

SONI WILLIAN HAUPENTHAL

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AMORFO
EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO – 2019

SONI WILLIAN HAUPENTHAL

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AMORFO
EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO

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

Orientador: Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira
Coorientador: Dr. Márcio Antonio Vilas Boas
Coorientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO – 2019

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

Haupenthal, Soni Willian
UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AMORFO EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO / Soni Willian Haupenthal; orientador(a), Jair Antônio Cruz Siqueira; coorientador(a), Márcio Antonio Vilas Boas, coorientador(a)II, Samuel Nelson Melegari de Souza, 2019. 100 f.

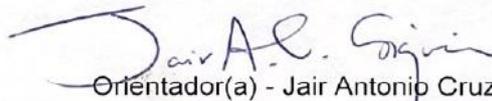
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2019.

1. Desempenho de sistema de irrigação. 2. Energia renovável. 3. Irrigação localizada. I. Cruz Siqueira, Jair Antônio . II. Vilas Boas, Márcio Antonio. III. Melegari de Souza, Samuel Nelson . IV. Título.

SONI WILLIAM HAUPENTHAL

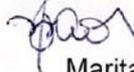
Utilização de um sistema fotovoltaico amorfo em sistema de irrigação por microaspersão

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) - Jair Antonio Cruz Siqueira

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



Maritane Prior

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



Jiam Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)

Cascavel, 18 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira, e meu coorientador, Professor Dr. Marcio Antonio Vilas Boas, pelas precisas e eficazes orientações.

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

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

Aos Professores, Dr. Jiam Pires Frigo e Dra. Maritane Prior, 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 neste trabalho de pesquisa.

À Fundação Araucária pela bolsa cedida para realização da pesquisa.

À CAPES, uma vez que este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área
AIE	Agência Internacional de Energia
a-Si	Silício amorfo
a-Si / μ c- Si	Silício microamorfo
BRICS	Brasil Rússia Índia China África do Sul
CASA	Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia
CdTe	Telurídeo de cádmio
CIGS	Dieseline de galão de índio
CIS	Seleneto de cobre e índio
Cp	Capacidade do processo
Cr	Coeficiente do material
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito
c-Si	Silício cristalino
CUC	Coeficiente de uniformidade de Christiansen
CUD	Coeficiente de uniformidade de distribuição
D	Diâmetro
Ec	Energia consumida
Ed	Energia disponível
EPIA	European photovoltaic industry association
H _g	Altura geométrica
H _m	Altura manométrica
I	Corrente

H_p	Perda de carga
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
I_{mp}	Corrente de potência máxima
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
I_{sc}	Corrente de curto circuito
L	Comprimento
L_{eq}	Comprimento equivalente
LIE	Limite inferior de especificação
LM	Linha média
LSE	Limite superior de especificação
mc-Si	Multicristalina
OMS	Organização Mundial da Saúde
P	Potência
P_d	Potência disponível
P_{max}	Potência máxima
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
Q	Vazão
R_s	Radiação solar global
sc-Si	Cristalino simples
Si	Silício
t	Tempo
U	Tensão

U_{CC}	Tensão de corrente contínua
U_{DL}	Tensão lida pelo datalogger
U_{MP}	Tensão em potência máxima
U_{OC}	Tensão em circuito aberto
U_{Real}	Tensão real
η	Eficiência de conversão

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C	Graus Celsius
A	Ampère
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros quadrados
eV	Eletro voltagem
g	Gramas
GW	Gigawatts
GWp	Gigawatt pico
Kg	Kilo grama
L min ⁻¹	Litros por minuto
L/W m ⁻²	Litros por Watts por metro quadrado
m	Metros
m s ⁻¹	Metros por segundo
mA	Miliampère
mca	Metros de coluna de água
MHz	Megahertz
mim	Minutos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mm h ⁻¹	Milímetros por hora
Mpa	Megapascal
s	Segundos

TWh	Terawatt hora
V	Volts
W	Watts
W h	Watts hora
W m ⁻²	Watts por metro quadrado
Wp	Watts pico
Ω	Ohm

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Banda de valência, banda proibida (band gap) e banda de condução: isolante, semicondutor e condutor.	6
Figura 2. Célula fotovoltaica. Fonte: CRESESB (2017).	7
Figura 3. Tipos de células fotovoltaicas de Silício. Fonte: CRESESB (2017).	8
Figura 4. Efeito causado pela variação da radiação solar sobre a curva característica do módulo de Si cristalino (temperatura constante). Fonte: Pinho e Galdino (2014).	9
Figura 5. Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica do módulo de Si cristalino a 1000 W m ⁻² . Fonte: Pinho e Galdino (2014).	10
Figura 6. Progresso da eficiência das células fotovoltaicas. Fonte: FRAUNHOFER (2016).	11
Figura 7. Sistema fotovoltaico de bombeamento para elevação de água com aplicações para consumo humano, animal e irrigação. Fonte: MORALES (2011).	12
Figura 8. Sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica com uso de bateria e bomba submersível. Fonte: SOTANKE e KALAMKAR (2016).	13
Figura 9. Sistema fotovoltaico de bombeamento com armazenamento de água aplicada para irrigação.	14
Figura 10. Local da montagem do experimento.	19
Figura 11. Módulo fotovoltaico da marca Solarterra, modelo JN40F	20
Figura 12. Bomba hidráulica – Marca Solarjack, modelo SDS-D-228.	21
Figura 13. Microaspersor rotativo bocal violeta.	21
Figura 14. Piranômetro Kipp & Zonen, modelo CMP3.	22
Figura 15. Sensor de fluxo de água.	23
Figura 16. Manômetro com glicerina analógico.	23
Figura 17. Miniestação meteorológica.	24
Figura 18. Datalogger Campbell Scientific, modelo CR 1000.	25
Figura 19. Painel Fotovoltaico amorfo instalado (a); conector tipo Y, ligado em paralelo (b).	26
Figura 20. Esquema do sistema de irrigação com bombeamento fotovoltaico. 01 - Painel fotovoltaico, 02 - bomba submersível, 03 - sensor de fluxo, 04 - manômetro, 05 - microaspersor, 06 - coletor.	26
Figura 21. Arranjo do sistema fotovoltaico amorfo, ligado em paralelo, utilizado no experimento.	27
Figura 22. Diagrama elétrico, posicionamento e ligação dos sensores do experimento.	28
Figura 23. Sistema de irrigação por microaspersão do experimento em funcionamento no ultimo horário de coleta.	30
Figura 24. Disposição dos microaspersores e coletores do experimento (Espaçamento 1).	30
Figura 25. Disposição dos microaspersores e coletores do experimento (Espaçamento 2).	31
Figura 26. Média horária da energia disponível por parte do painel fotovoltaico e da energia consumida do sistema de bombeamento do experimento.	42

Figura 27. Regressão linear em relação à energia consumida e a energia disponível pelo painel fotovoltaico do experimento.	43
Figura 28. Média diária do volume bombeado e irradiação solar média diária.....	44
Figura 29. Regressão linear da vazão média horária em relação à irradiação média horária do experimento.....	45
Figura 30. Regressão linear entre a vazão média horária pela energia consumida média horária do experimento.	46
Figura 31. Lâmina média dos coletores, 10h às 11h (a); Lâmina média dos coletores, 11h05min às 12h05min (b): Espaçamento 1.	53
Figura 32. Lâmina média dos coletores, 14h às 15h (a); Lâmina média dos coletores, 15h05min às 16h05min (b): Espaçamento 1.	53
Figura 33. Lâmina média dos coletores, 10h às 11h (a); Lâmina média dos coletores, 11h05min às 12h05min (b): Espaçamento 2.	54
Figura 34. Lâmina média dos coletores, 14h às 15h (a); Lâmina média dos coletores, 15h05min às 16h05min (b): Espaçamento 2.	54
Figura 35. Lâmina média dos coletores para o espaçamento 1 (a); Lâmina média dos coletores para o espaçamento 2 (b).	55
Figura 36. Gráfico de controle da média horária em relação à irradiação (a) e potência do painel fotovoltaico (b).....	59
Figura 37. Gráfico de controle para a pressão média horária dos espaçamentos 1 (a) e 2 (b).	61
Figura 38. Gráfico de controle para CUC (a), CUD (b), velocidade do vento (c) e vazão (d): espaçamento 1.....	63
Figura 39. Gráfico de controle para CUC (a), CUD (b), velocidade do vento (c) e vazão (d): espaçamento 2.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações Técnicas do Módulo Fotovoltaico.	20
Tabela 2. Características técnicas da bomba de diafragma hidráulica.	20
Tabela 3. Características técnicas do microaspersor.	21
Tabela 4. Características técnicas do piranômetro.	22
Tabela 5. Características técnicas do fluxômetro.	23
Tabela 6. Características técnicas do manômetro.	24
Tabela 7. Especificações técnicas da miniestação meteorológica ITWH 1080.	24
Tabela 8. Especificações técnicas do datalogger Campbell Scientific.	25
Tabela 9. Classificação dos coeficientes de uniformidade (CUC e CUD).	37
Tabela 10. Estatística descritiva dos dados para os quatro diferentes horários.	39
Tabela 11. Comparação entre as médias de irradiação, energia disponível e consumida, tensão e corrente.	41
Tabela 12. Estatística descritiva dos dados de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão, temperatura, velocidade do vento e umidade em função dos dois espaçamentos.	47
Tabela 13. Estatística descritiva dos dados de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão e velocidade do vento em função dos quatro horários.	49
Tabela 14. Médias de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão e eficiência para os dois espaçamentos.	50
Tabela 15. Eficiência média horária do sistema fotovoltaico de bombeamento, aplicação e global.	56
Tabela 16. Índice de capacidade do processo (C_{pi}) para CUC e CUD.	68

HAUPENTHAL, Soni Willian. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2019. **Utilização de um sistema fotovoltaico amorfo em sistema de irrigação por microaspersão.** Professor Orientador Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira.

RESUMO

No contexto da segurança energética e mudanças climáticas, a implantação de fontes renováveis de energia é fundamental. O acesso à energia elétrica e disponibilidade de água, pode ser um entrave ao desenvolvimento e melhora na qualidade de vida de determinadas regiões. O bombeamento fotovoltaico e os sistemas de irrigação localizada trazem um novo âmbito para a geração de energia limpa de pouca manutenção e acessível para lugares remotos, em substituição aos motores de combustão. Além disso, o sistema de irrigação possibilita maior produtividade e desenvolvimento para áreas com baixa pluviosidade. Desta forma, este trabalho teve por objetivo a avaliação do desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão em função da utilização de um sistema fotovoltaico amorfo sem unidade armazenadora de energia. A influência do sistema fotovoltaico de bombeamento de água no sistema de irrigação por microaspersão foi avaliada pelos coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). O experimento foi composto por dois painéis fotovoltaicos amorfos conectados em paralelo, ligados diretamente em uma bomba submersível localizada em um reservatório, com o recalque derivando para um sistema de irrigação composto por quatro microaspersores. Foram medidos os parâmetros de potência gerada pelo sistema, radiação solar global, volume de água, velocidade e direção do vento, umidade relativa, temperatura e medição da lâmina de água por parte dos coletores. O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, *Campus* de Cascavel, para um total de quatro horários em relação a parte fotovoltaica e de bombeamento, sendo esses, das 10:00 às 11:00h, 11:05 às 12:05h, das 14:00 às 15:00h e das 15:05 às 16:05h e dois espaçamentos entre os microaspersores, de 2,0 x 2,0 m e 2,0 x 1,6 m. Foram obtidos valores quanto à eficiência média do sistema fotovoltaico amorfo de 4,107% e bombeamento de 0,792%, encontrou-se valor de 59,66% para CUC e 58,86% para CUD no espaçamento 1, e no espaçamento 2 obteve-se para CUC, 68,85%, e CUD com 68,05%. Concluiu-se, portanto, que o melhor horário de utilização do sistema de bombeamento fotovoltaico é das 11:05 às 12:05h, por apresentar maior valor de eficiência do painel com 4,57%, e de bombeamento de 1,12%, e um espaçamento de 2,0 x 1,6 m entre microaspersores, o qual obteve valores superiores a 68% em ambos os coeficientes de uniformidade. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho de sistema de irrigação, energia renovável, irrigação localizada.

HAUPENTHAL, Soni Willian. Western Paraná State University, february 2019.
Utilization of an amorphous photovoltaic system in micro sprinkler irrigation system. Advisor Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

In the context of energy security and climate change, the deployment of renewable energy sources is key. Access to electricity and water availability can be an obstacle to the development and improvement of the quality of life of certain regions. Therefore, photovoltaic pumping along with localized irrigation systems, brings a new scope for the generation of clean energy of low maintenance and accessible to remote places, replacing the combustion engines. On the other hand, the irrigation system allows greater productivity and development for areas with low rainfall. In this way, this work had the objective of evaluating the performance of a micro sprinkler irrigation system due to the use of an amorphous photovoltaic system without energy storage unit. The influence of the photovoltaic system of water pumping in the micro sprinkler irrigation system was evaluated by the distribution uniformity coefficients (DUC) and the Christiansen uniformity coefficient (CUC). The experiment was composed of two amorphous photovoltaic panels connected in parallel, connected directly to a submersible pump, located in a water tank, with the settling to an irrigation system composed of four micro speakers. The parameters of power generated by the system, global solar radiation, water volume, wind speed and direction, relative humidity, temperature and water metering by the collectors were measured. The experiment was conducted at the State University of the West of Paraná, UNIOESTE, Campus of Cascavel, for a total of four hours in relation to the photovoltaic part and pumping, from 10:00 am to 11:00 am, 11:05 am to 12:05 pm, 2:00 pm to 3:00 pm, and 3:05 pm to 4:05 pm and two spacing with respect to irrigation, varying the spacing between the micro sprinklers, 2.0 x 2.0 m and 2.0 x 1.6 m. Values were obtained for the average efficiency of the amorphous photovoltaic system of 4.107% and pumping of 0.0792%. A value of 59.66% for CUC and 58.86% for CUD was found in spacing 1, and in spacing 2 it was obtained for CUC, 68.85%, and CUD with 68.05%. Therefore, it was concluded that the best time to use the photovoltaic pumping system is from 11:05 am to 12:05 p.m., due to the higher panel efficiency of 4.57% and pumping of 1.12%, and one spacing of 2.0 x 1.6 m between microsprinklers, which obtained values greater than 68% in both coefficients of uniformity. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior- Brasil (CAPES)- Finance Code 001.

KEYWORDS: Performance of irrigation system, photovoltaic system, localized irrigation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Panorama do consumo energético	3
2.2. Energia solar fotovoltaica	5
2.3. Eficiência do sistema fotovoltaico.....	9
2.4. Bombeamento de água com energia fotovoltaica.....	11
2.4.1. Bombeamento de água com energia fotovoltaica com acumulador de carga	12
2.4.2. Bombeamento de água com energia fotovoltaica sem acumulador de carga	13
2.5. Sistema de irrigação.....	15
2.5.1. Importância do uso do sistema de irrigação.....	15
2.5.2. Avaliação do sistema de irrigação	15
2.5.3. Fatores que influenciam na uniformidade de aplicação do sistema de irrigação	16
2.6. Gráfico de controle de Shewart	17
2.7. Índice de capacidade do processo.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Caracterização do experimento	19
3.2. Especificações técnicas dos materiais utilizados no experimento	19
3.2.1. Painel fotovoltaico amorfo	19
3.2.2. Sistema de bombeamento	20
3.2.3. Microaspersor.....	21
3.2.4. Piranômetro	22
3.2.5. Fluxômetro.....	22
3.3. Caracterização dos métodos.....	25
3.3.1. Instalação e funcionamento do experimento.....	25
3.3.2. Arranjo dos painéis fotovoltaicos.....	27
3.3.3. Delineamento experimental	27
3.3.4. Coleta dos dados.....	28
3.3.5. Determinação da tensão e corrente do sistema fotovoltaico	31
3.3.6. Determinação da potência do sistema fotovoltaico	32
3.3.7. Cálculo da perda de carga distribuída do sistema de bombeamento	33
3.3.8. Determinação da energia solar disponível e da energia consumida pelo sistema de bombeamento	33
3.3.9. Determinação da eficiência do painel, do sistema de bombeamento, da aplicação de água e da eficiência global do sistema fotovoltaico de bombeamento de água.....	34
3.3.10. Determinação dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD).....	36

3.3.11. Elaboração dos Gráficos de controle de Shewhart e determinação do índice de capacidade do processo	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1. Avaliação do sistema fotovoltaico	39
4.1.1. Estatística descritiva dos dados do sistema de fornecimento de energia	39
4.1.2. Comparação de médias dos parâmetros de geração do sistema fotovoltaico	41
4.1.3. Avaliação da energia solar disponível e da energia consumida pelo sistema de bombeamento de água fotovoltaico.....	42
4.2. Avaliação do sistema de bombeamento de água fotovoltaico	44
4.3. Avaliação do desempenho do sistema de irrigação por microaspersão	47
4.3.1. Análise estatística descritiva dos dados do sistema de irrigação por microaspersão	47
4.3.2. Comparação das médias das lâminas de irrigação, CUC, CUD, vazão, pressão e eficiência.	50
4.3.3. Avaliação do comportamento da lâmina d'água do sistema de irrigação por microaspersão.....	52
4.4. Avaliação da eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento de água para o sistema de irrigação por microaspersão.....	56
4.5. Análise dos gráficos de controle de Shewhart	58
4.6. Avaliação do índice de capacidade do processo	68
5. CONCLUSÕES.....	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência do aumento populacional e desenvolvimento tecnológico e econômico, os seres humanos precisam de mais energia elétrica para manter suas funções diárias. No entanto, a queima de combustíveis fósseis vem causando uma série de problemas ambientais, tais como: mudanças climáticas, aquecimento global, poluição do ar e até mesmo chuva ácida (PENG e YANG, 2013; TYAGI et al., 2013)

De acordo com Lise e Laan (2015), o aquecimento global vem ocorrendo nas últimas décadas e pode ser verificado por alguns fatores como: aumento nas temperaturas globais, aquecimento do ar, acúmulo de gases liberados na atmosfera e o aquecimento das temperaturas dos oceanos. Sendo a queima de combustíveis fósseis a principal responsável pela emissão de gases de efeito estufa que alteram o clima (JOENSUU e SINKKO, 2015).

Tais fatores podem ser justificados pela demanda de recursos do planeta que continuam a exceder a sua capacidade, portanto deve-se ser persuasivo na busca de tecnologias limpas e fontes de energia renováveis (MEADOWNS et al., 2004).

A tecnologia fotovoltaica, quando comparada com a geração de energia que utiliza combustível fóssil, não emite gases de efeito estufa na conversão da energia solar em energia elétrica, não contribuindo com a mudança climática, aquecimento global e poluição do ar. Outra vantagem que se encontra na energia fotovoltaica é que não há necessidade de ser extraída, refinada ou transportada. Entretanto, o processo de fabricação de células solares, montagem de módulos fotovoltaicos e transporte de material consome valores elevados de energia e emite gases do efeito estufa (PAI et al, 2004; RAZYKOV et al, 2011; HOSENUZZAMAN et al., 2015).

O uso da energia solar fotovoltaica tem a importância de suprir a necessidade energética, sem a preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis, bem como a distribuição desigual e aumento nos preços da eletricidade (ABU-ALIGAH, 2011). Com isso, torna-se acessível a tecnologia de bombeamento de água com diversas aplicações em regiões sem acesso à rede elétrica convencional (ANDRADE, 2013)

O sistema de bombeamento de água fotovoltaico traz muitas vantagens para os locais onde a conexão da rede nacional de eletricidade não está disponível e as instalações de redes de energia não são viáveis (VICK; NEAL, 2012; NOGUEIRA,

2009). Além disso, também é uma alternativa para solucionar a problemática da falta de chuvas nas regiões semiáridas e áridas no Brasil, podendo ser utilizado em um sistema de irrigação ou até mesmo para consumo doméstico (MICHELS et al., 2009).

Embora a utilização do sistema fotovoltaico para bombeamento de água seja uma tecnologia emergente, com grandes desafios, a técnica pode ser aplicada em uma escala maior e também apresenta uma alternativa ambientalmente favorável às bombas de água convencionais alimentadas com combustível fóssil, como o diesel (KUMAR et al., 2010).

Para que essa aplicação seja eficaz, é de grande importância conhecer as características dos sistemas, como tensão, corrente elétrica e potência gerada pelos painéis, bem como a irradiação média da região, velocidade dos ventos, a tensão e potência necessária para o acionamento da bomba e a vazão e distribuição de água fornecida pelo sistema.

O objetivo geral foi avaliar o desempenho de um sistema de bombeamento de água com painéis fotovoltaicos conectados a um sistema de irrigação por microaspersores sem o uso de um sistema de armazenamento de energia. Os objetivos específicos consistiram em determinar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), verificar a classificação do sistema de irrigação segundo as normas de uniformidade e constatar o efeito da radiação solar nos painéis fotovoltaicos em relação ao desempenho da irrigação por microaspersão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Panorama do consumo energético

O uso de energia tornou-se cada vez mais presente no cotidiano das pessoas e é ocasionado pela presença de novas tecnologias e crescimento populacional (MAUAD et al., 2017). Vale ressaltar que o combustível fóssil sob a forma de carvão, gás natural e petróleo representa 80% do consumo mundial de energia, sendo que aproximadamente metade da eletricidade gerada ainda é produzida em usinas a carvão (PENG et al., 2013; TYAGI et al., 2013). O público em geral, as pesquisas e os governos estão preocupados com a eficiência energética, especialmente nos países em desenvolvimento (SAMPAIO e GONZÁLEZ, 2017).

Nesse contexto de preocupações com a segurança energética e mudanças climáticas, a implantação de fontes renováveis é essencial. Pela menor concentração dos recursos naturais utilizados como fontes renováveis, elas são capazes de prover maior segurança energética aos países que as utilizam, e seu aproveitamento em maior escala é um dos principais instrumentos de combate às mudanças climáticas decorrentes da elevação dos gases de efeito estufa na atmosfera. Além desses benefícios, as fontes de energia renováveis, se implantadas apropriadamente, podem também contribuir com o desenvolvimento social e econômico, para a universalização do acesso à energia, redução de efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde (IPCC, 2011).

O fato é que a humanidade necessita de energia em sua vida diária para cozinhar, iluminar, comunicações entre outras demandas. Entretanto, desde os meados de 1985, os combustíveis fósseis dominaram as outras fontes de energia, acarretando o crescimento das percentagens de dióxidos de carbono na atmosfera, causando poluições ambientais. De acordo com as estimativas feitas pela Agência Internacional de Energia (AIE), a demanda global de energia aumenta 1,6% ao ano, com cerca de 65% do aumento em países em desenvolvimento (ARSLAN, 2010). Ainda de acordo com a AIE, os consumos totais de energia serão elevados em 75% do ano de 2008 até 2035 (SAHU, 2017). Segundo Dincer (2011), a produção de energia elétrica total do mundo, em 2004, foi de 17.450 TWh e estima-se que a energia mundial consumida em 2030 será de 31.675 TWh.

Sabe-se hoje que o problema de acesso à energia é predominantemente rural, pois, conforme os dados do PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) e da OMS (Organização Mundial da Saúde), em 2009, 85% ou 1,1 de 1,3 bilhão das pessoas sem acesso à energia estão nas áreas rurais, sendo o problema ainda mais grave quando se fala em energia limpa (BHATTACHARYYA, 2012).

Por tais circunstâncias, existe uma real necessidade de se atrair maiores investimentos para as áreas das energias renováveis (ZWICKEL et al., 2011). Tornando o acesso à energia elétrica possível nos locais afastados, com o intuito de promover o desenvolvimento de áreas rurais de forma sustentável.

Destaca-se que, entre 2000 e 2015, as taxas de crescimento das instalações fotovoltaicas foram de 41%, sendo que a China e Taiwan, desde 2006, vêm aumentando a indústria fotovoltaica com fortes taxas de crescimento. FRAUNHOFER INSTITUTE (2018) salienta que esses mesmos países mantiveram um valor de mais de 70% do percentual de produção de energia fotovoltaica mundial para os anos de 2016 e 2017.

Para Jäger-Waldau (2017), a produção de energia fotovoltaica, em 2016, foi de 75 GW, somando mais do que toda a capacidade instalada mundial até ao final de 2011.

No final de 2015, China e Taiwan possuíam a quota de mercado com cerca de 71% das vendas. Ainda existe a perspectiva de que o mercado de sistemas fotovoltaicos continue a crescer nos próximos anos em razão das políticas de subsídios, isenção de impostos entre outros incentivos financeiros (HOFFMANN, 2006; AVRUTIN, IZYUMSKAYA e MORKOÇ, 2011; DEVABHAKTUNI et al., 2013).

De acordo com Leccisi, Raugei e Fthenakis (2016), a tecnologia fotovoltaica baseada em silício cristalino representou cerca de 85% do mercado, por ser uma tecnologia de melhor eficiência, consolidação e confiança. Entre as tecnologias de filme fino, as células CdTe lideraram com uma produção anual de 2,5 GWp, bem como a participação de todos os filmes finos no mercado totalizando cerca de 7% da produção total anual (SAMPAIO e GONZÁLEZ, 2017).

Para o mesmo autor, o registro de eficiência de células fotovoltaica em laboratório é de 25,6% para silício monocristalino e de 21,3% para tecnologia de silício multicristalino. Já as células solares de multijunção chegaram a 46% de eficiência em laboratório.

A energia solar e a energia eólica, em conjunto, aumentaram mais de 77% em capacidade de geração de energia, enquanto a energia hidrelétrica aumentou 2,7%. Destaca-se que a capacidade das energias renováveis, sem levar em consideração a hidráulica, aumentou 35,1% na União Europeia, seguido pelos países do BRICS com o valor de 33,3% (SAHU, 2017).

A União Europeia alcançou, no final de 2016, uma capacidade instalada acumulada de 102 GW em energia fotovoltaica, o que representa cerca de um terço para a capacidade de geração de energia fotovoltaica total de 312 GW (IEA PVPS, 2017).

Voltando a atenção para o Brasil, segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2011, o país atingiu 92,6% da população rural com acesso à energia. Sendo esse acesso conhecido como o processo por meio do qual todos os pedidos de fornecimento de eletricidade devem ser atendidos, visto que a eletricidade deve ser reconhecida como um direito do cidadão (GÓMEZ e SILVEIRA, 2012). No entanto, mesmo com um alto índice de acesso à energia, até mesmo nas áreas rurais, sendo fundamentalmente provenientes de fontes limpas, como as hidroelétricas, necessita-se de um aumento na produção de energia de fontes renováveis como a solar (ANDRADE, 2013).

2.2. Energia solar fotovoltaica

A captura de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos, a fim de se produzir eletricidade, é considerado um dos mercados mais promissores no campo das energias renováveis, principalmente em razão da sua rápida perspectiva de crescimento e altos níveis de investimento envolvidos (SAMPAIO e GONZÁLEZ, 2017).

Destaca-se que o total de energia que incide na superfície terrestre em um ano é superior a dez mil vezes o consumo anual de energia bruta da humanidade (CRESESB, 2017).

A energia solar fotovoltaica pode ser definida como: eletricidade obtida diretamente da conversão de energia solar, ocorrendo devido ao efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Becquerel em 1839 (PARIDA, INIYAN e GOIC, 2011;

RAZYKOV et al., 2011; CHAAR, LAMONT e ZEIN, 2011; HOSENUZZAMAN et al., 2015).

O surgimento da tensão elétrica ocorre quando o elétron da banda de valência recebe energia suficiente do fóton para saltar a banda proibida e passar para a banda de condução. Para isso, a energia recebida do fóton de luz deve ser maior ou igual a energia do gap, que é a diferença entre a energia mínima da banda de condução e máxima da banda de valência

Ou seja, o elétron precisa de energia para vencer a banda proibida, caso o fóton incidente tenha energia maior que o “gap”, como pode ser visto na Figura 1.

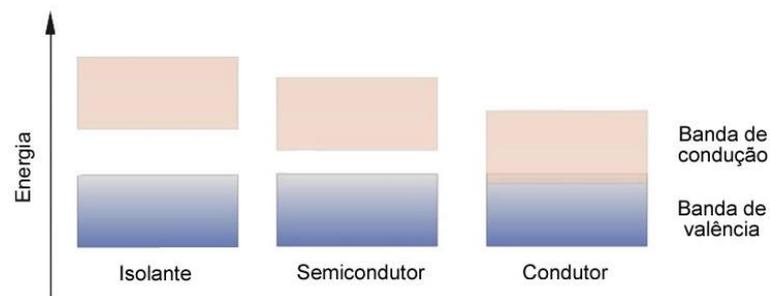


Figura 1. Banda de valência, banda proibida (band gap) e banda de condução: isolante, semicondutor e condutor.

O silício é o segundo elemento em maior abundância na terra e é o semicondutor mais utilizado na fabricação de painéis fotovoltaicos. Seus átomos são caracterizados por ter quatro elétrons que se conectam aos seus vizinhos, criando uma rede de cristal, cabendo à luz solar causar o efeito fotovoltaico, fornecendo uma quantidade de energia suficiente para o elétron mais externo passar da banda de valência para a banda de condução no material, gerando eletricidade. No caso do silício, especificamente, é necessário 1.12 e V (eletrovoltagem) para que os elétrons excedam e passem da banda de valência para a banda de condução (KUI-QING e SHUIT-TONG, 2011). Além disso, de acordo com Goetzberger, Hebling e Schock, (2003), o material semicondutor deve ser capaz de absorver uma grande parte do espectro solar. Uma típica célula fotovoltaica é mostrada na Figura 2.

Existe uma grande variedade de tecnologias de células fotovoltaicas no mercado, com uso de diferentes tipos de materiais, os quais estarão disponíveis no futuro um número ainda maior. As tecnologias de células fotovoltaicas, geralmente, são categorizadas em três gerações, dependendo da matéria-prima utilizada e do

nível de maturidade comercial (GANGOPADHYAY, JANA e DAS, 2013; LACERDA e VAN DEN BERGH, 2016).

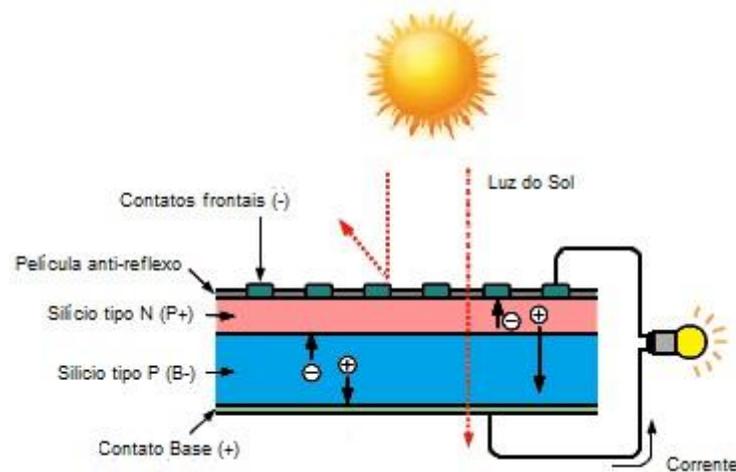


Figura 2. Célula fotovoltaica.

Fonte: CRESESB (2017).

- Sistemas fotovoltaicos de primeira geração, utilizam a tecnologia de silício cristalino (c-Si) tanto na sua forma de cristalino simples (sc-Si), quanto na forma multicristalina (mc-Si).
- Sistemas fotovoltaicos de segunda geração baseados em filme fino, geralmente, incluem três famílias principais: (1) Silício amorfo (a-Si) e silício micro amorfo (a-Si / $\mu\text{c-Si}$); (2) telurídeo de cádmio (CdTe); e (3) seleneto de cobre e índio (CIS) e cobre, diseleneto de galão de índio (CIGS).
- Os sistemas fotovoltaicos de terceira geração incluem tecnologias fotovoltaicas orgânicas que ainda estão sendo pesquisadas ou não foram amplamente comercializadas.

O semiconductor mais utilizado para células fotovoltaicas é o Silício (Si), sendo que o mais usual é o Monocristalino, seguido do Policristalino e Amorfo, demonstrados na Figura 3 (TOLMASQUIM, 2016). Existem ainda outros materiais e tecnologias empregadas na construção de células fotovoltaicas que possuem como característica alta flexibilidade, facilidade de instalação e uma vida útil de 25 anos, mas, até o momento, são utilizados de forma experimental ou em pequena escala comercial (MUNDO-HERNÁNDEZ et al., 2014).

Existem alguns requisitos para que um material de células fotovoltaicas seja considerado ideal: voltagem para a troca de banda entre 1,1 e 1,7 e V, porque quanto

menor a diferença, maior a facilidade de promover um elétron de uma banda à outra, aumentando a condução do material; materiais para fabricação prontamente disponíveis e não tóxicos; técnica de fabricação fácil, adequada para grandes volumes de produção; boa eficiência na conversão fotovoltaica; estabilidade de longa duração (GOETZBERGER e HEBLING, 2000; GOETZBERGER, LUTHER e WILLEKE, 2002; GOETZBERGER, HEBLING e SCHOCK, 2003).



Figura 3. Tipos de células fotovoltaicas de Silício.

Fonte: CRESESB (2017).

Os sistemas fotovoltaicos são considerados robustos e simples, exigem pouca manutenção e sua maior vantagem é que podem ser construídos como sistemas autônomos criando alternativas de geração de energia desde microwatts até megawatts. Sendo usados para os mais diferentes requisitos como: bombeamento de água para diversos fins, sistemas domésticos de energia solar, comunicações, satélites, veículos espaciais, entre outros. Com esta variedade de aplicações, a demanda por energia fotovoltaica está aumentando a cada ano (PARIDA, INIYAN e GOIC, 2011).

A energia fotovoltaica foi a fonte que apresentou maior crescimento no mundo entre os anos de 2000 a 2010, a uma taxa média de cerca de 39% ao ano, em evolução praticamente exponencial. A capacidade instalada atingiu cerca de 40 Giga Watts (GW) no final de 2010, contra 1,5 GW em 2000. Entre os anos de 2005 e 2010, o crescimento foi ainda mais expressivo, alcançando uma taxa média de 49% (IEA, 2011 e EPIA, 2012), enquanto no Brasil, ao final do ano de 2018, a capacidade instalada foi de 2,5 gigawatt contra 1,15 gigawatt no mesmo período de 2017, que apresentou um crescimento de 115% para o período de 1 ano (ABSOLAR, 2018).

Apesar de todo potencial e benefícios da energia solar, há a necessidade de que novas políticas e técnicas sejam consolidadas para que se ultrapassem as

barreiras atualmente colocadas em relação a energia solar, visto que podem ser divididas em técnicas como a restrição e eficiência dos materiais comercialmente utilizados e as barreiras econômicas, ou seja, o alto custo inicial, risco elevado e as barreiras institucionais como a falta de leis eficazes que incentivem à adoção mais ampla (TIMILSINA et. al., 2012).

2.3. Eficiência do sistema fotovoltaico

O desempenho do sistema fotovoltaico depende de vários parâmetros, tais como, nível de irradiação solar, inclinação do sistema fotovoltaico, sombreamento, aumento da temperatura ambiente ou do módulo fotovoltaico, entre outros (FOSTER et al., 2014).

Além desses fatores que influem sobre a eficiência do sistema de energia fotovoltaico, a degradação dos painéis é um dos parâmetros importantes que também afetam o sistema.

Variáveis como irradiação solar e temperatura da placa são de suma importância para a geração de energia, devendo sempre ser levadas em consideração na instalação do sistema fotovoltaico, uma vez que essa tem influência direta na corrente por tensão do módulo (BAYOD-RÚJULA; CEBOLLERO-ABIÁN, 2014).

A corrente elétrica gerada pelo módulo majora com o aumento da radiação solar. A corrente de curto-circuito tem aumento linear com a radiação solar, como mostra a Figura 4.

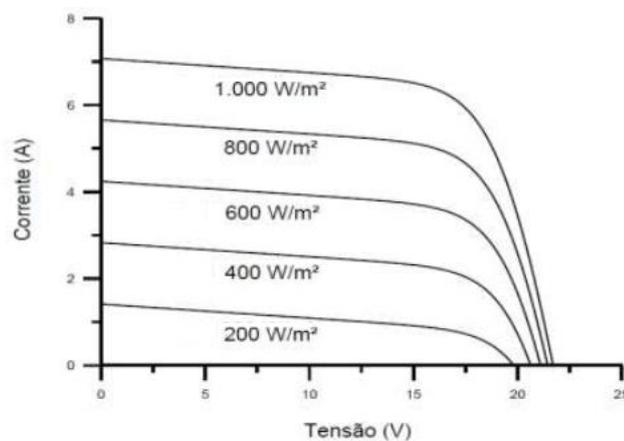


Figura 4. Efeito causado pela variação da radiação solar sobre a curva característica do módulo de Si cristalino (temperatura constante).
Fonte: Pinho e Galdino (2014).

A incidência da radiação solar e a amplitude térmica ambiente alteram a temperatura nas células que compõem o módulo, como mostra a Figura 5. Com a curva A-V para diversas temperaturas de célula, fica notório que existe uma queda na tensão com o aumento na temperatura das células, a partir da qual a corrente sofre um leve aumento que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão (PINHO e GALDINO, 2014).

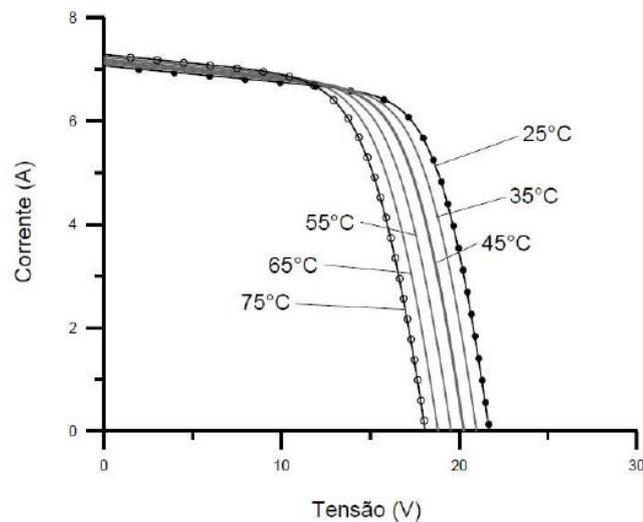


Figura 5. Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica do módulo de Si cristalino a 1000 W m^{-2} .

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Ressalta-se que o coeficiente de temperatura em células de filme fino, como o silício amorfo, é menor se comparado com as células de silício cristalino, resultando em menor perda por aumento da temperatura do módulo (TOMALSQUIM, 2016).

Destaca-se que ocorreram avanços na eficiência do sistema fotovoltaico, com aumento de 12 % para 17 % nos últimos dez anos, nos painéis de lâminas de silício usados comercialmente diminuindo, assim, a espessura e melhorando a relação peso potência do sistema fotovoltaico (FRAUNHOFER, 2016). Além disso, foram apresentadas novas perspectivas de um produto mais viável no mercado. A Figura 6 evidencia a melhoria da eficiência de diferentes tipos de células fotovoltaicas ao longo dos anos.

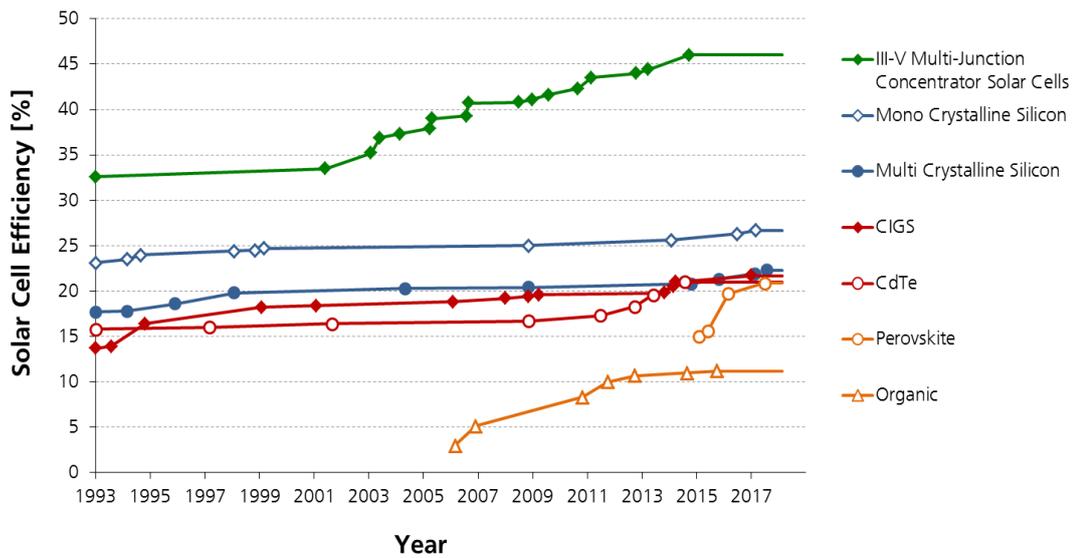


Figura 6. Progresso da eficiência das células fotovoltaicas.
Fonte: FRAUNHOFER (2016).

2.4. Bombeamento de água com energia fotovoltaica

No momento atual, a utilização da energia fotovoltaica para alimentar bombas d'água aparece como uma tecnologia emergente e com grandes desafios, podendo ser aplicada em pequenas e grandes escalas de produção de energia, figurando como uma alternativa ambiental favorável quando comparada aos sistemas convencionais alimentados por combustíveis fósseis (KUMAR et al., 2010, MITTAL et al., 2012).

Além disso, o sistema fotovoltaico de energia se destaca em razão da diminuição nas reservas de petróleo, sua distribuição desigual e aumento gradativo nos custos de eletricidade (DEMIRBAS, 2006).

Os sistemas de bombeamento de água fotovoltaica para suprimento doméstico, seja pecuário ou irrigação, como mostra a Figura 7, vêm ganhando aceitação em áreas remotas, por sua confiabilidade e desempenho, podendo suportar condições climáticas severas (SOTANKE e KALAMKAR, 2016; VALER et al., 2016; GHONEIM, 2006).

De modo semelhante, o uso de energia solar fotovoltaica para operar o sistema de bombeamento de água é a escolha mais apropriada, porque existe uma relação natural entre exigência de água e disponibilidade de energia solar (HSIEH, 1986).

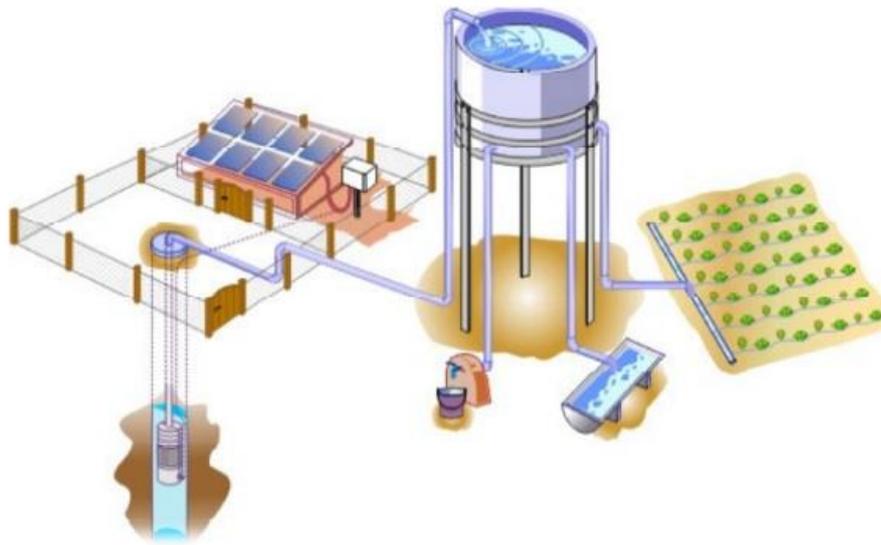


Figura 7. Sistema fotovoltaico de bombeamento para elevação de água com aplicações para consumo humano, animal e irrigação.

Fonte: MORALES (2011).

A instalação do sistema de bombeamento fotovoltaico tem destaque em locais nos quais a rede elétrica não está disponível e os valores para conexão são elevados (SHORT e OLDACH, 2003).

2.4.1. Bombeamento de água com energia fotovoltaica com acumulador de carga

O sistema de bombeamento de água fotovoltaico com uso de bateria (Figura 8), consiste em um painel solar, controlador de carga, baterias, controlador de bomba, interruptor de pressão, tanque de armazenamento e uma bomba de água de corrente contínua.

Durante o dia, os painéis solares convertem a energia solar em corrente elétrica que carrega as baterias. Assim, fornecem energia para o bombeamento de água quando necessário. Dessa forma, com as baterias carregadas, é possível prolongar a duração do bombeamento de água, propiciando o uso do sistema mesmo em dias nublados, com pouca luz ou mesmo à noite (SOTANKE e KALAMKAR, 2016).

O autor ainda cita que seu uso aumenta o custo da complexidade na instalação e manutenção do sistema, por possuir controlador de carga e, em alguns casos, inversor podendo reduzir a eficiência geral do sistema, pois as baterias regulam

a tensão operacional ao invés dos painéis fotovoltaicos. Sendo assim, o autor citado não recomenda o uso em sistemas de bombeamento fotovoltaico, pois, dependendo da temperatura e do carregamento das baterias, a tensão fornecida pode diminuir de um a quatro volts em relação à produzida nos painéis fotovoltaicos.

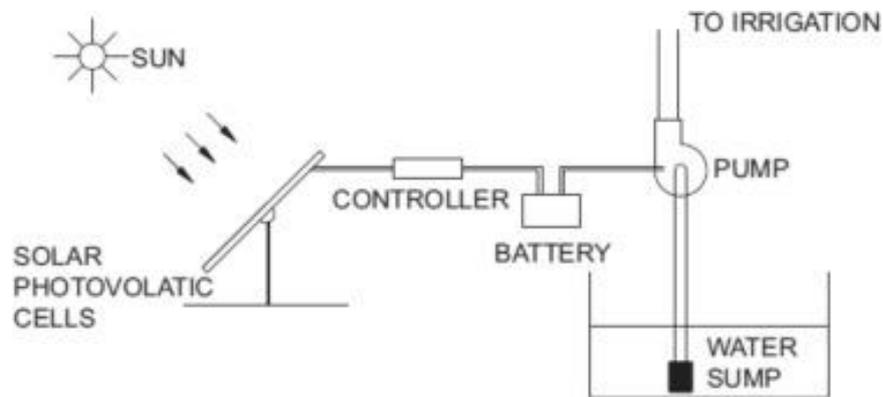


Figura 8. Sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica com uso de bateria e bomba submersível.

Fonte: SOTANKE e KALAMKAR (2016).

Recomenda-se o uso de baterias para bombeamento de água em propriedades nas quais a utilização de reservatórios que converteriam a energia elétrica em energia gravitacional não seja suficiente quanto aos valores de vazão ou pressão exigidas pelo sistema que será suprido pelo reservatório (LÓPEZ-LUQUE et al., 2015).

2.4.2. Bombeamento de água com energia fotovoltaica sem acumulador de carga

No fornecimento de energia fotovoltaica com ligação direta na bomba d'água de corrente contínua, a tensão do terminal e a corrente são iguais à tensão e à corrente da matriz fotovoltaica, em que a velocidade da bomba varia com o nível de radiação solar incidente no gerador fotovoltaico. Uma alternativa para suprir a falta do banco de baterias, em caso de necessidade do uso da água em dias nublados ou à noite, é bombear a água para um reservatório, transformando a energia elétrica em energia potencial gravitacional, suprimindo a necessidade hídrica em qualquer horário do dia (CHANDEL, NAIK e CHANDEL, 2017).

Um dos sistemas mais simplificados de bombeamento de água fotovoltaico, como se pode observar na Figura 9, é constituído por um gerador fotovoltaico

conectado ao conjunto motobomba em corrente contínua, sendo este conectado a um sistema de armazenamento de água e, posteriormente, a um sistema de distribuição, que pode ser um sistema de irrigação (MORALES, 2011).

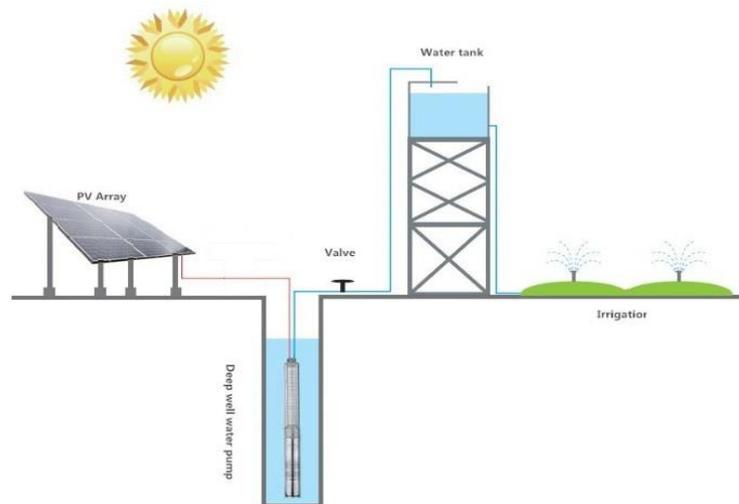


Figura 9. Sistema fotovoltaico de bombeamento com armazenamento de água aplicada para irrigação.

O benefício do sistema sem o uso de baterias, é de ser mais simples e de menor custo de instalação. Ressalta-se que a intensidade e o ângulo da radiação solar que incidem no painel mudam ao longo do dia, interferindo diretamente na vazão do bombeamento. A maior eficiência do sistema ocorre quando a incidência da radiação é maior (do final da manhã até o início da tarde em dias de céu aberto), visto que o sistema funciona plenamente. Para o período do início da manhã (7h30min - 8h30min) e final da tarde (4h - 5h30min), a eficiência da bomba diminui, resultando em baixas vazões (CHANDEL, NAIK e CHANDEL, 2015).

Os sistemas de bombeamento de água fotovoltaicos apresentaram avanços significativos na última década, sendo que os sistemas de primeira geração usaram bombas centrífugas geralmente acionadas por motores de corrente contínua e motores de corrente alternada de frequência variável, com confiabilidade comprovada de longo prazo e eficiência hidráulica variando de 25% a 35%. Os sistemas de bombeamento fotovoltaicos de segunda geração usam bombas de deslocamento positivo, bombas de cavidade progressivas ou bombas de diafragma, geralmente caracterizadas por baixos requisitos de potência de entrada do sistema fotovoltaico, baixo custo de capital e alta eficiência hidráulica de até 70% (PROTOGER e PEARCE, 2000).

2.5. Sistema de irrigação

2.5.1. Importância do uso do sistema de irrigação

A irrigação é de suma importância em áreas com longas estiagens, a qual reduz a produtividade e longevidade da produção agrícola (SCARPARE, LEAL e VICTORIA, 2015). Portanto, fazendo o uso de sistemas de bombeamento para irrigação, se reduz a dependência das chuvas (CHANDEL, NAIK e CHANDEL, 2017).

Destaca-se que o uso de sistemas de irrigação, devidamente planejados, bem empregados e com manejo correto, tornam-se instrumentos para aumento da produtividade agrícola (MAZZER et al., 2008). Na América Latina, vale frisar, a superfície irrigada é de, aproximadamente, 16 milhões de hectares, distribuída principalmente no México, Argentina, Brasil, Chile e Peru (COELHO, FILHO e OLIVEIRA, 2005).

Apesar do grande consumo de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos. Vale ressaltar que de toda água que passa pela planta pelo processo de transpiração, 95 a 97% desse volume retorna para a atmosfera na forma de vapor e apenas 3 a 5% estão presentes na planta no momento da colheita (FAGANELLO et al., 2007).

Segundo a ANA (2017), o Brasil possui 6,95 milhões de hectares irrigados sendo uns dos 10 países com maior área equipada para irrigação do mundo, com perspectiva de crescimento de 45% até 2030, chegando a 10,09 milhões de hectares irrigados.

2.5.2. Avaliação do sistema de irrigação

Para Reis et al. (2006), a avaliação do desempenho de um sistema de irrigação é uma etapa fundamental antes que qualquer estratégia de manejo de irrigação seja implementada. Mantovani e Ramos (1994) afirmam que a uniformidade da irrigação tem como objetivo básico melhorar a produtividade e/ou a rentabilidade da propriedade. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2005), é de capital importância determinar a uniformidade de distribuição d'água em qualquer método de irrigação.

Mantovani, Bernardo e Pallaretti (2012) destacam que, com o objetivo de reduzir a quantidade de água consumida no processo, o sistema de irrigação localizada é um dos mais adequados. Isso devido aos seus altos índices de eficiência e uso da água inferior a outros processos de irrigação. Ainda segundo o autor, tal conceito é fundamental para evitar o desperdício de um bem que, além de fundamental à vida, torna-se cada vez mais insuficiente.

Nesse âmbito de conscientização do uso da água, é notório o contínuo desenvolvimento de pesquisas quanto à aplicação dos sistemas de irrigação, com o surgimento de novos modelos que majorem a eficiência e diminuam o investimento, como é o caso do sistema de irrigação por microaspersão (MAZZER et al., 2008).

Martins et al. (2013) definem que a avaliação dos sistemas de irrigação tem ampla importância na redução das perdas do uso da água.

Para que o sistema de irrigação apresente um bom desempenho, os valores de uniformidade de distribuição devem ser elevados, sendo a uniformidade associada à variabilidade da lâmina de irrigação ao longo da área molhada, bem como expressa por índices ou coeficientes, visto que os mais utilizados são o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (BERNARDO, SOARES e MANTOVANI, 2005).

2.5.3. Fatores que influenciam na uniformidade de aplicação do sistema de irrigação

Segundo Conceição (2002), existe uma série de fatores que influenciam na uniformidade da irrigação, tais como: pressão de serviço, diâmetro dos bocais, geometria e rugosidade dos orifícios, inclinação e velocidade de lançamento do jato, altura do emissor em relação ao solo, estabilidade da haste de sustentação do emissor, que deve ser mantida sempre na vertical, distância dos microaspersores ao caule das plantas e, principalmente, fatores climáticos, como a velocidade e direção do vento.

Em estudo sobre a uniformidade de distribuição em irrigação por microaspersão na cultura do coco, Bezerra et al. (2015) encontrou valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) iguais a 96,7% e coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) igual a 97,7% considerados, segundo a classificação, como excelentes.

Conceição (2002) realizou a simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento e obteve, em uma de suas conclusões, que as perdas de água por deriva e evaporação na presença de vento representam entre 17,1% e 30,2% do volume total aplicado sem vento.

Sendo assim, destacam-se os benefícios da modernização dos sistemas de irrigação, que ressaltam o aumento da uniformidade de distribuição e uso consciente da água, melhorias nas operações dos sistemas de irrigação, assim como as condições de trabalho (TARJUELO et al., 2015).

Salienta-se que o uso de controle e automação têm ganho a atenção dos irrigantes por automatizar os horários e funcionamentos do sistema de irrigação (ZAPATA et al., 2013).

Entretanto, mesmo os sistemas de irrigação localizados podendo aplicar água com altos índices de uniformidade, o manejo correto é primordial para uma irrigação de qualidade (OLIVEIRA et al., 2016).

2.6. Gráfico de controle de Shewart

Desenvolvidos originalmente por Walter Shewart, em 1924, os gráficos de controle têm por objetivo eliminar variações anormais a partir da diferença entre alterações devidas às causas assinaláveis e aquelas devidas às causas aleatórias. Assim, monitorando o processo e sinalizando se é cabível a necessidade de investigá-lo e ajustá-lo, conforme o tamanho dos desvios encontrados.

Os gráficos de Shewart conseguiram êxito em razão da sua simplicidade, pois apresentam facilidade da regra de decisão baseando-se apenas no exame do último ponto observado. Sendo assim, eles investigam a presença de causas especiais no processo (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Ribeiro e Caten (2012), o controle estatístico do processo é uma técnica estatística que permite a redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade estudada, contribuindo com a melhoria da produtividade, da confiabilidade e custo do que está sendo avaliado. Definido como um sistema de inspeção por amostragem que, ao longo do processo, busca verificar a ocorrência de causas especiais, ou seja, causas que não são naturais e podem prejudicar a qualidade final do produto avaliado.

Ainda segundo os autores, processos definidos como estáveis apresentam apenas causas comuns, evidenciando sempre a mesma variabilidade ao longo do tempo. No entanto, causas especiais são consideradas falhas, fazendo o processo sair do seu padrão natural de operação e diminuindo drasticamente o seu desempenho.

Segundo Montgomery (2009), a identificação da variabilidade dos dados pode ser realizada com a construção do gráfico de controle, sendo este constituído de uma linha média (LM), representando o valor médio das características da qualidade em função do número de amostras ou do tempo, a linha do limite superior de controle (LSC) e a linha do limite inferior de controle (LIC).

O autor ainda afirma que, quando os valores estão plotados dentro dos limites, tanto inferior quanto superior, o processo é considerado sob controle e nenhuma ação é necessária. Em contrapartida, se o ponto se apresentar fora dos limites é interpretado como evidência de que o processo está fora de controle, necessitando, então, investigação e ação corretiva.

2.7. Índice de capacidade do processo

O índice de capacidade de processo é um parâmetro adimensional que, indiretamente, mede o quanto o procedimento é capaz de atender às especificações. Sabendo que, em sistemas de irrigação, quanto maior o coeficiente de uniformidade, melhor é o atendimento quanto às especificações, utilizamos o limite inferior de especificação com o intuito de estabelecer o valor mínimo a partir do qual a irrigação é considerada aceitável (COSTA, EPPRECHT e CARPINETTI, 2005).

Com o intuito de verificar se o processo é capaz de se manter sob controle em relação ao limite inferior de especificação, faz-se a interpretação dos índices de capacidade do processo (C_{pi}) que, segundo Montgomery (2009), devem ser acima de 1,25 para processos existentes e 1,45 para processos novos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do experimento

O experimento foi implantado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Cascavel, com Latitude 24°98' Sul (S), Longitude 53°44' Oeste (W) e altitude de 753 metros. O experimento foi realizado nas dependências anexas ao Laboratório CASA (Figura 10), que possui topografia plana e constituída por grama *Sto. Agostinho* (*Stenotaphrum secundatum*). O entorno do sistema de irrigação possui árvores e construções que limitam a passagem do vento.

O município de Cascavel está localizado na Região Oeste do Estado do Paraná apresentando, de acordo com o Programa SUNDATA (CRESESB, 2017), radiação média de 4,95 KWh m⁻² dia⁻¹.



Figura 10. Local da montagem do experimento.

3.2. Especificações técnicas dos materiais utilizados no experimento

3.2.1. Painel fotovoltaico amorfo

Foram utilizados dois módulos fotovoltaicos de silício amorfo com potência máxima de 40 Wp cada, da marca SOLARTERRA. Corrente de potência máxima de 0,87 A e tensão de potência máxima de 46 V, devidamente direcionado para o norte verdadeiro, ligados em paralelo com objetivo de elevar a corrente e manter a tensão em 46 V em corrente contínua na bomba d'água. As especificações técnicas dos módulos estão apresentadas na Tabela 1 e o painel fotovoltaico pode ser observado na Figura 11.

Tabela 1. Especificações Técnicas do Módulo Fotovoltaico.

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})	1,0 A
Tensão de circuito aberto (U_{oc})	61,0 V
Dimensões (CxLxE)	1253 X 643 X 37 mm
Peso	15 Kg



Figura 11. Módulo fotovoltaico da marca Solarterra, modelo JN40F

3.2.2. Sistema de bombeamento

O bombeamento de água para o ensaio do microaspersor foi realizado com o uso de uma bomba de diafragma submersa da marca Solarjack, modelo SDS-D-228 (Figura 12), e especificações técnicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características técnicas da bomba de diafragma hidráulica.

Modelo	SDS-D-228
Tensão nominal	30 V
Corrente nominal	2,6 A
Potência nominal	79 W
Altura manométrica máxima	70 m
Vazão nominal	234 L h ⁻¹
Dimensões	Ø 9,7 cm x 27,4 cm
Peso	6,3 Kg

Fonte: SOLARJACK (2018).



Figura 12. Bomba hidráulica – Marca Solarjack, modelo SDS-D-228.

3.2.3. Microaspersor

O microaspersor utilizado nos ensaios foi o microaspersor rotativo bocal violeta (Figura 13) com as características técnicas demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3. Características técnicas do microaspersor.

Diâmetro do Bocal	0,9 mm
Vazão	36 L h ⁻¹ a 62 L h ⁻¹
Pressão	10 mca a 30 mca
Diâmetro molhado	6,0 m

Fonte: BIOSEMENTES (2018).



Figura 13. Microaspersor rotativo bocal violeta.

3.2.4. Piranômetro

Para mensurar a irradiação solar global incidente no plano horizontal dos painéis, utilizou-se um piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP3, com $1,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ de sensibilidade. A Figura 14 apresenta o piranômetro instalado e a Tabela 4 as especificações técnicas.



Figura 14. Piranômetro Kipp & Zonen, modelo CMP3.

Tabela 4. Características técnicas do piranômetro.

Modelo	CMP3
Sensibilidade	5 a $16,3 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$
Faixa espectral	300 a 2800 nm
Máxima Irradiação	2000 W m^{-2}
Precisão	$\pm 5\%$
Tempo de resposta 95%	18 s
Temperatura de operação	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+80 \text{ }^\circ\text{C}$
Dimensões	$\varnothing 7,5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$
Peso	543 g

3.2.5. Fluxômetro

A medição da vazão se deu por um sensor de fluxo de água da marca Yifa, modelo YF-S201, com rosca de $\frac{1}{2}$ " que tem como princípio o funcionamento de Hall. O sensor instalado pode ser visualizado na Figura 15 e suas especificações na Tabela 5.



Figura 15. Sensor de fluxo de água.

Tabela 5. Características técnicas do fluxômetro.

Modelo	YF-S201
Intervalo de trabalho	1 a 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 (2018).

3.2.6. Manômetro

A aferição da pressão se deu por 3 manômetros com glicerina, Reto Novotest TECN-750.100R10. O primeiro foi instalado logo após a bomba submersível, o segundo manômetro no início do sistema de irrigação e o terceiro no final da linha do sistema. O manômetro utilizado pode ser visualizado na Figura 16 e suas especificações na Tabela 6



Figura 16. Manômetro com glicerina analógico.

Tabela 6. Características técnicas do manômetro.

Líquido interno	Glicerina
Faixa de pressão 1	0 a 85 psi
Faixa de pressão 2	0 a 6 bar
Fixação para rosca	1/4"
Precisão	±1% do fim de escala

Fonte: BIOSEMENTES (2018).

3.2.7. Estação meteorológica

Os dados climáticos referentes à temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade média do vento (m s^{-1}), rajada e direção do vento foram coletados com uma miniestação meteorológica sem fio, da marca Instrutemp-ITWH 1080, apresentada na Figura 17 e suas especificações na Tabela 7.



Figura 17. Miniestação meteorológica.

Tabela 7. Especificações técnicas da miniestação meteorológica ITWH 1080.

Distância do campo de transmissão	100 m
Frequência	868 MHz
Faixa de temperatura	-40 $^{\circ}\text{C}$ a 65 $^{\circ}\text{C}$
Precisão	-1 $^{\circ}\text{C}$
Resolução	0,1 $^{\circ}\text{C}$
Velocidade do vento	0 a 44,45 m s^{-1}
Precisão	± 1 m s^{-1}
Faixa de medição da umidade relativa	10% a 99%
Precisão	±5%

Fonte: INSTRUTEMP (2019)

3.2.8. Aquisição de dados

Para coletar e armazenar os dados relacionados à irradiação, vazão, tensão e corrente foi utilizado um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo CR 1000, como mostra a Figura 18, tendo suas especificações na Tabela 8.



Figura 18. Datalogger Campbell Scientific, modelo CR 1000.

Tabela 8. Especificações técnicas do datalogger Campbell Scientific.

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 e entrada analógica	± 5 V _{CC}
Precisão	± 0,06% (0 ~40 °C)
Dimensões	239 x 102 x 8,5 mm
Peso	1000g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000 (2019).

3.3. Caracterização dos métodos

3.3.1. Instalação e funcionamento do experimento

Foram usados dois painéis de silício amorfo (a-Si) para fornecimento de energia para a bomba d'água, os quais foram direcionados para o norte com inclinação de 10° mais a latitude do local do experimento, com aproximadamente 25° (Figura 19 a), somando, portanto, 35° de inclinação. Esses painéis foram ligados em paralelo por

um conector MC4 tipo Y, a fim de elevar a corrente do sistema (Figura 19 b). O funcionamento se deu apenas em horários de incidência de irradiação solar sobre os painéis, ou seja, nenhum sistema de armazenamento de energia foi utilizado.



Figura 19. Painel Fotovoltaico amorfo instalado (a); conector tipo Y, ligado em paralelo (b).

A motobomba submersível foi instalada dentro da caixa d'água realizando o recalque para o sistema de irrigação, formado por quatro microaspersores. Estes foram espaçados de 2 x 2 metros e, posteriormente, 2 x 1,6 metros, contendo os coletores dentro do perímetro molhado para coleta da água proveniente do sistema de irrigação, conforme ilustra a Figura 20.

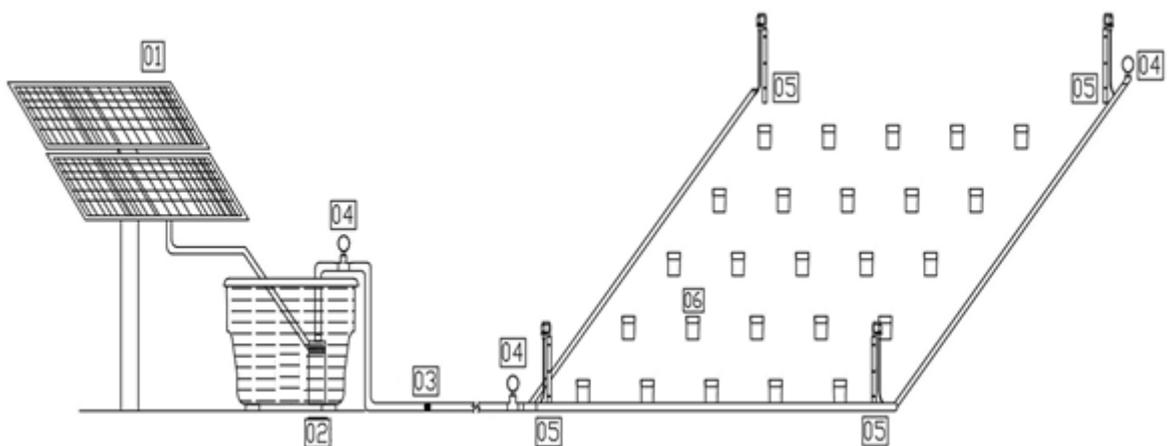


Figura 20. Esquema do sistema de irrigação com bombeamento fotovoltaico. 01 - Painel fotovoltaico, 02 - bomba submersível, 03 - sensor de fluxo, 04 - manômetro, 05 - microaspersor, 06 - coletor.

Na saída da bomba foi instalado um sensor de fluxo de água para medição da vazão nos períodos de ensaio. Três manômetros foram instalados para aferir a pressão do sistema hidráulico: o primeiro logo após a saída da bomba submersível, o segundo na chegada do duto de recalque ao sistema de irrigação e o terceiro no final da última linha.

3.3.2. Arranjo dos painéis fotovoltaicos

Para atender a potência máxima de 80 W da bomba submersa, foi utilizado, no painel amorfo, um sistema de ligação em paralelo, satisfazendo, assim, a demanda energética da carga nos horários de máxima irradiação solar.

A ligação em paralelo dos módulos em silício amorfo fornece 80 W_p, sendo, portanto, a tensão máxima de 46 V e a corrente máxima de 1,74 A. O arranjo do sistema fotovoltaico é apresentado na Figura 21.

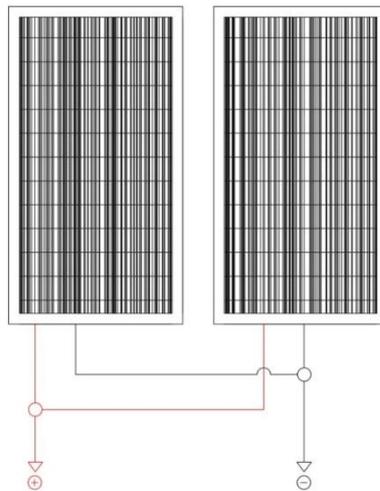


Figura 21. Arranjo do sistema fotovoltaico amorfo, ligado em paralelo, utilizado no experimento.

3.3.3. Delineamento experimental

Os ensaios para coleta tiveram início em abril com dois espaçamentos em relação aos microaspersores, sendo primeiro de 2,0 m x 2,0 m e, posteriormente, de 2,0 m x 1,6 m. Para cada espaçamento foram realizados 56 ensaios com 1 hora de duração, em quatro diferentes horários do dia, sendo o primeiro com início às 10h, o segundo horário iniciou às 11h05min, o terceiro às 14h e o último horário teve início às 15h05min.

O intervalo curto entre um horário e outro da coleta das lâminas foi possível em razão de terem sido feitas por 3 pessoas.

3.3.4. Coleta dos dados

Para coleta da irradiação, utilizou-se um pirômetro instalado próximo aos painéis e mesma inclinação, ligado a um datalogger que coletou os dados a cada 5 segundos fazendo a média para um minuto e o armazenando. A corrente e a tensão também foram medidas e armazenadas por um datalogger, o qual registrou os dados a cada 5 segundos fazendo a média para um minuto e armazenando-os na memória.

Como o intervalo de leitura do datalogger CR1000 é de aproximadamente 5 VCC, foi necessário montar um divisor resistivo entre os terminais de alimentação da bomba d'água, para fazer a leitura da tensão. Sendo um resistor de $20\text{ k}\Omega$ e outro de 470Ω , com precisão de 5 % em ambos resistores.

Já para a leitura dos valores de corrente, foram utilizados dois resistores em paralelo, sendo ambos de 1Ω e 25 W de dissipação, instalados no terminal positivo do painel. A tensão foi lida a partir dos resistores e armazenada no datalogger.

A ligação do sistema fotovoltaico diretamente na bomba submersa e a ligação dos sensores no datalogger são demonstradas na Figura 22.

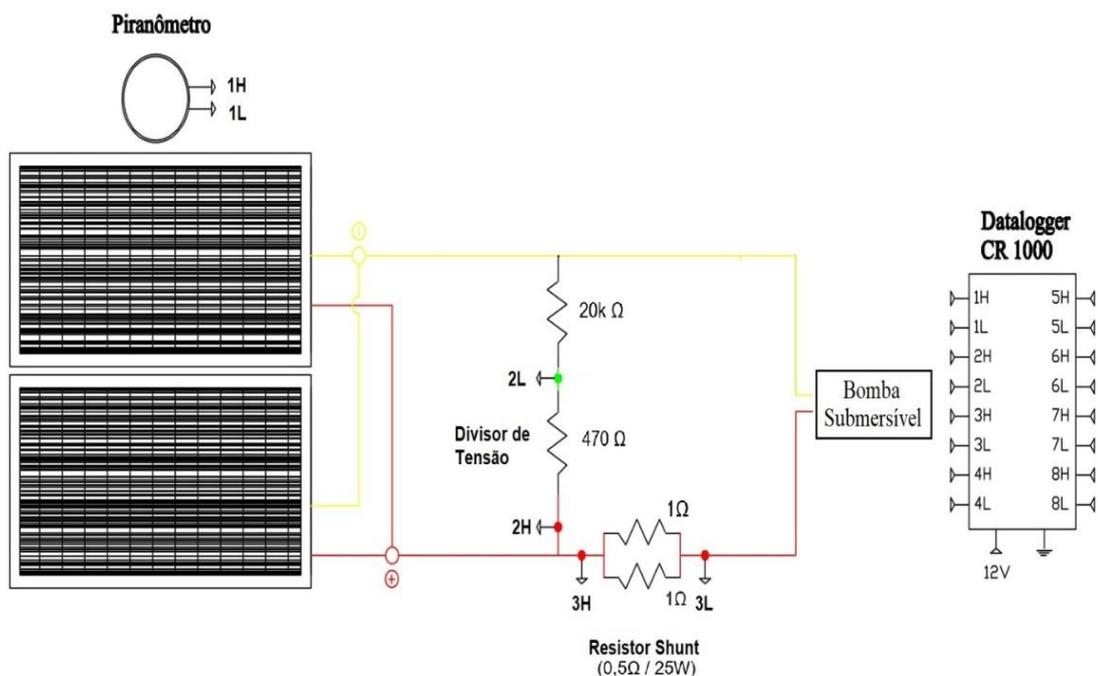


Figura 22. Diagrama elétrico, posicionamento e ligação dos sensores do experimento.

A frequência de coleta foi configurada para 10 segundos e realizada a média a cada minuto para os dados de corrente, tensão, vazão e irradiação sendo armazenados para posteriores análises.

No sistema hidráulico, a coleta da vazão se deu a partir de um fluxômetro, que fornece uma saída de tensão analógica, pulsada, proporcional ao volume de água. Para este sensor especificamente, a razão é de 2,14 mL pulso⁻¹. Sendo assim, ao levar em conta que este sinal não é compatível com o datalogger CR1000, já utilizado para a leitura e armazenamento das outras grandezas como a irradiância solar, tensão e corrente elétricas, foi necessária a conversão desse pulso analógico em um pulso digital ou também chamado de sinal chaveado (switch).

Portanto, foi utilizado o circuito integrado 4066, que converte o sinal analógico fornecido pelo sensor de fluxo em pulsos digitais. Com a conversão ou, então, a adequação do sinal analógico pulsado emitido pelo sensor de fluxo da água, permite-se o uso de uma função chamada PulseCount no Datalogger CR1000. Tal função permite a contagem do número de vezes em que a “chave” é aberta e fechada em um dado intervalo de tempo, também programável, fornecendo a frequência com que ocorreu este chaveamento, ou seja, o número de pulsos por segundo instantâneo e/ou médio em um dado intervalo de tempo.

A partir do número de pulsos em um determinado intervalo de tempo, foi realizada a conversão, posteriormente, de pulsos / minuto para litros / minuto. Destaca-se que, para o fluxo de água, não há média por minuto, apenas o registro e armazenamento do número de pulsos gerados.

Os valores de pressão foram lidos cinco vezes durante o ensaio, ou seja, no início, após 15min, 30min, 45min, e próximo do final da uma hora de funcionamento do sistema, obtendo-se a média horária da pressão.

Com o objetivo de coletar a água mais próxima ao solo, foram utilizados coletores plásticos com diâmetro de face superior de 7,97 cm, e 10 cm de altura, dispostos com sua base no nível do gramado e inseridos em suportes metálicos para evitar o tombamento. A Figura 23 demonstra o sistema de irrigação em funcionamento.



Figura 23. Sistema de irrigação por microaspersão do experimento em funcionamento no ultimo horário de coleta.

Os coletores foram posicionados entre os quatro microaspersores com distância de 40 cm entre si, somando-se 25 coletores para o espaçamento 1 (Figura 24) e 20 coletores para o espaçamento 2 (Figura 25).

Os microaspersores foram numerados de acordo com sua posição, sendo o primeiro no início da tubulação e o último na extremidade final da linha. Estabeleceu-se a coordenada (0,0) no microaspersor 2, a partir da qual se estabeleceu a numeração dos coletores.

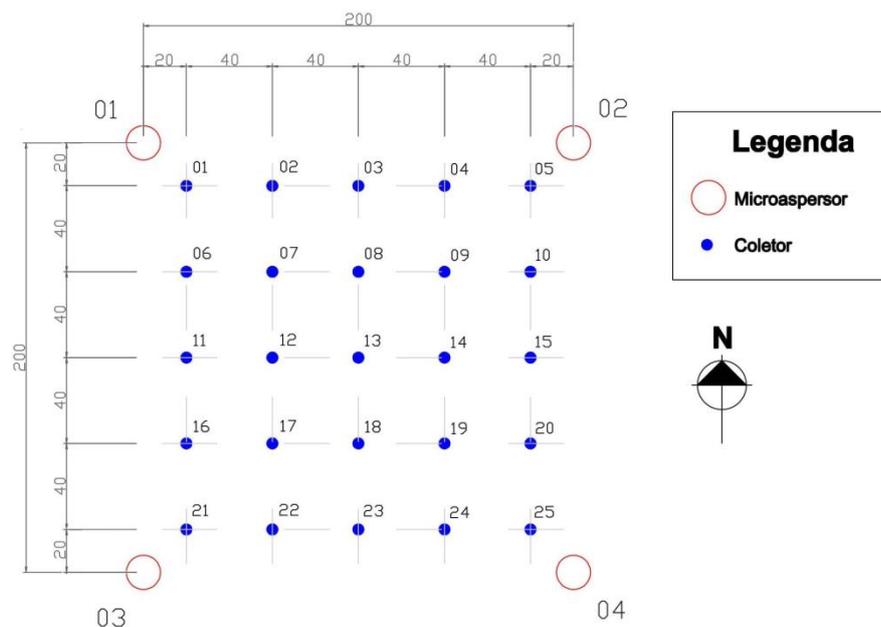


Figura 24. Disposição dos microaspersores e coletores do experimento (Espaçamento 1).

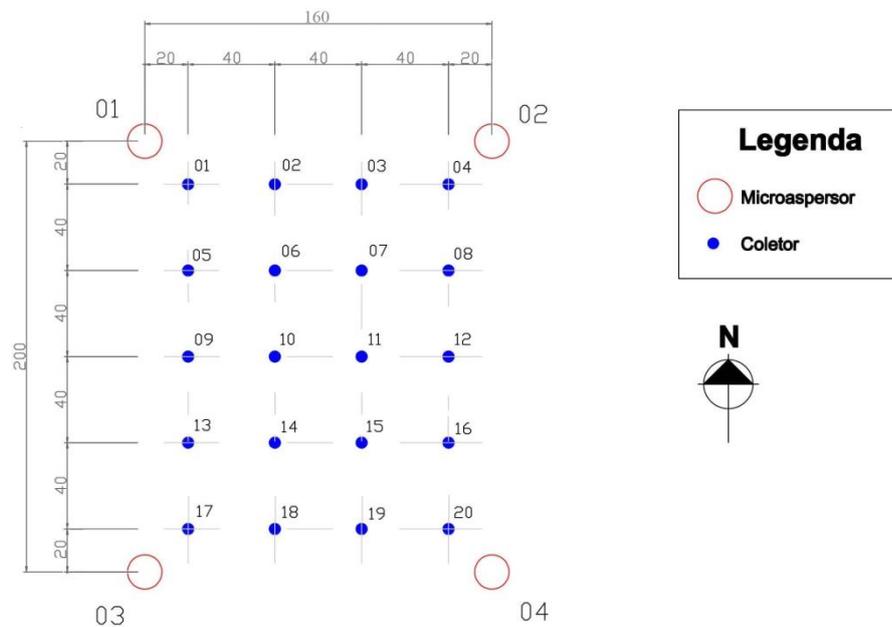


Figura 25. Disposição dos microaspersores e coletores do experimento (Espaçamento 2).

Para cada ensaio, o volume de água contida em cada coletor foi medido com auxílio de uma proveta graduada. Dividiu-se o volume de água de cada coletor (cm^3) pela área da face superior do coletor com diâmetro de 7,97 cm, obtendo-se, assim, a lâmina em cm. Multiplicando-se o resultado por 10, obteve-se a lâmina em mm.

Os dados de temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, foram coletados pela estação meteorológica Instrutemp-ITWH 1080, bem como armazenados a cada 5 minutos no receptor de dados via wireless. A estação foi instalada nas proximidades do sistema de irrigação a 1 metro de altura, uma vez que essa foi a altura com que a água foi lançada pelo sistema de irrigação por microaspersão.

3.3.5. Determinação da tensão e corrente do sistema fotovoltaico

Para tornar a leitura compatível com o datalogger CR 1000, adaptou-se a tensão para aproximadamente 5 V, utilizando um divisor resistivo, coletando uma parcela da tensão gerada. Da mesma maneira, foi dimensionado um resistor a fim de encontrar a corrente que alimenta a carga.

Conforme a Lei de Ohm, a tensão lida do resistor shunt pelo datalogger em mV pode ser convertida para a correspondente corrente elétrica pela Equação 01.

$$U = R * I \therefore \text{Corrente}(A) = \frac{\text{Tensão}_{\text{Amostra}}}{\text{Resistência}_{\text{Shunt}}} \cdot (1 * 10^{-3}) \quad (01)$$

Relação de tensão do divisor resistivo dada pela Equação 02.

$$\text{Tensão}_{\text{Amostra}} = \frac{470\Omega}{(20000 + 470)\Omega} \cdot \text{Tensão}_{\text{painel}} \quad (02)$$

Como a leitura do datalogger é dada em mV (10^{-3} V), a Equação 02 pode ser analogamente descrita pela Equação 03.

$$\text{Tensão}_{\text{painel}} = \frac{(20000 + 470)\Omega}{470\Omega} \cdot 1.10^{-3} \cdot \text{Tensão}_{\text{amostra}} \quad (03)$$

Para calcular o valor de corrente, utilizou-se a Equação 04 com uma resistência de 0,5 Ω .

$$I = \frac{U_{DL-2}}{0,5} \quad (04)$$

Onde:

I – Corrente gerada pelo painel fotovoltaico;

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

3.3.6. Determinação da potência do sistema fotovoltaico

Com os dados de corrente e tensão elétrica, foi calculada a potência elétrica do sistema, conforme a Equação 05.

$$P = U.I \quad (05)$$

Onde:

P – Potência gerada pelo painel fotovoltaico.

U – Tensão gerada pelo painel fotovoltaico.

I – Corrente gerada pelo painel fotovoltaico.

3.3.7. Cálculo da perda de carga distribuída do sistema de bombeamento

Para cálculo da perda de carga distribuída, empregou-se a equação de Flamant, divulgada por Alfred-Aimé Flamant, em 1883, sendo indicada para cálculos nos quais o sistema tenha diâmetros inferiores a 2" (50 mm), apresentada na Equação 06.

$$H_f = \frac{6,107 \cdot b \cdot L \cdot Q^{1,75}}{D^{4,76}} \quad (06)$$

Onde:

H_f – Perda de carga distribuída

b – Coeficiente dependente do material, utilizado 0,00135 para PVC;

L – Comprimento da tubulação (m);

Q – Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

D – Diâmetro interno da tubulação (m).

3.3.8. Determinação da energia solar disponível e da energia consumida pelo sistema de bombeamento

A incidência da radiação solar sobre uma área útil do painel fotovoltaico em um determinado tempo é definida como energia solar disponível. Já a potência requerida pela carga em um período delimitado é designada como energia consumida. Portanto, como a coleta de dados se deu a cada 1 minuto, calculou-se a energia média horária, disponível e consumida, conforme as Equações 09 e 10 (SIQUEIRA, 2005).

$$PD = R_s \cdot A \quad (07)$$

$$PC = U \cdot I \quad (08)$$

$$ED = \sum_{i=1}^n PD_i \cdot t \quad (09)$$

$$EC = \sum_{i=1}^n PC_i \cdot t \quad (10)$$

Onde:

PD – Potência solar disponível (W);

PC – Potência requerida pela carga (W);

ED – Energia solar disponível (W h);

EC – Energia consumida pela carga (W h);

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

A – Área útil do painel fotovoltaico (m^2);

n – Enésimo valor do conjunto de dados;

t – Tempo $\frac{1}{60} h$.

3.3.9. Determinação da eficiência do painel, do sistema de bombeamento, da aplicação de água e da eficiência global do sistema fotovoltaico de bombeamento de água

Para determinação da eficiência do painel fotovoltaico, utilizou-se a Equação 11, conforme Ceylan et al. (2014).

$$\eta_{PV} = \frac{PC}{PD} \cdot 100\% \quad (11)$$

Onde:

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

PC – Potência requerida pela carga (W);

PD – Potência solar disponível (W);

Para o cálculo da eficiência da bomba d'água, utilizou-se a Equação 13.

$$PH = Q \cdot H_M \cdot 9806 \quad (12)$$

$$\eta_{Bomba} = \frac{PH}{PC} \cdot 100\% \quad (13)$$

Onde:

PH – Potência hidráulica (W);

PC – Potência requerida pela carga (W);

Q – Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

H_M – Altura manométrica (m);

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

Para cálculo da eficiência da aplicação de água, utilizou-se a Equação 17.

$$IA_{col} = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i|}{n} \quad (14)$$

$$IA_{med} = t \cdot \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (15)$$

$$P_{ev} = 100 \left(\frac{IA_{med} - IA_{col}}{IA_{med}} \right) \quad (16)$$

$$\eta_{aplicação} = EF1 \cdot EF2 \quad (17)$$

Onde:

IA_{col} – Intensidade média recebida pelos coletores (mm h^{-1});

X_i – Valor medido em cada coletor (mm);

n – Número de coletores na área de ensaio;

IA_{med} – Intensidade de aplicação dos microaspersores (mm h^{-1});

t – Tempo de duração do ensaio (s);

Q – Vazão do aspersor (L s^{-1});

A – Área delimitada do ensaio (m^2);

P_{ev} – Perdas por evapotranspiração e vento (%);

EF1 – Eficiência de aplicação CUC (%);

EF2 – Eficiência durante a aplicação, $1 - P_{ev}$ (%);

$\eta_{aplicação}$ – Eficiência de aplicação (%).

Após os cálculos de eficiência dos painéis fotovoltaicos do sistema de bombeamento e de aplicação de água, foi possível determinar a eficiência global do sistema a partir da Equação 18, segundo Niedzialkoski (2013).

$$\eta_g = \frac{\eta_{PV} \cdot \eta_{Bomba} \cdot \eta_{aplicação}}{100} \quad (18)$$

Onde:

η_g – Eficiência global do sistema de bombeamento de água e de irrigação por microaspersão (%).

3.3.10. Determinação dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD)

Com os dados das lâminas de água do sistema de irrigação, foram calculados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), a partir das equações 15 e 16.

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), é um dos mais utilizados, pois adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão, como se pode observar na Equação 19.

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n - x_{med}} \right\} \quad (19)$$

Onde:

CUC: Coeficiente de Uniformidade de Chistiansen (%);

x_i : Valores individuais do volume de água contido nos coletores (mm);

x_{med} : média geral do volume de água coletado (mm);
 n: Número de coletores na área de ensaio.

Lopez et al. (1992) defendem que é mais coerente avaliar a uniformidade em função das áreas que recebem menos água, portanto, faz-se necessário utilizar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) determinado a partir da Equação 20.

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{med}} \right) \quad (20)$$

Onde:

CUD: Coeficiente de Uniformidade de distribuição (%);

x_{25} : Média do menor quartil dos volumes de água nos coletores (mm);

x_{med} : média geral do volume de água coletado (mm);

Classificação do CUC e CUD, de acordo com Keller e Bliesner (2009), a fim de identificar a classificação do sistema de irrigação, mostrada na Tabela 9.

Tabela 9. Classificação dos coeficientes de uniformidade (CUC e CUD).

Classificação	CUC (%)	CUD (%)
Excelente	> 90	> 90
Bom	90 – 85	90 – 85
Aceitável	85 – 78	85 – 65
Inaceitável	< 78	< 65

3.3.11. Elaboração dos Gráficos de controle de Shewhart e determinação do índice de capacidade do processo

A fim de verificar se os resultados estavam ou não sob controle estatístico, foram gerados os gráficos de controle para as médias individuais. Calculou-se os valores de limite superior de controle (LSC), linha média (LM) e a linha inferior de controle (LIC), a partir das Equações 21, 22 e 23.

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (21)$$

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad (22)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (23)$$

Onde:

$\bar{\bar{X}}$: Média das médias;

\bar{R} : Média das amplitudes dos dados;

d_2 : 1,128 para $n=2$, considerando-se médias individuais, de acordo com a tabela descrita por Motgomery (2009).

Foi calculado o índice de capacidade do processo (C_p) a partir do limite inferior de especificação (LIE) a fim de verificar se a irrigação foi capaz de se manter sob controle. Sendo que o índice deve ser acima de 1,25 e é calculado pela Equação 24.

$$C_p = \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\sigma} \quad (24)$$

Onde:

$\bar{\bar{X}}$: Média das médias;

LIE: Limite inferior de especificação;

σ : Desvio padrão.

Utilizou-se o software Minitab 16, com limite inferior de especificação (LIE) o valor de 78% para CUC e 65% para CUD, proposto por Keller e Bliesner (2009), apontado como mínimo aceitável para a irrigação por microaspersão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação do sistema fotovoltaico

4.1.1. Estatística descritiva dos dados do sistema de fornecimento de energia

A Tabela 10 apresenta a estatística descritiva da parte elétrica do bombeamento de água e o fornecimento de energia do sistema fotovoltaico, para cada horário. Constam os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo e máximo correspondentes às irradiações ($W m^{-2}$), energia solar disponível ($W h$), energia produzida ($W h$), tensão (V) e corrente (A).

Tabela 10. Estatística descritiva dos dados para os quatro diferentes horários.

Horários	Parâmetros	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
10:00 - 11:00	Irradiação ($W m^{-2}$)	797,96	32,16	4,03	688,16	842,43
	Energia disponível ($W h$)	1289,38	47,31	3,67	1108,63	1342,67
	Energia consumida ($W h$)	58,88	4,89	8,31	43,52	64,39
	Tensão (V)	34,67	1,74	5,01	29,19	37,33
	Corrente (A)	1,49	0,09	5,85	1,37	1,66
11:05 - 12:05	Irradiação ($W m^{-2}$)	992,76	22,52	2,27	941,25	1054,00
	Energia disponível ($W h$)	1584,56	38,91	2,46	1516,36	1697,99
	Energia consumida ($W h$)	68,97	4,99	7,23	59,47	78,28
	Tensão (V)	42,62	1,13	2,65	40,28	43,97
	Corrente (A)	1,61	0,11	6,67	1,40	1,83
14:00 - 15:00	Irradiação ($W m^{-2}$)	943,45	95,82	10,16	638,30	1123,40
	Energia disponível ($W h$)	1569,28	162,97	10,38	1028,31	1809,79
	Energia consumida ($W h$)	65,89	9,48	14,39	33,94	78,88
	Tensão (V)	39,16	4,77	12,17	21,12	44,17
	Corrente (A)	1,56	0,16	10,51	1,06	1,82
15:05 - 16:05	Irradiação ($W m^{-2}$)	588,37	199,43	33,90	201,64	873,49
	Energia disponível ($W h$)	815,69	390,16	47,83	324,84	1407,19
	Energia consumida ($W h$)	35,43	14,59	34,49	2,30	60,22
	Tensão (V)	21,01	10,35	49,26	2,58	37,78
	Corrente (A)	0,99	0,36	36,42	0,32	1,59

Onde: DP: Desvio padrão. CV: Coeficiente de variação (%).

Os baixos valores de coeficiente de variação (CV) para o horário 1 (10:00-11:00) e horário 2 (11:05-12:05) em relação a irradiação e energia disponível (3,67% e 2,46%), conferem que houve pouca variabilidade dos dados, sendo justificada pelo período da manhã dos dias de coleta terem sido de céu aberto e baixa formação de nuvens. Valores distintos para o período da tarde com o horário 3 (14:00-15:00) e 4 (15:05-16:05), com coeficiente de variação (CV) para irradiação e energia disponível (33,9% e 47,83%), indicam alta variabilidade dos dados.

A irradiação, que teve seu maior valor no período da tarde, das 14h às 15h, apresentou máximo de $1123,40 \text{ W m}^{-2}$, valores semelhantes aos encontrados por Zilli (2018), com valores superiores a 1000 W m^{-2} para o mesmo horário de coleta dos dados.

Entre os dados da energia disponível pelo painel fotovoltaico, observou-se o maior valor no horário 3, com $1809,79 \text{ W h}$, e o menor com $324,84 \text{ W h}$, no horário 4, lembrando que a energia disponível é o valor da irradiação pela área útil do módulo fotovoltaico.

O valor de energia consumida (W h) segue o mesmo aspecto da irradiação, os quais no período da manhã apresentam baixos valores de coeficiente de variação (8,31% e 7,23%), com aumento no período da tarde (14,39% e 34,49%), demonstrando alta variabilidade.

Os elevados valores de coeficiente de variação em relação à irradiação e energia disponível dos horários 3 e 4, podem ser justificados pelo fato de que, no período desses ensaios, ocorreu maior presença de nuvens encobrendo o painel solar diminuindo drasticamente os valores de irradiação que, por consequência, afetaram os demais parâmetros.

Quanto à tensão e corrente, as maiores médias foram registradas no horário 2, com $42,62 \text{ V}$ e $1,61 \text{ A}$. Esses valores são próximos das especificações do fabricante que são de 46 V e $1,74 \text{ A}$ (duas placas conectadas em paralelo), resultando em um fornecimento de energia pleno por parte do sistema fotovoltaico.

4.1.2. Comparação de médias dos parâmetros de geração do sistema fotovoltaico

A Tabela 11 apresenta a comparação de médias entre a irradiação, a energia disponível e consumida, bem como a tensão e corrente para os diferentes horários de coleta, aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 11. Comparação entre as médias de irradiação, energia disponível e consumida, tensão e corrente.

Parâmetros	10:00 - 11:00	11:05 - 12:05	14:00 - 15:00	15:05 - 16:05
Irradiação ($W m^{-2}$)	797,96 B	992,76 A	943,45 A	588,37 C
Energia disponível (W h)	1289,38 B	1584,56 A	1569,28 A	815,69 C
Energia consumida (W h)	58,88 B	68,97 A	65,89 A	42,29 C
Tensão (V)	34,67 B	42,62 A	39,16 A	21,01 C
Corrente (A)	1,49 A	1,61 A	1,56 A	0,99 B

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Pode-se observar que no horário 2 (11:05-12:05) obteve-se maior média em relação a irradiação ($992,76 W m^{-2}$), seguidos pelo horário 3, 1 e 4, sendo que das 15:05 às 16:05 obteve-se a menor média ($588,37 W m^{-2}$).

As maiores médias para energia consumida foram do horário 2 e 3 com 68,97 W h e 65,89 W h respectivamente, seguidas pela média do primeiro horário com 58,88 W h e, por último, o quarto horário com 42,29 W h.

Em pesquisa realizada com painel fotovoltaico amorfo, Zili (2018) encontrou valores comparáveis para energia consumida, de aproximadamente 55 Wh, 65 Wh, 65 Wh e 62 Wh, para os mesmos horários de 1 a 4, respectivamente.

Já para os dados de tensão e corrente, observou-se que o maior valor se manteve no segundo horário (11:05-12:05) com 42,62 V e 1,61 A, seguidos pelos horários 3 e 2, com 39,16 V e 1,56 A e 34,67 V e 1,49 A, respectivamente, e o último horário com as menores médias, correspondendo a 21,01 V e 0,99 A.

Percebe-se que dois horários se mantiveram com valores estatisticamente iguais, sendo o segundo (11:05-12:05) e o terceiro horário (14:00-15:00), os quais registraram as maiores médias ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, em relação aos parâmetros analisados.

Esse resultado pode ser justificado por apresentar horários próximos a de produção de pico de energia por parte do painel fotovoltaico e a ínfima presença de nuvens durante o período de coleta dos dados.

Sendo que o horário 1 apresentou valores inferiores por ter seus dados de irradiação iniciais baixos, com alta variabilidade entre 688,16 a 842,43 W m⁻², decorrentes do tempo de ensaio se aproximar do horário de pico de irradiação solar. A interferência por nuvens somada à diminuição acentuada dos valores de irradiação decorrentes do horário tendo um máximo de 873,49 W m⁻² com mínimo de 201,64 W m⁻², definiram o horário 4, como pior desempenho em relação aos parâmetros analisados.

4.1.3. Avaliação da energia solar disponível e da energia consumida pelo sistema de bombeamento de água fotovoltaico

A Figura 26 apresenta a média horária do comportamento da energia consumida (W h) em comparação com a energia solar média disponível (W h).

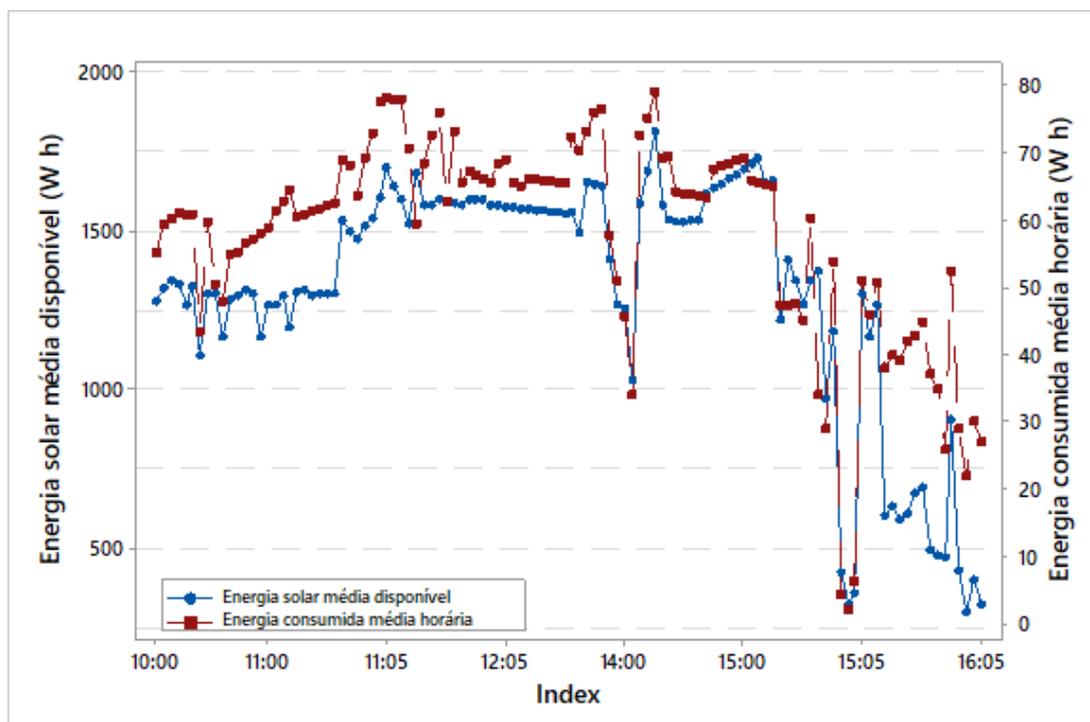


Figura 26. Média horária da energia disponível por parte do painel fotovoltaico e da energia consumida do sistema de bombeamento do experimento.

A energia solar disponível teve seus valores aumentados no decorrer do dia chegando ao pico de fornecimento médio no intervalo das 14:00 às 15:00 horas, com valor de 1809,79 W h, e menor valor no intervalo das 15:00 às 16:00 horas com 324,84 W h.

Pode-se observar um comportamento similar entre a energia consumida pela bomba d'água e do fornecimento de energia do painel fotovoltaico, porém o consumo é limitado à energia solar disponível.

Com a intenção de verificar a associação entre energia disponível e consumida, foi proposto um gráfico de regressão linear apresentado na Figura 27, demonstrando o comportamento da energia consumida média horária (W h) em função da energia solar média horária disponível (W h).

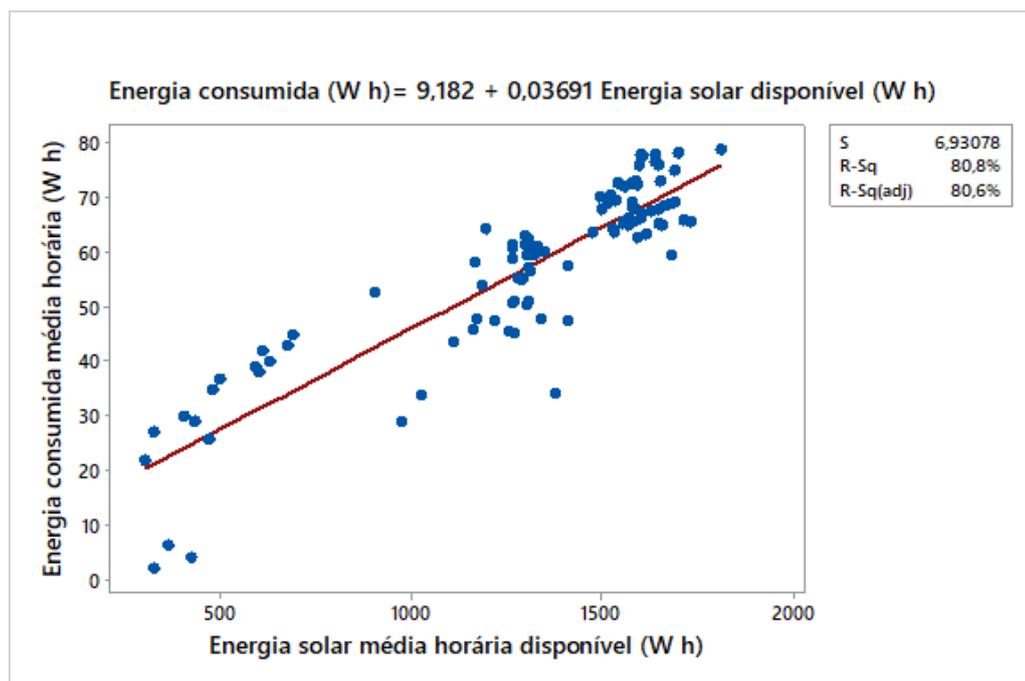


Figura 27. Regressão linear em relação à energia consumida e a energia disponível pelo painel fotovoltaico do experimento.

Com base nos resultados apresentados pelo gráfico, percebeu-se uma relação linear entre os parâmetros analisados, com R^2 de 80,6%, e uma correlação calculada de 90,4%, ou seja, as mudanças na energia disponibilizadas pelo sistema fotovoltaico durante o período de coleta dos dados, afetam diretamente os valores de energia consumida pelo sistema.

Pelo fato do arranjo fotovoltaico ser diretamente ligado ao sistema de bombeamento, sem a presença de controladores de carga ou mesmo banco de baterias, definiu-se que o fornecimento de energia foi igual aos valores de consumo por parte do sistema de bombeamento.

4.2. Avaliação do sistema de bombeamento de água fotovoltaico

A partir da coleta dos dados de irradiação e do volume de água diário bombeado, pode-se realizar a análise do comportamento desses parâmetros durante o período da realização do experimento.

A Figura 28 apresenta o comportamento similar entre os valores de irradiação e volume bombeado de água, indicando a dependência da irradiação nos painéis para um melhor funcionamento da bomba d'água.

Constatou-se que em dias de altos índices de irradiação como o terceiro dia de coleta com valor médio de $992,47 \text{ W m}^{-2}$, resultou em um volume de água de 1190,427 litros, enquanto que no nono dia para valores de $681,73 \text{ W m}^{-2}$, atingiu-se 673,12 litros bombeados de água.

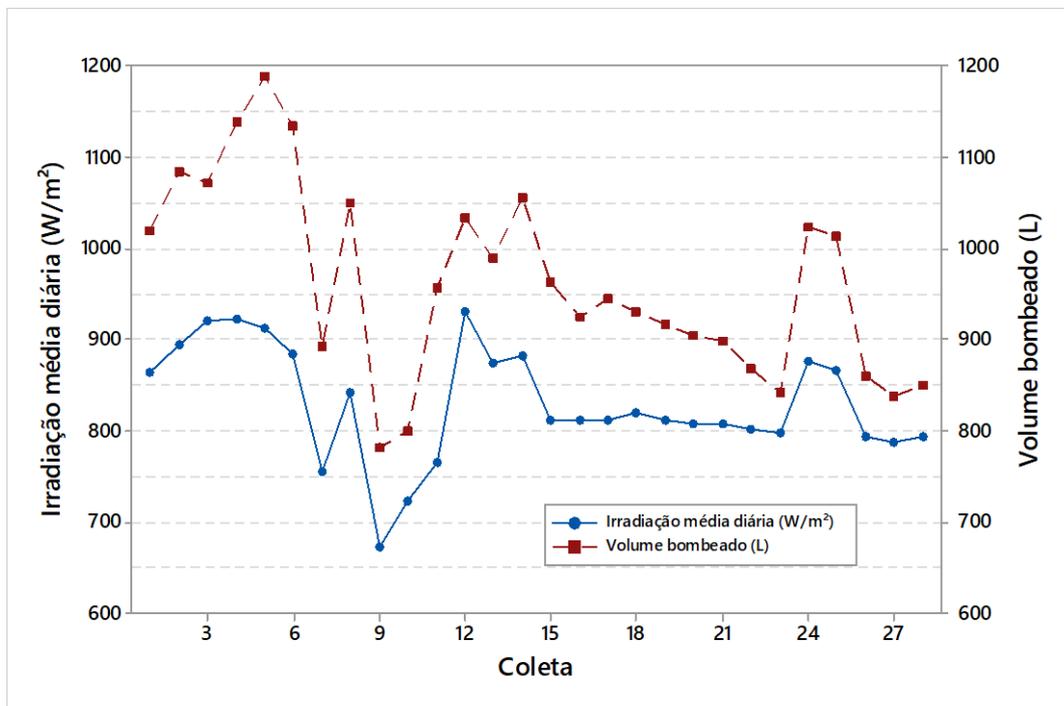


Figura 28. Média diária do volume bombeado e irradiação solar média diária.

O volume médio diário bombeado de água pelo sistema foi de 983,07 L dia⁻¹, para uma irradiação média diária de 830,64 W m⁻². Obteve-se, assim, uma taxa média de volume por irradiação solar incidente de 1,1835 L / W m⁻², valores inferiores aos encontrados por Zili (2018) e Nogueira et al. (2015), de 9,35 L / W m⁻² e 8,57 L / W m⁻², respectivamente, os quais utilizaram o mesmo modelo de sistema fotovoltaico e bomba. No entanto, foram similares aos valores de Santos, Michel e Gnoatto (2010) que obtiveram uma média diária de 1580,54 e 1233,34 litros para os meses de março e abril, utilizando o mesmo modelo de bomba, mas com sistema fotovoltaico policristalino modelo MSX-56 da Solartex.

Com o intuito de verificar a associação entre a variação da vazão média horária e irradiação média horária, elaborou-se um gráfico de regressão linear conforme a Figura 29.

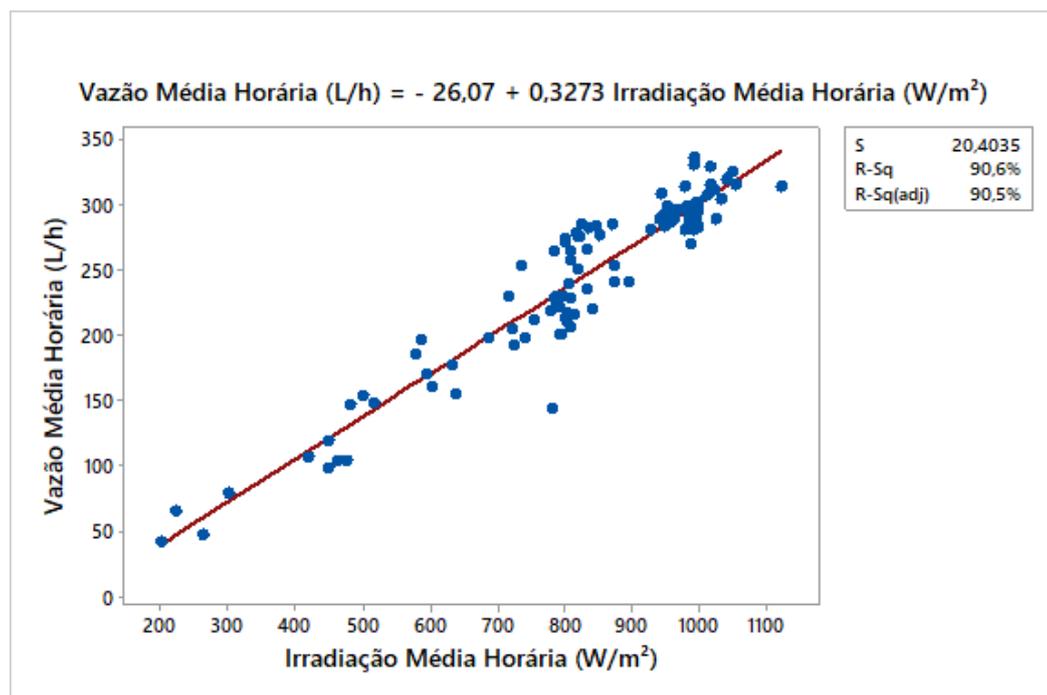


Figura 29. Regressão linear da vazão média horária em relação à irradiação média horária do experimento.

Observa-se que existe uma relação linear entre a vazão e os valores de irradiação, com o valor de R² em aproximadamente 90,5%, e uma correlação calculada de 88,6%, significando que as variações nos valores de irradiação média horária são diretamente proporcionais aos valores de vazão por parte da bomba

d'água, uma vez que o sistema fotovoltaico é diretamente conectado ao sistema de bombeamento.

Portanto, com aumento da irradiação, ocorre o aumento da energia disponível e, por consequência, da energia consumida pela bomba d'água que, por sua vez, acarretou maiores valores de vazão.

A partir da equação fornecida pelo gráfico, calculou-se a vazão em função da irradiação solar. Desta forma, para uma irradiação de 800, 1000 e 1200 W m⁻² obtém-se uma vazão de 235,77, 301,23 e 366,69 L h⁻¹ ou 3,93, 5,02 e 6,12 L min⁻¹, inferiores aos valores de Zili (2018) que, para o mesmo sistema fotovoltaico e mesma bomba submersível, obteve 6,36 L min⁻¹, para uma irradiação de 800 W m⁻².

A Figura 30 expõe o comportamento da vazão em função da energia média consumida pela bomba d'água.

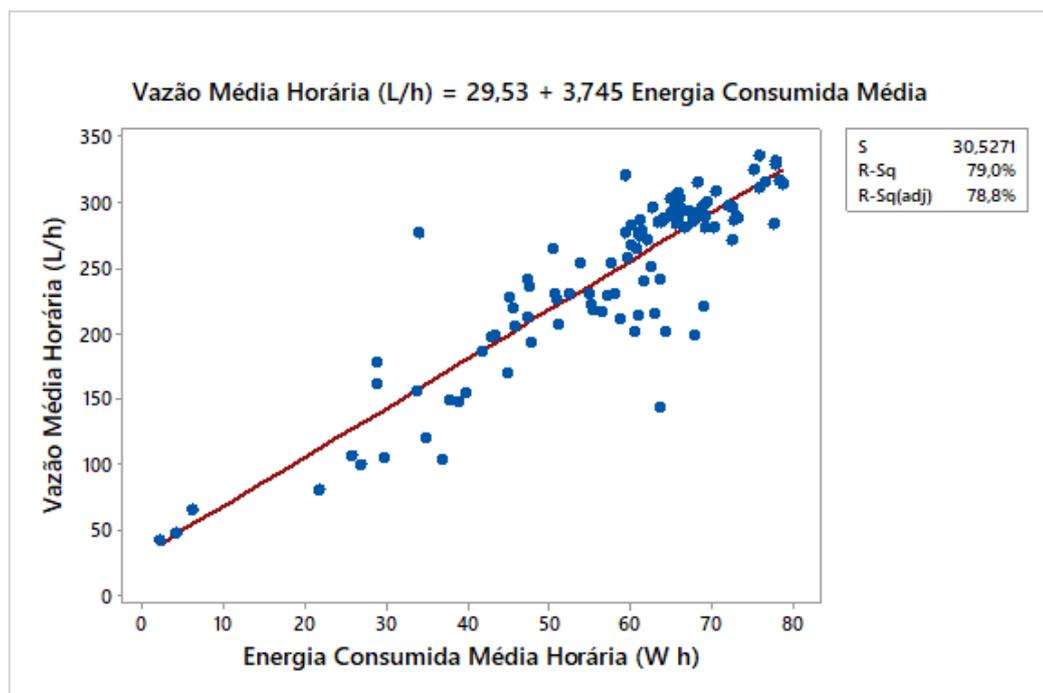


Figura 30. Regressão linear entre a vazão média horária pela energia consumida média horária do experimento.

Pode-se observar um comportamento linear entre vazão e energia consumida, com R² de 78,8%, e uma correlação calculada de 88,3%. Para o valor médio de energia consumida, 59,008 W h, observou-se uma vazão de 250,51 L h⁻¹, enquanto que para a maior valor horário de energia consumida, de 78,88 W h, que foi similar à potência nominal da bomba de 79 W, observou-se uma vazão de 324,94 L h⁻¹.

4.3. Avaliação do desempenho do sistema de irrigação por microaspersão

4.3.1. Análise estatística descritiva dos dados do sistema de irrigação por microaspersão

A Tabela 12 apresenta a estatística descritiva em relação ao bombeamento e irrigação para cada espaçamento. Constam dos valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo e máximo correspondentes às lâminas (mm h^{-1}), CUC (%), CUD (%), vazão (L h^{-1}), pressão (mca) e os fatores climáticos de temperatura, velocidade do vento e umidade.

Tabela 12. Estatística descritiva dos dados de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão, temperatura, velocidade do vento e umidade em função dos dois espaçamentos.

Espaçamentos	Parâmetros	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
Espaçamento 1 (2,0 m x 2,0 m)	Lâmina (mm h^{-1})	6,943	1,122	16,159	4,646	9,709
	CUC (%)	59,662	5,647	9,465	35,198	67,549
	CUD (%)	58,859	5,428	9,222	40,578	69,013
	Vazão (L h^{-1})	253,667	52,495	20,694	104	331,388
	Pressão (mca)	21,964	3,294	14,995	16	29,07
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	27,715	1,904	6,870	24,340	31,6
	Vento (m s^{-1})	0,998	0,296	29,677	0,323	1,45
	Umidade (%)	56,135	4,911	8,749	42,538	63,167
Espaçamento 2 (2,0 m x 1,6 m)	Lâmina (mm h^{-1})	8,186	1,702	20,792	1,373	10,719
	CUC (%)	68,848	4,152	6,030	56,802	78,883
	CUD (%)	68,054	5,740	8,435	46,229	78,797
	Vazão (L h^{-1})	237,866	77,396	32,538	42,481	335,940
	Pressão (mca)	21,988	2,677	12,176	15,567	25,704
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	29,833	1,571	5,266	26,450	33,000
	Vento (m s^{-1})	0,896	0,374	41,771	0,180	1,465
	Umidade (%)	51,233	6,129	11,963	35,308	67,000

Onde: DP: Desvio padrão. CV: Coeficiente de variação (%).

Os altos valores de coeficiente de variação (CV) em relação à lâmina (16,15%) do espaçamento 1 e coeficiente de variação da lâmina (20,79%) do espaçamento 2, indicam a existência de alta variabilidade dos dados, podendo ser justificada por se

tratar de um experimento em campo. Observou-se uma variabilidade considerável tanto para a pressão (14,99% e 12,17%) do espaçamento 1 e 2, quanto as variabilidades médias dos valores de vazão para o espaçamento 1 e espaçamento 2 (20,69% e 32,53%).

Os valores de pressão se mantiveram dentro das especificações técnicas do microaspersor (10 a 30 mca), com 21,96 e 21,98 mca para espaçamento 1 e espaçamento 2, respectivamente. Entretanto, a vazão não se manteve dentro das especificações dos microaspersores (36 a 62 L h⁻¹) no espaçamento 1, com vazão média horária de 253,66 L h⁻¹ que, divididos pelos quatro microaspersores, resultam em uma média de vazão de 63,41 L h⁻¹ para cada microaspersor. Enquanto que no espaçamento 2, a vazão média horária foi de 237,86 L h⁻¹ e resultou em 59,46 L h⁻¹, para cada microaspersores, se mantendo dentro das especificações. A distinção de valores da vazão (3,95 L h⁻¹) pode ser justificada pelo fato da coleta do espaçamento 1 apresentar maior média de irradiação horária (872,96 W m⁻²), em relação ao espaçamento 2 (819,64 W m⁻²), caracterizando a diferença nas vazões.

Quanto aos valores de coeficientes de uniformidade, no espaçamento 1 foram obtidas médias de 59,66% para CUC e 58,85% para CUD, com variabilidade de 9,46 e 9,22%, respectivamente. Já no espaçamento 2, obteve-se valores de CUC (68,84%) e CUD de (68,05%) superiores ao espaçamento 1.

Ambos os espaçamentos apresentam valores medianos de CV para os coeficientes de uniformidade, os quais variaram de 6,03 a 9,46%, caracterizando pouca variabilidade dos dados. O mesmo ocorreu com os resultados encontrados por Pallaretti (2014), que obteve CV de 6,52% para o CUC e 10,72% para o CUD.

Observou-se aumento de aproximadamente 9% nos coeficientes de uniformidade do espaçamento 1 (2 x 2 m) para espaçamento 2 (2 x 1,6 m), podendo afirmar que o espaçamento de 2 por 1,6 m apresentou melhores resultados que para o espaçamento de 2 por 2 m.

Quanto aos fatores climáticos, a maior média quanto à temperatura foi no espaçamento 2 com 33,00 °C e a menor no espaçamento 1 com 24,34 °C, destacando os valores baixos de coeficiente de variação com 6,87 e 5,26% para espaçamento 1 e espaçamento 2, respectivamente.

O espaçamento 2 apresentou a maior velocidade de vento com 1,46 m s⁻¹, valor inferior a 2,00 m s⁻¹, visto que, segundo Zhang, Merkley e Pinthong (2013), é o limite para não interferir significativamente na uniformidade de distribuição, valor que

pode ser justificado pelo experimento ter sido montado em um local entre muros árvores e um prédio, diminuindo a incidência de vento no local da montagem do sistema de irrigação.

Para análise do sistema hidráulica do bombeamento fotovoltaico e irrigação, para cada horário foi proposta a Tabela 13, apresentando a estatística descritiva, na qual constam os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, mínimo e máximo, correspondentes às lâminas (mm h^{-1}), CUC (%), CUD (%), Vazão (L h^{-1}), pressão (mca) e velocidade do vento (m s^{-1}).

Tabela 13. Estatística descritiva dos dados de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão e velocidade do vento em função dos quatro horários.

Horário	Parâmetros	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
10:00 - 11:00	Lâmina (mm h^{-1})	7,583	1,134	14,960	5,680	9,591
	CUC (%)	64,083	5,599	8,737	51,560	73,821
	CUD (%)	63,316	7,215	11,395	45,234	73,615
	Vazão (L h^{-1})	233,553	34,230	14,656	144,000	285,626
	Pressão (mca)	20,744	2,037	9,819	16,000	23,256
	Vento (m s^{-1})	0,839	0,271	32,262	0,223	1,234
11:05 - 12:05	Lâmina (mm h^{-1})	8,189	1,326	16,193	5,756	10,358
	CUC (%)	66,270	5,184	7,822	57,260	74,107
	CUD (%)	65,694	5,819	8,858	55,235	78,797
	Vazão (L h^{-1})	300,055	14,960	4,986	281,000	335,940
	Pressão (mca)	24,109	1,659	6,881	20,000	29,070
	Vento (m s^{-1})	0,931	0,291	31,285	0,285	1,380
14:00 - 15:00	Lâmina (mm h^{-1})	7,943	1,266	15,940	5,678	10,719
	CUC (%)	65,536	6,459	9,856	53,034	75,764
	CUD (%)	64,521	7,148	11,078	51,543	76,360
	Vazão (L h^{-1})	281,169	34,976	12,439	155,871	324,725
	Pressão (mca)	24,350	1,229	5,047	21,000	27,030
	Vento (m s^{-1})	0,995	0,404	40,626	0,200	1,465
15:05 16:05	Lâmina (mm h^{-1})	6,544	1,946	29,732	1,373	9,248
	CUC (%)	61,132	8,460	13,839	35,198	78,883
	CUD (%)	60,294	7,814	12,959	40,578	74,499
	Vazão (L h^{-1})	168,289	68,701	40,823	42,481	281,972
	Pressão (mca)	18,702	2,244	11,996	15,567	24,276
	Vento (m s^{-1})	1,024	0,364	35,575	0,180	1,450

Onde: DP: Desvio padrão. CV: Coeficiente de variação (%).

Os altos valores de coeficiente de variação (CV), em relação à lâmina para os horários, indicam a existência de alta variabilidade dos dados de acordo com a classificação de Pimentel-Gomes (2009), podendo ser justificada por se tratar de um experimento em campo e com variabilidades consideráveis para os valores de vazão.

Os valores de pressão foram mantidos dentro das especificações técnicas do microaspersor (10 a 30 mca), para todos os horário e espaçamento. A vazão se manteve dentro das especificações dos microaspersores (36 a 62 L h⁻¹) no primeiro e último horário de coleta, com média de 58,38 L h⁻¹ e 42,07 L h⁻¹.

Quanto aos valores de CUC, obteve-se o maior valor no horário das 11h05min às 12h05min, com 66,27%. O maior valor de CUD também se apresentou no mesmo horário (11h05min às 12h05min) com valor de 65,69%.

O horário das 11h05min às 12h05min apresentou os menores valores de CV, para os coeficientes de uniformidade, de 7,82 e 8,85%, para CUC e CUD, respectivamente, caracterizando pouca variabilidade dos dados, da mesma maneira que os resultados encontrados por Palaretti et al., (2016), que obteve CV de 6,52% para o CUC e 10,72% para o CUD. Salientando que o último horário de coleta (15h05min às 16h05min) obteve altos índices de CV (13,83 a 12,95%).

O horário das 15h05min às 16h05min evidenciou a maior média de velocidade de vento com 1,45 m s⁻¹, valor inferior a 2,00 m s⁻¹, sendo este o limite para que não ocorra interferência significativa na uniformidade de distribuição (ZHANG, MERKLEY e PINTHONG, 2013), portanto, a baixa velocidade do vento pode ser justificada pelo fato do experimento ter sido montado em um local entre muros árvores e um prédio, diminuindo a incidência de vento no local da montagem do sistema de irrigação.

4.3.2. Comparação das médias das lâminas de irrigação, CUC, CUD, vazão, pressão e eficiência.

O comparativo de médias entre lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão e eficiência de aplicação para os dois espaçamentos está exposto na Tabela 14, aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 14. Médias de lâmina, CUC, CUD, vazão, pressão e eficiência para os dois espaçamentos.

Espaçamento	Lâmina coletada (mm h ⁻¹)	CUC (%)	CUD (%)	Vazão (L h ⁻¹)	Pressão (mca)	Eficiência (%)
Espaçamento 1 (2 m x 2 m)	6,49 B	59,66 B	58,85 B	253,67 A	21,96 A	52,65 B
Espaçamento 2 (2 m x 1,6 m)	8,18 A	68,84 A	68,05 A	237,9 A	21,98 A	60,62 A

Médias seguidas de letras distintas na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observou-se que o espaçamento 2 sobressaiu em relação a lâmina de água apresentando maior média, com 8,18 mm h⁻¹, enquanto o espaçamento 1 evidenciou o valor de 6,49 mm h⁻¹.

A maior média obtida para o CUC foi do espaçamento 2 com 68,84% e CUD de 68,05%, já para o espaçamento 1, as médias são inferiores, com 59,66% e 58,85% para CUC e CUD, respectivamente.

Para Keller e Bliesner (2009), os valores de CUC e CUD do espaçamento 1 e CUC do espaçamento 2 foram classificados como inaceitáveis. Contudo, o CUD do espaçamento 2 foi classificado como aceitável.

Os valores foram superiores aos encontrados por Baum, Dukes e Miller (2005) que, em sua pesquisa sobre microaspersores, identificaram valores de 49% para CUC e entre 41 e 49% para CUD.

Entretanto, na pesquisa de Meneses et al. (2015) sobre um sistema de irrigação por microaspersão, os valores obtidos de CUC e CUD variaram de 76 a 96% e de 58 a 94%, classificados como inaceitáveis a excelentes.

Em relação à vazão e à pressão, foram observados valores similares para ambos os espaçamentos, com uma pequena superioridade do espaçamento 1 que obteve 253,67 L h⁻¹ e 21,96 mca, enquanto o espaçamento 2 apresentou 237,9 L h⁻¹ e 21,98 mca.

A superioridade da vazão no espaçamento 1 pode ter como justificativa o valor mais elevado de energia consumida (59,79 W h) em relação ao espaçamento 2 (55,69 W h)

Ressalta-se que essa superioridade de aproximadamente 16 L h⁻¹ do espaçamento 1 resultou em uma sobreposição do limite máximo das especificações técnicas dos microaspersores que, por sua vez, pode ter interferido nos valores de uniformidade e, por consequência, na eficiência, uma vez que as fórmulas para seu cálculo levam em consideração a vazão e o CUC.

Quanto à eficiência de aplicação, atingiu-se a maior média para o espaçamento 2, com 60,62% e menor para o espaçamento 1 com 52,65%. Valores esses que podem ser considerados baixos quando comparados aos resultados obtidos por Lima et al. (2012) de 85,5% para um sistema de microaspersão. Contudo, os baixos valores de eficiência de aplicação podem ser justificados por se tratar de um experimento a campo com interferências como a evaporação e velocidade do vento.

Pode-se observar que o espaçamento 2 registrou as maiores médias, ao nível de 5% de significância, para todas as variáveis analisadas. Destaca-se, inclusive, que foi obtida a menor média de velocidade de vento ($0,89 \text{ m s}^{-1}$). No espaçamento 1, o CUC, CUD e eficiência, registrando baixo desempenho em relação aos parâmetros analisados.

4.3.3. Avaliação do comportamento da lâmina d'água do sistema de irrigação por microaspersão

Com a intenção de representar o comportamento da lâmina d'água coletada para os quatro horários e dois espaçamentos, foram propostas as Figuras 31 a 34. Além disso, para representar a média das lâminas em ambos espaçamentos dos microaspersores foi proposta a Figura 35. São mapas bidimensionais com lâminas médias obtidas em cada coletor e identificadas a partir de uma paleta de cores que vai de 0 a 18 mm h^{-1} , com a representação da direção predominante do vento para os espaçamentos e horários propostos.

Para todos os mapas, a distribuição das lâminas coletadas foi distinta tanto em relação aos espaçamentos, quanto aos horários. Destaca-se a manifesta presença de cores mais escuras, que representam maiores valores das lâminas e equilíbrio na distribuição das cores para o horário 2 em ambos espaçamentos, sendo esses remetidos aos maiores valores de CUC e CUD. Já a predominância da direção dos ventos foi definida como advinda da região nordeste.

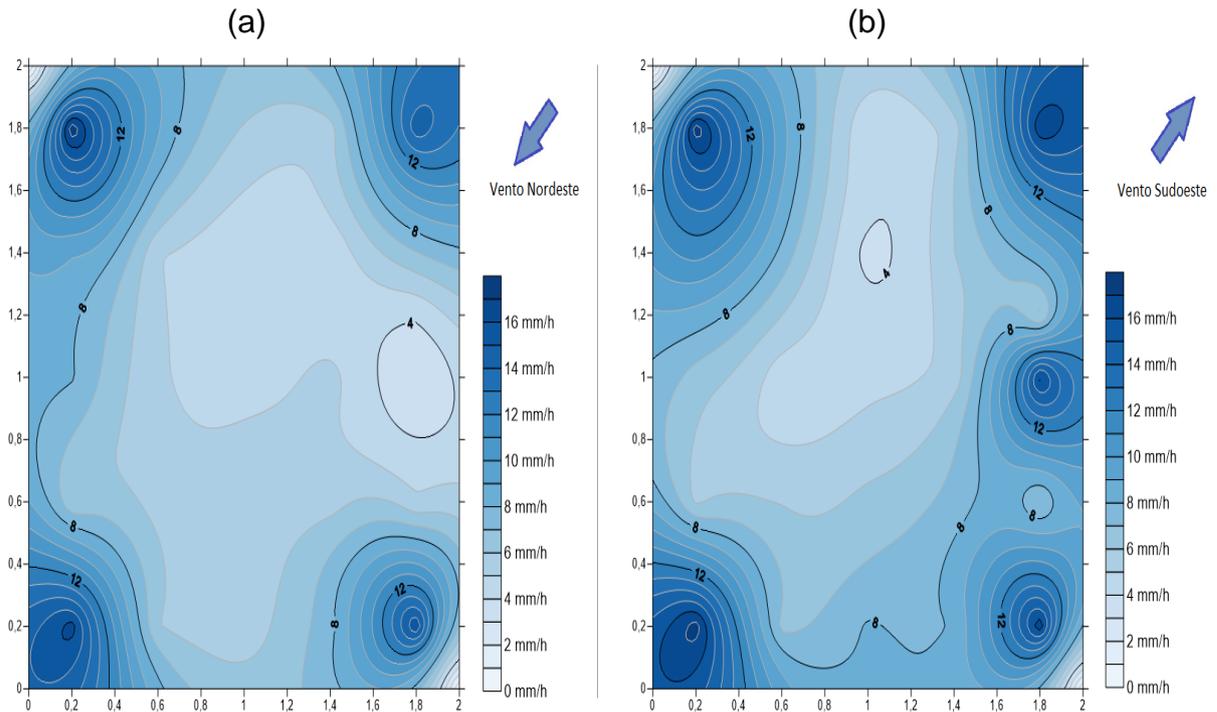


Figura 31. Lâmina média dos coletores, 10h às 11h (a); Lâmina média dos coletores, 11h05min às 12h05min (b): Espaçamento 1.

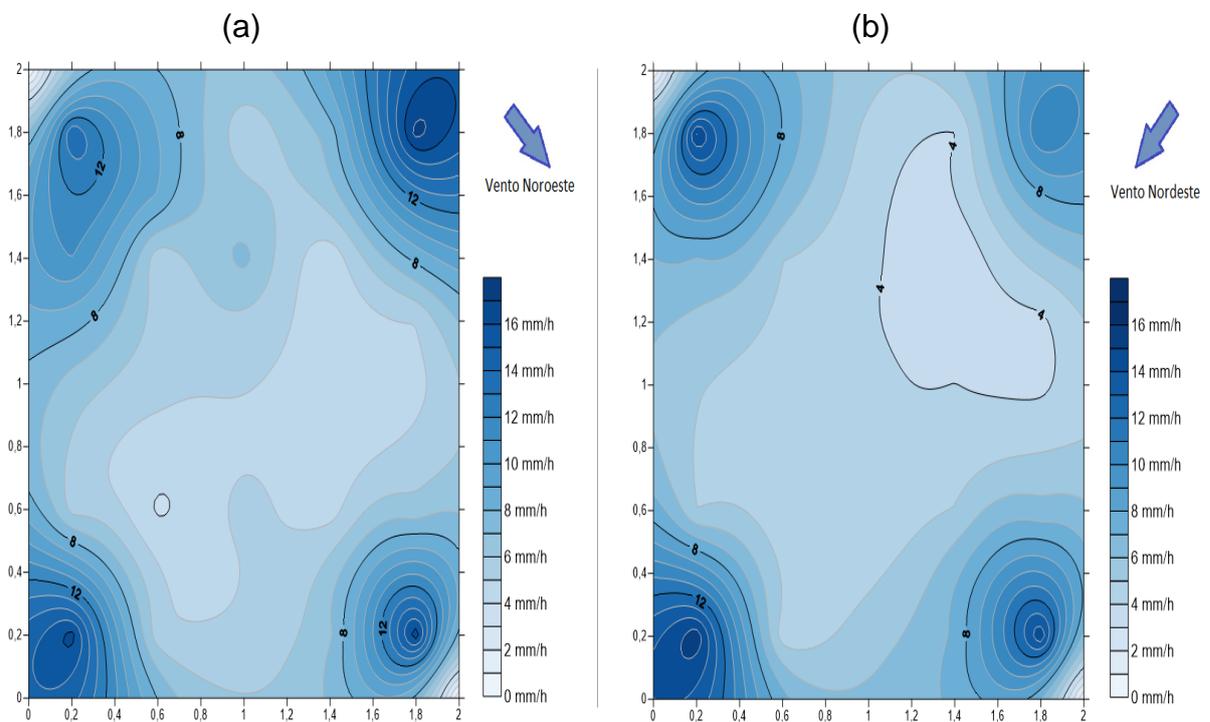


Figura 32. Lâmina média dos coletores, 14h às 15h (a); Lâmina média dos coletores, 15h05min às 16h05min (b): Espaçamento 1.

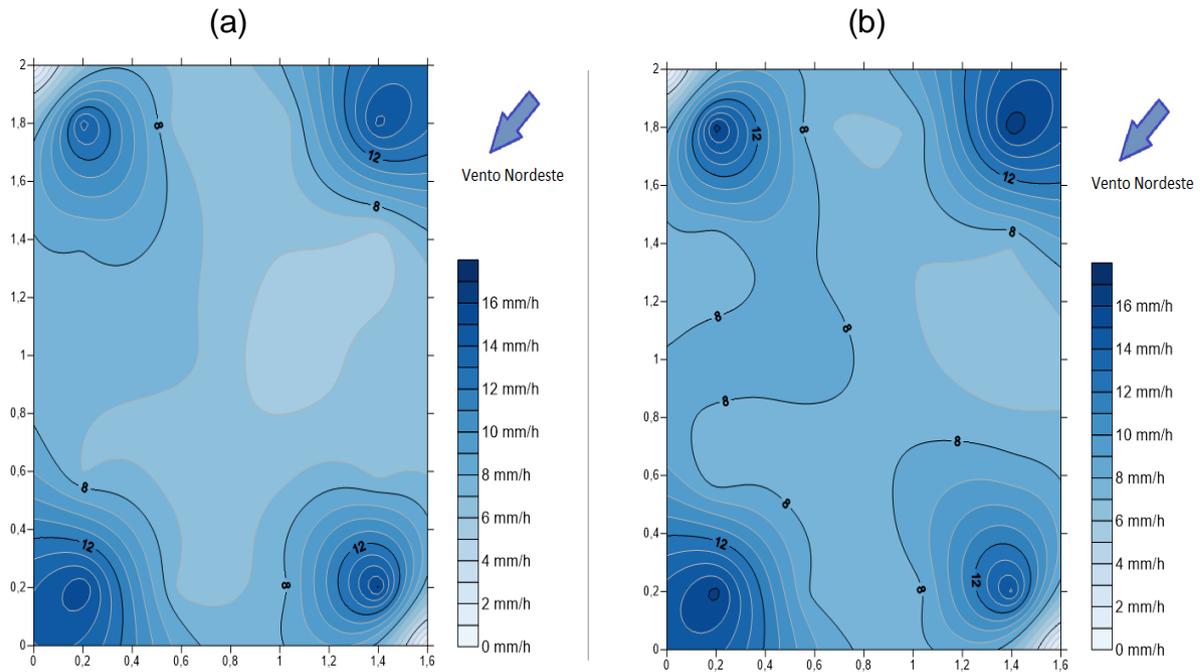


Figura 33. Lâmina média dos coletores, 10h às 11h (a); Lâmina média dos coletores, 11h05min às 12h05min (b): Espaçamento 2.

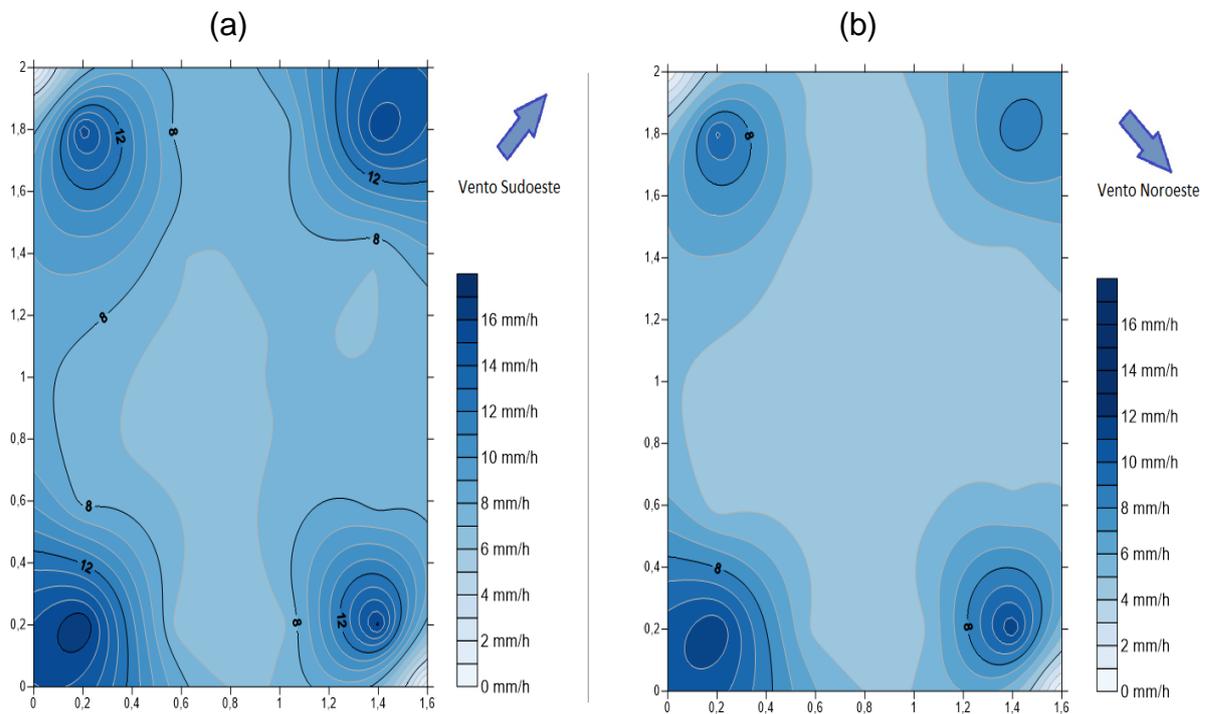


Figura 34. Lâmina média dos coletores, 14h às 15h (a); Lâmina média dos coletores, 15h05min às 16h05min (b): Espaçamento 2.

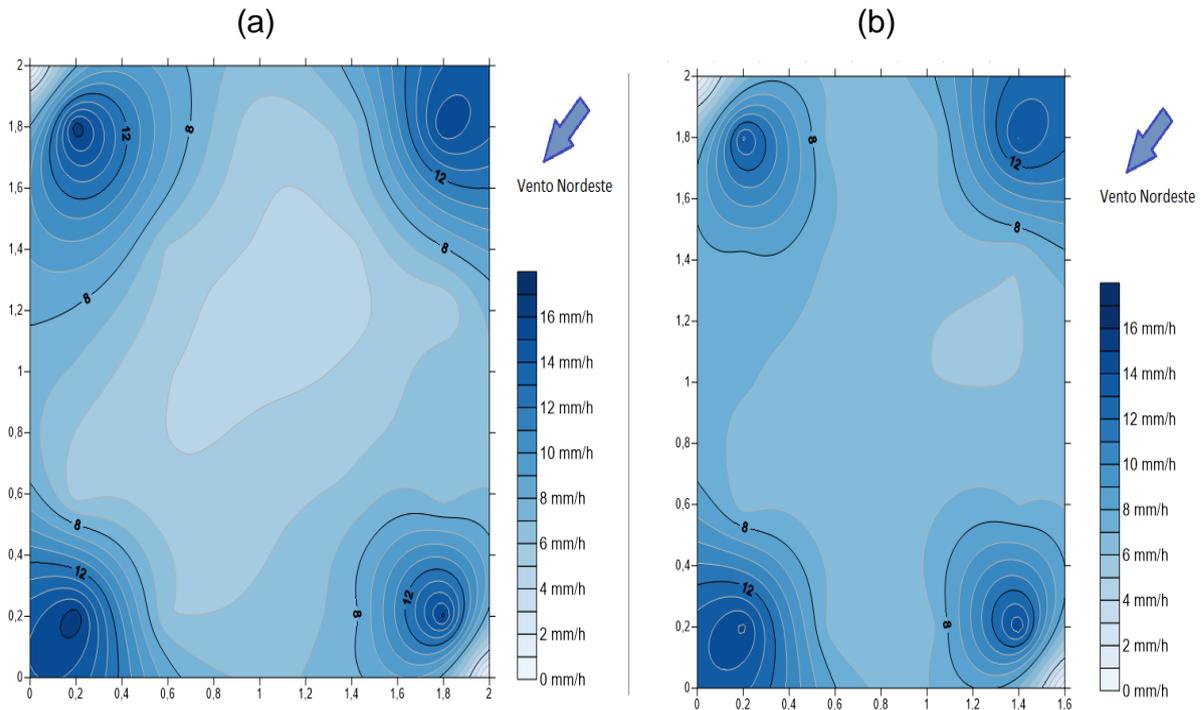


Figura 35. Lâmina média dos coletores para o espaçamento 1 (a); Lâmina média dos coletores para o espaçamento 2 (b).

No horário das 10h às 11h, para o espaçamento de 2,0 x 2,0 m, encontrou-se a maior amplitude quanto à lâmina de água (14,74 mm), com o maior valor (17,77 mm) próximo ao microaspersor 02, e a menor (3,03 mm) próximo ao centro do lado direito da área.

Como se pode observar em todas as figuras, houve maior concentração nos locais próximos ao microaspersores com valor médio de 15,24 mm para os quatro coletores (01, 05, 21 e 25, espaçamento 1 e 01, 04, 17, 20, para o espaçamento 2), valor bem distinto da média geral das lâminas de água para os 2 espaçamentos e 4 horários que foi de 7,77 mm.

Em contrapartida, a área que menos recebeu água foi a região central com valor médio nos coletores para o espaçamento 1 (2 x 2 m) de 5,14 mm nos 9 coletores centrais (7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 19) e 6,45 mm no espaçamento 2 (2 x 1,6 m) nos 6 coletores (6, 7, 10, 11, 14, 15).

Em pesquisa realizada por Zhang, Merkley e Pinthong (2013), no estudo de um sistema de irrigação por aspersão utilizando o mapeamento de distribuição de água, foi concluído também a prevalência de maiores volumes de água nos coletores próximos aos aspersores.

Outro parâmetro que se pode observar é a distinção entre as amplitudes para ambos espaçamentos, visto que o espaçamento 1 (2,0 x 2,0 m) apresentou a amplitude média de 13,67 mm h⁻¹, enquanto o espaçamento 2 (2,0 x 1,6 m) teve uma amplitude média de 9,94 mm h⁻¹. Essa diferença de valores é notória na Figura 35, a qual apresenta cores mais homogêneas no segundo espaçamento.

Portanto, o espaçamento 2, ao apresentar maior homogeneidade em seus mapas, comprova os valores mais elevados de uniformidade em relação ao espaçamento 1, caracterizando uma melhor eficiência do sistema de irrigação.

4.4. Avaliação da eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento de água para o sistema de irrigação por microaspersão

A Tabela 15 apresenta os valores médios horários das eficiências para o painel fotovoltaico, a bomba d'água da aplicação por parte do sistema de irrigação e a eficiência global do sistema para os respectivos horários.

Tabela 15. Eficiência média horária do sistema fotovoltaico de bombeamento, aplicação e global.

Horários	10:00 - 11:00	11:05 - 12:05	14:00 - 15:00	15:05 - 16:05
Eficiência do painel fotovoltaico (%)	4,41 A	4,57 A	4,42 A	3,03 B
Eficiência da bomba d'água (%)	0,83 B	1,25 A	0,97 AB	0,52 B
Eficiência de aplicação (%)	56,37 A	58,73 A	57,13 A	53,14 A
Eficiência Global (%)	2,06 BC	3,35 A	2,44 B	0,83 C

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Analisando os resultados obtidos, notou-se que a eficiência do painel fotovoltaico aumentou no decorrer do período da manhã, passando de 4,41% no horário 1 para 4,57% para o horário 2. Com um declínio no período da tarde para uma eficiência de 4,42% no terceiro horário e o menor valor no último horário de coleta de 3,03%.

O maior valor de eficiência do painel foi registrado no segundo horário, ou seja, 4,91%, sob uma irradiação média horária de 1017,14 W m⁻² e uma temperatura

média ambiente de 30,21 °C. Já a menor eficiência ocorreu no quarto horário com 0,82% a uma radiação de 227,83 W m⁻² e temperatura de 28,19 °C.

Considerando, assim, o sistema de fornecimento de energia fotovoltaico amorfo satisfatório, uma vez que Green et al. (2013) define a eficiência da célula de silício amorfo com valor de 10%, sendo esses dados de laboratório, portanto, superiores aos comerciais.

De acordo com Al Hanai et al. (2011), o sistema fotovoltaico amorfo tem uma eficiência comercial 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).

Em comparativo, valores similares foram encontrados por Zili (2018) que utilizou um painel amorfo obtendo eficiência de 4,24% para uma irradiação acima de 950 W m⁻². Destacando que, em valores acima de 800 W m⁻², ocorre uma queda na eficiência, causada pelo aumento da temperatura do painel, em decorrência do aumento da temperatura ambiente e da própria irradiação incidente no painel (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017).

Destaca-se a distinção entre o valor máximo da eficiência do painel (4,87%) para o mínimo (0,71%), sendo que a máxima eficiência se deu no dia 09/04 na coleta do horário 2, pois a ínfima presença de nuvens e altos valores de irradiação especificaram a coleta. Em contrapartida, o menor valor de eficiência se deu no dia 13/04 para o horário 4, coleta que foi caracterizada pela formação acentuada de nuvens e diminuição gradual dos níveis de irradiação, apresentando alta variabilidade e, por consequência, menor valor de eficiência do painel fotovoltaico.

Em relação à eficiência da bomba d'água, constatou-se o maior valor em 1,32% no segundo horário (11h05min – 12h05min) para uma pressão de serviço de 1,13 mca.

Segundo Kolling et al. (2004), baixas alturas manométricas resultam em maiores vazões, mas não representam maior eficiência da bomba. Vale salientar que a eficiência é apresentada quando a bomba é submetida a cargas maiores, uma vez que está diretamente ligada à potência hidráulica, que aumenta proporcionalmente à altura manométrica. Os mesmos autores utilizaram um sistema fotovoltaico monocristalino de energia e uma altura de 19 metros que chegou a 39% de eficiência da bomba.

A eficiência de aplicação não apresentou variabilidade entre os horários, uma vez que suas médias foram consideradas estatisticamente iguais em todos eles, porém destaca-se apenas que a maior porcentagem foi no horário 2 (11h05min – 12h05min).

Evidencia-se a maior eficiência global no horário das 11h05min às 12h05min, com média de 3,35%. Tal resultado vem corroborado pelos maiores índices de irradiação, que definiram o horário com melhor eficiência fotovoltaica e melhor eficiência da bomba. Ademais, por contar também com as maiores vazões e coeficientes satisfatórios de uniformidade, os quais culminaram em uma melhor eficiência de aplicação.

O horário 2 (11h05min – 12h05min) apresentou médias estatisticamente superiores aos demais horários destacando as maiores médias a 5% de significância. Foi também o horário que apresentou o maior valor de irradiação média ($992,76 \text{ W m}^{-2}$) e energia consumida ($68,97 \text{ W h}$). Entretanto, o horário 4 teve o pior desempenho em relação aos parâmetros analisados.

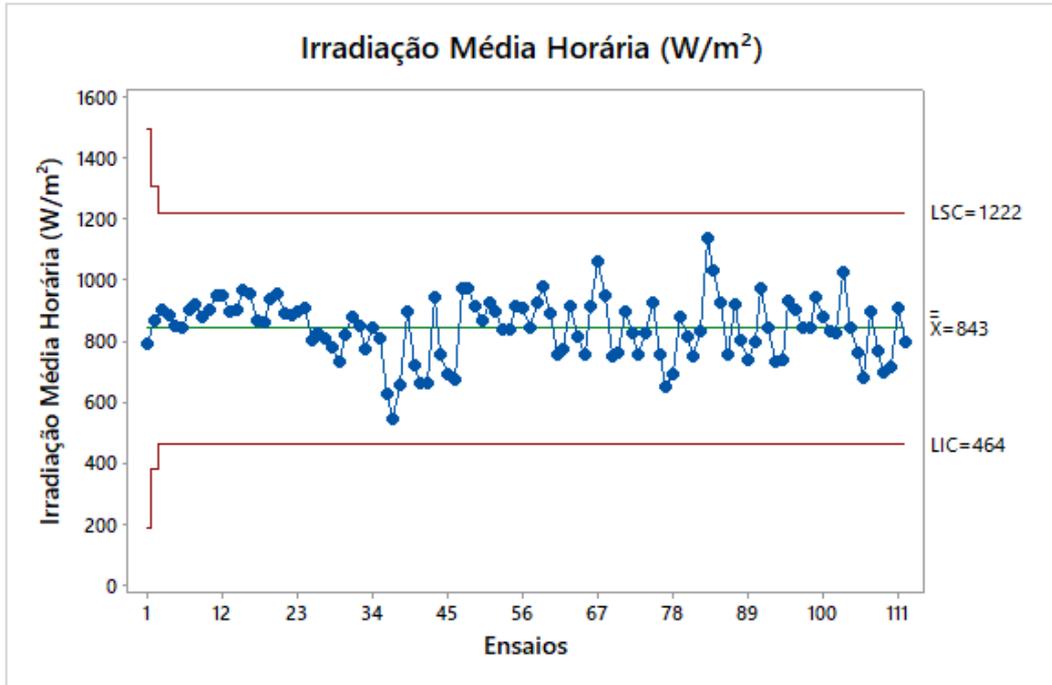
4.5. Análise dos gráficos de controle de Shewhart

Com o intuito de investigar se o processo esteve sob controle estatístico, ou não, quanto aos parâmetros analisados, foram propostos gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais em relação à irradiação solar e potência do painel fotovoltaico, com a finalidade de verificar a variação do fornecimento de energia por parte do sistema fotovoltaico durante os 112 ensaios e também para os dados de pressão média horária para espaçamento 1 ($2,0 \times 2,0 \text{ m}$) e 2 ($2,0 \times 1,6 \text{ m}$).

Foram elaborados ainda os gráficos de controle em relação aos parâmetros de uniformidade com o desígnio de identificar a variação de distribuição durante os 56 ensaios, indicando o limite aceitável de 78% para CUC e 65% para CUD, de acordo com a classificação de Keller e Bliesner (2009). Além disso, foi elaborado o gráfico de controle para a variável de velocidade do vento, com uma linha de referência para a velocidade de $2,00 \text{ m s}^{-1}$, valor que, se excedido, pode diminuir a uniformidade de distribuição significativamente (ZHANG, MERKLEY e PINTHONG, 2013), bem como o gráfico relacionado com a vazão média para os horários de coleta com a finalidade de justificar a variabilidade do CUC e CUD.

A Figura 36 apresenta o gráfico de controle de Shewart para irradiação média horária (a) e média da potência do painel fotovoltaico (b) para os 112 ensaios.

(a)



(b)

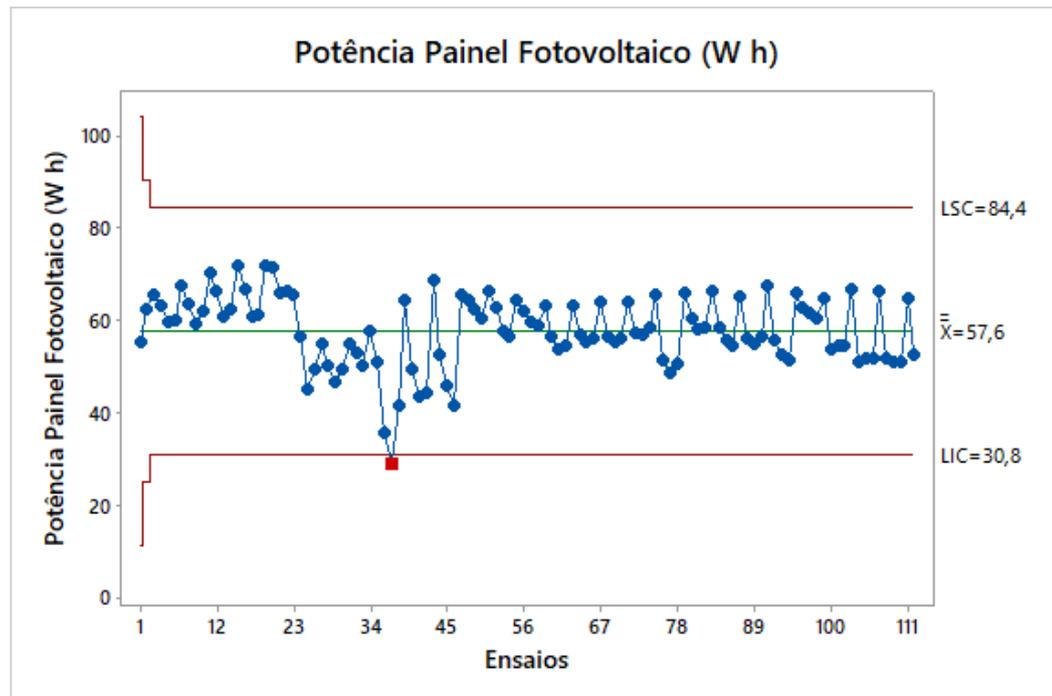
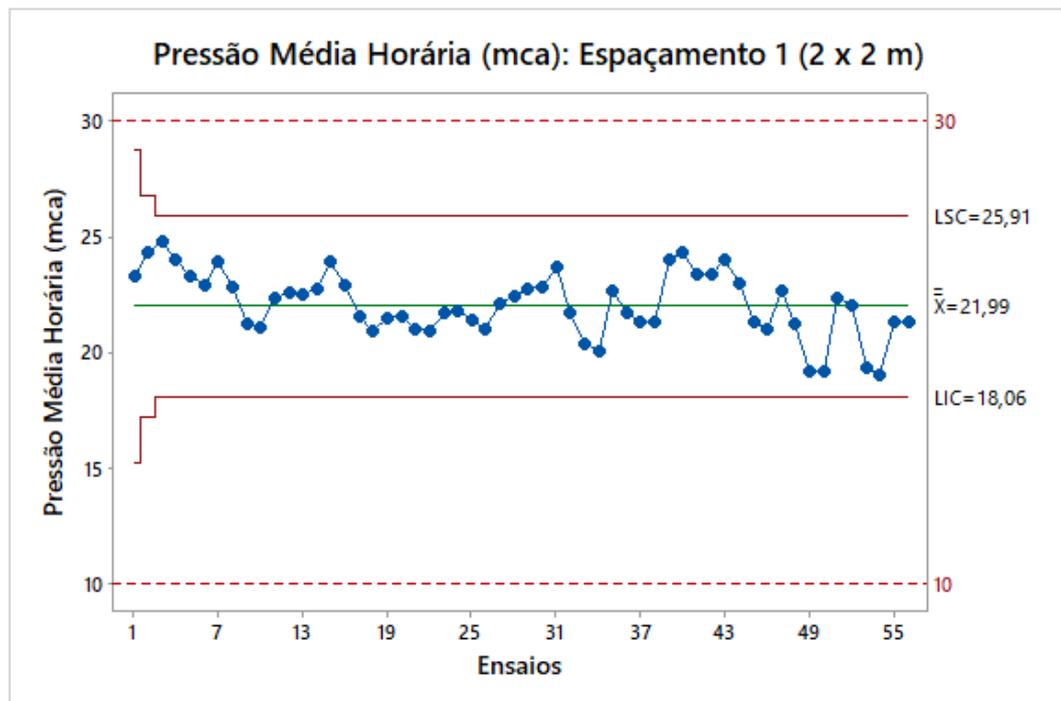


Figura 36. Gráfico de controle da média horária em relação à irradiação (a) e potência do painel fotovoltaico (b).

Verificou-se que o ensaio 37 para o gráfico de Potência do painel fotovoltaico está abaixo do LIC (Limite Inferior de Controle). Com isso, o processo está fora de controle estatístico podendo ser justificável pela elevada presença de nuvens no momento da coleta, que reduziram para 262 W m^{-2} e $4,32 \text{ W h}$ quanto à irradiação e potência, respectivamente. Foi constatado também que, no gráfico de irradiação, ocorreram 18 ensaios consecutivos plotados em um mesmo lado da linha média que, pela regra de Western Electric, também estão fora de controle (MONTGOMERY; RUNGER e HUBELE, 2004). Tal fato também acontece no gráfico de potência, do ensaio 2 ao 23. Outra característica que se destacou foi a presença de 10 ensaios no gráfico de potência abaixo da linha média, definindo como fora de controle estatístico por apresentar uma tendência decrescente. Vale frisar que acompanharam a diminuição dos valores de irradiação, uma vez que a correlação entre as variáveis chegou a 86,9%.

A Figura 37 apresenta os gráficos de controle para pressão dos espaçamentos 1 (a) e 2 (b), com os indicativos no gráfico das especificações técnicas de pressão máxima e mínima de operação dos microaspersores.

(a)



(b)

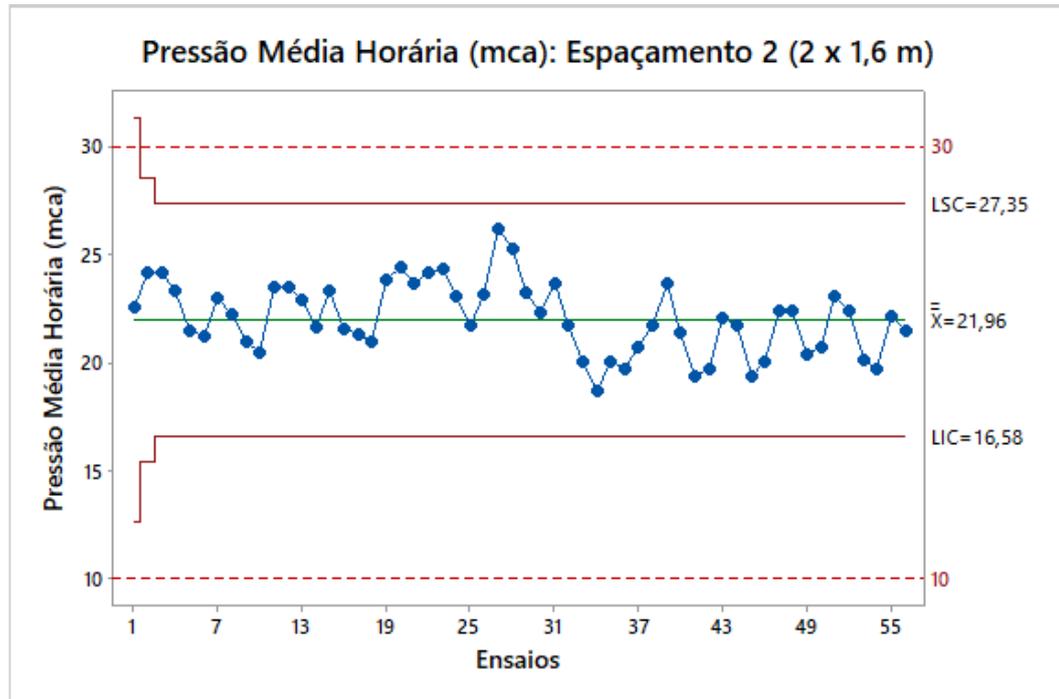


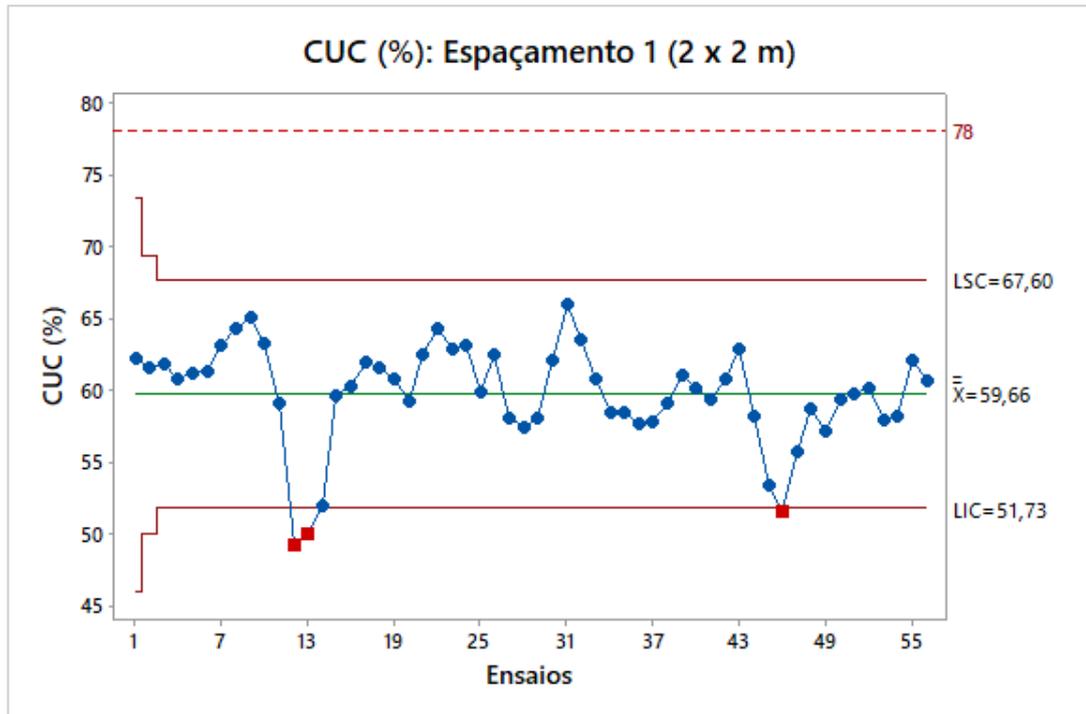
Figura 37. Gráfico de controle para a pressão média horária dos espaçamentos 1 (a) e 2 (b).

Pode-se observar que, em ambos os espaçamentos, não foram registrados pontos fora dos limites de controle, se mantendo também dentro das especificações técnicas de pressão dos microaspersores que varia de 10 a 30 mca. É importante ressaltar, no espaçamento 1, a ocorrência de 8 ensaios em sequência acima da linha média (1 ao 8), bem como os ensaios de 17 a 26 que estão do mesmo lado da linha média e, com isso, caracterizam uma sequência decrescente que, para Montgomery (2009), é avaliada como fora de controle estatístico.

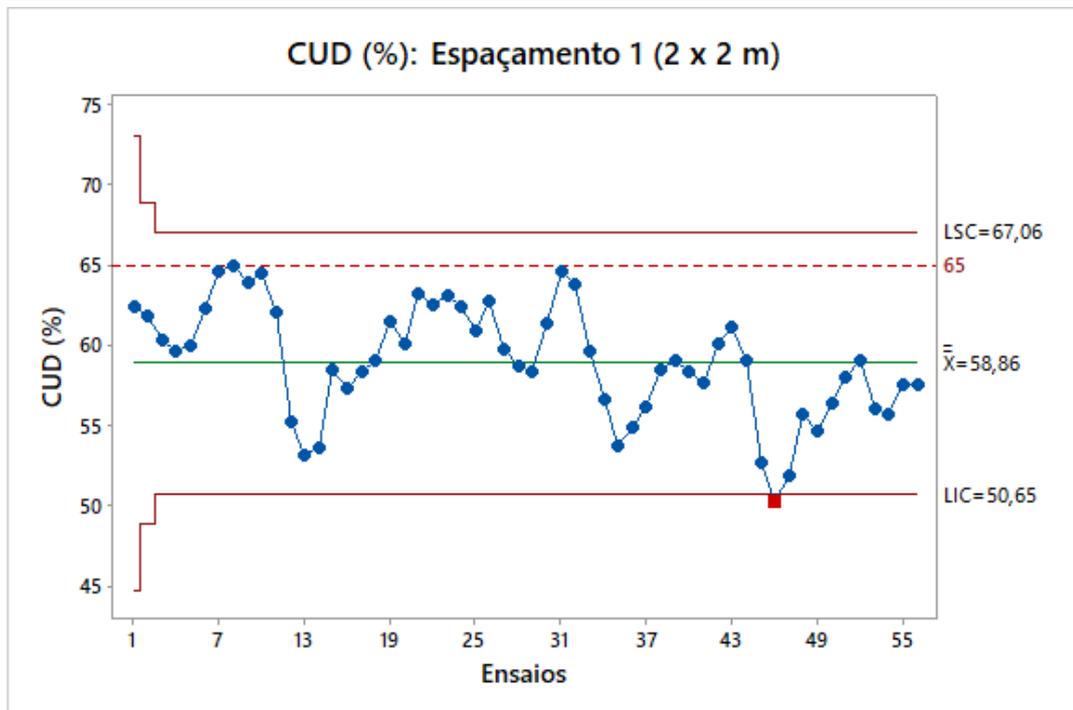
Portanto, somente o espaçamento 2 se manteve sob controle para os valores de pressão média horária.

A Figura 38 exibe os gráficos de controle para CUC (a), CUD (b), com suas linhas de referências em 78% em relação ao gráfico do CUC e 65% quanto ao gráfico do CUD, velocidade do vento (c), com a linha de velocidade máxima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ e vazão (d) para o espaçamento 1.

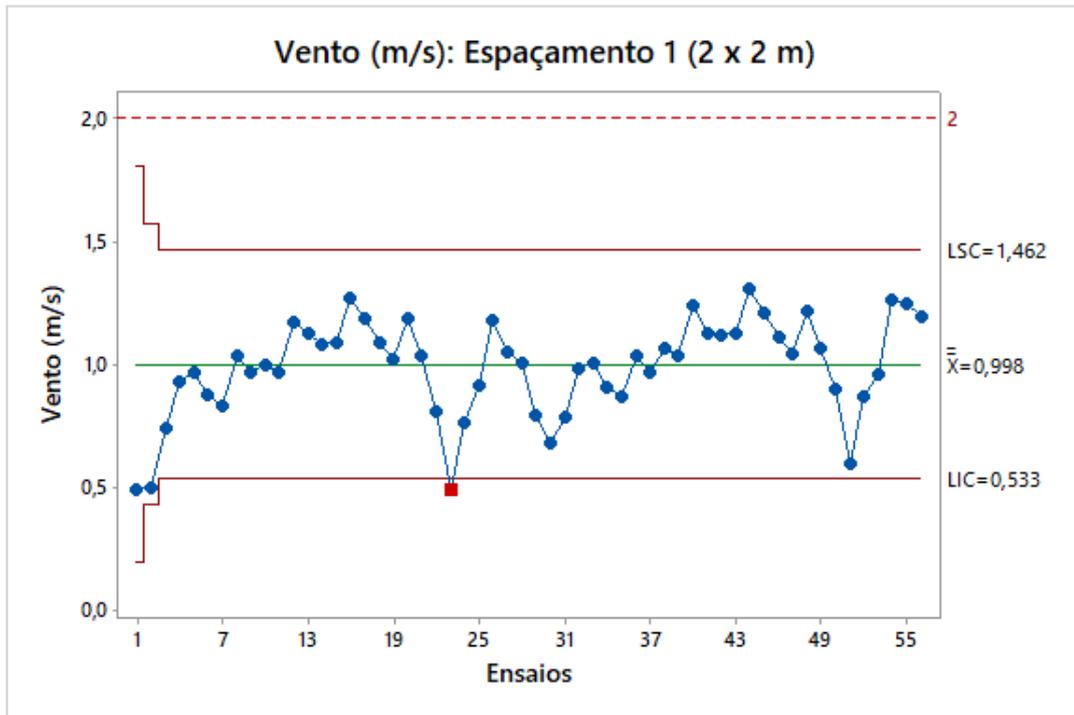
(a)



(b)



(c)



(d)

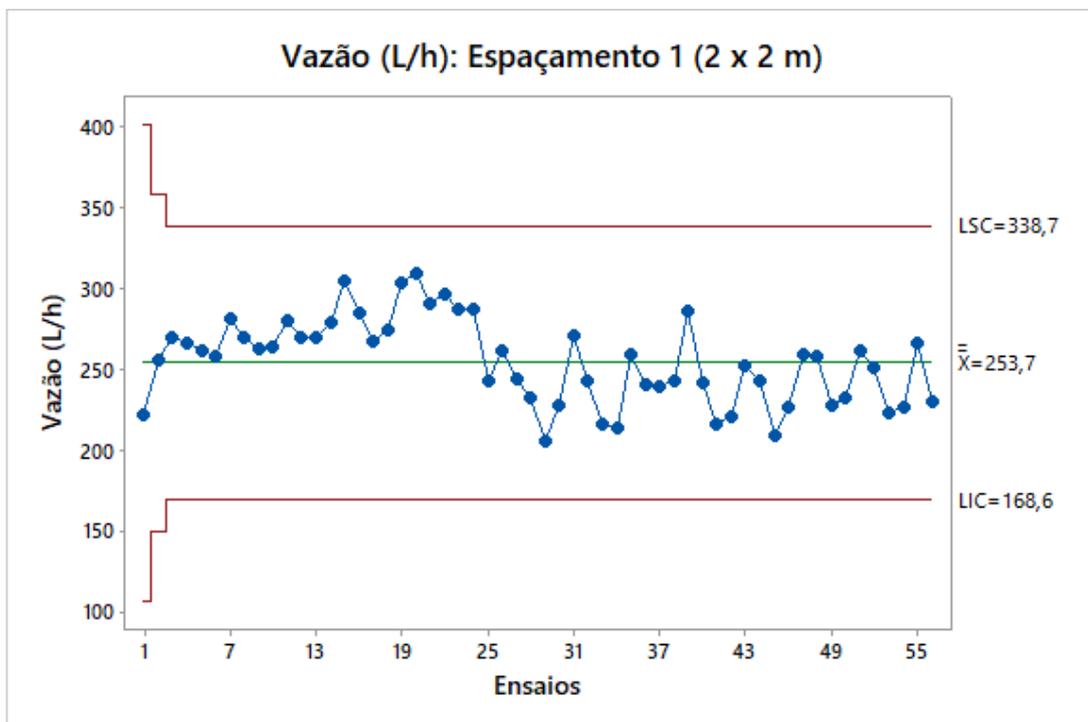


Figura 38. Gráfico de controle para CUC (a), CUD (b), velocidade do vento (c) e vazão (d): espaçamento 1.

Os gráficos de uniformidade em evidência apresentaram pontos fora do limite inferior de controle. Contudo, todas as médias dos ensaios, tanto de CUC quanto para CUD, estão abaixo ou no limite aceitável de 78% e 65%, conforme Keller e Bliesner (2009).

O CUC também foi considerado fora de controle por apresentar dez valores do mesmo lado da linha média, de acordo com Montgomery, Runger e Hubele (2004). E, apesar de serem acima da linha média caracterizando uma maior uniformidade, não alcançam os valores do limite aceitável.

O ensaio 12, que apresentou valor abaixo do limite inferior de controle, embora a velocidade do vento média tenha sido abaixo do alcance de 2 m s^{-1} e com vazão controlada, pode ser justificado pela velocidade do vento de rajada, que chegou a $3,1 \text{ m s}^{-1}$, excedendo o limite de $1,8$ a $2,0 \text{ m s}^{-1}$, e a variação na vazão durante o ensaio com amplitude de $1,518 \text{ L min}^{-1}$.

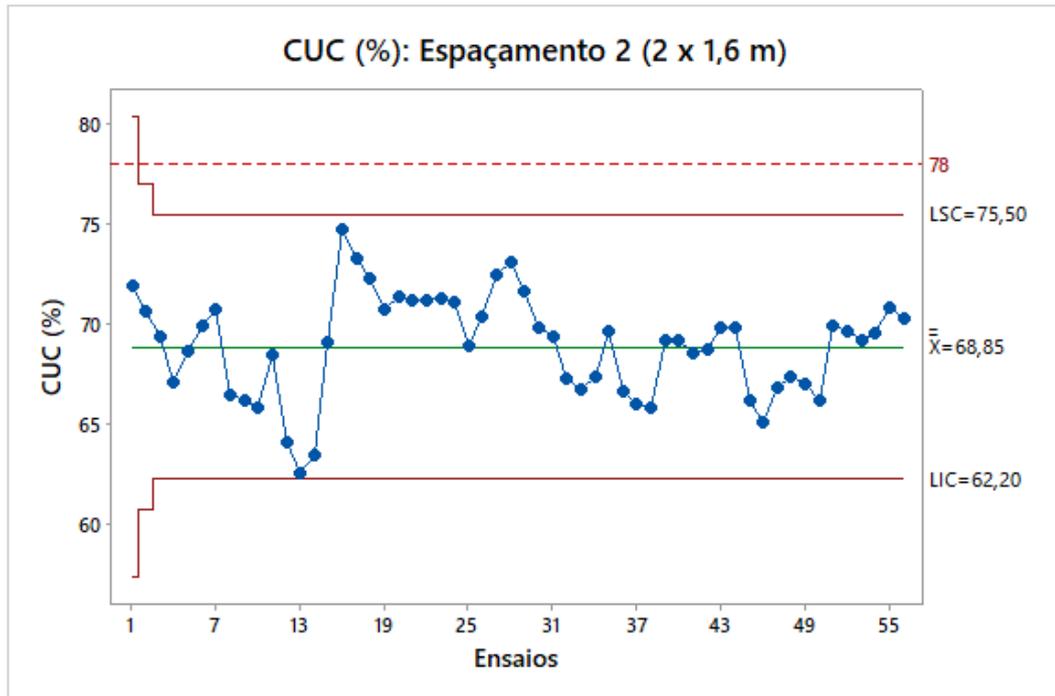
O fato da caracterização do ensaio 13 de estar abaixo do limite de controle inferior pode ser justificado em razão de ser o primeiro ensaio da manhã, horário que ficou caracterizado pelo aumento significativo nos valores de irradiação, causando variabilidade no fornecimento de energia e, por consequência, alta variabilidade na vazão ao longo do ensaio, a qual inicia com aproximadamente $4,0 \text{ L min}^{-1}$, passando para $5,0 \text{ L min}^{-1}$ no final do ensaio.

O ensaio 46 apresentou valor abaixo do limite inferior de controle em ambos os gráficos, podendo ser justificado pelos altos valores de amplitude da irradiação ($671,5 \text{ W m}^{-2}$) causados pela formação de nuvens durante o ensaio que, por seguinte, causou variação na vazão, com amplitude significativa ($1,76 \text{ L min}^{-1}$) por parte do sistema de bombeamento.

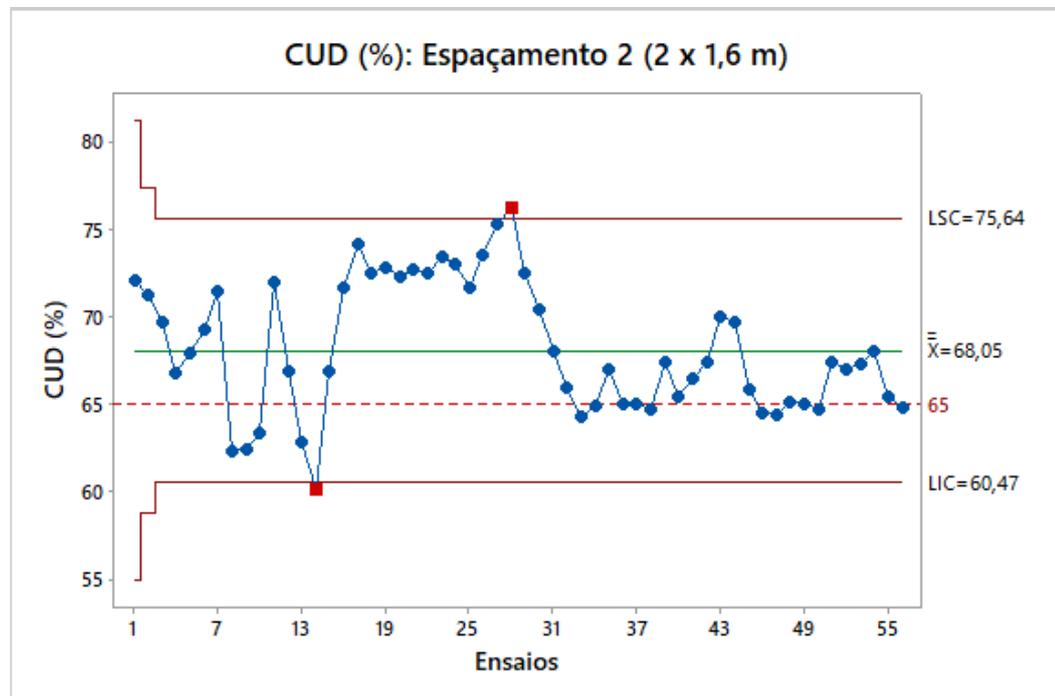
Os ensaios 8, 9 e 31 evidenciaram os maiores valores de CUC e CUD, assim como, para os mesmos ensaios, foram registradas baixa velocidade do vento e vazão normalizada. Já os ensaios 12, 13 e 46, a partir dos quais foram observados os menores valores de CUC e CUD, também foram registrados valores de velocidade do vento baixa e vazão normalizada. Sendo assim, a velocidade do vento e vazão para esses ensaios não assinalaram interferência nos valores de CUC e CUD, uma vez que, para dados normalizados de vento e vazão, são destacados altos e baixos valores de CUC e CUD.

A Figura 39 apresenta os gráficos de controle para CUC (a), CUD (a), velocidade do vento (c) e vazão (d) para o espaçamento 2.

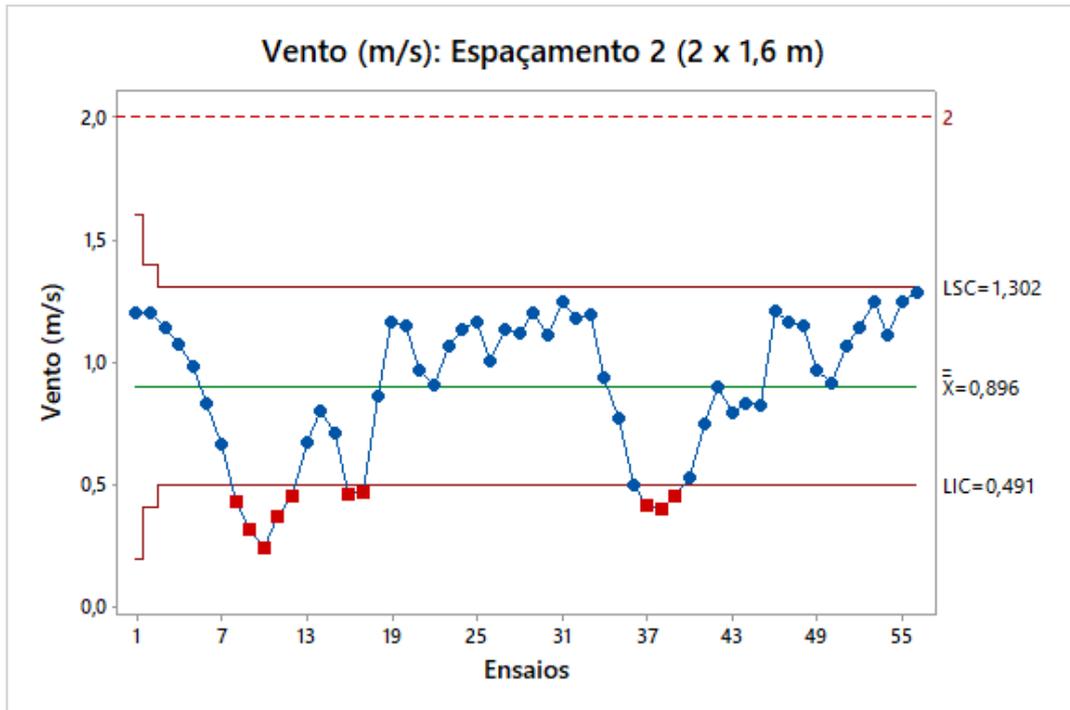
(a)



(b)



(c)



(d)

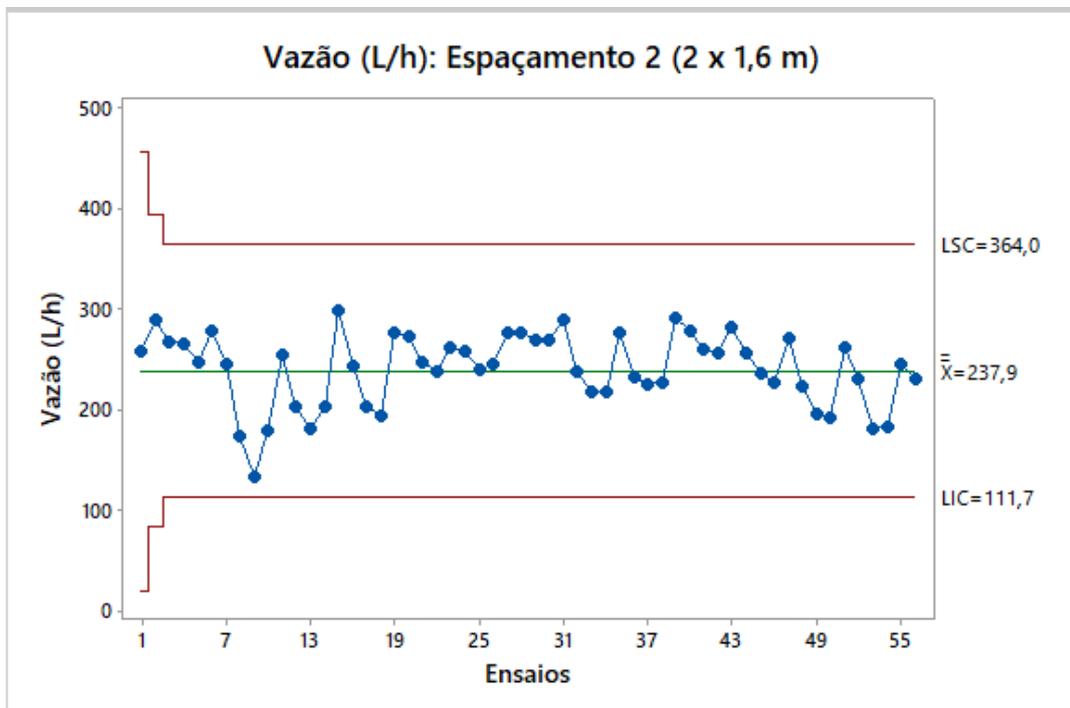


Figura 39. Gráfico de controle para CUC (a), CUD (b), velocidade do vento (c) e vazão (d): espaçamento 2.

O gráfico de CUC da Figura 39 (a) não apresentou pontos fora do limite de controle, mas é possível observar que, em todos os ensaios, os valores se mantiveram abaixo do limite aceitável quanto à classificação Keller e Bliesner (2009) (78%). Além disso, por apresentar 9 pontos em um mesmo lado da linha média, mesmo que acima e, por consequência, exibirem maior uniformidade, foi considerado fora do controle estatístico, segundo Montgomery (2009), para a regra de Western Electric.

Comparando os gráficos de CUC do primeiro e segundo espaçamento, pode-se observar uma aproximação da linha média em relação ao mínimo aceitável, conforme a classificação Keller e Bliesner (2009) para a uniformidade de aplicação, passando de aproximadamente 59% do espaçamento 1 para 69% no espaçamento 2.

Em relação ao CUD, o ensaio 14 está abaixo do limite inferior de controle indicando, assim, que o processo está fora de controle. Para o mesmo ensaio, obteve-se $0,8 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade de vento e $22,75 \text{ L min}^{-1}$ na vazão. Quando foram analisados os dados de velocidade de rajada, observou-se que estes chegaram a $3,17 \text{ m s}^{-1}$, valor acima do limite de $2,0 \text{ m s}^{-1}$, podendo, portanto, ser a causa do baixo valor para CUD.

Ademais, foi identificado que, em razão dos ensaios 15 ao 29 estarem plotados de um mesmo lado da linha, foram considerados fora do controle, com base em Montgomery, Runger e Hubele (2004). Salientando que o ponto 27 extrapolou o limite superior de controle caracterizando como fora de controle estatístico, mesmo que a superioridade dos valores aponte para maior uniformidade.

No entanto, destaca-se que o gráfico de controle de CUD para o espaçamento 2 foi o único que salientou, em sua grande maioria, pontos plotados acima do limite aceitável de 65%.

Ao comparar os dias e horários de coleta que apresentaram velocidade do vento abaixo do limite inferior de controle (ensaios do 8 ao 12, 16 e 17 e 37, 38 e 39), e os confrontarmos com os mesmos dias e horários de coleta dos valores de CUC e CUD, esses apresentaram valores tanto abaixo, quanto acima da média para a uniformidade. Assim, é possível verificar que a baixa velocidade do vento não apresentou interferência na uniformidade. E, ao calcular a correlação entre os parâmetros, chega-se aos valores de 10,3% entre CUC, velocidade do vento e 9,2% entre CUD e velocidade do vento.

Sendo assim, nenhum dos dois espaçamentos foi explicitado sob controle estatístico para CUC e CUD, pois os gráficos do espaçamento 1 apontaram valores

fora do limite inferior de controle e tendências ascendentes em ambos os gráficos. O espaçamento 2, apesar de não apresentar nenhum ponto fora dos limites para CUC, foi diagnosticado fora de controle estatístico por apresentar característica ascendente, enquanto que o CUD, além dos pontos ascendentes, teve valores fora do limite inferior e superior de controle. Salientando que o gráfico de CUD do espaçamento 2 foi o único a ultrapassar, em diversos pontos o limite aceitável para o sistema de irrigação por microaspersão, segundo Keller e Bliesner (2009).

4.6. Avaliação do índice de capacidade do processo

A verificação do índice de capacidade do processo (C_{pi}) objetivou identificar o espaçamento em que a irrigação se manteve sob controle no processo ao longo do tempo, considerando, para fins de cálculo, o limite inferior de especificação (LIE) de 78% em relação ao CUC e 68% em relação ao CUD que, segundo a classificação de Keller e Bliesner (2009), é o limite aceitável para irrigação.

Tabela 16. Índice de capacidade do processo (C_{pi}) para CUC e CUD.

Índice de capacidade do processo para CUC (%) para LIE = 78%, e para CUD (%) para LIE = 65%		
Espaçamentos	C_{pi} CUC LIE = 78%	C_{pi} CUD LIE = 65%
Espaçamento 1 (2,0 x 2,0 m)	0	0
Espaçamento 2 (2,0 x 1,6 m)	0	0,19

Sendo: CUC – Coeficiente de uniformidade de Christiansen; CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição; LIE – Limite inferior de Especificação.

Ao atentar para o fato de que o sistema só é capaz de se manter sob controle quando o valor de C_{pi} é superior a 1,25 para processos existentes (Montgomery, 2009), definiu-se que ambos os espaçamentos não foram capazes de se manter sob controle, pois seus valores não alcançaram o mínimo de 1,25.

Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), em seu estudo sobre a irrigação por aspersão em campo aberto, encontraram valores do índice de capacidade do processo, ao longo dos 25 ensaios, indicando que, para um CUC de 70 a 75% obtiveram um C_{pi} de 2,26, já para o CUC de 75 a 80%, o valor subiu para 2,97 e CUC superior a 80% o índice foi de 3,00.

Levando em conta que os valores de CUC, para ambos os espaçamentos, tiveram baixos coeficientes, inferiores ao LIE, já se esperava que não apresentassem valores significativos para o índice de capacidade do processo. Já no caso do espaçamento 2, por apresentar o maior CUD, com valores acima do LIE em diversos ensaios, esperava-se que seus valores de C_{pi} chegassem ao mínimo de 1,25. Entretanto, os demais fatores envolvidos no processo como os aspectos climáticos, variabilidade na irradiação, fornecimento de energia e, por consequência, variabilidade na vazão e pressão hidráulica, corroboraram com a falta de capacidade em se manter sob controle ao longo do tempo.

5. CONCLUSÕES

O melhor resultado no tocante à irradiação foi obtido no horário das 11h05min às 12h05min, com valor de $992,76 \text{ W m}^{-2}$, horário que correspondeu a maior eficiência do painel de 4,57% e, também, máxima energia consumida pela bomba d'água, de 68,97 W h.

Os fatores com maior correlação foram entre energia consumida média horária (W h) e energia solar média horária disponível (W h) (90,04%), seguida pela correlação entre Irradiação média horária (W m^{-2}) e vazão média horária (L h^{-1}) (86,9%).

Os melhores resultados acerca da CUC e CUD, assim como da eficiência de aplicação, foram obtidos no espaçamento 2 (2,0 x 1,6 m), com valor de 68,84%, 68,05%, 58,73% respectivamente, constatou-se também baixa velocidade do vento ($0,89 \text{ m s}^{-1}$) e menor vazão ($237,8 \text{ L h}^{-1}$).

O gráfico de controle de Shewhart indicou que nenhum dos dois espaçamentos da irrigação se manteve sob controle estatístico, uma vez que os parâmetros analisados não foram controlados, ocorrendo grande variação. O que também acarretou a irradiação e potência do painel fotovoltaico.

Sendo assim, concluiu-se que o melhor horário de utilização do sistema de bombeamento fotovoltaico foi das 11h05min às 12h05min, por apresentar maiores valores de eficiência, tanto do painel quanto do bombeamento. É oportuno salientar que não é recomendada a utilização do sistema de irrigação para o horário de melhor funcionamento do painel e da bomba (11h05min às 12h05min), uma vez que altas temperaturas, menor umidade, evaporação da água a partir do solo e ar, assim como a evapotranspiração da planta, são características desse horário do dia que acarretam na diminuição da eficiência do sistema de irrigação.

Quanto ao espaçamento dos microaspersores, recomenda-se 2,0 x 1,6 m, pois obteve maiores coeficientes de uniformidade entre os espaçamentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-ALIGAH, M. Design of photovoltaic water pumping system and compare it with diesel-powered pump. *Jordan J Mech Ind Eng.* v. 5, p. 273–280, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório 2017. Brasília: ANA, no prelo. 2017.

ANDRADE, M.G. **Efeito de um sistema de bombeamento de água fotovoltaico na operação de um microaspersor.** 2013. 97p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

ARSLAN, O. Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya, Turkey. *Energy.* v. 35, p. 120–131, 2010.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Capacidade instalada de energia solar vai crescer 115% em 2018, diz associação, 2018. Disponível em: < <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/capacidade-instalada-de-energia-solar-vai-crescer-115-em-2018-diz-associacao.html> >. Acessado em: 20 fev. 2019.

AVRUTIN, V.; IZYUMSKAYA, N.; MORKOÇ, H. Semiconductor solar cells: recent progress interrestrial applications. **Superlattices Microstruct.** v. 49, p. 337–364, 2011.

BAUM, M.C.; DUKES, M.D.; MILLER, G.L. Analysis of Residential Irrigation Distribution Uniformity. **Journal of irrigation and drainage engineering**, Florida, v. 131, n. 4, p. 336-341, 2005.

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.

BERNARDO, S; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2005.

BEZERRA, A.E.; RODRIGUES, L.G.; GOMES, A.C.P.; PEREIRA, J.A.; OLIVEIRA, C. W. Uniformidade de distribuição em irrigação por microaspersão na cultura do coco. XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, UFS - São Cristóvão, SE. P. 1363-1368, 2015.

BHATTACHARYYA, S.C. Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis. **Journal of Energy for Sustainable Development**. v. 16, p. 260-271, 2012.

BIOSEMENTES. Microaspersor rotativo bocal violeta. Disponível em: <<https://www.biosementes.com.br/loja/item/Microaspersor-rotativo-bocal-violeta-52-L%7B47%7Dh-estaca-de-36-cm-e-microtubo.html>>. Acessado em: 17 mar. 2018.

CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000. **Instruction manual CR1000 measurement and control system**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/cr1000>>. Acessado em: 03 fev. 2019.

CEYLAN, I.; GUREL, A.E.; DEMIRCAN, H.; AKSU, B. Cooling of photovoltaic module with temperature controlled solar collector. **Energy and Buildings**, v.72, p. 96 – 101, 2014.

CHAAR, L.E.; LAMONT, L.A.; ZEIN, N.E. Review of photovoltaic technologies. **Renew Sustain Energy Rev**. v. 15, p. 2165–2175, 2011.

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.

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.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

COELHO, E.F.; FILHO, M.A.C.; OLIVEIRA, S.L. **Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e uso de água**. Embrapa, Bahia, 2005.

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002, 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Piracicaba: ESALQ/USP, 2002.

COSTA, A.F.B.; EPPRECHTE.K.; CARPINETTI, L.C.R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito. SUNDATA. 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>> Acesso em: 21 ago. 2017.

DEMIRBAS, A. Global renewable energy resources. Energy Sources Part A: Recovery, **Utili Environ Eff**. v. 28, p. 779–792, 2006.

DEVABHAKTUNI, V.; ALAM, M.; DEPURU, S.S.S.R.; GREEN, R.C.; NIMS, D.; NEAR, C. Solar energy: trends and enabling technologies. **Renew Sustain Energy Rev**. v. 19, p. 555–564, 2013.

DINCER, F. The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p.5135-5142, 2011.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION - EPIA. (2012). Market Report 2011. Global Wind Energy Council (GWEC). (2011). Global Wind Statistics.

FAGANELLO, C.R.F.; FOLEGATTI, M.V.; GONÇALVES, R.A.B.; LUCAS, A.A.T. Uso da água de irrigação e gestão de recursos hídricos na microbacia do Ribeirão dos Marins do município de Piracicaba/SP. **Irriga, Botucat**, v. 12, p. 456-470, 2007.

FOSTER, R.; MAJID, G.; COTA, A. A testbook of solar energy. *Renew Energy Environ*. 2014. Disponível em <www.amazon.com/Solar-Energy-Renewable-Environment>. Acesso em: 22 ago. 2017.

FRAUNHOFER Institute for solar energy system – ISE. **Photovoltaics Report. 2016. Disponível em: <www.ise.fraunhofer.de>**. Acessado em: 11 fev. 2018.

GANGOPADHYAY, U.; JANA, S.; DAS, S. State of Art of Solar Photovoltaic Technology. In: *Proceedings of International Conference on Solar Energy Photovoltaics*. 2013.

GHONEIM, A.A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. **Energy Convers Manag**. v. 47, p. 1449–1463, 2006.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C. Photovoltaic materials, past, present, future. **Sol Energy Mater Sol Cells**. v. 62, p. 1–19, 2000.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H.W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. **Mater Sci Eng**. v. 40, p. 1–46, 2003.

GOETZBERGER, A.; LUTHER, J.; WILLEKE, G. Solar cells: past, present, future. **Sol Energy Mater Sol Cells**. v. 74, p. 1–11, 2002.

GÓMEZ, M.F.; SILVEIRA, S. Delivering off-grid electricity systems in the Brazilian Amazon. **Journal of Energy for Sustainable Development**. v. 16, p. 155 -167, 2012.

HOSENUZZAMAN, M., et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renew Sustain Energy**. v. 41, p.284–297, 2015.

HOFFMANN, W. PV solar electricity industry: market growth and perspective. **Sol Energy Mater Sol Cells**. v. 90, p. 3285–3311, 2006.

HSIEH J.S. **Solar energy engineering**. New Jersey: Prantice Hall. 1986.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Snapshot of global photovoltaic markets**. Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2017. Disponível em: <http://www.ieapvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2018.

INSTRUTEMP. **Estação meteorological com display touch screen**. Disponível em:< <http://www.insmart.com.br/produtos/arquivos/itwh-1080-1-6022.pdf>>. Acessado em: 03 fev. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY [IEA]. G-20 Clean Energy, and Energy Efficiency Deployment and Policy Progress. IEA, 2011.

INTERNATIONAL JOURNAL ON HYDROPOWER & DAMS [IPCC]. 2010 World Atlas & Industry Guide. Disponível em: < INTERGOVERNMENT PANEL ON CLIMATE CHANGES. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2011. Disponível em: <[http:// www.ipcc-wg3.de/ publica tions/special-reports](http://www.ipcc-wg3.de/publications/special-reports)>. IPCC, 2011. Acessado em: 22 nov. 2018.

JÄGER-WALDAU, A. Snapshot of photovoltaics - March 2017. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 783, 2017.

JOENSUU, K.; SINKKO, T. Environmental sustainability and improvement options for agribiomass chains: Straw and turnip rape. **Biomass and Bioenergy**. v. 83, p. 1-7, 2015.

JUSTI, A.L.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, S.C. Índice de capacidade do processo na avaliação de irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal. v. 30, n. 2, 2010.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**, Chapman-Hall Publishers, 1990, Utah State University, Copyright to 2009. 314p.

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.

KUI-QING, P.; SHUIT-TONG, L. Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion. **Adv Mater**. v. 23, p.198-210, 2011.

KUMAR, A.; KUMAR, K.; KAUSHIK, N.; SHARMA, S.; MISHRA, S. Renewable energy in India: current status and future potentials. **Renew Sustain Energy Rev**. v. 14, p. 2434–2442, 2010.

LACERDA, J.S.; VAN DEN BERGH, J.C.J.M. Diversity in solar photovoltaic energy: implications for innovation and policy. **Renew Sustain Energy Rev**. v. 54, p. 331–40, 2016.

LECCISI, E.; RAUGEI, M.; FTHENAKIS, V. The Energy and environmental performance of ground-mounted photovoltaic systems—A timely update. **Energies**, v. 9, n. 8, p. 622, 2016.

LIMA, L.O.; OLIVEIRA, J.P.; ALMEIDA, R.R.; DINIZ, M.R.M.; MIRANDA, M.S.; SOUZA, J.S.C. Estimativa da eficiência de um sistema de irrigação por microaspersão. VI CONNEPI, **Anais...** Palmas, Tocantins, 2012, 8p.

LISE, W.; LAAN, J.V.D. Investment needs for climate change adaptation measures of electricity power plants in the EU. **Energy for Sustainable Development**, v. 28, p. 10-20, 2015.

LÓPEZ-LUQUE, R.; RECA, J.; MARTÍNEZ, J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaics system for deficit irrigation of olive orchards. **Applied Energy**, London. v. 149, p.13-23, 2015.

LOPEZ, J.R.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNADEZ, J.F.G. 2. ed. **Riego localizado**. Madrid: Centro Nacional de Tecnologia de Regadios, p. 217-229, 1992.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2012. 355p.

MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. Manejo da irrigação. In: COSTA, E. F. da; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Brasília: Embrapa, SPI, p.129-158, 1994.

MARTINS, C.L.; BUSATO, C.; SILVA, S.F.; RODRIGUEZ, W.N.; REIS E.F. Avaliação do desempenho de irrigação no sul do Estado do Espírito Santo. **Revista Agroambiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 236-241, 2013.

MAUAD, F.F.; FERREIRA, L. DA C.; TRINDADE, T.C.G. **Energia Renovável no Brasil**. EESC/ESP São Carlos, Brasil. 2017: 348 p.

MAZZER, H.R.; PLETSCHE, T.H.; CRUZ, R.L.; VILAS BOAS, M.A.; OLIVEIRA, E.F. Avaliação de desempenho do microaspersor Amanco em bancada de teste. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.3, p.426-437, 2008.

MEADOWNS, D.; RANDERS, J.; DENNIS MEADOWNS. **The limits to growth, the 30 years update** London, UK. 2004: 363 p.

MICHELS, R.N., RICIERI, R., GNOATTO, E., SOUSA, S.N.M., SILVA, S.L., FISCHBORN, M. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 370 – 379, 2009.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M.Z. A comparative analysis of long-term field tests of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. **Energy and Sustainable Development**, v.38, p. 93-101, 2017.

MITTAL, M.L.; SHARMA, C.; SINGH R. Estimates of emissions from coal fired thermal power plants in India. In: Proceedings of international emission inventory conference. v. 14, p. 1–22, 2012.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – 4 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513p.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. **Estatística aplicada à Engenharia**. 2. ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Capítulo 8: Controle estatístico da qualidade p. 279-309, 2004.

MORALES, L.R.V. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. Dissertação (Pós-Graduação Stricto Sensu). Energia. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2011.

MUNDO-HERNÁNDEZ, J.; ALONSO, B.C.; HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, J.; CELISCARRILLO, B. An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.31, p. 639-649, 2014.

NIEDZIALKOSKI, R.K. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57f. Dissertação (Mestrado) – Curso de pós-graduação stricto sensu em energia na agricultura, departamento de centro de ciências exatas e tecnológicas, Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

NOGUEIRA, C.E.C.; BEDIN, J.; NIEDZIAŁKOSKI, R.K.; de SOUZA, S.N.M.; das NEVES, J.C.M. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panel in a

water pumping system in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1610 – 1616, 2015.

NOGUEIRA, C.U. **Utilização de sistemas, solar e eólico, no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

OLIVEIRA, E. V.; ARRAES, F. D. D.; TORRES W. L. V.; SOUZA, L. A.; VIEIRA, W. L. Desempenho de sistemas de irrigação por microaspersão e estimativa de demanda hidráulica para diferentes fruteiras no município de Iguatu – CE, **Revista Conexão – Ciência e tecnologia**. Fortaleza/CE, v. 10, n. 2, p. 40-46, 2016.

PALLARETTI, L.F.; ZANINI, J.R.; VECHIATO, D.A.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T. Análise dos coeficientes de aplicação de microaspersores. II Inovagri International Meeting. **Anais**. Fortaleza, p. 2979-2985, 2014.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R.A. review of solar photovoltaic technologies. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 15, p. 1625–1636, 2011.

PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renew Sustain Energy Rev**, v.19, p.255–274, 2013.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Brasil: Rio de Janeiro, 2014. 530p.

PROTOGER, C.; PEARCE, S. Laboratory evaluation and system sizing charts for a second generation direct PV-powered, low cost submersible solar pump. **Sol Energy**, v.68, p. 453–474, 2000.

RAZYKOV, T.M.; FERKIDES, C.S.; MOREL, D.; STEFANAKOS, E.; ULLAL, H.S.; UPADHYAYA, H.M. Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. **Sol Energy**, v.85, p.1580–1608, 2011.

REIS, M.M.; PALADINI, E.P.; KHATOR, S.; SOMMER, W.A. Artificial intelligence approach to support statistical quality control teaching. **Computers & Education**, v. 47, p. 448–464, 2006.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.S.T. Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição. **Série Monográfica Qualidade-Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre, RS. 2012, 172p.

SAHU, B.K. Wind energy developments and policies in China: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

SAMPAIO, P.G.V.; GONZÁLES. M.O.A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 77, p. 590 – 601, 2017.

SANTOS, J.A.A.; MICHEL, R.N.; GNOATTO, E. Desempenho d um sistema de bombeamento fotovoltaico na região oeste do Paraná. **Revista Agroambiental**, Pouso alegre, v. 2, p. 22-25, 2010.

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

SHORT, T.; OLDACH, R. **Solar powered water pumps: the past, the present - and the future**. *Jour. of Solar Energy Engineering*. v.125, p. 76 – 82, 2003.

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: <www.sunpompus.com/photo/336?d=2/12/2018 14:39:19PM>. Acessado em fevereiro de 2018.

SOTANKE, V.C.; KALAMKAR, V.R. Solar photovoltaic water pumping system – A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1038 – 1067, 2016.

TARJUELO, J.M.; RODRIGUEZ-DIAZ, J.A.; ABADIA, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORA, C.; MORENO, M.A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: lessons from Spanish case studies. **Agricultural Water Management**. v. 162, p. 66-77, 2015.

TIMILSINA, G.R.; KURDGELASHVILI, L.; NARBEL, P.A. Solar Energy: Markets, economics and policies. v. 16, p. 449 – 465, 2012.

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

TYAGI V.V.; RAHIM N.A.A.; RAHIM N.A.; SELVARAJ, J.A.L. Progress in solar PV technology: research and achievement. **Renew and Sustainable Energy Reviews**. v. 20, p. 443–461, 2013.

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

VICK, B. D., NEAL, B. A. 2012. **Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems.** Jour. of Solar Energy. 86. 1197 – 1207.

ZAPATA, N.; SALVADOR, R.; CAVERO, J.; LECINA, S.; LÓPEZ, C.; MANTERO, N.; ANADÓN, R.; PLAYÁN E. Field test of an automatic controller for solid-set sprinkler irrigation. **Irriga Science**, v. 31, p. 1237-1249, 2013.

ZHANG, L.; MERKLEY, G.P.; PINTHONG, K. Assessing whole-field sprinkle irrigation application uniformity. **Irrigation Science**, v. 31, p. 87-105, 2013.

ZILLI, B.M. **Análise de um sistema autônomo de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos amorfo e policristalino. 2018. 52f.** Dissertação (Mestrado) – Curso de pós-graduação stricto sensu em engenharia de energia na agricultura, departamento de centro de ciências exatas e tecnológicas, Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, S. Summary for policymakers. In: IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 2011.

YIFA. Sensor de Fluxo de Água 1/2" YF-S201. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-fluxo-de-agua-1-2-yf-s201.html>>. Acessado em: 18 mar. 2018.