

Uniformidade da irrigação por gotejamento com energia fotovoltaica autônoma utilizando rastreador solar

Uniformity of drip irrigation with autonomous photovoltaic energy using solar tracker

Uniformidad del riego por goteo con energía fotovoltaica autónoma mediante seguidor solar

Recebido: 04/12/2023 | Revisado: 11/12/2023 | Aceitado: 12/12/2023 | Publicado: 15/12/2023

Diego Berwanger

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3448-7334>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: diego@bmsolar.com.br

Soni Willian Haupenthal

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2598-4133>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: soniwillian@hotmail.com

Jair Antonio Cruz Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8140-444X>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: jair.siqueira@unioeste.br

Marcio Antonio Vilas Boas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-8164>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: marcio.vilasboas@unioeste.br

Resumo

Objetivou-se avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento, utilizando energia fotovoltaica autônoma. O experimento foi composto por um módulo fotovoltaico, diretamente conectado à bomba de água, com recalque conduzido a um sistema de irrigação formado por quatro tubos gotejadores instalados em uma bancada. Os ensaios foram realizados com o fornecimento de energia, utilizando o sistema fixo e de rastreamento solar, de modo que os dois tratamentos se caracterizam da seguinte maneira: T1 - Fixo e Nível e T2 – Rastreamento e Nível. Os coletores foram posicionados para coleta da vazão às 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 e 17:00 horas. No sistema de energia, foram medidos os parâmetros de tensão, corrente e irradiação; na irrigação, a vazão da água, e pressão de serviço inicial e final. Calculou-se os Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) além do gráfico de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo. Os resultados apresentaram maior estabilidade, quando da utilização do sistema de rastreamento, com CV de 65,28% e potência de 64,71W, para o sistema fixo, e CV de 16,31% com 142,40W com o sistema de rastreamento. Ambos os tratamentos superaram os 90%, na uniformidade, com o CUD atingindo valor mínimo necessário do índice de capacidade do processo para se manter em níveis de excelência. Portanto, a melhor geração de energia do sistema de rastreamento influenciou positivamente a irrigação, o que pode ser constatado principalmente nos gráficos de controle de Shewhart.

Palavras-chave: Capacidade do processo; Controle estatístico; Energia solar; Irrigação localizada; Sustentabilidade.

Abstract

The objective was to evaluate the performance of a drip irrigation system, using autonomous photovoltaic energy. The experiment was composed of a photovoltaic module directly connected to the water pump, with the discharge conducted to an irrigation system formed by four drip pipes installed on a bench. The tests were carried out with the energy supply, using the fixed and solar tracking system, so that the two treatments are characterized as follows: T1 - Fixed and Level and T2 - Tracking and Level. The collectors were positioned for flow measurement at 9:00 AM, 10:00 AM, 11:00 AM, 12:00 PM, 1:00 PM, 2:00 PM, 3:00 PM, 4:00 PM, and 5:00 PM. In the energy system, voltage, current and irradiation parameters were measured; in irrigation, the water flow rate, and initial and final service pressure. The Distribution Uniformity Coefficients (DUC) and Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) were calculated in addition to the Shewhart control chart and the process capability index. The results showed greater stability when using the tracking system, with CV of 65.28% and power of 64.71W, for the fixed system, and CV of 16.31% with 142.40W with the tracking system. Both treatments exceeded 90%, in uniformity, with the DUC reaching minimum necessary value of the process capacity index to maintain excellent levels. Therefore, the better energy generation of the tracking system positively influenced irrigation, which can be seen mainly in the Shewhart control charts.

Keywords: Localized irrigation; Process capacity; Solar energy; Statistical control; Sustainability.

Resumen

El objetivo fue evaluar el desempeño de un sistema de riego por goteo, utilizando energía fotovoltaica autónoma. El experimento estuvo compuesto por un módulo fotovoltaico conectado directamente a la bomba de agua, conduciendo la descarga a un sistema de riego formado por cuatro tubos de goteo instalados sobre una mesa. Las pruebas se realizaron con el suministro de energía, utilizando el sistema fijo y de seguimiento solar, de manera que los dos tratamientos se caracterizan de la siguiente manera: T1 - Fijo y Nivel y T2 - Seguimiento y Nivel. Los colectores se colocaron para medir el flujo a las 9:00 a. m., 10:00 a. m., 11:00 a. m., 12:00 p. m., 1:00 p. m., 2:00 p. m., 3:00 p. m., 4:00 p. m. y 5:00 p. m. En el sistema energético se midieron parámetros de voltaje, corriente e irradiación; en riego, el caudal de agua y la presión de servicio inicial y final. Se calcularon los Coeficientes de Uniformidad de Distribución (CUD) y el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), además de la gráfica de control de Shewhart y el índice de capacidad del proceso. Los resultados mostraron mayor estabilidad al utilizar el sistema de seguimiento, con CV de 65,28% y potencia de 64,71W, para el sistema fijo, y CV de 16,31% con 142,40W con el sistema de seguimiento. Ambos tratamientos superaron el 90%, en uniformidad, alcanzando el CUD el valor mínimo necesario del índice de capacidad del proceso para mantener niveles excelentes. Por lo tanto, la mejor generación de energía del sistema de seguimiento influyó positivamente en el riego, lo que se puede observar principalmente en los gráficos de control de Shewhart.

Palabras clave: Capacidad de proceso; Control estadístico; Energía solar; Riego localizado; Sostenibilidad.

1. Introdução

Com uma área de 6,95 milhões de hectares, a agricultura irrigada brasileira está entre os 10 países com maior área equipada para irrigação do mundo, e com possível ampliação de 45% até 2030, chegando a 10,09 milhões de hectares irrigados (ANA, 2017).

Apesar da irrigação consumir grande parte da água doce, é comprovado que o método de irrigar por gotejamento economize água em seu processo e ainda reduz os níveis de evapotranspiração, quando comparado a outros métodos de irrigação (Wang, et al., 2020).

Portanto, o método de irrigação por gotejamento é uma solução plausível, na qual a principal característica do gotejamento efetiva-se pela aplicação da água direta sobre a região radicular, em pequenas intensidades, porém, com alta frequência, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo (Omofunmi, et al., 2009).

Na irrigação por gotejamento, existem fatores que interferem na uniformidade, como perdas de carga, a pressão de serviço, variações de vazão, entupimentos e tempo de uso (Lima et al., 2017). Sendo assim, com um bom manejo e cálculo dos valores de uniformidade mantém o sistema em pleno funcionamento (Oliveira et al., 2016; Suszek et al., 2019). Sendo assim, a uniformidade é um dos elementos mais importantes para a irrigação, uma vez que influencia diretamente a produtividade agrícola (Brauer et al., 2011).

O gotejamento se apresenta com o viés de suprir a necessidade hídrica em períodos de estiagem, com a irrigação completa, ou mesmo em períodos menores com irrigações que complementem as chuvas (Scarpate, et al., 2015).

Uma vez que um sistema adequado de energia, bombeamento e irrigação, as dependências da precipitação diminuem, juntamente as perdas na produção por falta de água, possibilitando ainda aumento na produtividade agrícola (Chandel, et al., 2017).

Ademais, a configuração de módulo fotovoltaico para suprir a necessidade energética do bombeamento de água, torna-se adequado em áreas remotas e afastadas, podendo suportar condições climáticas severas e por sua confiabilidade e desempenho, (Sotanke & Kalamkar, 2016; Valer et al., 2016). Além do mais, o aumento no consumo de energia e as preocupações com o aquecimento global promoveram o uso de energias renováveis no setor da agricultura de irrigação (García et al., 2020). Em sua configuração autônoma, o sistema fotovoltaico de bombeamento tem seu funcionamento, de modo que a energia é conectada diretamente à bomba d'água em corrente contínua, sendo que a tensão do terminal e a corrente são iguais à tensão e à corrente do módulo fotovoltaico. Portanto, a vazão da bomba varia com o nível de radiação solar incidente no módulo fotovoltaico (Chandel, et al., 2017).

Tendo como perspectiva maior estabilização no fornecimento de energia para um bombeamento satisfatório, durante o processo de irrigação, a instalação de um rastreador solar objetiva suplantar essa questão, uma vez que aumenta e estabiliza a geração de energia, durante o dia, tornando-o mais competitivo e consolidando o sistema fotovoltaico (Hoffmann et al., 2018).

Uma vez que o sistema de rastreamento mantém o módulo fotovoltaico perpendicular à incidência solar, aumentando a energia coletada (Al-Mohamad, 2004). Resultados de experimentos diagnosticaram um sobressalto na produção de energia por parte do sistema fotovoltaico em cerca de 10% a 40% a mais do que o sistema de ângulo fixo. Como consequência aumenta-se a eficiência do sistema de geração de energia (Mustafa et al., 2018).

Sendo assim, o bombeamento fotovoltaico aparece como uma solução relevante para para abastecimento ou mesmo bombeamento em áreas rurais (Valer et al., 2016).

Para melhor diagnosticar o sistema como um todo o controle estatístico de qualidade, tanto quanto os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo, são ferramentas estatísticas que apresentam uns resultados expressivos (Ribeiro & Caten, 2012).

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

Quanto ao índice de capacidade de processo, tem a qualificação de medir o quanto o procedimento é capaz de atender às especificações, indiretamente, através de parâmetros adimensionais.

Sabe-se, dessa maneira, que, em sistemas de irrigação, quanto maior o coeficiente de uniformidade, melhor é o atendimento quanto às especificações; utilizamos o limite inferior de especificação com o intuito de estabelecer o valor mínimo a partir do qual a irrigação é considerada aceitável (Costa, et al., 2005). Assim, um coeficiente alto e pouca variabilidade contribuem para o aumento do valor do índice, responsável pela adequação dessa irrigação aos critérios pré-estabelecidos (Montgomery, 2009).

Em conformidade com o exposto, o objetivo desta pesquisa foi de analisar sobre a utilização de um sistema de rastreamento fotovoltaico em relação a uniformidade no gotejamento, através da utilização do gráfico de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo, diagnosticando a influência do rastreamento fotovoltaico no fornecimento de energia e estabilização da pressão e vazão, do gotejamento.

2. Metodologia

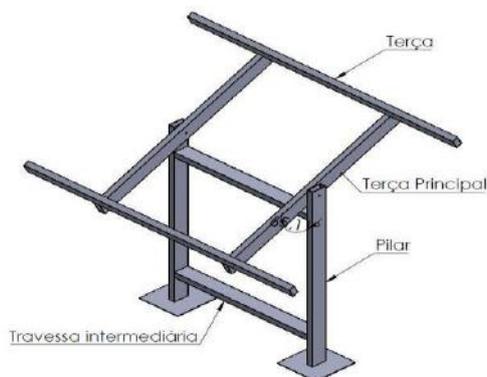
O experimento foi instalado no Laboratório de Irrigação e Fertirrigação (LIF), no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, nas coordenadas geográficas 24° 58' Sul e 53° 27' Oeste, apresentando, de acordo com o programa SUNDATA (2017), irradiação solar diária média de 4,75 kWh m⁻² dia⁻¹, no plano horizontal, e 4,96 kWh m⁻² dia⁻¹, no plano inclinado, com ângulo igual à latitude (25° Norte).

Foram montados dois sistemas, ambos alimentados por meio de energia solar com um módulo de silício policristalino, potência de 150 Wp, da marca Resun Solar, modelo RS6E 150P, direcionados para o Equador (Norte Verdadeiro), em que o sistema fixo foi instalado com inclinação referente à latitude do local, ou seja, 24° 58', uma vez que o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico deve ser igual à latitude do local onde o sistema será instalado. Dessa forma, é possível manter o painel fotovoltaico perpendicular à movimentação do sol ao longo do dia (Pinho & Galdino, 2014).

Já o sistema com rastreador solar, foi instalado sem inclinação em uma estrutura metálica fixada no solo com ângulo de 90°, com o pilar voltado para o norte verdadeiro. A parte superior da estrutura do rastreador solar (terça principal e terça) move-se no sentido Leste-Oeste, com os painéis fixados na terça.

A Figura 1 apresenta o layout desenvolvido em modelagem 3D para fabricação da estrutura metálica para fixação do módulo fotovoltaico.

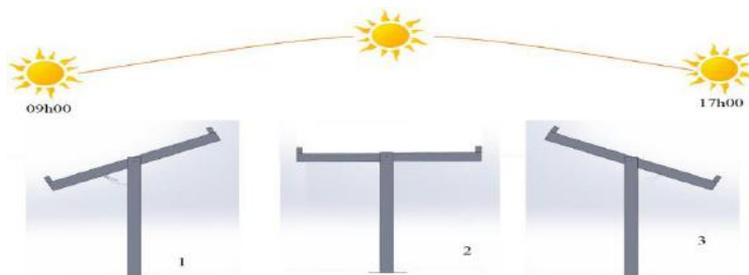
Figura 1 - Layout do suporte para instalação do módulo fotovoltaico e do sistema de rastreamento solar.



Fonte: Autores (2023).

O posicionamento inicial do rastreador (Figura 2) é com a face voltada para o leste, mantendo perpendicular a incidência de raios solares para as primeiras horas do dia (1). Assim, move-se para oeste conforme a movimentação do sol (2) e, no período da tarde, volta sua face para o oeste (3), buscando manter a incidência de raios solares, de forma perpendicular, durante todo o processo de irrigação fotovoltaica.

Figura 2 - Representação da movimentação do sistema de rastreamento solar ao longo do dia.



Fonte: Autores (2023).

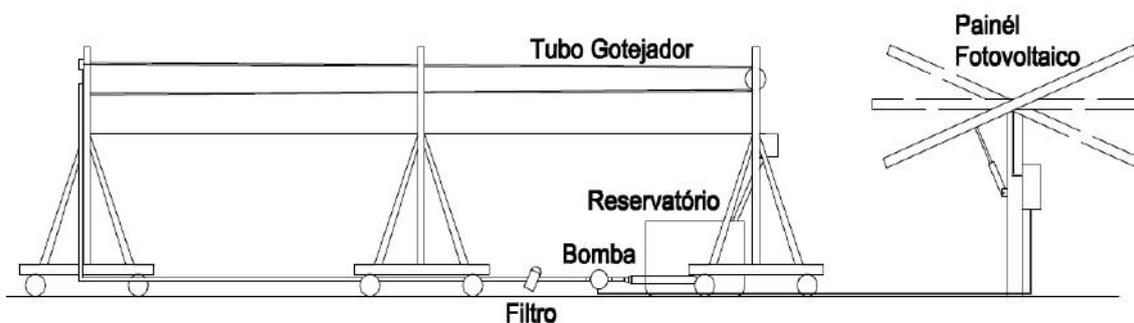
Para realizar a movimentação da mesa superior da estrutura do rastreador de um eixo, foi utilizado um atuador linear com 520 mm de curso acionado por motor elétrico monofásico, com redução de 1/23, fabricante PPA, modelo Pivo Home. Para realizar o controle do acionamento do motor do atuador linear, utilizado para movimentação da mesa superior da estrutura do rastreador de um eixo, foi considerado um temporizador digital, fabricante Exatron, modelo TMDS0BC, no qual, às 9:00 horas, ele partia do ponto inicial, voltado para a face leste com ângulo interno de 35°, chegando a 90° às 13:00 horas e a 70° às 17:00 horas.

Ambos os sistemas foram ligados diretamente à bomba hidráulica marca Sun Pumps, modelo SDS-D-228, com vazão máxima de 342 L h⁻¹, realizando o recalque até o sistema de irrigação, que utilizou os gotejadores da marca Irritec, modelo P1, instalado sobre a bancada de ensaios (Figura 3). Tal bancada possui 5,0 m de comprimento, com quatro linhas laterais, em que, por meio de roldanas, é possível realizar a volta da linha lateral, obtendo 10,0 m de comprimento. Conta, ainda, com um filtro de disco de 120 mesh.

Dois manômetros digitais da marca INSTRUTEMP, modelo 8215 (100 mwc), foram instalados no início do sistema de

irrigação e um no final da última linha.

Figura 3 - Layout do sistema de irrigação por gotejamento com a utilização de energia solar fotovoltaica com rastreamento solar.



Fonte: Autores (2023).

A coleta de dados de geração de energia do sistema fotovoltaico foi realizada a partir do Alicata amperímetro digital CAT III 600V - ET-3166B, em que os dados de tensão e corrente foram medidos no período de coleta da vazão do sistema de irrigação. Já os níveis de radiação, foram registrados por um medidor de energia solar portátil da marca Instrutherm, modelo MÊS-100.

No sistema de irrigação, a coleta dos dados foi realizada por meio da metodologia proposta por Keller e Karmeli (1975). Essa metodologia consiste na determinação da vazão em quatro emissores por linha lateral, ou seja, o primeiro gotejador, os gotejadores situados a 1/3 (17º gotejador) e a 2/3 (34º gotejador) do comprimento da linha lateral; o último gotejador (50º) em quatro linhas.

Os tratamentos foram dispostos da seguinte maneira: T1 – Sistema fotovoltaico Fixo e Irrigação em Nível; T2 – Sistema fotovoltaico com Rastreador e Irrigação em Nível. As variáveis respostas do fornecimento de energia foram irradiação, corrente e tensão, e do sistema de irrigação são a vazão do gotejador amostrado ($L h^{-1}$), o peso dos coletores (g) e pressão (Bar) medida na entrada e final do sistema de irrigação.

Para que ocorra igualdade dentro do período de coleta, todos os tratamentos se deram dentro do intervalo das 9:00 horas às 17:00 horas, em que os coletores foram posicionados para a mensuração da vazão às 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 e 17:00 horas.

Cabe ressaltar que a coleta ocorreu em períodos de céu aberto, mas, mesmo em períodos de passagens de nuvens, será realizada conforme estabelecido, averiguando posteriormente se a passagem das nuvens no momento de coleta apresenta alguma alteração significativa nos coeficientes de uniformidade.

A vazão dos gotejadores foi mensurada pelo método gravimétrico, a fim de se obter maior precisão. Com o volume coletado nos emissores durante 5 minutos, conforme recomendado pela NBR 9261 (ABNT, 2006), determina-se a vazão dos emissores, conforme a Equação 1.

$$q = \frac{V}{1000 \times t} \times 60 \quad (1)$$

Em que: q - Vazão do gotejador, $L h^{-1}$; V - volume coletada, mL; t - Tempo de coleta, minutos.

A fim de avaliar o sistema de irrigação, utilizou-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), e Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), proposto por Merriam & Keller (1978), conforme as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n \cdot x_{med}} \right\} \quad (2)$$

Em que: x_i : Valores individuais do volume de água contido nos coletores (mm); x_{med} : média geral do volume de água coletado (mm); n : Número de coletores na área de ensaio.

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{med}} \right) \quad (3)$$

Em que: X_{25} : Média do menor quartil dos volumes de água nos coletores (mm); x_{med} : média geral do volume de água coletado (mm).

Para a classificação dos dados de CUC e CUD, empregou-se a proposta de Frizzone et al. (2012), a fim de identificar a classificação do sistema de irrigação, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos coeficientes de uniformidade (CUC e CUD).

Classificação	CUC (%)	CUD (%)
Excelente	> 90	> 90
Bom	90 – 80	90 – 80
Aceitável	80 – 70	80 – 70
Ruim	70 – 60	70 – 60
Inaceitável	<60	<60

Fonte: Frizzone et al. (2012).

Busca-se monitorar se os resultados do fornecimento de energia (potência) e sistema de irrigação (CUC e CUD) foram confeccionados, por meio dos gráficos de controle de Shewhart, com o objetivo de investigar os parâmetros durante os ensaios. Para tal, calcularam-se os valores de limite superior de controle (LSC) e a linha inferior de controle (LIC), a partir das Equações 4 e 5.

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (5)$$

Em que: $\bar{\bar{X}}$: Média das médias; \bar{R} : Média das amplitudes dos dados; d_2 : 1,128 para $n=2$, considerando-se médias individuais, de acordo com a tabela descrita por Montgomery (2009).

Calculou-se o índice de capacidade do processo (C_{pi}), pela metodologia proposta por Montgomery (2009), para os resultados de CUC e CUD, a partir do limite inferior de especificação (LIE), a fim de verificar se a irrigação será capaz de manter um nível satisfatório de capacidade, utilizando a Equação 6.

$$C_{pi} = \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \quad (6)$$

Em que: \bar{X} : Média das médias; LIE: Limite inferior de especificação; σ : Desvio padrão.

A classificação do processo para os valores de uniformidade propõe como capaz ou adequado aqueles com $C_{pi} \geq 1,25$, haja vista que são processos considerados existentes e com especificações unilaterais (Montgomery, 2009), no caso 80 e 90%, para classificação da uniformidade em bom ou excelente, respectivamente.

As técnicas de controle estatístico de qualidade, bem como os gráficos de controle de Shewhart e índice de capacidade do processo foram calculados utilizando o software MINITAB, versão 16.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estatística descritiva dos dados

A Tabela 2 apresenta a estatística de cada tratamento, na qual constam os valores de média, coeficiente de variação, correspondentes aos valores de irradiação ($W m^{-2}$) e potência do sistema fotovoltaico, juntamente comparativo de média de ambos os tratamentos, de maneira que se aplica o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

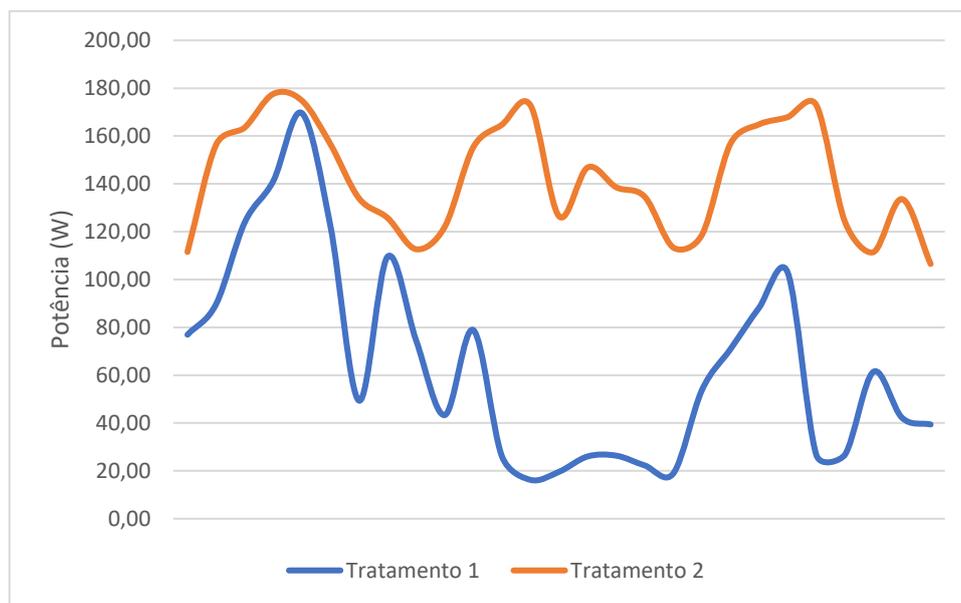
Tabela 2 - Estatística dos dados de ambos os tratamentos em relação a energia gerada.

Tratamento	Energia Gerada			
	Irradiação ($W m^{-2}$)	CV (%)	Potência (W)	CV (%)
Trat. 1 – Sistema Fixo e Nível	455,62 B	58,85	64,71 B	65,28
Trat. 2 – Sistema com rastreador solar e Nível	887,59 A	14,91	142,40 A	16,31

Médias seguidas de letras distintas, na mesma coluna, diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: Autores (2023).

Nota-se uma superioridade estatística do Tratamento 2, com rastreador solar, tanto nos índices de irradiação quanto na potência do sistema fotovoltaico, destacando ainda que o menor valor de coeficiente de variação do tratamento 2 competiu ao sistema um fornecimento regular de energia no decorrer das coletas, mantendo um valor de 887,59 $W.m^{-2}$ de irradiação e 142,40 W de potência; tal valor se aproxima do nominal do módulo fotovoltaico (150W). A Figura 4, a seguir, apresenta o gráfico dos valores de potência ao longo das coletas.

Figura 4 - Gráfico dos valores individuais de potência.



Fonte: Autores (2023).

O aumento do valor médio de irradiação, ao longo do dia, torna o sistema fotovoltaico mais eficiente; por consequência, também o valor médio de potência. Na pesquisa de Abhilash et al. (2021), foi implementado com sucesso o sistema de rastreamento de eixo único, em que a geração de energia solar pelo sistema de rastreamento aumentou a eficiência da bomba em até 79,4%. Da mesma forma, Sidek et al. (2017) mostraram os mesmos resultados, ao utilizar um sistema de rastreamento duplo, de maneira que aumentaram a eficiência do sistema em 26,9%.

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva de cada tratamento, na qual constam os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo que correspondem aos valores de vazão ($L h^{-1}$), e o valor médio de pressão (Bar), juntamente aos valores comparativos de média de ambos os tratamentos, aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos dados de ambos os tratamentos.

Tratamento	Vazão					Pressão
	Mínimo ($L h^{-1}$)	Média ($L h^{-1}$)	Máximo ($L h^{-1}$)	CV (%)	DP ($L h^{-1}$)	Média (Bar)
Trat. 1 – Sistema Fixo e Nível	0,834	0,881A	0,960	3,514	0,031	1,59 B
Trat. 2 – Sistema com rastreador solar e Nível	0,767	0,91 A	1,068	4,475	0,041	1,93 A

Médias seguidas de letras distintas, na mesma coluna, diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: Autores (2023).

Apesar da clara distinção no fornecimento de energia por parte do sistema fotovoltaico, não houve consequência nos valores de vazão do sistema de irrigação por gotejamento, mantendo-se estatisticamente iguais e com baixos valores de coeficiente de variação, o que demonstra homogeneidade nos valores (Montgomery, 2009). Entretanto, para a variável de pressão, o tratamento 2, com a utilização do rastreamento solar, ficou superior estatisticamente em relação ao sistema fixo. Todavia, cabe ressaltar que, utilizando o sistema de rastreamento, a pressão média do sistema de irrigação superou em 0,23 Bar o valor nominal pressão (1,7 Bar).

Tabela 4 - Estatística dos dados de ambos os tratamentos em relação à uniformidade.

Tratamento	Uniformidade					
	CUC (%)	CV (%) CUC	DP (L h ⁻¹) CUC	CUD (%)	CV (%) CUD	DP (L h ⁻¹) CUD
Trat. 1 – Sistema Fixo e Nível	95,42 A	2,21	2,11	96,44 A	0,85	0,82
Trat. 2 – Sistema com rastreador solar e Nível	94,25 B	2,53	2,38	95,03 B	0,61	0,58

Médias seguidas de letras distintas, na mesma coluna, diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: Autores (2023).

Em relação aos valores de uniformidade, os tratamentos apresentaram baixos valores de coeficiente de variação, indicando a existência de pouca variabilidade, sendo que todos os valores de CUC e CUD se caracterizam como excelentes, segundo a classificação. Entretanto, o tratamento 1 mostrou-se superior estatisticamente, em que essa superioridade pode ser explicada pelo valor médio de pressão ter se mantido dentro dos parâmetros nominais estipulados pelo fabricante dos tubos gotejadores.

Tais resultados foram corroborados pela pesquisa desenvolvida por Filho et al. (2018), que, ao analisarem o desempenho hidráulico do gotejador Irritec P1, com alteração na pressão, obtiveram valores de 97,64%, para CUC, e 96,03%, para CUD.

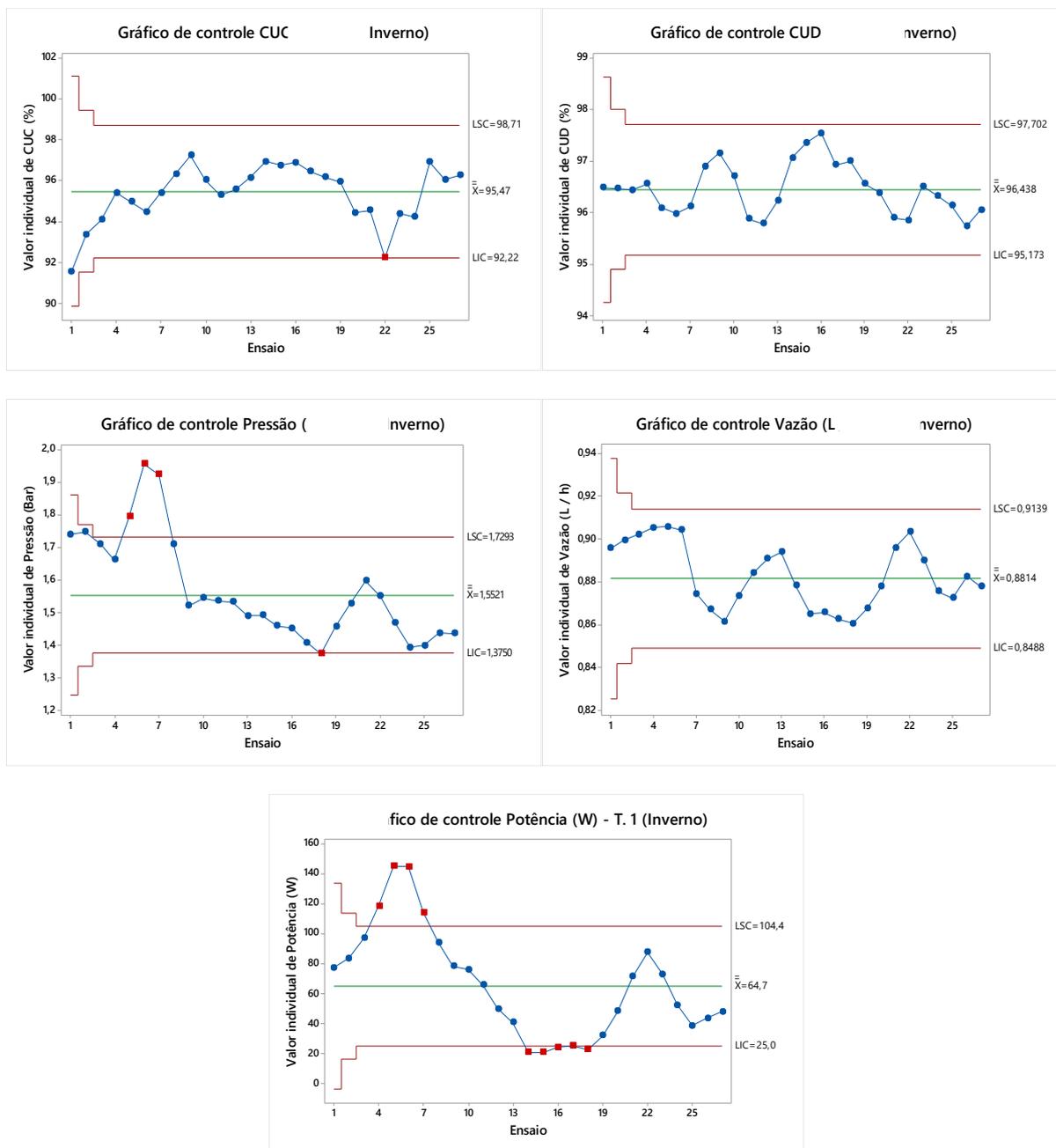
De forma geral, apesar da distinção em relação à produção de energia, que resultou em alteração dos valores de pressão, a uniformidade manteve qualificação excelente em ambos os tratamentos analisados.

3.2 Gráfico de Controle de Shewhart

Para identificar se o processo esteve ou não sob controle estatístico a ambos os tratamentos, foram elaborados gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais de CUC e CUD, findando identificar a variação da uniformidade durante os 27 ensaios. Juntamente aos gráficos, para as variáveis de pressão, vazão e potência, buscou justificar a variabilidade dos coeficientes de uniformidade.

Sendo assim, a Figura 5 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência para o tratamento 1.

Figura 5 - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência para o Tratamento 1.



Fonte: Autores (2023).

Verificou-se que, nesse tratamento, os valores das médias e dos limites inferiores de controle são excelentes perante a classificação de Frizzone et al. (2012). Além disso, no ensaio 22, o CUC encontra-se abaixo do LIC e, portanto, está fora de controle. Destaca-se que, nesse ensaio em questão, ficou registrada a potência média do sistema fotovoltaico de 164,89 W, com a pressão média de 2,036 Bar, ou seja, acima do valor limite estipulado pelo fabricante, o que resultou em instabilidade da uniformidade do sistema de gotejamento.

Observa-se que os gráficos referentes à potência e pressão estão fora do controle estatístico de qualidade, por apresentarem pontos acima e abaixo dos limites; já a vazão, apesar de não apresentar pontos fora de controle, caracterizou-se como fora de controle por ter 6 pontos sequências e ascensão. Sendo assim, apesar de não se manter sob controle, os parâmetros em análise não interferiram diretamente nos coeficientes de uniformidade, os quais se mantiveram acima de 90%, sendo

classificados como excelentes perante a classificação.

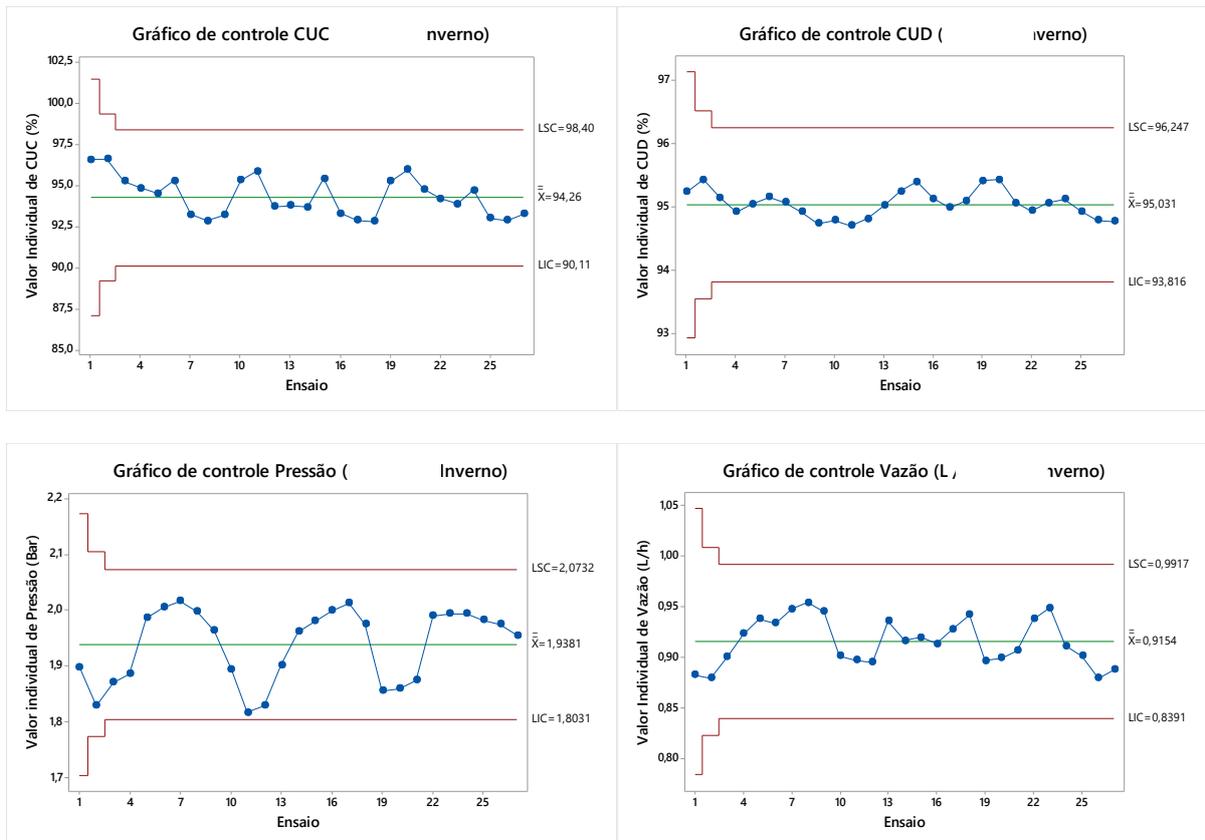
Os maiores valores de CUC foram verificados no ensaio 9, com as demais variáveis registrando 112,69 W de potência, 1,7 Bar de pressão e 0,9 L h⁻¹ de vazão, ou seja, todos os valores estão dentro dos limites nominais. Já o maior valor de CUD, foi para o ensaio 15, registrando 146,86 W de potência, 1,7 Bar de pressão e 0,91 L h⁻¹ de vazão, portanto, todos os valores também se mantiveram dentro dos limites nominais.

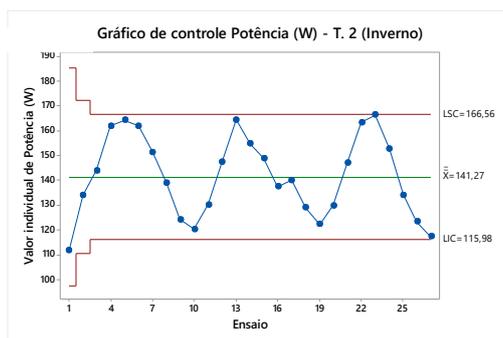
Individualizando os gráficos de potência e pressão, pode-se notar uma similaridade entre ambos, em que valores acima do limite superior de potência resultaram em valores acima do limite superior de pressão e o mesmo resultado se repete para valor abaixo do limite inferior. O ocorrido pode ser justificado pelo sistema ter seu layout sem a utilização de baterias ou controlador de carga, portanto, a variável de potência implica diretamente o bombeamento, que aumenta ou diminui a pressão de acordo com a amplitude da irradiação.

Hermes et al. (2015), analisando a irrigação por gotejamento, com base nos gráficos de controle de Shewhart, verificaram a ocorrência de valores abaixo do limite inferior de controle, definindo o sistema como fora de controle estatístico de qualidade, similar ao ocorrido nesse experimento.

Os gráficos de controle, em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência, para o tratamento 2, são apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência para o Tratamento 2.





Fonte: Autores (2023).

Nos gráficos referentes aos CUC e CUD, não houve pontos fora dos limites de controle. Todos os valores estão acima do limite de classificação de excelência de 90%. Destaca-se, ainda, que, nos demais gráficos, não existe nenhum ponto fora dos limites superior e inferior, tampouco a ocorrência de tendências positivas ou negativas, portanto, todas as variáveis em questão estão sob o controle estatístico de qualidade, demonstrando estabilidade no processo ao longo do tempo, ou seja, nos processos que estão sob controle estatístico, não existe efeito de fatores específicos no estudo (Tamagi et al., 2016).

Como apontamento, pode-se definir que a estabilidade da potência do sistema fotovoltaico culminou em uma estabilidade da pressão, mantendo a uniformidade sob controle. Assim como no tratamento 1, os maiores valores de CUC (ensaio 2) e CUD (ensaio 14) apresentaram os parâmetros de potência, pressão e vazão dentro dos valores nominais.

Juchen et al. (2013) aplicaram os gráficos de controle na irrigação por gotejamento na cultura da alface e obtiveram todos os resultados dos testes sob controle estatístico de qualidade, similar aos resultados encontrados neste estudo.

Já Andrade et al. (2017), ao analisarem o uso das ferramentas do controle estatístico de qualidade na análise da uniformidade de um sistema de irrigação por microaspersão, por meio do CUC e CUD, definiram que o gráfico de controle de Shewart foi satisfatório na determinação do melhor tratamento dentre os analisados.

3.3 Índice de Capacidade do Processo

Com o objetivo de apontar se a irrigação possui a capacidade de se manter sob controle no processo ao longo do tempo, foram calculados os índices de capacidade do processo (Cpi), considerando-se o limite inferior de especificação (LIE) em relação ao CUC, para cada tratamento, mostrados na Tabela 5. Estipulou-se o valor do LIE de 90% como excelente e 80% como bom, a partir da classificação proposta por Frizzone et al. (2012) para a irrigação. Ressalta-se que, segundo Montgomery (2009), o processo só é capaz de se manter sob controle quando o valor de Cpi é maior que 1,25 para processos existentes.

Tabela 5 - Índice de Capacidade do Processo (Cpi) para CUC, CUD, pressão, vazão e potência.

Tratamento	Cpi						
	CUC	CUD	CUC	CUD	Pressão	Vazão	Potência
	90%		80%		0,8 - 1,7 Bar	0,8 - 1,10 L h ⁻¹	50 - 150 W
Trat. 1 – Sistema Fixo	0,89	1,76	1,34	3,42	1,44	2,66	0,8
Trat. 2 – Sistema com rastreador solar	0,7	2,38	1,04	3,56	2,05	1,14	1,06

Fonte: Autores (2023).

O valor de CUD atingiu 90% de uniformidade ao longo do tempo para ambos os tratamentos; por levar em consideração, em seus cálculos, as 25% menores vazões em sua análise do sistema de irrigação, pode-se definir que a

uniformidade mantém níveis de excelência. Os valores de pressão suplantaram 1,25, mantendo-se sob controle ao longo do processo; apesar de, em ambos os resultados, a potência não atingir o valor, entretanto, tal resultado é decorrência da alta amplitude da irradiação ao longo das horas de coleta, que foram iniciadas pela manhã, às 09:00 horas, terminando à tarde, às 17:00 horas.

Em sua pesquisa, Haupenthal, et al. (2021), ao analisarem a uniformidade de emissão de água de um sistema de irrigação por microaspersão, utilizando energia fotovoltaico, concluíram que o índice de capacidade do processo mostrou-se capaz de diagnosticar se a irrigação tem competência de se manter sob controle e estável, com valor de índice de capacidade do processo de 1,457 para a Uniformidade de Emissão (UE), ou seja, o sistema foi capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade.

Valores similares foram encontrados por Andrade et al. (2017), em sua pesquisa, por meio da utilização de microaspersores, atingindo o valor mínimo de 1,25 apenas em 1 tratamento, quando o LIC foi de 90%, mas satisfazendo o parâmetro quando o LIC foi de 80% em todos os tratamentos apontados em relação ao CUC.

Já Silveira et al. (2021), com o objetivo de avaliar os diferentes métodos de um sistema de irrigação por gotejamento, em função da utilização de um sistema de bombeamento fotovoltaico amorfo indoor e sem armazenamento de energia, definiram que a instabilidade no bombeamento de água resultou em todos os valores de C_p abaixo de 1,25.

4. Conclusão

As uniformidades foram superiores a 90% nos tratamentos 1 e 2, sendo classificados como excelentes; quando da utilização do sistema de rastreamento constatou-se um aumento na produção de energia com maior estabilidade, elevando no sistema de irrigação a pressão média.

O gráfico de controle de Shewhart indicou o tratamento 2 sob controle estatístico de qualidade em todas as variáveis analisadas. Já o índice de capacidade do processo, mostrou que ambos os tratamentos são capazes de se manter sob controle ao longo do tempo para um CUD de 90%.

Sendo assim, conclui-se que, apesar de melhorar e tornar estável a geração de energia, a utilização do sistema de rastreamento não influenciou estatisticamente os valores de uniformidade; entretanto, quando levamos em consideração o processo de irrigação, pode-se confirmar que houve influência positiva, uma vez que houve maior estabilidade na geração de energia. Conseqüentemente, isso influenciou o bombeamento, tornando mais estável a vazão dentro do sistema de irrigação, bem como amplitude nas horas da irrigação com funcionamento pleno de bombeamento.

Visando uma ampliação dos resultados e confirmação do método de irrigação por gotejamento autônomo com rastreador solar, como futuros trabalhos recomendasse a análise em diferentes inclinações das linhas de gotejamento buscando maior realidade ao encontrado a campo, e a utilização de um banco de baterias visando suplantiar a questão de dias nublados e possivelmente extensão do período de irrigação para horários de baixa incidência de irradiação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Cascavel, pelo apoio no estudo.

Referências

Abhilash, P., Kumar, R. N., & Kumar, P. P. (2021). Solar powered water pump with single axis tracking system for irrigation purpose. *Materials Today: Proceedings*, 1, 553-557.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio (2006). ABNT NBR ISSO 9261. ABNT.

- Agência Nacional De Águas (Brasil) (2017). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório 2017. ANA, no prelo.
- Andrade, M. G., Vilas Boas, M. A., Siqueira, J. A. C., Dieter, J., Sato, M., Hermes, E., Mercante, E., & Tokura, L. K. (2017). Statistical quality control for the evaluation of the uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. *Renewable and Sustainable Energy*, 78, 743-753. 10.1016/j.rser.2017.05.012
- Brauer, R. L., Cruz, R. L., Villas Boas, R. L., & Pletsch, T. A. (2011). Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. *Irriga, Botucatu*, 16(1), 21-30.
- Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2017) Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 163-175.
- Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling*. University of California.
- Costa, A. F. B., Epprecht, E. K., & Carpinetti, L. C. R. (2005). *Controle estatístico de qualidade*. (2a ed.). Atlas.
- Filho, J. A. F., Silva, Y. F., Dalri, A. B., Palaretti, L. F., Zanini, J. R., & Coelho, A. P. (2018) Caracterização hidráulica de gotejadores de fluxo turbulento. *Irriga, Botucatu*, 23(2), 380-389.
- Frizzone, J. A., Fretas, P. S. L., Rezende, R., Faria, M. A. (2012). Microirrigação: gotejamento e microaspersão. EDUEM.
- García, A. M., Perea, R. G., Poyoto, E. C., Barrios, P. M. (2020). Comprehensive sizing methodology of smart photovoltaic irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 229, 1-9.
- Hauptenthal, S. W., Vilas Boas, M. A., Siqueira, J. A. C., Tokura, L. K., & Nascimento, L. F. J. (2021). Statistical quality control to emission uniformity in micro sprinkler with autonomous photovoltaic pumping. *Research, Society and Development*, 10(11), 1-12. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19867>
- Hermes, E., Vilas Boas, M. A., Rodrigues, L. N., Melo, E. L., Gonçalves M. P., Lins, M. A., & Berger, J. S. (2015). Process capacity index in drip irrigation with cassava wastewater processing. *African Journal of Agricultural Research*, 10, 1427-1433.
- Hoffmann, F. M., Molz, R. F., Kothe, J. V., Nara, E. O. B., & Tedesco, L. P.C. (2018). Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal For Photovoltaic Panels. *Renewable Energy*, 115, 750-759.
- Juchen, C. R., Suszek, F. L., & Vilas Boas, M. A. (2013). Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuais agroindustriais. *Irriga, Botucatu*, 18(1), 243-256.
- Keller, J., & Karmeli, D. (1975). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, 17, 678-684.
- Lima, M. G. M., Dantas Neto, J., Ferreira, D. J. L., Gomes, A. H. S., & Vasconcelos, G. N. (2017). Comportamento hidráulico de sistema de irrigação por gotejamento em função da pressão de serviço adotada. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 12(1), 167-171.
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). *Farm Irrigation System Evaluation: a guide for management* (3rd. Ed.). Logan: Utah State University.
- Montgomery, D. C. (2009). Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria Lima De Farias, Vera Regina Lima De Farias e Flores, Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. (4a ed.). LTC.
- Mustafa, F. I., Shakir, S., Mustafa, F. F., Naiyf, A. T. (2018). Simple Design and Implementation of Solar tracking System Two Axis with Four Sensors for Baghdad city. *The 9th International Renewable Energy Congress*, 5.
- Oliveira, E. V., Arraes, F. D. D., Torres, W. L. V., Souza, S. A., & Vieira, W. L. (2016). Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão e estimativa da demanda hídrica para diferentes fruteiras no município de Iguatu – CE. *Revista Conexoes – Ciências e tecnologia*, 10(2), 40-46.
- Omofunmi, O. E., Ilesanmi, O. A., & Orisabinone, T. (2009). Performance evaluation of hydraulic parameters of a developed drip irrigation system. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 9-16.
- Periasamy, P., Jain, N. K., & Singh, I. P. (2015). A review on development of photovoltaic water pumping system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 918-925.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.
- Ribeiro, J. L. D., & Caten, C. S. T. (2012). *Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição*. Série Monográfica Qualidade-Control Estatístico do Processo. Editora.
- Scarpore, F. V., Leal, M. R. L. V., & Victoria, R. L. (2015). The challenges of sugarcane ethanol in Brazil: past, presente and future. Bioenergy and Latin America: A Multi-Country Perspective. *JRC technical reports*, p. 91-104.
- Sidek, M. H. M. Azis, N., Hasan, W. Z. W., AB Kadir, M. Z. A., Shafie, S., & Radzi, M. A. M. (2017). Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Energy*, 124, 160-170.
- Silveira, V. F., Siqueira, J. A. C., & Nascimento, L. F. J., et al. (2021). Comparative study of drip irrigation systems using indoor amorphous photovoltaic panels. *Research, Society and Development*, 10(11), 1 -14.
- Sotanke, V. C., & Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1038-1067.

Suszek, F. L., Vilas Boas, M. A., Sampaio, S. C., Juchen, C. R., & Lima, V. L. A. (2019). Desobstrução de emissores com ácido fosfórico em fertirrigação com cloreto de potássio vermelho. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 12(1), 9-24.

Tamagi, J. T., Uribe-Opazo, M. A., Johann, J. A., & Vilas Boas, M. A. (2016). Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas. *Irriga*, 21(4), 631 – 647.

Wang, Y., Li, S., Qin, S., Guo, H., Yang, D., Lam, H. (2020). How can drip irrigation save water and reduce evapotranspiration compared to border irrigation in arid regions in northwest China. *Agricultural Water Management*, 239.