

BRUNO MENEGHEL ZILLI

**SISTEMA AUTÔNOMO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO
POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS AMORFO E POLICRISTALINO**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2018

BRUNO MENEGHEL ZILLI

**SISTEMA AUTÔNOMO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO
POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS AMORFO E POLICRISTALINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Coorientadora: Dra. Maritane Prior

CASCABEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2018

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Zilli, Bruno Meneghel

Sistema autônomo de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos amorfo e policristalino / Bruno Meneghel Zilli; orientador(a), Samuel Nelson Melegari de Souza; coorientador(a), Maritane Prior, 2018.

68 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2018.

1. Energia. 2. Eficiência energética. 3. Bombeamento de água. 4. Sistema fotovoltaico. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Prior, Maritane. III. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO MENEGHEL ZILLI

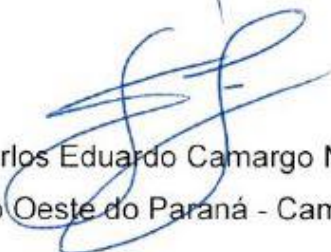
“Sistema autônomo de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos amorfo e policristalino”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



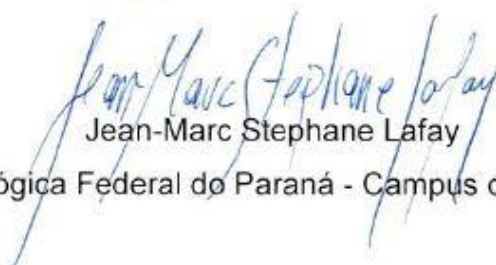
Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jean-Marc Stephane Lafay

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Pato Branco (UTFPR)

Cascavel, 19 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza e minha co-orientadora, Professora Dra. Maritane Prior pelas precisas e eficazes orientações.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA) pelo conhecimento compartilhado e pela prestatividade nas mais diversas horas.

À assistente do Programa, Vanderléia L. S. Schmidt, por toda ajuda e prontidão.

Aos Professores Dr. Jean-Marc Stephane Lafay e Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, membros da banca de defesa, pelas preciosas contribuições.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, pela disponibilidade de infraestrutura, equipamentos e laboratórios utilizados nesta pesquisa.

À Fundação Araucária pela bolsa cedida para realização da pesquisa.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
CASA	Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia
CdTe	Telureto de Cádmio
C_f	Coeficiente do material
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
Cz-Si	Silício Czochralski
D	Diâmetro
E_C	Energia consumida
E_D	Energia disponível
EVA	Etil Vinil Acetato
H_g	Altura geométrica
H_m	Altura manométrica
H_P	Perda de carga
I	Corrente
I_{MP}	Corrente em potência máxima
I_{SC}	Corrente em curto circuito
L	Comprimento
L_{eq}	Comprimento equivalente
MIGDI	Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
m-Si	Silício monocristalino
OPV	Organic photovoltaic
P	Potência
P_C	Potência consumida
P_D	Potência disponível
P_{MAX}	Potência máxima
PN	Junção positivo-negativo
p-Si	Silício policristalino

PVC	Policloreto de Polivinila
Q	Vazão
R_s	Irradiação solar global
SBF	Sistema de bombeamento fotovoltaico
SWE	<i>Staebler-Wronski Effect</i>
t	Tempo
U	Tensão
U_{CC}	Tensão em corrente contínua
U_{DL}	Tensão lida pelo datalogger
U_{MP}	Tensão em potência máxima
U_{OC}	Tensão em circuito aberto
U_{Real}	Tensão de saída do painel fotovoltaico
η	Eficiência de conversão

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C	Graus célsius
A	Ampère
cm	Centímetro
g	Grama
h	Hora
kg	Kilo grama
kW _P	Kilo watts pico
kΩ	Kilo ohm
L dia ⁻¹	Litros por dia
L h ⁻¹	Litros por hora
L min ⁻¹	Litros por minuto
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³ s ⁻¹	Metro cúbico por segundo
mA	Miliampère
mca	Metro de coluna d'água
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
mV °C ⁻¹	Milivolts por grau célsius
V	Volts
W	Watts
W h	Watts hora
W m ⁻²	Watts por metro quadrado
W _P	Watts Pico
µm	Micro metro
Ω	Ohm

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potencial anual médio de energia solar em cada região.....	3
Figura 2. Efeito fotovoltaico.	4
Figura 3. Módulos de silício monocristalino, policristalino e amorfo.	5
Figura 4. Aumento das eficiências das células fotovoltaicas de diferentes tecnologias, em laboratório.	6
Figura 5. Componentes materiais de um módulo fotovoltaico monocristalino e policristalino.....	8
Figura 6. Curva I-U de uma célula fotovoltaica de silício cristalino à 25 ⁰ C.....	9
Figura 7. Curvas I-U de uma célula fotovoltaica em diferentes temperaturas à 1000 W m ⁻²	9
Figura 8. Associação de módulos fotovoltaicos: (a) série; (b) paralelo.	10
Figura 9. Diagrama de um sistema fotovoltaico isolado em função da carga utilizada.	11
Figura 10. Sistema fotovoltaico conectado à rede com medidor bidirecional.	12
Figura 11. Sistema de bombeamento fotovoltaico com possíveis aplicações.	14
Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema com diferentes alturas manométricas.	15
Figura 13. Painel fotovoltaico de silício amorfo instalado.	17
Figura 14. Painéis de silício policristalino instalados.	18
Figura 15. Bomba d'água submersa, marca Solarjack.	19
Figura 16. Estrutura e curso hídrico do sistema de bombeamento.	20
Figura 17. Piranômetro CMP3 instalado no plano do painel.	21
Figura 18. Termopares instalados na face inferior e na sombra do painel.	22
Figura 19. Sensor de fluxo de água instalado.	23
Figura 20. Datalogger da Campbell Scientific, modelo CR1000.....	24
Figura 21. Datalogger construído a partir de um Arduino, RTC e um módulo de cartão SD.	25
Figura 22. Esquema de alimentação da bomba e circuito hidráulico.	26
Figura 23. Arranjos dos geradores fotovoltaicos amorfo e policristalino.	27
Figura 24. Diagrama elétrico, posicionamento e ligações dos sensores.	28

Figura 25. Datalogger montado com um arduíno pro mini para a medição de vazão.	29
Figura 26. Volume bombeado e irradiação solar média no período de coleta do painel amorfo.....	35
Figura 27. Volume bombeado e irradiação solar média no período de coleta do painel policristalino.	36
Figura 28. Vazão por irradiação do sistema amorfo.....	37
Figura 29. Vazão por irradiação do sistema policristalino.	37
Figura 30. Vazão pela energia consumida no sistema amorfo.....	38
Figura 31. Vazão pela energia consumida no sistema policristalino.	38
Figura 32. Energias consumida e disponível do sistema amorfo, no dia 13/03.	40
Figura 33. Energias consumida e disponível do sistema policristalino, no dia 27/04.	40
Figura 34. Energia consumida pela energia disponível no sistema amorfo.	41
Figura 35. Energia consumida pela energia disponível no sistema policristalino.	41
Figura 36. Gráfico de irradiação por hora pela eficiência do painel amorfo.	44
Figura 37. Gráfico de irradiação por hora por eficiência do painel policristalino.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural	13
Tabela 2. Especificações técnicas de módulo JN40F da Solarterra.....	18
Tabela 3. Especificações técnicas de módulo STP022-12/D da Suntech	19
Tabela 4. Especificações técnicas da bomba d'água SDS-D-228 da SolarJack	20
Tabela 5. Especificações técnicas do piranômetro CMP3 da Kipp & Zonen	21
Tabela 6. Especificações técnicas do sensor de fluxo de água	23
Tabela 7. Especificações técnicas do datalogger CR 1000, da Campbell Scientific .	24
Tabela 8 - Componentes utilizados com os respectivos custos e vidas úteis.	33
Tabela 9 - Efeito da temperatura sobre a eficiência dos painéis.	43

ZILLI, Bruno Meneghel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2018. **Sistema autônomo de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos amorfo e policristalino.** Professor Orientador Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza. Professora Coorientadora Dra. Maritane Prior

RESUMO

Os recursos hídricos são de fundamental importância tanto para a vida dos seres vivos, quanto para as atividades antrópicas. A falta destes pode ser um fator limitante para a ocupação e desenvolvimento de uma determinada região. Sistemas de bombeamento de água são uma alternativa para solução destes casos, sendo a geração elétrica a partir de painéis fotovoltaicos uma opção localmente sem poluentes e com menos manutenção quando comparado a moto geradores à combustão. Este trabalho visa a análise de um sistema de bombeamento fotovoltaico com duas diferentes tecnologias de células, silício amorfo e policristalino. O mesmo foi instalado nas dependências da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – campus Cascavel-PR. Coletou-se os dados da tensão e corrente elétrica gerados pelos painéis, temperatura ambiente e dos painéis, irradiação solar e vazão da bomba d'água. A partir destes, foram avaliados o volume bombeado no período estabelecido, a vazão em função da irradiação e da energia consumida, o comportamento das energias disponível e consumida, assim como a influência da irradiação e da temperatura do painel sobre a eficiência do mesmo. O volume médio bombeado foi de 2.255,44 e 2.397,01 litros por dia nos sistemas amorfo e policristalino, respectivamente. Os melhores resultados de eficiência em ambos os sistemas se deram a 800 W m^{-2} , sendo 4,69% para o amorfo e 7,75% no policristalino. No entanto o primeiro apresentou menor queda de tensão com o aumento de temperatura. Obteve-se no sistema policristalino maior vazão, eficiência global e menores custos específicos.

Palavras Chave: bombeamento de água, eficiência energética; sistema fotovoltaico.

ZILLI, Bruno Meneghel. State University of West Paraná, February 2018.
Autonomous water pumping system powered by amorphous and polycrystalline photovoltaic panels. Advisor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza. Co-advisor Dra. Maritane Prior

ABSTRACT

Water resources have fundamental importance both for life of living beings and for human activities. The lack of water can be a limiting factor for occupation and development of a certain region. Pumping systems are an alternative solution for these cases, with electric generation from photovoltaic panels being a locally pollutant-free option with less maintenance when compared to combustion-generation engines. This work aims the analysis of a photovoltaic pumping system with two cell technologies, amorphous silicon and polycrystalline. The experiment was installed in the dependencies of the State University of West Paraná – campus Cascavel-PR. The data of voltage and electric current generated by panels, ambient and panels temperature, solar irradiation and water flow were collected. From these data, the volume pumped in the established period, the flow as a function of the irradiation and the energy consumed, the behavior of the available and consumed energies, as well as the panel's temperature on efficiency, were analyzed. The average volume pumped was 2,255.44 and 2,397.01 liters per day in the amorphous and polycrystalline systems, respectively. The best efficiency results in both systems were given at 800 W m^{-2} , 4,69% for amorphous and 7,75% polycrystalline. However, the first one presented lower voltage drop with panel's temperature increasing. It was obtained higher flow and overall efficiency in the polycrystalline system.

Keywords: water pumping, energy efficiency; photovoltaic system.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Energia solar	3
2.1.1. Energia solar fotovoltaica	4
2.2. Sistemas fotovoltaicos.....	9
2.2.1. Sistemas fotovoltaicos isolados	11
2.2.2. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede	11
2.3. Uso de água na agricultura	12
2.4. Sistema de bombeamento fotovoltaico	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Localização do experimento.....	17
3.2. Material.....	17
3.2.1. Conjuntos de painéis fotovoltaicos.....	17
3.2.2. Motobomba	19
3.2.3. Materiais hidráulicos.....	20
3.2.4. Piranômetro	21
3.2.5. Termopar	22
3.2.6. Medição de vazão	22
3.2.7. Aquisição de Dados	23
3.2.8. Medição de tensão e corrente.....	25
3.3. Métodos.....	25
3.3.1. Montagem e funcionamento do experimento.....	25
3.3.2. Arranjo dos painéis fotovoltaicos	26
3.3.3. Aquisição de dados	27
3.3.4. Parâmetros calculados.....	29
3.3.4.1. Tensão e corrente reais	29
3.3.4.2. Potência.....	30
3.3.4.3. Altura manométrica	30
3.3.4.4. Energia solar disponível e energia consumida pela carga	31
3.3.4.5. Determinação da eficiência dos painéis, da bomba e do sistema	32
3.3.4.6. Custos unitários da energia consumida e do volume de água bombeada	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1. Volume bombeado	35
4.2. Vazão	37
4.3. Altura manométrica	39
4.4. Energia consumida e energia disponível	39

4.5. Eficiência dos painéis	42
4.5.1. Caracterização da eficiência do painel conforme a temperatura.....	42
4.5.2. Caracterização da eficiência do painel conforme a irradiação incidente	43
4.6. Eficiência da motobomba	45
4.7. Eficiência global do sistema.....	46
4.8. Custos unitários do sistema de bombeamento	46
5. CONCLUSÕES	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

A energia proveniente do sol é considerada uma das mais promissoras para a continuidade do desenvolvimento humano e uma alternativa para suprir o constante crescimento da demanda energética. Esta fonte de energia pode ser aplicada ao consumo constante de água, seja pelo seu aquecimento ou mesmo bombeamento, promovendo assim o desenvolvimento energético rural.

Os recursos hídricos, em termos qualitativos e quantitativos, são de suma importância para a vida dos seres vivos e para as atividades antrópicas como produção de alimentos, geração de energia, saneamento domiciliar, dentre outros (OLIVEIRA et al., 2015).

O nordeste brasileiro, região caracterizada pelo clima semiárido, sofre com irregularidades pluviométricas e falhas de infraestrutura em sistemas de armazenamento de água. Segundo Marengo (2008) estes problemas são barreiras no desenvolvimento de atividades agropecuárias que acentuam as frágeis condições de pequenos produtores, resultando na migração populacional da região.

A irrigação é uma importante ferramenta em áreas com longos períodos de tempo seco, o qual cria estresse e reduz o rendimento e a longevidade das culturas locais (SCARPARE et al., 2015). No meio rural, tanto para a irrigação quanto para o abastecimento de água, normalmente são usados sistemas de bombeamento de forma a reduzir a dependência de chuvas (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2017).

Uma solução para propriedades rurais isoladas é a aplicação de bombas de água alimentadas por fontes renováveis autônomas. Para pequenos produtores, sistemas de bombeamento fotovoltaicos são uma boa opção, em termos de manutenção e custo, quando comparados ao sistema convencional de fornecimento de energia ou geradores à diesel (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015), pois independem de extensivas infraestruturas elétricas de transmissão de energia para atender aplicações específicas ou uma baixa densidade demográfica (MICHELS, 2007).

O grande empecilho para a larga difusão da tecnologia de placas fotovoltaicas é o alto custo inicial para aquisição dos geradores, mesmo que estes possuam uma vida útil média de vinte e cinco anos. Fedrizzi (2003) discute que a opção fotovoltaica é mais competitiva em localidades mais afastadas de grandes

centros, podendo ser mais vantajoso que geradores à diesel em determinadas regiões.

Devido ao alto investimento, o sistema deve ser dimensionado de modo a atender a demanda levando em consideração as características intrínsecas da região de operação. Michels (2007), Niedzialkoski (2013) e Vicentin (2014) convergem ao mencionar que todo sistema alimentado por células fotovoltaicas deve ser acompanhado por um estudo local de viabilidade técnica e econômica.

O território brasileiro de um modo geral recebe alta incidência de radiação solar, sendo assim favorável às aplicações fotovoltaicas. Michels (2007) apenas ressalva que estes sistemas devem ser melhores estudados na região sul, onde observa-se menor incidência solar quando comparado com outras regiões.

Diante do exposto, tem-se como problema, se um sistema de bombeamento fotovoltaico, avaliando-se diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos e sem o auxílio de um banco de baterias, poderia atender a demanda de uma pequena propriedade rural na região oeste do Paraná.

Moreira (2009) e Vicentin (2014) definiram que são necessários 1200 litros de água em uma pequena propriedade rural. Nogueira et al. (2015) registrou uma média diária de volume bombeado de 3.536,45 litros com um painel fotovoltaico de silício monocristalino de 150 W_p e 4.182,55 litros com um painel fotovoltaico de 135 W_p de silício policristalino, utilizando uma motobomba de superfícies de 84 W. Supõe-se, portanto, que um sistema de bombeamento utilizando uma bomba submersa de 79 W alimentada por um painel de silício policristalino de 132 W_p ou um painel de silício amorfo de 80 W_p conseguiria suprir a demanda de uma pequena propriedade rural.

Este trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos dos tipos amorfo e policristalino na região de Cascavel/PR, tendo o curso hídrico uma altura manométrica fixa.

Os objetivos específicos são: determinar a eficiência dos painéis fotovoltaicos, da bomba e a eficiência global do sistema, caracterizar a influência da temperatura na eficiência dos painéis e encontrar os custos específicos dos sistemas ao longo de suas vidas úteis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia solar

Segundo Pereira et al. (2006), o Brasil recebe em média uma incidência de radiação solar alta durante todo o ano, como mostra a Figura 1, devido ao seu clima intertropical. O que favorece o uso da energia solar como uma fonte de geração térmica ou elétrica em quase a totalidade de seu território. Porém os autores ressaltam que há altas variabilidades na radiação solar nos períodos de outono e inverno na região sul e sudeste devido à entrada de sistemas frontais, os quais ocasionam nebulosidade durante alguns dias consecutivos.

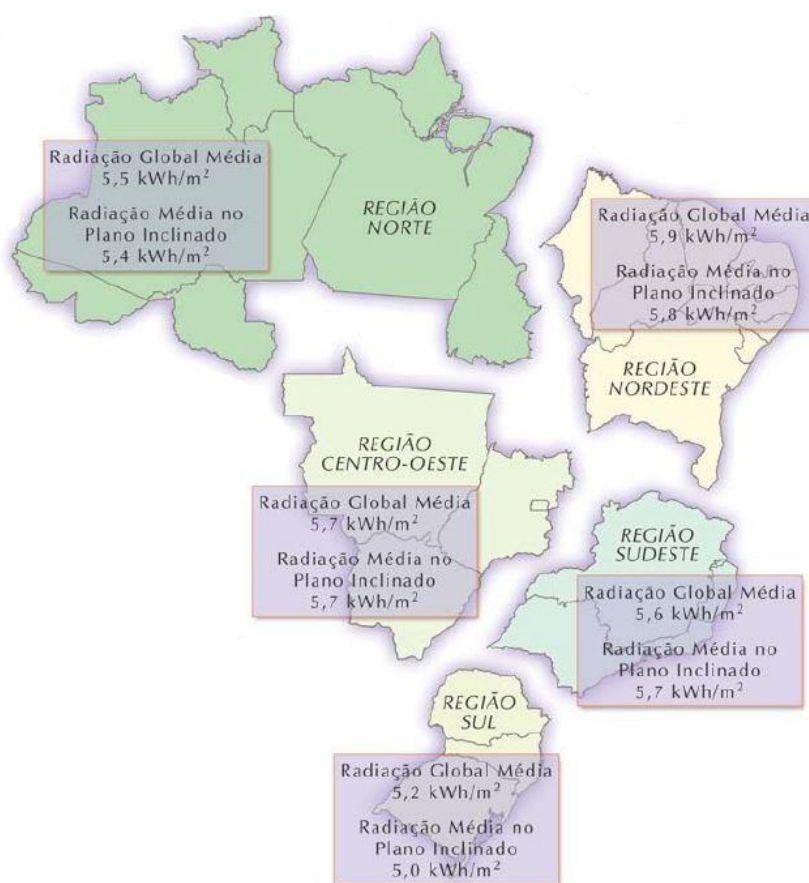


Figura 1. Potencial anual médio de energia solar em cada região.

Fonte: Pereira et al. (2006)

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - Cresesb (2014) enfatiza a importância da energia solar como a responsável pela

maior parte das outras fontes de energia. De forma indireta, nos casos da hidráulica, eólica, biomassa e até mesmo no petróleo, carvão e gás natural. Ou direta como na energia solar térmica ou fotovoltaica.

2.1.1. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio de células fotovoltaicas. As quais realizam a conversão da radiação solar em eletricidade, através do efeito fotovoltaico (HOSENUZZAMAN et al., 2015).

Este efeito se dá em materiais semicondutores, sendo o silício o mais utilizado devido sua abundância. Este é dopado normalmente com fósforo (dopante n) para propositalmente ter excesso de elétrons e formar a banda de valência e boro (dopante p) que é caracterizado pela falta de elétrons, ou seja, maior presença de lacunas formando a banda de condução. A partir deste processo de dopagem há a junção pn na célula de silício, que quando exposta a fótons com energia maior que a banda vazia (*gap*), a qual fica entre as bandas de valência e de condução, ocorre os pares elétrons-lacunas, acelerando-se as cargas e gerando corrente elétrica na junção pn (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; CRESESB, 1999). A Figura 2 ilustra esta dinâmica dos elétrons diante da radiação solar.

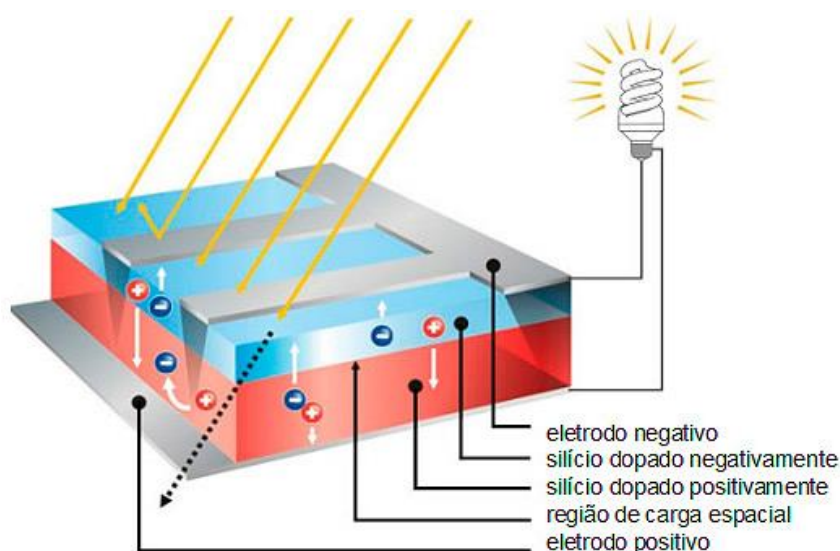


Figura 2. Efeito fotovoltaico.
Fonte: CRESESB (2014)

Calaia (2011) e Lacerda e Van Den Bergh (2016) classificam as células fotovoltaicas em diferentes tipos de gerações conforme a tecnologia de fabricação e material usado. A primeira geração é baseada no silício, compreendendo o monocristalino (m-Si), o policristalino (p-Si) e o amorfo (a-Si), cujos módulos são apresentados na Figura 3. A segunda é a geração dos filmes finos, a qual também faz parte o silício amorfo, juntamente com as células de Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) e Telureto de Cádmio (CdTe) caracterizadas por sua baixa espessura e peso. E por fim as células de terceira geração, com novos conceitos e em sua maioria ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento. Dentre estas Tolmasquim (2016) destaca as células de multijunção que utilizam o empilhamento de duas ou mais células, capazes de observar uma maior faixa de espectro da irradiação solar. Ou as células orgânica (OPV) que usam moléculas ou polímeros orgânicos para absorver a luz.

As tecnologias de células fotovoltaicas mais difundidas e encontradas são a de silício monocristalino e policristalino. Por serem consideradas mais confiáveis, terem as maiores eficiências e as tecnologias mais consolidadas, juntas correspondem à mais de 85% do mercado (CRESESB, 2014).



Figura 3. Módulos de silício monocristalino, policristalino e amorfo.
Fonte: Calaia (2011)

As células de silício monocristalinas são obtidas pelo método Czochralski (Cz-Si), formando uma peça cilíndrica uniforme que posteriormente é laminada em espessuras de 100 μm . Apresentam uma eficiência de conversão de irradiação solar

em potência elétrica típica entre 17 a 21,5% em módulos comerciais (TOLMASQUIM, 2016).

No entanto essa maior qualidade obtida no cristal resulta em custos mais elevados na extração e fabrico do mesmo, o que aumenta o valor das células monocristalinas (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015).

Com a mesma espessura de lâmina, as células provenientes de silício policristalino são confeccionadas a partir da fusão de silício e posteriormente solidificado em um bloco contendo pequenos cristais. Consequentemente a eficiência destas células é reduzida devida as interfaces entre os vários cristais, tendo valores típicos entre 14,5 a 16,2% (CRESESB, 2014; *Massachusetts Institute of Technology-MIT*, 2015).

Fraunhofer (2016) destaca o aumento de eficiência média em cerca de 12% para 17% em células laminadas de silício usadas em módulos comerciais no últimos dez anos. Desta forma, as fabricantes conseguiram reduzir a espessura e melhorar a relação de peso/potência das mesmas.

Com a melhoria de processos de produção de células fotovoltaicas, juntamente com a constante pesquisa em aprimoramento de eficiência destas, resultam em um produto viável no mercado. A Figura 4 expõe numericamente esta evolução.

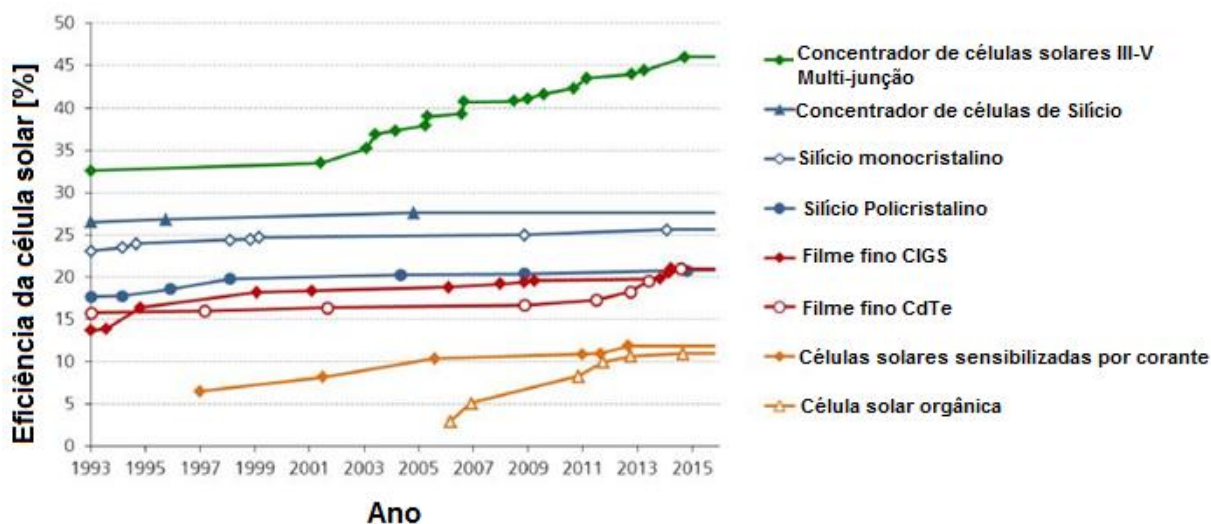


Figura 4. Aumento das eficiências das células fotovoltaicas de diferentes tecnologias, em laboratório.

Fonte: adaptado de Fraunhofer (2016)

Nota-se um aumento de eficiência em todas as tecnologias de células fotovoltaicas. As células mono e policristalinas apresentaram menor inclinação em ascensão por serem as primeiras amplamente estudadas e consolidadas no mercado.

De acordo com Al Hanai et al. (2011) as células de silício amorfo são depositadas como gás em superfícies como vidro, alumínio ou plástico, formando assim películas finas de material semicondutor com espessuras entre 0,5 a 2 μm . Nesta tecnologia usa-se uma menor quantidade de materiais para produção das células se comparado com as de silício cristalino. No entanto tem eficiências menores, entre 6 e 8%, sendo que esta reduz significativamente (cerca de 30%) nas primeiras mil horas de exposição à irradiação solar pelo efeito Staebler-Wronski (SWE).

Yang, Banerjee e Guha (2003) explicam que para amenizar este efeito de queda de eficiência, as células de silício amorfo são usadas em estruturas multijunção, ou tandem, sendo estas formadas por uma camada superior e outra inferior de películas de filmes finos. Kateb, Tobbeche e Merazga (2017) relata que essa estrutura é oferecida por alguns fabricantes devida sua eficiência estabilizada e redução da banda proibida (*bandgap*) do material semicondutor, tornando possível a absorção de uma faixa maior do espectro da luz.

Apesar da baixa eficiência, Tolmasquim (2016) destaca o elevado coeficiente de absorção de luz, 10 a 100 vezes maior que os cristalinos, e o menor coeficiente de temperatura, resultando em menor perda de potência conforme o aumento de temperatura da célula.

A conexão em série e/ou paralelo destas células viabiliza tensões e correntes adequadamente utilizáveis, que juntamente com os materiais que proporcionam proteção mecânica e ambiental, como ilustra a Figura 5, formam os módulos fotovoltaicos (HOSENUZZAMAN et al., 2015; TOLMASQUIM, 2016).

Segundo Tolmasquim (2016), a moldura (geralmente em alumínio) tem por função a fixação do módulo em local adequado. Esta juntamente com o selante e o vidro com camada anti-reflexiva, realizam a proteção contra agentes do ambiente, principalmente gases, umidade, choques mecânicos e vibrações. O encapsulante, normalmente de Etil Vinil Acetato – EVA, além de proteger as células da umidade, otimiza a condução elétrica das mesmas. O *backsheet*, dentre outras atribuições, adiciona isolamento elétrico ao módulo.

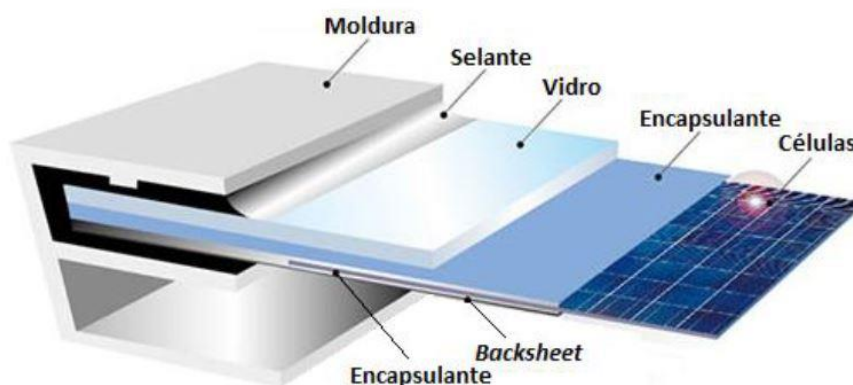


Figura 5. Componentes materiais de um módulo fotovoltaico monocristalino e policristalino.

Fonte: Tolmasquim (2016)

Duas variáveis ambientais que influenciam na geração de energia de um módulo fotovoltaico são a irradiação solar e a temperatura da placa. Ambas devem ser levadas em consideração dada as características intrínsecas do local de instalação e operação, uma vez que afetam a característica corrente por tensão (I-U) do módulo (BAYOD-RÚJULA; CEBOLLERO-ABIÁN, 2014).

A irradiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica afeta diretamente a geração de corrente da mesma. Nota-se pela Figura 6 o aumento da corrente conforme se eleva a irradiação na curva I-U, a uma mesma temperatura, caracterizando assim uma relação linear entre as variáveis. Já a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica (CRESESB, 2014).

A temperatura da célula é decorrente tanto da irradiação incidente quanto da temperatura ambiente. O aumento de uma destas variáveis, ou ambas, resulta em um decréscimo considerável da tensão da célula e um aumento desprezível em sua corrente (BARTH et al., 2016). A Figura 7 ilustra curvas I-U com células fotovoltaicas em diferentes temperaturas a uma irradiação solar constante. Com a redução da tensão reduz-se consequentemente a potência e a eficiência das células (CRESESB, 2014).

Tolmasquim (2016) e Al Hanai et al. (2011) ressaltam que o coeficiente de temperatura em células de filme fino, como o silício amorfo, é menor se comparado às células de silício cristalino. Significando menor perda de potência diante da elevação de temperatura do módulo.

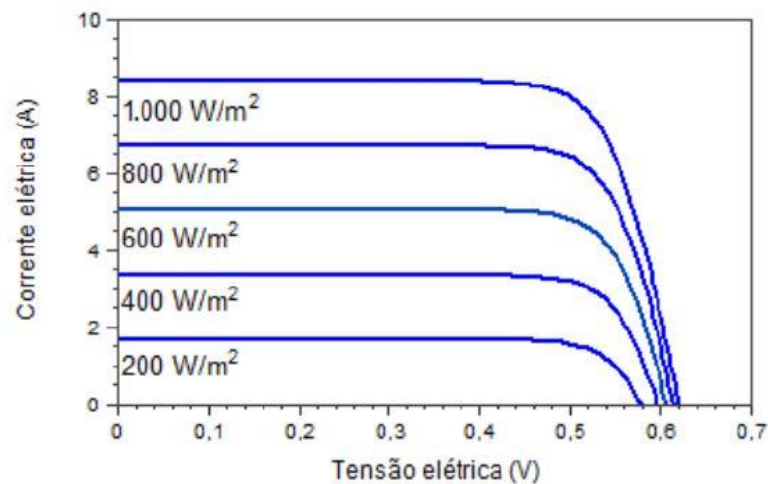


Figura 6. Curva I-U de uma célula fotovoltaica de silício cristalino à 25°C.
Fonte: CRESESB (2014)

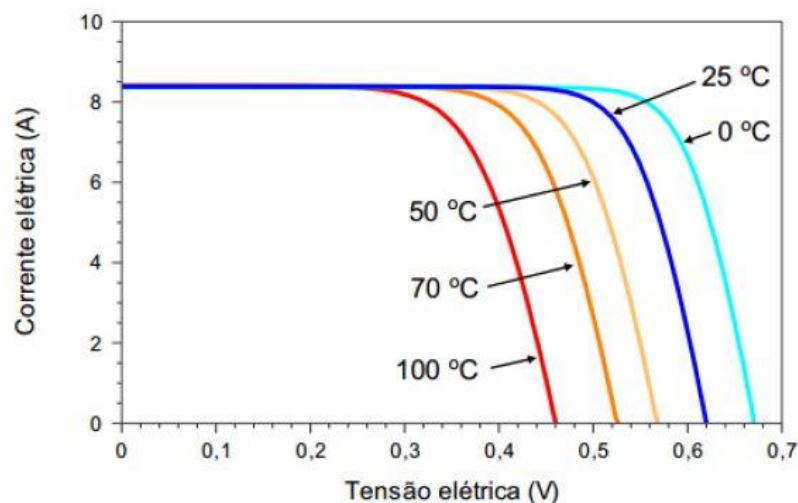


Figura 7. Curvas I-U de uma célula fotovoltaica em diferentes temperaturas à 1000 W m⁻².
Fonte: CRESESB (2014)

2.2. Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos de um módulo ou um arranjo destes de modo que seja fornecida a potência desejada como mostra a Figura 8. Associando-se dois módulos iguais em série a tensão dos geradores são somadas e a corrente se mantém como em um único módulo. Já a conexão em paralelo mantém a mesma tensão entre os módulos, porém as corrente dos geradores são somadas (CRESESB, 2014).

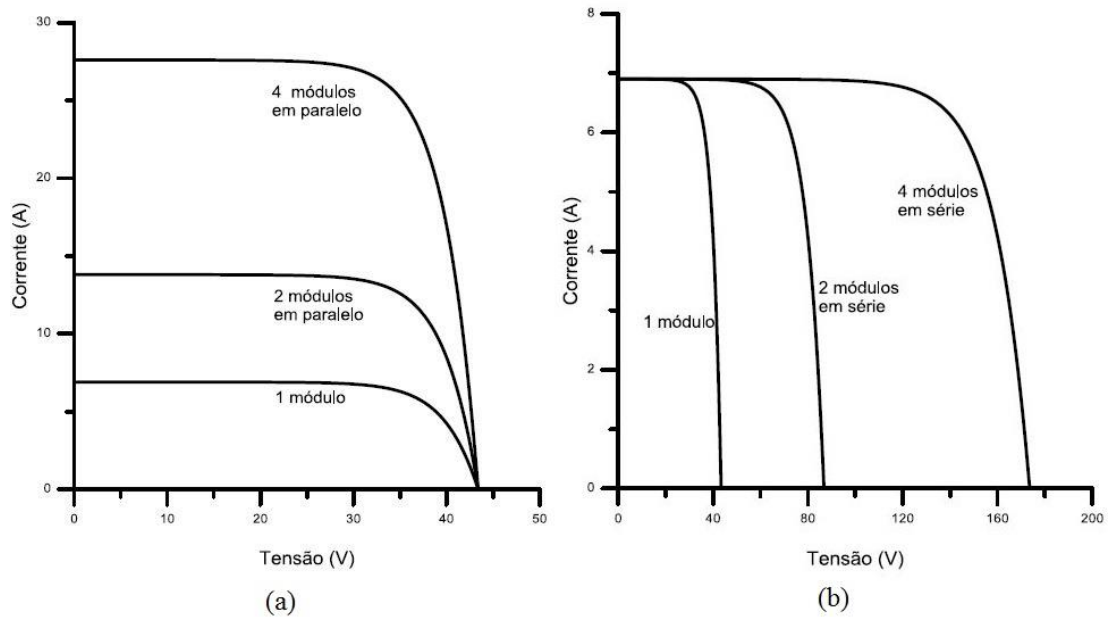


Figura 8. Associação de módulos fotovoltaicos: (a) série; (b) paralelo.
Fonte: CRESESB (2014)

Além dos geradores fotovoltaicos, também compõem o sistema um banco de baterias e controladores de carga, para cargas de corrente contínua e um inversor, caso a aplicação necessite de tensão alternada (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Montenegro (2013) classifica os sistemas fotovoltaicos em dois principais ramos: os interligados na rede (*on-grid*) e os sistemas isolados (*off-grid*), também denominados de autônomos, os quais não têm conexão com a malha de distribuição elétrica. Cresesb (2014) acrescenta que em ambos os casos a geração fotovoltaica pode ser complementada com outras fontes, formando os chamados sistemas híbridos.

Em locais afastados da rede de distribuição elétrica, principalmente áreas rurais, a geração fotovoltaica tornou-se uma alternativa para este atendimento (CHAUREY; KANDPAL, 2010). Em países em desenvolvimento, a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados para suprir a demanda energética em vilas afastadas ou propriedades rurais já foram implementados ou analisados por programas governamentais, como é o caso da Índia (KAMALAPUR; UDAYKUMAR, 2011), Brasil (TOLMASQUIM, 2016) e Argélia (NACER et al., 2016) visando o desenvolvimento social e da infraestrutura local.

2.2.1. Sistemas fotovoltaicos isolados

Sistemas isolados são comumente usados em regiões remotas onde há ausência de fornecimento de energia elétrica. Moreira (2009) aponta que estes são caracterizados por aplicações de baixas potências, com valores típicos entre centenas de W_p a unidades de kW_p . A Figura 9 mostra um sistema fotovoltaico isolado com diferentes configurações de equipamentos conforme o tipo de tensão que a carga exige (CRESESB, 1999).

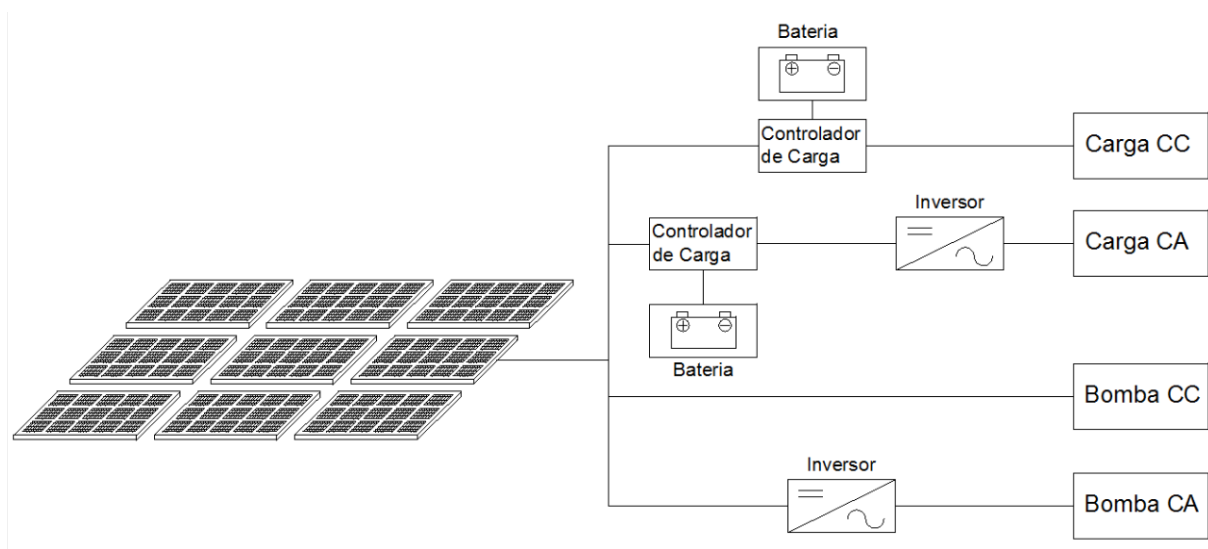


Figura 9. Diagrama de um sistema fotovoltaico isolado em função da carga utilizada. Fonte: Adaptado de Cresesb (1999)

Os sistemas isolados ganharam amparo legal e de regulamentação com a Resolução Normativa Nº 83/2004 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que oportunizou um importante avanço da tecnologia na inserção em programas de eletrificação rural. Posteriormente a mesma foi substituída pela Resolução Nº 493/2012, a qual incluiu também os procedimentos e as condições de fornecimento de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) (CRESESB, 2014).

2.2.2. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

A principal característica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede é o fornecimento direto da energia elétrica produzida na rede de distribuição elétrica,

estando assim em paralelo aos demais geradores. Devido a este modo de operação, não se aplica qualquer forma de armazenamento de energia nestes sistemas.

Quando se tornou pública a Resolução Normativa Nº 482/2012, possibilitou-se que consumidores possam também gerar, através de pequenos geradores, energia elétrica e comercializá-la em um sistema de créditos com a concessionária responsável pela linha de distribuição que lhe concede acesso. Esta deixa claro que as fontes de geração permitidas são: hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada (ANEEL, 2012).

Neste sistema de compensação, a propriedade se torna uma unidade geradora e injetará o excedente (o que não foi consumido no próprio local) na rede de distribuição, recebendo assim créditos a serem utilizados nos meses seguintes. Os quais são descontados conforme a necessidade de uso da energia da concessionária em períodos de incapacidade de geração fotovoltaica (MONTENEGRO, 2013).

Este fluxo de energia elétrica hora de fornecimento outra de consumo, torna necessário um medidor bidirecional de registros como o ilustrado na Figura 10 (CRESESB, 2014).

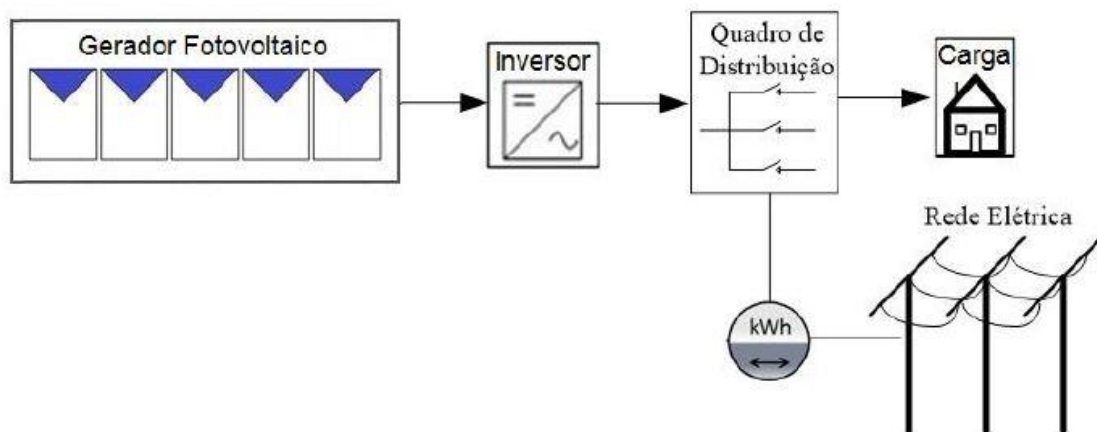


Figura 10. Sistema fotovoltaico conectado à rede com medidor bidirecional.
Fonte: CRESESB (2014)

2.3. Uso de água na agricultura

Segundo Rodrigues (2012), o uso de água em aplicações agrícolas demanda um bombeamento e fluxo hídrico significativo, consequentemente exigindo

uma intensa quantidade de energia. O autor ainda ressalva que devida à característica climática de baixa precipitação pluviométrica em certas regiões, acentua-se a importância da irrigação.

Prática comum dentre os usos de sistemas de bombeamento hídrico, a irrigação permite tanto a adaptação da variabilidade de chuva, de forma a suavizar os impactos climáticos sazonais ou interanuais, quanto esta sendo a única fonte de água para uma cultura (TURRAL; SVENDSEN; FAURES, 2010)

Tiago Filho (2002) dimensiona a demanda hídrica de uma pequena propriedade rural seguindo os parâmetros de consumo de água exibidos na Tabela 1 multiplicados pela quantidade de pessoas, animais e área de plantio existente.

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

<i>Especificação</i>	<i>Unidade</i>	<i>Litros por dia</i>
Sede da propriedade	Pessoa	70 a 100
Aves	Cabeça	0,2 a 0,3
Caprinos	Cabeça	4 a 5
Suínos + higiene	Cabeça	5 a 8
Bovinos	Cabeça	30 a 35
Equinos	Cabeça	35 a 50
Horta e jardim	m ²	3 a 5

Fonte: Adaptado de Tiago Filho (2002).

Usando o método de dimensionamento de Tiago Filho (2002), Moreira (2009) e Vicentin (2014) definiram que em uma pequena propriedade onde vivem 6 pessoas, as quais criam 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e ainda cultivam em uma área de 100 m², necessita de 1200 litros de água diariamente.

Uma forma de disponibilizar água em pequenas propriedades e comunidades isoladas que possuem esse recurso subterrâneo é bombear usando energia a partir de fontes renováveis como a solar, eólica, biomassa, hidráulica ou a cogeração das mesmas. De acordo com Niedzialkoski (2013) um sistema de bombeamento autônomo alimentado por painéis fotovoltaicos pode ser um fator a ser considerado para a permanência de produtores em regiões rurais isoladas que não dispõem de água potável devida à ausência de energia elétrica.

2.4. Sistema de bombeamento fotovoltaico

Um sistema de bombeamento fotovoltaico comum é composto por um gerador fotovoltaico, um gerenciador de potência, uma bomba, uma cisterna para armazenamento e um sistema de distribuição. Estes componentes são selecionados conforme a aplicação e as características do local de operação. A água disponibilizada através de bombeamento pode ser usada no meio rural tanto para uso doméstico e higienização, quanto para irrigação e na criação de animais, conforme ilustra a Figura 11 (SONTAKE; KALAMKAR, 2016; VALER et al., 2016).

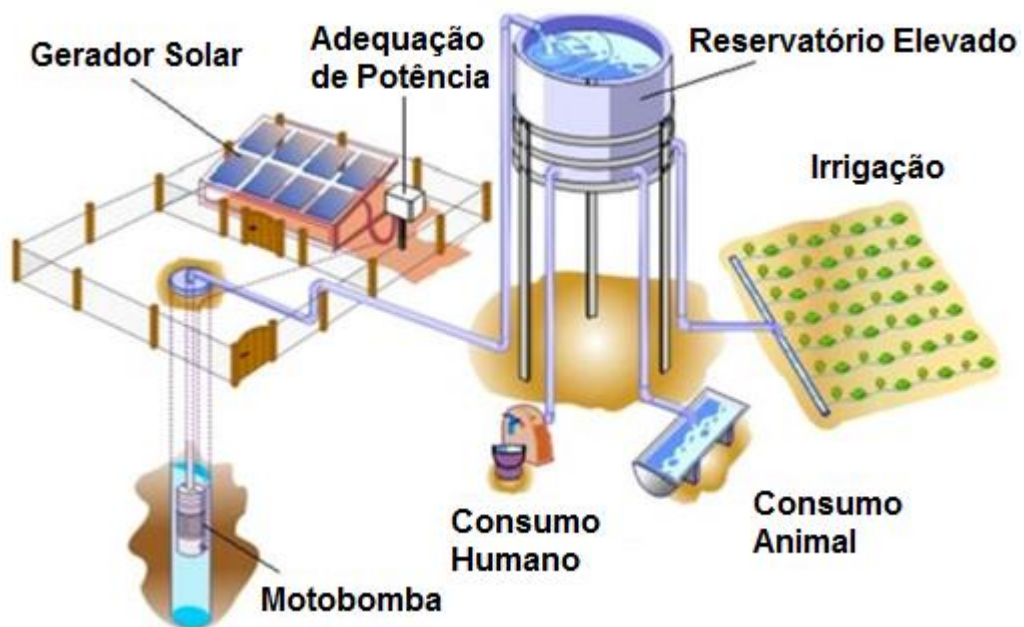


Figura 11. Sistema de bombeamento fotovoltaico com possíveis aplicações.
Fonte: adaptado de Valer et al. (2016)

Kolling et al. (2004) explicam que o módulo fotovoltaico converte a energia solar incidente em tensão e corrente contínua que alimenta o motor responsável pelo funcionamento da bomba d'água. O motor começa a operar apenas quando sua potência exigida é atendida pelo painel. Neste momento o torque mecânico é produzido e a bomba começa a trabalhar.

Diferente de outros sistemas fotovoltaicos isolados, os sistemas de bombeamento que usam essa alimentação geralmente não usam armazenamento de energia elétrica proveniente do conjunto controlador de carga e baterias. Mas sim energia potencial gravitacional através de um reservatório hidráulico elevado, os

quais são dimensionados para uma quantidade de dias de autonomia (CRESESB, 2014).

Kolling et al. (2004) montaram um sistema de bombeamento fotovoltaico para um experimento usando uma motobomba Shurflo, modelo 2088 e um painel fotovoltaico Solaris, modelo Ap6150, conforme ilustra a Figura 12. Seis alturas manométricas distintas foram empregadas, sendo elas: 4; 7,5; 11; 13; 15 e 19 m.

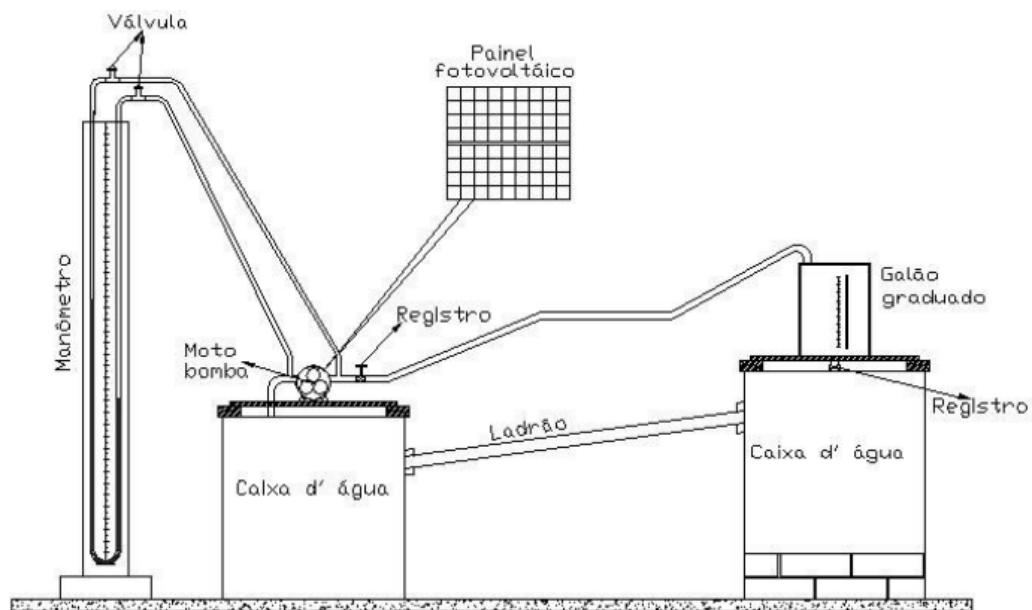


Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema com diferentes alturas manométricas. Fonte: Kolling et al. (2004)

Os autores concluíram que este sistema alcançou a eficiência global máxima de 2,3%, obtida pela relação entre a potência hidráulica e a energia solar disponível, na condição de maior carga (19 m). A vazão obtida variou de 2445 a 5565 L dia⁻¹ em função da irradiação solar incidente e da carga de bombeamento empregada no sistema.

Nogueira et al. (2015) analisaram o desempenho de três módulos fotovoltaicos policristalino de 50 W_p em série e de um painel monocristalino de 135 W_p para alimentar uma motobomba Shurflo 8000 com uma altura manométrica fixa de 6,83 m. O autor obteve vazões médias diárias dentro do intervalo de 3536,46 a 4182,55 litros. Sendo o sistema com painel monocristalino mais eficiente relacionando a vazão com energia consumida, porém foi com o painel policristalino que o sistema bombeou um volume maior de água.

Vincentin et al. (2016) avaliou dois sistemas de bombeamento fotovoltaico com altura manométrica variável. O primeiro sistema (SBF1) é composto por dois módulos policristalino de $130 W_p$ em paralelo e uma motobomba de $792 L h^{-1}$ a 0 mca. Este obteve melhor desempenho em alturas manométricas mais elevadas (7,5 e 13,5 mca) e alta irradiação solar média. O segundo (SBF2) possui outros dois módulos, idênticos ao primeiro, porém ligados em série e uma motobomba de $840 L h^{-1}$ a 0 mca com um driver de alimentação dotado de um seguidor de máxima potência. Resultando em menor dependência de altas irradiações e maior volume bombeado em baixas alturas manométricas (2,5 e 7,5 mca).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do experimento

O experimento foi realizado no Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia (CASA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel. O qual possui a localização geográfica definida pelas coordenadas 24°59' de Latitude Sul (S) e 53°27' de Latitude Oeste (W) e altitude de 753 metros acima do nível do mar. Possuindo uma irradiação média anual de 4,95 kWh m⁻² dia⁻¹ (SUNDATA, 2016).

3.2. Material

Dentre os equipamentos utilizados em um sistema de bombeamento fotovoltaico, destaca-se a motobomba e os módulos que compõem o painel fotovoltaico.

3.2.1. Conjuntos de painéis fotovoltaicos

Em uma primeira etapa de operação do sistema de bombeamento, utilizou-se um conjunto de dois módulos fotovoltaicos de silício amorfo, como ilustra a Figura 13.



Figura 13. Painel fotovoltaico de silício amorfo instalado.

As especificações de cada módulo de silício amorfo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações técnicas de módulo JN40F da Solarterra

<i>Característica</i>	<i>Especificação Técnica</i>
Modelo	JN40F
Potência máxima (P_{MAX})	40 W _p
Corrente nominal em P_{MAX} (I_{MP})	0,87 A
Tensão nominal em P_{MAX} (U_{MP})	46 V
Corrente de curto circuito (I_{SC})	1,00 A
Tensão de circuito aberto (U_{OC})	61,0 V
Dimensões (CxLxE)	1253 x 643 x 37 mm
Peso	15 kg

Fonte: Dias (2017)

A segunda etapa de bombeamento foi alimentada por um conjunto de seis módulos fotovoltaicos de silício policristalino, mostrados pela Figura 14.

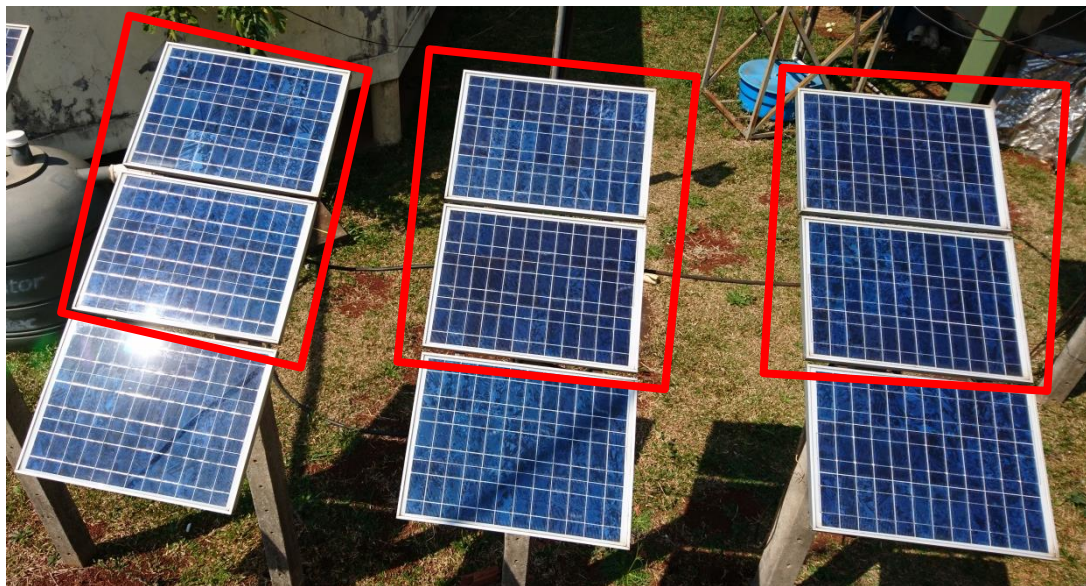


Figura 14. Painéis de silício policristalino instalados.

As especificações técnicas de cada módulo fotovoltaico de silício policristalino são expostas na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações técnicas de módulo STP022-12/D da Suntech

<i>Características</i>	<i>Especificação técnica</i>
Modelo	STP022-12/D
Potência máxima (P_{MAX})	22 W _P
Corrente nominal em P_{MAX}	1,31 A
Tensão nominal em P_{MAX}	16,8 V
Corrente de curto circuito (I_{SC})	1,61 A
Tensão de circuito aberto (U_{OC})	21 V
Dimensões (CxLxE)	559 x 407 x 25 (mm)
Peso	3,2 Kg

Fonte: SUNTECH [2005]

Os painéis de ambas as tecnologias foram montados em suportes com inclinação de 35°. Valor correspondente a latitude local acrescido de 10°, fixados com orientação geográfica norte, desta forma os painéis são otimizados para a operação no período de inverno (GNOATTO et al., 2008; SANTOS; RISPOLI, 2015).

3.2.2. Motobomba

Para o recalque de água foi utilizada uma bomba submersa da marca Solarjack, modelo SDS-D-228 do tipo diafragma, a qual é apresentada na Figura 15 e as especificações técnicas descritas na Tabela 4.



Figura 15. Bomba d'água submersa, marca Solarjack.

Tabela 4. Especificações técnicas da bomba d'água SDS-D-228 da SolarJack

<i>Características</i>	<i>Especificações técnicas</i>
Modelo	SDS-D-228
Tensão nominal	30 V
Corrente nominal	2,6 A
Potência nominal	79 W
Altura manométrica máxima	70 m
Vazão nominal	3,9 L min ⁻¹
Dimensões	Ø 9,7 cm x 27,4 cm
Peso	6,3 Kg

Fonte: SOLARJACK

3.2.3. Materiais hidráulicos

O sistema de bombeamento foi montado em uma estrutura metálica com 2,50 m de altura. Duas caixas d'água de fibra de vidro, com capacidade de 100 litros cada, foram usadas para simular um ponto de captação e bombeamento e um reservatório elevado para acúmulo de água, conforme ilustra a Figura 16.



Figura 16. Estrutura e curso hídrico do sistema de bombeamento.

Tubulações de PVC, bem como curvas de 90°, luvas, reduções e flanges foram utilizados no circuito hídrico. No nível de saída da bomba instalou-se uma válvula de retenção afim de se evitar o retorno de água nos dutos de recalque.

3.2.4. Piranômetro

Afim de mensurar a irradiação solar global incidente no plano horizontal dos painéis, utilizou-se um piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP3, com $15,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ de sensibilidade. As Figura 13 e Figura 17 mostram o piranômetro instalado, e a Tabela 5 descreve suas especificações técnicas.



Figura 17. Piranômetro CMP3 instalado no plano do painel.

Tabela 5. Especificações técnicas do piranômetro CMP3 da Kipp & Zonen

<i>Característica</i>	<i>Especificação Técnica</i>
Modelo	CMP3
Sensibilidade	5 a $15,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$
Faixa espectral	300 a 2800 nm
Máxima irradiação	2000 W m^{-2}
Precisão	$\pm 5\%$
Tempo de resposta 95%	18 s
Temperatura de operação	-40°C a $+80^\circ\text{C}$
Dimensões	$\varnothing 7,5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$
Peso	543 g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CMP3-L (2016).

3.2.5. Termopar

Para a coleta de dados de temperatura, utilizou-se três termopares tipo J. Dois destes foram instalados na região central da parte traseira de um módulo em cada tecnologia de painel. O terceiro é localizado na sombra do painel, com o intuito de medir a temperatura ambiente durante o período de coleta como mostra a Figura 18.

Segundo Trinuruk et al. (2009), a temperatura das células fotovoltaicas são difíceis de serem mensuradas, devida ao encapsulamento que as protege do ambiente externo e umidade. Diante disso, é medida a temperatura da região de trás do módulo fotovoltaico e assume-se esta como a temperatura da junção das células.

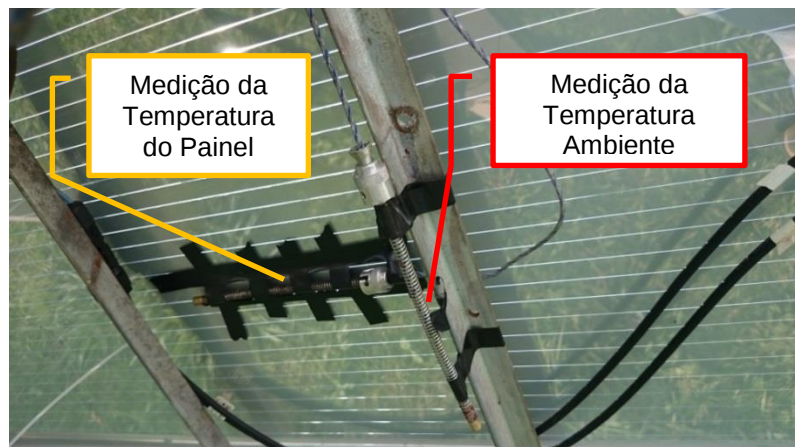


Figura 18. Termopares instalados na face inferior e na sombra do painel.

3.2.6. Medição de vazão

A mediação de vazão foi realizada com um sensor de fluxo de água da marca Yifa, modelo YF-S201 com rosca de $\frac{1}{2}$ ", que tem como princípio de funcionamento o efeito Hall. O sensor instalado pode ser visualizado na Figura 19 e suas especificações técnicas na Tabela 6.



Figura 19. Sensor de fluxo de água instalado.

Tabela 6. Especificações técnicas do sensor de fluxo de água

<i>Característica</i>	<i>Especificação Técnica</i>
Modelo	YF-S201
Intervalo de trabalho	1-30 L min ⁻¹
Pressão de água suportada	≤ 1,75 MPa
Tensão nominal de trabalho (U _{CC})	5~18 V
Corrente máxima de operação (5V)	15 mA
Temperatura	≤ 80 °C

Fonte: YIFA.

3.2.7. Aquisição de Dados

Para a coleta e armazenamento de dados foi usado um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo CR 1000, ilustrado pela Figura 20 e suas especificações técnicas apresentadas na Tabela 7. O mesmo coletou e gravou os valores de irradiação, temperaturas nas faces inferiores dos painéis amorfo e policristalino, temperatura ambiente e as médias de tensão e corrente.

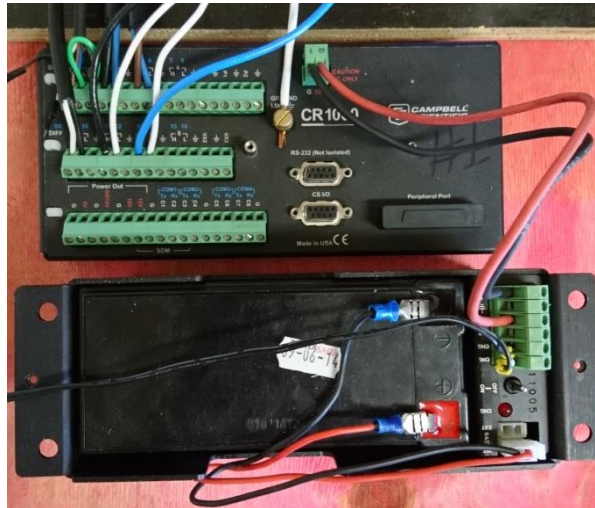


Figura 20. Datalogger da Campbell Scientific, modelo CR1000.

Tabela 7. Especificações técnicas do datalogger CR 1000, da Campbell Scientific

<i>Características</i>	<i>Especificações</i>
Modelo	CR 1000
Alimentação	9,6 ~ 16 V _{CC}
Temperatura de operação	- 25 ~ 50 °C
Entradas analógicas	8
Entradas controladoras de pulsos	2
Canais de corrente	3
Comunicação	1 CS I/O, 1 RS-232
Faixa de leitura em entrada analógica	± 5 V _{CC}
Precisão	± 0,06% (0 ~ 40°C)
Dimensões	239 x 102 x 8,5 mm
Peso	1000 g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000

Uma placa de desenvolvimento Arduino Pro Mini, com microprocessador ATmega 328 de 16 MHz, foi usada juntamente com um relógio de tempo real (*Real Time Clock* - RTC) DS 3231 e um módulo de cartão micro SD para formar um segundo datalogger, ilustrado pela Figura 21. Este foi programado para coletar os pulsos gerados pelo sensor de fluxo de água.

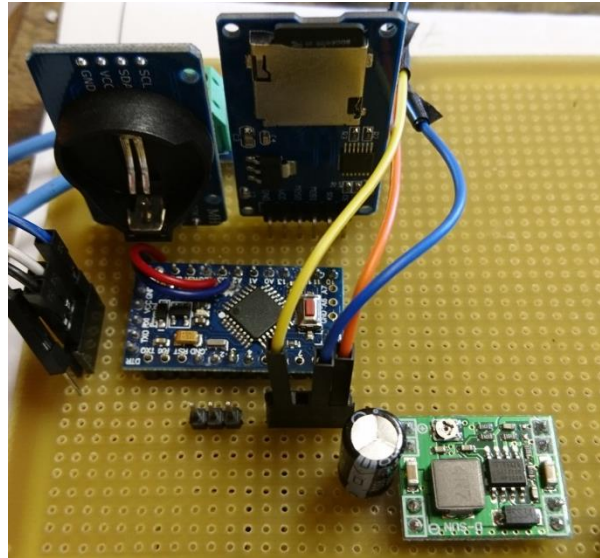


Figura 21. Datalogger construído a partir de um Arduino, RTC e um módulo de cartão SD.

3.2.8. Medição de tensão e corrente

Considerando que o intervalo de leitura do datalogger CR1000 em uma entrada analógica é de ± 5 VCC, se fez necessário montar um divisor resistivo entre os terminais de alimentação da bomba de água. Um dos resistores escolhidos foi de $220\ \Omega$ e o outro de $4,7k\ \Omega$, ambos com precisão de 5%.

Para a obtenção do valor da corrente utilizou-se dois resistores *shunt* em paralelo, sendo cada um de $1\ \Omega$ e $25\ W$ de dissipação. O par foi instalado no terminal positivo dos painéis fotovoltaicos. A tensão sobre o resistor *shunt* foi lida e armazenada no datalogger CR 1000.

3.3. Métodos

3.3.1. Montagem e funcionamento do experimento

A montagem do sistema de bombamento foi realizado conforme ilustra a Figura 22. A motobomba do tipo submersa, instalada na caixa d'água inferior, realiza o recalque para a caixa superior. A energia elétrica necessária para o funcionamento da bomba é proveniente dos módulos fotovoltaicos.

Foram usadas duas tecnologias de células fotovoltaicas para alimentação do sistema. Primeiramente, utilizou-se dois módulos de silício amorfo (a-Si) durante o período de 13 a 24 de março. Em um segundo momento, a geração elétrica se deu

por seis módulos fotovoltaicos de silício policristalino (p-Si) nos dias 30 e 31 de março e 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 18, 19, 24, 25, 26 e 27 de abril.

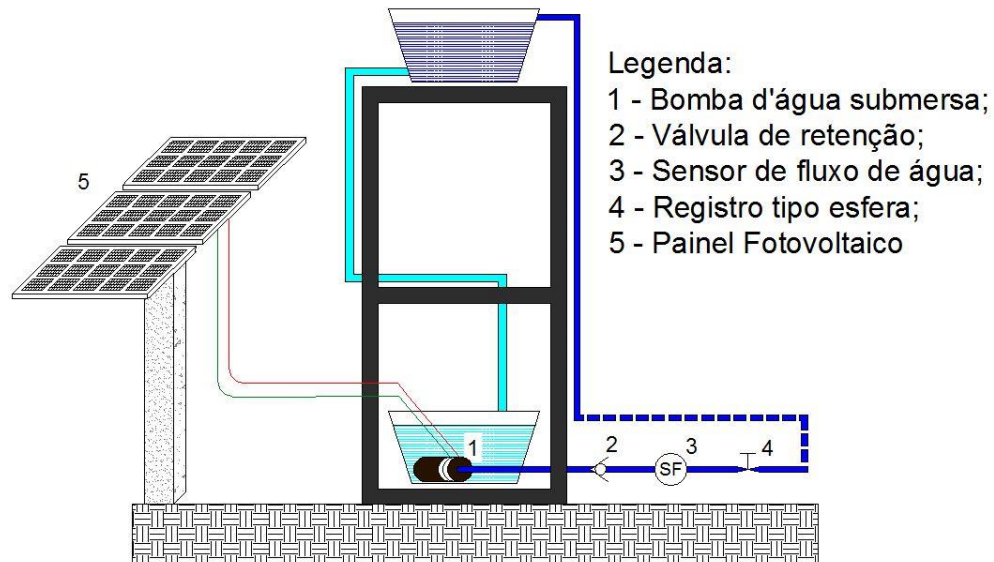


Figura 22. Esquema de alimentação da bomba e circuito hidráulico.

O funcionamento da bomba só ocorreu nos horários de incidência de irradiação solar sobre os painéis, ou seja, nenhum sistema de armazenamento de energia elétrica foi utilizado para que o sistema operasse durante a noite ou dias nublados. Em um sistema como tal, a energia é acumulada de forma potencial gravitacional através da água contida na caixa superior.

No mesmo nível de saída da bomba foi instalado um sensor de fluxo de água, localizado após uma válvula de retenção de forma que o fluxo hidráulico tenha somente um sentido, não interferindo na medição.

3.3.2. Arranjo dos painéis fotovoltaicos

Para atender à potência máxima de 80 W da bomba foi utilizado tanto no painel amorfo quanto no policristalino módulos configurados em série e paralelo de forma a atender a demanda energética da carga nos horários de máxima irradiação solar.

A Figura 23 mostra os arranjos montados para cada tecnologia de geradores. A ligação em paralelo dos módulos em silício amorfo fornecem 80 W_P, sendo a tensão e a corrente máximas de 46 V e 1,74 A, respectivamente.

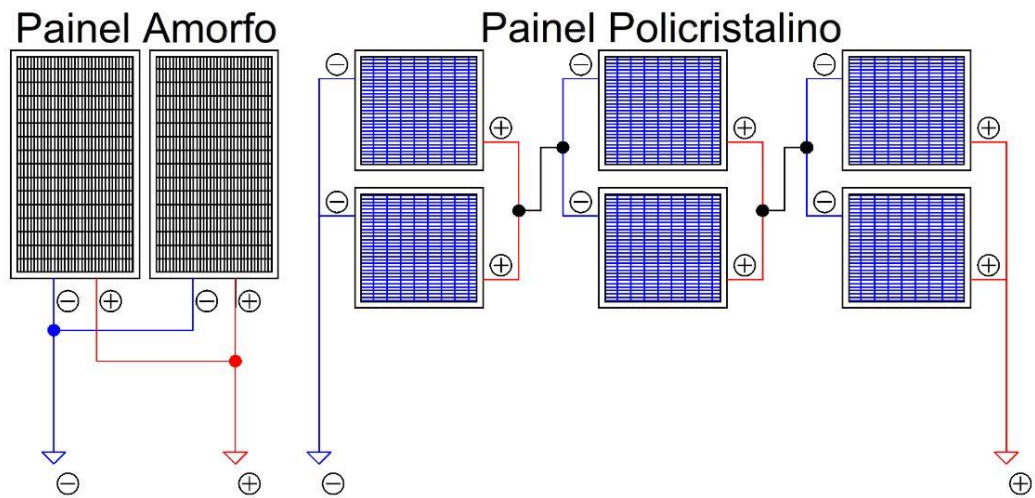


Figura 23. Arranjos dos geradores fotovoltaicos amorfo e policristalino.

Os módulos fotovoltaicos de silício policristalino foram conectados primeiramente em paralelo, formando três pares de geradores. Posteriormente os mesmos foram ligados em série, obtendo-se assim 132 W_P, com tensão e corrente máximas de 50,4 V e 2,62 A quando ligadas à carga.

3.3.3. Aquisição de dados

Monitorou-se no experimento tanto as variáveis de operação do sistema de bombeamento, como tensão, corrente e vazão. Quanto as variáveis do ambiente onde o mesmo foi montado e influenciam em seu funcionamento, sendo a irradiação, temperaturas ambiente e dos painéis.

O acoplamento direto entre o gerador e a bomba d'água, bem como a localização e ligações físicas dos sensores no datalogger são ilustradas pelo esquema da Figura 24.

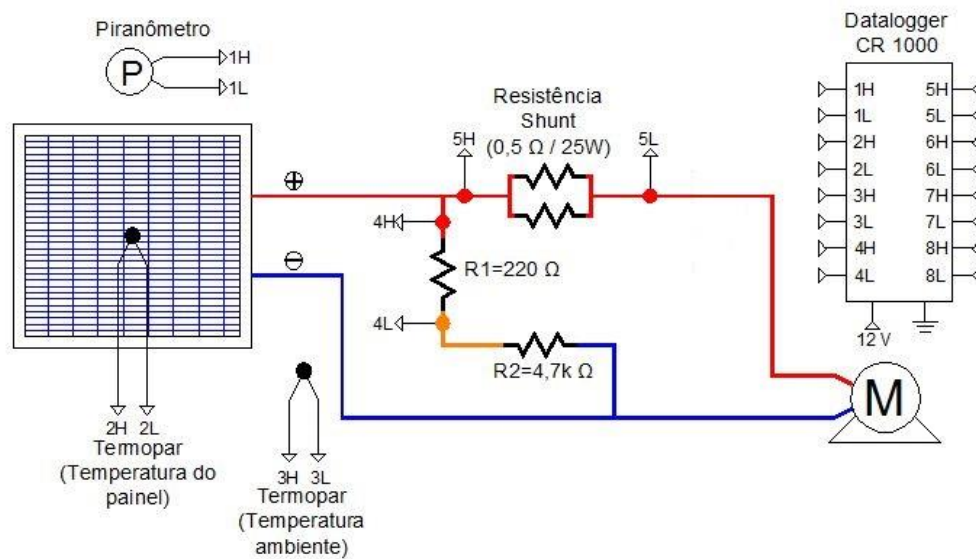


Figura 24. Diagrama elétrico, posicionamento e ligações dos sensores.

A frequência de coleta de dados foi programada no datalogger CR 1000 para ocorrer a cada 5 segundos, sendo que a cada 5 minutos uma média era realizada dos valores obtidos neste período e gravada na memória interna para posterior análise.

O sensor de fluxo de água teve seus valores gerados gravados em um datalogger montado a partir de uma plataforma de desenvolvimento arduino, construído conforme a Figura 25.

Os valores de vazão obtidos pelo sensor de fluxo são provenientes de pulsos gerados. Os quais são identificados pela borda de subida e contabilizados através de uma interrupção do código do arduino. A cada minuto eram gravados os pulsos coletados naquele período.

O sensor foi aferido no próprio sistema de bombeamento, sendo a bomba alimentada por uma fonte controlada. Para as potências de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 W, pesou-se a água bombeada em um período delimitado de tempo e comparou-se com os pulsos obtidos pelo sensor. Este procedimento foi realizado em quadruplicata e ao final foi realizado a média de ml por pulsos dos resultados de todas as potências.

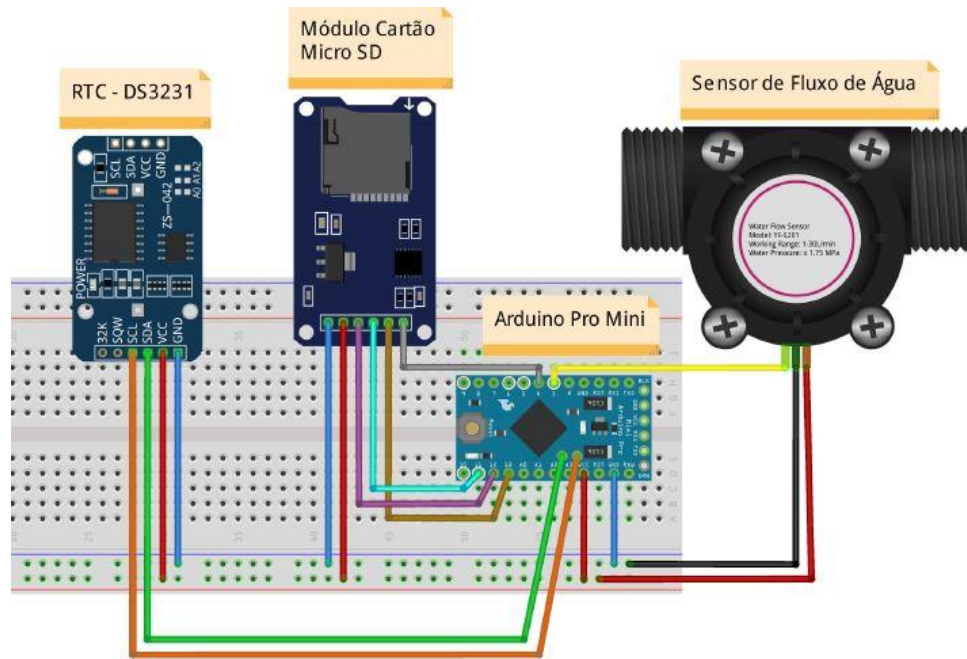


Figura 25. Datalogger montado com um arduino pro mini para a medição de vazão.

3.3.4. Parâmetros calculados

3.3.4.1. Tensão e corrente reais

Devida a necessidade de se adaptar a tensão lida para um intervalo de ± 5 V, compatível com a leitura do datalogger CR 1000, usou-se um divisor resistivo para coletar uma parcela da tensão gerada. Com o mesmo intuito foi dimensionada a resistência *shunt*, afim de encontrar a corrente que alimenta a carga.

Sendo $220\ \Omega$ e $4,7k\ \Omega$ as resistências usadas no divisor resistivo, com a leitura do datalogger sobre a de menor valor, determinou-se os valores reais de tensão usando a Equação 1.

$$U_{Real} = U_{DL-1} \cdot \frac{4920}{220} \quad (1)$$

Onde:

U_{Real} - Tensão de saída do painel fotovoltaico (V);

U_{DL-1} - Tensão lida pelo datalogger sobre a resistência de $220\ \Omega$ (V).

Já para encontrar o valor real da corrente utilizou-se a Equação 2, sendo esta a lei de Ohm com uma resistência *shunt* de $0,5\ \Omega$.

$$I = \frac{U_{DL-2}}{0,5} \quad (2)$$

Onde:

I – Corrente gerada pelo painel fotovoltaico;

U_{DL-2} - Tensão lida pelo datalogger sobre a resistência de 0,5 Ω (V).

3.3.4.2. Potência

Com a tensão e a corrente reais, determina-se a potência a partir da Equação 3.

$$P = U.I \quad (3)$$

Onde:

P – Potência gerada pelo painel fotovoltaico (W).

3.3.4.3. Altura manométrica

O sistema de bombeamento montado tem altura manométrica (H_m) fixa. Sendo esta determinada pela soma da altura geométrica (H_g) com as perdas de carga na tubulação de recalque e sucção transformadas em comprimento equivalente (H_p) (MOREIRA, 2009).

As perdas de carga existentes nas tubulações, acessórios e demais componentes hidráulicos utilizados foram determinados pelo método de Hazen-Williams, o qual é exposto pela Equação 4.

$$H_p = 10,65 \cdot \left(\frac{Q}{C_f} \right)^{1,85} \cdot \frac{(L + L_{eq})}{D^{4,87}} \quad (4)$$

Onde:

Q – Vazão ($m^3 s^{-1}$);

C_f – Coeficiente dependente do material e estado das paredes dos tubos (adimensional);

D – Diâmetro interno da tubulação (m);

L – Comprimento da tubulação (m);

L_{eq} – Comprimento equivalente de acessórios e conexões hidráulicas (m);

3.3.4.4. Energia solar disponível e energia consumida pela carga

A energia solar disponível é a radiação solar incidente sobre a área útil do painel fotovoltaico em um intervalo de tempo. Já a energia consumida é a potência requerida pela carga em um período delimitado. Como os dados foram coletados a cada 5 minutos, calculou-se as energias médias horárias, disponível e consumida, conforme Siqueira (2005) seguindo as Equações 5 e 6.

$$ED = \sum_{i=1}^n PD_i . t \quad (5)$$

$$EC = \sum_{i=1}^n PC_i . t \quad (6)$$

Sendo:

$$PD = R_S . A \quad (7)$$

$$PC = U . I \quad (8)$$

Onde:

$$t = \frac{1}{12} h ;$$

n = Enésimo valor do conjunto de dados;

ED – Energia solar disponível (W h);

EC – Energia consumida pela carga (W h);

PD – Potência solar disponível (W);

PC – Potência requerida pela carga (W);

R_S – Irradiação solar global ($W m^{-2}$);

A – Área das células fotovoltaicas (área útil) do painel fotovoltaico (m²).

3.3.4.5. Determinação da eficiência dos painéis, da bomba e do sistema

A porcentagem de eficiência dos painéis fotovoltaicos pode ser encontrada pela Equação 9, conforme descrevem Ceylan et al. (2014).

$$\eta_{PV} = \frac{PC}{PD} \cdot 100\% \quad (9)$$

Onde:

η_{PV} – Eficiência do painel fotovoltaico (%).

A eficiência da bomba d'água foi obtida através da Equação 10.

$$\eta_{Bomba} = \frac{PH}{PC} \cdot 100\% \quad (10)$$

Sendo:

$$PH = Q \cdot H_M \cdot 9806 \quad (11)$$

Onde:

η_{Bomba} – Eficiência da bomba d'água (%);

PH – Potência hidráulica (W);

Q – Vazão (m³ s⁻¹);

H_M – Altura manométrica (m).

A eficiência global do sistema de bombeamento alimentado por energia fotovoltaica foi determinada pela Equação 12, conforme Niedzialkoski (2013).

$$\eta_g = \frac{\eta_{PV} \cdot \eta_{Bomba}}{100} \quad (12)$$

Onde:

η_g – Eficiência global do sistema de bombeamento (%);

3.3.4.6. Custos unitários da energia consumida e do volume de água bombeada

O custo unitário de ambos os sistemas, foram realizados de forma anualizada, levando em consideração o valor de aquisição dos equipamentos e a vida útil dos mesmos. A Tabela 8 expõem os custos iniciais e o tempo de operação dos componentes utilizados no sistema.

Tabela 8 - Componentes utilizados com os respectivos custos e vidas úteis.

Componente	Custo inicial(R\$)	Vida útil (anos)
Painel Amorfo (a-Si)	1.200,00	25
Painel Policristalino (p-Si)	774,00	20
Motobomba SDS-D-228	3.965,91	10
Estrutura metálica	600,00	25
Materiais hidráulicos	350,00	25

Fonte: Dias (2017); Neosolar (2017); Altestore (2016).

Perante demais gastos com estruturas, suporte e instalação dos painéis são acrescidos 10% ao custo anualizado, seguindo a Equação 13. Também foi considerado uma taxa de juros de 10% ao ano.

$$C_a = C_i \cdot \left[\frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (13)$$

Sendo:

C_a – Custo anualizado (R\$.ano⁻¹);

C_i – Custo inicial (R\$);

i - Taxa de juros (% aa);

n – Vida útil (anos).

Para se determinar o custo unitário por energia consumida é necessário conhecer a energia consumida no decorrer do ano. Como o experimento operou em um período delimitado de tempo menor que este, uma proporção foi realizada. Sabendo que a irradiação média anual incidente na cidade de Cascavel é de 1,81 MWh m⁻² ano⁻¹ (SUNDATA, 2016), dividiu-se este valor pela somatória de toda a irradiação média obtida em cada período de estudo (Wh m⁻² período estudado⁻¹). Desta forma, resultam índices de proporção referentes a cada período de coleta de dados. Estes são multiplicados pela somatória da energia consumida média obtida

em cada período, fornecendo assim uma estimativa do total anual de energia consumida.

Este mesmo procedimento é realizado para estimar o volume de água bombeado no decorrer de um ano.

Com o valor do custo anualizado dos equipamentos utilizados e as estimativas de energia consumida e volume bombeado no período de um ano é possível determinar os custos unitários conforme as Equações 14 e 15.

$$\frac{\text{Custo (R\$)}}{\text{kWh}} = \frac{C_a(\text{R\$ ano}^{-1})}{E_c(\text{kWh ano}^{-1})} \quad (14)$$

$$\frac{\text{Custo (R\$)}}{\text{Litro}} = \frac{C_a(\text{R\$ ano}^{-1})}{V_b(\text{Litro ano}^{-1})} \quad (15)$$

Sendo:

E_c – Energia consumida (kWh ano^{-1});

V_b – Volume de água bombeado (L ano^{-1}).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Volume bombeado

A partir dos dados de irradiação solar e o volume diário bombeado, é possível ver o comportamento do sistema durante o período de realização do experimento através da Figura 26 e da Figura 27.

Observa-se nos gráficos a similaridade entre o comportamento a partir dos resultados de volume bombeado e irradiação média diária, o que caracteriza a dependência da irradiação solar incidente sobre os painéis para o melhor funcionamento da bomba.

Em dias de baixa irradiação média como no dia 16/03, onde se registrou uma média de $60,15 \text{ W m}^{-2}$, resultou em um reduzido volume bombeado no sistema amorfo. Assim como nos dias 4, 5 e 11 de abril, quando o sistema estava operando com geradores policristalinos.

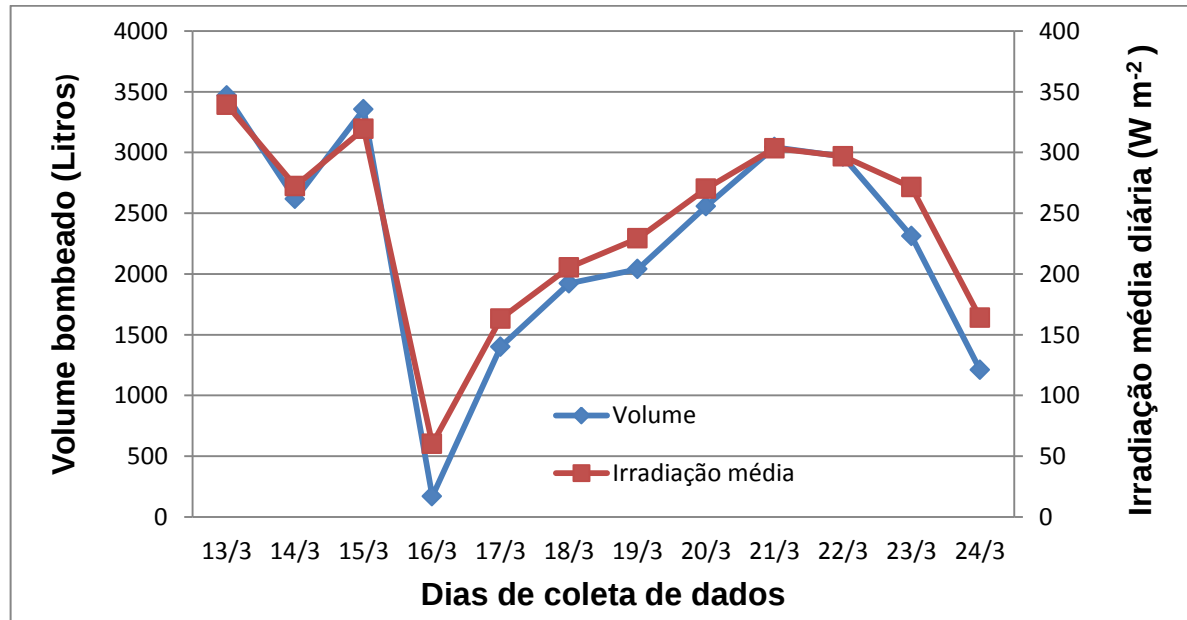


Figura 26. Volume bombeado e irradiação solar média no período de coleta do painel amorfo.

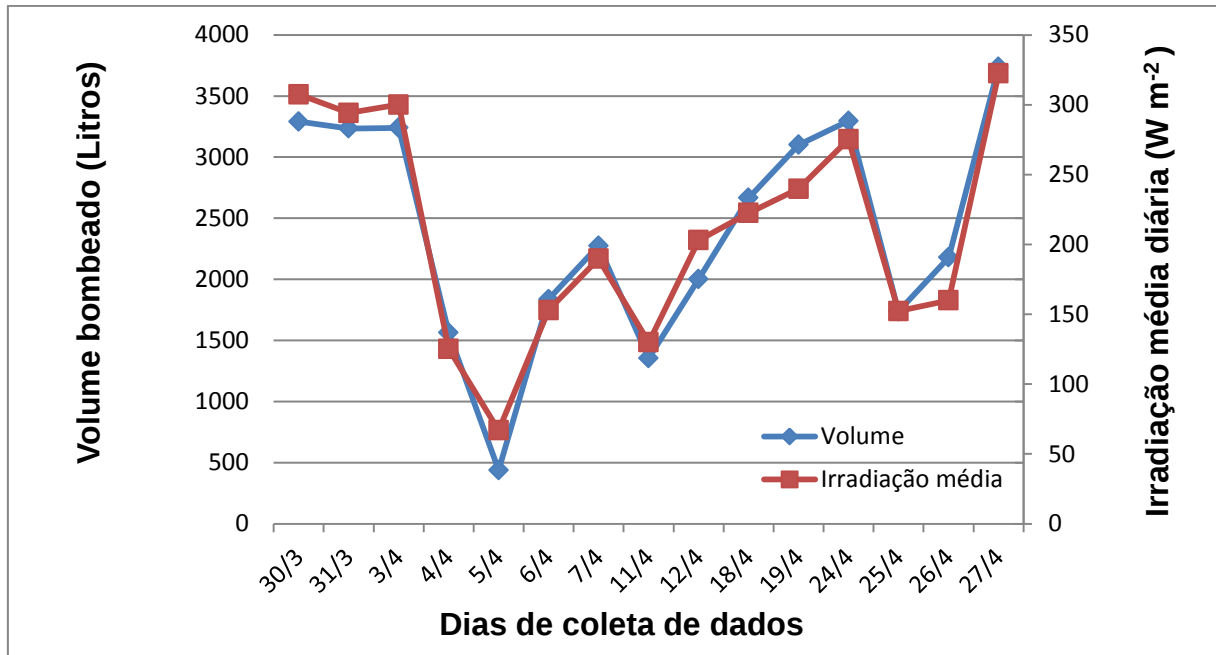


Figura 27. Volume bombeado e irradiação solar média no período de coleta do painel policristalino.

O volume médio bombeado pelo sistema amorfo foi de $2.255,44 \text{ L dia}^{-1}$ para uma irradiação média diária de $241,31 \text{ W m}^{-2}$. Já no período de coleta do sistema policristalino obteve-se um volume médio diário de $2.397,01$ litros para uma irradiação média de $209,45 \text{ W m}^{-2}$. Diante disso, obtém-se uma taxa média de volume por irradiação solar incidente de $9,35 \text{ L/W m}^{-2}$ para o sistema amorfo e $11,44 \text{ L/W m}^{-2}$ para o sistema policristalino.

Nogueira et al. (2015), que utilizando um painel monocristalino de 135 W_P , registrou uma vazão média diária de $3.536,45$ Litros a uma irradiação média de $412,48 \text{ W m}^{-2}$. E com um painel policristalino de 150 W_P , observou o bombeamento médio de $4.182,55 \text{ L dia}^{-1}$ a $467,93 \text{ W m}^{-2}$ de irradiação média diária. Tendo assim valores menores de taxas médias de volume por irradiação incidente de $8,57 \text{ L/W m}^{-2}$ para o sistema monocristalino e $8,94 \text{ L/W m}^{-2}$ para o sistema policristalino.

Também um pouco acima dos resultados de Santos, Michels e Gnoatto (2010), que obtiveram uma média diária de $1.580,54$ litros no mês de março e $1.233,34$ litros no mês de abril utilizando o mesmo modelo de bomba e um painel policristalino modelo MSX-56 da Solarex.

4.2. Vazão

A Figura 28 e a Figura 29 representam a variação da vazão em função da irradiação.

Observa-se em ambas as figuras uma curva de tendência polinomial de segunda ordem. Sendo que o aumento da irradiação resulta em uma elevação da vazão. O sistema amorfo inicia o funcionamento da bomba com cerca de 340 W m^{-2} o que proporciona uma corrente média de $0,63 \text{ A}$ e uma potência de 5 W . Enquanto o sistema policristalino aciona a bomba com a irradiação média de 290 W m^{-2} .

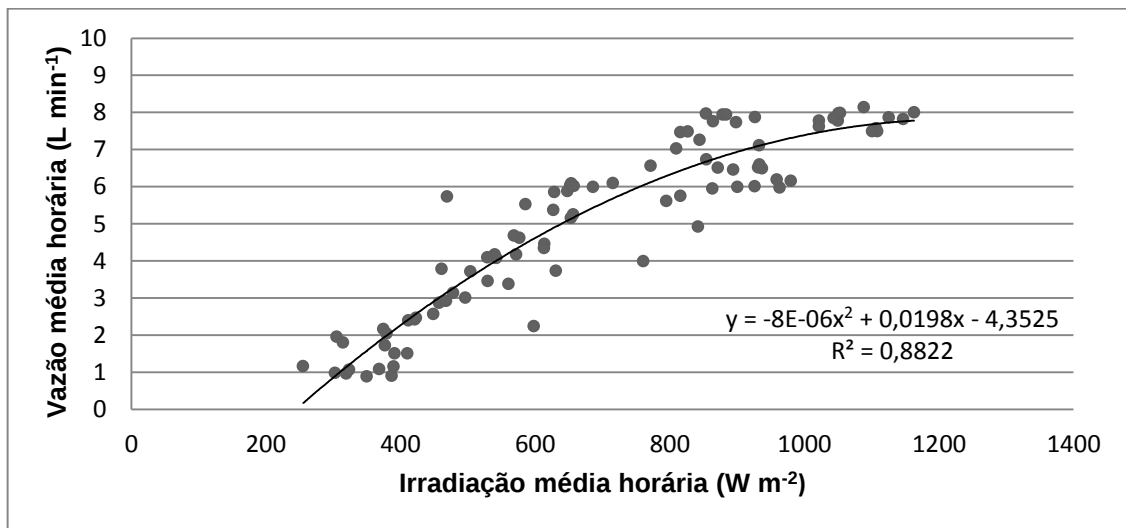


Figura 28. Vazão por irradiação do sistema amorfo.

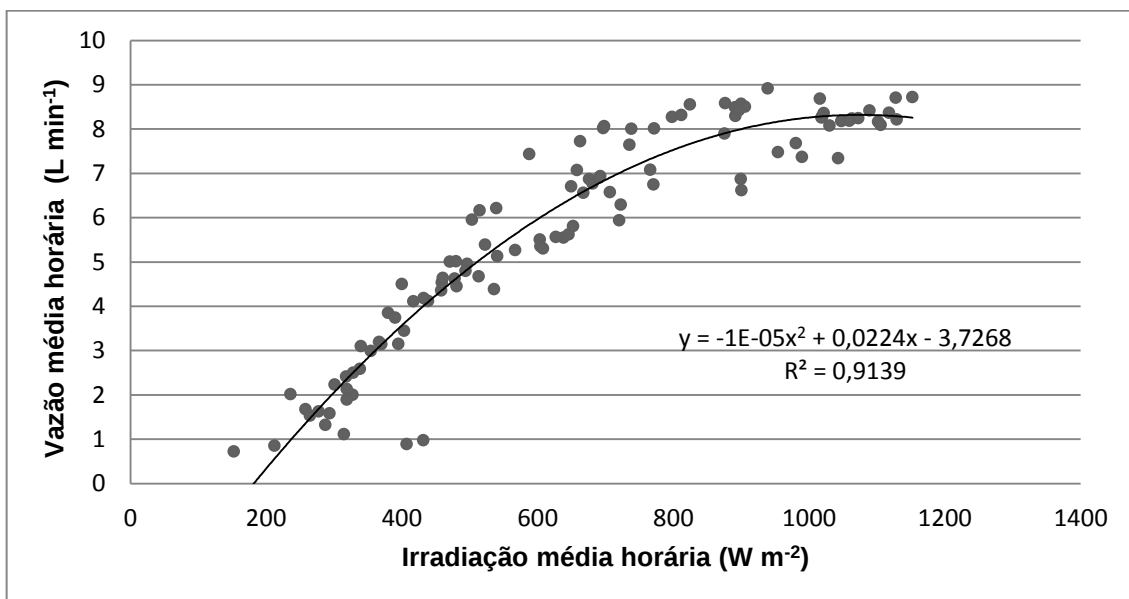


Figura 29. Vazão por irradiação do sistema policristalino.

A partir das equações que descrevem a linha de tendência, pode-se calcular a vazão em função da irradiação solar. Portanto, para uma irradiação de 800 W m^{-2} , tem-se uma vazão de $6,3675 \text{ L min}^{-1}$ para o sistema amorfo e $7,7932 \text{ L min}^{-1}$ com o sistema policristalino.

Nota-se então uma vazão maior no sistema policristalino quando se compara ao sistema amorfo a um mesmo valor de irradiação solar incidente.

O comportamento da vazão em função da energia média consumida pela bomba são expostas na Figura 30 e na Figura 31.

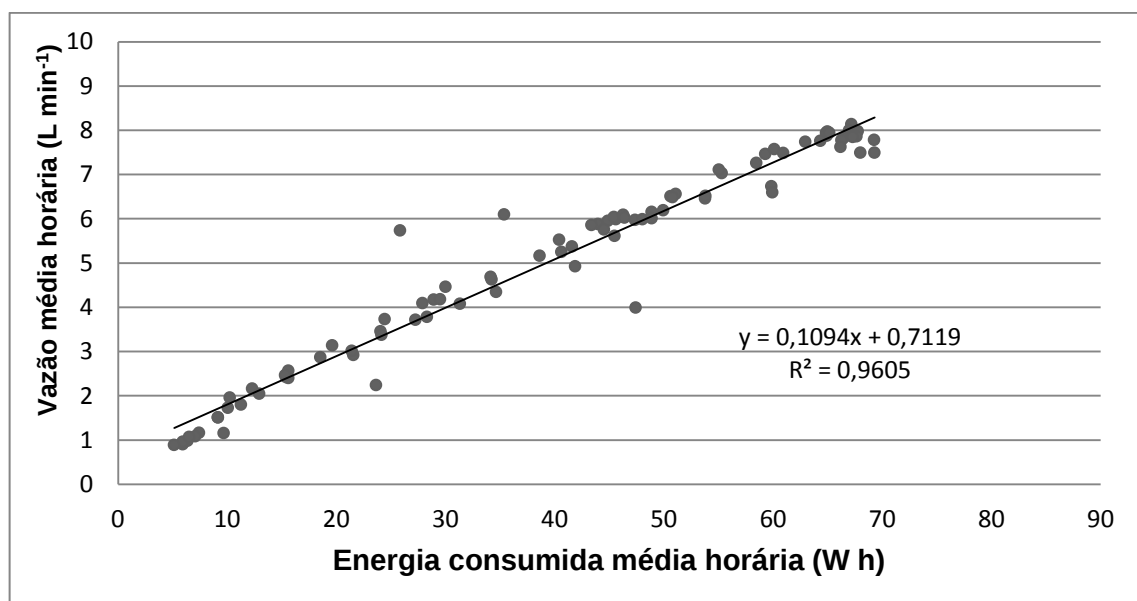


Figura 30. Vazão pela energia consumida no sistema amorfo.

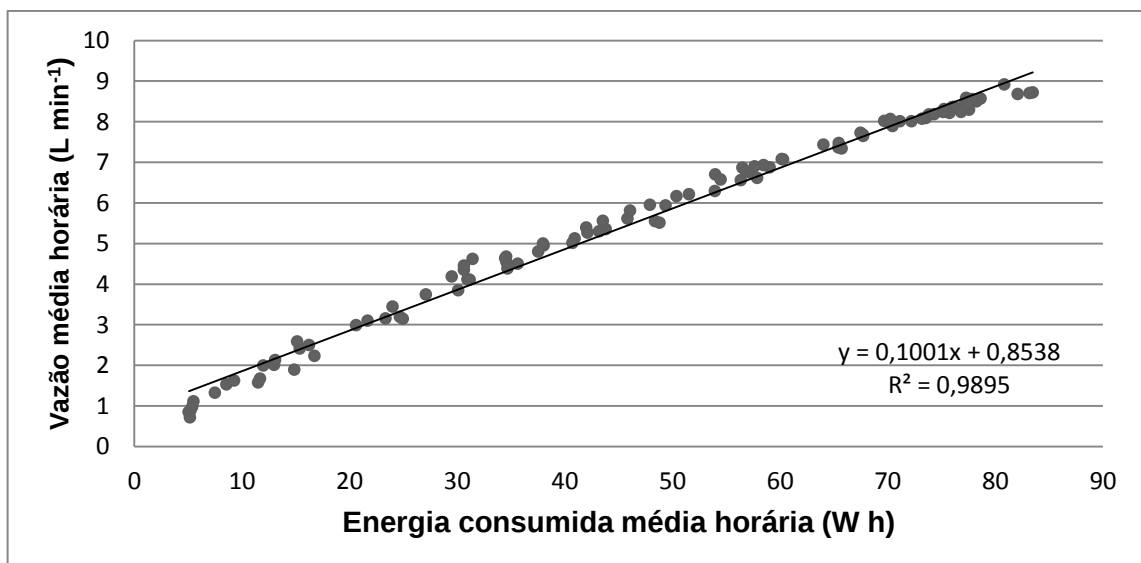


Figura 31. Vazão pela energia consumida no sistema policristalino.

Observa-se o comportamento linear entre a vazão e a energia média consumida pela bomba, com R^2 de 0,9605 no sistema amorfo e 0,9895 no sistema policristalino. A uma energia consumida média de 40 W h, tem-se uma vazão de 5,088 L min⁻¹ e 4,858 L min⁻¹ para os sistemas amorfo e policristalino. Com 60 W h, as vazões sobem respectivamente para 7,28 L min⁻¹ e 6,86 L min⁻¹. Ou seja, para a mesma energia consumida, o sistema amorfo apresentou uma capacidade maior de bombeamento.

4.3. Altura manométrica

Mesmo o circuito hidráulico do sistema sendo fixo, a altura manométrica possui leves alterações em seu valor. Isto ocorre devida a variação da vazão ocorrida no sistema, resultando em diferentes perdas de carga, calculadas pela Equação 4 de Hazen-Williams.

A altura geométrica, da saída da bomba até o ponto de entrada do reservatório elevado, é de 2,66 metros. As médias encontradas da altura manométrica foram de 2,684 e 2,690 mca para os sistemas amorfo e policristalino, com desvio padrão de 0,019 e 0,023, respectivamente.

4.4. Energia consumida e energia disponível

A Figura 32 e a Figura 33 mostram o comportamento da energia solar média horária disponível e da energia consumida média horária no decorrer dos dias 13/03 e 27/04 dos sistemas amorfo e policristalino, respectivamente.

A energia solar disponível aumenta no decorrer do dia até chegar a seu pico, uma vez que a mesma é dependente da área do painel e da irradiação, esta que é variável conforme a posição do sol. Em ambos os sistemas a energia disponível máxima se deu em torno das 13 horas.

A energia consumida pela motobomba tende a acompanhar a energia disponível, porém é limitada a capacidade de geração do painel fotovoltaico.

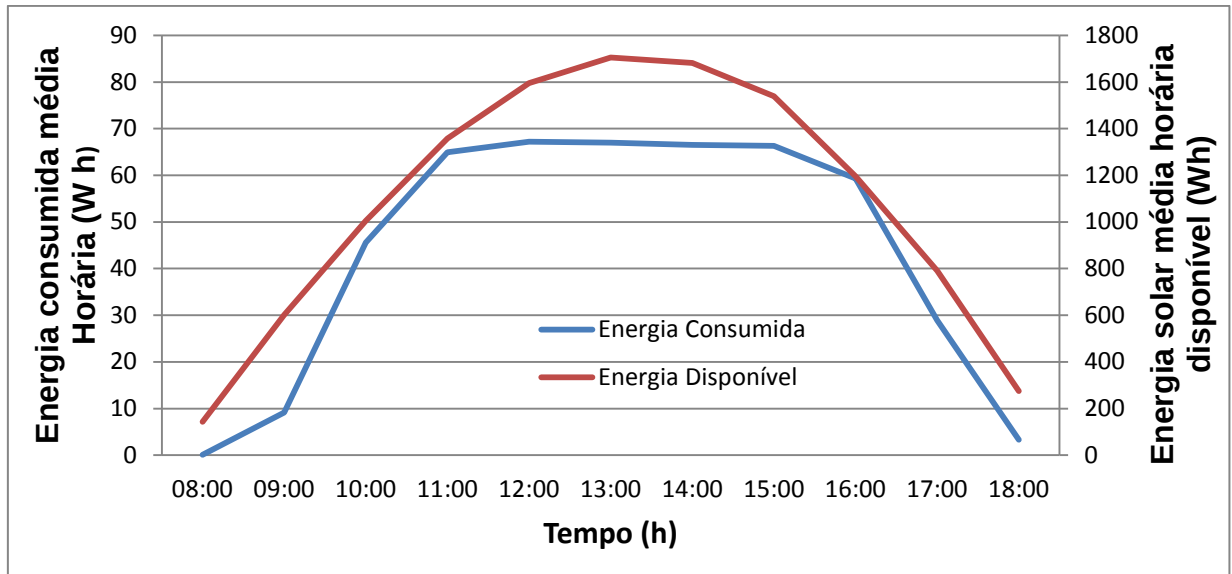


Figura 32. Energias consumida e disponível do sistema amorfo, no dia 13/03.

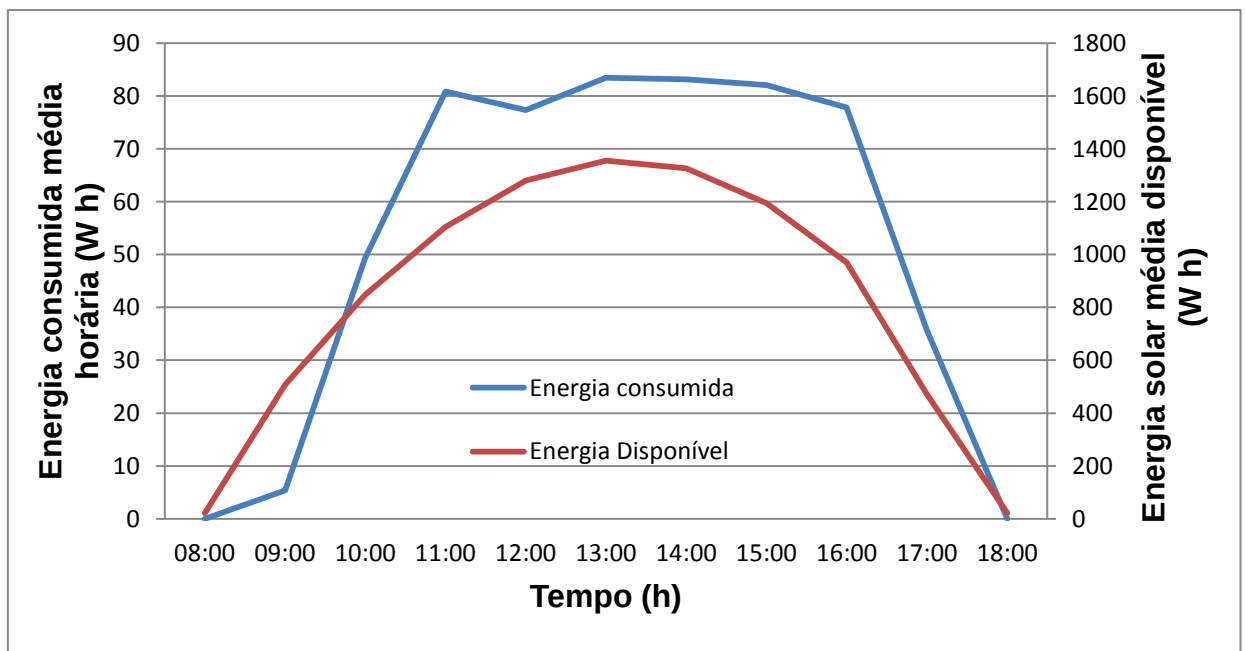


Figura 33. Energias consumida e disponível do sistema policristalino, no dia 27/04.

A Figura 34 e a Figura 35 representam o comportamento da energia consumida em função da energia disponível.

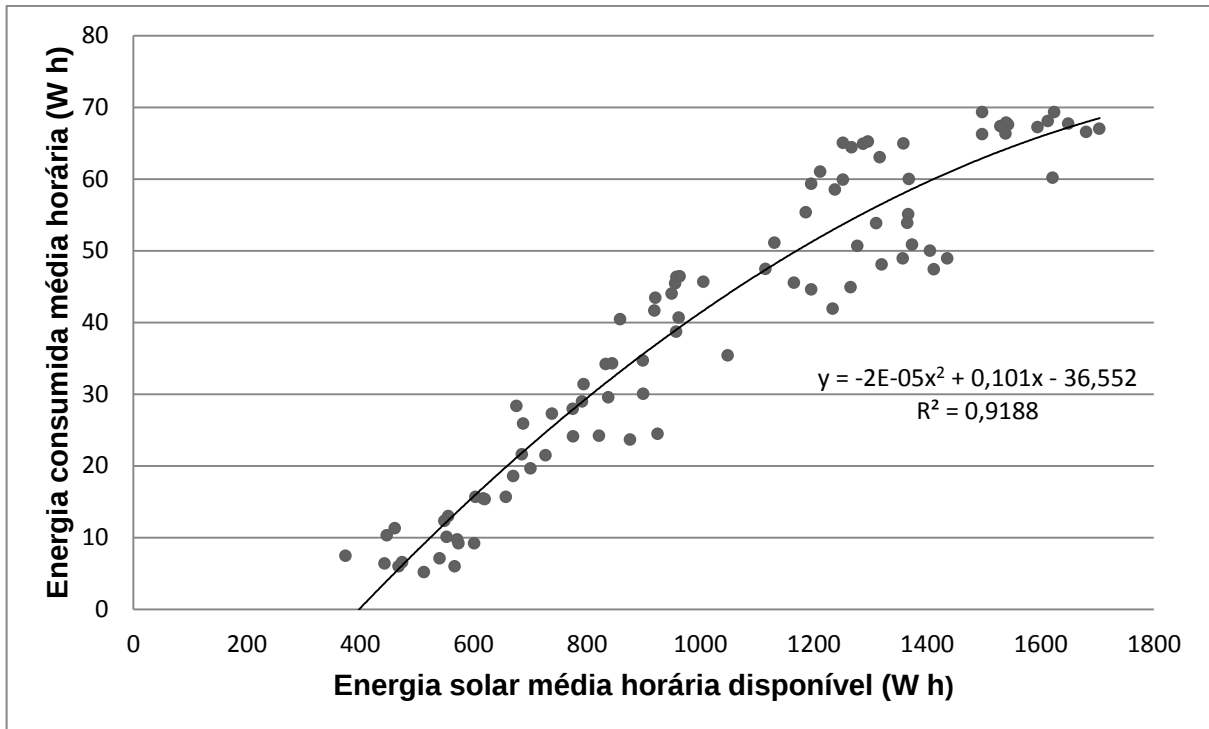


Figura 34. Energia consumida pela energia disponível no sistema amorfo.

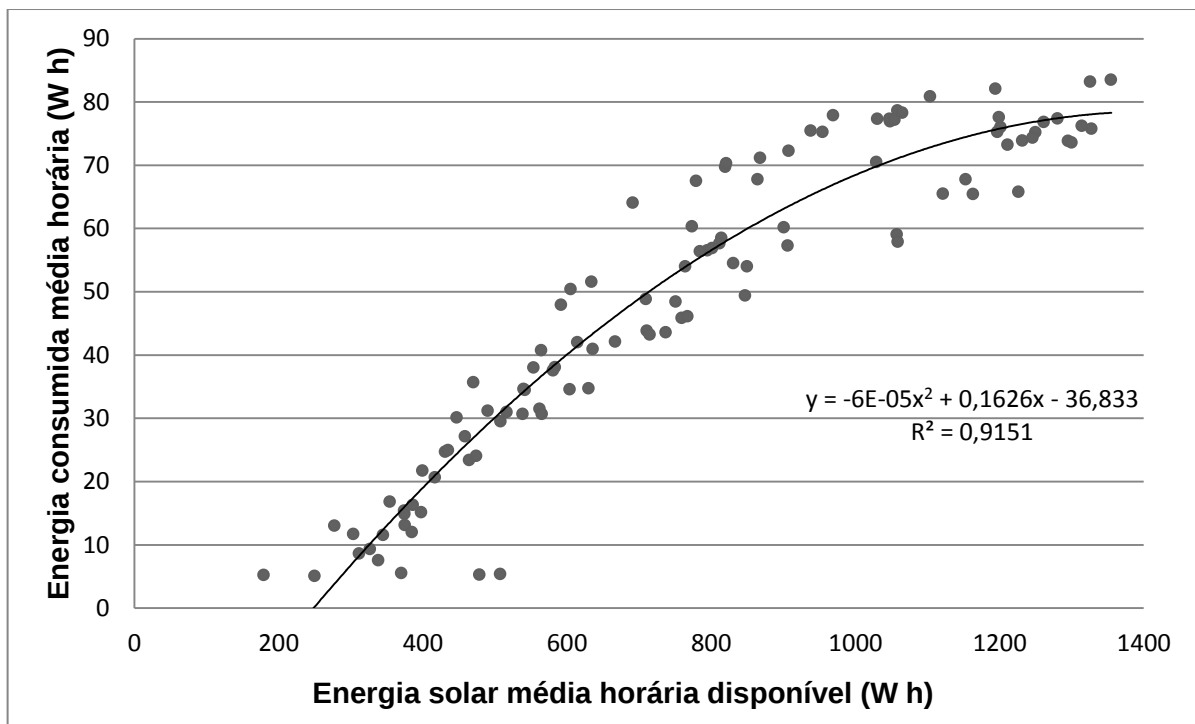


Figura 35. Energia consumida pela energia disponível no sistema policristalino.

Ambos os sistemas apresentaram uma linha de tendência polinomial, com equações representativas de segunda ordem. Para as irradiações de 600, 800, 1000

e 1200 W m^{-2} , o sistema amorfo apresentou uma energia consumida de 16,85; 31,45; 44,45 e 55,85 W h, respectivamente. Enquanto o sistema policristalino obteve 39,13; 54,85; 65,77 e 71,89 W h, respectivamente.

Diante destes resultados, nota-se uma maior eficiência de conversão da energia solar disponível em energia consumida pelo sistema policristalino se comparado ao amorfo. Corroborando com os dados de Nogueira et al. (2015) que encontrou uma eficiência média de conversão em um painel policristalino de 6,57% em condições de campo, superior a 5,18% encontrado por Mateo et al. (2018) em um painel de silício amorfo.

4.5. Eficiência dos painéis

As eficiências dos painéis fotovoltaicos foram calculados usando a Equação 9 em todo o período de coleta de dados. A mesma varia no decorrer do dia conforme o valor da irradiação incidente sobre o painel e a temperatura do mesmo.

4.5.1. Caracterização da eficiência do painel conforme a temperatura

No período de coleta de dados do sistema amorfo, registrou-se uma redução nas máximas tensões atingidas, partindo de 53,1 V a $37,26^\circ\text{C}$ para 51,01 V a $48,28^\circ\text{C}$. Uma taxa de decréscimo linear de $189,65 \text{ mV }^\circ\text{C}^{-1}$. Já no período alimentado pelo painel policristalino, o aumento de temperatura de $24,33^\circ\text{C}$ para 40°C , resultou em uma queda de tensão máxima de 4,56 V. Portanto uma redução linear de $291 \text{ mV }^\circ\text{C}^{-1}$. Valores estes maiores se comparados com o encontrado por Gnoatto et al. (2008), que registrou em média uma queda de $(80 \pm 10) \text{ mV }^\circ\text{C}^{-1}$ em circuito aberto em um painel policristalino.

Diante disso entende-se que o painel amorfo absorve maior calor se comparado ao policristalino. No entanto, sua queda de tensão é menor conforme o aumento de temperatura. O que condiz com o exposto por Tolmasquim (2016).

Como já citado por Cresesb (2014) e apresentado na Figura 6, a tensão do painel fotovoltaico tende a decair enquanto a corrente se mantém conforme o aumento de temperatura do mesmo. Esta redução de tensão provoca a queda de potência gerada, segundo a Equação 3 e consequentemente reduz a eficiência de

acordo com a Equação 9. A Tabela 9 expõem esse comportamento da eficiência conforme o aumento de temperatura.

Tabela 9 - Efeito da temperatura sobre a eficiência dos painéis.

Temperatura do Pannel	Eficiência (%)				
	25-30 °C	30-35 °C	35-40 °C	40-45 °C	45-50 °C
Sistema Amorfo	2,82	3,706	4,107	3,962	3,475
Sistema Policristalino	6,39	6,12	5,82	5,65	-

Analisando os resultados obtidos, nota-se que ambos os sistemas têm a eficiência afetada conforme o aumento de temperatura do painel. O painel amorfo, por ter coloração preta, aquece rapidamente e atinge maiores temperaturas quando comparado ao policristalino.

As médias de eficiência encontradas nas faixas de temperaturas de 25-30 e 30-35 °C não condizem com o pressuposto de maiores eficiências em menores temperaturas. Supoem-se que devido ao rápido aquecimento do painel amorfo, foram obtidos poucos dados nestes intervalos de temperatura, tornando o resultado impreciso, o que não significa que sejam piores temperaturas de trabalho.

4.5.2. Caracterização da eficiência do painel conforme a irradiação incidente

A Figura 36 e a Figura 37 demonstram o comportamento da eficiência no decorrer do dia em ambos os sistemas. Nota-se nos gráficos um comportamento semelhante em ambos os painéis fotovoltaicos. Os picos de eficiência ocorrem no período das 9:30 às 16 horas com irradiação próxima de 800 W m^{-2} . Acima deste valor de irradiação, registrou-se uma queda de eficiência, devida ao aumento de temperatura do painel, causada pela temperatura ambiente e pela irradiação incidente sobre o mesmo (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017).

O painel amorfo apresentou uma eficiência média, para valores de irradiação entre 750 e 850 W m^{-2} , de 4,69%. Para valores acima de 950 W m^{-2} a eficiência média teve uma leve redução para 4,24 %. A eficiência máxima obtida foi 5,46% a uma irradiação de $691,4 \text{ W m}^{-2}$ com temperatura do painel de $38,63 \text{ °C}$.

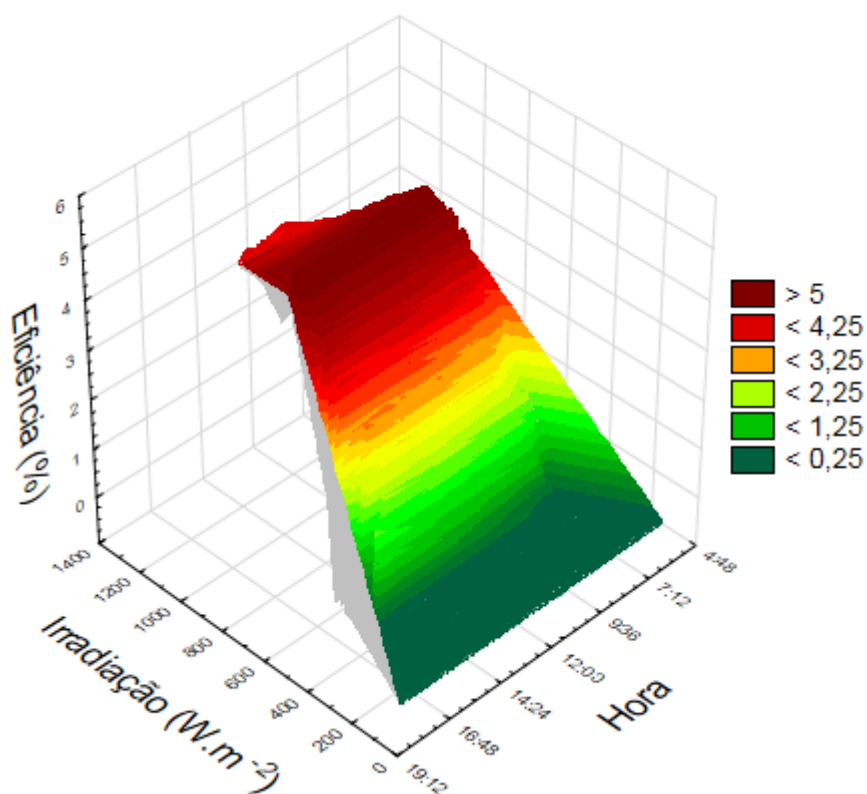


Figura 36. Gráfico de irradiação por hora pela eficiência do painel amorfo.

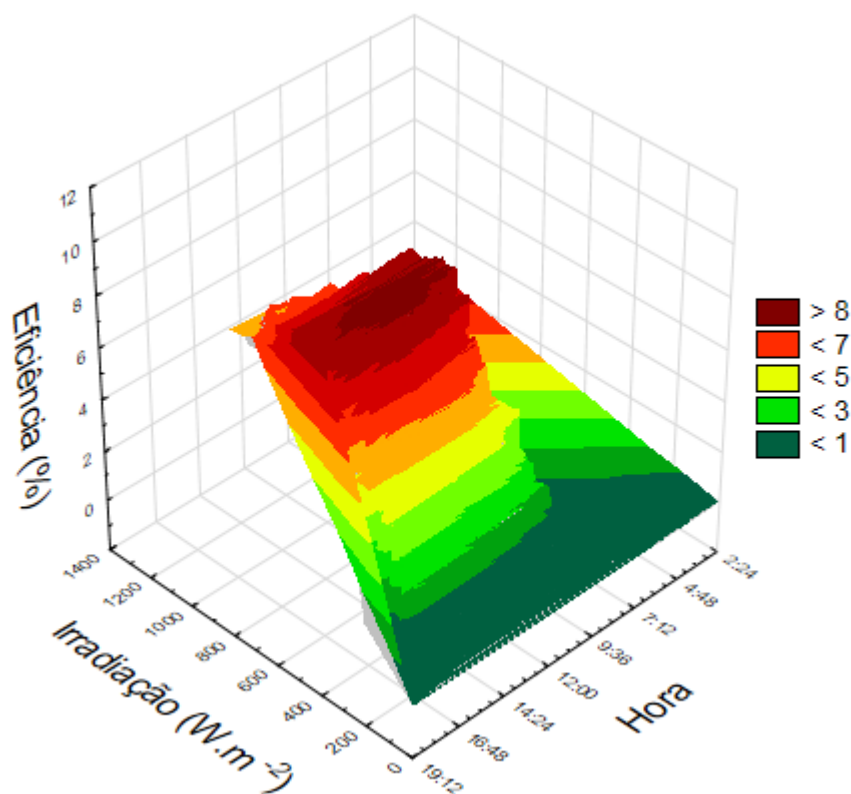


Figura 37. Gráfico de irradiação por hora por eficiência do painel policristalino.

O painel policristalino obteve uma eficiência média 7,75% dentro do intervalo de 750 a 850 W m⁻². Já em irradiações acima de 950 W m⁻² a média da eficiência reduz para 6,14%. O valor máximo encontrado neste painel foi 9,77% a uma irradiação de 583,9 W m⁻², quando o painel estava a uma temperatura de 18,31 °C.

Mirzaei e Mohiabadi (2017) registraram a eficiência de painéis monocristalino e policristalino no decorrer do dia. Encontraram uma queda de 3,5% e 1,2% nos respectivos módulos no período entre as 11 e 12 h, quando estes estavam expostos a uma irradiação média de 700 W m⁻², bem acima da média do restante do dia, cerca de 290 W m⁻². Os autores calcularam uma perda de 10,9% de eficiência (de 14,9% para 13,4%) quando a temperatura dos painéis passou de 5 °C à 35°C.

4.6. Eficiência da motobomba

Usando a Equação 10 encontrou-se as eficiências médias de cada período de cinco minutos durante o tempo de bombeamento. A média encontrada de todos os períodos coletados foi de 6,23% para o sistema amorfo e 5,66% para o sistema policristalino, com 2,13 e 1,27% de desvio padrão respectivamente.

Essas baixas eficiências obtidas se dão pela baixa altura manométrica do sistema. A mesma resulta em uma baixa potência hidráulica o que diminui as médias das eficiências da bomba obtidas nos períodos de coleta.

Segundo Kolling et al. (2004) menores cargas (baixa altura manométrica) resulta em maiores vazões, porém não representa a maior eficiência da bomba. Esta condição acontece quando a bomba é submetida a cargas mais elevadas, uma vez que a eficiência está em função da potência hidráulica, a qual aumenta proporcionalmente a altura manométrica. Os autores alcançaram uma eficiência máxima de 39% da bomba, com o sistema operando com painéis monocristalino a uma altura manométrica de 19 m.

Vicentin (2014) também obteve baixas eficiências nas bombas em seus sistemas de bombeamento fotovoltaicos quando operavam a uma altura manométrica de 2,5 mca, sendo estas 6,35% e 6,91% para os sistemas de bombeamento fotovoltaico 1 (SBF1) e 2 (SBF2), respectivamente. Porém estes resultados melhoraram com o aumento da altura manométrica, sendo 15,97% e 17,11% para 7,5 mca e 24,42% e 16,55% com 13,5 mca.

4.7. Eficiência global do sistema

Determinadas as eficiências da motobomba e do painel fotovoltaico, pode-se encontrar a eficiência global do sistema usando a Equação 12.

No intervalo entre 750 e 850 W m⁻², onde ambos os painéis apresentaram suas maiores médias de eficiências, gerou uma eficiência global de 0,29% no sistema amorfo e 0,44% no sistema policristalino. Já para uma irradiação superior a 950 W m⁻², as eficiências globais caíram em ambos os sistemas para 0,26% e 0,35% respectivamente.

Valores estes inferiores aos de Nogueira et al. (2015) que foram, 4,27% para o sistema de bombeamento fotovoltaico com painel monocristalino e 5% com painel policristalino.

Porém, próximo dos encontrados por Vicentin (2014), que obteve 0,50% e 0,61% de eficiência global para seus sistemas SBF1 e SBF2 a uma altura manométrica de 2,5 mca.

4.8. Custos unitários do sistema de bombeamento

No sistema alimentado pelo painel amorfo, foram encontrados os seguintes custos unitários por energia consumida e por volume bombeado R\$ 9,43/kWh e R\$ 0,0013/litro, respectivamente. Já no sistema policristalino os custos unitários por energia consumida foi de R\$ 6,63/kWh e por volume bombeado R\$ 0,0010/litro.

Sendo assim, o sistema policristalino apresentou menores custos unitários por energia consumida e por volume bombeado.

Niedzialkoski (2013) encontrou um custo unitários de energia consumida e de litro de água bombeada de R\$ 1,69/kWh e R\$ 0,00025/litro, respectivamente, para o sistema alimentado por um painel monocristalino e R\$ 3,10/kWh e R\$ 0,00023/litro, respectivamente, para o sistema policristalino. Os valores encontrados são menores devida a diferença dos modelos de motobomba, sendo a SDS-D-228, usada neste estudo, muito mais cara que a Shurflo 8000 usada por Niedzialkoski (2013), uma vez que os módulos e demais materiais usados nesta pesquisa têm menor custo de aquisição.

Apesar dos módulos de silício amorfo serem fabricados usando menos material, o que em muitos países o torna um módulo mais barato quando comparado

aos módulos de silício monocristalino ou policristalino e assim atrativo financeiramente (AL HANAI et al., 2011). No Brasil, módulos com tecnologia amorfo têm um custo superior aos módulos de silício policristalino, devido a maior oferta deste último no mercado nacional. Por serem tecnologias mais consolidadas e com maior eficiência de conversão, os módulos de silício monocristalino e policristalino correspondem a mais de 85% do mercado, favorecendo e facilitando a aquisição dos mesmos (FERREIRA et al., 2018).

5. CONCLUSÕES

Os volumes diários médios bombeados foram 2.255,44 e 2.397,01 litros para os sistemas amorfo e policristalino, respectivamente. Os quais são capazes de suprir a demanda básica de uma pequena propriedade rural.

O sistema policristalino apresentou maior vazão se comparado ao amorfo para uma mesma irradiação incidente. No entanto, este último obteve maior vazão pela energia consumida.

O painel policristalino apresentou melhor conversão da energia disponível para consumida. Com uma eficiência calculada de 7,75% para uma irradiação na faixa de 800 W m^{-2} , enquanto para o amorfo se registrou 4,69% para a mesma condição ambiental. Em Irradiações acima deste nível, as eficiências diminuíram devido ao aumento da temperatura dos painéis. No entanto, o painel amorfo denotou menor queda de tensão e eficiência conforme o acréscimo de temperatura.

A eficiência da bomba d'água em ambos os sistemas apresentaram valores semelhantes, 6,23 e 5,66% para os sistemas amorfo e policristalino, respectivamente. O sistema policristalino apresentou maior eficiência global e menores custos unitários quando comparado ao amorfo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL HANAI, T. et al. Environment effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin-film amorphous silicon system. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2615-2622, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.010
- ALTESTORE. **Sun pumps submersible SDS-D-228 (12-30 Volts)**. 2016. Disponível em: < <https://www.altestore.com/store/solar-water-pumps/submersible-solar-pumps/sun-pumps/sun-pumps-submersible-sds-d-228-12-30-volts-p1649/> > Acesso em: Agosto 2017.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 481, de 17 de Abril de 2012**. Brasília, 2012.
- BARTH, N. et al. PV panel single and double diode models: Optimization of parameters and temperature dependence. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 148, p. 87-98, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.003>
- BAYOD-RÚJULA, A.A.; CEBOLLERO-ABIÁN, J.A. A novel MPPT method for PV systems with irradiance measurement. **Solar Energy**, v. 109, p. 95-104, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.017>
- CALAIA, F.J.S. **Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas estudo experimental com transposição para um nível macro**. 2011, 135 f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Superior técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000. **Instruction manual CR1000 Measurement and Control System**. Disponível em: <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>>. Acesso: Jul. 2016.
- CAMPBELL SCIENTIFIC CMP3-L. **Instruction manual, Cmp3-L, Pyranometer**. Rev. 2/16. 2016. Disponível em: <<https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cmp3.pdf>> Acesso em: Jul. 2016.
- CEYLAN, İ. et al. Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 96-101, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.058>.
- CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R. Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 163-175, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.019>
- CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1084-1099, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>

CHAUREY, A.; KANDPAL, T.C. Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2266-2278, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.04.005

CRESESB/CEPEL – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO e CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA **Energia Solar Princípio e Aplicações**. Sistema Eletrobrás. Rio de Janeiro:1999.

CRESESB/CEPEL – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO e CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**; 2014. 530p.

DIAS, M.S.C. **Módulo Fotovoltaico JN40F**[mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <meneghel.zilli@gmail.com> em 8 de maio 2017

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

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaicsolar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.81, p. 181-191, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>

FRAUNHOFER Institute for Solar Energy Systems-ISE. **Photovoltaics Report**. 2016. Disponível em: < www.ise.fraunhofer.de>. Acesso em: Maio 2017.

GNOATTO, E. et al. 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.

HOSENUZZAMAN, M. et al. Global prospect, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p.284-297, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.046>

KAMALAPUR, G.D.; UDAYKUMAR R.Y. Rural electrification in India and feasibility of Photovoltaic Solar Home Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 33, p.594-599, 2011. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.12.014

KATEB, M.N.; TOBBECHE, S.; MERAZGA, A. Influence of $\mu\text{c-Si:H}$ tunnel recombination junction on the performance of a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ tandem solar cells. **Optik**, v.139, p. 152 – 165, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.03.099>

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, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300005>

LACERDA, J.S.; VAN DEN BERGH, J.C.J.M. Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p.331-340, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.032>

MARENGO, J.A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptações á mudança do clima no semi-árido do Brasil**. Parcerias Estratégicas, v. 13, n. 27, 2008.

MATEO, C. et al. Analysis of initial stabilization of cell efficiency in amorphous silicon photovoltaic modules under real outdoor conditions. **Renewable Energy**, v. 120, p. 114-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.054>

MICHELS, R.N. **Avaliação de um sistema de bombeamento de água alimentado por painéis fotovoltaicos**. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M.Z. A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. **Energy for Sustainable Development**, v. 38, p. 93-101, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.002>

MIT – MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **The future of solar energy an interdisciplinary MIT study**. 2015. Disponível em: < <http://energy.mit.edu/publication/future-solar-energy/> >. Acesso em: Maio 2017.

MONTENEGRO, A.A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. 2013. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

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.

NACER, T. et al. Feasibility study of grid connected photovoltaic system in family farms for electricity generation in rural areas. **Renewable Energy**, v. 96, p. 305-318, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.093>

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL022P-17b-1/7(22Wp)**. 2016. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl022p-17b-22wp.html> >. Acesso em: Agosto, 2017.

NIEDZIALKOSKI, R.K. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Departamento de Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná., Cascavel, 2013.

NOGUEIRA, C.E.C. et al. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1610-1616, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.082>

OLIVEIRA, L.B. et al. Gerenciamento comunitário de recursos hídricos, uma questão de saúde: a água que temos e a água que queremos: percepção dos usuários de sociedades de água em um município rural da sub-bacia hidrográfica de Forqueta, RS. **Ambiência**, Guarapuava, v. 11, n. 2, p.359-374, Abr. 2015.

PEREIRA, E.B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1.ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

RODRIGUES, R.C. **Análise do Desempenho Hidroenergético de Sistemas de Abastecimento de Água do Município de Marabá**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

SAMPAIO, P.G.V.; GONZÁLEZ, M.O.A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>

SANTOS, J.A.A.; MICHELS, R.N.; GNOATTO, E. Desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico na região oeste do Paraná. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 2, n. 2, p.22-25, Set. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v2n22010269>

SANTOS, R.K.; RISPOLI, Í.A.G. Seleção do coletor solar em sistemas brasileiros de aquecimento de água. **Acta Iguazu**, v. 4, n. 3, p. 31-47, 2015. INSS: 2316-4093

SCARPARE, F.V.; LEAL, M.R.L.V.; VICTORIA, R.L. The challenges of sugarcane ethanol in Brazil: past, present and future. In: DALLEMAND, J.F.; HILBERT, J.A.; MONFORTI, F. Bioenergy and Latin America: A Multi-Country Perspective. JRC technical reports, 2015, p.91-104.

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

SOLARJACK. **SDS Series Pumps Specifications**. Disponível em: < <https://www.sunpumps.com/Photo/336?d=7/27/201712:24:56PM> >. Acesso em: Jul. 2017.

SONTAKE, V.C.; KALAMKAR, V.R. Solar photovoltaic water pumping system – A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1038-1067. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>

SUNDATA. **Potencial Solar – SunData**. CRESESB/CEPEL. 2016. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data> >. Acesso em: Ago. 2017.

SUNTECH. **Multicrystalline Silicon Solar Module**. [2005] Disponível em: <
http://www.meridian-industries.com/en/panel_prod_list4.htm >. Acesso em: Jul. 2017.

TIAGO FILHO, G.L. **Carneiro hidráulico: o que é e como construí-lo**. CERPCH - Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos. 2002.

TOLMASQUIM, M.T. **Energia Renovável**: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. 452 p. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TRINURUK, P. et al. Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand. **Renewable Energy**. v. 34, p. 2515-2523. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.027>

TURRAL, H.; SVENDSEN, M.; FAURES, J.M. Investing in irrigation: Reviewing the past and looking to the future. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 551-560, 2010. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.07.012

VALER, L.R. et al. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.15, p. 20-26, 2016.

VICENTIN, T.A. **Acionamento de dois sistemas de bombeamento alimentados por uma centralde microgeração fotovoltaica**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Agronomia (Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista., Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014.

VICENTIN, T.A. et al. Análise do acionamento de motobombasatravés de sistemas fotovoltaicos. **Energ. Agric., Botucatu**, n. 1, v. 31, p.72-79, 2016.

YANG, J.; BANERJEE, A.; GUHA, S. Amorphous silicone based photovoltaics – from earth to the “final frontier”. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 78, p. 597-612, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00453-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00453-1)

YIFA. **YF-S201 product instruction**. Disponível em:
 <http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_YF-S201.pdf#_ga=2.80396881.792150102.1498525511-623839993.1498525511>. Acesso em: Nov. 2016.