

DIEGO BERWANGER

*ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ
CENTRAL*

*CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2024*

DIEGO BERWANGER

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ
CENTRAL**

*Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.
Orientador: Jair Antonio Cruz Siqueira
Coorientador: Marcio Antonio Vilas Boas*

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2024**

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

Berwanger, Diego

Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação por Pivô Central /
Diego Berwanger; orientador Jair Antonio Cruz Siqueira;
coorientador Marcio Antonio Vilas Boas. -- Cascavel, 2024.
69 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade
Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na
Agricultura, 2024.

1. Energia Renovável. 2. Autonomia. 3. Uniformidade. 4.
Controle Estatístico de Qualidade. I. Cruz Siqueira, Jair
Antonio, orient. II. Vilas Boas, Marcio Antonio, coorient.
III. Título.

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 Valor do coeficiente de uniformidade para pivô central, a partir do cálculo da Equação 2.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 2 Diâmetro dos bocais, valor de pressão com a distância da posição do bocal ao pivô.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4 Dados estimados de irradiação solar diária para plano inclinado em 20° N na cidade de Cascavel - PR.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 5 Dados estimados de precipitação média mensal na cidade de Cascavel – PR.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 6 Especificações técnicas do módulo fotovoltaico.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 7 Classificação do índice de capacidade do processo, bilaterais e unilaterais.</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 8 Estatística descritiva dos dados em relação à potência fotovoltaica e potência do motor, com o coeficiente de variação</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 9 Estatística descritiva dos dados em relação a vazão e pressão do sistema de irrigação por pivô central</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 10 Estatística descritiva dos dados em relação à uniformidade, com o coeficiente de variação e desvio padrão</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 11 Valores do Índice de Capacidade do Processo (Cpi) para Uniformidade, pressão, vazão do pivô central e potência do motor</i>	<i>51</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Matriz Energética Brasileira</i>	5
<i>Figura 2 Banda de valência, banda proibida (band gap) e banda de condução: isolante, semicondutor e condutor</i>	8
<i>Figura 3 Célula fotovoltaica</i>	8
<i>Figura 4 Variedade de fabricação de células fotovoltaicas de Silício</i>	10
<i>Figura 5 Efeito da variação da radiação solar em relação a curva característica do módulo de Si cristalino</i>	12
<i>Figura 6 Efeito da variação da temperatura das células em relação à curva característica do módulo de Si cristalino a 1000 W m^{-2}</i>	13
<i>Figura 7 Configuração do sistema fotovoltaico off-grid</i>	14
<i>Figura 8 Bombeamento de água com energia fotovoltaica em elevação de nível para aplicação variada</i>	16
<i>Figura 9 Layout do sistema de irrigação fotovoltaica autônomo</i>	18
<i>Figura 10 Layout de instalação e configuração de um sistema de irrigação por pivô central</i>	19
<i>Figura 11 Vista aérea do local de instalação do experimento</i>	24
<i>Figura 12 Linha lateral do pivô central instalada</i>	25
<i>Figura 13 Imagem realizada durante um dos ensaios de uniformidade na aplicação de água e o layout gráfico das distâncias adotadas no posicionamento dos coletores</i>	28
<i>Figura 14. Módulo fotovoltaico da marca CANADIAN SOLAR</i>	32
<i>Figura 15 Vista superior da estrutura de fixação, modelado em software computacional</i>	35
<i>Figura 16 Vista lateral da estrutura da estrutura de fixação sobre o telhado do LIF</i>	35
<i>Figura 17 Layout da estrutura de fixação do sistema fotovoltaico</i>	36
<i>Figura 18 módulos fotovoltaicos instalados no telhado do LIF</i>	37
<i>Figura 19 Diagrama unifilar do projeto elétrico fotovoltaico</i>	38
<i>Figura 20 Arranjo do sistema fotovoltaico, com ligação em série, dos 8 módulos fotovoltaicos</i>	38
<i>Figura 21 Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 1</i>	45
<i>Figura 22 Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH}, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 2</i>	46
<i>Figura 23 Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH}, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 3</i>	48

<i>Figura 24 Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 4.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 25 Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH}, Pressão, Vazão e Potência para a coleta 5.....</i>	<i>50</i>

RESUMO

O sistema de irrigação com bombeamento fotovoltaico autônomo surge como uma opção acessível a lugares afastados, possibilitando produção agrícola em locais de escassez hídrica. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por pivô central utilizando para fornecimento de energia um sistema fotovoltaico isolado. O processo de validação dos equipamentos desenvolvidos ocorreu durante os ensaios de avaliação do coeficiente de uniformidade aplicando água, analisando conjuntamente o controle estatístico de qualidade, utilizando o gráfico de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo. O fornecimento de energia foi composto por oito módulos fotovoltaicos monocristalinos com potência de 665W da marca Canadian Solar e um inversor de frequência da marca Delta 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, serão 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, onde foram realizados os ensaios do fornecimento de energia utilizando o sistema fotovoltaico, ligado diretamente ao bombeamento do pivô central. Foram realizados 5 dias de coleta com 30 ensaios por dia, totalizando 150 coletas. 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, foram classificados como ruins, porém 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, afeta 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. Recomenda-se, portanto, a utilização de um banco de baterias para estabilizar a geração e consumo de energia.

PALAVRAS-CHAVE: *energia renovável; autonomia; uniformidade; controle estatístico de qualidade.*

ABSTRACT

The irrigation system with autonomous photovoltaic pumping appears as an accessible option for remote locations, enabling agricultural production in places with water scarcity. Thus, this work aimed to evaluate the performance of a central pivot irrigation system using an isolated photovoltaic system for energy supply. The validation process of the developed equipment took place during the uniformity coefficient evaluation tests using water, jointly analyzing the statistical quality control, using the Shewhart control chart and the process capacity index. The power supply consisted of eight monocrystalline photovoltaic modules with a power of 665W from the Canadian Solar brand and a 1.5kW Delta frequency inverter, finally connected directly to the pumping system. The power parameters of the photovoltaic system and the water pump motor will be measured simultaneously while collecting the water flow from the central pivot. The experiment was conducted at the Experimental Center for Agricultural Engineering at the State University of Western Paraná, where energy supply tests were carried out using the photovoltaic system, connected directly to the pumping of the central pivot. Five days of collection were carried out 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 generation of energy, 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 satisfactory central pivot irrigation. It is therefore recommended to use a battery bank to stabilize energy generation and consumption.

KEYWORDS: *renewable energy; autonomy; uniformity, statistical quality control.*

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 OBJETIVO GERAL	4
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Panorama de produção e consumo energético.....	5
2.2 Energia solar fotovoltaica	7
2.3 Eficiência do sistema fotovoltaico.....	11
2.4 Sistema fotovoltaico isolado da rede	13
2.5 Bombeamento de água com energia fotovoltaica	14
2.6 Uso de Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação	16
2.7 Sistema de irrigação por pivô central	19
2.8 Gráfico de controle de Shewart	21
2.9 Índice de capacidade do processo	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Caracterização do local experimento	24
3.2 Características do sistema hidráulico do pivô central.....	25
3.3 Caracterização dos ensaios de uniformidade.....	25
3.3.1 Aplicação de água	25
3.4 Fatores climáticos	29
3.5 Painel fotovoltaico	31
3.6 Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI).....	34
3.7 Estrutura de fixação dos módulos.....	35
3.8 Instalação e funcionamento do sistema fotovoltaico.....	36
3.9 Arranjo dos painéis fotovoltaicos.....	37
3.10 Delineamento experimental.....	38
3.11 Gráficos de controle de Shewart e índice de capacidade do processo.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Estatística descritiva dos dados.....	42
4.2 Gráfico de Controle de Shewart.....	44
4.3 Índice de Capacidade do Processo	51
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Com aumento da demanda por energia do setor de irrigação, sistemas de energia renovável e sistemas autônomos surgem como uma das alternativas viáveis (MÉRIDA GARCÍA et al., 2020), sendo a energia fotovoltaica uma escolha executável visando ao 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 crescimento devido ao seu custo de implantação ter diminuído, assim como o aumento dos valores tarifários cobrados pelas concessionárias de energia que são repassados a todos os grupos consumidores.

Com isso, tornou-se acessível a utilização de fontes renováveis de energia que gerem impactos ambientais mínimos, propendendo à sustentabilidade e a diminuição do impacto decorrente do seu consumo (MIRZAEI e 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).

Ressalta-se que o Brasil possui amplo potencial para geração fotovoltaica, dado seus altos níveis de radiação por todo seu território (GOMES et al., 2019).

Segundo Lana et al. (2015), a energia solar fotovoltaica é gerada a partir da conversão direta da radiação solar em eletricidade, que ocorre por meio da célula fotovoltaica. Por não depender de grandes áreas, não emitir gases nocivos na atmosfera e ter como fonte a radiação do sol, a energia fotovoltaica é considerada uma energia limpa e sustentável.

Estes sistemas podem ser divididos em duas configurações: On-Grid - sistemas conectados à rede; e Off-Grid - sistemas isolados da rede ou autônomos. Os sistemas fotovoltaicos On-Grid são utilizados para fornecer energia ao consumidor e possibilitam que, caso a demanda seja maior que a produção do sistema, o consumidor utilize energia da rede elétrica pública para complementar sua necessidade (VARELLA, 2009). A produção excedente é injetada na rede pública e pode ser utilizada por outros consumidores, como um sistema de compensação, de acordo com a Resolução Normativa Nº 687/2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A Agência Nacional de Energia Elétrica regulamenta os sistemas de microgeração e minigeração de sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica por meio de suas Resoluções Normativas Nº 482 e Nº 687, de 17 de abril de 2012 e 24 de novembro de 2015, respectivamente. De acordo com o disposto na Resolução Nº 687/2015, que altera a redação da Resolução Nº 482/2012, microgeração é caracterizada por potências inferiores ou iguais a 75 kW, ao passo que a minigeração possui potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW, em se tratando de centro de geração de energia, que utilize cogeração qualificada ou para fontes renováveis de energia elétrica conectadas à rede elétrica.

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 poderia ser gerada na propriedade, solucionando os problemas relacionados com 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, visto que, quanto maior for a lâmina d'água aplicada, maior será 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).

Nos locais onde a rede de distribuição de energia já estiver instalada e disponível para consumo, a instalação de sistemas On-Grid costuma possibilitar o fornecimento da energia gerada em excesso, sendo enviada para as distribuidoras em que o excedente gera crédito e pode ser utilizado em até 5 anos, segundo regulamentação NR 482/2012 da ANEEL. Com isso, torna-se uma opção para a diminuição nos gastos com energia elétrica, em longo prazo (COPEL, 2017).

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 do baixo custo de manutenção não gerar ruídos e resíduos, autossuficientes e renováveis, com a recuperação do investimento (ELECTSOLAR, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar tecnicamente a utilização de um Sistema Fotovoltaico isolado da Rede como fornecimento de energia elétrica para bombeamento da irrigação por meio do Pivô Central, a partir do estudo de caso do projeto implantado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

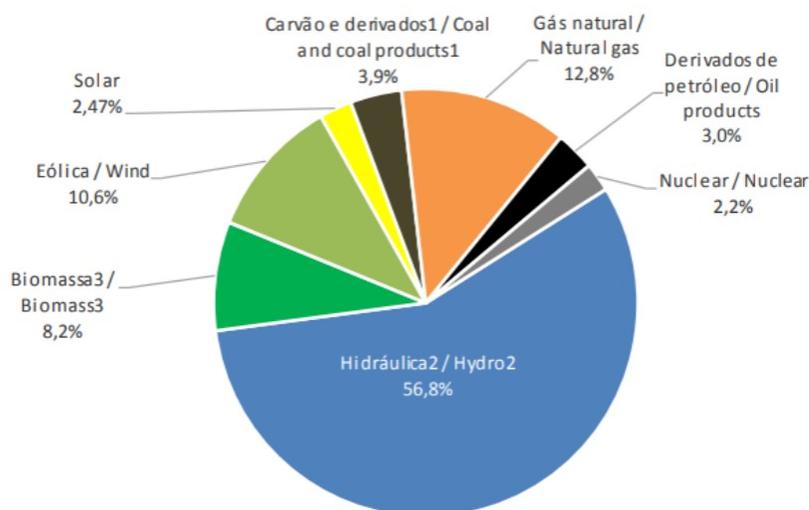
- Realizar o levantamento histórico de consumo energético para o adequado funcionamento da irrigação por meio do pivô central;*
- Dimensionar o sistema fotovoltaico isolado da rede, de acordo com as normativas estabelecidas;*
- Executar a implantação do sistema fotovoltaico ligando ao bombeamento do pivô central;*
- Efetuar a análise técnica do sistema completo, verificando a viabilidade da implantação de um sistema fotovoltaico para fornecimento de energia destinada à irrigação a partir do pivô central.*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama de produção e consumo energético

A utilização de energia elétrica vem aumentando constantemente ao longo dos anos, tanto em razão da ampliação do número de aparelhos elétricos quanto pela elevação do número de usuários dos aparelhos (MAUAD et al., 2017). Vale destacar que grande parte da produção de energia para suprir essa demanda energética vem de combustível fóssil sob a forma de carvão, gás natural e petróleo, representando 81,1% da matriz energética mundial no ano de 2016 (IEA, 2018).

No contexto de preocupações com a segurança energética e mudanças climáticas, a implantação de fontes renováveis torna-se essencial. Por conta da menor concentração dos recursos naturais utilizados, estas são capazes de prover mais segurança energética aos países que as utilizam, e seu aproveitamento em maior escala é um dos principais instrumentos de combate às mudanças climáticas e emissão de gases que potencializam o efeito estufa. Além desses benefícios, ainda apresentam a tutela de acarretar o desenvolvimento social e econômico, universalizando o acesso à energia e reduzindo os efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde da população (ALEGE, ADEDIRAN E OGUNDIPE, 2015).



Fonte: Energética (2022).

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira

Fonte: ENERÉTICA (2022).

A qualidade de vida e o crescimento econômico da população têm refletido diretamente na expansão do consumo de energia elétrica, por meio do acesso aos aparelhos eletrônicos consumidos e utilizados com mais frequência. Em conformidade, alguns aspectos negativos se evidenciam, entre eles a possibilidade de escassez dos recursos necessários para a produção de energia e o impacto no meio ambiente (LIMA JÚNIOR et al., 2018). Ainda de acordo com a AIE, o consumo de energia elétrica aumentará em 75% do ano de 2008 até 2035 (SAHU, 2017).

Com o crescimento da demanda energética, surge a necessidade de investimento em tecnologias que apresentem suporte à instalação de fontes de energia limpa e renovável, propendendo ao desenvolvimento sustentável (BEKHET E OTHMAN, 2017). Ademais, torna ainda o acesso à energia elétrica possível nos locais afastados, promovendo o desenvolvimento de áreas rurais de forma sustentável.

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

No tocante à produção nacional de energia fotovoltaica, o Brasil ultrapassou a marca de 32 gigawatts (GW) de potência instalada da fonte solar fotovoltaica, somando as usinas de grande porte e os sistemas de geração própria de energia em telhados, fachadas e pequenos terrenos, sendo equivalente a 14,7% da capacidade instalada da matriz elétrica do país (ABSOLAR, 2023).

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

Quanto à produção de módulos fotovoltaicos, no final de 2015, China e Taiwan possuíam a quota de mercado com cerca de 71% das vendas. Ainda existe a perspectiva de que o mercado de sistemas fotovoltaicos continue a crescer nos próximos anos em razão das políticas de subsídios, bem como a isenção de impostos e outros incentivos financeiros (DEVABHAKTUNI et al., 2013).

No entanto, mesmo com um alto índice de acesso à energia, até nas áreas rurais, sendo fundamentalmente proveniente de fontes limpas, como a hidroelétrica,

necessita-se de um aumento na produção de energia de fontes renováveis como a solar (ANDRADE et al., 2017).

2.2 Energia solar fotovoltaica

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

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

A energia solar fotovoltaica pode ser definida como: eletricidade obtida diretamente da conversão de energia solar, ocorrendo devido ao efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Becquerel em 1839 (HOSENUZZAMAN et al., 2015).

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

O elétron precisa de energia para vencer a banda proibida, caso o fóton incidente tenha energia maior que o “gap”, como pode ser visto na Figura 2.

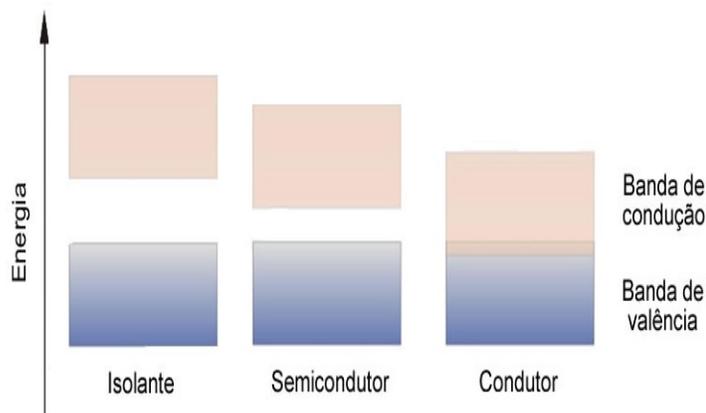


Figura 2 - Banda de valência, banda proibida (band gap) e banda de condução: isolante, semicondutor e condutor

Nota-se uma grande variedade de tecnologias de células fotovoltaicas no mercado, com uso de diferentes tipos de materiais, os quais estarão disponíveis no futuro um número ainda maior. As tecnologias de células fotovoltaicas, geralmente, são categorizadas em três gerações, dependendo da matéria-prima utilizada e do nível de maturidade comercial (GANGOPADHYAY, JANA e DAS, 2013; LACERDA e VAN DEN BERGH, 2016).

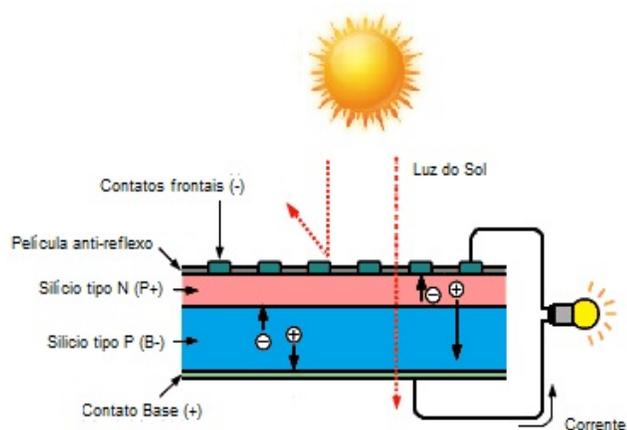


Figura 3 - Célula fotovoltaica

Fonte: CRESESB (2017).

- Sistemas fotovoltaicos de primeira geração utilizam a tecnologia de silício cristalino (c-Si), tanto na sua forma de cristalino simples (sc-Si) quanto na forma multicristalina (mc-Si).

- *Sistemas fotovoltaicos de segunda geração baseados em filme fino, geralmente, incluem três famílias principais: (1) Silício amorfo (a-Si) e silício microamorfo (a-Si / μ c-Si); (2) telurídeo de cádmio (CdTe); e (3) seleneto de cobre e índio (CIS) e cobre, diseleneto de galão de índio (CIGS).*

- *Os sistemas fotovoltaicos de terceira geração incluem tecnologias fotovoltaicas orgânicas que ainda estão sendo pesquisadas ou não foram amplamente comercializadas.*

O semiconductor mais utilizado para células fotovoltaicas é o Silício (Si), sendo que o mais usual é o Monocristalino, seguido do Policristalino e Amorfo, demonstrados na Figura 5 (TOLMASQUIM, 2016). Existem ainda outros materiais e tecnologias empregadas na construção de células fotovoltaicas que possuem como característica alta flexibilidade, facilidade de instalação e uma vida útil de 25 anos, mas, até o momento, são utilizados de forma experimental ou em pequena escala comercial (MUNDO-HERNÁNDEZ et al., 2014).

Tem-se alguns requisitos para que um material de células fotovoltaicas seja considerado ideal: voltagem para a troca de banda entre 1,1 e 1,7 eV, porque quanto menor a diferença, maior a facilidade de promover um elétron de uma banda à outra, aumentando a condução do material; materiais para fabricação prontamente disponíveis e não tóxicos; técnica de fabricação fácil, adequada para grandes volumes de produção; boa eficiência na conversão fotovoltaica; estabilidade de longa duração (GOETZBERGER,HEBLING e SCHOCK, 2003).

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

A energia fotovoltaica foi a fonte que apresentou mais crescimento no mundo entre os anos de 2000 à 2010, a uma taxa média de cerca de 39% ao ano, em evolução praticamente exponencial. A capacidade instalada atingiu cerca de 40 Giga Watts (GW) no final de 2010, contra 1,5 GW em 2000. Entre os anos de 2005 e 2010, o crescimento foi ainda mais expressivo, alcançando uma taxa média de 49%

(IEA, 2011 e EPIA, 2012), enquanto no Brasil, ao final do ano de 2018, a capacidade instalada foi de 2,5 gigawatt contra 1,15 gigawatt no mesmo período de 2017, que evidenciou um crescimento de 115% para o período de um ano (ABSOLAR, 2018).

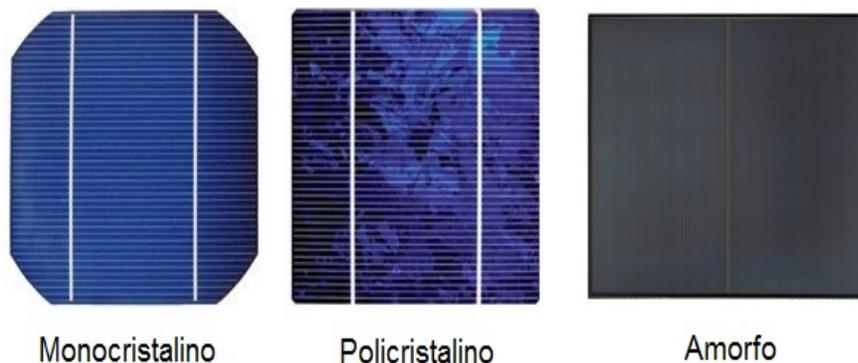


Figura 4 - Variedade de fabricação de células fotovoltaicas de Silício.

Fonte: CRESESB (2017).

- *Células de silício monocristalino.* O silício monocristalino é o material mais usado na composição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A eficiência deste tipo de célula fotovoltaica varia de 15% a 24,7%. Tais células solares são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidos em fornos especiais.

- *Células de silício policristalino.* Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, salienta uma participação de mercado de 30% (FREITAS, 2008). Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor que nas de silício monocristalino. Para Jannuzzi, Varella e Gomes (2009), devido ao grande número de cristais, que provocam uma descontinuidade na estrutura molecular, ocasionando mais dificuldade de movimento de elétrons quando são comparadas com as células anteriores. O tipo de célula mencionado tem uma eficiência menor, de aproximadamente 12,5%.

- *Células de silício amorfo.* O silício amorfo puro é um material que em princípio apresenta propriedades optoeletrônicas impróprias à sua aplicação em dispositivos, devido ao elevado número de distorções (ligações flutuantes) e tensões internas resultantes da deformidade da rede cristalina. Para Freitas (2008), as

células amorfas são formadas por um suporte de vidro ou de outra matéria sintética, na qual é depositada uma fina camada de silício. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. No que diz respeito à aplicação, as células amorfas são utilizadas em pequenos produtos de consumo, como relógios e calculadoras, mas podem também ser usadas em instalações solares (FREITAS, 2008).

Apesar de todo potencial e benefícios da energia solar, existe a necessidade de que novas políticas e técnicas sejam consolidadas para que se ultrapassem as barreiras atualmente colocadas em relação à energia solar, visto que podem ser divididas em técnicas como a restrição e eficiência dos materiais comercialmente utilizados e as barreiras econômicas, ou seja, o alto custo inicial, risco elevado e as barreiras institucionais como a falta de leis eficazes que incentivem a adoção mais ampla (TIMILSINA et. al., 2012).

2.3 Eficiência do sistema fotovoltaico

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

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

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

A corrente elétrica gerada pelo módulo majora com o aumento da radiação solar. A corrente de curto-circuito tem aumento linear com a radiação solar, como mostra a Figura 5.

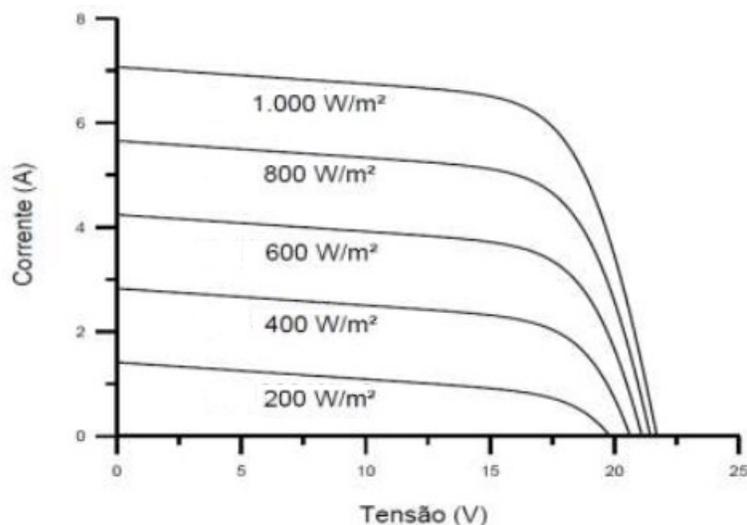


Figura 5 - Efeito da variação da radiação solar em relação à curva característica do módulo de Si cristalino

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

A incidência da radiação solar e a amplitude térmica ambiente alteram a temperatura nas células que compõem o módulo, como mostra a Figura 7. Com a curva A-V para diversas temperaturas de célula, fica notório que existe uma queda na tensão com o aumento na temperatura das células, a partir da qual a corrente sofre um leve aumento que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão (PINHO e GALDINO, 2014).

Ressalta-se que o coeficiente de temperatura em células de filme fino, como o silício amorfo, é menor se comparado com as células de silício cristalino, resultando em menor perda por aumento da temperatura do módulo (TOMALSQUIM, 2016). A Figura 6 evidencia a melhoria da eficiência de diferentes tipos de células fotovoltaicas ao longo dos anos.

Destaca-se que ocorreram avanços na eficiência do sistema fotovoltaico, com aumento de 12% para 17% nos últimos dez anos, nos painéis de lâminas de silício usados comercialmente diminuindo, assim, a espessura e melhorando a relação peso potência do sistema fotovoltaico (FRAUNHOFER, 2016). Ademais, foram mostradas novas perspectivas de um produto mais viável no mercado.

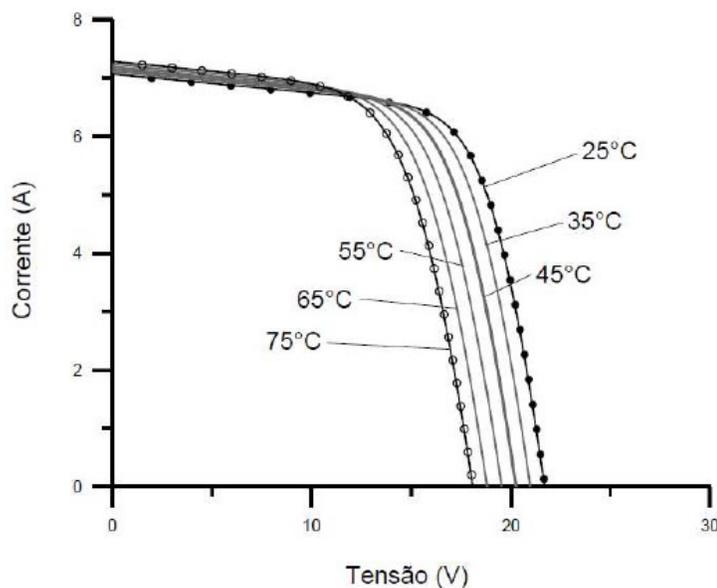


Figura 6 - Efeito da variação da temperatura das células em relação à curva característica do módulo de Si cristalino a 1000 W m^{-2} .

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

2.4 Sistema fotovoltaico isolado da rede

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), conforme ilustrado na Figura 7.

Os sistemas fotovoltaicos isolados (*off-grid*), geralmente, fornecem eletricidade para baixas demandas de energia. A instalação de um sistema isolado configura as mais diversas localidades, sendo uma escolha viável em caso da rede elétrica de distribuição da concessionária vigente não atender o local.



Figura 7 - Configuração do sistema fotovoltaico off-grid.

Os sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), geralmente, fornecem eletricidade para baixas demandas de energia. A instalação de um sistema isolado configura as mais diversas localidades, sendo uma escolha viável em caso da rede elétrica de distribuição da concessionária vigente não atender o local.

Os sistemas fora da rede normalmente têm cerca de 2 kW de tamanho e, geralmente, oferecem uma alternativa econômica para não estender a rede de distribuição de eletricidade com distâncias de mais de 1 ou 2 km das linhas de energia existentes. Se a bateria for devidamente dimensionada, fornecem energia com baixa manutenção para uma ampla gama de aplicações, como telecomunicações, bombeamento de água, refrigeração de vacinas e auxiliares de navegação (SANTOS et al, 2017, BRAUN-GRABOLLE, 2010).

2.5 Bombeamento de água com energia fotovoltaica

Atualmente, a utilização da energia fotovoltaica para suprir a demanda energética de bombas d'água aparece como uma tecnologia viável, porém com grandes desafios. Salieta-se que o sistema pode fornecer energia desde os pequenos até os grandes sistemas de bombeamento, figurando como uma alternativa ambiental favorável quando comparada aos sistemas convencionais como geradores a diesel (MITTAL, SHARMA E SINGH, 2012).

Para Li et al. (2017), os elevados custos com o diesel, tanto quanto seu armazenamento, influenciam negativamente no bombeamento da água para fins de irrigação.

Tem-se ainda que, para Dike et al. (2012), a energia solar pode ajudar a diversificar o suprimento de energia, bem como aumentar a segurança elétrica, uma vez que 1,5 bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento não têm acesso à rede de abastecimento e esse problema é ainda maior em áreas rurais.

Os sistemas de bombeamento de água fotovoltaica para fins agrícolas e residenciais (PERIASAMY, JAIN E SINGH, 2015), como mostra a Figura 10, vêm ganhando espaço em áreas remotas, por sua confiabilidade e desempenho, podendo suportar condições climáticas severas (SOTANKE e KALAMKAR, 2016; VALER et al., 2016).

Ainda existe uma conformidade no uso de energia solar fotovoltaica para operar o sistema de bombeamento de água, uma vez que existe uma relação natural entre exigência de água e aumento nos níveis de radiação para melhor produção de energia solar (HSIEH, 1986).

Chandel, Naik e Chandel (2015) concluíram que o desempenho da bomba de água fotovoltaica depende também da taxa de fluxo de água que é influenciada pelas condições meteorológicas do local, principalmente da irradiância solar e variações da temperatura do ar. Outro fator é o desempenho da bomba solar, ligado à necessidade de água, tamanho do tanque de armazenamento de água, água a ser bombeada (m^3), energia virtual do arranjo fotovoltaico (kWh), energia na bomba (kWh), energia fotovoltaica não utilizada (kWh), eficiência da bomba (%), eficiência do sistema (%) e variação diurna na bomba de pressão devido às mudanças na irradiância e compensação de pressão.

Dal Bem et al. (2017) analisaram um sistema de bombeamento em uma propriedade rural na cidade de Alta Floresta – MT utilizado na atividade de pecuária de corte para atender ao consumo de água dos animais. O sistema de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica avaliado era composto por uma bomba de 380 W que opera em 220 V, dois módulos policristalinos de 255 Wp cada conectados em paralelo e um inversor. Os autores calcularam um volume de água bombeado de 3.500 litros por dia, suficiente para a manutenção de 150 bovinos.

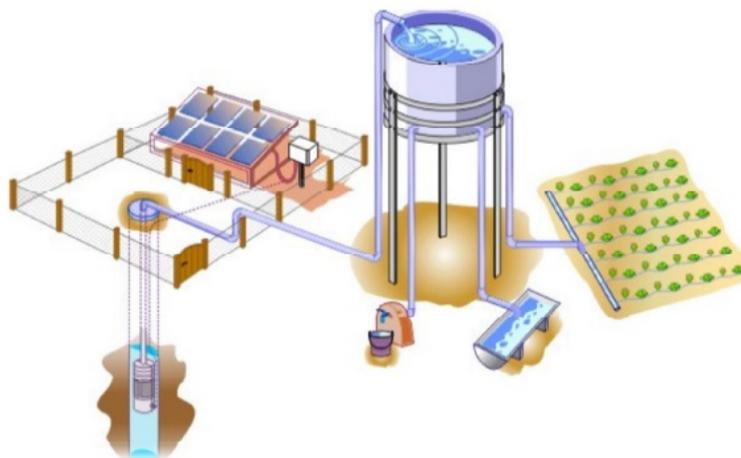


Figura 8 - Bombeamento de água com energia fotovoltaica em elevação de nível para aplicação variada

Fonte: MORALES (2011).

Valer et al. (2016) salientaram que os sistemas de bombeamento fotovoltaico figuram como uma solução viável para o abastecimento de água para produção agrícola, e que vêm sendo usados há muitos anos como uma alternativa para o abastecimento de água no meio rural. Com isso, o estudo de bombeamento fotovoltaico para irrigação se faz necessário para áreas rurais ou afastadas a fim de otimizar os processos agrícolas recentes.

2.6 Uso de Energia Solar Fotovoltaica na Irrigação

Os mais diversos setores da agricultura estão procurando soluções para fornecimento de energia segura e estável, encontrando nas energias renováveis e, principalmente, na energia fotovoltaica uma forma de suplantiar essa questão, principalmente pela queda de preço dos módulos fotovoltaicos e pela alta confiabilidade na geração de energia (IRENA, 2018), tornando-se uma das alternativas promissoras para a eletrificação de zonas rurais, essencialmente 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).

Chandel, Naik e Chandel (2015) reconhecem que a energia fotovoltaica para irrigação é competitiva em termos de custos em comparação com fontes tradicionais de energia, para sistemas de baixa demanda de vazão. Isso se deve ao aumento do custo do combustível fóssil e a redução do valor agregado dos sistemas fotovoltaicos, principalmente dos módulos solares.

A Índia, por exemplo, está com planejamento ambicioso quanto à instalação de sistemas de bombeamento de água com fornecimento de energia proveniente de sistema fotovoltaico, condicionado pelo auxílio governamental por meio de subsídios e linhas de créditos fornecidas pelo governo (KULKARNI, 2015).

Os sistemas de irrigação que utilizam energia solar figuram como uma forma acessível que faz com que os agricultores possam gerar energia em países em desenvolvimento, como é o caso da África Subsaariana, sul da Ásia, América e América Latina. Entretanto, por ser um sistema tecnológico novo em termos de utilização e estudos, deve ser implementada de forma adequada, para evitar o uso desnecessário e o desperdício de água. A rápida expansão da irrigação utilizando energia solar oferece soluções viáveis e proporciona uma grande oportunidade para que os pequenos produtores possam melhorar a produtividade de suas culturas (IDCOL, 2015; FAO, GIZ, 2018).

Cabe salientar que o fato de a irrigação fotovoltaica autônoma (Figura 9) não necessitar de banco de baterias a torna ainda mais ambientalmente favorável, sendo uma tecnologia de irrigação comercialmente disponível, com baixos custos operacionais e de manutenção. Em razão disso, inúmeras pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de aperfeiçoar esse método de irrigação (YU et al., 2011).

Kazem et al. (2017) estudaram um sistema de bombeamento de água para irrigação em áreas rurais de Omã. Os autores analisaram a viabilidade na substituição de um gerador a diesel por um sistema de bombeamento fotovoltaico objetivando mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Observaram que o emprego desta opção elimina cerca de 924 kg / ano de CO₂, 2,28 kg / ano de CO e 0,253 kg / ano de NO_x, o que representa evitar 0,172 kg / ano de HC, 1,86 kg / ano de SO₂ e 20,4 kg / ano de partículas suspensas da emissão ao meio ambiente.

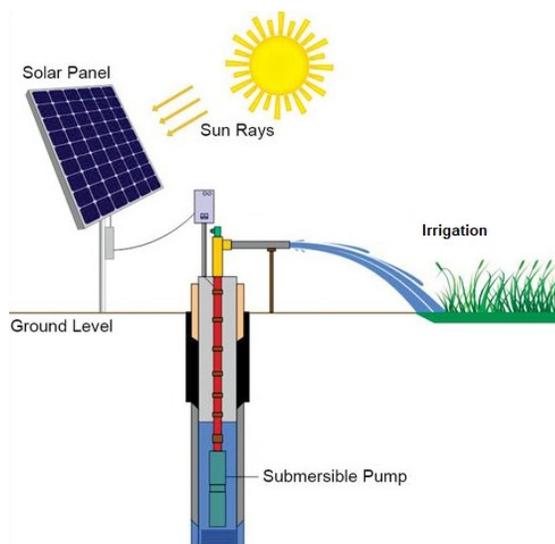


Figura 9 - Layout do sistema de irrigação fotovoltaica autônomo

Em seus estudos comparativos sobre a viabilidade econômica entre um sistema de energia fotovoltaico e a utilização de um motor diesel como gerador, Al-Waeli et al. (2017) encontraram um rendimento energético ótimo do sistema fotovoltaico de 0,309 USD / kWh e 0,79 USD / kWh o custo para o motor a diesel.

Widiastuti e Wijayanto (2017) utilizaram um sistema híbrido de energia (solar e eólica) na cultura da fruta pitaya no distrito de Beji, Indonésia, e conseguiram identificar que o método de irrigação por gotejamento alimentada por uma bomba com uma combinação de 120 watts sistema fotovoltaico e turbina eólica de 5 lâminas foi adequado para o fornecimento de água para cada planta, diagnosticando como um layout ideal para implantação em países tropicais ou de alta temperatura média.

Para Alvarenga, Ferreira e Fortes (2014), o sistema fotovoltaico autônomo para bombeamento de água em sistemas de irrigação por gotejamento vem se tornando uma opção economicamente competitiva para a agricultura familiar, principalmente nas populações localizadas em áreas remotas como já mencionado. As culturas como pomares, hortaliças e as denominadas culturas orgânicas precisam, além dos nutrientes apropriados, de uma uniformidade na sua irrigação. Permite melhor captação e o uso racional da água, impossibilitando perda da colheita pelo estresse hídrico motivado por uma irrigação descontrolada ou escassa. Assim, com a otimização da energia fotovoltaica é possível viabilizar todo tipo de cultivo competitivo no mercado consumidor.

2.7 Sistema de irrigação por pivô central

O surgimento do pivô central ocorreu em meados de 1948, sendo a primeira patente relacionada com o equipamento registrada em nome de Frank L. Zybach, agricultor no Colorado, Estados Unidos, em 1952 (BERNARDO et al., 2008; JAVAID, 2011). O pivô central realiza a aplicação da lâmina d'água por um tubo suspenso (linha lateral) onde estão instalados os emissores (FRIZZONE et al., 2011). A linha lateral é suspensa por uma estrutura treliçada que é apoiada nas suas extremidades.

No vão inicial do pivô central (Figura 10), a estrutura treliçada é apoiada por duas torres: uma fixa e outra móvel. A torre fixa é o ponto pivô do equipamento que oferece suporte para que as demais torres móveis realizem movimento circular em relação ao ponto pivô. A última torre inicia uma reação de avanço em cadeia de forma progressiva para o centro. Com isso, elas podem realizar o giro completo ou parcial, isso depende do tamanho, do formato e das condições da área de cultivo (BISCARRO, 2009).

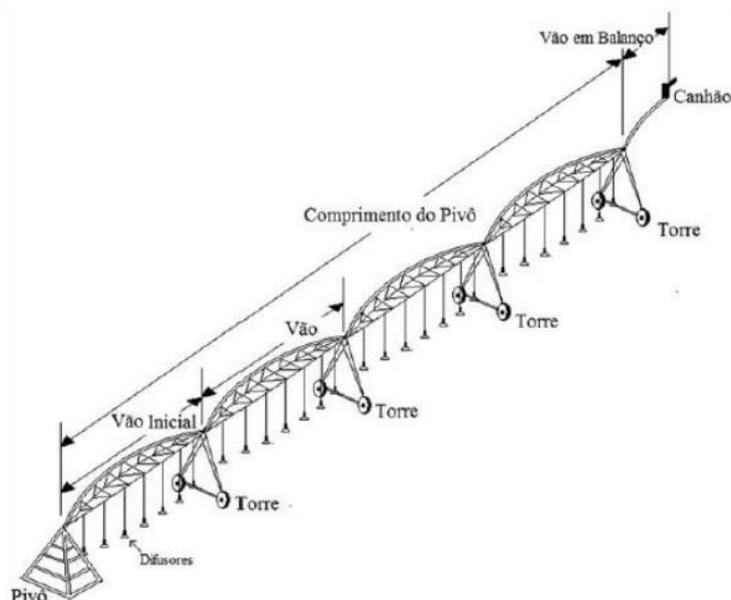


Figura 10 - Layout de instalação e configuração de um sistema de irrigação por pivô central

Fonte: BISCARRO (2009).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), foram identificados 19.892 equipamentos que

ocupam 1,275 milhão de hectares no ano de 2014, resultado que apontou crescimento de 43,3% da área irrigada por pivôs centrais em relação ao ano de 2006 (IBGE, 2006).

Sendo que no mesmo período, entre os anos de 2006 a 2014, a participação do consumo de energia elétrica do setor agropecuário partiu de 16,1% em 2006 para 20,5% em 2014 (BEN, 2015). Parte deste aumento pode ser justificado pela modernização no setor agropecuário em todas as áreas, não apenas na irrigação.

A área irrigada por pivôs centrais em 2017 era de aproximadamente 1,394 milhão de hectares, o que correspondia a aproximadamente 20% da área total irrigada nacional, somando 119 mil de hectares a mais que 2014, salienta-se ainda o cenário de expansão para 2030 prevendo um aumento da área irrigada por pivôs centrais para 2,885 milhões de hectares, ou seja, um crescimento de 107% para o setor, em comparação com 2017 (ANA, 2017).

É de crucial importância discutir sobre métodos racionais para o fornecimento de energia elétrica ocasionada pelo aumento da área irrigada por pivôs centrais. Moraes et al. (2014) destacam que a agricultura é altamente dependente de energia elétrica para aumentar a produtividade e, assim, atender às necessidades do mercado.

Turco et al. (2009) descrevem que o custo com a energia elétrica é uma das variáveis mais sensíveis no custo final da irrigação, e que a possibilidade de escassez de energia e de água, bem como a rápida elevação dos custos de produção, pressionam e aceleram o interesse para o uso racional.

Mesmo que as práticas racionais de consumo da energia elétrica, em tempos em que o valor do kWh é fator importante no balanço final da safra em áreas irrigadas, sejam um assunto de pauta que carece de ação conjunta, o aumento do consumo do principal insumo da agricultura irrigada alcançou valores ainda mais expressivos.

A retirada de água do período que compreende os anos de 1995 a 2016 passou de 100 m³.s⁻¹ para 969 m³.s⁻¹, o que corresponde a 46,2% do total de água retirada no Brasil em 2016, enquanto o consumo urbano, segundo o registro em 2016, é de 488,3 m³.s⁻¹, praticamente a metade da irrigação (ANA, 2016).

No mesmo cenário ressaltado pela Agência Nacional das Águas (período 2015 a 2030) acompanhando o crescimento da área irrigada (6,95 para 10,09 Mha),

a retirada de água, que em 2016 era de 969 mil L.s⁻¹, prevê que no ano de 2030 a irrigação alcance 1,338 milhões L.s⁻¹ (ANA, 2017).

Deste aumento, a irrigação por pivôs centrais passará de 177,327 mil L.s⁻¹ em 2015, para 361,260 mil L.s⁻¹ em 2030, o que corresponde a um acréscimo de mais de 100%, deixando os pivôs centrais apenas atrás do Arroz-Convencional e igualado às demais culturas e aos sistemas de irrigação na retirada de água em 2030 (ANA, 2017).

É notório que, pelos dados contidos nos relatórios citados, o crescimento da irrigação por pivô central aumenta não só o consumo de água, mas também o de energia elétrica. Logo, é de suma importância implementar métodos de fornecimento de energia modernos e que condizem com a sustentabilidade ambiental.

2.8 Gráfico de controle de Shewart

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

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

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

Ainda segundo os autores, processos definidos como estáveis mostram apenas causas comuns, salientando sempre a mesma variabilidade ao longo do tempo. No entanto, causas especiais são ponderadas como falhas, fazendo o

processo sair do seu padrão natural de operação e diminuindo drasticamente o seu desempenho.

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

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

Sendo assim, visando a um melhor diagnóstico das interferências no processo de irrigação, o uso de gráficos de controle acarreta algumas melhorias na avaliação do processo de irrigar, bem como no atendimento das normas de qualidade da irrigação, no monitoramento de erros sistemáticos no processo, informações quanto ao status do processo, cálculo da incerteza da medição na irrigação, evidência objetiva para a demonstração da qualidade nas medições e fonte de dados históricos sobre o processo de medida (VILAS BOAS, 2016).

A utilização dos gráficos de controle vem se consolidando dentro de uma ampla gama de estudos sobre a irrigação. Andrade et al. (2017), por exemplo, avaliaram a uniformidade de um sistema de irrigação por microaspersão com a utilização de energia fotovoltaica, utilizando 3 tipos de gráficos de controle e definindo que o gráfico EWMA constatou com mais eficiência pequenas variações e os momentos exatos da variabilidade do processo.

Zocoler et al. (2015) definiram que, apesar da utilização de água salina para irrigação por gotejamento, as curvas características de vazão do gráfico de controle de Shewhart permaneceram dentro do limite de controle.

Juchen, Suszek e Vilas Boas (2018), ao analisarem um sistema de irrigação por gotejamento na produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais, utilizaram gráficos de controle para verificar os valores de vazões obtidos nos tratamentos com fertirrigações.

2.9 Índice de capacidade do processo

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

Idealizando a capacidade do processo de se manter sob controle em relação ao limite inferior de especificação, faz-se a interpretação dos índices de capacidade do processo (C_{pi}) (MONTGOMERY, 2009).

Pode-se utilizar a ferramenta para análise na irrigação localizada, buscando observar a adequação da irrigação, em termos de qualidade refletida por meio dos gráficos de controle, em que um coeficiente alto e pouca variabilidade contribuem com o aumento do valor do índice responsável pela adequação desta irrigação aos critérios pré-estabelecidos (MONTGOMERY, 2009).

Um estudo sobre a uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas (TAMAGI et al., 2016), constatou que o aspersor compensante apresentou melhor desempenho à altura de 1,5 m e que, entre as alturas estudadas, as melhores uniformidades de distribuição de água ocorreram na altura de 1,5 m. Mas como o $C_{pk} < C_p$ em todas as variáveis calculadas, os resultados indicam que os processos estão fora do ponto de especificação. CPK.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local experimento

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 a latitude (25° Norte).



Figura 11 - Vista aérea do local de instalação do experimento

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.

O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen é o tipo subtropical úmido, sendo o inverno seco e o verão chuvoso, tendo valores de precipitação anual aproximada de 1841 mm. O relevo possui ondulações suaves com formações sedimentares, o solo é de predominância Latossolo e Nitossolo Vermelho.

3.2 Características do sistema hidráulico do pivô central

O reservatório utilizado para os ensaios tem capacidade de 1m^3 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 fluidos com presença de sólidos. Já o aspersor utilizado é da marca SENNINGER, modelo placa simples, com vazão variando de 395 a 4811 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 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. Nesta interligação, também foi utilizado o tubo PVC de 2". O desnível entre o conjunto motobomba e a torre central é desprezível.

Na Figura 12, é possível visualizar os detalhes das instalações do pivô central.



Figura 12 - Linha lateral do pivô central instalada

3.3 Caracterização dos ensaios de uniformidade

3.3.1 Aplicação de água

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

usar o modelo de gráficos de controle atende ao requisito mínimo recomendado (MONTGOMERY, 2017).

Os ensaios tiveram a duração de 5 minutos, sendo que o primeiro ensaio começou às 9:00 horas. O último ensaio foi iniciado às 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 m².

As avaliações de uniformidade da aplicação de água foram realizadas seguindo os procedimentos e orientações da Norma 11545 de 2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. O coeficiente de uniformidade foi calculado utilizando a Equação 1 de Chirstiansen, modificada por Heermann e Hein (1968).

$$C_{uh} = 100 * \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_{mp}| * S_i}{\sum_{i=1}^n V_i * S_i} \right) \right] \quad \text{Eq. 01}$$

Onde: CUH: coeficiente de uniformidade de Heerman e 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; Vi - é o volume de água coletada no i-ésimo coletor, em centímetros cúbicos ou milímetros; Si - 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 (Equação 3).

A Equação 2 foi utilizada para determinar o volume médio ponderado de água coletada.

$$V_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{Eq. 02}$$

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, sendo que a lâmina aplicada é 10% maior ou menor que a lâmina média, sejam investigados para determinar a causa da variação.

Para auxiliar na orientação da avaliação do pivô central, sendo que, o equipamento se trata de um protótipo e não há um valor pré-determinado de coeficiente (C_{UH}), foi adotado o método de interpretação dos valores de coeficiente da Universidade de Minnesota, que é apresentado na Tabela 1. O método utiliza a mesma equação da norma ABNT 15545 de 2016 para calcular o coeficiente (C_{UH}).

O equipamento utilizado é um protótipo que auxilia na orientação da avaliação do pivô central e não há um valor pré-determinado de coeficiente (C_{UH}). Assim, foi adotado o método de interpretação dos valores de coeficiente da Universidade de Minnesota, apresentado na Tabela 1, que utiliza a mesma equação da norma ABNT 15545 de 2016 para calcular o coeficiente (C_{UH}).

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.

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

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

Fonte: Adaptado da Universidade de Minnesota (2021).

A Figura 13 exibe os coletores durante um dos ensaios que foram realizados. A Figura 17b exibe um desenho 2D com as distâncias entre os coletores e o ângulo de abertura entre os dois raios de coletores.



Figura 13 - 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.

Tabela 2 - Diâmetro dos bocais, valor de pressão com 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).

3.4 Fatores climáticos

Os módulos fotovoltaicos devem ser posicionados em um local com boa incidência de ventos e voltados para o Norte geográfico com a inclinação mais próxima à latitude do local. Tais cuidados objetivam minimizar as perdas de energia e a aumentar a eficiência do equipamento (PINHO e GALDINO, 2014).

Por meio da ferramenta de cálculo do programa SunData v 3.0, disponibilizada no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), foi possível obter os níveis de irradiação solar diária média mensal ($\text{kWh/m}^2.\text{dia}$), sob o ângulo de inclinação ideal para os módulos de 20° N. Com essa ferramenta, foi possível notar também que a irradiação alcança seus picos máximos nos meses do verão, sendo o maior em dezembro ($5,87 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$) e os mínimos ao redor do Inverno (junho, $3,85 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$).

Tabela 3 - Dados estimados de irradiação solar diária para plano inclinado em 20° N na cidade de Cascavel - PR

Meses	Irradiação solar diária média Mensal ($\text{kWh/m}^2.\text{dia}$)	Dias no mês	Total Irradiação Mensal ($\text{kWh/m}^2.\text{mês}$)
Janeiro	5,82	31	180,42
Fevereiro	5,38	28	150,64
Março	5,38	31	166,78
Abril	4,89	30	146,70
Maio	4,16	31	128,96
Junho	3,85	30	115,50
Julho	4,04	31	125,24
Agosto	4,99	31	154,69
Setembro	4,74	30	142,20
Outubro	5,16	31	159,96
Novembro	5,66	30	169,80
Dezembro	5,87	31	181,97
Média	4,99	30,42	151,80

Fonte: CRESESB (2018).

De posse dessas informações, é possível obter o número de Horas de Sol Pleno (HSP), ou seja, o valor acumulado de energia solar ao longo do dia. Essa grandeza se refere ao número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1kW/m^2 (1000W/m^2), de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão. HSP é obtida pela razão da irradiação diária (kWh/m^2 dia) e a constante 1kW/m (PINHO e GALDINO, 2014), sendo matematicamente igual a irradiância diária total em função dessa definição.

A fim de comparar os dados de irradiação e, conseqüentemente, a energia produzida com a necessidade hídrica para a irrigação, foi realizado o levantamento dos dados climatológicos da região e expostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados estimados de precipitação média mensal na cidade de Cascavel – PR

Meses	Precipitação Média (mm)	Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	Intensidade Média dos Ventos (m.s^{-1})
Janeiro	151,9	23,3	4,89
Fevereiro	150,2	23	4,44
Março	112,4	22,4	3,92
Abril	130,8	20,5	3,75
Maiο	158,4	16,9	4,28
Junho	133,2	15,9	4,92
Julho	98,9	15,4	5,50
Agosto	83,1	17,3	6,14
Setembro	133,5	19,2	6,44
Outubro	182,6	21,3	6,44
Novembro	153,8	21,7	6,19
Dezembro	147,4	23	5,64
Média	136,35	19,99	5,21

Fonte: IAPAR (2019).

Foram usados os dados de 33 estações, dentro do período de 1976 a 2015, perfazendo uma série temporal de 40 anos.

Os dados dos elementos meteorológicos presentes na Tabela 4 tiveram origem da rede de estações meteorológicas do IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná, do SIMAPEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná e da rede de estações pluviométricas das Águas do Paraná.

3.5 Painel fotovoltaico

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 3.

$$kW = CV * 0,74$$

Eq. 03

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

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

Foram instalados para o projeto os módulos fotovoltaicos da CANADIAN SOLAR, modelo HIKU7 MONO PERC, de Silício Monocristalino. Os Módulos são certificados pela ISO 9001:2015, ISSO 14001:2015 e ISSO 45001:2018.

Sua potência de pico, conforme o fabricante, é de 665 Wp sob condições de teste padrão (CTP) de irradiância de 1000 W/m² e temperatura da célula de 25°C. Sua vida útil está em pelo menos 30 anos. A Tabela 5 traz as informações mais detalhadas de cada módulo fotovoltaico de acordo com as especificações do fabricante.

Tabela 5 - Especificações técnicas do módulo fotovoltaico

Potência Máxima (P_{max})	665 W_P
Arranjo Celular	132 (2x(11x6))
Corrente Nominal em P_{max} (I_{mp})	18,51 A
Tensão Nominal em P_{max} (V_{mp})	45,6 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	17,28 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	38,5 V
Tensão máxima do Sistema	1500 V
Dimensões (CxLxE)	2384 X 1303X 35 mm
Peso	34,4 Kg
Temperatura de operação NOTC	43°C
Coefficiente de Temperatura da Potência	- 0,36%/°C
Coefficiente de Temperatura da Tensão	- 0,28%/°C
Coefficiente de Temperatura da corrente	0,05%/°C

Para elaborar o projeto, é fundamental conhecer a quantidade de módulos necessários para abastecer o consumo em questão (100%) e a área ocupada. Figura 14 esquematiza as proporções dos módulos, sendo que área total de cada placa é igual a 3,094 m².

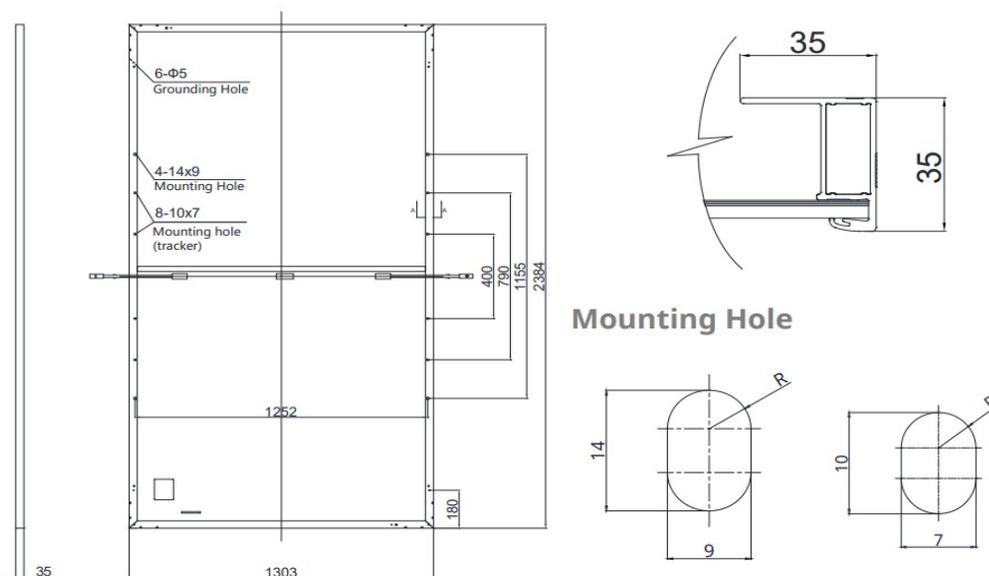


Figura 14 - Módulo fotovoltaico da marca CANDIANSOLAR

Pode-se determinar a potência aproximada do sistema fotovoltaico por meio da fórmula empírica adaptada (PINHO e GALDINO, 2014) aplicada aos módulos monocristalino escolhidos para elaboração do projeto (Equação 4).

$$PF = \frac{De}{HSP \times TD} \quad \text{Eq. 04}$$

Onde: PF (kWp): Potência de Pico do Sistema Fotovoltaico; De (kWh/d): Demanda Energética Diária; HSP (horas/dia): Horas de Sol Pleno, dada por (Irradiância local em kWh/m²) / (1kW/m²); TD (adimensional): Taxa de Desempenho.

A taxa de desempenho mensura a potência real de todo o sistema fotovoltaico, em condições de operação contabilizando todas as perdas, como queda de tensão devido à resistência do cabeamento e conectores, sombreamento, inversor (eficiência e carga), temperatura operacional, resposta espectral, entre outras. Comumente é utilizada uma TD de 75% (PINHO e GALDINO, 2014), valor assumido para o trabalho proposto.

Após a escolha e determinação da potência, faz-se necessário o cálculo do número de módulos. Para tanto, utilizou-se a Eq. 5 (SILVA et al., 2018):

$$Nm = \frac{PF}{Pm} \quad \text{Eq. 05}$$

Onde: Nm : Número de Módulos; Pm (Wp): Potência de Pico Módulo, de acordo o fabricante.

A partir disso, tem-se a área total ocupada pelos módulos obtida por meio da Eq. 6.

$$At = Nm * Am \quad \text{Eq. 06}$$

Onde: At (m²) – Área Total; Am (m²): Área de cada Módulo.

Ponderou-se neste estudo a perda de eficiência anual dos módulos descrita pelo fabricante de 0,5% ao ano. Para o primeiro ano, adotou-se um valor médio de metade da taxa anual, ou seja, somente ao final do primeiro ano obtemos a degradação de 0,5%.

3.6 Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)

Para o dimensionamento do inversor, foi calculado o (FDI) dado pela relação entre a potência máxima do gerador fotovoltaico e a potência do inversor. A sua configuração ideal proporciona ao SFCR utilizar ao máximo a energia gerada com uma maior eficiência (COSTA, 2010). O FDI é uma grandeza adimensional dada pela equação Eq. 7:

$$FDI = \frac{P_{INV}}{P_F} \quad \text{Eq. 07}$$

Onde: P_{INV} (kW): Potência Nominal do Inversor (fabricante), P_F (kWp): Potência Painel Fotovoltaico.

A composição do gerador fotovoltaico e inversor estabelece o ponto principal dentre o fluxo de potência dos SFCR, tendo em conta que toda energia gerada passa pelo inversor para ser direcionada à rede. Em casos em que não existe um fluxo adequado de potência, o sistema pode operar com uma baixa eficiência.

A variação contínua da irradiação e da sazonalidade das temperaturas faz com que ocorra uma oscilação na energia gerada e, conseqüentemente, potências variantes. Tais potências devem ser processadas pelo inversor, que necessita de um dimensionamento adequado para converter toda, ou ao menos, a maior parte da potência entregue a ele.

Assim sendo, o dimensionamento do inversor deve ser realizado de forma que não leve o sistema a perder potência, seja por subdimensionamento ou por sobredimensionamento do inversor. Alguns profissionais da área estabelecem uma faixa de potência de operação entre 0,75 e 1,2 da potência nominal do gerador fotovoltaico (COSTA, 2010).

A escolha do inversor foi efetuada em conformidade com as especificações do sistema fotovoltaico que será conectado e indicado no orçamento. O inversor escolhido foi da marca DELTA, modelo MS300 220V, trifásico.

3.7 Estrutura de fixação dos módulos

A estrutura de fixação do painel solar foi desenvolvida em software computacional com o objetivo de atender às especificações técnicas do objetivo proposto. Foi realizada a modelagem dos componentes, a montagem e a simulação do protótipo em ambiente virtual, tal como mostrado nas Figuras 15 e 16.

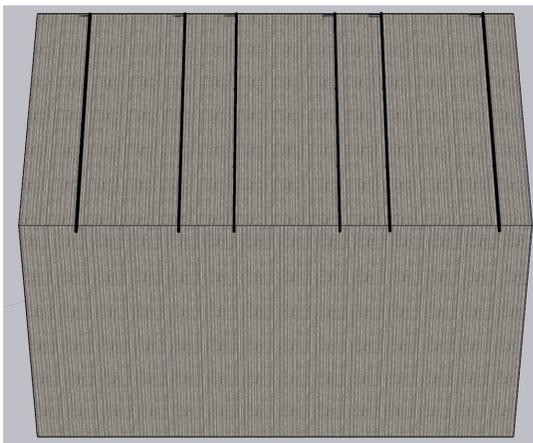


Figura 15 - Vista superior da estrutura de fixação, modelado em software computacional

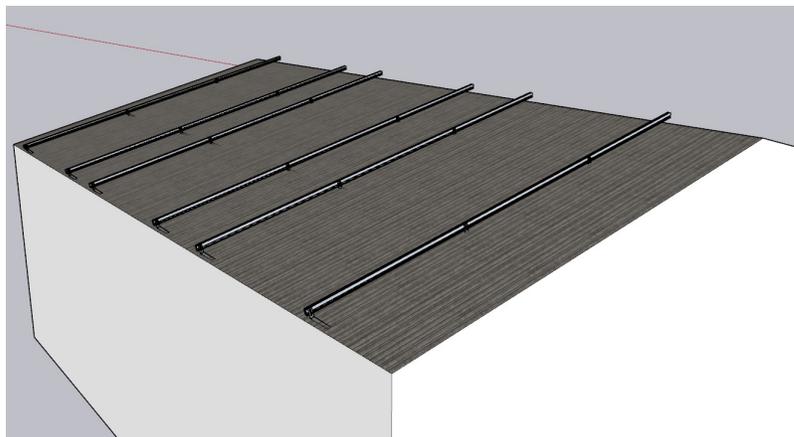


Figura 16 - Vista lateral da estrutura da estrutura de fixação sobre o telhado do LIF

3.8 Instalação e funcionamento do sistema fotovoltaico

Foram utilizados oito painéis de silício monocristalino, instalados em estrutura de alumínio com inclinação devidamente estabelecida, sendo direcionados para o nordeste, conforme orientação do telhado, com inclinação de 10° , sendo que essa inclinação atinge elevados valores de irradiação solar diária média mensal ($\text{kWh m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) para a cidade de Cascavel. Os painéis foram ligados em série por um conector MC4, a fim de elevar a tensão do sistema, fornecendo energia em corrente contínua, pois, 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.

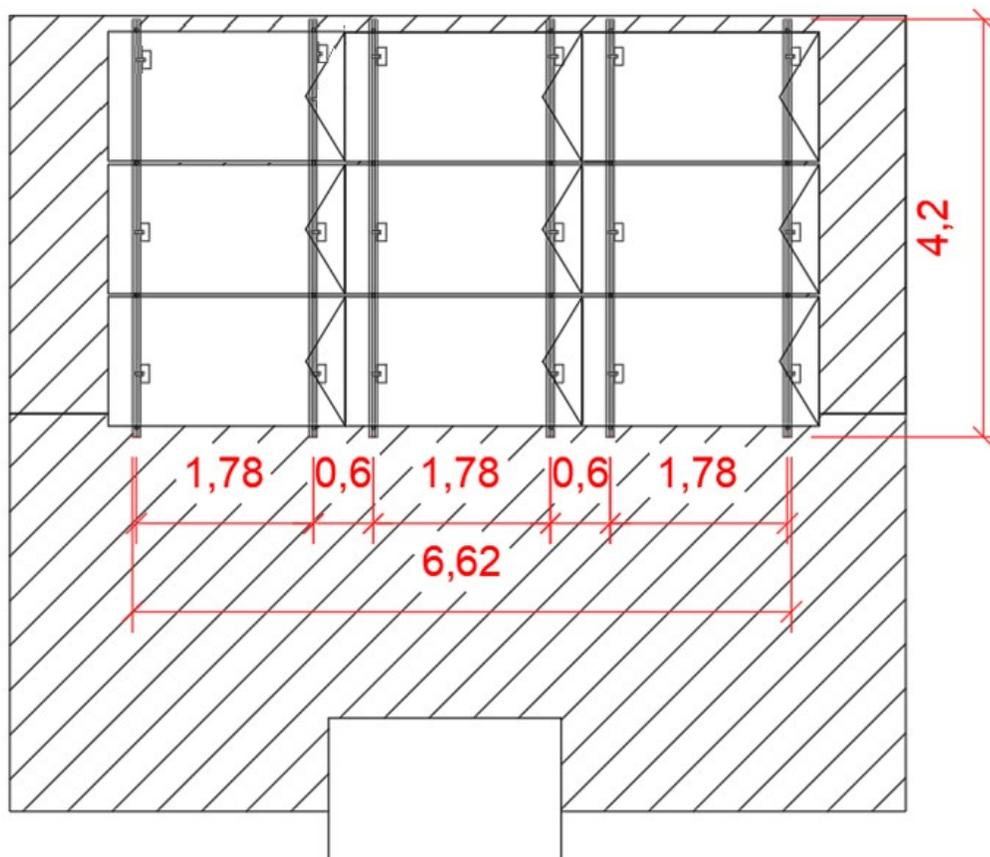


Figura 17 - Layout da estrutura de fixação do sistema fotovoltaico



Figura 18 - Módulos fotovoltaicos instalados no telhado do LIF

3.9 Arranjo dos painéis fotovoltaicos

Para atender a potência máxima de 1,471 kW do motor acoplado à bomba de 2CV foi utilizado, no painel monocristalino, um sistema de ligação em série, satisfazendo, assim, a demanda energética da carga nos horários de irradiação solar.

O projeto elétrico para o sistema fotovoltaico será realizado de acordo com a Figura 28.

A ligação em série dos módulos em silício monocristalino fornecendo a partir do inversor a potência de 5,32 kW_p, 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 exibido na Figura 20.

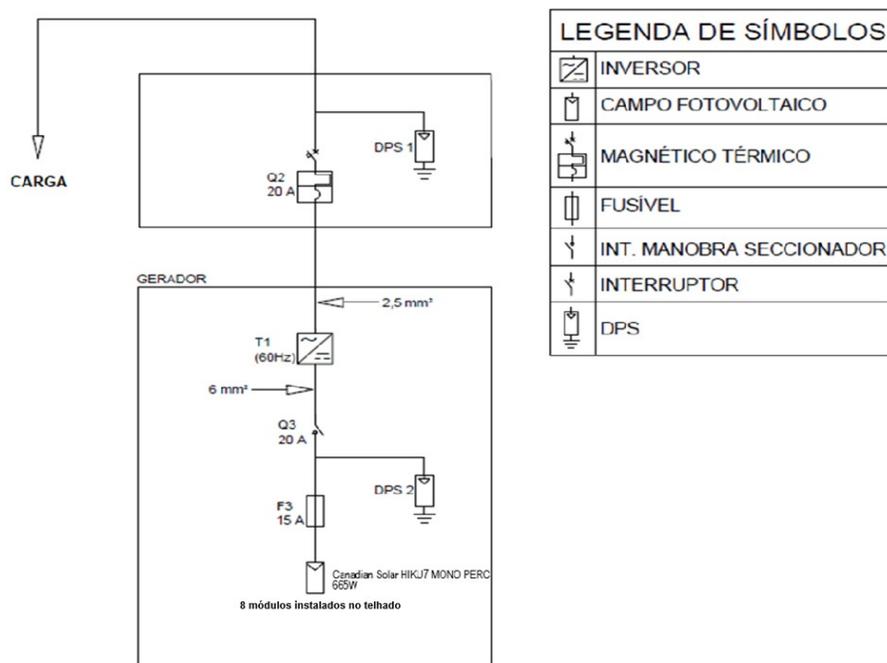


Figura 19 - Diagrama unifilar do projeto elétrico fotovoltaico

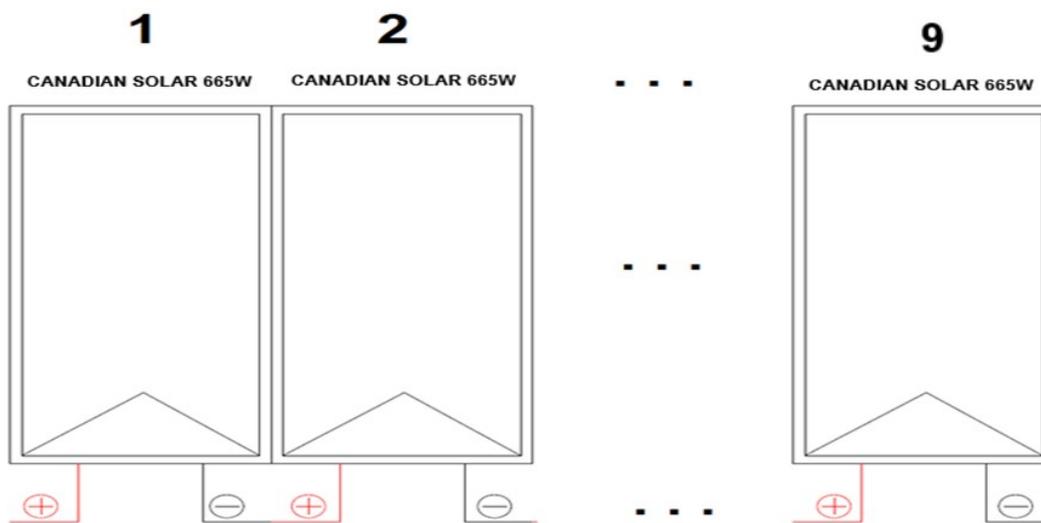


Figura 20 - Arranjo do sistema fotovoltaico, com ligação em série, dos 8 módulos fotovoltaicos

3.10 Delineamento experimental

Os ensaios analisaram na uniformidade de aplicação de água do pivô central com fornecimento de energia a partir de um sistema fotovoltaico ligado diretamente

à bomba de água, dentro da oportunidade fotovoltaica de irrigação.

O valor de uniformidade foi calculado a partir da vazão dos 38 coletores que foram utilizados para cobrir a área molhada efetiva do pivô central, sendo o primeiro coletor posicionado a 2,5 e o último a 17 metros de distância do ponto pivô.

Para melhor representatividade e igualdade, as coletas foram realizadas dentro do intervalo das 9:00 horas às 17:00 horas, ligando a bomba de água a cada 15 minutos e medindo a vazão nos coletores pelo método gravimétrico.

Serão 5 dias de coleta, com 30 coletas por dia, somando o total de 150 coletas.

A coleta de dados de geração de energia do sistema fotovoltaico foi realizada a cada 10 segundos com o controlador lógico programável (CLP) da marca DELTA, integrado a interface homem – máquina (IHM) que fornece os valores de tensão, corrente, potência, tanto da parte de corrente contínua (sistema fotovoltaico), quanto da parte de corrente alternada (consumo energético do sistema de bombeamento do pivô central).

3.11 Gráficos de controle de Shewhart e índice de capacidade do processo

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 7, 8 e 9.

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq.07}$$

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad \text{Eq.08}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq.09}$$

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

Montgomery (2017) orienta que se o gráfico da amplitude (o gráfico \bar{R}) tiver 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 mostram 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 10 (MONTGOMERY, 2017).

$$C_p = \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\sigma} \quad \text{Eq. 10}$$

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

O valor adimensional da capacidade do processo (C_p) é avaliado seguindo o que descreve a Tabela 6.

Tabela 6 - 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, pois não é necessária

nenhuma ação no momento, mas o sistema deve ser monitorado para elevar o coeficiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística descritiva dos dados

A Tabela 7 salienta a estatística em que constam os valores de média e coeficiente de variação, correspondentes aos valores de potência fotovoltaica e potência do motor da bomba de água, com o comparativo de média, aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 7 - Estatística descritiva dos dados em relação à potência fotovoltaica e potência do motor, com o coeficiente de variação

Energia Gerada				
	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.

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, pois não ocorreu a formação de nuvens e nem o aumento, por consequência, da geração e consumo de energia.

Pode-se notar também que o valor de coeficiente de variação se manteve abaixo de 10% apenas para a coleta 5 na potência fotovoltaica, demonstrando mais 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, concluíram que a elevada formação de nuvens desestabiliza a geração de energia

aumentando os valores de coeficiente de variação.

A Tabela 8 evidencia os valores das médias de vazão e pressão do sistema de irrigação por pivô central.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos dados em relação à vazão e pressão do sistema de irrigação por pivô central

	Vazão		Pressão	
	Média (L.h ⁻¹)	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.

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

As coletas 1 e 4 tiveram 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%. Logo, apesar da 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 9 apresenta as médias das coletas, sendo possível identificar os valores de Cuh (%), coeficiente de variação (%) e o desvio padrão.

Tabela 9 - Estatística descritiva dos dados em relação à uniformidade, com o coeficiente de variação e desvio padrão

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

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

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

Cabe destacar a coleta 5, que obteve superioridade estatística em relação às demais coletas, e com coeficiente de variação abaixo de 10%, indicando homogeneidade dos dados (Montgomery, 2009). Logo, quando são analisados 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 melhor 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 as encontradas no estudo proposto.

4.2 Gráfico de Controle de Shewhart

Buscando avaliar se os ensaios mantiveram-se 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, bem como os gráficos para as variáveis de pressão, vazão e potência, buscando justificar a variabilidade dos coeficientes de uniformidade.

A Figura 21 mostra os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD,

Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 1.

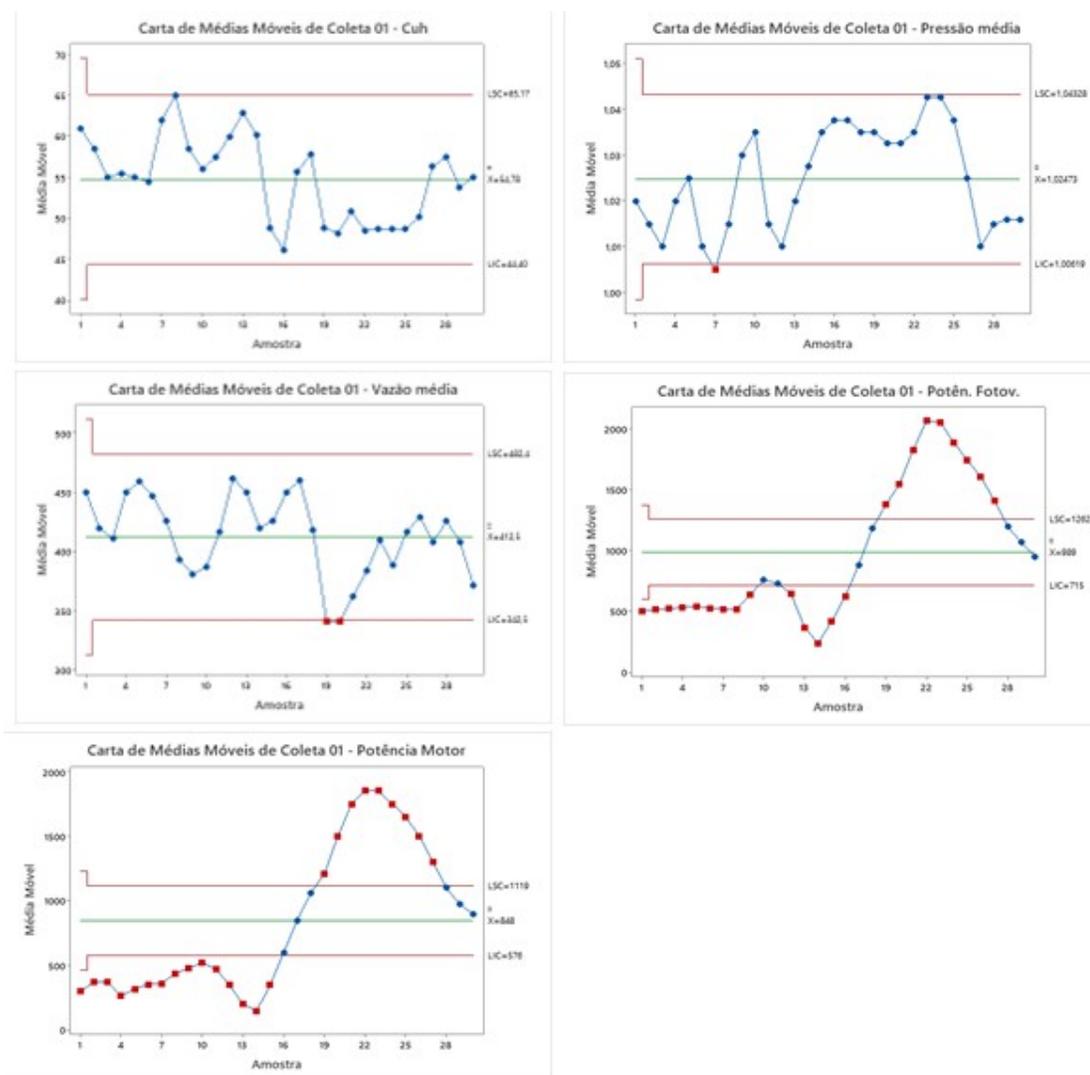


Figura 21 - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 1.

Verificou-se que os gráficos de potência fotovoltaica e potência do motor têm o mesmo comportamento, o que é condizente, uma vez que o sistema de energia fotovoltaica está ligado diretamente à 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, sendo que a maior produção de energia culminou em maior pressão no sistema (Ensaio 23 e 22).

No gráfico referente à uniformidade, nota-se tendência decrescente, entre os pontos 19 e 26, pois, 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 22 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 2.

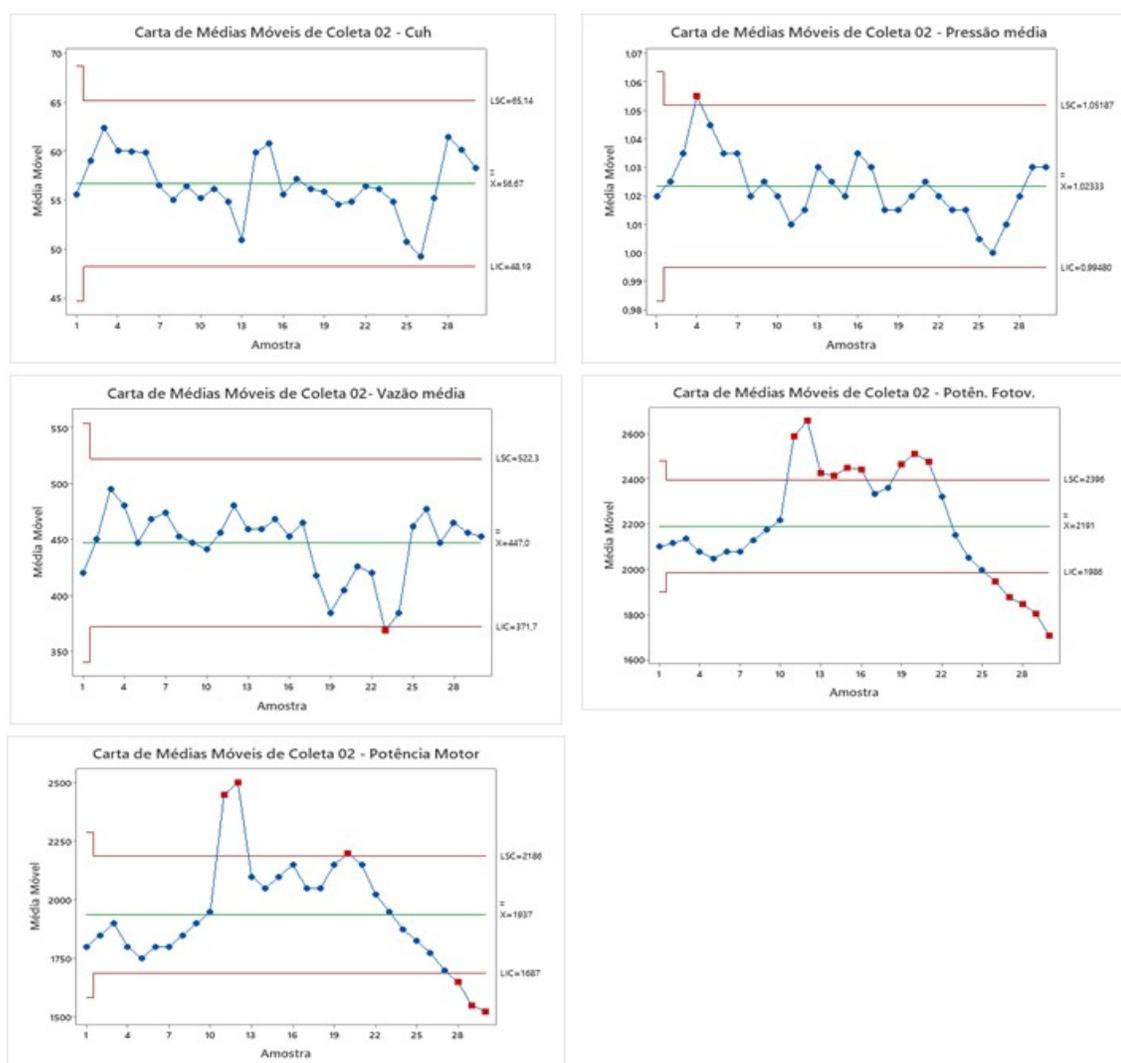


Figura 22 - Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH}, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 2.

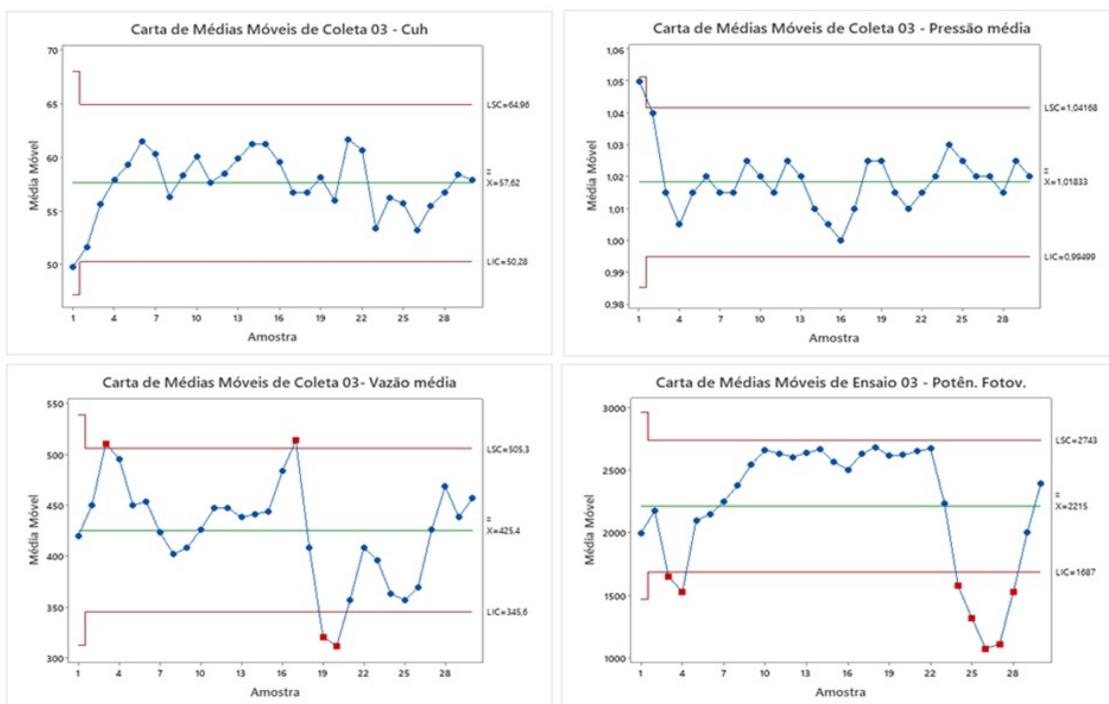
Nota-se que apenas o gráfico referente à uniformidade se manteve sob controle estatístico de qualidade, porém os valores ficaram abaixo do recomendado para a uniformidade.

Os demais gráficos tiveram pontos tanto acima quanto abaixo dos limites estipulados com destaque para a coleta 26 que, apesar dos valores de potência fotovoltaica e da bomba com 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 referentes à subida dos valores de radiação, atingindo seu pico nas coletas próximas às 13:00 e 14:00, voltando a decrescer no período da tarde.

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

A Figura 23 apresenta os gráficos de controle em relação ao CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 3.



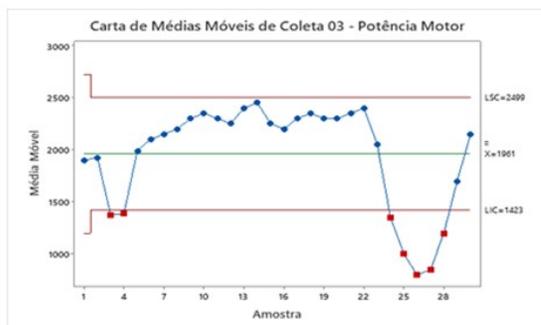


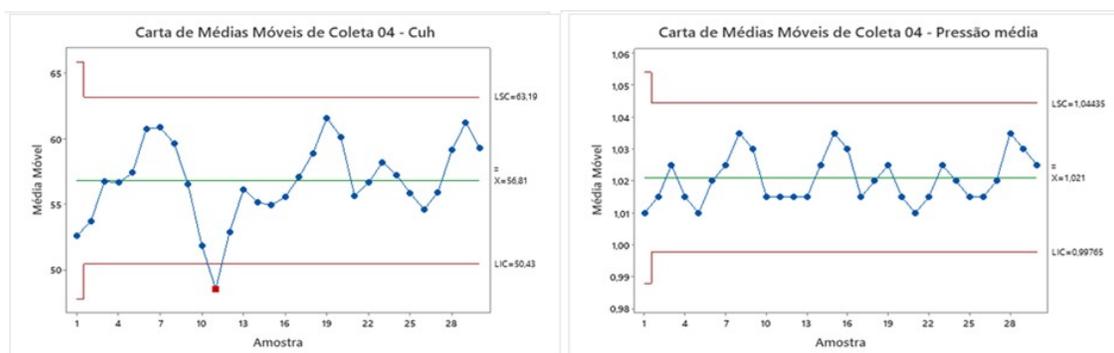
Figura 23 Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH} , Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 3.

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), quando analisaram um sistema e irrigação por gotejamento com energia fotovoltaica autônoma e detectaram que a diminuição no valor de potência do sistema de energia acarreta menores valores de vazão do sistema de irrigação.

A Figura 24 salienta os gráficos de controle em relação ao C_{UH} , Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 4.



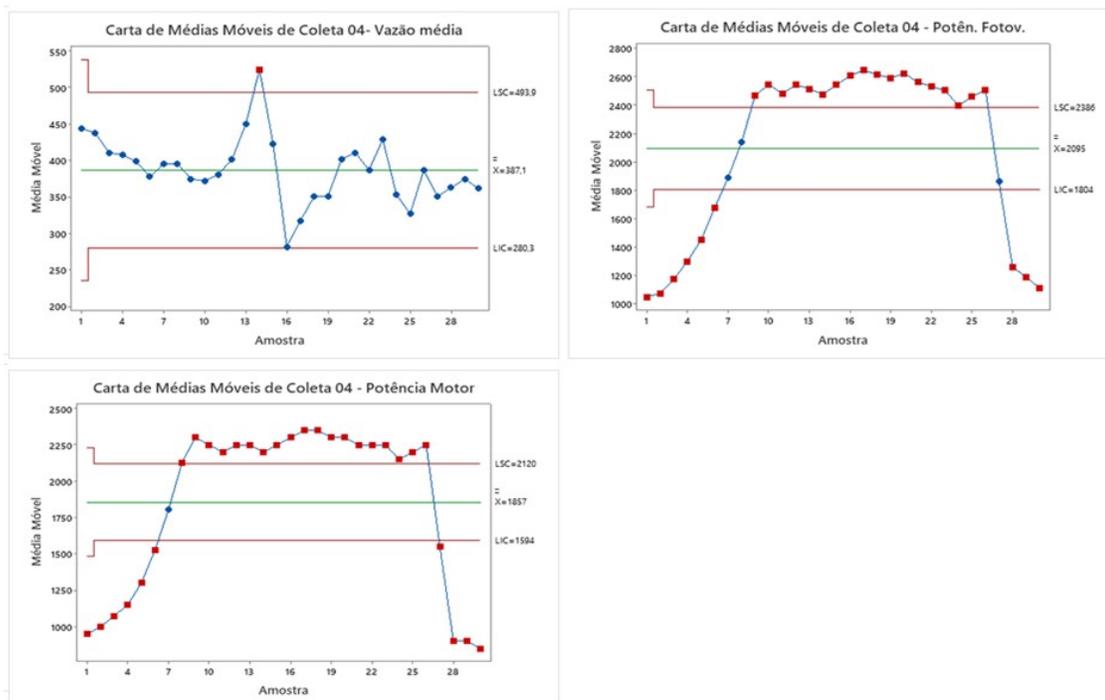


Figura 24 - Gráfico de Controle de Shewhart para CUC, CUD, Pressão, Vazão e Potência do sistema fotovoltaico e motor para a coleta 4.

A coleta 4 foi caracterizada pelos valores elevados de potência, visto que durante todo o dia de coleta não ocorreu a formação de nuvens. Logo, podemos observar nos gráficos referentes à potência que existem pontos abaixo, mas sua maioria está 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 corresponde ao horário das 11:00 às 14:00 horas (PINHO e GALDINO, 2014), culminou em maior estabilidade da vazão, com apenas 1 ponto acima do limite superior e efeito positivo na pressão que se manteve dentro do controle estatístico de qualidade, melhorando, por fim, a uniformidade com 7 pontos acima dos 60%.

A Figura 25 exibe os gráficos de controle em relação ao C_{UH} , Pressão, Vazão e Potência para a coleta 5.

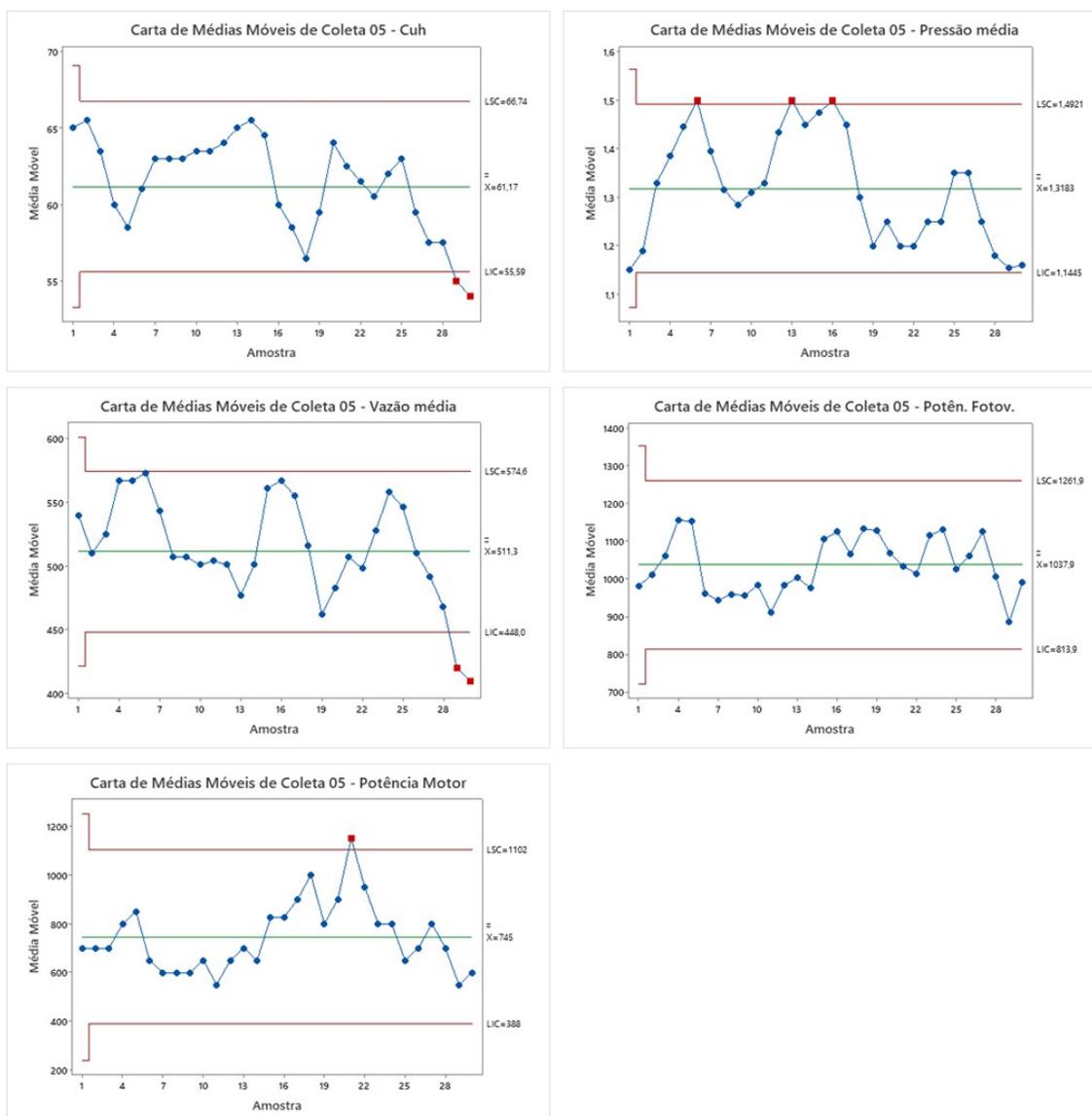


Figura 25 - Gráfico de Controle de Shewhart para C_{UH} , Pressão, Vazão e Potência para a coleta 5.

Nota-se, no gráfico referente à uniformidade, pontos abaixo do limite inferior, justificados pelos valores baixos de vazão e pressão, com 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 à 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 avaliarem o desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão com bombeamento fotovoltaico, definiram que os gráficos de controle permitiram 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 que são características e interferem na uniformidade do processo de irrigação.

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 o CUD, definiram que o gráfico de controle de Shewart foi satisfatório na determinação do melhor tratamento dentre os analisados.

4.3 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), ponderando-se o limite inferior de especificação (LIE) em relação ao C_{UH} , para cada tratamento mostrado na Tabela 10. 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, para 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 10 - 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 ⁻¹)	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

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.

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, Vilas Boas e Sampaio (2010), ao analisarem a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão, concluíram que o índice de capacidade do processo se mostrou 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.

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 C_p abaixo de 1,25.

5 CONCLUSÃO

Em todos os tratamentos, a uniformidade ficou abaixo de 80%. Sendo classificados como ruins, 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.

A potência do motor atingiu o mínimo necessário apenas na coleta 5, pois, apesar de não obter os maiores valores, caracterizou-se pelo baixo valor de coeficiente de variação. Logo, a coleta com mais estabilidade na produção e consumo de energia 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.

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. Ademais, a estabilidade na geração de energia melhorou a uniformidade e, em contrapartida, a formação e presença de nuvens diminuiu consideravelmente 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.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGE, P. O.; ADEDIRAN, O. S.; OGUNDIPE, A. A. *Pollutant emissions, energy consumption and economic growth in Nigeria: a multivariate granger causality. Framework. International journal of energy economics and policy.* v. 6, p. 202-207, 2016.

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.

AL-WAELI, A. H. et al. *Evaluation of the economic and environmental aspects of using photovoltaic water pumping system. In: 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Springer, Singapore.* p. 715- 723, 2017.

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

ANDRADE M. G.; VILAS-BOAS M. A.; SIQUEIRA JAC; DIETER J., SATO, M.; HERMES E.; MERCANTE, E. TOKURA, L. K. *Statistical quality control for evolution of uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. Renewable and Sustainable Reviews.* v. 78, p. 743-753, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração. Fonte de Energia exploradas no Brasil. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em: 02 mai. 2017.*

BAYOD-RÚJULA, A. A; CEBOLLERO- ABIÁN, J. A. *A novel MPPT method for PV systems with irradiance measurement. Solar energy,* v. 109, p. 95-104, 2014.

BEKHET, H. A.; OTHMAN, N. S. *Impact of urbanization growth on Malaysia CO2 emissions: Evidence from the dynamic relationship. Journal of Cleaner Production,* v. 154, p. 374-388, 2017.

BEN. *Balanco Energético Nacional de 2014. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia, Governo Federal Brasileiro,* 2015.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de irrigação*. 8 ed. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2008.

BISCARO, G. A. *Sistemas de Irrigação por Aspersão*. Dourados, MS. Editora da UFGD, 2009, 134 p.

BRAUN-GRABOLLE, P. *A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2010.

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.

CHANDEL, S. S.; NAIK, M. N.; CHANDEL, R. *Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v 76, p. 163 – 175, 2017.

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

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito. SUNDATA. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php> Acesso em: 21 de Janeiro, 2022.

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.

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

DIKE, V.N.; CHINEKE, T.C., NWOFOR, O.K.; OKORO, U.K. *Optimal angles for harvesting solar electricity in some African cities*. *Renewable Energy, Brighton*, v. 39, p. 433-439, 2012.

ELEKTSOLAR. *Energia solar fotovoltaica: Vantagens e Desvantagens*. Disponível em: <https://eleksolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-vantagens-e-desvantagens/>. Acesso em: 14 jul 2018.

EPE. Energia renováveis Disponível em <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>. Acesso 25 abr. 2022.

FAO, GIZ 2018 Final report: International workshop on Prospects for solar-powered irrigation system (SPIS) in developing countries. (Rome: Food and Agriculture of United Nations Organization).

FOSTER, R.; MAJID, G.; COTA, A. A testbook of solar energy. *Renew Energy Environ.* 2014. Disponível em www.amazon.com/Solar-Energy-Renewable-Environment>. Acesso em: 22 ago. 2020.

FRANCISCO, P. R. M.; CARDOSO, A.; SILVA, J. V. N. Tecnologias sociais para o desenvolvimento do semiárido: pedagogia de assessoria técnica social e ambiental. *Polêmica*, v. 15, n. 1, p. 28 a 38, 2015.

FRAUNHOFER Institute for solar energy system – ISE. *Photovoltaics Report*. 2016. Disponível em: www.ise.fraunhofer.de>. Acessado em: 11 fev. 2022.

FRIZZONE, J. A.; FRETAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. *Microirrigação: gotejamento e microaspersão*. 1 ed. Maringá: EDUEM, 2012.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H. G. PRODEEM - O Programa Nacional de Eletrificação Rural Baseado em Energia Solar Fotovoltaica. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia-CBE*. 2002.

GALDINO, M. et al. O contexto das energias renováveis no Brasil. *Revista da Direng*, 2000. Disponível em www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2014.

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

GARCIA, A. M.; PEREA, R. G.; POYATO, E. C.; BARRIOS, P. M.; DÍAZ J. A. R. Comprehensive sizing methodology of smart photovoltaic irrigation systems. *Agricultural Water Management*. v. 229, 2020.

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

HAUPENTHAL, S. W.; VILAS BOAS, M. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; TOKURA, L. K.; NASCIMENTO, L. F. J. *Statistical quality control to emission uniformity in micro sprinkler with autonomous photovoltaic pumping*. **Research, Society and Development**. v. 10, n. 11, p. 1 – 12, 2021

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

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

INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANA (IAPAR). *Atlas climático do estado do Paraná*, Londrina, 2019, 210p.

IBGE. *Estatísticas do Século XX*. Rio de Janeiro: IBGE, 2006, 577p.

IDCOL. (2015). *IDCOL Solar Irrigation Projects*. Retrieved. Disponível em: <<http://www.icimod.org/resource/17186>>. Acesso: 10.maio.2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Snapshot of global photovoltaic markets*. Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2017. Disponível em: <<http://www.ieapvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS- A Snapshot of Global PV-1992-2017.pdf>>. Acesso em: 5 jul.2018.

IEA. *ELECTRICITY INFORMATION: OVERVIEW (2017 edition)* França, 2018. International Energy Agency – IEA. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>>. Acesso: 5 jul. 2018.

IRENA, 2018. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JAVOID, A. *Effects of bio-fertilizers combined with different soil amendments on potted rice plants*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, v. 71, n. 1, p. 157-163, 2011.

JUCHEN, C. R.; SUSZEK, F. L.; VILAS BOAS, M.A. *Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais*. *Irriga*, v. 18, n. 2, p. 243, 2018.

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

KAZEM, H. A. et al. *Design, measurement and evaluation of photovoltaic pumping system for rural areas in Oman. Environment, Development and Sustainability*, v. 19, n. 3, p. 1041-1053, 2017.

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

KULKARNI, D. MAHARASHTRA. *Government plans to give 5 lakh solar pumps to farmers. dna Analysis. Retrieved June 9, 2015. Disponível em: <<http://www.dnaindia.com/mumbai/report-maharashtra-government-plansto-give-5-lakh-solar-pumps-to-farmers-2049952>. >Acesso em: 05.maio. 2018.*

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

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

LI, G. et al. *Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 440-458, 2017.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELLO, J. M.; JUAN, J. A.; BALLESTEROS R.; DOMÍNGUEZ A. *Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. Agricultural Water Management.* v. 98, p. 190-198, 2010.

MAGALHÃES, G. E. *Bombeamento de Água Utilizando Sistema Fotovoltaico Autônomo: Um Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – UFMT, Cuiabá-MT, 2016.*

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

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

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (MME). *Manual de Tarifação da Energia Elétrica: agosto/2011. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2018.*

MOHAMED, A. Z.; PETERS, R. T.; ZHU, X.; SARWARA, A. *Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. Agricultural Water Management, v. 213, p. 1078-1083, 2019.*

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria LIMA DE F.; VERA R. L. F. e F. S.; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – 4 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513p.*

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade. Rio de Janeiro, LTC, 7ª ed., 2017.*

MORAES, MARIA J.; FILHO, D. O.; MANTOVANI, E. C.; MONTEIRO, P. M. B.; MENDES, A. L. C.; DAMIÃO, J. H. A. C. *Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014.*

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

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

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

PAZUCH, F. A. *Desenvolvimento, construção e validação de um pivô central experimental. Tese (Pós-Graduação Stricto Sensu). Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, 2021.*

PERIASAMY, P.; JAIN, N. K.; SINGH, I. P. A review on development of photovoltaic water pumping system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 918-925, 2015.

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

RECA, J.; TORRENTE, C.; LÓPEZ-LUQUE, R.; MARTÍNEZ, J. Feasibility analysis of stand alone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renew Energy* 2016; 85:1143–54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.056>

REN21, “Renewable 2017 – Global Status Report”, 2017 Disponível em < http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf >. Acesso em maio 2018.

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

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

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

SANTOS, D. B.; PEÃO, D. B. M. A; FERREIRA, E. R. *Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede: Estudo de Viabilidade Econômica na Utilização em um Site de Telecomunicações. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações) – IFF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2017.*

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

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

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; VILAS BOAS, M. A. *Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e*

não compensantes em diferentes alturas. Irriga, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 631 – 647, 2016.

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

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A. G. Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil: Condicionantes e impactos. EPE, v.2, n.3, 2014. <http://www.epe.gov.br>. 02 Out. 2018.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. D. S.; PAVANI, L. C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. Engenharia Agrícola, v. 29, p. 311-320, 2009.

UNIVERSIDADE DE MINNESOTA. Interpretação do Coeficiente de Uniformidade. Acesso em: Abril de 2021. Disponível em: extension.umn.edu.

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

VARELLA, F. K. de O. Estimativa do Índice de Nacionalização dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil. 2009. 148 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/263003/1/Varella_FabianaKarladeOliveiraMartins_D.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2018.

VILAS BOAS, M. A. Fundamentos de irrigação localizada. Cascavel: Edunioeste, 2016.

WIDIASTUTI, I.; WIJAYANTO, D. (). Developing a Hybrid Solar/Wind Powered Drip Irrigation System for Dragon Fruit Yield. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. v. 180, 2017.

YU, Y.; LIU, J.; WANG, G.; LIU, M. Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. Appl Energy. v. 88, p. 3176–82, 2011.

ZOCOLER, JO. L. et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. IRRIGA, v. 1, n. 1, p. 234, 2015.