

Microgeração de sistemas fotovoltaicos para aeração e oxigenação em fazenda de camarão de cativeiro de água doce na região semiárida

Microgeneration of photovoltaic systems for aeration and oxygenation in a freshwater captive shrimp farm in the semi-arid region

Microgeneración de sistemas fotovoltaicos para aireación y oxigenación en una granja de camarón en cautiverio de agua dulce en la región semiárida

Recebido: 19/03/2024 | Revisado: 05/04/2024 | Aceitado: 06/04/2024 | Publicado: 09/04/2024

Mayara Oliveira Fonseca

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9288-0386>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: mayara10fonseca@gmail.com

Elissandro Monteiro do Sacramento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-7224>
Instituto Federal do Ceará, Brasil
E-mail: elissandro.monteiro@ifce.edu.br

Natasha Esteves Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9172-5098>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: estevesnatasha@gmail.com

Lutero Carmo de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7313-729X>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: luterodelima@gmail.com

Brendo Rodrigues Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4916-6529>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: brendo.rodrigues30@gmail.com

Merivaldo de Freitas Brito

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9885-3783>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: merivaldo@mbritto.com.br

Renata de Oliveira Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6967-2604>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: renatarivera597@gmail.com

Resumo

O presente trabalho apresenta uma análise sobre a importância e desempenho de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados à rede elétrica em uma fazenda de camarão de água doce localizada no interior do Ceará. A carcinicultura está em expansão no semiárido e uma das formas de tornar o negócio sustentável é investir em fontes de energia renováveis, especialmente a solar, devido aos seus benefícios ambientais e econômicos, uma vez que a região de análise apresenta condições favoráveis para a geração de energia solar e eólica. O objetivo do trabalho é fazer um estudo de análise de desempenho de uma microgeração fotovoltaica conectada à rede com potência de 42,88 kWp, instalado no interior de Russas-CE. Para esse estudo é realizado análises de produção que incluem geração de energia, produtividade, perdas do sistema, taxa de desempenho e fator de capacidade, baseados nas medidas elétricas geradas pelo aplicativo do inversor e dados meteorológicos fornecidos pela FUNCEME (2023). Os resultados indicam que a produção de energia é significativamente influenciada pela irradiação solar e temperatura ambiente, sendo os meses de agosto, setembro e outubro os mais produtivos. A produtividade do sistema FV é analisada em comparação com a irradiação de referência, mostrando variações ao longo dos meses. Além disso, são discutidas as perdas do sistema e sua influência na taxa de desempenho, sendo sugeridas medidas para melhorar a eficiência do sistema. Por fim, o estudo destaca a viabilidade e eficiência do sistema FV analisado, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica; Geração de energia; Análise de desempenho; Sustentabilidade; Produção de camarão.

Abstract

This work presents an analysis of the importance and performance of photovoltaic systems (PV) connected to the electrical grid in a freshwater shrimp farm located in the interior of Ceará. Shrimp farming is expanding in the semi-

arid region and one of the ways to make the business sustainable is to invest in renewable energy sources, especially solar, due to its environmental and economic benefits, since the region under analysis presents favorable conditions for the generation of solar and wind energy. The objective of the work is to carry out a performance analysis study of a photovoltaic microgeneration connected to the grid with a power of 42.88 kWp, installed in the interior of Russas-CE. For this study, production analyzes are carried out including energy generation, productivity, system losses, performance rate and capacity factor, based on electrical measurements generated by the inverter application and meteorological data provided by FUNCEME (2023). The results indicate that energy production is significantly influenced by solar irradiation and ambient temperature, with the months of August, September and October being the most productive. The productivity of the systems PV is analyzed in comparison with the reference irradiation, showing variations over the months. Furthermore, system losses and their influence on the performance rate are discussed, and measures to improve system efficiency are suggested. Finally, the study highlights the viability and efficiency of the analyzed systems PV, contributing to the sustainable development of the region.

Keywords: Photovoltaic solar energy; Power generation; Performance analysis; Sustainability; Production of shrimp.

Resumen

Este trabajo presenta un análisis de la importancia y desempeño de los sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red eléctrica en una granja camaronera de agua dulce ubicada en el interior de Ceará. El cultivo de camarón se está expandiendo en la región semiárida y una de las formas de hacer sustentable el negocio es invertir en fuentes de energía renovables, especialmente solar, por sus beneficios ambientales y económicos, ya que la región bajo análisis presenta condiciones favorables para la generación de energía solar y eólica. El objetivo del trabajo es realizar un estudio de análisis del rendimiento de una microgeneración fotovoltaica conectada a red con una potencia de 42,88 kWp, instalada en el interior de Russas-CE. Para este estudio se realizan análisis de producción incluyendo generación de energía, productividad, pérdidas del sistema, tasa de rendimiento y factor de capacidad, con base en mediciones eléctricas generadas por la aplicación inversora y datos meteorológicos proporcionados por FUNCEME (2023). Los resultados indican que la producción de energía está influenciada significativamente por la irradiación solar y la temperatura ambiente, siendo los meses de agosto, septiembre y octubre los más productivos. Se analiza la productividad del sistemas FV comparándola con la irradiación de referencia, mostrando variaciones a lo largo de los meses. Además, se analizan las pérdidas del sistema y su influencia en la tasa de rendimiento y se sugieren medidas para mejorar la eficiencia del sistema. Finalmente, el estudio destaca la viabilidad y eficiencia del sistemas FV analizado, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica; Generación de energía; Análisis de rendimiento; Sostenibilidad; Producción de camarón.

1. Introdução

A eletricidade é essencial para a vida moderna, sendo indispensável em diversos setores como transporte, alimentos e industriais. O fornecimento de eletricidade vem se destacando como um dos principais objetivos dos governos (Lima et al., 2017). A solução é investir em novas fontes de energia, de preferência renováveis, pois são inesgotáveis ou repostas rapidamente pela natureza, sustentáveis e minimizam os danos ao meio ambiente.

O investimento em fontes renováveis é visto como medida de ampliação da matriz energética. Assim, a energia solar tem se tornado um pilar na transição para energias renováveis (Akpahou et al., 2023), devido aos baixos custos de manutenção (Amir et al., 2022), além do aproveitamento de espaços como telhados e coberturas, e pequenos terrenos. A cada ano, a energia solar fotovoltaica vem se consolidando como uma das principais fontes na matriz energética brasileira. Dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) indicam que já existem mais de 2,1 milhões de instalações de geração distribuída (GD). Conforme dados da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), a microgeração e minigeração distribuída (MMGD) contribui com cerca de 11% da matriz energética e, segundo projeções, essa porcentagem tende a crescer até 2027.

O Nordeste do Brasil apresenta bons níveis de irradiação e vento; logo, a inserção de energias renováveis como solar e eólica vem crescendo na região semiárida e promove o desenvolvimento socioeconômico na região. O Nordeste também apresenta condições naturais propícias para o cultivo de camarão. Diante deste cenário, os estados do Rio Grande do Norte e do Ceará são os dois estados que mais se destacam na produção de camarão de cativeiro.

Os custos com eletricidade estão no top três dos gastos totais na produção. Para sistemas semi-intensivos, são utilizados pelo menos dois aeradores de pás por viveiro, que têm a função de manter os níveis de oxigênio dissolvidos, especialmente no

período noturno. A fim de promover a segurança alimentar, os produtores vêm utilizando sistemas FV visando reduzir os custos e agregar valor ao produto.

A adesão de sistemas solares vem crescendo devido à redução de custos de equipamentos, confiabilidade e desenvolvimento de tecnologia que visa o aumento da vida útil do sistema. Esse cenário é possível devido a estudos e pesquisas que visam um melhor desempenho e aproveitamento energético, uma vez que se torna possível encontrar eventuais falhas e proporcionar aos usuários incremento na eficiência, ganhos técnicos e retorno financeiro mais rápidos.

Os indicadores de desempenho são utilizados como diagnósticos que usam a eficiência de conversão de energia (Kroth, 2020). No setor fotovoltaico, os índices analisados foram propostos pelo Programa de Sistema FV da Agência Internacional de Energia (IEA - PVPS), que avaliam perdas, eficiências, taxa de desempenho, rendimentos e fator de capacidade (Bracco et al., 2018; Markovic et al., 2017).

Diante deste cenário, justifica-se pesquisas sobre essas análises uma vez que o conhecimento auxilia no desenvolvimento de estratégias que visam tornar o setor fotovoltaico mais eficiente. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de um Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) de 42,88 kWp utilizado para o cultivo de camarão de água doce localizado no interior do Ceará. Além disso, busca-se fazer um acompanhamento da geração, analisar eventuais problemas e fatores técnicos que influenciam na performance.

2. Referencial Teórico

2.1 Classificação dos sistemas fotovoltaicos

Para cada local, um tipo de sistema será utilizado conforme necessidade, sendo as três configurações mais utilizadas para sistemas fotovoltaicos: Sistema off-grid, que é autônomo, on-grid, que se conecta à rede elétrica, e os sistemas híbridos, que utilizam mais de uma fonte de geração.

- Sistema off-grid: é composto por módulos, controladores de carga e baterias. A vantagem é que o sistema pode ser utilizado em locais distantes e isolados, como em zonas rurais ou áreas remotas (Uchiyama, 2009), e a desvantagem é o custo mais elevado.
- Sistema on-grid: Conectado à rede elétrica, podendo estar próximo ou longe do consumidor, o arranjo é composto por módulos que geram a eletricidade e inversor que converte a corrente em alternada (CA). A principal vantagem é a redução de custos, já que toda a energia produzida é entregue à rede elétrica (Nascimento, 2013).
- Sistemas híbridos: É um sistema composto por duas ou mais fontes para a geração elétrica, sendo muito utilizado em locais onde as concessionárias de eletricidade não chegam, ou em aplicações prioritárias como telecomunicações, irrigação, dessalinização e tratamento de água.

2.2 Curvas Características das células fotovoltaicas

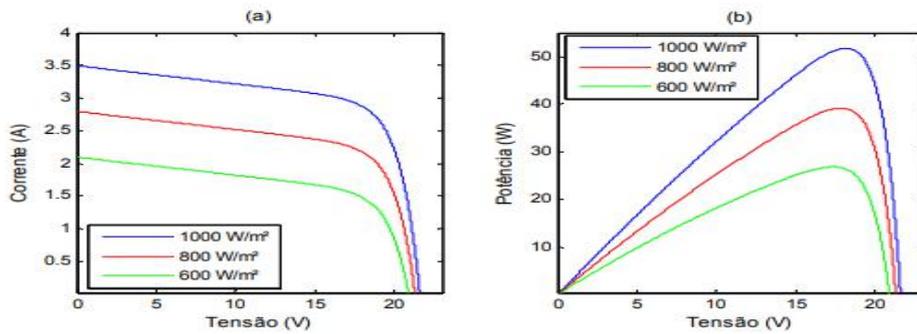
2.2.1 Curva corrente versus tensão: I x V

A curva I x V é amplamente utilizada para avaliar os módulos fotovoltaicos, permitindo verificar a potência gerada. Cada painel possui suas próprias características, que podem ser verificadas no datasheet fornecido por cada fabricante. Para análises das características elétricas, utiliza-se a curva I x V, que será específica para cada módulo, sob análises de condições padrão definidas pela norma E-1036, que estabelece a Irradiância de 1000 W/m² (ao meio-dia), temperatura de 25°C e massa de ar 1.5 (Seguel, 2009).

2.2.2 Efeito produzido pela irradiação

Ao longo do dia, a irradiação solar sofre alterações. A corrente elétrica varia linearmente com a irradiação solar (Alvarenga, 2014), pois a corrente gerada é proporcional ao fluxo de fótons incidentes, logo, se a radiação diminui, a corrente também diminui. A tensão do circuito não sofre muita influência, exceto se a radiação cair significativamente devido à cobertura de nuvens. Como a potência máxima depende da corrente e da tensão, sofrerá alterações conforme os níveis de irradiação. A Figura 1 ilustra a característica elétrica para diferentes níveis de irradiação em que a corrente e potência sofrem variações mais acentuadas quando comparadas à tensão.

Figura 1 - Curvas características de um módulo fotovoltaico para diferentes níveis de radiação, e mesma temperatura. (a) Curva I -V (b) Curva P - V.

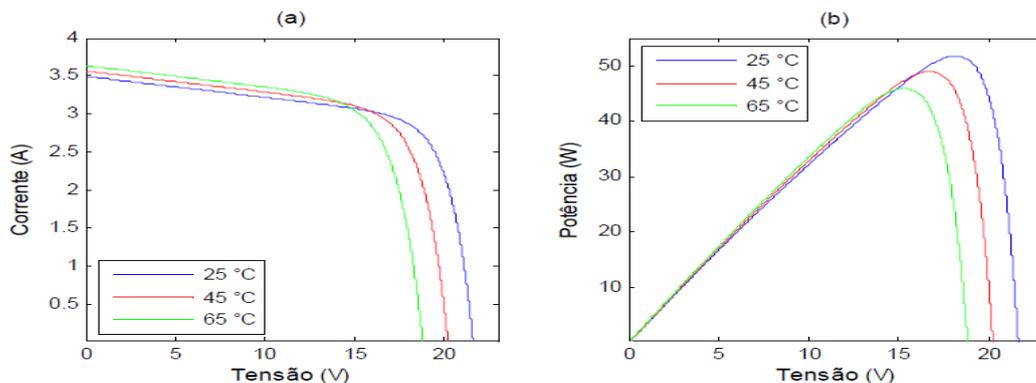


Fonte: Seguel (2009, p. 18).

2.2.3 Efeito produzido pela Temperatura

Em contraste com o efeito da radiação, se a temperatura aumenta, há um pequeno aumento na corrente de curto-circuito, mas seus efeitos serão significativos na tensão de circuito aberto, que diminuirá devido à redução na mobilidade dos elétrons causada pelo excesso de temperatura. Segundo Alvarenga (2014), a redução de tensão é cerca de 0,37% a cada grau de aumento de temperatura, e a redução da máxima potência será em torno de 0,45% a cada grau de aumento de temperatura. A Figura 2 ilustra (a) a diminuição significativa de tensão enquanto a corrente sofre pouca variação e (b) a queda de potência devido ao aumento de temperatura.

Figura 2 – Curvas características de um módulo fotovoltaico para várias temperaturas, e mesma radiação. (a) Curva I -V (b) Curva P - V.

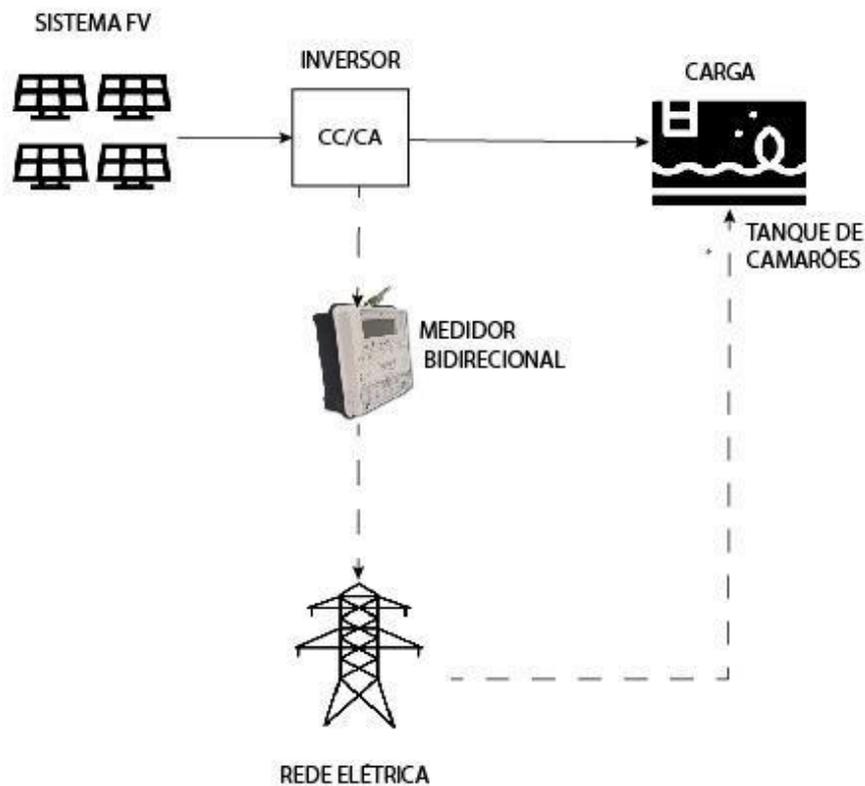


Fonte: Seguel (2009, p. 18).

3. Metodologia

O sistema objeto deste estudo é composto por 128 módulos de 335 Wp, ocupando uma área de 273,2 m², com potência instalada de 42,88 kWp. Esta microgeração é utilizada em uma fazenda de camarão em cativeiro de água doce, cuja finalidade principal é aeração, oxigenação e bombeamento de água nos tanques. A Figura 3 mostra o esquema básico que é utilizado na fazenda. O sistema FV é utilizado para gerar energia em corrente contínua (CC), e o inversor que transforma em corrente alternada (CA), essa energia é utilizada na carga (tanques de camarão) e quando a geração é superior a carga o excedente é injetado na rede elétrica.

Figura 3 - Esquema básico do sistema FV.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As tabelas 1 e 2 detalham as especificações técnicas dos módulos (Módulo Renovigi / RENO-335P, 2023) e do inversor (Inversor RENO – 40K – NG, 2023) utilizado no projeto de microgeração do estudo de caso.

Tabela 1 – Especificações dos módulos FV.

Potência Nominal (Wp)	Tensão de Operação (VDC)	Corrente Nominal (A)	Eficiência (%)	Temperatura de Operação	Área Bruta (m ²)	Fabricante/ Modelo
335	37,83	8,87	17,3	-40°C a + 85°C	1,94	Renovigi / RENO-335P

Fonte: Estas informações são fornecidas pelo fabricante Renovigi, referentes ao modelo RENO-335P.

Tabela 2 - Especificações do inversor.

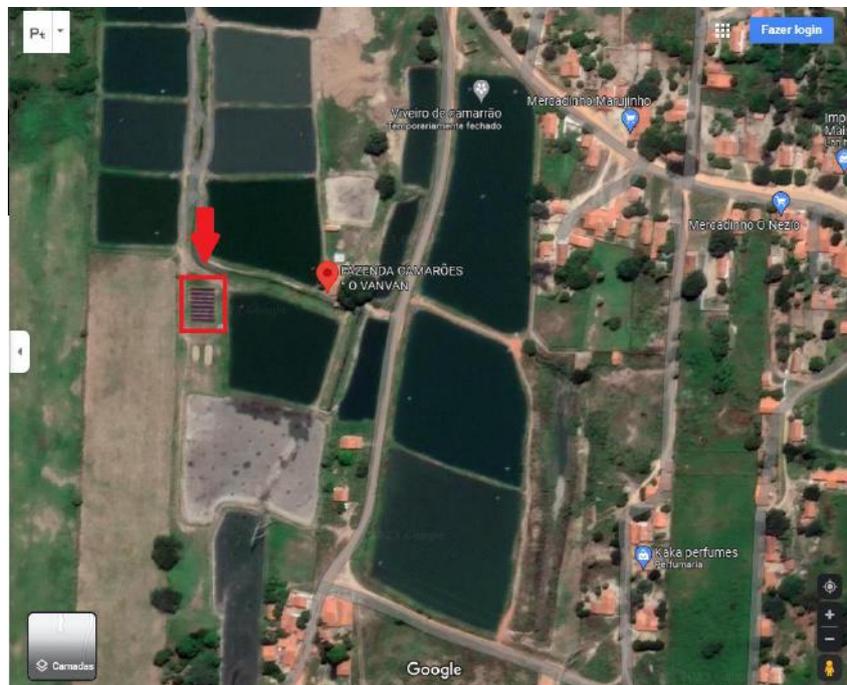
Potência Nominal de Saída (W)	Faixa de Tensão de Operação por fase (V)	Máxima Corrente de Saída (A)	Eficiência (%)	Temperatura ambiente	Grau de proteção	Resfriamento	Comunicação	Fabricante/ Modelo
40.000	176 - 242	60,9	98,8	-25°C a + 60°C	IP65	Convecção natural	WiFi Plug II	Renovigi / RENO – 40K – NG

Fonte Estas informações são fornecidas pelo fabricante Renovigi, referentes ao modelo RENO-40K-NG.

O inversor possui quatro MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) e cada MPPT permite a conexão de 2 MPPT, logo, os 128 módulos são divididos em 8 *strings*.

Para a pesquisa, foram utilizados dados da Plataforma de Coleta de Dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), que estão equipadas com sensores meteorológicos que medem temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, e pluviometria. O piranômetro usado nas PCDs da FUNCEME (2023) é do tipo SP-LITE, que mede a radiação global no plano horizontal através de um detector de fotodiodo. Os valores de saída deste aparelho são expressos em Watts por metro quadrado (W/m²). A Figura 4 mostra o sistema objeto de estudo do trabalho que está situado no interior da cidade de Russas, estado do Ceará, localizado nas coordenadas geográficas 4°58'23" de Latitude Sul (S) e 37°55'47" de Longitude Oeste (W), tendo uma altitude de 20 metros acima do nível do mar. Para obter melhores índices de geração, os módulos foram instalados com um ângulo de inclinação de 10° e ângulo de azimute de 0°.

Figura 4 - Imagem de satélite do local de estudo.



Fonte: Google Earth.

3.1 Método

Existem diversas formas de avaliar o desempenho de um sistema solar. Este trabalho tomará como referência o padrão IEC 61724:1998, que faz o monitoramento do desempenho do sistema FV – Diretrizes para medição, troca de dados e análise, e a norma ABNT NBR 16274/2014, que é a norma para sistemas FV conectados à rede. Para o presente estudo, será utilizado apenas o requisito de avaliação de desempenho.

Para esse estudo, será feita uma análise do período de maio a dezembro de 2022 e serão avaliados os seguintes parâmetros: entrada e saída de energia, índice de desempenho, produtividade e fator capacidade (FC). Alguns desses parâmetros necessitam de dados precisos de radiação que foram obtidos via e-mail com as informações da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da FUNCEME (2023). A PCD disponibiliza dados de irradiação, temperatura máxima e mínima e precipitação para os meses estudados.

3.1.2 Geração de energia

Segundo Lima (2017), a energia total é definida como a quantidade de energia CA gerada pelo sistema durante um período.

A energia total horária é definida como:

$$E_{CA,h} = \sum_{t=1}^{60} E_{CA,t} \quad (1)$$

A energia diária é definida como:

$$E_{CA,d} = \sum_{h=1}^{24} E_{CA,h} \quad (2)$$

A energia mensal é definida como:

$$E_{CA,m} = \sum_{d=1}^N E_{CA,d} \quad (3)$$

Onde:

- $E_{CA,t}$ é energia total CA no tempo t (em minutos);
- $E_{CA,h}$ é energia total CA horária (em horas);
- $E_{CA,d}$ é energia total CA diária;
- $E_{CA,m}$ é energia total CA mensal;
- N é o número de dias no mês.

3.1.3 Produtividade

É representado pela letra Y e pode ser classificado em três tipos que são: a produtividade de referência (YR), a produtividade do arranjo FV (Y_{FV}) e a produtividade final (YF). Com efeito, esses índices são muito citados na literatura uma vez que permitem fazer a comparação de diferentes sistemas fotovoltaicos, diferentes potências nominais e situados em localizações distintas (Junior, 2014).

A **produtividade do arranjo** Y_{FV} é expressa em kWh/kWp, é definido como a razão da saída de energia de CC produzida por um determinado período pela potência nominal do sistema FV (Lima et al., 2017), (Adoramola et al., 2015).

$$Y_{FV} = \frac{E_{CC}}{P_{FV}} (KWh/kWp) \quad (4)$$

P_{FV} é a potência nominal do FV.

Segundo Elhadj Sidi et al., a equação 4 é usada para indicar o tempo que o arranjo fotovoltaico deve estar operando com sua potência nominal para gerar a energia produzida em CC.

A **produtividade final** é definida como a energia em CA total produzida pelo sistema pela razão nominal do sistema do gerador (Lima et al., 2017), sendo representada pela equação abaixo.

$$Y_F = \frac{E_{CA}}{P_{FV}} (KWh/kWp) \quad (5)$$

A equação 5 é utilizada como indicativo da quantidade de horas por dia que o sistema deve operar em sua potência nominal para produzir a energia registrada (Sharma et al., 2013).

A **produtividade de referência** Y_R é definido com a irradiação total no plano ou a insolação global no plano horizontal, dividida pela irradiância de referência 1000 W/m^2 (Cassares, 2016), em condições padrões de teste STC, do ingles *Standart Test Conditions*.

$$Y_R = \frac{H_T}{H_R} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{kWp}} \cdot \text{dia} \right) \quad (6)$$

Onde:

- H_T é a irradiação total ou a irradiação horizontal global no plano;
- H_R é a irradiação de referência.

A Equação 6 é a medida da energia teórica disponível, sendo função da localização e orientação do sistema local durante um período de tempo específico (Cassares, 2016).

3.1.4 Perdas de energia

As perdas da Matriz, ou perdas de captação do arranjo Fotovoltaico (L_{FV}) são perdas de operação e incapacidade da matriz de utilizar toda a irradiação disponível (Wittkopf et al., 2012). A perda da matriz é definida como a diferença do rendimento de referência Y_R e do rendimento final Y_F .

$$L_{FV} = Y_R - Y_F \quad (7)$$

Tem-se também as perdas L_S que são perdas do sistema FV e são relacionados a conservação de energia de saída CC (saída do sistema) para energia CA realizada pelo inversor para ser injetada na rede. Para o cálculo, utiliza-se a diferença do rendimento do arranjo Y_{FV} e o rendimento final Y_F .

$$L_S = Y_{FV} - Y_F \quad (8)$$

3.1.5 Taxa de desempenho

Segundo Padmavathi (2013) a taxa de desempenho, ou *Performance Ratio* (PR) pode ser descrita como uma medida de qualidade de uma instalação não estando diretamente relacionado a localização, ângulo de inclinação, orientação e da capacidade nominal de potência do sistema. O PR é uma grandeza adimensional que aponta o rendimento em condições ideais, (Cassares, 2016), sendo essa taxa é utilizada para comparar a relação da saída energética real e teórica sem perdas.

Os fatores que estão associados a diminuição da taxa de desempenho são causados por perdas por efeito joule no inversor e nos módulos, sujeira, sombreamento, conexões entre os fios na instalação e falhas nos componentes (Cassares, 2016). Para o cálculo são utilizados o rendimento final e o rendimento de referência (Ozden et al., 2017), conforme equação abaixo.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (9)$$

3.1.6 Fator Capacidade (FC)

Segundo Elhadj (2016) esse fator serve como indicador do quantitativo de energia foi entregue para uma geração elétrica, sendo definido quanto a razão entre a energia CA produzida pelo sistema durante um tempo pela energia que deveria ter sido gerado de acordo com a sua potência nominal se o sistema operasse em sua plena capacidade. O FC é expresso em porcentagem e quanto mais próximo de 1 (100%) maior é a geração de energia (Croce et al., 2023). Esse fator varia significativamente pois depende do tipo de fonte primária e do tipo de sistema (Cassares, 2016), e pode ser calculado a partir da equação 9

$$FC = \frac{E_{CA}}{P_{FV} \times t} * 100 \quad (10)$$

Onde:

- FC : [%];
- E_{CA} : Energia gerada no período analisado;
- P_{FV} : Potência instalada;
- t : Intervalo de tempo considerado.

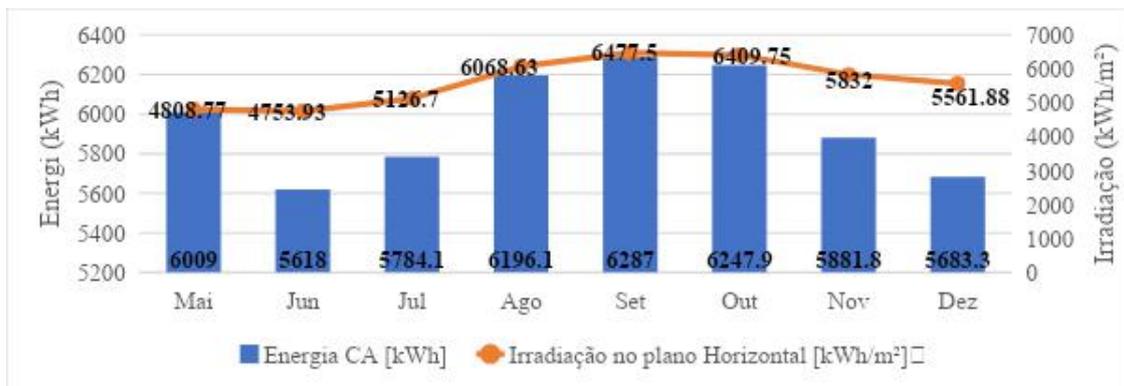
4. Resultados e Discussão

Nesta seção, os resultados serão apresentados mediante análise das medições do sistema FV obtidas pelo aplicativo disponibilizado pelo fabricante do inversor, juntamente com os dados da FUNCEME (2023), compreendidos no período de maio a dezembro de 2022. Esse período analisado foi aquele em que houve efetiva geração, e para os dados de irradiação, produção de energia e temperatura, foram excluídos os dados das 18 horas e das 5 horas de cada dia.

4.1 Análise da Geração de Energia e Irradiação e Temperatura

A geração de energia correlacionado à irradiação para o período analisado é apresentada na Figura 5. A produção de energia é disponibilizada pelo aplicativo Renogivi que permite o monitoramento em tempo real, em que os dados são exibidos por meio de gráficos.

Figura 5 – Geração de energia e Irradiação.

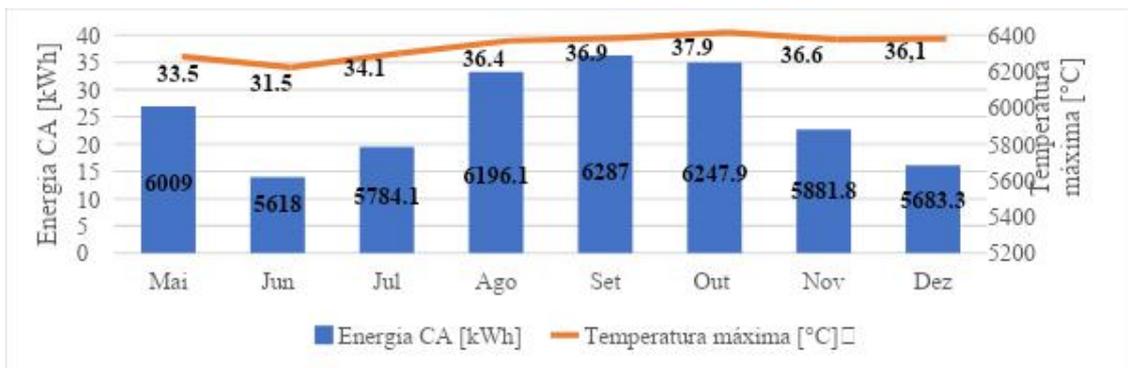


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A geração produzida pelo sistema no período analisado foi de 47,7 MW, com média mensal de 5.963,4 kWh. A Figura 5 mostra o perfil de geração (kWh) em função da irradiação (kWh/m²) para cada mês. As maiores produções de energia foram registradas nos meses de agosto, setembro e outubro, que coincidem com os meses de maiores radiações. Para o estado do Ceará, os meses de menor radiação ocorrem de dezembro a maio. Embora seja verão no hemisfério sul, esse período é caracterizado por maior interferência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), trazendo maiores índices de precipitação e nebulosidade.

A Figura 6 mostra a análise de geração de energia e a média de temperatura máxima ambiente em que o sistema FV está localizado.

Figura 6 – Geração de energia e Temperatura



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

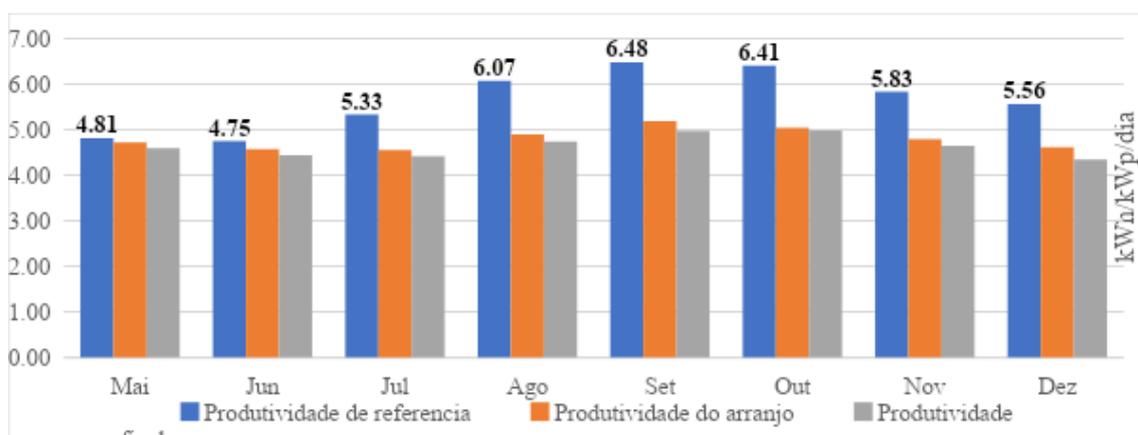
O segundo semestre é caracterizado pela diminuição de nebulosidade e precipitações (geralmente não registradas no período), causando aumento de temperatura e na taxa de evaporação. Outro fator considerável é que o sistema analisado está situado no interior do estado e não está localizado próximo ao litoral, e por isso a temperatura do ar tem registros mais elevados. A Figura 6 relaciona a geração (kWh) em função da temperatura ambiente (°C). Nas condições STC (Condições Padrões de Teste), a temperatura para melhor eficiência do módulo é de 25°C. A média de temperatura máxima do ambiente ficou em 35,4°C, sendo os meses de setembro e outubro com maiores registros.

Comparando os meses de setembro e junho, que registraram respectivamente maior e menor produção de energia, houve uma diferença de irradiação de mais de 25%, justificando uma perda de mais de 10% na geração de energia no mês de junho. Embora os registros de maiores temperaturas tenham ocorrido entre os meses de agosto a novembro, caracterizada pela baixa nebulosidade e permitindo maiores índices de irradiação, esta é a justificativa para as melhores produções de energia do sistema.

4.2 Análise de produtividade

Os rendimentos analisados para o sistema foram o de referência (R_R), do arranjo (R_{FV}) e final (R_F), além da taxa de desempenho observada para o período.

Figura 7 – Produtividades.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O rendimento de referência representa um número equivalente de horas de irradiação diária. A Figura 7 mostra a média diária para os meses de maio a dezembro. Os meses de maiores RR foram agosto, setembro e outubro, destacando-se setembro

com uma média diária de 6,48 kWh/m².dia, e o período com média de 5,70 kWh/m².dia. Em 2010, a FUNCEME (2023) disponibilizou dados solarimétricos e estimou que a irradiação solar anual no Nordeste pode chegar a 2500 horas.

A produtividade do arranjo obteve médias mensais bem próximas no período analisado, com média de 4,68 kWh/kWp.dia. No gráfico, ficou perceptível que a produtividade final ficou menor em todos os meses analisados, com média de 4,63 kWh/kWp.dia.

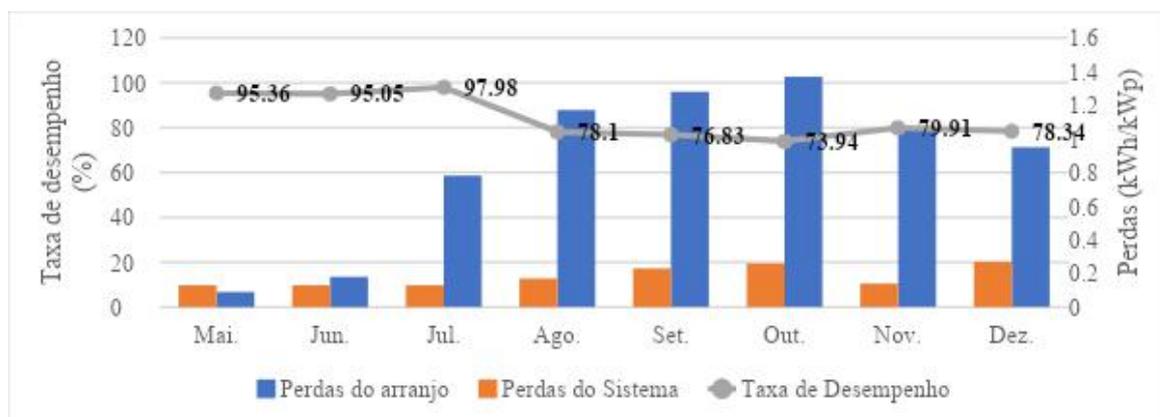
O *datalogger* do inversor registrou temperaturas próximas a 65°C no intervalo entre 11:00 e 14:00 horas, nos meses de agosto a outubro. Em condições de elevados níveis de irradiância, o inversor utiliza um mecanismo de segurança e limita a potência de entrada, reduzindo o aproveitamento da energia gerada pelo sistema (Almeida, Marcelo Pinho, 2012). Outro fator que justifica a alta temperatura é que o inversor fica em local fechado e isolado, sem refrigeração e ventilação. Como os meses de maio e junho são de menores irradiação e temperatura, existe pouca diferença nas produtividades quando comparados aos meses de agosto, setembro e outubro.

Fazendo um comparativo com o estudo de Morais (2017), que fez uma análise em um sistema com 5,2 kWp, com azimute 25° e inclinação de 8°, e tomando como referência o mês de setembro, em que se obteve os melhores índices nos dois trabalhos, o RR obteve um valor de 5,18 kWh/m².dia. A justificativa para essa diferença se dá devido à diferença dos níveis de irradiação e à perda por captação de irradiação devido à inclinação de 25° do ângulo azimute. Vale destacar que, conforme Pinho e Galdino (2014), para sistemas fixos e localizados ao sul, deve-se direcionar o sistema para um maior aproveitamento dos raios solares, a um ângulo de azimute 0°.

4.3 Análise da taxa de desempenho e perdas

A Figura 8 faz uma análise das perdas do arranjo associadas à captação da irradiância e as perdas do sistema associadas a, correlacionadas com a taxa de desempenho. As perdas do arranjo estão relacionadas à impossibilidade de utilizar toda a irradiância disponível. Como causa, pode-se citar a degradação dos módulos, sombras ou sujidades e particulados sobre os módulos. As perdas do sistema referem-se ao que não se aproveita na conversão da energia (CC para CA), sendo afetada pelo grau de rendimento de módulos e inversores, perdas por efeito Joule.

Figura 8 – Taxa de desempenho correlacionados com as perdas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As perdas do arranjo estão relacionadas à impossibilidade de utilizar toda a irradiância disponível. Como causa, pode-se citar a degradação dos módulos, sombras ou sujidades e particulados sobre os módulos. As perdas do sistema referem-se ao que não se aproveita na conversão da energia (CC para CA), sendo afetadas pelo grau de rendimento de módulos e inversores,

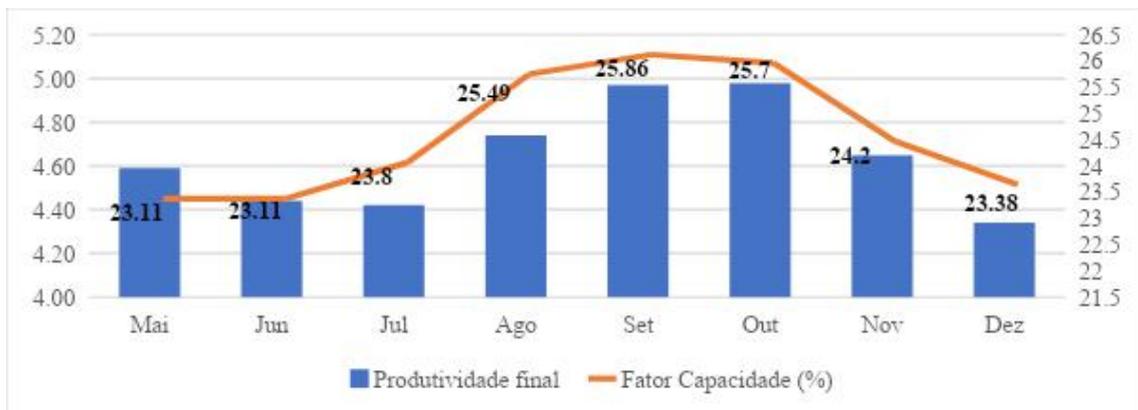
perdas por efeito Joule. As maiores perdas são registradas entre agosto a novembro devido à periodicidade de limpeza dos módulos, geralmente limpos uma vez por semana. Outro fator é que o inversor fica em um local fechado e sem sistema de resfriamento, e segundo informações do *datalogger*, nos horários mais quentes o inversor atinge temperaturas maiores que 65°C, justificando as perdas por efeito Joule.

A taxa de desempenho é utilizada para estimar o efeito global das perdas de potência do sistema, e sua importância dá-se devido à monitorização contínua ser útil para corrigir falhas no sistema, que podem ser causadas pela má operação do inversor, conexões, sombreamento, sujeira (Almeida, 2012). Conforme a figura, a variação oscilou entre 95,36% a 73,94%, sendo observadas as menores taxas de desempenho nos meses em que houve maiores perdas na produção de energia. De acordo com Khalid (2016), um sistema tem bom desempenho quando o indicador está acima de 80%, e para este estudo a média do período ficou em 84,4%. Nesse caso, uma medida para melhorar o desempenho do sistema é abrir correntes de ventilação no local em que o inversor é colocado para que o equipamento opere nas condições mais próximas expressas no *datasheet*.

4.4 Análise do FC correlacionado a produtividade de final

O FC expressa a relação entre a energia CA produzida em determinado tempo pela capacidade de potência nominal para um certo período. A Figura 9 faz uma correlação do FC e a produtividade, em que se observa que nos meses de maior produtividade são os meses em que o sistema apresenta melhores índices de FC.

Figura 9 – FC correlacionado a produtividade de Referência.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O FC médio mensal variou entre 23,11% e 25,7%. Esse índice faz uma estimativa da porcentagem média em que o sistema FV operou em plena capacidade. Em sistemas fotovoltaicos, o FC é relativamente baixo quando comparado às fontes eólica e hidráulica, sendo justificado pela sua intermitência, ou seja, só existe geração quando há sol. Segundo Almeida (2012), o FC da região Nordeste apresenta o melhor índice, com média anual de 18,1%. Portanto, o sistema estudado apresenta ótimos índices para o período analisado.

5. Considerações Finais

O uso de eletricidade na produção de camarão é indispensável, sendo muito utilizada para encher e manter os níveis de água, bem como na aeração e oxigenação, que são realizadas em aeradores diariamente entre 8 a 12 horas por dia no período noturno. A utilização da energia solar tem sido uma grande aliada na aquicultura, pois traz vantagens como autonomia na geração elétrica e mais sustentabilidade na atividade.

Este trabalho avaliou a produção de energia elétrica, análises de desempenho, produtividades, perdas do sistema e fator

de capacidade de um SFCR situado no interior de Russas-CE, com base nos dados de produção de energia por meio de aplicativos do inversor e dados fornecidos pela FUNCEME (2023), como Irradiância e Temperatura. O período analisado foi de maio a dezembro de 2022.

Para os meses de agosto, setembro e outubro, foi observado que houve as maiores produções de energia, o que pode ser verificado pelo fator de capacidade nesse período. Em contrapartida, foi o período em que ocorreram as maiores perdas de produção e menores índices de desempenho, que podem ser justificados pela periodicidade de limpeza dos módulos e pela alta temperatura do inversor no período de maiores índices de irradiação. Nos meses de maio e junho, o sistema produziu menor quantidade de energia, porém nesse período houve periodicidade de chuvas, os módulos ficaram limpos e o inversor não operou em temperaturas altíssimas.

É importante ressaltar que o desempenho de um sistema depende dos módulos, condições de radiação e temperatura do local a ser instalado, qualidade dos componentes e, como observado no estudo, o inversor deve estar em um local adequado, arejado, com circulação de ar para melhorar o desempenho e aproveitamento da energia gerada pelos módulos. Trabalhos que analisam o desempenho de sistemas são importantes para verificar a qualidade dos componentes, detecção de problemas operacionais e propor melhorias. Em um novo trabalho, poderão ser feitas melhorias no local do inversor, na periodicidade de limpeza e reproduzir o mesmo estudo no ano seguinte para comparar o desempenho do mesmo sistema.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo comparativo utilizando a mesma metodologia para sistemas instalados flutuantes em água e fazer uma análise de eficiência energética devido à redução de temperatura nos módulos.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas - MACFA da UECE. A FUNCAP pela bolsa de estudos do primeiro autor e a FUNCEME pelo envio de dados que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- Adaramola, M. S., & Vâgnes, E. E. (2015). Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 90, 458-465.
- Akpahou, R., Odoi-Yorke, F., & Osei, L. K. (2023). Techno-economic analysis of a utility-scale grid-tied solar photovoltaic system in Benin republic. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100633.
- Almeida, M. P. (2012). *Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Dissertação. (Programa de pós-graduação em energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p.171.*
- Alvarenga, C. A. (2014). *O módulo fotovoltaico para gerador solar de eletricidade*. Solenerg Engenharia e Comércio Ltda. Disponível em: [<https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2014/10/modulo-fotovoltaico-para-gerador-solar-de-eletricidade-solenerg-out14.pdf>].
- Amir, N., Errami, A., & Seung-Woo, L. (2022, October). Technical, Economical, Environmental feasibility of Solar PV System for Sustainable Shrimp Aquaculture: A Case Study of a Circular Shrimp Pond in Indonesia. In *2022 IEEE 8th Information Technology International Seminar (ITIS)* (pp. 102-107). IEEE.
- Bracco, S., Delfino, F., Foiadelli, F., & Longo, M. (2017, September). Smart microgrid monitoring: Evaluation of key performance indicators for a PV plant connected to a LV microgrid. In *2017 IEEE PES Innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
- Cassares, M. A. R. (2016). *Avaliação operacional de sistemas fotovoltaicos com seguimento solar: sistemas com e sem concentração*. Dissertação (Programa de Pós- Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo). São Paulo, p.162.
- Croce, L. F. et al. (2023). *Análise da atratividade da geração híbrida de energia elétrica de acordo com o atual cenário do mercado brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia - Universidade Federal de Itajubá). Itajubá, p. 137.
- Fonte: SEGUEL, Roberto. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. Érica, 2009, p. 18.
- Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME. (2023). Dados Meteorológicos da PCD FUNCEME/RUSSAS durante o ano de 2022.
- Inversor RENO – 40K – NG. (2023). Disponível em: [https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/reno-attachments/938bfa60-f2cc-4620-886d-cbea94aa36fb/e215d287-aa13-4af5-98c4-7623eac4ad55/3abd6ded-dc9c-4bfe-82fa-fb99b6ac84f3/Painel_335W_Renovigi.pdf?1602695433]. Acesso em 20 de novembro de 2023.

- Módulo Renovigi / RENO-335P. (2023). Disponível em: [https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/reno-attachments/938bfa60-f2cc-4620-886d-cbea94aa36fb/e215d287-aa13-4af5-98c4-7623eac4ad55/dfc97951-621e-4c0c-bf81-97984b3805a5/Cat%C3%A1logo_Reno-40K-NG.pdf?1595330779]. Acesso em 20 de novembro de 2023.
- Junior, J. U., Junior, E. F. C., & Tiepolo, G. M. (2014). Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR. In *Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*.
- Khalid, A. M., Mitra, I., Warmuth, W., & Schacht, V. (2016). Performance ratio—Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1139-1158.
- Kroth, G., & Rampinelli, G. A. (2020). Análise de indicadores de desempenho de um sistema fotovoltaico com distintos fatores de dimensionamento de inversor e diferentes ângulos azimutais. In *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*.
- Lima, L. C. et al. (2017). Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 37, 79–85.
- Markovic, M. L., & Ciric, R. M. (2017). Efficiency analysis of grid-connected photovoltaic power plants. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3(3), 269-277.
- MORAIS, F. (2017) *Análise de Desempenho de Um Sistema Fotovoltaico de 5, 2 Kw Conectado à Rede Instalado na Uece*, Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas –Universidade Estadual do Ceará). Fortaleza, p. 96.
- Nascimento, M. A. P. do. (2013). *Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica*. Dissertação (Departamento de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). Disponível em: [<https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/3207/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>]
- Ozden, T., Akinoglu, B. G., & Turan, R. (2017). Long term outdoor performances of three different on-grid PV arrays in central Anatolia—An extended analysis. *Renewable energy*, 101, 182-195.
- Padmavathi, K., & Daniel, S. A. (2013). Performance analysis of a 3 MWp grid connected solar photovoltaic power plant in India. *Energy for sustainable development*, 17(6), 615-625.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. (2a ed.), Cresesb.
- Seguel, J. I. L. (2009). *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais). 222.
- Sharma, V., & Chandel, S. S. (2013). Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy*, 55, 476-485.
- Sidi, C. E. B. E., Ndiaye, M. L., El Bah, M., Mbodji, A., Ndiaye, A., & Ndiaye, P. A. (2016). Performance analysis of the first large-scale (15 MWp) grid-connected photovoltaic plant in Mauritania. *Energy conversion and management*, 119, 411-421.
- Uchiyama, L. D. L. (2009). *Energia elétrica - impactos socioeconômicos e as condições das famílias do espaço rural de Manaus*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional -Universidade Federal do Amazonas). Manaus, p.58.
- Wittkopf, S., Valliappan, S., Liu, L., Ang, K. S., & Cheng, S. C. J. (2012). Analytical performance monitoring of a 142.5 kWp grid-connected rooftop BIPV system in Singapore. *Renewable Energy*, 47, 9-20.