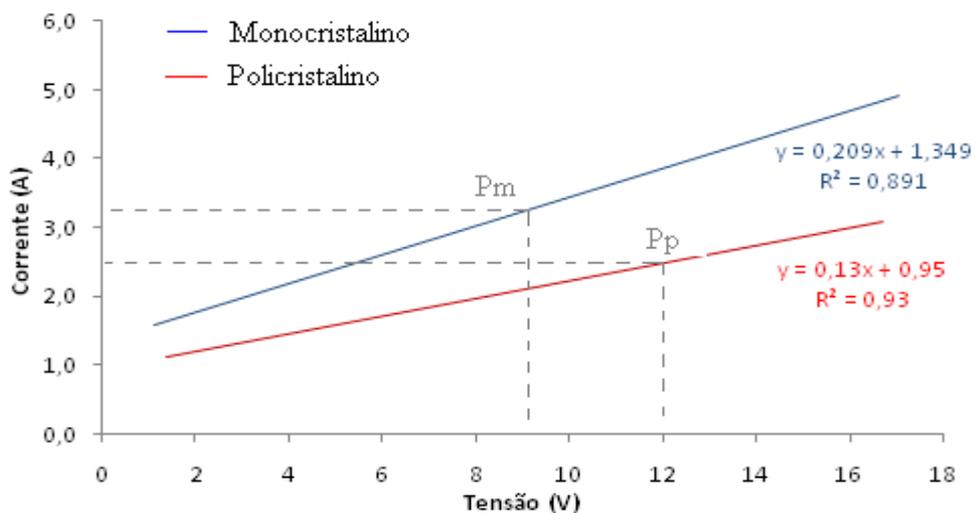


Figura 31– Corrente x tensão para os sistemas monocristalino e policristalino.

Analisando a tendência da corrente e tensão para os dois sistemas, verificou-se que, para uma mesma potência ($P_m=P_b$) o sistema fotovoltaico fornece tensões e correntes diferentes. Esse efeito é decorrente da não utilização de um controlador de carga com dispositivo seguidor do ponto de máxima potência.

Além disso, verificou-se que a motobomba possui maior eficiência quando trabalha com tensões maiores. Daí o motivo de se obter diferentes volumes de água bombeados para um mesmo valor de energia consumida pela motobomba.

4.11 Custos específicos do sistema de bombeamento

O custos do sistema monocristalino por litro de água bombeada e por energia consumida, ao longo da vida útil do sistema, foram de 0,00025 R\$ L⁻¹ e 1,69 R\$ kWh⁻¹, respectivamente. Já para o sistema policristalino, os custos apresentados foram 0,00023 R\$ L⁻¹ e 3,10 R\$ kWh⁻¹.

O sistema monocristalino apresentou menor custo por kWh de energia consumida. Já o custo por litro de água bombeado foi um pouco maior para o sistema monocristalino.

4.12 Tabela - resumo das eficiências do sistema

A Tabela 9 apresenta um resumo das eficiências do sistema fotovoltaico de bombeamento.

Eficiência	Monocristalino	Policristalino
Painel (%)	9,40	6,57
Motobomba (%)	45,38	76,07
Global (%)	4,27	5,00
Custo por energia consumida (R\$ kWh ⁻¹)	1,69	3,10
Custo por litro de água bombeada (R\$ L ⁻¹)	0,00025	0,00023

O painel monocristalino mostrou-se mais eficiente em relação ao policristalino quando analisado individualmente, porém, em termos de eficiência global, o sistema policristalino foi o que apresentou melhor desempenho e menor custo por litro de água bombeado.

5. CONCLUSÕES

O volume médio diário de água bombeada pelos dois sistemas variou entre 3.536,46 e 4.182,55 litros, sendo suficiente para atender as necessidades básicas de uma pequena propriedade rural.

A vazão de água bombeada é função dos níveis de irradiação solar e também da energia consumida pela motobomba. Quando considerada a relação entre vazão e irradiação, o sistema monocristalino mostrou-se mais eficiente, porém, quando considerada a relação entre vazão e energia consumida, o sistema policristalino foi o que bombeou um volume maior de água.

A vazão de água bombeada pela motobomba foi mais suscetível à variação da tensão quando comparada com a variação da corrente, sendo que o aumento da tensão também provocou aumento no volume de água bombeada.

A eficiência dos painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalino foi de 9,40% e de 6,57%, respectivamente.

O sistema policristalino apresentou maior eficiência global e menor custo por litro de água bombeado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOLZADEH, M; AMERI, M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. **Renewable Energy**, v.34, p. 91-96, 2009.

ANEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2ª Ed, Brasília: ANEL, 2005, p. 243. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em 25 nov. 2011.

BAÑOS, R.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; ALCAYDE, C.G.; GÓMEZ, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p.1753–1766, 2011.

BASSO, L. H. et al. Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, vol.30, n.2, p.332-344, Jan./Feb. 2010.

CECCHINI, T. **Otimização das regiões altamente dopadas de células solares fabricadas por processos térmicos rápidos de pequeno porte**. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CRESESB/CEPEL. **Energia Solar Princípio e Aplicações**. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; CEPEL – Centro de pesquisas de Energia Elétrica. Sistema Eletrobrás. Rio de Janeiro:1999.

CRESESB/CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Grupo de trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: 2008. 206p.

DE ANDRADE, E. H. P.; BEZERRA, L. D. S.; ANTUNES, F. L. M. **Sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica utilizando motor de indução trifásico**. 2008. Disponível em: <<http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/53.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2011.

EREC - European Renewable Energy Council. Disponível em: <<http://www.erec.org/renewable-energy/photovoltaics.html>>. Acesso em: 07 mar. 2012.

FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L. **Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos**. Encontro de Energia no Meio Rural, an. 4, 2002.

FIORENTINO, J. J.; SERAPHIM, J. O. Análise da eficiência de módulos fotovoltaicos instalados em condições normais de operação. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.20, n.3, p.89-112, 2005.

GNOATTO, E.; DALLACORT, R.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. L.; FERRUZI, Y. Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 30, n.2, p. 215-219, 2008.

GREENPRO. **Energia Fotovoltaica – manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. 2004. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/index.htm>>. Acesso em: 29 mar. 2011.

JAFAR, M. A model for small-scale photovoltaic solar. **Renewable Energy**, [S.l], p.85-90, 2000.

JANUZZI, G. DE M.; VARELLA, F. K. DE O. M.; GOMES, R. D. M. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: Relatório final**. Campinas, out, 2009. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2011.

KOLLING, E. M. **Análise de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água**. 2001. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2001.

KOLLING, E. M. et al. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.527-535, set./dez. 2004.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2007. 358 p.

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.

MICHELS, R. N. et al. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, p.370-379, jul./set. 2009.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. Solar photovoltaic water pumping. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.l], p.472-487, 2008.

MOREIRA, C. A. M. **Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água**. 2009. 129 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho/ Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2009.

NOGUEIRA, C. U. **Utilização de sistemas solar e eólico no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ODEH, I.; YOHANIS, Y.G.; NORTON, B. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. **Solar Energy**, v. 80, p.850–860, 2006.

OLIVEIRA, F. C. et al. Potencial de redução do consumo de energia elétrica pela utilização de aquecedores solares no Estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p. 267-279, jul./set. 2008.

PRESENÇO, F. J. **Desenvolvimento de um sistema de controle para avaliação de fontes de energias renováveis no bombeamento de água.** 2007. 152 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2007.

REIS, L. B. DOS. **Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade.** 3ªed. Barueri: Manole, 2003.

RIFFEL, D. B. **Unidade de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias: simulação, projeto e validação experimental.** 2005. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SÁ, D. A. P. DE. **Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água.** 2010. 56 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, J. A. A; MICHELS, R. N. Influência de fatores ambientais sobre o desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico: um estudo de caso. **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 03, n. 3, p. 51-55, 2011.

SHAYANI, R. A. et al. Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 5, 2006, Brasília. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/sbpe_2006.pdf>. Acesso em 25 mar. 2012.

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

TIBA, C. et al. **Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres.** Recife: Ed.Universitária da UFPE, 2000. 111p.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003.