

## Energia solar fotovoltaica autônoma na irrigação por pivô central

Photovoltaic solar energy in central pivot irrigation

Energía solar fotovoltaica autónoma en riego de pivote central

Recebido: 02/07/2024 | Revisado: 10/07/2024 | Aceitado: 11/07/2024 | Publicado: 14/07/2024

**Diego Berwanger**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3448-7334>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil  
E-mail: [diego@bmsolar.com.br](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:marcio.vilasboas@unioeste.br)

### Resumo

O trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por pivô central utilizando energia de um sistema fotovoltaico isolado, através de um estudo quantitativo experimental em laboratório. O fornecimento de energia foi composto por oito módulos fotovoltaicos com potência de 665W e um inversor de frequência de 1,5kW, ligado por fim, diretamente ao sistema de bombeamento. Os parâmetros de potência do sistema fotovoltaico e do motor da bomba de água, foram medidos simultaneamente a coleta da vazão da água do pivô central. O experimento foi conduzido no Núcleo Experimental da Engenharia Agrícola (NEEA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, realizando 5 dias de coleta com 30 ensaios por dia, totalizando 150 coleta. A geração de energia por parte do sistema fotovoltaico foi instável com coeficiente de variação de 9,82 a 56,74%, já os valores de pressão e vazão mantiveram-se dentro dos valores nominais de especificação de acordo com o índice de capacidade do processo. Os valores de uniformidade ficaram entre 54,78 e 61,38%, portanto classificados como ruins, entretanto destaca-se que a estabilidade da geração de energia melhorou a uniformidade. Os gráficos de controle de Shewhart, definiram que a presença de nuvens, bem como valores baixos de radiação afetam a geração de energia, pressão e vazão do sistema de irrigação, comprometendo a uniformidade. Sendo assim conclui-se que o layout do sistema em estudo não foi satisfatório para uma irrigação adequada por pivô central. Recomendado portanto a utilização de um banco de baterias para estabilizar a geração e consumo de energia.

**Palavras-chave:** Autonomia; Controle estatístico; Energia renovável; Uniformidade; Sustentabilidade.

### Abstract

The aim of this research was to evaluate the performance of a central pivot irrigation system using energy from an isolated photovoltaic system, through a study experimental lab quantitative study. The energy supply consisted of eight photovoltaic modules with a power of 665W and a 1.5kW frequency inverter, finally connected directly to the pumping system. The power parameters of the photovoltaic system and the water pump motor were measured simultaneously while collecting the water flow from the central pivot. The experiment was conducted at the Experimental Center for Agricultural Engineering (NEEA) at the State University of Western Paraná, UNIOESTE, carrying out 5 days of collection with 30 tests per day, totaling 150 collections. Energy generation by the photovoltaic system was unstable with a coefficient of variation of 9.82 to 56.74%, while the pressure and flow values remained within the nominal specification values according to the process capacity index. The uniformity values were between 54.78 and 61.38%, therefore classified as poor, however it is highlighted that the stability of energy generation improved uniformity. Shewhart's control charts defined that the presence of clouds, as well as low radiation values, affect the energy generation, pressure and flow of the irrigation system, compromising uniformity. Therefore, it is concluded that the layout of the system under study was not satisfactory for appropriate central pivot irrigation. It is therefore recommended to use a battery bank to stabilize energy generation and consumption.

**Keywords:** Autonomy; Renewable energy; Statistical control; Sustainability; Uniformity.

## Resumen

El objetivo del trabajo fue evaluar el rendimiento de un sistema de riego de pivote central utilizando energía procedente de un sistema fotovoltaico aislado, a través de un estudio experimental de laboratorio estudio cuantitativo. El suministro energético estuvo compuesto por ocho módulos fotovoltaicos con una potencia de 665W y un inversor de frecuencia de 1,5kW, finalmente conectados directamente al sistema de bombeo. Los parámetros de potencia del sistema fotovoltaico y del motor de la bomba de agua se midieron simultáneamente mientras se recogía el flujo de agua del pivote central. El experimento se realizó en el Centro Experimental de Ingeniería Agrícola (NEEA) de la Universidad Estadual del Oeste de Paraná, UNIOESTE, realizando 5 días de colecta con 30 pruebas por día, totalizando 150 colectas. La generación de energía por parte del sistema fotovoltaico fue inestable con un coeficiente de variación de 9,82 a 56,74%, mientras que los valores de presión y flujo se mantuvieron dentro de los valores de especificación nominal según el índice de capacidad del proceso. Los valores de uniformidad estuvieron entre 54,78 y 61,38%, por lo que se clasificó como pobre, sin embargo se destaca que la estabilidad de la generación de energía mejoró la uniformidad. Las cartas de control de Shewhart definieron que la presencia de nubes, así como los bajos valores de radiación, afectan la generación de energía, la presión y el flujo del sistema de riego, comprometiendo la uniformidad. Por lo tanto, se concluye que el trazado del sistema en estudio no fue satisfactorio para un riego de pivote central apropiado. Por ello se recomienda utilizar un banco de baterías para estabilizar la generación y el consumo de energía.

**Palabras clave:** Autonomía; Control estadístico; Energía renovable; Uniformidad; Sostenibilidad.

## 1. Introdução

Com aumento da demanda por energia do setor de irrigação, sistemas de energia renovável e autônomas surgem como uma alternativa viável (Mérida García et al., 2020), sendo a energia fotovoltaica uma escolha executável visando fornecimento de energia em zonas rurais ou mesmo locais afastados da rede de energia convencional.

Entretanto, no meio rural, o valor monetário com energia elétrica é menor, uma vez que as propriedades possuem tarifas subsidiadas (Dantas & Pompermayer, 2018). Mesmo com tal afirmação, a instalação dos sistemas fotovoltaicos está sendo considerada e vem apresentando crescente devido ao seu custo de implantação ter diminuído, juntamente ao aumento dos valores tarifários cobrados pelas concessionaria de energia que são repassados a todos os grupos consumidores.

Portanto, tornou-se acessível à utilização de fontes renováveis de energia que gerem impactos ambientais mínimos, propendendo à sustentabilidade e a diminuição do impacto decorrente do seu consumo (Mirzaei & Mohiabadi, 2017).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia, a demanda por energia elétrica, no Brasil, tende a atingir a marca de 1.465 TWh até 2050 - contra os 463 TWh consumidos em 2013 com uma taxa de crescimento de 3,2% ao ano para serem supridos pelo Sistema Elétrico Nacional, descontados os valores provenientes de autoprodução. Isso significa que será necessário investir em fontes alternativas de geração de energia elétrica para compor a matriz elétrica brasileira, além de maximizar a eficiência energética destas fontes para conseguir suprir a demanda projetada (EPE, 2016).

Além disso, ressalta-se que o Brasil possui amplo potencial para geração fotovoltaica, dado seus altos níveis de radiação por todo seu território (Gomes et al., 2020).

Segundo Almeida (2021), a energia solar fotovoltaica é gerada a partir da conversão direta da radiação solar em eletricidade, a qual ocorre por meio da célula fotovoltaica. Uma vez que por não depender de grandes áreas, não emitir gases nocivos na Sistemas isolados da rede ou off-grid, são definidos pela carga de consumo e o sistema fotovoltaico formado por módulos e inversor. Para que o fornecimento de energia seja ininterrupto, em geral, faz-se uso de um acumulador (bateria), que dissocia as horas de geração do horário de consumo. Outro equipamento comumente utilizado é o controlador de carga, que tem como principal função não deixar que ocorram danos na bateria por sobrecarga, ou descarga profunda. Essa configuração de sistema é comumente usada em sistema de pequena demanda de energia, (Magalhães, 2016).

Atualmente, a utilização da energia fotovoltaica para suprir a demanda energética de bombas d'água aparece como uma tecnologia viável, entretanto com grandes desafios, salienta-se que o sistema pode fornecer energia desde pequenos a

grandes sistemas de bombeamento, figurando como uma alternativa ambiental favorável quando comparada aos sistemas convencionais como geradores a diesel (Mittal et al., 2012).

Para Li et al. (2017) os elevados custos com o diesel tanto quanto seu armazenamento influencia negativamente no bombeamento da água para fins de irrigação. Portanto, buscando considerar a necessidade de reduzir os problemas relacionados ao fornecimento e geração de energia elétrica, surgiu a opção do uso de energia fotovoltaica, que poderiam ser geradas na propriedade, solucionando os problemas relacionados a essa questão e a demanda do sistema de produção do país. A utilização da energia fotovoltaica em pivô central torna-se uma solução para localidades que não possuem o fornecimento estabelecido ou sofrem com interrupções constantes, sendo mais segura e limpa que a utilização de diesel. Além de ser uma alternativa para produtores que pensam em uma produção mais sustentável.

Salienta-se que o pivô central em suas operações mantenha o consumo da energia elétrica diretamente proporcional ao consumo de água, onde, quanto maior a lâmina d'água aplicada, maior o período de operação. Então, aplicar apenas a lâmina requerida, de maneira uniforme, converte o investimento realizado, no sistema irrigado, em aumento na produtividade e economizando energia do sistema de bombeamento (Mohamed et al., 2019).

Apesar de prioritariamente depender de um alto valor de investimento, os sistemas fotovoltaicos possuem um curto período de retorno do investimento, entre 4 e 8 anos, dependendo do valor da tarifa paga por kWh e da quantidade de radiação solar do local de instalação, além de baixo custo de manutenção, não gerar ruídos e resíduos, autossuficientes e renovável, com a recuperação do investimento (Elecktsolar, 2018).

Destaca-se ainda que diversos setores da agricultura estão procurando soluções para fornecimento de energia segura e estável, encontrando nas energias renováveis e, principalmente, na energia fotovoltaico uma forma de suplantando essa questão, principalmente pela queda de preço dos módulos fotovoltaicos e pela alta confiabilidade na geração de energia (IRENA, 2018), se tornando uma alternativas promissoras para a eletrificação de zonas rurais, principalmente por inúmeras fazendas, tanto de baixa quanto alta demanda de energia, estarem isoladas ou longe das instalações da rede elétrica, de modo que o custo da eletrificação convencional tende a ser alto (Zvala et al., 2020).

Em conformidade com o exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a utilização de um sistema de fornecimento de energia autônoma e renovável utilizando para avaliar os resultados o gráfico de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo para diagnosticar a influência da variabilidade no fornecimento de energia solar fotovoltaica na estabilização da pressão e vazão do pivô central, por meio dos coeficientes de uniformidade.

## 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<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> no plano horizontal e 4,96 kWh m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> no plano inclinado com ângulo igual a latitude (25° Norte).

Os módulos do sistema fotovoltaico foram implantados em estrutura sobre o telhado do laboratório de irrigação e fertirrigação (LIF) com orientação a nordeste e inclinação de 10°, enquanto o sistema de irrigação por pivô central foi instalado nas adjacências do laboratório.

Destaca-se ainda que diversos setores da agricultura estão procurando soluções para fornecimento de energia segura e estável, encontrando nas energias renováveis e, principalmente, na energia fotovoltaico uma forma de suplantando essa questão, principalmente pela queda de preço dos módulos fotovoltaicos e pela alta confiabilidade na geração de energia (IRENA, 2018), se tornando uma alternativas promissoras para a eletrificação de zonas rurais, principalmente por inúmeras fazendas, tanto de

baixa quanto alta demanda de energia, estarem isoladas ou longe das instalações da rede elétrica, de modo que o custo da eletrificação convencional tende a ser alto (Zvala et al., 2020).

O consumo energético do pivô central foi levantado a partir do CV da motobomba utilizada para a pressurização do sistema, sendo esta fabricada pela empresa FAMAC, trifásica, com 1,5 cv, modelo FES3A com tensão de alimentação de 220 V. Portanto para determinação dos Quilowatt será convertido o valor de CV a partir da Equação 1.

$$kW = CV * 0,74 \quad (1)$$

Onde: kW: quilowatt; CV: Cavalo-vapor.

Portanto, ao converter o valor de CV em kW, o sistema fotovoltaico fornecerá uma potência equivalente a 1,471 kW.

Para atender a potência máxima de 1,471 kW do motor acoplado à bomba de 2 CV, foi utilizado, um sistema de ligação em série de 9 módulos, instalados no telhado do laboratório, com estrutura de trilho tubular, conforme recomendado para telhado de fibrocimento (Figura 1), satisfazendo, assim, a demanda energética da carga nos horários de irradiação solar.

**Figura 1** - Módulos fotovoltaicos instalados no telhado do LIF.



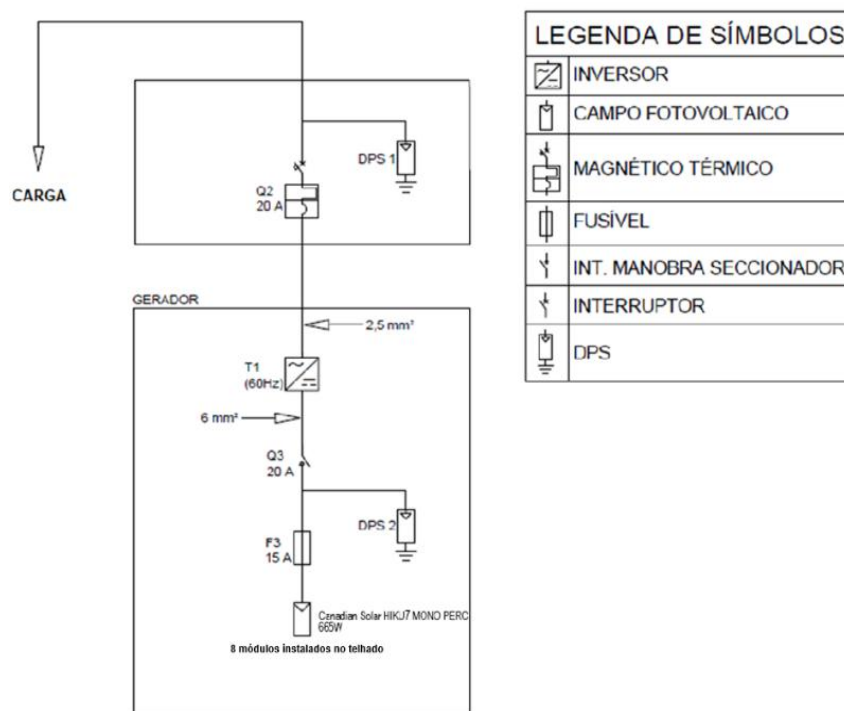
Fonte: Autores (2024).

Os painéis foram ligados por conectores MC4, a fim de elevar a tensão do sistema, fornecendo energia em corrente contínua, onde, a partir do inversor será transformada em corrente alternada e por fim chegando até o sistema de bombeamento da irrigação por pivô central.

A estrutura de sustentação do sistema fotovoltaico tem 4,2 metros de comprimento por 6,62 metros de largura, composta por 3 linhas de painéis somando total de 8 módulos. Toda a estrutura de fixação é de alumínio, tanto os trilhos quanto os suportes e parafusos de fixação.

A ligação em série dos módulos forneceu a partir do inversor a potência de 5,32 kWp, sendo, portanto, a tensão máxima do sistema fotovoltaico de 308 V e a corrente máxima de 17,28 A. O arranjo do sistema fotovoltaico é apresentado na Figura 2, demonstrando a configuração de ligação elétrica do experimento.

**Figura 2** - Diagrama unifilar do projeto elétrico fotovoltaico.



Fonte: Autores (2024).

O reservatório utilizado para os ensaios tem capacidade de 1m<sup>3</sup> e foi instalado em mesmo nível ao local de instalação do conjunto motobomba a uma distância de aproximadamente 1 metro. A interligação entre o reservatório e a motobomba foi realizada utilizando tubo PVC de 2". A motobomba utilizada para a pressurização do sistema é fabricada pela empresa FAMAC, trifásica, com 1,5 cv, modelo FES3A com tensão de alimentação de 220 V. O modelo é recomendado para a irrigação e para fluídos com presença de sólidos. Já o aspersor utilizado é da marca Senninger, modelo placa simples, com vazão variando de 395 a 4811 L.h<sup>-1</sup>, e pressão de 0,41 a 1,38 Bar.

O local de instalação da torre central do pivô se encontrava a 12 metros de distância do conjunto motobomba, e nesta interligação também foi utilizado tubo PVC de 2". O desnível entre o conjunto motobomba e a torre central é desprezível.

Foram realizadas 150 coletas por ensaio de uniformidade com o pivô central utilizando apenas água, a fim de garantir que o número de pontos necessários para utilizar o modelo de gráficos de controle atende o requisito mínimo recomendado (Montgomery, 2017).

Os ensaios tiveram a duração de 5 minutos, onde o primeiro ensaio se iniciou as 9:00 horas com o último ensaio se iniciando as 17:00 horas. Durante a realização dos ensaios, o pivô central consumirá em média 750 L de água. A área efetivamente irrigada, que receberá em média 6 mm, tinha aproximadamente 254,5 m<sup>2</sup>.

As coletas seguiram a metodologia qualitativa, onde segundo Ludke & Andre (2013), são aqueles nos quais é importante a interpretação por parte do pesquisador com suas opiniões sobre o fenômeno em estudo. Seguindo algumas diretrizes, com ocorrer em ambiente natural, coletas descritivas, o processo se manteve focado nos produtos em análise (Pereira et al., 2018).

Na Figura 3, é possível visualizar os detalhes das instalações do pivô central, com os quadros de comando e linha de recalque até a caixa de água.



**Figura 3** - Linha lateral do pivô central instalada.



Fonte: Autores (2024).

As avaliações de uniformidade da aplicação de água foram realizadas seguindo a metodologia da Norma 11545 de 2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. O coeficiente de uniformidade foi calculado utilizando a Equação 2 de Chirstiansen, modificada por Heermann e Hein (1968).

$$C_{uh} = 100 * \left[ 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_{mp}| * S_i}{\sum_{i=1}^n V_i + S_i} \right) \right] \quad (2)$$

Onde: CUH: coeficiente de uniformidade de Heerman & Hein, em porcentagem; n - é o número de coletores utilizados na análise de dados; i - é o número designado para identificação de um coletor em particular, normalmente começando com o coletor localizado com  $i = n$ , para o último coletor considerado;  $V_i$  - é o volume de água coletada no  $i$ -ésimo coletor, em centímetros cúbicos ou milímetros;  $S_i$  - é a distância do  $i$ -ésimo coletor ao ponto pivô, em metros; VMP - é o volume médio ponderado (massa ou coluna d'água) da água coletada, em centímetros cúbicos ou milímetros.

A Equação 3 foi utilizada para determinar o volume médio ponderado de água coletada.

$$V_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3)$$

A norma 11545 de 2016 da ANBT orienta utilizar o gráfico do perfil da lâmina aplicada para identificar as possíveis causas para valores de coeficientes abaixo do valor previsto em projeto e que os locais ao longo da lateral, onde a lâmina aplicada é 10% maior ou menor que a lâmina média, sejam investigados para determinar a causa da variação.

Durante os ensaios, a aplicação de água terá como objetivo diagnosticar a eficiência de aplicação do pivô central com o fornecimento de energia suplantado pelo sistema fotovoltaico. No início dos ensaios, 30 coletores foram utilizados para cobrir a área molhada efetiva do pivô central. O primeiro coletor foi posicionado a 2,5 e o último a 17 metros de distância do ponto pivô.

A Tabela 1 apresenta os valores a serem considerados para classificação do sistema de irrigação por pivô central,

calculados a partir da equação 2, conforme recomendado por Heermann e Hein (1968).

**Tabela 1** - Valor do coeficiente de uniformidade para pivô central, a partir do cálculo da Equação 2.

Coeficientes de uniformidade	Interpretação
90-100%	Excelente, não é necessária nenhuma ação.
85-90%	Bom, não é necessária nenhuma ação.
80-85%	Moderado, não é necessária nenhuma ação no momento, mas o sistema deve ser monitorado para elevar o coeficiente.
Abaixo de 80%	Ruim, melhorias são necessárias.

Fonte: Adaptado da Universidade de Minnesota (2021).

A Figura 4 exibe os coletores durante um dos ensaios que foram realizados, exibindo também um desenho 2D com as distâncias entre os coletores e o ângulo de abertura entre os dois raios de coletores, salientando que a área de instalação dos medidores foi limpa e nivelada para melhor captação de água.

**Figura 4** - Imagem realizada durante um dos ensaios de uniformidade na aplicação de água e o layout gráfico das distâncias adotadas no posicionamento dos coletores.



Fonte: Pazuch (2021).

Para o monitoramento da lâmina aplicada por spray, foi identificada a quantidade de coletores atendidos por cada spray. Partindo-se do ponto pivô, o primeiro e o segundo alcançarão cinco coletores cada um, os outros dois seguintes alcançarão seis coletores cada e o último spray alcançará oito coletores.

Para cobrir a área molhada destes ensaios serão utilizados, portanto, vinte e seis coletores: o primeiro coletor posicionado a 5 metros e o último a 17,5 metros do pivô, a fim de também cobrir toda a área molhada efetiva do pivô central, seguindo a metodologia de Pazuch (2021).

A Tabela 2 apresenta os valores de distância, pressão e diâmetro do bocal, caracterizando que a variabilidade na pressão de acordo com a distância ponto pivô central.

**Tabela 2** - Diâmetro dos bocais, valor de pressão juntamente a distância da posição do bocal ao pivô.

Posição	Distância ponto pivô (m)	Pressão sob bocal (bar)	Diâmetro do bocal (mm)
1	6,25	0,5	1,59
2	8,75	1,8	1,59
3	11,75	2	1,59
4	15,25	0,65	3

Fonte: Pazuch (2021).

A fim de verificar se os resultados estavam ou não sob controle estatístico, serão gerados os gráficos de controle para as médias individuais. Calculando-se os valores de limite superior de controle (LSC), linha média (LM) e a linha inferior de controle (LIC), a partir das Equações 4, 5 e 6.

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

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad (5)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (6)$$

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

Montgomery (2017) orienta que se o gráfico da amplitude (o gráfico  $\bar{R}$ ) apresentar pontos fora das linhas de controle, estes devem ser descartados e posteriormente é preciso refazer o gráfico. Os pontos fora dos limites de controle podem ser ignorados desde que respeitado o mínimo de pontos necessários para construir um gráfico de controle, entre 20 e 25 pontos (Montgomery, 2017).

Existe uma forma para estimar a quantidade de pontos do gráfico  $\bar{x}$ , após estabelecidos os valores de limite superior e inferior, que vão afetar o desempenho do processo. Para o caso em estudo, esses pontos são os grupos de coletores que apresentarão a média de lâmina superior ou inferior aos limites estabelecidos para o gráfico da média amostral ( $\bar{x}$ ). O valor que representa a capacidade do processo é definido utilizando a Equação 7 (Montgomery, 2017).

$$C_p = \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\sigma} \quad (7)$$

Onde:  $\bar{\bar{X}}$  : Média das médias; LIE: Limite inferior de especificação;  $\sigma$  : Desvio padrão.

O valor adimensional da capacidade do processo ( $C_p$ ) é avaliado seguindo o que descreve a Tabela 3. Para processos existentes e novos, onde para efeito, nesse estudo foi utilizado processo existente unilateral como valor definidor.



**Tabela 3** - Classificação do índice de capacidade do processo, bilaterais e unilaterais.

	Especificações Bilaterais	Especificações Unilaterais
Processos existentes	1,33	1,25
Processos novos	1,5	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos existentes)	1,5	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos novos)	1,67	1,6

Fonte: Montgomery (2009).

Foi utilizado o software Minitab 16, com limite inferior de especificação (LIE) o valor de 80% para CUC e CUD, considerado moderado, onde não é necessária nenhuma ação no momento, mas o sistema deve ser monitorado para elevar o coeficiente.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Estatística descritiva dos dados

A Tabela 4 apresenta a estatística, na qual constam os valores de média e coeficiente de variação, correspondentes aos valores de potência fotovoltaica e potência do motor da bomba de água, juntamente comparativo de média, aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

**Tabela 4** - Estatística descritiva dos dados em relação a potência fotovoltaica e potência do motor, juntamente ao coeficiente de variação.

Energia Gerada				
Coletas	Potência Fotovoltaica (W)	CV (%)	Potência Motor (W)	CV (%)
Coleta 1	988,62 B	56,74	847,6 B	67,54
Coleta 2	2191,26 A	12,32	1936,67 A	13,59
Coleta 3	2214,87 A	25,05	1961 A	27,68
Coleta 4	2094,88 A	29,13	1856,93 A	31,22
Coleta 5	1037,92 B	9,82	745 B	24,06

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

Nota-se uma superioridade estatística nas coletas 2, 3 e 4, com valores superiores tanto em potência do sistema fotovoltaico quanto em potência do motor da bomba de água, tais valores são reflexo do alto índice de irradiação no dia de coleta, onde não houve formação de nuvens aumento por consequência a geração e consumo de energia.

Pode-se notar também que o valor de coeficiente de variação manteve-se abaixo de 10% apenas para a coleta 5 na potência fotovoltaica, demonstrando maior homogeneidade nos valores (Montgomery, 2009), uma vez que o dia de coleta 5 foi marcada por céu limpo.

Em contraponto o elevado valor de coeficiente de variação na coleta 1 é definido pela elevada formação de nuvens desde o período da manhã, estendendo a todo o período de coleta, assim como Hauptenthal et al. (2021), ao estudar um sistema de irrigação por microaspersor com energia de um sistema fotovoltaico, concluiu que a elevada formação de nuvens desestabiliza a geração de energia aumentando os valores de coeficiente de variação.

A Tabela 5 apresenta os valores das médias de vazão e pressão do sistema de irrigação por pivô central, tanto quanto seus respectivos valores de coeficiente de variação.

Entre os valores de média de vazão e pressão a coleta 5 foi superior estatisticamente as demais, e manteve em ambos

os parâmetros coeficiente de variação abaixo de 10%, vale destacar que apesar de inferiores estatisticamente todos os valores de vazão e pressão ficaram dentro dos parâmetros estipulados pelo fabricante dos aspersores.

O valor superior da vazão e pressão são reflexo da estabilidade na geração de energia para o mesmo período de coleta, e por manter-se dentro dos parâmetros exigidos pelo motor da bomba.

**Tabela 5** - Estatística descritiva dos dados em relação a vazão e pressão do sistema de irrigação por pivô central.

	Vazão		Pressão	
	Média (L.h <sup>-1</sup> )	CV (%)	Média (Bar)	CV (%)
Coleta 1	412,48 BC	10,13	1,02 B	1,42
Coleta 2	447,01 B	9,06	1,03 B	1,48
Coleta 3	425,43 B	14,22	1,02 B	1,17
Coleta 4	387,1 C	16,7	1,02 B	1,01
Coleta 5	511,33 A	9,09	1,32 A	9,56

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

A coleta 1 e 4 apresentaram os menores valores de vazão, coletas essas que também apresentaram elevado valor de coeficiente de variação na produção de energia com 56,74 e 29,13%, portanto, apesar de elevada produção de energia na coleta 4 (2094,88 W) a instabilidade na produção, em decorrência de presença de nuvens, acarretou a diminuição da vazão dos aspersores.

A Tabela 6 apresenta as médias das coletas, na qual constam os valores de Cuh (%) e coeficiente de variação (%) e o desvio padrão, para as 5 coletas realizadas ao longo do estudo.

**Tabela 6** - Estatística descritiva dos dados em relação a uniformidade, juntamente ao coeficiente de variação e desvio padrão.

Coletas	Uniformidade		
	Cuh (%)	CV (%) Cuh	Desv. Pad.
Coleta 1	54,78 B	10,74	5,94
Coleta 2	56,67 B	7,66	4,34
Coleta 3	57,62 B	6,68	3,86
Coleta 4	56,81 B	6,42	3,64
Coleta 5	61,38 A	5,82	3,57

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

Em relação aos valores de uniformidade destaca-se o baixo valor em todas as coletas, ficando inferior a 80%, onde a interpretação segundo referencial é de ruim, melhorias são necessárias.

Cabe destacar a coleta 5, que obteve superioridade estatística em relação as demais coletas, e com coeficiente de variação abaixo de 10%, indicando homogeneidade dos dados (Montgomery, 2009). Portanto quando se analisa em conjunto os parâmetros de uniformidade, vazão, pressão e energia, pode-se definir que a maior estabilidade na geração de energia resultou em maior vazão e pressão, culminando em um maior índice de uniformidade.

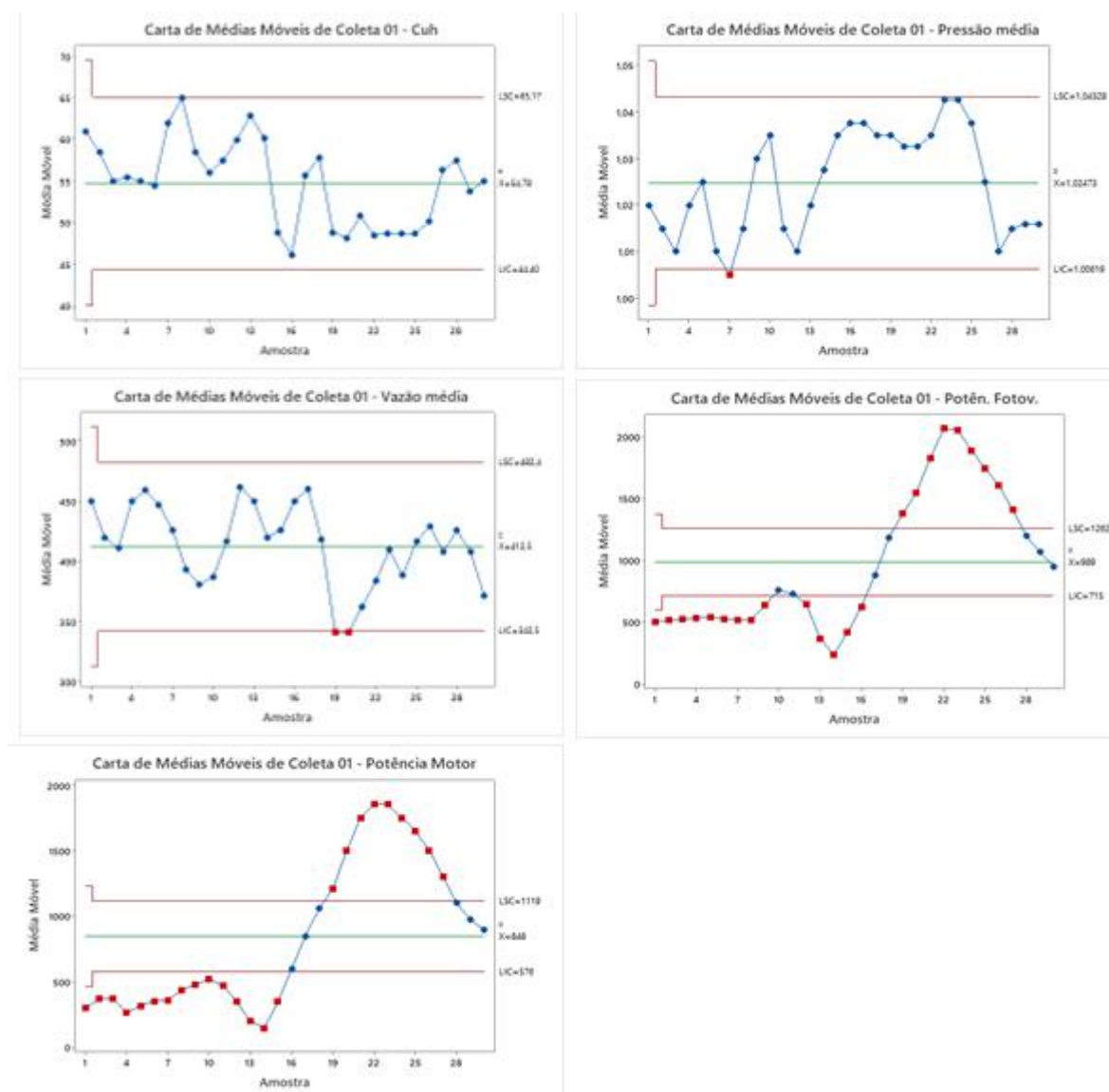
Ao analisar o coeficiente de uniformidade aplicando água de um pivô central com energia da rede de distribuição, energia de alta estabilidade em seu fornecimento, Pazuch (2021), encontrou resultados com uniformidade de 78 a 88%, superiores às encontradas no presente estudo.

### 3.2 Gráfico de Controle de Shewhart

Buscando avaliar se os ensaios se mantiveram sob controle estatístico para os tratamentos, foram elaborados gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais de CUC e CUD, findando identificar a variação da uniformidade durante os 150 ensaios. Juntamente aos gráficos para as variáveis de pressão, vazão e potência, buscando justificar a variabilidade dos coeficientes de uniformidade.

A Figura 5 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 1.

**Figura 5** - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 1.



Fonte: Autores.

Verificou-se que nos ambos os gráficos de potência fotovoltaica e potência do motor tem o mesmo comportamento, o que é condizente, uma vez que o sistema de energia fotovoltaica está ligado diretamente a bomba de água. Destaca-se ainda que ambos estão fora de controle estatístico, com pontos tanto abaixo quanto acima dos limites estipulados, com pico de produção no período da tarde para a coleta 1.

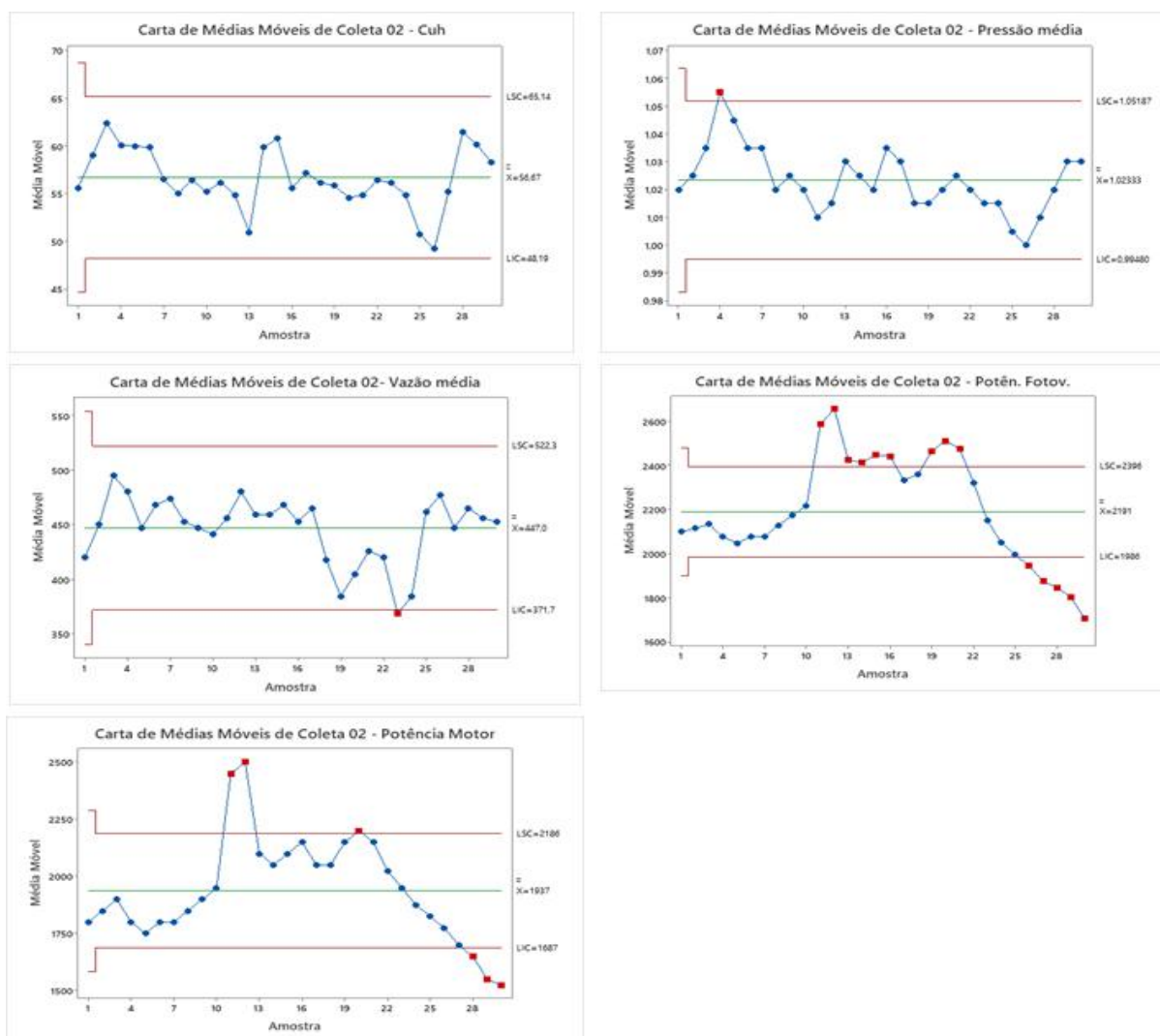
A variação na produção e consumo de energia não influenciou linearmente os valores de vazão, gráfico esse que está fora do controle estatístico de qualidade por apresentar 2 pontos abaixo do limite inferior, coletas essas que também ficaram com valor abaixo do especificado pelo fabricante do aspersor.

Já a pressão aumentou em decorrência da maior produção de energia, com similaridade entre os gráficos, onde a maior produção de energia culminou em maior pressão no sistema (Ensaio 23 e 22).

No gráfico referente a uniformidade, nota-se tendência decrescente, entre os pontos 19 e 26, onde segundo Montgomery (2004), pela regra de Western Electric, o processo está fora de controle, cabe ainda destacar que todos os pontos estão abaixo do limite mínimo aceitável de 85%.

A Figura 6 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 2.

**Figura 6** - Gráfico de Controle de Shewhart para CUH, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 2.



Fonte: Autores.

Nota-se que apenas o gráfico referente a uniformidade manteve-se sob controle estatístico de qualidade, entretanto os valores ficaram abaixo do recomendado para a uniformidade.

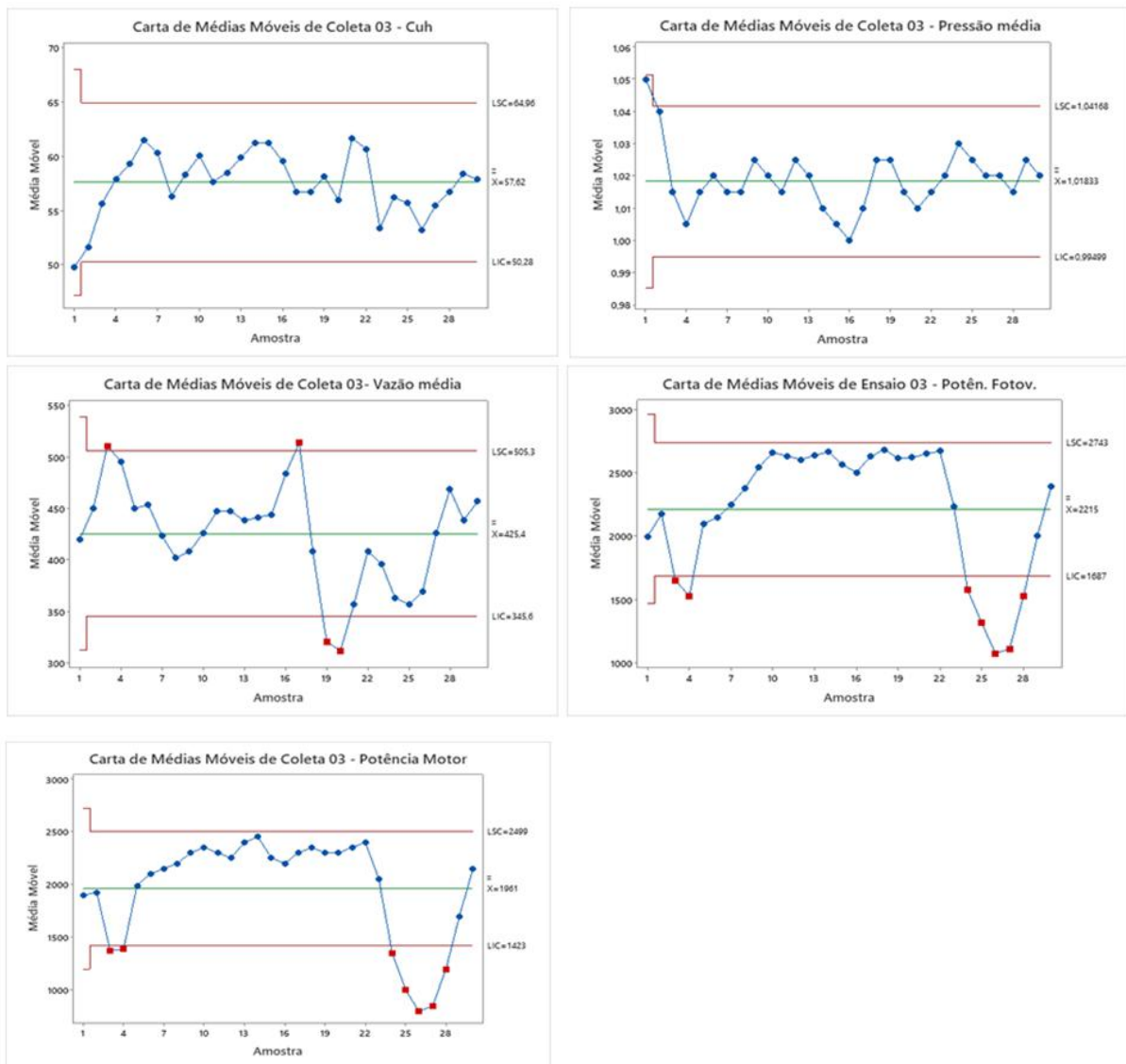
Os demais gráficos apresentaram pontos tanto acima quanto abaixo dos limites estipulados com destaque para a coleta 26 que apesar dos valores de potência fotovoltaica e da bomba, juntamente a pressão estarem em valores nominais, apresentou-se abaixo do limite inferior, tal comportamento se explica pelo fato da alta variabilidade das potências dentro da coleta, com CV de 74,2%, com potência mínima de 450 W e a máxima de 2300 W.

A subidas e descidas do gráfico de potência são características referente a subida dos valores de radiação, atingindo seu pico nas coletas próximas as 13:00 e 14:00, voltando a decrescer no período da tarde.

Já o menor valor de pressão (Coleta 25) corresponde aos menores valores de potência tanto fotovoltaico quanto da bomba.

A Figura 7 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 3.

**Figura 7** - Gráfico de Controle de Shewhart para CUH, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 3.



Fonte: Autores.



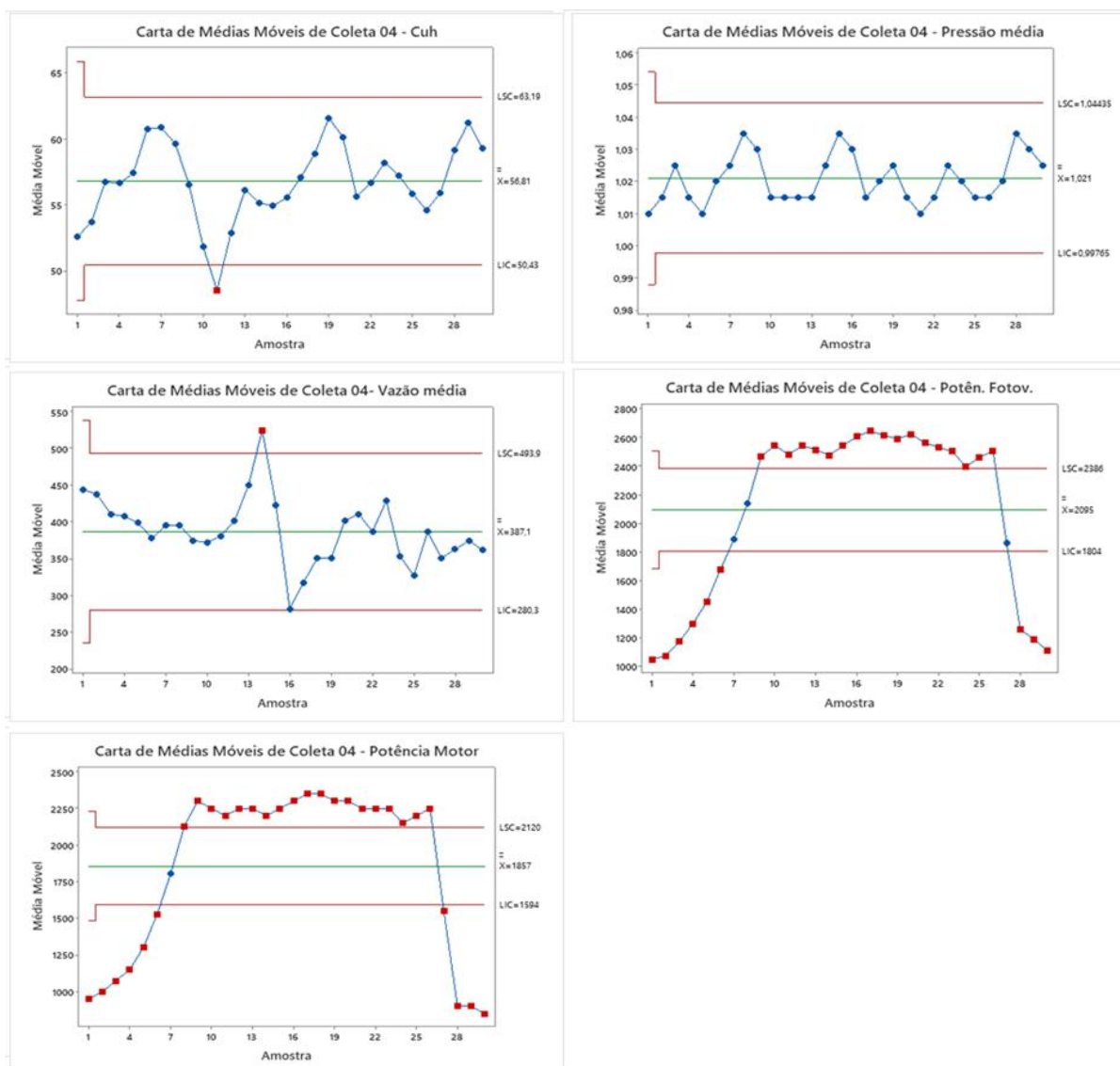
Os gráficos de uniformidade e pressão mantiveram-se sob controle estatístico de qualidade, entretanto os valores da uniformidade ficaram aquém do necessário para uma irrigação de qualidade, já a pressão além do controle estatístico manteve-se dentro dos parâmetros nominais.

Já os demais gráficos não apresentaram controle estatístico de qualidade, com destaque para os gráficos de potência com valores abaixo do limite inferior, cabendo a justificativa da formação de nuvens nos momentos de coleta diminuindo a irradiação sobre o sistema e diminuindo a potência do sistema como um todo, acarretando uma menor vazão.

Valores que são corroborados por Berwanger et al. (2023), onde ao analisar um sistema e irrigação por gotejamento com energia fotovoltaica autônoma, detectou que a diminuição no valor de potência do sistema de energia, acarreta menores valores de vazão do sistema de irrigação.

A Figura 8 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUH, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 4.

**Figura 8** - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 4.



Fonte: Autores.

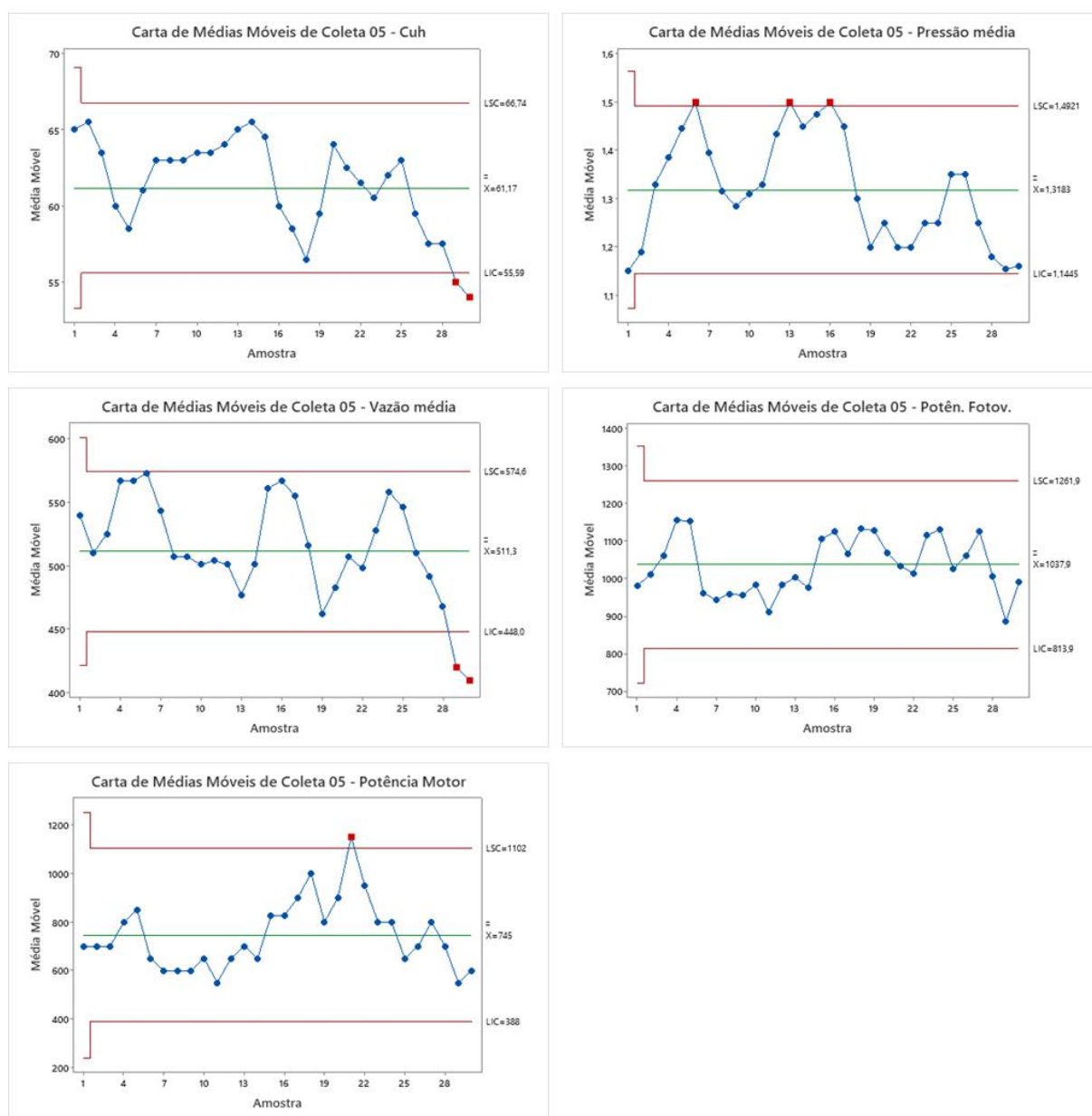
A coleta 4 se caracterizou pelos valores elevados de potência, onde durante todo o dia de coleta não houve a formação de nuvens, portanto, podemos observar nos gráficos referentes a potência que existem pontos tanto abaixo, mas em sua maioria acima do limite superior.

O menor valor de potência registrada foi de 800 W para o motor e 1095,22 W para o sistema fotovoltaico.

Apesar da falta de controle estatístico, a potência estável durante o período de produção de energia fotovoltaica de pico que correspondem ao horário das 11:00 às 14:00 horas (Pinho & Galdino, 2014), culminarem em maior estabilidade da vazão, com apenas 1 ponto acima do limite superior e efeito positivo na pressão, a qual manteve-se dentro do controle estatístico de qualidade, melhorando pôr fim a uniformidade. Com 7 pontos acima dos 60%.

A Figura 9 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUH, Pressão, Vazão e Potência para a coleta 5.

**Figura 9** - Gráfico de Controle de Shewhart para CUH, Pressão, Vazão e Potência para a coleta 5.



Fonte: Autores.

Nota-se no gráfico referente a uniformidade pontos abaixo do limite inferior, justificados pelos valores baixos de vazão e pressão, juntamente a baixa potência do sistema e formação de nuvens no período de coleta, que foi registrado no final do dia nos horários de 16:45 e 17:00.

Cabe ressaltar que o gráfico referente a potência fotovoltaica se manteve dentro do controle de qualidade e apesar de 2 pontos abaixo do limite inferior, o gráfico da uniformidade apresentou a maior média, com quatro pontos acima dos 65% e um total de vinte pontos acima dos 60%.

Os resultados são condizentes com os estudos desenvolvidos por Hauptenthal et al. (2021) que ao avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão com bombeamento fotovoltaico definiu que o gráficos de controle permitiu reconhecer a existência de alguns padrões não aleatórios para identificar tendências e analisar de forma concisa as variáveis apresentadas neste estudo, definindo esta presença ou passagem de nuvens são características que interferem na uniformidade do processo de irrigação.

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 através do CUC e o CUD, definiram que o gráfico de controle de Shewart foi satisfatório na determinação do melhor tratamentos 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 CUH, para cada tratamento, mostrados na Tabela 7. Estipulou-se o valor do LIE de 90% como excelente e 85% como bom, a partir da avaliação dos coeficientes de uniformidade para pivô central, adaptado da Universidade de Minnesota (2021). 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 7** - Valores do Índice de Capacidade do Processo (Cpi) para Uniformidade, pressão, vazão do pivô central e potência do motor.

Índice de capacidade do processo						
Coletas	Cuh (%)			Pressão (Bar)	Vazão (L.h <sup>-1</sup> )	Potência Motor. (W)
	90	85	80	0,41 - 1,38	395 - 4711	900 - 1200
Coleta 1	0,4	0,61	0,81	15,73	22,11	0,43
Coleta 2	0,39	0,59	0,79	13,13	18,97	0,3
Coleta 3	0,45	0,67	0,89	16,76	15,67	0,18
Coleta 4	0,51	0,77	1,02	15,64	14,72	0,52
Coleta 5	0,69	1,03	1,03	1,97	21,97	1,5

Fonte: Autores.

Observa-se que para os valores de uniformidade nenhuma coleta atingiu o mínimo de 1,25 para a uniformidade acima de 80%, vale ressaltar que a Coleta 5 se caracterizou por apresentar valor acima do mínimo para a potência do motor, conferindo capacidade de se manter ao longo do tempo dentro dos valores nominais.

Já os valores de pressão e vazão apresentaram resultados satisfatórios para todas as coletas, ou seja, são capazes de se manter sob controle ao longo do tempo.

Em sua pesquisa, Justi et al. (2010), ao analisarem a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão, 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, ou seja, se será capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade.

Já Silveira et al. (2021), com o objetivo 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 Cp abaixo de 1,25.

#### 4. Conclusão

Em todos os tratamentos a uniformidade ficou abaixo de 80%, classificados portanto como, ruim, melhorias são necessárias. Entretanto a pressão e a vazão foram caracterizadas como excelentes, uma vez que o valor do índice de capacidade do processo apontou que ambas as variáveis têm a capacidade de se manter dentro dos valores nominais ao longo do tempo.

Já a potência do motor atingiu o mínimo necessário apenas na coleta 5, onde apesar de não obter os maiores valores, se caracterizou pelo baixo valor de coeficiente de variação, portanto a coleta com maior estabilidade na produção e consumo de energia, a qual, culminou na melhor uniformidade entre as coletas.

O gráfico de controle de Shewhart indicou nos processos que baixos valores de potência resultam em menores valores de pressão e vazão, diminuindo a uniformidade de irrigação. Destaca-se que valores de potência acima da nominal não interferiram negativamente na uniformidade.

Sendo assim, pode-se definir que o atual modelo de fornecimento de energia autônomo para a irrigação por pivô central não atingiu o valor necessário de uniformidade. Entretanto, pode-se afirmar que a estabilidade na geração de energia melhorou a uniformidade, e em contrapartida a formação e presença de nuvens diminuiu consideravelmente a o coeficiente de uniformidade.

Recomenda-se, portanto, a utilização de um método para estabilizar o fornecimento de energia, como um banco de baterias ou mesmo um inversor solar com rastreamento com ponto de máxima potência, buscando diminuir a variabilidade de tensão e corrente no consumo de energia por parte do motor da bomba de água.

Expõe-se, portanto, a sugestão de elaboração de um layout do sistema aqui estudado com a adição de um banco de baterias, para verificar a maior estabilidade no fornecimento de energia e por consequência o aumento do valor de uniformidade da irrigação por pivô central.

#### Agradecimentos

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

#### Referências

- Almeida, P. M. de. (2021). *Condicionamento da energia solar fotovoltaica para sistemas interligados à rede elétrica*. <http://www.ufjf.br/labsolar/files/2011/05/Condicionamento-da-Energia-Solar-Fotovoltaica.pdf>.
- 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.
- 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. doi:10.1016/j.rser.2017.05.012
- Berwanger, D., Hauptenthal, S. W., Vilas Boas, M. A., & Siqueira, J. A. C. (2023). Uniformidade da irrigação por gotejamento com energia fotovoltaica autônoma utilizando rastreador solar. *Research, Society and Development*, 12(14), e36121444496.
- Dantas, S. G., & Pompermayer, F. M. (2018). *Viabilidade econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeito no setor elétrico*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA.
- Elektosolar. Energia solar fotovoltaica: Vantagens e Desvantagens. <<https://elektosolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-vantagens-e-desvantagens/>>. Acesso em: 14 jul 2018.

- EPE. Empresa de pesquisa energética. (2016): *Energias renováveis*. <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>.
- Gomes, A. C., Matos, V. S., Wanderley, V. D. S. A., Gonçalves, G. B., Cortes, L. R. C., & Soriano, F. R. (2020). Análise do potencial de geração fotovoltaica no estado da Bahia, Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico, 4, 113-128. 10.22533/at.ed.59720061010
- 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.
- Heermann, D. F., & Hein, P. R. (1968). Performance characteristics of self propeled center pivot sprinkler irrigation system. *Transaction of the ASAE*, Saint Joseph, 11(1), 11-15.
- Justi, A. L., Vilas Boas, M. A., & Sampaio, S. C. (2010). Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. *Engenharia Agrícola*, 30 (2), 264-270. 10.1590/S0100-69162010000200008
- Keller, J., & Karmeli, D. (1975). *Trickle irrigation design parameters*. Transactions of the ASAE, 17, 678-684.
- Li, G. et al. (2017). Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 440-458.
- Magalhães, G. E. (2016). *Bombeamento de Água Utilizando Sistema Fotovoltaico Autônomo: Um Estudo de Caso*. 104f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Engenharia de Edificação e Ambiental, Cuiabá, Mato Grosso.
- Mérida, G. A., R., González P. Poyatoa E, C., Barriosa, P. M., & Díaz J. A. R. (2020). Comprehensive sizing methodology of smart photovoltaic irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 229, 105888
- Mirzaei, M., & Mohiabadi, M. Z. (2017). A comparative analysis of long-term field tests of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. *Energy and Sustainable Development*, 38, 93-101.
- Mittal, M. L., Sharma, C., & Singh, R. (2012). *Estimates of emissions from coal fired thermal power plants in India*. In: Proceedings of international emission inventory conference, 14, 1–22.
- Mohamed, A. Z., Peters, R. T., Zhu, X., & Sarwara, A. (2019). Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. *Agricultural Water Management*, 213, 1078-1083.
- 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.
- Montgomery, D. C. (2017) *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. (7a ed.).
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., & Hubele, N. F. (2004). *Estatística Aplicada à Engenharia*. 2a.ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Capítulo 8: controle estatístico da qualidade. 279-309.
- Pazuch, F. A. (2021). *Desenvolvimento, construção e validação de um pivô central experimental*. 80f. (Tese Doutorado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Engenharia Agrícola. Cascavel, Paraná.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018), *Metodologia da pesquisa científica*. UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*.
- 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.
- Universidade de Minnesota. *Interpretação do Coeficiente de Uniformidade*. [extension.umn.edu](http://extension.umn.edu).
- Zavala V., López-Luque, R., Reza, J., Martínez, J., & Lao, M. T. (2020). Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system. *Applied Energy*, 260.