

RAFAEL GOMES PAES

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO FOTOVOLTAICO
AUTÔNOMO E COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Paes, Rafael Gomes, 1992-
P126d Desempenho de um sistema de irrigação fotovoltaico
2019 autônomo e com armazenamento de energia em baterias / Rafael
Gomes Paes. – Viçosa, MG, 2019.
x, 54f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Catariny Cabral Aleman.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Baterias.
3. Irrigação por aspersores. 4. Irrigação por gotejamento.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22 ed. 621.47

RAFAEL GOMES PAES

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO FOTOVOLTAICO
AUTÔNOMO E COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2019.



Rodolpho Vilela Alves Neves



Fernando França da Cunha



Catariny Cabral Aleman
(Orientadora)

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.”
(John F. Kennedy)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre me dar forças e iluminar meus passos.

Agradeço também meus pais, Sheila e Luiz Renato, pelo incentivo, confiança, amor e por sempre estar presente fornecendo apoio.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À professora Catariny Cabral Aleman, pela orientação, ensinamento, confiança, apoio e por sempre que necessário me exigir melhoras.

Aos professores Heverton A. Pereira e Hewlley M. A. Imbuzeiro, pela coorientação e ensinamentos.

Ao professor Fernando, pela “coorientação”, ensinamentos, paciência em sala de aula, confiança, apoio e indicação para vaga de emprego.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Anauger pela concessão dos materiais para realização da pesquisa.

Aos meus amigos Sávio, Daniel e Thallita por terem contribuído muito para conclusão dessa fase.

Aos meus amigos de república e de Viçosa durante esses dois anos em Viçosa, pela amizade, companheirismo e conselhos.

Aos meus amigos da pós-graduação e colegas do GESAI pela amizade e companheirismo.

Enfim, a todos que me ajudaram de alguma forma na execução desse projeto, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

RAFAEL GOMES PAES nasceu no dia 13 de maio de 1992 em Cachoeiro de Itapemirim, ES, filho de Luiz Renato Fraga Paes e Sheila Cristina Cardoso Gomes, irmão de Hugo e Augusto Gomes Paes.

Em janeiro de 2015, concluiu o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2017, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa em fevereiro de 2019.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1. Sistema Anauger Solar R100. FONTE: ANAUGER (2019).	10
Figura 2.1.2. Sistema com baterias para armazenar energia (CB).....	10
Figura 2.1.3. Curva de desempenho da bomba Anauger R100.	12
Figura 2.1.4. Sistemas de irrigação por gotejamento.....	13
Figura 2.1.5. Sistema simulado de irrigação.....	14
Figura 2.1.6. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada tratamento. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.	20
Figura 2.1.7. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUD observados para cada tratamento. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.	20
Figura 2.1.8. Regressão CUC, CUD e vazão em função da radiação solar.	22
Figura 2.1.9. Variação da vazão em cada repetição e radiação solar observada para as avaliações com o PCSB.	23
Figura 2.1.10. Variação da pressão em cada teste.	24
Figura 2.1.11. Volumes diário médio mensal bombeado por mês para NSB.	25
Figura 2.1.12. Volumes diário médio mensal bombeado por mês para PCSB.	26
Figura 2.1.13. Boxplot volume diário médio mensal bombeado pelos dois sistemas.	27
Figura 2.1.14. Curvas de desempenho em função da potência fornecida. FONTE: CAMPOS; ALCANTARA (2018).....	29
Figura 2.2.1. Sistema Anauger Solar R100. Fonte: ANAUGER (2019).	38
Figura 2.2.2. Sistema com baterias para armazenar energia (CB).....	38
Figura 2.2.3. Curva de desempenho da bomba Anauger R100.	40
Figura 2.2.4. Avaliação da uniformidade utilizando metodologia para aspersão.	42

Figura 2.2.5. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada tratamento utilizando a metodologia para irrigação localizada. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.	45
Figura 2.2.6. Regressão CUC e vazão em função da radiação solar.....	46
Figura 2.2.7. Variação da vazão em cada repetição e radiação solar observada para as avaliações com MSB.....	47
Figura 2.2.8. Variação da pressão em cada repetição.	47
Figura 2.2.9. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada tratamento utilizando a metodologia para aspersão convencional. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.	48
Figura 2.2.10. Variação da radiação solar durante cada repetição.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do NSB	18
Tabela 2.1.2. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do PCSB	19
Tabela 2.1.3. Teste de média dos valores de CUC e CUD.	20
Tabela 2.1.4. Volume bombeado por cada sistema para mesma condição de radiação solar.	30
Tabela 2.1.5. Custo fixo adicional do sistema com baterias.	31
Tabela 2.2.1. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do MSB método irrigação localizada	43
Tabela 2.2.2. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do MSB método aspersão	44
Tabela 2.2.3. Teste de média dos valores de CUC metodologia irrigação localizada.	45
Tabela 2.2.4. Teste de média dos valores de CUC metodologia aspersão convencional.	48
Tabela 2.2.5. Espaçamento de emissores, em função do diâmetro molhado e da velocidade do vento.....	50

RESUMO

PAES, Rafael Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Desempenho de um sistema de irrigação fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias.** Orientadora: Catariny Cabral Aleman. Coorientadores: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro e Heverton Augusto Pereira.

Alternativas sustentáveis para fornecimento de energia têm sido implementadas em diferentes áreas da agricultura. A energia fotovoltaica é uma energia limpa e renovável, que tem sido amplamente utilizada para o bombeamento de água na irrigação. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de sistemas de irrigação localizada fotovoltaico considerando uma condição de conversão direta (autônomo) da energia solar e outra com armazenamento da energia em baterias. Foram testados dois sistemas de irrigação localizado: gotejamento (vazão de 4 L h^{-1}), utilizando emissores normal e autocompensante, e microaspersão (vazão de 65 L h^{-1}). Para avaliar o desempenho dos sistemas de irrigação foi determinado os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUC e CUD). Além disso, foram comparados os volumes bombeados pelo sistema autônomo e com armazenamento de energia. As informações obtidas foram submetidas a análise de regressão correlacionando com dados de radiação solar. Obteve-se o coeficiente de claridade horário para as condições testadas, o que confirma a ocorrência de diferentes condições climáticas durante os testes. Foi realizado um estudo do potencial de bombeamento dos sistemas irrigação por gotejamento fotovoltaico autônomos para todo o Brasil para um período de 01/02/2018 a 31/01/2019. Ambos os sistemas de bombeamento apresentaram valores de coeficiente de uniformidade de distribuição classificados com excelentes. O Brasil possui um grande potencial de utilização do sistema fotovoltaico autônomo. O sistema autônomo bombeou mais do que o dobro de água do que o sistema com armazenamento de energia, o volume bombeado pelas baterias totalmente recarregadas foi de 2420 L dia^{-1} . Conclui-se que os sistemas de irrigação localizada fotovoltaico autônomo utilizando emissores normais é viável e apresenta um grande potencial de utilização para o território nacional em sistemas de pequeno porte. Além disso, o sistema com armazenamento de energia em baterias no presente trabalho não apresentou vantagens.

ABSTRACT

PAES, Rafael Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Performance of an autonomous photovoltaic irrigation system with energy storage in batteries** Adviser: Catariny Cabral Aleman. Co-advisers: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro and Heverton Augusto Pereira.

Sustainable alternatives for energy supply have been implemented in different areas of agriculture. Photovoltaic energy is a clean and renewable energy, which has been widely used for water pumping in irrigation. The objective of this work was to evaluate the performance of photovoltaic localized irrigation systems considering a direct (autonomous) conversion condition of solar energy and another with energy storage in batteries. Two systems of localized irrigation were tested: drip (flow of 4 L h⁻¹), using normal and self-compensating emitters, and microaspersion (flow of 65 L h⁻¹). In order to evaluate the performance of the irrigation systems, the Uniformity and Distribution Coefficient (CUC and CUD) was determined. In addition, the volumes pumped by the autonomous system and with energy storage were compared. The obtained data were submitted to regression analysis correlating with solar radiation data. The coefficient of time clarity was obtained for the conditions tested, which confirms the occurrence of different climatic conditions during the tests. A study of the pumping potential of autonomous photovoltaic drip irrigation systems for all Brazil was carried out for a period from 02/01/2018 to 01/31/2019. Both pumping systems presented values of uniformity coefficient of distribution classified with excellent. Brazil has a great potential to use the autonomous photovoltaic system. the autonomous system pumped more than twice as much water as the energy-stored system, the volume pumped by the fully recharged batteries was 2420 L dia⁻¹. It is concluded that autonomous photovoltaic localized irrigation systems using normal emitters is feasible and presents a great potential of use for the national territory in small systems. In addition, the system with energy storage in batteries in the present work did not present advantages.

SUMÁRIO

1. Introdução Geral	1
1.1 Referências	4
2. Artigos Científicos	6
2.1 Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias	6
2.1.1 Introdução	6
2.1.2 Material e métodos	9
2.1.3 Resultados e discussão	17
2.1.4 Conclusões	31
2.1.5 Referências	32
2.2 Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias	35
2.2.1 Introdução	35
2.2.2 Material e métodos	37
2.2.3 Resultados e discussão	43
2.2.4 Conclusões	51
2.2.5 Referências	52

1. Introdução Geral

No Brasil, a principal fonte de energia elétrica são as usinas hidrelétricas, que necessitam de grandes áreas inundadas e geram grandes impactos ambientais quando comparado com as fontes eólica e solar, consideradas como limpas e inesgotáveis (MICHELS et al., 2009). Em decorrência do crescente número de conflitos devido à crise hídrica causada pelo volume anual de chuvas abaixo da média histórica, o Brasil tem utilizado fontes alternativas para atender sua demanda, principalmente derivados do petróleo e carvão mineral.

No entanto, nos últimos anos a implantação de Energias Renováveis (ER) vem crescendo rapidamente, impulsionada por políticas governamentais, pela redução do custo de algumas tecnologias de ER, pela forte oscilação dos preços dos combustíveis fósseis e das tarifas de energia elétrica, acrescido da necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2011). Entre as ER se destaca a energia fotovoltaica, que converte de forma direta a energia solar em energia elétrica através dos painéis solares.

De acordo com De Souza e Macagnam (2018), embora a geração de energia através de meios sustentáveis tenha aumentado, apenas 2% da capacidade de instalação de energia fotovoltaica global é utilizada. Esse fato é justificado pela demanda de estudos relacionados aos fatores econômico e ambiental, além de definir modelos que estimem adequadamente a radiação para as diferentes regiões do globo.

O Brasil apresenta um grande potencial para instalação de energia fotovoltaica. No dia 21 de fevereiro de 2019 o país possuía uma potência outorgada de 1.987.719 kW, representando 1,21% da energia gerada (ANEEL, 2019).

Segundo Michels et al. (2009), a geração de energia fotovoltaica é função da radiação solar e temperatura. A radiação solar varia em função da latitude, estação do ano, nebulosidade e horário do dia. Kelly et al. (2010) destacam que regiões de maior latitude apresentam seus níveis máximos no verão, enquanto que as regiões próximas ao equador apresentam maior radiação solar média anual com pequenas variações ao longo do ano, com exceção regiões com alto índice de nuvens, como a Floresta Amazônica.

A eficiência do painel fotovoltaico em gerar energia elétrica é um fator muito importante, interferindo diretamente no tempo de retorno do sistema de bombeamento

fotovoltaico. É importante se atentar ao material utilizado na fabricação, posicionamento e limpeza periódica dos painéis.

O material mais empregado na produção de células fotovoltaicas é o silício, acrescido de pequenas quantidades de outros materiais. Segundo Chandel et al. (2015), 90% das instalações fotovoltaicas do mundo e mais de 80% da indústria mundial de painéis solares utilizam células de silício. As células rígidas de silício monocristalino apresentam em condições de laboratório eficiência de 25,6%, já as células rígidas de silício policristalino têm 20,8% de eficiência.

A respeito do posicionamento, o ângulo de inclinação e a orientação dos painéis fotovoltaicos são outros parâmetros importantes para melhorar o desempenho do gerador fotovoltaico fixo, que pode ser determinado a valores mensais, sazonais e anuais para cada localização. O posicionamento correto do painel aumenta a potência gerada.

A energia fotovoltaica tem-se destacado no bombeamento de água (WAZED et al., 2018). A grande vantagem da utilização de sistemas fotovoltaicos para irrigação é que no período da primavera e verão em que são observados os maiores valores de evapotranspiração de referência (ET_0), ocorre maior bombeamento de água pelo sistema devido o maior número de horas de insolação (MICHELS et al., 2009).

Existem duas gerações de bombeamento fotovoltaico. Segundo Chandel et al. (2015), a primeira geração utilizava bombas centrífugas (dinâmicas), acionadas por motores de corrente contínua ou corrente alternada, com confiabilidade comprovada a longo prazo, menor exigência de manutenção e eficiência hidráulica variando de 25% a 35%. Porém, o funcionamento em baixa rotação diminui a eficiência dessas bombas, sendo uma limitação em condições de baixa radiação solar.

Já a segunda geração dos sistemas de bombeamento fotovoltaicos utiliza bombas volumétricas, também conhecidas como bombas de diafragma, caracterizadas por menores requisitos de potência, baixo custo e alta eficiência hidráulica, podendo atingir até 70%. Nessas bombas a vazão é diretamente proporcional à amplitude da tensão aplicada (CHANDEL et al. 2015). Segundo Kolling et al. (2004), as características citadas anteriormente tornam as bombas de diafragma mais adaptadas à aplicação direta no bombeamento por energia solar. Nesse presente estudo, o kit comercial escolhido funciona com uma bomba vibratória, que é um exemplo de bomba volumétrica.

Os sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos, sem armazenamento de energia, trabalham oscilando a vazão e pressão, já que a radiação solar não é constante. Para contornar esse problema, adotam-se mecanismos de armazenamento de energia, em baterias ou bombeando a água para uma altura geométrica maior em relação a área irrigada. Porém, essas alternativas aumentam o custo. Outra alternativa que tem surgido para solucionar esse problema são os sistemas híbridos, que combinam energia fotovoltaica e outras fontes de energia para proporcionar segurança do fornecimento de energia, em casos de condição de baixa radiação solar (López-Luque et al., 2015).

Carroquino et al. (2015) afirmam que a solução econômica ideal para irrigação por gotejamento na região do Mediterrâneo é o sistema híbrido painel fotovoltaico e diesel. A presença de geradores a diesel eliminou a necessidade de superdimensionar a geração de energia fotovoltaica, para garantir a segurança energética. Além disso, o gerador a diesel operou apenas algumas horas por ano e a fração de energia renovável era muito alta. Porém, o modelo de sistema híbrido e sua viabilidade não podem ser generalizados para todas as localidades porque dependem de fatores econômicos e das condições climáticas de cada região.

Segundo Kelly et al. (2010), a viabilidade econômica é determinada pela comparação dos custos fixos e variáveis dos sistemas de irrigação fotovoltaicos com os sistemas de irrigação baseados em diesel e energia proveniente da rede elétrica. Porém, os custos de capital inicial para os sistemas fotovoltaicos são muito maiores em todos os casos, ocorrendo a amortização devido aos baixos custos do ciclo de vida dos sistemas solares.

Sistemas de irrigação fotovoltaico apresentam maior viabilidade quanto maior o seu tempo de funcionamento, que é função das características do solo, demanda hídrica da cultura, condições climáticas e número de ciclos de plantio. Dessa forma, obtém-se a viabilidade econômica através de estudos de caso ou criação de modelos de simulação. Segundo Chandel et al. (2015), a análise de custo indica que a irrigação movida a energia solar é economicamente viável em relação aos sistemas diesel e rede elétrica, com retorno do investimento encontrado entre 4 e 6 anos.

O alto custo inicial indica a provável necessidade de financiamentos. Dessa forma, em grandes projetos de irrigação o alto valor para a implantação de grandes sistemas de bombeamento fotovoltaico pode constituir a própria barreira à instalação

bem-sucedida, além de demandarem enormes áreas para instalação dos painéis (CHANDEL et al., 2015).

Dessa forma, o interessante é utilizar sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos por apresentarem menor custo, fácil instalação e manutenção. Porém, a literatura a respeito da eficiência de irrigação desses sistemas é praticamente inexistente.

O objetivo desse trabalho foi avaliar e comparar a eficiência de irrigação realizada por irrigação localizada a partir de um kit comercial de bombeamento fotovoltaico autônomo (SB - sem bateria) com outro que utiliza baterias para armazenamento de energia (CB – com bateria).

1.1 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA ELETRICA – ANEEL. **Banco de informações de Geração.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 21 de fev. de 2019.

CARROQUINO, J.; DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. **Renewable energy**, v. 76, p. 566-574, 2015.

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.

DE SOUZA, G. K.; MACAGNAN, M. H. Comparação de modelos de radiação difusa horária a partir de dados medidos pela rede sonda em algumas cidades do Brasil. In: **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018.** 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). O. EDENHOFER; R. PICHES-MADRUGA; Y. SOKONA; K. SEYBOTH; P. MATSCHOSS; S. KADNER; T. ZWICKEL; P. EICKEMEIER; G. HANSEN; S. SCHLÖMER; C. VON STECHOW (eds). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. **Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011, 1075 p.

KELLEY, L. C. et al. On the feasibility of solar-powered irrigation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2669-2682, 2010.

KOLLING, E. M.; DE SOUZA, S. N.; RICIÉRI, R. P.; SAMPAIO, S. C.; DALLACORT, R. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento

de água Operational analysis of a photovoltaic water pumping (PV) system. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 527-535, 2004.

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

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

WAZED, S. M. et al. A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1206-1225, 2018.

2. Artigos Científicos

2.1 Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias

Resumo: A necessidade de utilizar fontes renováveis de energia tem aumentado a cada dia, entre elas se destaca a energia fotovoltaica, tendo o território brasileiro um enorme potencial para utilizar essa fonte de energia. A energia fotovoltaica tem se destacado no bombeamento de água, existindo sistemas de irrigação que funcionam de forma autônoma, sem armazenamento de energia, ocorrendo assim, variação da pressão e vazão em função da radiação solar. O objetivo desse trabalho foi avaliar e comparar a eficiência de irrigação por gotejamento a partir de um kit comercial de bombeamento fotovoltaico autônomo (SB - sem bateria) com outro que utiliza baterias para armazenamento de energia (CB - com bateria), testando emissores normais e autocompensantes. Foram calculados os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUC e CUD) de ambos os sistemas de bombeamento com os dois tipos de emissores, sendo que no sistema autônomo a radiação solar foi diferente em cada teste, para avaliar o seu efeito. Com isso foi estimado o potencial do kit de bombeamento fotovoltaico autônomo para todo o Brasil. A utilização de sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos utilizando emissores normais de qualidade é mais viável, com forte potencial de implementação em todo território brasileiro e o armazenamento de energia em baterias não apresentou vantagens.

Palavras chaves: energia fotovoltaica, bateria, irrigação localizada, CUC e CUD.

2.1.1 Introdução

A busca por padrões sustentáveis de produção de alimentos para atender o crescente aumento populacional tem acarretado discussões sobre a questão energética (ALVARENGA et al., 2014). O emprego crescente de novas tecnologias tem proporcionado um desenvolvimento acelerado, ocasionando melhoria da qualidade de vida da população e aumento da produção de alimentos. Essa evolução, no entanto, está vinculada ao maior consumo de energia elétrica.

O setor energético brasileiro sofre com a falta de redes de distribuição de energia por todo território nacional, principalmente nas regiões rurais do Norte e Nordeste. Uma vez que o Brasil apresenta distribuição populacional irregular, regiões

de baixa densidade populacional afastadas de centros urbanos são geralmente as mais afetadas (DAL BEM et al., 2016). Além disso, observa-se um aumento constante das tarifas de energia.

Um outro inconveniente para o setor energético nos últimos anos é o aumento do preço do diesel, desestimulando a sua utilização e impulsionado a procura por energias alternativas, em especial a energia fotovoltaica (WAZED et al., 2018). Atrelado a notável dependência do ser humano por energia elétrica, estas novas fontes vêm sendo altamente exploradas com o objetivo de atingir um novo modelo de desenvolvimento, atendendo a demanda energética e favorecendo o desenvolvimento econômico.

Dessa forma, a utilização de painéis fotovoltaicos (geradores) para produção de eletricidade através da energia solar está em ascensão nos últimos anos, favorecida pela diminuição dos custos de módulos fotovoltaicos e aumento da eficiência dos mesmos, apresentando valores médios em campo da ordem de 15% (LÓPEZ-LUQUE et al., 2015). Kelly et al. (2010) indicam que a vida útil média dos geradores é em torno de 25 anos, além do baixo custo de manutenção e a alta confiabilidade da tecnologia. Essas características tornam a energia solar fotovoltaica viável, já que os painéis representam 60% a 80% do custo total (CHANDEL et al., 2015).

O Brasil possui um enorme potencial para utilizar energia solar (MME, 2017). A Região Nordeste apresenta a maior média de radiação solar e a menor variabilidade anual, o que se deve à proximidade do equador, a baixa nebulosidade e a alta incidência de radiação solar. A radiação média anual brasileira é bem acima da média europeia, variando entre 1200 a 2400 kWh m⁻² ano⁻¹ (MME, 2017). Valores acima de 3000 kWh m⁻² ano⁻¹ são observados em regiões com o clima típico de deserto, como Austrália, norte e sul da África, Oriente Médio, parte da Ásia Central, parte da Índia, sudoeste dos EUA, México, Chile e Perú (MME, 2017).

Entre os principais usos da energia fotovoltaica se destaca o bombeamento de água (WAZED et al., 2018). Segundo Kelly et al. (2010), sistemas de irrigação fotovoltaico de pequeno porte são viáveis tecnicamente e economicamente, desde que as áreas apresentem altos índices de radiação solar. Reça et al. (2016), afirmam que sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos, sem armazenamento de energia, estão sendo usados para irrigação em todo mundo, para diferentes tipos de culturas em diferentes climas e condições de cultivo. Em comparação com os sistemas

convencionais, um sistema de irrigação fotovoltaico adequadamente projetado resulta em economias de custo significativas em longo prazo, principalmente em bombeamento de água em pequena escala (CHANDEL et al., 2015).

A maior parte dos conjuntos motobombas que funcionam acoplados a sistemas fotovoltaicos são de pequeno porte, tendo assim vazões pequenas. Dessa forma, o sistema de irrigação por gotejamento se destaca dentre os demais (HAMIDAT et al., 2003; WAZED et al., 2018), por necessitarem de menor altura manométrica, proporcionando maior vazão, além de apresentar maior eficiência de irrigação. Portanto, irriga-se uma área maior com o mesmo conjunto motobomba, o que o torna ainda mais viável economicamente.

Sistemas de irrigação necessitam operar em vazão e altura manométrica constantes, porém os painéis fotovoltaicos não geram uma potência contínua devido a variação da radiação solar incidente sobre o mesmo ao longo do dia. Para contornar este problema, geralmente adota-se um sistema de armazenamento de energia, o que encarece o sistema. Esse armazenamento se dá de duas formas distintas, através de baterias ou bombeando-se a água direto para um reservatório localizado em uma altura geométrica maior.

Segundo Reça et al. (2016) o uso de baterias tem várias desvantagens, como o aumento do custo fixo e variável do sistema, necessidade de espaço para seu armazenamento, maior manutenção e preocupações ambientais relacionadas ao descarte. Dentre as desvantagens da utilização de reservatórios pode-se citar a indisponibilidade de locais com elevação suficiente para a sua construção nas proximidades da área irrigada e, em projetos de maior dimensão, podem demandar estruturas enormes para o armazenamento de água, o que é economicamente inviável (LÓPEZ-LUQUE et al., 2015). Nesse trabalho, foram utilizadas baterias como estratégia de armazenamento de energia, uma vez que era a alternativa mais simples para as condições existentes no local do experimento.

Para solucionar esse problema, Reça et al. (2016) e López-Luque et al. (2015), propuseram sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos, com bombas centrífugas de velocidade variável e emissores sem compensação de pressão (normal). Essa combinação permite que a vazão do sistema de irrigação seja variada a fim de ajustar a energia consumida pelo sistema de irrigação à energia produzida pelo módulo

fotovoltaico. Contudo, a documentação sobre a eficiência de irrigação desses sistemas é praticamente inexistente.

O objetivo desse trabalho foi avaliar e comparar o coeficiente de uniformidade de distribuição de uma irrigação por gotejamento a partir de um kit comercial de bombeamento fotovoltaico autônomo (SB - sem bateria) com outro que utiliza baterias para armazenamento de energia (CB – com bateria). Além disso, quanto aos sistemas de irrigação foram testados emissores normais e autocompensantes.

2.1.2 Material e métodos

2.1.2.1 Implantação do experimento

O presente trabalho foi realizado durante o período de 24 de outubro a 20 de dezembro de 2018, estação da primavera. O sistema de irrigação foi montado na Área Experimental de Irrigação, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG. As coordenadas geográficas são latitude 20° 46' S e longitude 42° 52' O, estando a 675 m de altitude em relação ao nível do mar.

Foram utilizados dois conjuntos de bomba vibratória submersa movida a energia solar fotovoltaica, fabricante *Anauger*, modelo *Anauger Solar R100*. A bomba trabalha apoiada no fundo do reservatório, o que simplifica a instalação e permite o melhor aproveitamento do nível de água do reservatório.

O conjunto é composto por painel solar fotovoltaico, driver e bomba (Figura 2.1.1). O circuito de geração de eletricidade é formado por um módulo solar *Anauger* monocristalino de 175Wp, com tensão de 36Vdc. O driver tem a função de converter a corrente contínua gerada pelo painel em corrente alternada requerida pela bomba, além de controlar a tensão (ANAUGER, 2019).

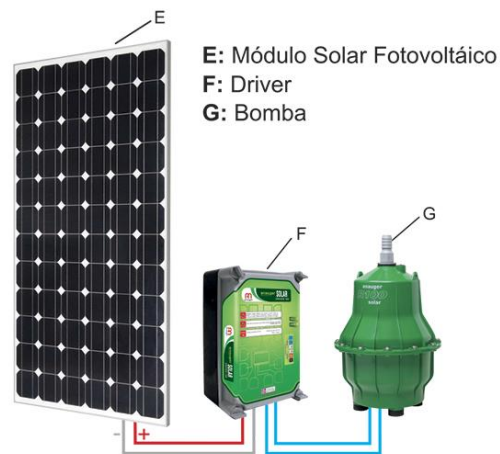


Figura 2.1.1. Sistema Anauger Solar R100. FONTE: ANAUGER (2019).

O sistema fotovoltaico sem armazenamento de energia (SB) foi instalado seguindo as recomendações do fabricante. O outro sistema que utiliza baterias para armazenar energia (CB) foi adaptado a três baterias estacionária Heliar Freedom DF1000 70Ah 12V, conectadas em série, e um controlador de carga Viewstar VS3048AU 30A 36V (Figura 2.1.2), além de ser necessário a utilização de mais um painel solar *Anauger*, conectados em série.



Figura 2.1.2. Sistema com baterias para armazenar energia (CB).

Essa adaptação foi realizada no Departamento de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG. O controlador de carga tem a função de controlar a tensão de recarga das baterias e a tensão de alimentação da bomba suprida pelas baterias (MEAH et al., 2008). Dessa forma, a energia elétrica

produzida pelos dois painéis passa pelo controlador de carga para depois recarregar as baterias. Quando a bomba é ligada, a energia armazenada nas baterias passa novamente pelo controlador de carga, depois pelo driver *Anauger* para posteriormente alimentar a bomba.

As duas bombas foram instaladas em uma caixa d'água de PVC de 1000 litros no nível do solo ao lado dos painéis fotovoltaicos, entretanto os sistemas não funcionavam simultaneamente. A água era então deslocada até os sistemas de irrigação por uma tubulação de PVC com diâmetro nominal de 32mm.

Como o experimento foi realizado no Hemisfério Sul, os painéis fotovoltaicos foram posicionados para norte geográfico, com inclinação similar à latitude do local (ALVARENGA et al., 2014). Tal inclinação é importante para maximizar a geração de energia e se obter maior eficiência do sistema fotovoltaico devido à maior exposição à radiação solar.

As medidas de radiação solar, em $W\ m^{-2}$, foram feitas pela estação meteorológica automática Davis, através do seu piranômetro. A estação foi instalada no local do experimento e programada para coletar dados com intervalo de cinco minutos.

As leituras de pressão foram feitas com um Manômetro Digital Bronze - VKP – 064, posicionado antes do hidrômetro próximo aos dois sistemas de irrigação. Esse aparelho registra valores de pressão máxima e mínima durante cada teste. Para isso, no início de toda repetição os valores de pressão máxima e mínima eram zerados depois que o sistema pressurizava, sendo feita a leitura desses dados segundos antes de finalizar o teste.

A mediação da vazão em cada teste foi calculada através da relação hidrômetro analógico e tempo. No início e final de todo teste eram feitas as leituras de volume no aparelho, sendo a diferença entre o volume final e inicial dividido pelo tempo de duração para se encontrar a vazão média.

O fabricante da bomba disponibiliza apenas a curva de desempenho em altura manométrica (H), metros, em função da vazão (Q), $L\ dia^{-1}$, porém com essa curva não é possível dimensionar o sistema de irrigação. Dessa forma, foi traçada uma nova curva da bomba com a vazão em $L\ h^{-1}$, utilizando a bomba na potência máxima e em funcionamento constante. Para isso foi utilizado o sistema CB, onde foram imprimidas 7 perdas de carga diferentes no sistema simulando H e realizadas 3 leituras de vazão

para cada ponto de pressão, sendo utilizado o valor médio de Q para elaborar a nova curva de desempenho (Figura 2.1.3).

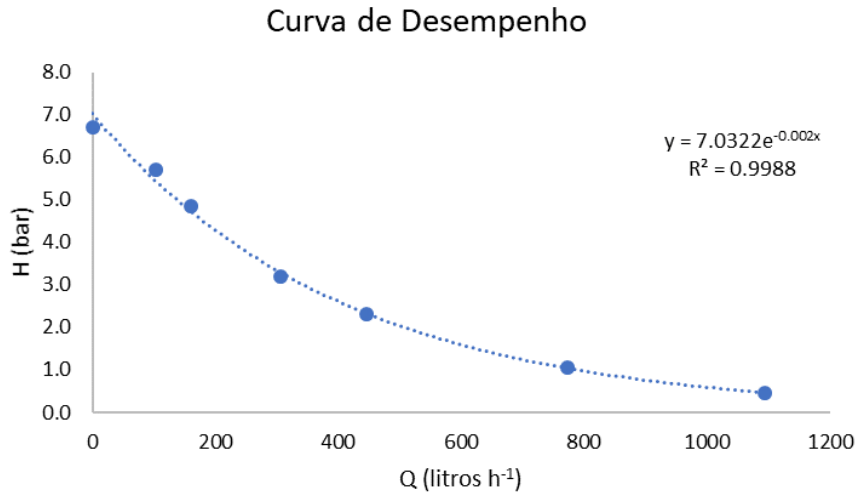


Figura 2.1.3. Curva de desempenho da bomba Anauger R100.

2.1.2.2 Sistema de irrigação por gotejamento fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias

Utilizaram-se dois sistemas de irrigação, um com emissores do tipo botão gotejador iDrop Normal (*Irritec*), com vazão de 4 L h⁻¹ na pressão de 1 bar; e outro com emissores do tipo botão gotejador iDrop PC (*Irritec*), de vazão 4 L h⁻¹, sendo esse autocompensante, com aproximadamente a mesma vazão no intervalo de 0,5 a 4,5 bar. Os dois sistemas de irrigação eram compostos por sete linhas laterais, espaçadas de 0,8 em 0,8 m, com cada linha lateral contendo 22 emissores, espaçados de 0,5 em 0,5 m, totalizando 154 emissores por sistema. A pressão de serviço média dos emissores foi de 1,5 bar, considerando a bomba operando em potência máxima, de forma que, quando a potência fornecida pelo painel diminuísse, os emissores ainda trabalhassem acima do limite inferior de pressão de serviço. Na Figura 2.1.4 podemos ver a esquerda o sistema com emissores autocompensante e a direita com emissores normal.



Figura 2.1.4. Sistemas de irrigação por gotejamento.

Essa avaliação contou com 4 sistemas de irrigação, sistema de irrigação com emissor normal com bomba sem armazenamento de energia em baterias (NSB), sistema de irrigação com emissor autocompensante com bomba sem armazenamento de energia em baterias (PCSB), sistema de irrigação com emissor normal com bomba com armazenamento de energia em baterias (NCB) e sistema de irrigação com emissor autocompensante com bomba com armazenamento de energia em baterias (PCCB).

As avaliações foram realizadas entre os dias 24 de outubro e 30 de novembro de 2018 (estação predominante: primavera). Os testes para o NSB e o PCSB foram realizados em dias e horários aleatórios, oscilando as condições de nebulosidade entre dias de céu aberto, poucas nuvens e nublados, com objetivo de variar ao máximo a radiação solar, para realização das análises de forma confiável.

Para o NSB e o PCSB foram feitos 24 testes de uniformidade para cada sistema. Devido um problema na estação meteorológica automática, para 7 avaliações do PCSB não foram registrados valores de radiação solar, sendo calculado apenas os coeficientes de uniformidade. Já para o NCB e o PCCB por não dependerem das condições climáticas, mas das baterias, além de trabalhar de forma constante devido ao controlador de carga, foram realizados apenas 7 testes para cada sistema.

2.1.2.3 Avaliação do volume bombeado pelo sistema SB e CB para mesma condição de radiação

Montou-se um sistema para simular a irrigação, retornando à água para dentro do mesmo reservatório (Figura 2.1.5), com o objetivo de comparar o volume bombeado por cada sistema para um mesmo dia. A pressão no sistema foi gerada pelo fechamento parcial do registro de gaveta localizado no final da tubulação, criando uma pressão de 1,5 bar, utilizando o sistema CB para regulagem do registro. O sistema SB funcionava durante todo o dia, enquanto o sistema CB recarregava as baterias, e durante a noite o sistema CB trabalha até descarregar as baterias. Fazendo-se as leituras no hidrômetro foi possível calcular o volume bombeado por cada sistema para uma mesma condição de radiação. Foram realizados 6 ensaios entre os dias 14 e 20 de dezembro de 2018.



Figura 2.1.5. Sistema simulado de irrigação.

2.1.2.4 Avaliação da autonomia das baterias do sistema CB

Para avaliar a autonomia das baterias carregadas, foram realizados 3 ensaios utilizando o mesmo sistema simulado de irrigação da Figura 2.1.5, entre os dias 01 e 05 de dezembro de 2018. A partir da recarga total das baterias o sistema era ligado e

operava até ser desligado pelo controlador de carga. Com os três testes obteve-se o volume médio bombeado com as baterias totalmente recarregadas.

2.1.2.5 Índice de claridade horário

Para confirmar a variação nas condições de radiação solar no momento dos testes do NSB e do PCSB, foi calculado o índice de claridade horário (K_T^h) para cada avaliação pela Equação 1, de acordo com Duffie e Beckman (1980).

$$K_T^h = \frac{R_s}{R_a} \quad (\text{Equação 1})$$

em que: K_T^h - índice de claridade horário, adimensional; R_s - radiação solar horária, $W m^{-2}$; R_a - radiação no topo da atmosfera horária, $W m^{-2}$.

Para R_s foi utilizado o valor médio de radiação solar medido pela estação meteorológica automática para cada teste e R_a foi calculado de acordo com o Boletim FAO 56 (1998). Segundo Escobedo et al. (2009), o índice de claridade horário pode ser classificado em quatro intervalos, $K_T^h \leq 0,35$ céu nublado, $0,35 < K_T^h \leq 0,55$ parcialmente nublado com predomínio do componente difuso da radiação solar, $0,55 < K_T^h \leq 0,65$ parcialmente nublado com predomínio do componente direto da radiação solar e $K_T^h > 0,65$ céu claro.

2.1.2.6 Coeficientes de uniformidade de distribuição

Para os sistemas de irrigação localizada, a avaliação da uniformidade de distribuição de água foi realizada conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975), com modificação proposta por Denículi et al. (1980). Esta metodologia consiste na coleta de dados em quatro linhas laterais (primeira linha, linha situada a 1/3 e 2/3 da origem e última linha), com estudo de oito emissores por linha (primeiro emissor; emissores a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7 e 6/7 da origem; e último emissor), totalizando 32 pontos de coleta.

Foram selecionados para expressar o coeficiente de uniformidade de distribuição, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC - Equação 2), proposto por Christiansen (1942), e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD - Equação 3), proposto por Criddle et al. (1956).

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum |L_i - L_m|}{n \cdot L_m}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

em que: CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen, %; L_i - lâmina coletada no emissor “i”, mm; L_m - lâmina média de todas as observações, mm; n – número de emissores coletados.

$$CUD = \left(\frac{L_{25}}{L_m}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

em que: CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, %; L_{25} - média do quartil inferior das lâminas dos emissores, mm; L_m - lâmina média de todas as observações.

Afim de correlacionar CUC, CUD, vazão, pressão máxima e mínima e radiação solar em cada teste, em todos os 32 emissores avaliados os volumes eram coletados ao mesmo tempo. Para isso, em todos esses pontos de coleta foram feitos orifícios circulares no solo nos quais utilizava-se garrafas pet de 2 litros cortadas ao meio para armazenar o volume durante cada teste. Antes de cada teste todas as garrafas eram posicionadas corretamente, somente então a bomba era ligada, tendo duração média de 15 minutos. Ao final a bomba era desligada, e toda tubulação era drenada para evitar que a água gotejasse nas garrafas localizadas no início das linhas laterais devido a pequena inclinação do relevo, para posteriormente se iniciar as leituras de volume.

2.1.2.7 Avaliação do potencial de bombeamento para o Brasil

Para avaliar o potencial de bombeamento da placa fotovoltaica em estudo, desenvolveram-se equações onde pode se estimar, a partir da radiação solar, a vazão média bombeada para os sistemas de gotejo sem bateria (NSB e PCSB). Essas equações foram aplicadas aos dados de Rs provenientes da rede de estações meteorológicas automáticas (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O período avaliado corresponde a um ano, de 01/02/2018 a 31/01/2019.

A rede de EMAs do INMET conta com 581 estações espalhadas por todo território brasileiro que fornecem valores horários de Rs. Embora parte significativa dos erros presentes nos dados brutos seja eliminada no pós-processamento do INMET, a série de dados meteorológicos passou por um processo de filtragem onde foram eliminando os valores espúrios. A filtragem foi realizada seguindo os seguintes

critérios: $R_s \geq R_a$; $R_s \approx 0$; e médias mensais de radiação discrepantes em relação às estações em sua proximidade.

O INMET fornece dados de R_s em $\text{KJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, e, para que as equações fossem aplicadas, os mesmos foram convertidos para W m^{-2} . Para se estimar o volume bombeado por hora, considerou-se a R_s horária disponibilizada pelas estações. Os volumes horários foram agregados para períodos de 24 horas correspondentes a sua data, e então computado o volume diário médio bombeado para os meses avaliados.

2.1.2.8 Análise estatística dos dados

Para os sistemas de irrigação localizada, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (CONOVER, 1980), para verificar se houve diferença estatística entre os valores calculados de CUC e CUD dos 4 sistemas. O teste de comparações múltiplas utilizado foi a menor diferença significativa de Fisher (LSD) (CONOVER; IMAN, 1981), aplicada com a correção de Bonferroni (SHINGALA; RAJYAGURU, 2015). As análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2018), utilizando-se o pacote Agricolae (DE MENDIBURU, 2019).

2.1.3 Resultados e discussão

2.1.3.1 Índice de claridade horário

Nas Tabela 2.1.1 e Tabela 2.1.2 são apresentados o dia e horário em que foi realizado cada teste, os valores de radiação solar e índice de claridade horário (K_T^h) para o NSB e o PCSB, respectivamente. Segundo Alvarenga et al. (2014), os painéis fotovoltaicos têm bom funcionamento de 9 às 15 horas, porque nesse período a R_a apresenta seus maiores valores. Dessa forma, o K_T^h permite caracterizar a radiação solar de uma região, sendo possível estimar o funcionamento das placas solares na produção de energia solar fotovoltaica (GALDINO et al., 2016).

Durante os horários do dia próximos ao nascer do sol e ocaso, mesmo em condições de céu claro a R_s é baixa. Assim, para confirmar a variação nas condições de nebulosidade foram classificados somente os valores de K_T^h compreendidos entre 9 e 15 horas.

Tabela 2.1.1. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do NSB.

NSB					
Nº teste	Data	H. Início	H.Término	Rad. solar (w/m ²)	K_T^h
1	24/out	09:27:00	09:43:00	508.8	0.58
2	24/out	13:09:00	13:28:00	316.6	0.21
3	24/out	14:06:00	14:22:00	445.5	0.31
4*	24/out	15:05:00	15:22:00	415.4	0.32
5*	24/out	16:09:00	16:37:00	106.7	0.10
6*	25/out	08:34:00	08:56:00	345.0	0.63
7	25/out	10:10:00	10:28:00	418.0	0.36
8	25/out	14:11:00	14:27:00	372.3	0.26
9*	25/out	15:09:00	15:27:00	183.2	0.14
10	26/out	09:25:00	09:44:00	172.6	0.19
11	29/out	11:49:00	12:09:00	191.4	0.14
12	26/nov	10:00:00	10:15:00	795.5	0.57
13	26/nov	13:24:00	13:39:00	530.5	0.32
14	27/nov	09:09:00	09:24:00	684.3	0.60
15	27/nov	10:37:00	10:52:00	795.3	0.57
16	27/nov	12:24:00	12:39:00	956.3	0.58
17	27/nov	12:57:00	13:13:00	970.0	0.59
18	27/nov	13:30:00	13:45:00	1230.8	0.75
19	27/nov	14:16:00	14:31:00	430.7	0.28
20	27/nov	14:44:00	15:01:00	303.0	0.20
21*	27/nov	15:29:00	15:52:00	211.5	0.16
22	28/nov	10:09:00	10:26:00	412.8	0.29
23	28/nov	10:44:00	10:59:00	1032.8	0.73
24	28/nov	12:54:00	13:07:00	1164.3	0.70

*Valores de K_T^h não classificados

Tabela 2.1.2. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do PCSB.

PCSB					
Nº teste	Data	H. Início	H.Término	Rad. solar (w/m ²)	K_T^h
1	12/nov	12:29:00	12:47:00	639.8	0.40
2	12/nov	13:31:00	13:47:00	367.0	0.23
3*	12/nov	15:04:00	15:19:00	899.8	0.69
4	23/nov	10:57:00	11:12:00	552.0	0.35
5	23/nov	11:40:00	11:55:00	491.5	0.32
6	26/nov	09:03:00	09:18:00	286.0	0.25
7	26/nov	10:31:00	10:46:00	751.0	0.54
8	26/nov	12:00:00	12:16:00	782.5	0.47
9	26/nov	12:51:00	13:04:00	1285.3	0.78
10	27/nov	09:49:00	10:05:00	1101.5	0.97
11	28/nov	13:19:00	13:31:00	1106.7	0.67
12	28/nov	13:41:00	13:53:00	352.3	0.21
13	28/nov	14:03:00	14:15:00	735.0	0.48
14	28/nov	14:24:00	14:39:00	335.3	0.22
15	28/nov	14:46:00	15:01:00	732.0	0.48
16	29/nov	09:09:00	09:25:00	349.0	0.30
17	29/nov	09:37:00	09:55:00	338.5	0.29

*Valores de K_T^h não classificados

Os testes do NSB foram realizados 47,3% em condições de céu nublado, 5,3% parcialmente nublado, com predomínio do componente difuso da radiação, 31,6% parcialmente nublado, com predomínio do componente direto da radiação e 15,8% céu claro. Já para o PCSB os valores foram, 43,7%, 37,5%, 0,0% e 18,8%, respectivamente. Assim, pode-se observar a variação da radiação solar entre as avaliações.

2.1.3.2 Coeficientes de uniformidade de distribuição

Na Tabela 2.1.3, Figura 2.1.6 e Figura 2.1.7 observou-se que os testes que utilizaram o sistema CB apresentaram estatisticamente os maiores valores de CUC e CUD, além de exibirem menor grau de dispersão. Isso se deve ao sistema CB trabalhar com pressão e vazão constante, uma vez que o controlador de carga disponibiliza uma potência constante a bomba. Já o sistema SB, oscila a pressão e vazão durante os testes devido a variação da radiação solar incidente sobre o painel fotovoltaico.

Tabela 2.1.3. Teste de média dos valores de CUC e CUD.

Sistema	CUC	Grupo	CUD	Grupo
PCCB	97,56	a	96,23	a
NCB	96,83	ab	95,19	ab
PCSB	96,68	b	94,64	b
NSB	95,88	b	93,31	b

a = grupo de maior média e b = grupo de menor média.

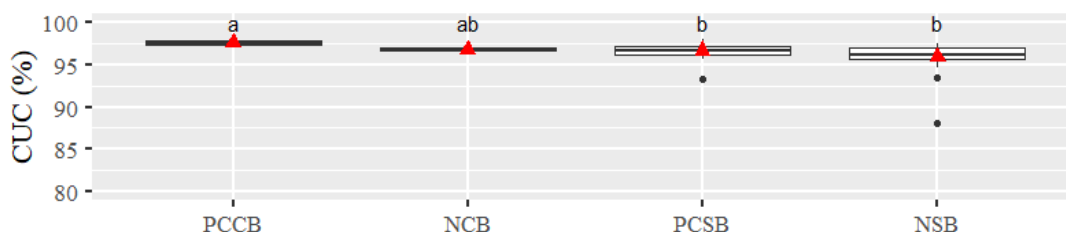


Figura 2.1.6. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada sistema. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.

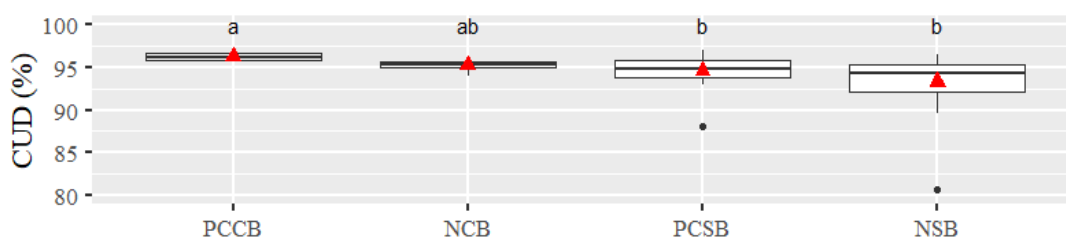


Figura 2.1.7. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUD observados para cada sistema. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.

Apesar de os valores médios de CUC e CUD serem inferiores para o sistema SB, esses valores são classificados como excelentes de acordo com Mantovani (2001). Apenas o NSB apresentou uma avaliação em que os valores de CUC e CUD são classificados como bom, 88,05% e 80,65%, que coincide com o menor valor de radiação solar entre todos os testes. Os demais valores de CUC e CUD para todos os testes são classificados como excelentes. De acordo com Zago (2017), em Cascavel – PR, utilizando um sistema de irrigação fotovoltaico autônomo de pequeno porte com gotejo, obteve-se resultados similares, nenhum dos valores de CUC e CUD foram classificados como inaceitáveis, sendo a maioria dos valores obtidos classificados como excelentes.

Campana et al. (2015) constataram que a utilização da energia fotovoltaica para bombeamento em sistema de irrigação é uma alternativa para o fornecimento de água

de forma sustentável e economicamente viável, principalmente para região áridas e semi-áridas

Analisando o tipo de emissor para o sistema SB, observou-se que o emissor normal (NSB) apresenta maior dispersão dos valores calculados e menor valor médio de CUC e CUD, apesar de esses serem estatisticamente iguais. Isso ocorre, porque o emissor normal varia a vazão em virtude da variação da pressão, enquanto que o emissor autocompensante possui um mecanismo de para controlar a pressão acima de 0,5 bar, proporcionando vazões uniformes e valores de CUC e CUD próximos.

Os valores de CUC sempre são superiores aos de CUD para o mesmo teste, devido o último ser um teste mais rigoroso, já que em sua metodologia utiliza-se os 25% menores volumes para seu cálculo.

2.1.3.3 Análises de regressão em função da radiação solar

Na Figura 2.1.8 estão apresentadas as análises de regressão para o sistema SB (NSB e PCSB) dos seus respectivos valores de CUC, CUD e vazão em função da radiação solar. Todos os parâmetros das equações foram significativos a 5% de significância.

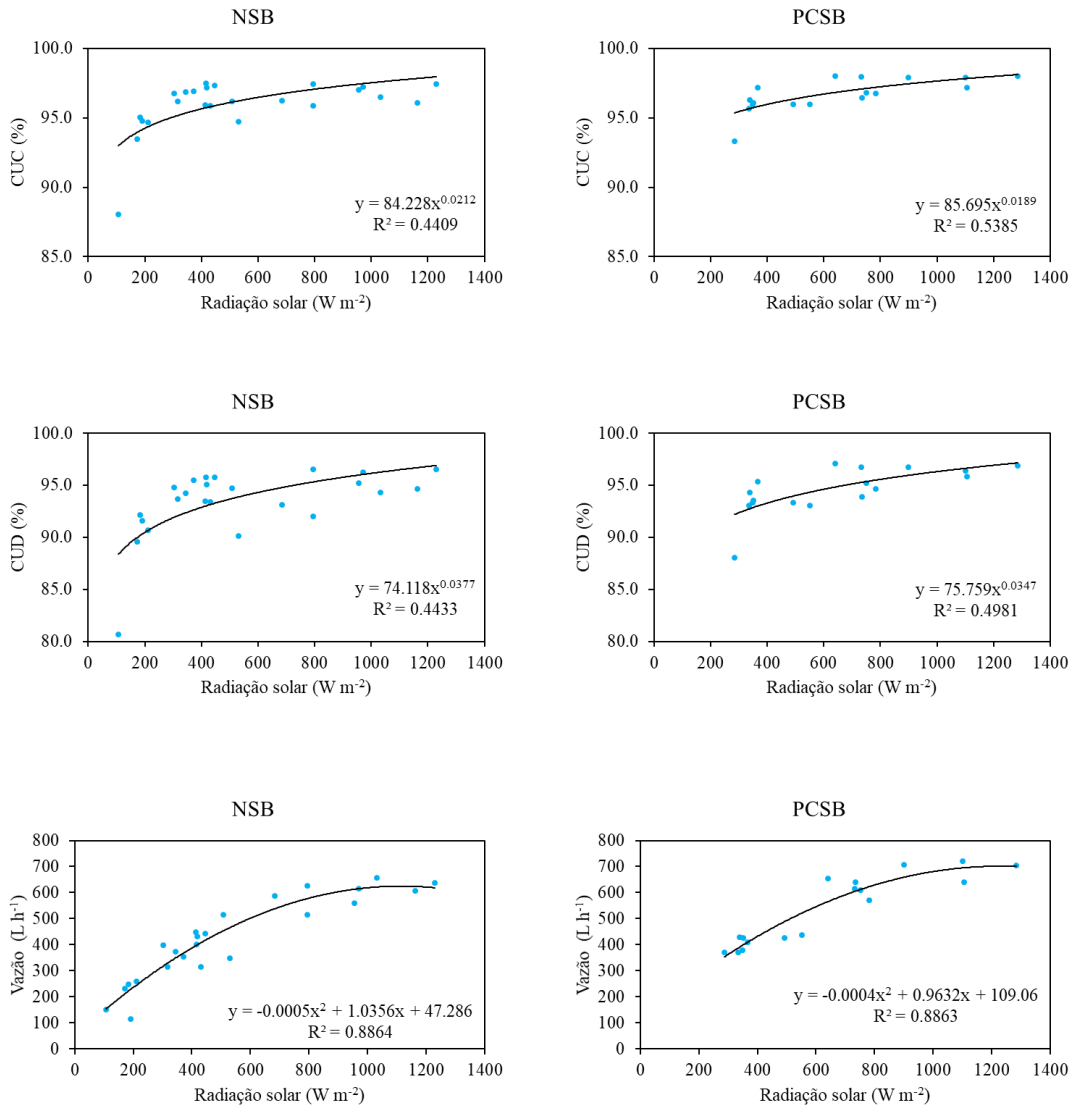


Figura 2.1.8. Regressão CUC, CUD e vazão em função da radiação solar.

Analisando o CUC e CUD em função da radiação solar observa-se que a medida que aumenta a radiação solar ocorre aumento dos valores dos coeficientes de uniformidade de distribuição. O modelo matemático que melhor descreve esse comportamento é o potencial. De acordo com Zago (2017), em Cascavel – PR, utilizando um sistema de irrigação fotovoltaico autônomo de pequeno porte com gotejo, foi observado o mesmo comportamento.

Já a vazão do sistema em função da radiação solar possui uma correlação muito alta, apresentando valores de coeficientes de determinação próximos de 0,9, assim, a medida que a radiação solar aumenta se tem um aumento da vazão. Segundo Michels et al. (2009), a vazão é função da radiação solar e da temperatura do painel fotovoltaico. Dessa forma, o modelo matemático que melhor descreve esse

comportamento é o polinomial de segundo grau. De acordo com esse modelo há uma maior declividade da curva para menores valores de radiação, depois a declividade da curva diminui para maiores valores de radiação solar.

2.1.3.4 Variação da vazão e pressão

Na Figura 2.1.9 observa-se que a vazão do sistema CB apresenta uma variação muito pequena, com desvio padrão de $24,63 \text{ L h}^{-1}$ para o NCB e $7,71 \text{ L h}^{-1}$ para o PCCB. Já o sistema SB apresenta uma variação muito grande nas vazões, acompanhando a oscilação da radiação solar. O desvio padrão para o NSB e o PCSB foram respectivamente, $158,52$ e $119,37 \text{ L h}^{-1}$.

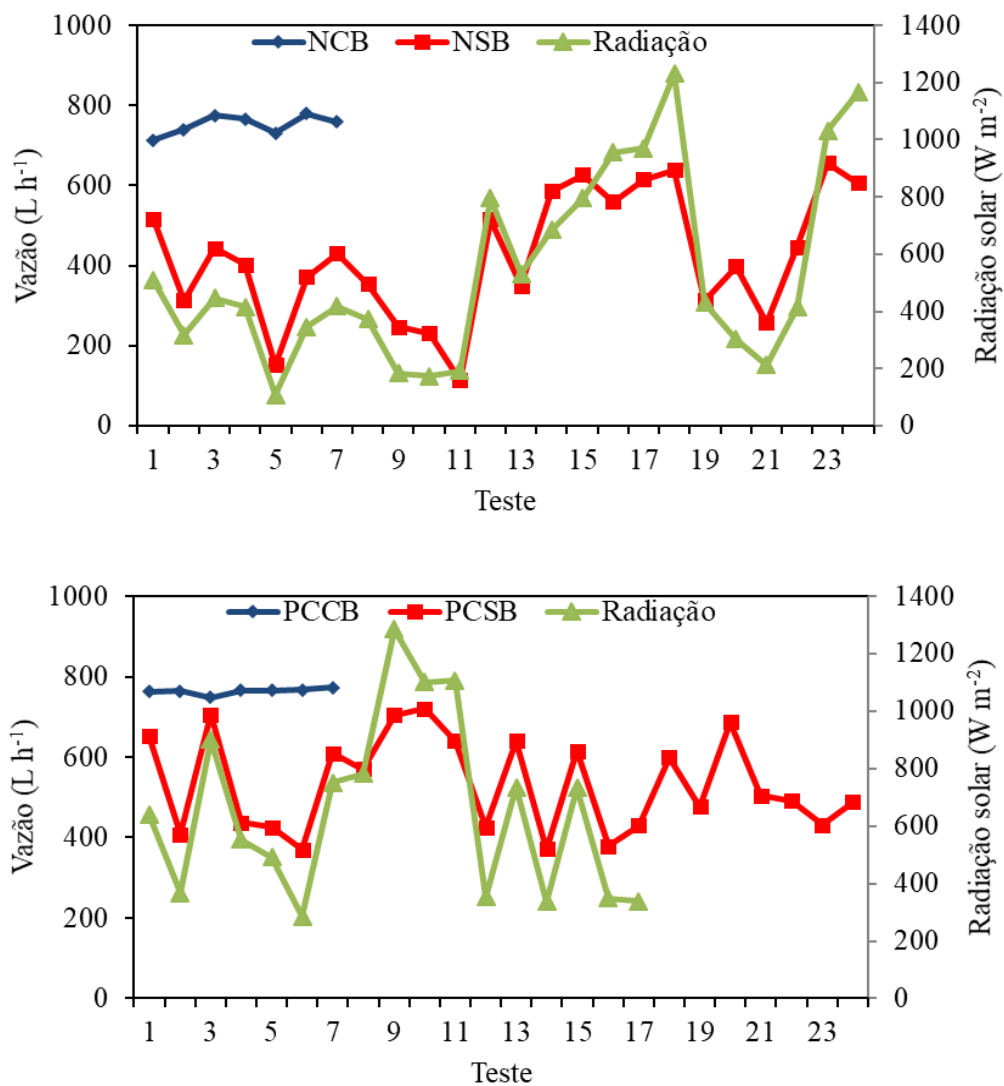


Figura 2.1.9. Variação da vazão dos sistemas e radiação solar observada para as avaliações com o NSB e o PCSB.

Analisando o sistema CB isoladamente, percebe-se que os testes que utilizaram emissor normal apresentaram maior variação na vazão. Isso ocorreu porque o emissor autocompensante apresenta um mecanismo de controle de vazão. Pela mesma razão, podemos observar na Figura 2.1.10 que a pressão varia mais no NCB em relação ao PCCB.

A pressão varia muito pouco no sistema CB por trabalhar com potência constante. Já o sistema SB a pressão varia de acordo com a oscilação da radiação solar, apresentando uma grande variação de pressão em cada teste e até mesmo entre testes.

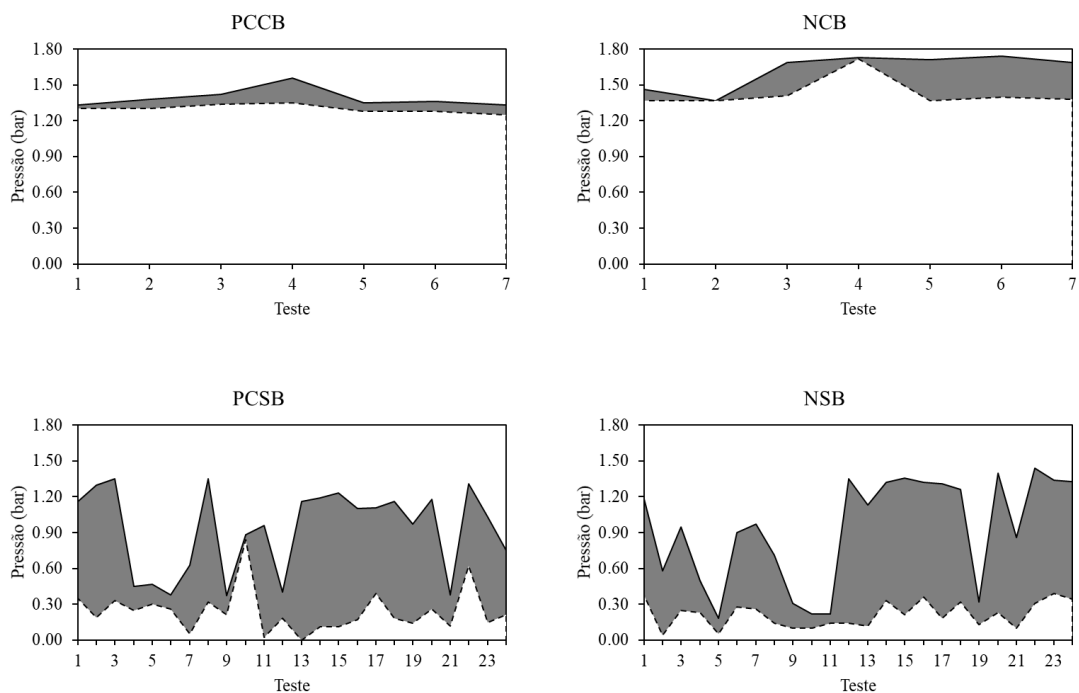


Figura 2.1.10. Variação da pressão em cada teste.

2.1.3.5 Potencial de bombeamento para o Brasil

Segundo Michels et al. (2009), a vazão de um sistema de bombeamento fotovoltaico é função da potência gerada pelos painéis e essa é diretamente proporcional ao aumento da radiação solar e inversamente proporcional ao aumento da temperatura do painel, apesar dessas relações não serem lineares. Os painéis fotovoltaicos são testados em condições padrão, temperatura do painel 25°C. Em temperaturas do painel acima desse valor, ocorre diminuição da eficiência dos painéis fotovoltaicos gerando uma potência menor.

Uma vez que não foi possível medir a potência gerada e nem a temperatura dos painéis fotovoltaico, o potencial de bombeamento para o Brasil foi calculado levando-

se em consideração apenas os valores de R_s observados e as equações de vazão apresentadas na Figura 2.1.8. O volume diário médio mensal por estação para o NSB e o PCSB são apresentados na Figura 2.1.11 e Figura 2.1.12, respectivamente, sendo possível ter a dimensão do comportamento de cada sistema para o território brasileiro. O número de estações que apresentaram dados confiáveis ao longo dos meses variou de 469 a 506.

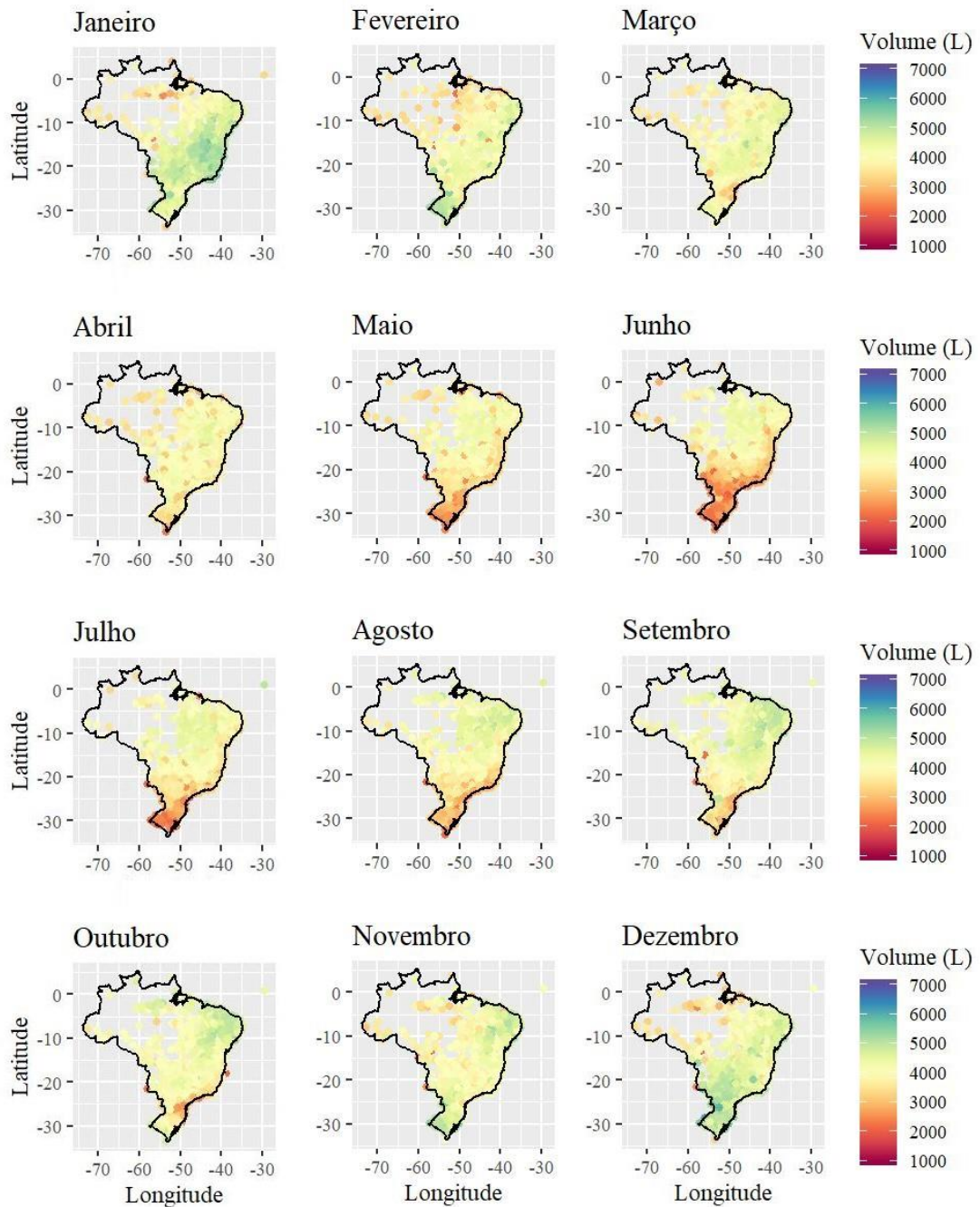


Figura 2.1.11. Volumes diário médio mensal bombeado por mês para o NSB.

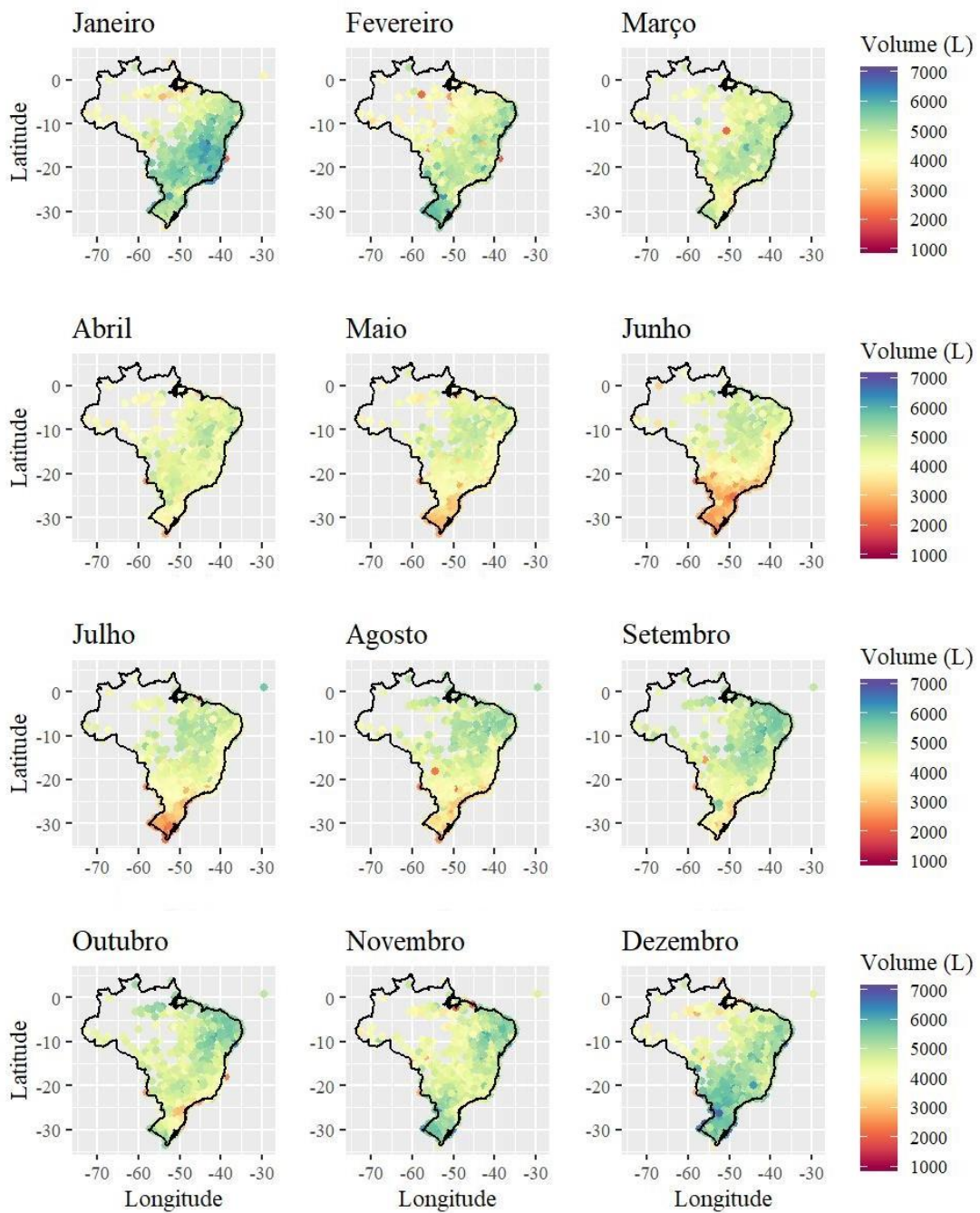


Figura 2.1.12. Volumes diário médio mensal bombeado por mês para o PCSB.

Em todo o país notou-se que houve variação dos volumes médio mensal ao longo dos meses para os dois sistemas. Esse comportamento se deve a variação da incidência de radiação solar ao longo do ano. As menores variações ocorrem na região Nordeste, por encontrar-se próximo à Linha do Equador. Já na região Sul são observadas as maiores variações devido a maior latitude, apresentando grande variabilidade de radiação solar ao longo do ano. Na primavera-verão os maiores valores de volume bombeado são observados na região Sul, por apresentar maior

comprimento do dia. Já no outono-inverno a região Nordeste apresenta os maiores valores, e a região Sul os menores valores porque os dias são mais curtos.

Algumas variações desse padrão são provocadas pelos diferentes fenômenos atmosféricos que predominam em cada região em diferentes épocas do ano. Esses fenômenos são responsáveis pela sazonalidade das chuvas, conferindo diferentes graus de intensidade e duração da chuva, o que influencia também no comprimento da estação chuvosa e seca.

Na Figura 2.1.13 estão apresentados os boxplots dos volumes médios diários bombeados por todas as estações em cada mês.

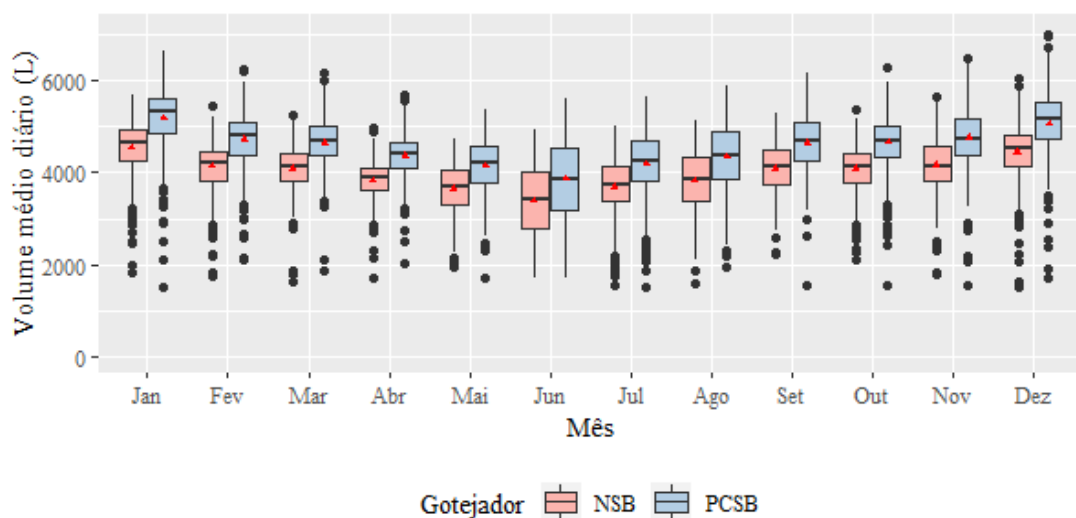


Figura 2.1.13. Boxplot volume diário médio mensal bombeado pelos dois sistemas.

Notou-se uma maior amplitude dos dados nos meses de maio a agosto, o que provavelmente se deve a menores radiações registradas. Isso ocorre porque, para as equações utilizadas, há uma maior declividade da curva para menores valores de radiação. Dessa forma, a região Sul por apresentar baixos valores de radiação solar nesse período terá pequenos volumes bombeados, enquanto que a região Nordeste por ter menor oscilação da radiação apresentara maiores volumes bombeados. Durante os meses de verão, embora o Brasil apresente média de radiação solar mais elevada, também apresenta uma elevada nebulosidade, o que se deve à estação chuvosa predominante no país, resultando em um grande número de outliers. Além disso, o volume médio diário para o Brasil apresenta menores médias no outono-inverno e maiores na primavera-verão, já que a radiação solar é maior na última estação.

O volume médio diário bombeado para todas as estações avaliadas variou de 3396 a 4549 L para o NSB e de 3860 a 5189 L para o PCSB. O PCSB superou o

volume bombeado pelo sistema NSB em uma média de 556 L. Isso ocorre porque entre 0,5 a 1,0 bar o emissor autocompensante apresenta maior vazão em relação ao emissor normal, de acordo com o catálogo do fabricante. Dessa forma, em momentos em que se tem baixa radiação solar, o PCSB tem vazões superiores.

Além disso, em pressões maiores que 1,0 bar o emissor PC deve possuir vazão praticamente constante, já o emissor normal deve apresentar aumento da vazão com o aumento da pressão. Porém, esse comportamento não foi observado para o emissor PC, sendo a visualização mais fácil no sistema CB, onde o NCB apresentou pressão média de 1,5 bar e vazão média de cada emissor de $4,9 \text{ L h}^{-1}$, já o PCCB os valores foram respectivamente, 1,4 bar e $5,0 \text{ L h}^{-1}$. Dessa forma, os emissores autocompensantes utilizados não são de qualidade, já que tiveram funcionamento similar aos emissores normais, variando a vazão de acordo com a pressão.

2.1.3.6 Funcionamento e manejo do sistema de irrigação fotovoltaico autônomo

Do ponto de vista hidráulico, os emissores normais são mais viáveis para sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos (LÓPEZ-LUQUE et al., 2015 e RECA et al., 2016). Isso porque a medida que se tem maiores valores de radiação solar o painel fotovoltaico irá fornecer maior potência a bomba, proporcionando maiores pressões e vazões ao sistema de irrigação. Porém, isso só ocorre desde que, o sistema seja construído com emissores normais, ocorrendo maior aproveitamento da radiação solar e permitindo uma maior área irrigada, aumentando a viabilidade econômica. Dessa forma, é de grande importância a utilização de emissores de qualidade, para que os mesmos tenham comportamento condizente com as suas especificações.

O efeito citado anteriormente faz com que o armazenamento da energia em reservatórios para depois realizar a irrigação seja ainda mais inviável. Como a maioria dos reservatórios são próximas as áreas irrigadas e de bombeamento, o principal componente da altura manométrica total do sistema é a altura geométrica. Na condição de menor radiação solar, a bomba apresenta outra curva de desempenho, como pode ser visto na Figura 2.1.14.

Considerando o bombeamento para um reservatório, a altura manométrica total continuaria sendo praticamente a mesma para diferentes curvas de desempenho da bomba, ocorrendo uma grande diminuição da vazão em baixas potências. Porém se o sistema de irrigação fotovoltaico é autônomo com emissores normais, o sistema de

irrigação entrará em novo equilíbrio no ponto onde a curva característica da tubulação cruza a nova curva característica da bomba para uma potência inferior. Assim, o novo equilíbrio gerado terá uma pressão menor e maior vazão quando comparado na mesma potência com a condição de um reservatório.

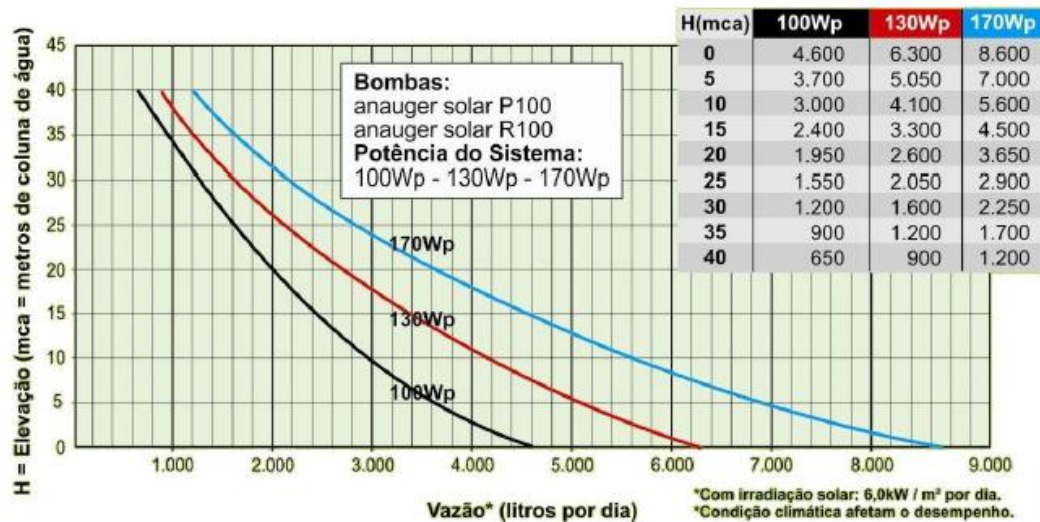


Figura 2.1.14. Curvas de desempenho em função da potência fornecida. FONTE: CAMPOS; ALCANTARA (2018).

Para um sistema de irrigação fotovoltaico autônomo com emissores normais ter um bom funcionamento devem ser atendidas as condições propostas por López-Luque et al. (2015) e Reca et al. (2016), apresentadas nas equações abaixo.

$$\frac{H_m}{H_M} = \frac{Q_m^2}{Q_M^2} = r_h \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{P_m}{P_M} = \left(\frac{H_m}{H_M}\right)^{3/2} = r_h^{3/2} \quad (\text{Equação 5})$$

em que: H_m – altura manométrica total mínima; H_M – altura manométrica total máxima de projeto; Q_m – vazão mínima; Q_M – vazão máxima de projeto; P_m – potência mínima; P_M – potência máxima; r_h – relação entre a pressão mínima de trabalho do emissor e a pressão máxima de projeto.

Essas relações só devem ser assumidas se a relação entre a diferença de nível e H_M for menor que 0,1 (RECA et al., 2016). Aplicando essas relações é possível calcular os valores de H_m , Q_m e P_m . Assim que o sistema de irrigação fotovoltaico autônomo com emissores normais atingirem esses limites inferiores o sistema deve ser

desligado, evitando que os emissores funcionem abaixo do limite inferior de pressão recomendado pelo fabricante, o que assegura bons coeficientes de uniformidade ao sistema de irrigação.

Segundo De Souza et al. (2017), para realizar o manejo da irrigação é necessário saber a intensidade de aplicação média dos emissores e o sistema tem que apresentar uma boa eficiência de irrigação. Dessa forma, manejar esse tipo de sistema seria complicado, porque o emissor apresenta intensidade de aplicação variada em função da oscilação da vazão. Assim, teriam que ser estudadas técnicas de manejo mais apropriadas para esse sistema. Uma alternativa seria calcular o volume de água necessário por setor de irrigação, utilizando hidrômetros para realizar as leituras de volume.

2.1.3.7 Volume bombeado pelo sistema SB e CB para mesma condição de radiação e autonomia das baterias do sistema CB

Para mesma condição de radiação solar, com sistema SB bombeando água durante o dia enquanto que o sistema CB recarregava as baterias para posteriormente realizar o bombeamento noturno, observamos na Tabela 2.1.4 que o sistema SB bombeou mais do que o dobro de água. Além disso, o teste que avaliou a autonomia das baterias utilizando a mesma estrutura hidráulica constatou um volume médio de 2420,0 L bombeado pelo sistema CB com as baterias totalmente recarregadas.

Tabela 2.1.4. Volume bombeado por cada sistema para mesma condição de radiação solar.

Volume sistema SB (L)	Volume sistema CB (L)	Proporção SB/ CB
4983,4	2401,5	2,1
4562,6	2214,0	2,1
3719,6	1777,8	2,1
3980,5	1926,7	2,1
4494,0	2148,0	2,1
3840,0	1693,7	2,3

SB = sem armazenamento de energia em baterias e CB = com armazenamento de energia em baterias.

O sistema SB bombeia mais água porque no sistema CB ocorrem perdas energéticas devido a eficiência das baterias não ser 100%, como mencionado nos trabalhos de Santos et al. (2017) e Yang et al. (2007). Segundo Chen et al. (2009), a eficiência das baterias estacionárias de lítio chumbo varia de 70 a 90%. Além disso,

ocorrem perdas no controlador de carga, já que o mesmo também não apresenta eficiência de 100%.

Analisando o volume bombeado pelo sistema CB em comparação com o volume bombeado pelo sistema SB é possível afirmar que em nenhum dia a radiação solar foi suficiente para recarregar totalmente as baterias, já que o volume bombeado pelo sistema CB em nenhum dia atingiu o volume bombeado pelas baterias totalmente recarregadas. Assim, o baixo volume bombeado pelo sistema CB não pode ser justificado pela recarga total das baterias antes do término do dia.

Para construção do sistema CB foi necessário mais um painel fotovoltaico, três baterias, um controlador de carga e um quadro para instalação de equipamentos, que totalizaram um custo fixo inicial maior de aproximadamente R\$ 2597,00 (Tabela 2.1.5).

Tabela 2.1.5. Custo fixo adicional do sistema com baterias.

Item	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Painel fotovoltaico	1	R\$ 329,00	R\$ 329,00
Bateria estacionária	3	R\$ 431,00	R\$ 1293,00
Controlador de carga	1	R\$ 575,00	R\$ 575,00
Quadro de instalação	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Mão de obra	adim.	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Total			R\$ 2597,00

Dessa forma, o sistema CB na configuração utilizada não apresenta vantagens, por bombear um volume de água menor para uma mesma condição de radiação solar, as baterias totalmente recarregadas apresentam uma baixa autonomia de bombeamento e ter um custo fixo adicional maior. Além disso, os coeficientes de uniformidade de distribuição do sistema SB também são classificados como excelentes.

Para se argumentar com segurança sobre a viabilidade do sistema CB é necessário conhecer a real eficiência das baterias, do controlador de carga e a profundidade de descarga das baterias permitida pelo controlador de carga.

2.1.4 Conclusões

Os sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos são mais viáveis utilizando emissores normais, uma vez que apresentam coeficiente de uniformidade considerado excelente e proporcionam maior aproveitamento da radiação solar, bombeando maiores volumes de água.

O armazenamento de energia em baterias não apresentou vantagens para o sistema de irrigação, devido ao seu maior custo de implantação e menor volume diário bombeado.

O kit de bombeamento fotovoltaico utilizado nesse trabalho para irrigação de pequenas áreas, que caracterizam principalmente a agricultura familiar, apresentou grande potencial ao longo de todo território brasileiro.

2.1.5 Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998.

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. **Sinergia**, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 311-318, 2014.

ANAUGER. **Anauger solar r100**. Disponível em: <<https://www.anauger.com.br/linha-anauger-solar/anauger-solar-r100/>>. Acesso em: 28 de jan. de 2019.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia: Balanço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF. 2017.

CAMPANA, P. E. et al. Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation. **Energy Conversion and Management**, v. 95, p. 32-41, 2015.

CAMPOS, M. S.; DE ALCANTARA, L. D. S. Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação na agricultura familiar. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 205-214, 2018.

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.

CHEN, H. et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in natural science**, v. 19, n. 3, p. 291-312, 2009.

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

CONOVER, W. J. **Practical nonparametric statistics**. 1980.

CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. **The American Statistician**, v. 35, n. 3, p. 124-129, 1981.

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. Methods for evaluating irrigation systems. In: Soil Conservation Service – USDA. **Agricultural Handbook**. Washington: 1956.

DAL BEM, J. C. T. et al. Solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 1, p. 50-57, 2016.

DE MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical procedures for agricultural research**. R package version 1.3-0, 2019.

DE SOUSA, G. G. et al. Lâminas de irrigação para cultura do gergelim com biofertilizante bovino. **Magistra**, v. 26, n. 3, p. 343-352, 2017.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, v.27, n.50, p.155-162, 1980.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Willey & Sons, 1980. 762 p.

ESCOBEDO, J. F. et al. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 299-309, 2009.

GALDINO, J. J. B. et al. Estudo da radiação solar da cidade de petrolina através de um modelo empírico de céu claro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 98-105, 2016.

HAMIDAT, A.; BENYOUCEF, B.; HARTANI, T. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. **Renewable Energy**, v. 28, n. 7, p. 1081-1096, 2003.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133p.

KELLEY, L. C. et al. On the feasibility of solar-powered irrigation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2669-2682, 2010.

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

MANTOVANI, E. C. **Avalia: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada**. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. Solar photovoltaic water pumping for remote locations. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 12, n. 2, p. 472-487, 2008.

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

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 08 de jan de 2019.

RECA, J. et al. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1143-1154, 2016.

SANTOS, A. L. M.; OLIVEIRA, L. W.; DIAS, B. H.; OLIVEIRA, J. G. Otimização da operação de baterias em sistemas de distribuição de energia elétrica. In: The XII latin-americano congress on electricity generation and transmission – Clagtee 2017. **Renewable and non-conventional sources of electric power**. 2017.

SHINGALA, M. C.; RAJYAGURU, A. Comparison of post hoc tests for unequal variance. **International Journal of New Technologies in Science and Engineering**, v. 2, n. 5, p. 22-33, 2015.

WAZED, S. M. et al. A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1206-1225, 2018.

YANG, H.; LU, L.; ZHOU, W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. **Solar energy**, v. 81, n. 1, p. 76-84, 2007.

ZAGO, E.A. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando energia fotovoltaica**. 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

2.2 Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão fotovoltaico autônomo e com armazenamento de energia em baterias

Resumo: A procura por fontes de energia renováveis está crescendo muito nos últimos anos, impulsionada principalmente pelo aumento das tarifas de energia e do petróleo, além de ter um apelo ambiental. Entre as fontes renováveis a energia fotovoltaica tem se destacado, tendo o Brasil um grande potencial de geração energética, principalmente na região Nordeste. Atualmente, os painéis fotovoltaicos têm sido muito utilizados no bombeamento de água, existindo sistema de irrigação fotovoltaico autônomos e com armazenamento de energia em baterias ou reservatórios elevados. O objetivo desse trabalho foi avaliar e comparar a eficiência de irrigação por microaspersão a partir de um kit comercial de bombeamento fotovoltaico autônomo (SB - sem bateria) com outro que utiliza baterias para armazenamento de energia (CB – com bateria). Foram calculados o CUC de ambos os sistemas de bombeamento, através da metodologia de irrigação localizada e da metodologia de aspersão convencional, sendo que no sistema autônomo foram realizados testes sob diferentes condições de radiação solar, com objetivo de avaliar seu efeito. Os sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos são mais viáveis, porém deve se ter cuidado na escolha do tipo de emissor (normal ou autocompensante), em função da porcentagem de área molhada e espaçamento entre eles.

Palavras chaves: energia fotovoltaica, bateria, irrigação localizada e CUC.

2.2.1 Introdução

As comunidades rurais, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil sofrem com a dispersão geográfica e problemas no fornecimento de energia elétrica. Isso ocorre por estarem localizadas distantes dos centros de geração e das redes de distribuição, o que acarreta alto investimento e elevado custo operacional das concessionárias para atender essa demanda (CAMPOS; ALCANTARA, 2018).

Em grandes empreendimentos agrícolas sem energia elétrica proveniente de redes de distribuição, é comum a utilização de geradores a diesel para alimentar os sistemas de irrigação. Porém, o custo variável é de 3 a 5 vezes maior quando comparado as concessionárias elétricas, além de se tratar de uma fonte energética não renovável e com grande potencial de poluição, contribuindo para as mudanças

climáticas. Dessa forma, para garantir o suprimento de energia elétrica nessas localidades isoladas e como alternativa ao aumento constante das tarifas de energia, a melhor solução é a utilização de fontes de energia renováveis.

A energia solar vem ganhando grande destaque entre as energias renováveis, por fazer a conversão direta da radiação solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos (BORGES; SERA, 2011). De acordo com López-Luque et al. (2015), nos últimos anos tem se percebido uma crescente diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos, aumento da sua eficiência energética, além de possuírem baixo custo de manutenção, vida útil média dos geradores em torno de 25 anos e alta confiabilidade, tornando essa tecnologia cada vez mais viável.

Segundo Tiba et al. (2000), mais de 90% do território brasileiro se encontra acima do trópico de Capricórnio, sendo uma característica natural que contribui para geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos. A radiação solar incidente é função da latitude, época do ano e nebulosidade, quanto mais próximo da Linha do Equador menor sua variação sazonal, tornando a região Nordeste a mais atrativa para instalação desses sistemas. A radiação média anual brasileira é bem acima da média europeia, variando entre 1200 a 2400 kWh m⁻² ano⁻¹ (MME, 2017).

Entre os usos frequentes da energia fotovoltaica se destaca o bombeamento de água (WAZED et al., 2018). A utilização de bombas solares para irrigação tem a grande vantagem, que nos dias em que são observadas as maiores demandas hídricas pelas plantas, são os dias que se tem maior radiação solar disponível e, conseqüentemente, maior volume de água bombeado (MICHELS et al., 2009).

Sistemas de irrigação requerem vazão e altura manométrica constante. No entanto, devido as variações da radiação solar ao longo de um dia e em decorrência das condições climáticas, os sistemas fotovoltaicos não apresentam uma potência constante. Afim de contornar este problema, em sistemas fotovoltaicos é comum utilizar sistemas de armazenamento de energia, aumentando o custo. Esse processo pode ser executado de duas formas distintas, através de baterias que permitem o funcionamento constante do sistema ou bombeando a água para um reservatório localizado em uma altura geométrica maior em relação a área irrigada, realizando a irrigação posteriormente. Sistemas mais modernos utilizam um motor auxiliar com inversor de frequência, para suprir somente a energia deficitária, porém, apresenta um custo ainda maior.

Para solucionar esse problema, Reça et al. (2016) e López-Luque et al. (2015), propuseram sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos, com bombas centrífugas de velocidade variável e emissores sem compensação de pressão (normal). Essa combinação permite que a vazão do sistema de irrigação seja variada a fim de ajustar a energia consumida pelo sistema de irrigação à energia produzida pelo módulo fotovoltaico. Contudo, a documentação sobre os coeficientes de uniformidade de distribuição desses sistemas é praticamente inexistente.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o coeficiente de uniformidade de distribuição de uma irrigação por microaspersão a partir de um kit comercial de bombeamento fotovoltaico autônomo (SB - sem bateria) e outro que utiliza baterias para armazenamento de energia (CB - com bateria). Além disso, recomendar o sistema de irrigação fotovoltaico para condições onde toda área é molhada e onde a área molhada é inferior a 100%.

2.2.2 Material e métodos

2.2.2.1 Implantação do experimento

O experimento foi realizado de 06 a 13 de dezembro de 2018, estação da primavera. O sistema de irrigação foi instalado na Área Experimental de Irrigação, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG. As coordenadas geográficas são latitude 20° 46' S e longitude 42° 52' O, estando a 675 m de altitude em relação ao nível do mar.

Foram utilizados dois conjuntos de bomba vibratória submersa movida a energia solar fotovoltaica, fabricante *Anauger*, modelo *Anauger Solar R100*. A bomba trabalha apoiada no fundo do reservatório, o que simplifica a instalação e permite um melhor aproveitamento do nível de água do reservatório.

O conjunto é composto por painel solar fotovoltaico, driver e bomba (Figura 2.2.1). O circuito de geração de eletricidade é formado por um módulo solar *Anauger* monocristalino de 175Wp, com tensão de 36Vdc. O driver tem a função de converter a corrente contínua gerada pelo painel em corrente alternada requerida pela bomba, além de controlar a tensão (ANAUGER, 2019).

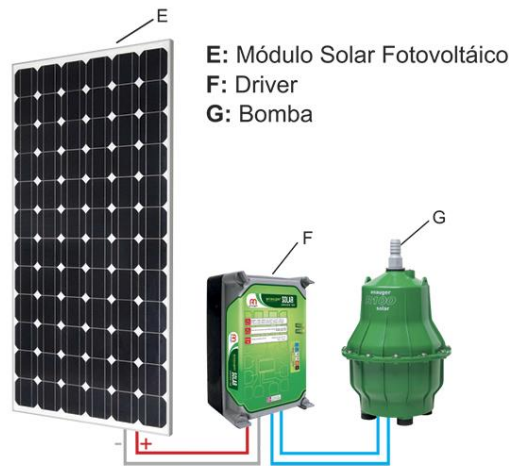


Figura 2.2.1. Sistema Anauger Solar R100. Fonte: ANAUGER (2019).

O sistema fotovoltaico sem armazenamento de energia (SB) foi utilizado de acordo com o fabricante. Já no sistema que utiliza baterias para armazenar energia (CB), foram adaptadas em série três baterias estacionária Heliar Freedom DF1000 70Ah 12V e um controlador de carga Viewstar VS3048AU 30A 36V (Figura 2.2.2), além de ser necessário a utilização de mais um painel solar Anauger, totalizando dois painéis fotovoltaicos conectados em série.



Figura 2.2.2. Sistema com baterias para armazenar energia (CB).

Essa adaptação foi realizada no Departamento de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG. E baseia-se no princípio de que o controlador de carga tem a função de controlar a tensão de recarga das baterias e a tensão de alimentação da bomba suprida pelas baterias (MEAH et al., 2008). Dessa

forma, a energia elétrica produzida pelos dois painéis passa pelo controlador de carga para depois recarregar as baterias. Quando a bomba é ligada, a energia armazenada nas baterias passa novamente pelo controlador de carga, depois pelo driver Anauger para posteriormente alimentar a bomba.

As duas bombas foram instaladas em uma caixa d'água de PVC de 1000 litros no nível do solo ao lado dos painéis fotovoltaicos, entretanto os sistemas não funcionavam simultaneamente. A água era então deslocada até os sistemas de irrigação por uma tubulação de PVC com diâmetro nominal de 32mm.

Como o experimento foi realizado no Hemisfério Sul, os painéis fotovoltaicos foram posicionados para norte geográfico, com inclinação similar à latitude do local (ALVARENGA et al., 2014). Tal inclinação é importante para obter maior eficiência do sistema fotovoltaico devido à maior exposição à radiação solar.

As medidas de radiação solar, em $W m^{-2}$, foram feitas pela estação meteorológica automática Davis, através do seu piranômetro. A estação foi instalada no local do experimento e programada para coletar dados de cinco em cinco minutos.

As leituras de pressão foram feitas com um Manômetro Digital Bronze - VKP – 064, posicionado antes do hidrômetro próximo aos dois sistemas de irrigação. Esse aparelho registra valores de pressão máxima e mínima durante cada teste. Para isso, no início de toda repetição os valores de pressão máxima e mínima eram zerados depois que o sistema pressurizava, sendo feita a leitura desses dados segundos antes de finalizar o teste.

A mediação da vazão em cada avaliação foi calculada através da relação hidrômetro analógico e tempo. No início e final de todo teste eram feitas as leituras de volume no aparelho, sendo a diferença entre o volume final e inicial dividido pelo tempo de duração para se encontrar a vazão média de cada teste.

O fabricante da bomba disponibiliza apenas a curva de desempenho em altura manométrica (H), metros, em função da vazão (Q), $L dia^{-1}$, porém com essa curva não é possível dimensionar o sistema de irrigação. Dessa forma, foi traçada uma nova curva da bomba com a vazão em $L h^{-1}$, utilizando a bomba na potência máxima e em funcionamento constante. Para isso foi utilizado o sistema CB, onde foram imprimidas 7 perdas de carga diferentes no sistema simulando H e realizadas 3 leituras de vazão para cada ponto de pressão, sendo utilizado o valor médio de Q para elaborar a nova curva de desempenho (Figura 2.2.3).

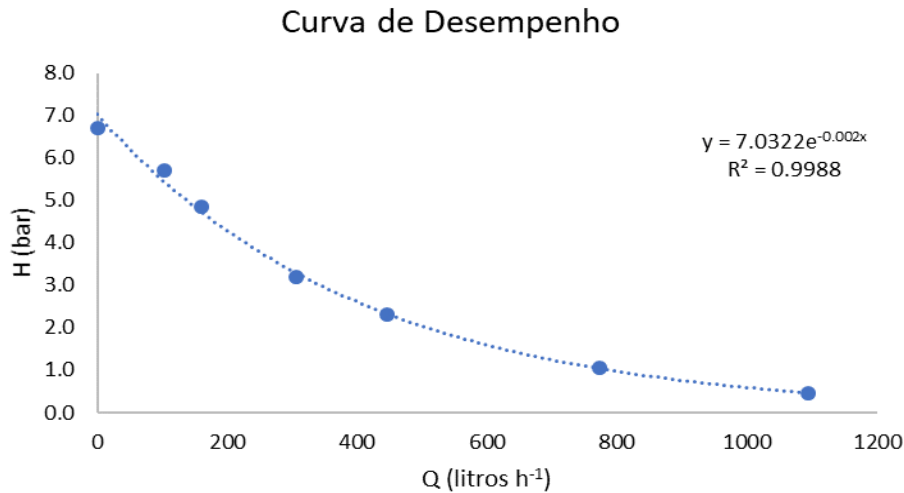


Figura 2.2.3. Curva de desempenho da bomba Anauger R100.

O emissor utilizado foi o microaspersor Amanco MF2, bocal amarelo, defletor cinza, com vazão de 65 L h⁻¹ e 3,8 m de raio de alcance na pressão de 1,5 bar. O sistema de irrigação era composto por 3 linhas laterais, espaçadas de 3,0 em 3,0 m. Cada linha lateral continha 3 microaspersores, espaçados de 3,0 em 3,0 m, totalizando 9 emissores no sistema.

O experimento foi composto por dois sistemas, sistema de irrigação por microaspersão com bomba sem armazenamento de energia em baterias (MSB) e sistema de irrigação por microaspersão com bomba com armazenamento de energia em baterias (MCB). Cada sistema foi avaliado através de duas metodologias diferentes de coleta de dados para calcular os coeficientes de uniformidade, método de irrigação localizada e de aspersão convencional.

Para o MSB foram feitos 12 testes utilizando a metodologia de irrigação localizada e 16 testes com o método de aspersão convencional. Já para o MCB, por não dependerem das condições climáticas, mas das baterias, além de trabalhar de forma constante devido ao controlador de carga, foram feitas 5 e 6 avaliações para cada metodologia, respectivamente.

2.2.2.2 Índice de claridade horário

Para confirmar a variação nas condições de radiação solar no momento dos testes do MSB, foi calculado o índice de claridade horário (K_T^h) para cada teste pela Equação 1, de acordo com Duffie e Beckman (1980).

$$K_T^h = \frac{R_s}{R_a} \quad (\text{Equação 1})$$

em que: K_T^h - índice de claridade horário, adimensional; R_s - radiação solar horária, $W m^{-2}$; R_a - radiação no topo da atmosfera horária, $W m^{-2}$.

Para R_s foi utilizado o valor médio de radiação solar medido pela estação meteorológica automática para cada teste e R_a foi calculado de acordo com o Boletim FAO 56 (1998). Segundo Escobedo et al. (2009), o índice de claridade horário pode ser classificado em quatro intervalos, $K_T^h \leq 0,35$ céu nublado, $0,35 < K_T^h \leq 0,55$ parcialmente nublado com predomínio do componente difuso da radiação solar, $0,55 < K_T^h \leq 0,65$ parcialmente nublado com predomínio do componente direto da radiação solar e $K_T^h > 0,65$ céu claro.

2.2.2.3 Coeficiente de uniformidade de distribuição

Para os sistemas de irrigação localizada, a avaliação da uniformidade de distribuição de água geralmente é realizada conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975) ou de Denículi et al. (1980). Porém, como o sistema só utilizou 9 emissores, foi realizada a coleta do volume aplicado por todos eles. Afim de correlacionar CUC, vazão, pressão máxima e mínima e radiação solar em cada teste, os volumes aplicados pelos 9 microaspersores eram coletados ao mesmo tempo. Com esse método é possível conhecer o coeficiente de uniformidade de distribuição das vazões dos emissores. Cada teste teve duração de 5 minutos.

Para avaliar a variação do raio molhado em função da oscilação da pressão no sistema SB, também foi utilizada a metodologia proposta por Christiansen (1942) e citada por Bernardo et al. (2006), para avaliação da uniformidade de distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão convencional. Para tal, foi escolhido o microaspersor localizado no centro do sistema de irrigação. Ao redor dele foi demarcada uma área de $9 m^2$ ($3,0 \times 3,0 m$), igual ao espaçamento entre emissores, e essa área foi dividida em subáreas de $0,25 m^2$ ($0,5 \times 0,5 m$), sendo realizada a coleta das precipitações por meio da instalação de coletores de precipitação alocados no centro de cada subárea, conforme a Figura 2.2.4. Cada teste teve duração de 60 minutos.



Figura 2.2.4. Avaliação da uniformidade utilizando metodologia de aspersão convencional.

Foi selecionado para expressar o coeficiente de uniformidade de distribuição, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC – Equação 2), proposto por Christiansen (1942).

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum |L_i - L_m|}{n \cdot L_m}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

em que: CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen, %; L_i – lâmina coletada no emissor “i”, mm; L_m – lâmina média de todas as observações, mm; n – número de emissores.

2.2.2.4 Análise estatística dos dados

Foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (CONOVER, 1980), para verificar se houve diferença estatística entre os valores calculados de CUC dos dois sistemas em cada metodologia. O teste de comparações múltiplas utilizado foi a menor diferença significativa de Fisher (LSD) (CONOVER; IMAN, 1981), aplicada com a correção de Bonferroni (SHINGALA; RAJYAGURU, 2015). As análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2018), utilizando-se o pacote Agricolae (DE MENDIBURU, 2019).

2.2.3 Resultados e discussão

2.2.3.1 Índice de claridade horário

Nas Tabela 2.2.1 e Tabela 2.2.2 são apresentados o dia e horário em que foi realizado cada teste, e os respectivos valores de radiação solar e índice de claridade horário (K_T^h) para o MSB em cada metodologia. Segundo Alvarenga et al. (2014), os painéis têm bom funcionamento de 9 às 15 horas, porque nesse período a R_a apresenta seus maiores valores. Dessa forma, o K_T^h permite caracterizar a radiação solar de uma região, sendo possível estimar o funcionamento das placas solares na produção de energia solar fotovoltaica (GALDINO et al., 2016).

Durante os horários do dia próximos ao nascer e ocaso do sol, mesmo em condições de céu claro a R_s é baixa. Assim, para confirmar a variação nas condições de nebulosidade foram classificados somente os valores de K_T^h compreendidos entre 9 e 15 horas.

Tabela 2.2.1. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do MSB método de irrigação localizada.

MSB método irrigação localizada					
Nº teste	Data	H. Início	H.Término	Rad. solar (w/m ²)	K_T^h
1	12/dez	13:15:00	13:20:00	1263.5	0.75
2	12/dez	13:35:00	13:40:00	1096.5	0.65
3	12/dez	13:49:00	13:54:00	1057.5	0.63
4	12/dez	14:12:00	14:17:00	1028.0	0.66
5	12/dez	14:27:00	14:32:00	1022.5	0.66
6*	12/dez	16:04:00	16:09:00	712.1	0.60
7*	13/dez	08:56:00	09:01:00	865.2	0.85
8	13/dez	09:12:00	09:17:00	1074.3	0.91
9	13/dez	09:29:00	09:34:00	1054.3	0.89
10	13/dez	09:47:00	09:52:00	523.3	0.44
11	13/dez	10:04:00	10:09:00	548.3	0.42
12	13/dez	10:18:00	10:23:00	498.5	0.35

*Valores de K_T^h não classificados

Tabela 2.2.2. Data, horário, radiação solar e índice de claridade horário para cada teste do MSB método de aspersão convencional.

MSB método aspersão					
Nº teste	Data	H. Início	H.Término	Rad. solar (w/m ²)	K_T^h
1	06/dez	09:06:00	10:07:00	677.8	0.58
2	06/dez	10:25:00	11:25:00	733.2	0.48
3	06/dez	11:35:00	12:35:00	865.2	0.53
4	06/dez	12:47:00	13:47:00	815.2	0.49
5	06/dez	13:58:00	14:58:00	1054.3	0.68
6	11/dez	08:57:00	09:57:00	437.2	0.37
7	11/dez	10:10:00	11:10:00	712.1	0.49
8	11/dez	11:22:00	12:22:00	908.1	0.55
9	11/dez	12:34:00	13:34:00	632.7	0.38
10	11/dez	13:47:00	14:47:00	759.9	0.49
11*	11/dez	14:59:00	15:59:00	543.5	0.41
12*	11/dez	16:12:00	17:12:00	563.3	0.54
13	12/dez	08:44:00	09:44:00	702.2	0.60
14	12/dez	09:57:00	10:57:00	703.5	0.49
15	12/dez	11:09:00	12:09:00	684.9	0.42
16*	12/dez	14:46:00	15:46:00	900.9	0.67

*Valores de K_T^h não classificados

Utilizando a metodologia de irrigação localizada foram realizados 10,0% em condições de céu nublado, 20,0% parcialmente nublado, com predomínio do componente difuso da radiação, 10,0% parcialmente nublado, com predomínio do componente direto da radiação e 60,0% céu claro. Já para a metodologia de aspersão convencional os valores foram, 0,0%, 76,9%, 15,4% e 7,7%, respectivamente. Assim, podemos observar a variação entre as condições de radiação solar para os testes.

2.2.3.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição método de irrigação localizada

Na Tabela 2.2.3 e Figura 2.2.5 observa-se que o MCB apresentou estatisticamente o maior valor de CUC, além de exibir menor grau de dispersão. Isso se deve ao sistema CB trabalhar com pressão e vazão constante, já que o controlador de carga fornece uma potência constante a bomba. Já o sistema SB, oscila a pressão e vazão durante os testes devido a variação da radiação solar incidente sobre o painel fotovoltaico.

Tabela 2.2.3. Teste de média dos valores de CUC metodologia de irrigação localizada.

Sistema	CUC	Grupo
MCB	97,10	a
MSB	95,21	b

, a = grupo de maior média e b = grupo de menor média.

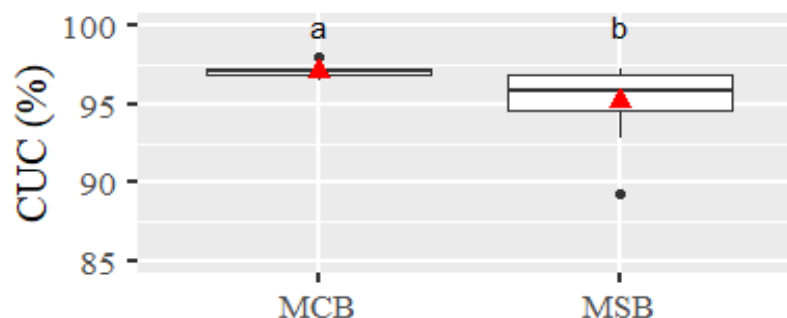


Figura 2.2.5. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada sistema utilizando a metodologia de irrigação localizada. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.

Apesar de o valor médio de CUC ser inferior para o MSB, de acordo com MANTOVANI (2001), esse valor é classificado como excelente. Apenas para uma avaliação do MSB que o valor de CUC foi classificado como bom, 89,26%, porém esse valor está muito próximo do limite inferior, 90,00%, para ser classificado como excelente. Nesse teste também foi observado um dos menores valores de radiação solar entre as avaliações. Todos os demais valores de CUC de ambos os sistemas foram classificados com excelente.

A grande maioria dos valores de CUC do MSB serem classificados como excelente, indica um grande potencial de utilização de sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos com microaspersores.

2.2.3.3 Análises de regressão em função da radiação solar

Na Figura 2.2.6 estão apresentadas as análises de regressão para o MSB, método de irrigação localizada, dos seus respectivos valores de CUC e vazão em função da radiação solar. Todos os parâmetros das equações foram significativos a 5% de significância.

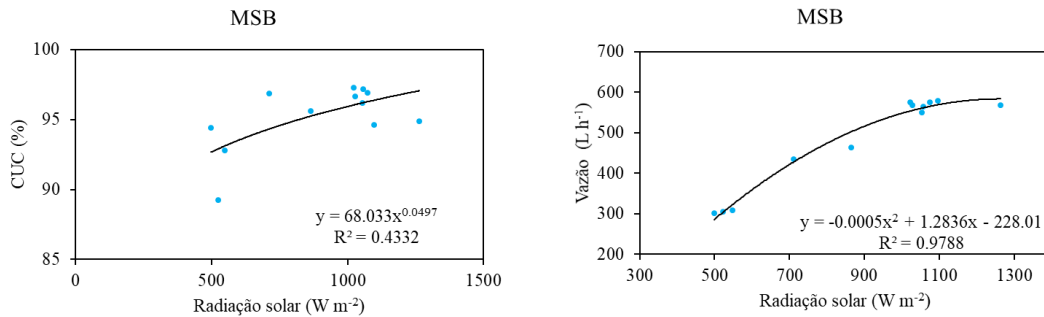


Figura 2.2.6. Regressão CUC e vazão em função da radiação solar.

Analisando o CUC em função da radiação solar observa-se que os valores do coeficiente de uniformidade de distribuição aumentam com o incremento da radiação solar. O modelo matemático que melhor descreve esse comportamento é o potencial.

Já a vazão do sistema em função da radiação solar possui uma correlação muito alta, apresentando valor de coeficiente de determinação próximo de 0,98, assim, a medida que a radiação solar aumenta se tem uma maior vazão. O modelo matemático que melhor descreve esse comportamento é o polinomial de segundo grau. De acordo com esse modelo há uma maior declividade da curva para menores valores de radiação, depois a declividade da curva diminui para maiores valores de radiação solar.

2.2.3.4 Variação da vazão e pressão

Na Figura 2.2.7 é apresentada a variação da vazão dos sistemas, método de irrigação localizada. Além disso, também se observa a variação da radiação solar para cada teste do MSB, método de irrigação localizada.

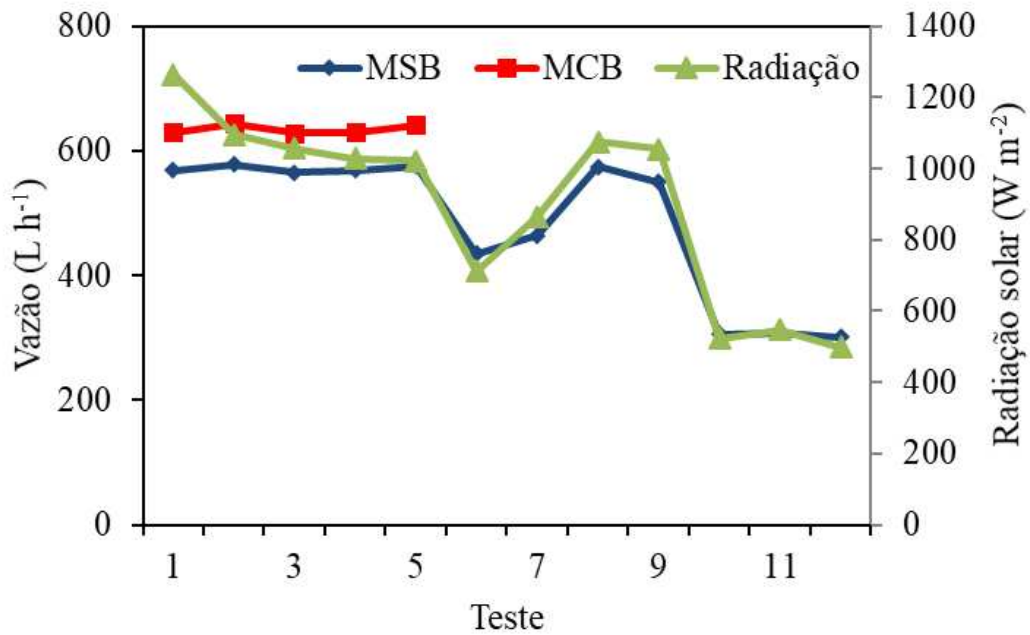


Figura 2.2.7. Variação da vazão dos sistemas e radiação solar observada para as avaliações com o MSB.

A vazão do MCB apresenta uma variação muito pequena, com desvio padrão de $6,86 \text{ L h}^{-1}$, por isso o número reduzido de repetições, já que o mesmo trabalha com potência constante. Já o MSB apresenta uma variação muito grande nas vazões, acompanhando a oscilação da radiação solar, com desvio padrão de $116,64 \text{ L h}^{-1}$.

Na Figura 2.2.8 observamos que a pressão variou muito pouco no MCB, já que o controlador de carga fornece uma potência constante a bomba. Já no MSB a pressão varia de acordo com a oscilação da radiação solar, apresentando uma grande variação de pressão em cada teste e até mesmo entre testes.

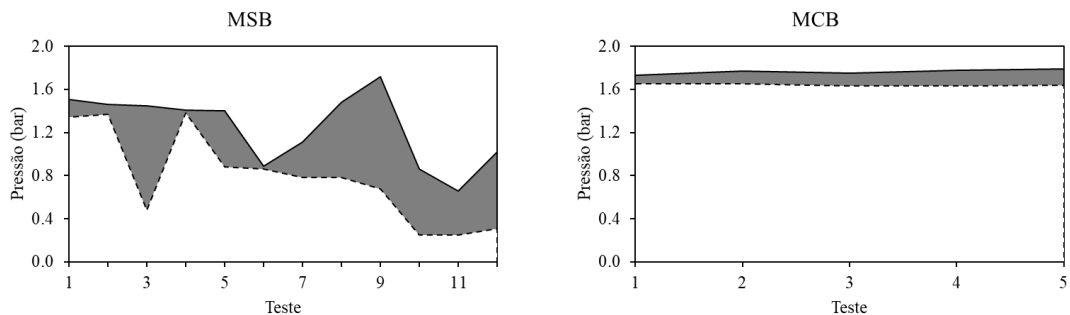


Figura 2.2.8. Variação da pressão em cada teste.

2.2.3.5 Coeficiente de uniformidade de distribuição método de aspersão convencional

Na Tabela 2.2.4 e Figura 2.2.9 observa-se que o MCB apresentou estatisticamente o maior valor de CUC, além de exibir menor grau de dispersão. No MCB os valores de CUC variaram de 71,19% a 78,18%, já no MSB variaram de 48,28% a 73,64%. Isso se deve ao MCB trabalhar com pressão e vazão constante. Já no MSB, durante os 60 minutos de duração de cada teste a radiação solar oscilou bastante (Figura 2.2.10), variando a pressão e vazão do sistema.

Tabela 2.2.4. Teste de média dos valores de CUC metodologia de aspersão convencional.

Sistema	CUC	Grupo
MCB	74,55	a
MSB	66,75	b

a = grupo de maior média e b = grupo de menor média.

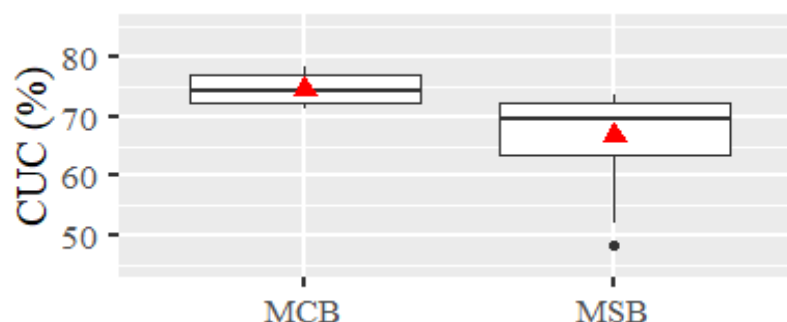


Figura 2.2.9. Teste de comparações múltiplas LSD para os valores de CUC observados para cada sistema utilizando a metodologia de aspersão convencional. Médias (símbolo vermelho) seguidas pela mesma letra não apresentam diferença estatística.

A variação da pressão proporciona uma variação do diâmetro molhado, alterando assim a sobreposição de água entre os emissores. Além disso, quando um sistema de microaspersão trabalha abaixo da pressão de projeto, mesmo que a pressão seja constante, automaticamente ele terá um menor diâmetro molhado, gerando uma menor sobreposição. Segundo Sandri et al. (2010), quando maior a sobreposição de água maior o valor de CUC, assim o MSB tem um coeficiente de uniformidade pior, utilizando o método de aspersão convencional, por apresentar sobreposição menor ou variada.

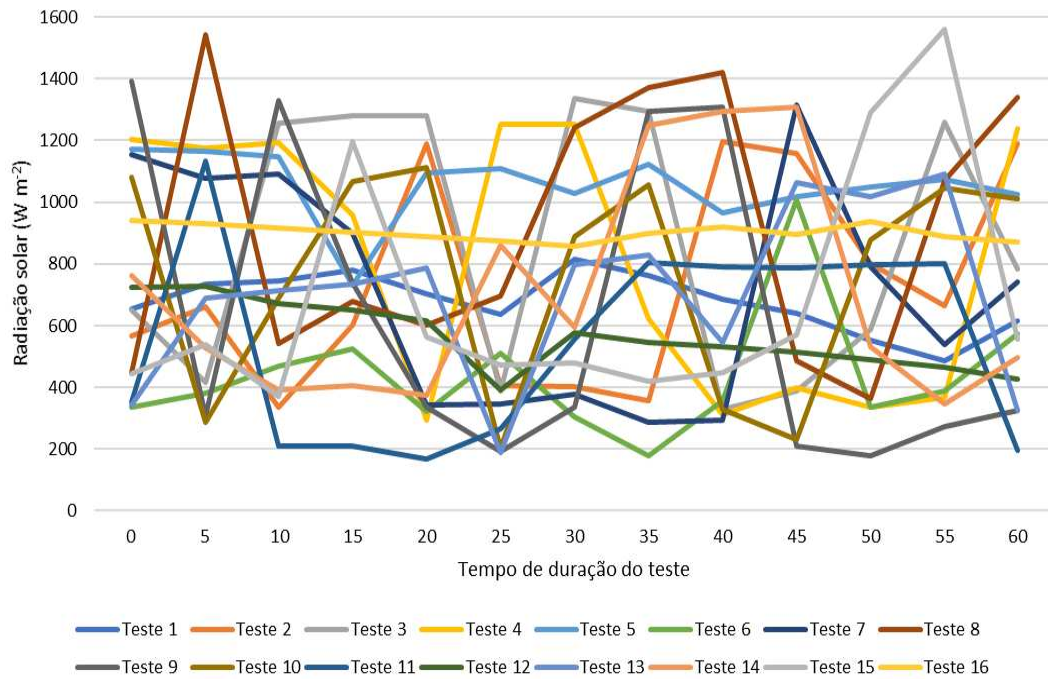


Figura 2.2.10. Variação da radiação solar durante cada teste.

2.2.3.6 Dimensionamento, funcionamento e manejo do sistema de irrigação fotovoltaico autônomo

Analisando situações onde a porcentagem de área molhada (PAM) não é 100%, a variação do diâmetro molhado tem que ser analisada com maior atenção em relação ao manejo da irrigação. O manejo da irrigação leva em consideração o sistema água-sola-planta-atmosfera (BERNARDO et al., 2006). Dessa forma, se ocorre uma diminuição do PAM devido uma menor pressão no sistema de irrigação, a planta terá menos água disponível, considerando sempre a profundidade do sistema radicular constante.

De acordo com o catálogo do fabricante do emissor utilizado no experimento, a diminuição da pressão de 1,5 bar para 1,2 bar, provoca uma diminuição do raio molhado de 3,8 m para 3,6 m. Essa diminuição de apenas 0,2 m, gera uma diminuição da área molhada de 10,25%.

Para evitar problemas com estresse hídrico em condições onde a PAM é inferior a 100%, a solução seria utilizar microaspersores autocompensantes de qualidade, dimensionando o sistema para trabalhar na curva de desempenho máximo da bomba próximo ao ponto médio da faixa de compensação de pressão do emissor. Além disso, o sistema deve ser desligado sempre que atingir-se o limite inferior da

faixa de compensação de pressão. Dessa forma, se tem um diâmetro molhado uniforme.

Segundo Sandri et al. (2010), em Anápolis – GO, utilizando metodologia similar à utilizada nesse trabalho, em condições onde toda área é molhada, como no caso de hortaliças e viveiros de mudas, à medida que se aumentou o espaçamento entre microaspersores e entre as linhas laterais ocorreu uma redução nos índices de CUC. Nessas situações recomenda-se escolher o espaçamento máximo em função da velocidade do vento, conforme a Tabela 2.2.5 (BERNARDO, 1995). Além disso, as linhas laterais devem ser posicionadas perpendiculares à direção predominante dos ventos.

No caso de sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos que molham 100% da área, devem ser empregados emissores normais e utilizado o menor valor de diâmetro molhado recomendado pelo fabricante para calcular o espaçamento entre os microaspersores. Dessa forma, se garante que na menor pressão de serviço do emissor se terá a sobreposição mínima para assegurar bons valores de CUC.

Tabela 2.2.5. Espaçamento de emissores, em função do diâmetro molhado e da velocidade do vento.

Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	Espaçamento em função do diâmetro molhado
Sem vento	65 a 70%
0 a 2,0	55 a 65%
2,0 a 4,0	45 a 55%
> 4,0	30 a 45%

FONTE: BERNARDO, 1995.

Dessa forma, quando toda área é molhada devem ser utilizados microaspersores normais, sem compensação de pressão, isso porque a medida que se tem maiores valores de radiação solar o painel fotovoltaico irá fornecer maior potência a bomba, proporcionando maiores pressões e vazões ao sistema de irrigação. Ocorrendo maior aproveitamento da radiação solar e permitindo uma maior área irrigada, aumentando a viabilidade econômica. Dessa forma, é de grande importância a utilização de emissores de qualidade, para que os mesmos tenham comportamento condizente com as suas especificações. Do ponto de vista hidráulico, os emissores normais são mais viáveis para sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos (LÓPEZ-LUQUE et al., 2015 e RECA et al., 2016).

Para um sistema de irrigação fotovoltaico autônomo com emissores normais ter um bom funcionamento devem ser atendidas as condições propostas por López-Luque et al. (2015) e Reça et al. (2016), apresentadas nas equações abaixo.

$$\frac{H_m}{H_M} = \frac{Q_m^2}{Q_M^2} = r_h \quad (\text{Equação 3})$$

$$\frac{P_m}{P_M} = \left(\frac{H_m}{H_M}\right)^{3/2} = r_h^{3/2} \quad (\text{Equação 4})$$

em que: H_m – altura manométrica total mínima; H_M – altura manométrica total máxima de projeto; Q_m – vazão mínima; Q_M – vazão máxima de projeto; P_m – potência mínima; P_M – potência máxima; r_h – relação entre a pressão mínima de trabalho do emissor e a pressão máxima de projeto.

Essas relações só devem ser assumidas se a relação entre a diferença de nível e H_M for menor que 0,1 (RECA et al., 2016). Aplicando essas relações vai se descobrir os valores de H_m , Q_m e P_m . Assim que o sistema de irrigação fotovoltaico autônomo com emissores normais atingirem esses limites inferiores o sistema deve ser desligado, evitando que os emissores funcionem abaixo do limite inferior de pressão recomendado pelo fabricante, o que assegura bons coeficientes de uniformidade ao sistema de irrigação.

Segundo De Souza et al. (2017), para realizar o manejo da irrigação é necessário saber a intensidade de aplicação média dos emissores e o sistema tem que apresentar uma boa eficiência de irrigação. Dessa forma, manejar esse tipo de sistema com emissores normais seria complicado, porque os emissores apresentam intensidade de aplicação variada em função da oscilação da vazão. Assim, teriam que ser estudadas técnicas de manejo mais apropriadas para esse sistema. Uma alternativa seria calcular o volume de água necessário por setor de irrigação, utilizando hidrômetros para realizar as leituras de volume.

2.2.4 Conclusões

Os dois sistemas apresentaram coeficientes de uniformidade de distribuição classificados como excelentes, utilizando o método de irrigação localizada para coleta dos volumes.

Em condições onde toda área é molhada, recomenda-se a utilização de sistemas de irrigação fotovoltaico autônomos com microaspersores normais, uma vez que apresentam coeficiente de uniformidade considerado excelente pelo método de irrigação localizada, proporcionando maior aproveitamento da radiação solar, bombeando maiores volumes de água. Porém, deve-se utilizar o menor valor de diâmetro molhado recomendado pelo fabricante para calcular o espaçamento entre os emissores.

Em condições de PAM inferior a 100% o sistema de irrigação fotovoltaico autônomo com microaspersores autocompensantes é mais viável, uma vez que não apresentam variações do diâmetro molhado.

2.2.5 Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56, 1998.

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. **Sinergia**, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 311-318, 2014.

ANAUGER. **Anauger solar r100**. Disponível em: <<https://www.anauger.com.br/linha-anauger-solar/anauger-solar-r100/>>. Acesso em: 28 de jan. de 2019.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6ª ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625p.

BORGES, C.G.R.; SERA, A.S. Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural. **Ingeniería Mecánica**, v.14, n 1, p.13-21, 2011.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia: Balanço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF. 2017.

CAMPOS, M. S.; DE ALCANTARA, L. D. S. Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação na agricultura familiar. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 205-214, 2018.

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

CONOVER, W. J. Practical nonparametric statistics. 1980.

CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. **The American Statistician**, v. 35, n. 3, p. 124-129, 1981.

DE MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical procedures for agricultural research**. R package version 1.3-0, 2019.

DE SOUSA, G. G. et al. Lâminas de irrigação para cultura do gergelim com biofertilizante bovino. **Magistra**, v. 26, n. 3, p. 343-352, 2017.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, v.27, n.50, p.155-162, 1980.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Willey & Sons, 1980. 762 p.

ESCOBEDO, J. F. et al. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 299-309, 2009.

GALDINO, J. J. B. et al. Estudo da radiação solar da cidade de petrolina através de um modelo empírico de céu claro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 98-105, 2016.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133p.

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

MANTOVANI, E. C. **Avalia: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada**. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MEAH, K.; FLETCHER, S.; ULA, S. Solar photovoltaic water pumping for remote locations. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 12, n. 2, p. 472-487, 2008.

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

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 08 de jan de 2019.

RECA, J. et al. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1143-1154, 2016.

SANDRI, D., MESQUITA, M., BESSA, K. S., & PRADO, L. C. Influência do tempo de uso sobre as características hidráulicas do microaspersor do grupo modular. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1089-1100, 2010.

SHINGALA, M. C.; RAJYAGURU, A. Comparison of post hoc tests for unequal variance. **International Journal of New Technologies in Science and Engineering**, v. 2, n. 5, p. 22-33, 2015.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSZKOWICZ, M.; CAVALCANT, E.S.C.; LYRA, F.J.M.; NOGUEIRA, A.M.B. **Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

WAZED, S. M. et al. A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1206-1225, 2018.