

Bioclimatic pilot plant integrated: Energy performance analysis over a 2-year horizon

Planta piloto bioclimática integrada: Análise de desempenho energético em um horizonte de 2 anos

Article Info:

Article history: Received 2023-07-16 / Accepted 2023-08-03 / Available online 2023-08-03

doi: 10.18540/jcecv19iss6pp16302-01e



Douglas Lamas Dias

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1699-8601>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: douglaslamas@gmail.com

Giuliano Arns Rampielli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6034-046X>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: giulianorampinelli@gmail.com

Resumo

A energia solar fotovoltaica, é considerada uma das principais opções de investimento para os próximos anos, devido ao rápido desenvolvimento tecnológico, confiabilidade e competitividade econômica. No Brasil, em julho de 2023, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica nacional ultrapassou os 32 GW, ficando atrás apenas da energia hídrica. Para que esse crescimento continue, é necessário um investimento constante em pesquisa, a fim de analisar o desempenho dos sistemas solares e aprimorar sua utilização na sociedade. Nesse contexto, este trabalho apresenta a análise de desempenho energético de um sistema fotovoltaico, com potência instalada de 0,99 kWp, em um horizonte de 2 anos. O sistema fotovoltaico é conectado à rede e está integrado em uma planta piloto bioclimática localizada na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na cidade de Araranguá/SC. Os dados utilizados para o estudo abrangem o período de janeiro de 2021 a dezembro de 2022. Durante a análise de desempenho do sistema fotovoltaico, foram calculados indicadores como a produtividade do sistema (Y_F), a produtividade de referência (Y_R) e o razão de performance (P_R) do sistema, além da irradiação solar global do plano inclinado para os anos de 2021 e 2022, utilizando dados da plataforma do INMET. Os resultados mostraram que a produtividade do sistema em 2021 foi 5,1% maior do que a produtividade do sistema em 2022. Em relação à produtividade de referência, o maior valor foi alcançado em janeiro de 2022, com 190,19 kWh/kWp, enquanto em fevereiro de 2021 o valor máximo foi de 184,85 kWh/kWp. Por fim, a razão de performance em 2021 atingiu 89%, enquanto em 2022 foi de 85%. Para garantir o contínuo crescimento e aprimoramento do uso da energia solar, é fundamental investir em pesquisas e estudos para otimizar seu desempenho e contribuir para um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: Energia Renovável. Energia Solar Fotovoltaica. Planta Piloto Bioclimática. Produtividade do Sistema.

Abstract

Solar photovoltaic energy is considered one of the main investment options for the coming years, thanks to its rapid technological development, reliability, and economic competitiveness. In Brazil, as of July 2023, the installed capacity of solar photovoltaic energy in the national electricity grid surpassed 32 GW, trailing only hydropower. To ensure this growth continues, constant investment in research is necessary to analyze the performance of solar systems and improve their utilization in

society. In this context, this study presents an analysis of the energy performance of a photovoltaic system with an installed capacity of 0.99 kWp over a 2-year period. The photovoltaic system is grid-connected and integrated into a bioclimatic pilot plant located at the Federal University of Santa Catarina (UFSC) in the city of Araranguá/SC. The data used for the study cover the period from January 2021 to December 2022. During the analysis of the photovoltaic system's performance, indicators such as system productivity (YF), reference productivity (YR), and system performance ratio (PR) were calculated, along with the global solar irradiation on the inclined plane for the years 2021 and 2022, using data from the INMET platform. The results showed that the system's productivity in 2021 was 5.1% higher than in 2022. Concerning the reference productivity, the highest value was achieved in January 2022, at 190.19 kWh/kWp, while in February 2021, the maximum value was 184.85 kWh/kWp. Finally, the performance ratio in 2021 reached 89%, while in 2022, it was 85%. To ensure the continuous growth and improvement of solar energy utilization, it is essential to invest in research and studies to optimize its performance and contribute to a more sustainable future.

Keywords: Renewable Energy. Photovoltaic Solar Energy. Bioclimatic Pilot Plant. Yield Final.

1. Introdução

As fontes de energia renovável no Brasil estão sendo cada vez mais utilizadas, incluindo solar, eólica, biomassa, entre outras. Isso ocorre devido ao consenso mundial sobre a descarbonização da energia, uma vez que as energias fósseis amplamente utilizadas, como carvão e petróleo, produzem gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), que contribuem para o aquecimento global. Apenas em 2022, no Brasil, foram instalados 6.879,37 mega-watt (MW) de fontes renováveis no setor elétrico. Prevê-se que em 2023 serão instalados 9,27 giga-watt (GW) de fontes renováveis (ANEEL, 2023).

A análise da irradiação solar nas diferentes regiões do Brasil é fundamental para entender o potencial de aproveitamento da energia solar fotovoltaica em cada área. A região Nordeste possui uma irradiação global horizontal de 5,49 kilo-watt hora por metro ao quadrado (kWh/m²) e componente direta normal de 5,05 kWh/m², enquanto a região Sul apresenta uma irradiação menor, com 4,53 kWh/m² em irradiação global horizontal e 4,20 kWh/m² na componente direta normal. Em comparação, a região Nordeste supera países ibéricos em irradiação solar, enquanto a região Sul é semelhante a países europeus (Atlas brasileiro de energia solar, 2017).

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica alcançou mais de 32 GW de capacidade operacional em julho de 2023, representando 14,8% da Matriz Elétrica Nacional, ficando atrás apenas da energia hídrica. Dessas instalações, 70% correspondem à geração distribuída, em que os consumidores brasileiros podem gerar sua própria energia elétrica e até fornecer o excedente para a rede de distribuição local, enquanto 30% correspondem à geração centralizada, que são grandes usinas afastadas dos centros consumidores e conectadas através de linhas de transmissão (ABSOLAR, 2023).

E como forma de utilização de energia solar fotovoltaica, os edifícios bioclimáticos são uma solução, visto que o mundialmente os edifícios representam 30% do consumo final de energia e 26% relacionadas a emissão de energia com 18% desses relacionado a produção de eletricidade (IEA, 2023). Com essas plantas bioclimáticas é possível por meio de usos de materiais sustentáveis e do clima local, bem como a utilização de sistemas de energia menos emissores é possível reduzir os dados mencionados acima.

Diante do exposto, é possível constatar que esse crescimento possui uma tendência de aumento ainda maior. Com isso, surgirão mais estudos e desenvolvimentos de novas tecnologias, assim como estimativas de desempenho e eficiência, como demonstrado na revisão realizada.

Medrano *et al.* (2008) descrevem um edifício na Universidade de Lleida (Lleida, Espanha) com características bioclimáticas, bem como o cálculo anual de redução de consumo. Em relação

ao sistema de energia, foram utilizados 5 kilo-watt (kW) de painéis solares fotovoltaicos, para o consumo de energia do prédio, com produção anual máxima de 627,1kilo-watt hora por mês (kWh/mês) para o mês de maio e 213,6 para o mês de dezembro, com uma economia de 2,4 milhares de euros (kE) para o consumo de eletricidade anual.

Stasi *et al.* (2020) analisaram um edifício de energia quase zero, no sul da Itália. Com a utilização de um sistema solar fotovoltaico de silício monocristalino com uma potência de pico de 8 kilo-watt pico (kWp) instalados no telhado do edifício. O desempenho do sistema solar fotovoltaico produziu em seu total de energia anual 40,74 kWh/m², com 25,67 kWh/m² utilizada pelo edifício com o resto exportado para a rede.

Bosqued *et al.* (2006) apresentam 9 subprojetos de arquiteturas bioclimáticas na Espanha, com objetivo de designs sustentáveis e economias de energias. Para isso são usados métodos como estudos climáticos residenciais para que por meio de materiais corretos pode-se prevenir que a casa fique muito fria ou muito quente. Em relação a energia uso de painéis fotovoltaicos para o abastecimento residencial. De acordo, com modelos de simulações é possível uma economia de 80 a 90% de energia.

Kaliakatsos *et al.* (2022) fazem uma análise de um edifício bioclimático pelo software energy plus onde se analisa todas as características de edifícios como massa térmica, tipos de envidraçamento, etc., para a redução do consumo de energia pelo uso de persianas solares fotovoltaicas. Com a análise sendo realizada em Roma-Itália a persiana fotovoltaica para um inversor de 0,9 constatou uma energia elétrica total de 1.036 kilo-watt horas (kWh), com produção máximas mensais de 169 kWh e mínimas de 14,7 kWh.

HUI *et al.* (2011) descrevem como integrar telhados verde a sistemas fotovoltaicos e realiza uma análise no software Energy plus de um edifício em Hong Kong. Foram realizadas quatro simulações onde se analisou casos de sistemas fotovoltaicos, de telhados verdes e de sistemas integrados. Os sistemas fotovoltaicos estudados foram de 12 a 13% de eficiência. Comparando o consumo de energia anual percebeu-se um ganho de 118 giga-joule (GJ) de energia para os sistemas integrados do que o sistema fotovoltaico único, isso ocorre, pois os telhados verdes o consumo de energia dos edifícios. Em relação a desempenho mensal notou-se uma produção de eletricidade de 8,3% a mais para o sistema integrado em relação ao fotovoltaico

Akram *et al.* (2023) realizam um estudo de revisão de técnicas de economia de energia para edifícios de forma sustentável. As tecnologias revisadas foram janelas de vidro duplo, janelas resistentes a calor, integração de dispositivos fotovoltaicos semitransparentes e sistemas de iluminação natural e artificial. Considerando o sistema fotovoltaico tem como objetivo reduzir a penetração da radiação solar e gerar energia. Por trabalhar com ângulos altos de inclinação de fachada países do mediterrâneo estão crescendo o interesse devido seu baixo ângulo de azimute. Foi testado na universidade Norueguesa de Ciência e tecnologia, onde produziu 16 kWp e reduziu de 10 a 15% o consumo de energia para fins de resfriamento. Para um projeto em Nova York 2.730 módulos solares de silício amorfo integrados a um edifício e produziu no ano 240 mega-watt hora (MWh).

Abd-ur-Rehman *et al.* (2018) utilizam o software Visual DOE para a analisar a energia solar em edifícios residencial da Arábia Saudita na análise potencial de conservação de energia. Foi considerado para a simulação um sistema fotovoltaico conectado à rede de silício policristalino com eficiência de 16%. A simulação encontrada demonstra uma produção de eletricidade anual de 3.247 MWh com uma taxa de utilização de 13 anos.

Com base nisso, o objetivo deste trabalho é apresentar o desempenho de um sistema fotovoltaico real com capacidade de 0,99 kilo-watt pico (kWp), conectado à rede e instalado em uma arquitetura bioclimática. Serão analisados os dados do sistema referentes ao período de janeiro de 2021 a dezembro de 2022, utilizando indicadores de desempenho que abrangem tanto os dados reais quanto os dados de radiação fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2. Metodologia

O sistema fotovoltaico, estudado e analisado no âmbito deste trabalho, está conectado à rede e integrado em uma planta piloto bioclimática, conforme ilustrado na Figura 1. O sistema fotovoltaico está em operação desde dezembro de 2020 e está localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), unidade Mato Alto, na cidade de Araranguá-SC. A concessionária responsável é a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). O sistema é composto por 3 módulos fotovoltaicos, cada um com potência nominal de 330 watt-pico (Wp), totalizando uma potência nominal instalada de 0,99 kWp.

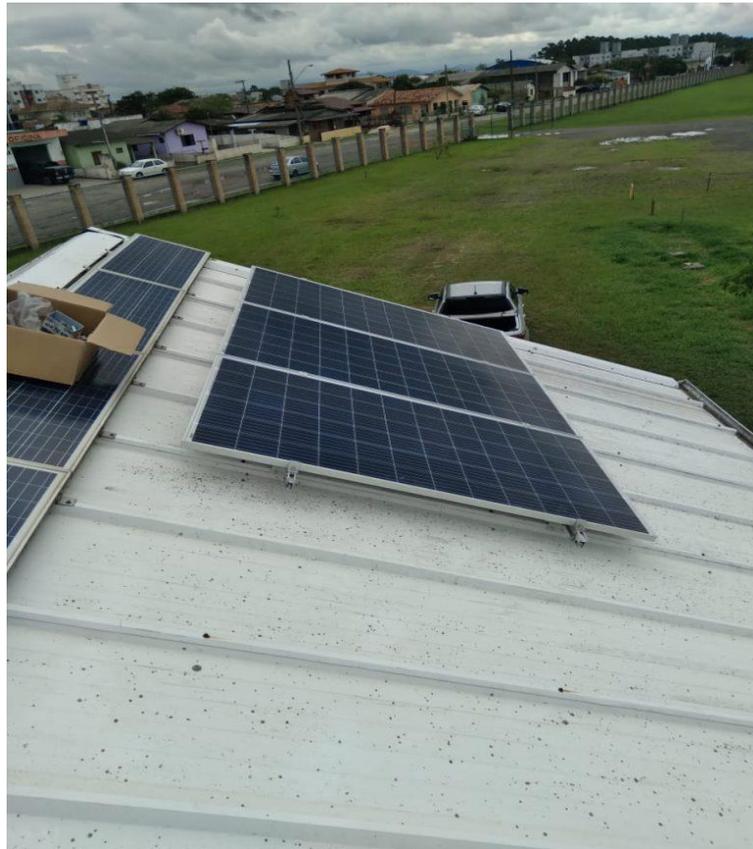


Figura 1 - Sistema Fotovoltaico Instalado na Planta Piloto Bioclimática.

Tabela 1: Características do Sistema da planta piloto.

Potência Instalada	0,99 kWp
Inclinação Sistema	20°
Arranjo Fotovoltaico	1 string e 3 Módulos
Orientação	0°
Fabricante	BYD
Modelo	330 PHK-36
Inversores	1
Fabricante	PHB Solar
Modelo	PHB 1500 NS
Potência Inversor	1,5 kW

2.1 Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho são frequentemente quantificados por meio da comparação entre a produção de energia do sistema real e uma produção de energia esperada ou modelada. Os índices escolhidos para análise do sistema são: produtividade do sistema (Y_F), produtividade de referência (Y_R) e índice de performance (P_R).

A produtividade do sistema (Y_F) é calculada dividindo-se a energia elétrica de corrente alternada (Energia CA) fornecida pelo inversor, em kWh, pela potência nominal (P_{nom}) instalada do sistema fotovoltaico, em kWp, durante o período de medição, conforme a Equação 1:

$$Y_F = \frac{\text{Energia CA}}{P_{nom}} \quad (1)$$

A produtividade de referência (Y_R) é calculada dividindo-se a irradiação solar no plano inclinado (H_I), em kWh/m², pela irradiação de referência (G_{ref}), em 1000 Watt por metro ao quadrado (W/m²), conforme a Equação 2:

$$Y_R = \frac{H_I}{G_{ref}} \quad (2)$$

O fator de capacidade (F_C) representa a razão entre a energia real entregue pelo sistema (Energia CA) e a energia que seria entregue caso se operasse na potência nominal de forma contínua, durante um período de trinta dias (horas), como indicado na Equação 3.

$$F_C = \frac{\text{Energia CA}}{P_{nom} * \text{Período}} \quad (3)$$

Por fim, o índice de desempenho (P_R) do sistema representa a produtividade do sistema (Y_F) dividida pela produtividade de referência (Y_R), conforme apresentado na Equação 4:

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (4)$$

Por fim foi calculado a diferença de porcentual (%) entre os valores de 2021 e 2022 com os resultados de das produtividades de referência e do sistema, como demonstrado na Equação 5.

$$\text{Diferença Porcentual} = 1 - \frac{\text{Produtividade 2021}}{\text{Produtividade 2022}} \quad (5)$$

2.2 Irradiação Solar Global do Plano Inclinado

Os dados de radiação solar descritos neste trabalho foram buscados na plataforma INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) a irradiação solar global horizontal em kJ/m², que foi então convertido para kWh/m². Esses dados abrangem o período de 2021 a 2022. Em seguida, para o cálculo da irradiação solar global do plano inclinado, utilizou-se a proposta de Stuart Bowden e Christiana Honsberg, na Equação 6.

$$H_I = \frac{H_G * \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Onde H_I representa a irradiação solar global do plano inclinado, H_G é a irradiação solar global horizontal, α é o ângulo de elevação do sol e β é o ângulo de inclinação do módulo, medido a partir da horizontal. O ângulo de elevação α é calculado utilizando a Equação 7:

$$\alpha = 90 - \delta - \phi \quad (7)$$

O ângulo ϕ representa a latitude do local analisado e δ é o ângulo de declinação que é calculado como a Equação 8:

$$\delta = 23,45^\circ * \left[\frac{360}{365} * (284 + d) \right] \quad (8)$$

Onde d é o número de dias do ano.

2.3 Processamento e Tratamento de Dados

Para contornar a falta de dados de radiação em determinados períodos ao longo dos anos, foi realizado um tratamento dos dados. Por exemplo, nos meses de novembro de 2021, houve problemas com os dados; portanto, foram utilizadas médias calculadas levando em consideração o ano anterior e o ano posterior para esses meses específicos. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de viabilizar a análise das radiações, mesmo nos períodos em que os dados originais estavam ausentes. O método utilizado foi o método de previsão simples conhecido como método de persistência.

Quanto aos dados de energia do inversor, algumas medições não ocorreram em todo o período mensal analisado. Para evitar encontrar valores discrepantes nos meses de um ano para outro, foi calculada a média mensal com base nos dados disponíveis e multiplicada pelo número de meses do período estudado, a fim de representar a energia do inversor de forma mais próxima da realidade.

3. Resultados e Discussões

A irradiação solar global no plano inclinado, calculada para os anos de 2021 e 2022, está representada na Figura 4. É possível observar que os maiores e menores valores em kWh/m² para os anos de 2021 e 2022 foram, respectivamente, 185,09 kWh/m² (em dezembro) e 92,14 kWh/m² (em junho), 190,19 kWh/m² (em janeiro) e 89,83 kWh/m² (em junho). Vale notar que os valores de irradiação solar global no plano inclinado vêm do banco de dados do INMET, e os valores da planta piloto bioclimática são diferentes.



Figura 2 - Irradiação global do plano inclinado-kWh/m².

Os valores máximos de irradiação solar global do plano inclinado para o mês de 2022 foram de 1578,74 kWh/m², demonstrando um aumento de 0,87% em relação ao ano de 2021, que atingiu 1564,95 kWh/m². É possível notar que os meses de verão são os meses com maior irradiação solar para os dois períodos, o que é esperado, pois o ângulo do sol nesse tempo é bem próximo de 90°.

recebendo muita radiação solar nesse período. No entanto, o mês de janeiro de 2022 teve um aumento de 17% na irradiação solar. Já para os meses do verão, notou-se uma maior discrepância nos valores de irradiação, com valores de abril, maio e julho apresentando uma diminuição de no mínimo 15% em relação a 2022.

O desempenho energético do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) foi monitorado de janeiro de 2021 a dezembro de 2022. A produtividade média mensal em kWh/kWp durante esse período está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Produtividade Média Diária Mensal em kWh/kWp.

Meses	2021	2022	Diferença Percentual
Janeiro	4,40	4,79	8%
Fevereiro	5,73	5,38	-7%
Março	3,42	3,70	7%
Abril	4,77	2,83	-69%
Maio	4,12	3,85	-7%
Junho	3,22	3,16	-2%
Julho	4,29	3,32	-29%
Agosto	3,33	3,65	9%
Setembro	3,99	3,77	-6%
Outubro	3,90	3,90	0%
Novembro	4,82	5,27	9%
Dezembro	5,15	4,69	-10%
Média	4,26	4,02	-8%

O mês de maior produtividade foi fevereiro em ambos os anos, com valores de 5,73 kWh/kWp em 2021 e 5,38 kWh/kWp em 2022, o que representa uma diminuição de 7% de um ano para o outro. A menor produtividade do ano de 2021 ocorreu em junho, com 3,22 kWh/kWp, enquanto em 2022 foi em abril, com 2,80 kWh/kWp. Observou-se uma redução de 69% na produtividade em abril de 2021.

Comparando a média dos doze meses, constatou-se uma redução de 8% em 2022 em relação a 2021, com uma média de 4,26 kWh/kWp em 2021 e 4,02 kWh/kWp em 2022. Esses valores em relação à irradiação solar global do plano inclinado calculado apresentaram um aumento de 0,87%, o que demonstra uma discrepância.

Essas diferenças que ocorreram no sistema de um ano para outro se devem a dois motivos. Primeiro, como já explicado, foi necessário realizar um tratamento de dados nos valores encontrados do inversor, pois em alguns meses não foram medidos todos os dias do período, o que resultou em uma diferença de 69% para abril e 29% para junho.

O segundo fator que levou a essa diferença nos valores foi que, o valor da irradiação solar global do plano inclinado do INMET é diferente ao da planta piloto bioclimática, por estarem em diferentes pontos de irradiação solar, é possível identificar que nos meses de abril e julho os valores da irradiação solar global do plano inclinado diminuíram em mais de 20% para esses períodos, demonstrando a ocorrência de diminuição nos valores de produtividade analisados.

Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os gráficos de dispersão de dados e box plot que têm como objetivo avaliar a distribuição empírica dos dados, verificando as variabilidades dos dados analisados, respectivamente, representando a geração média mensal em kWh/mês dos anos.

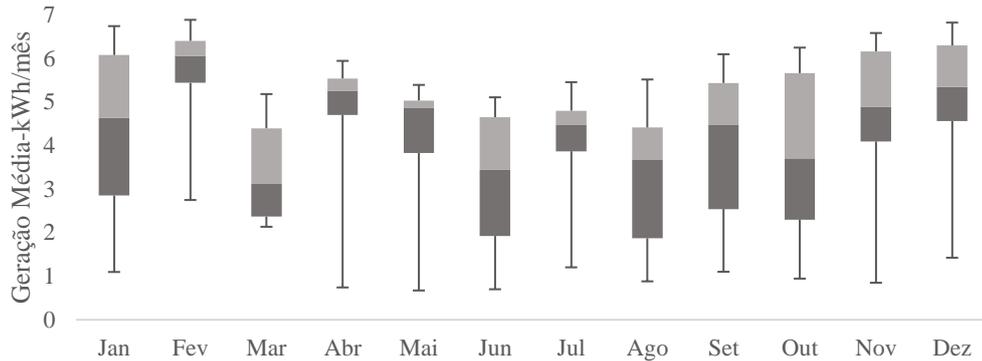


Figura 3 - Dispersão de dados da geração média mensal de 2021 em kWh/mês.

A Figura 3 permite identificar os meses com menor variação nos valores. Observa-se que o mês de março teve a menor variação, atingindo 59%. Isso ocorre devido à menor quantidade de dados disponíveis para esse mês em relação aos outros. Em seguida, tem-se o mês de fevereiro, com 60%, e dezembro, com variação de 79%. Todos esses meses estão no verão. Por outro lado, os meses de abril e maio apresentaram a maior variação, ambos com 88%.

Na Figura 4, pode-se verificar que o mês de novembro teve a menor variação, seguido pelo mês de fevereiro, com 66% e 69%, respectivamente. É notável que esses menores valores foram observados durante o verão. Por outro lado, o mês de agosto teve a maior variação, com 89%, e os outros meses de inverno apresentaram variações próximas a esse valor.

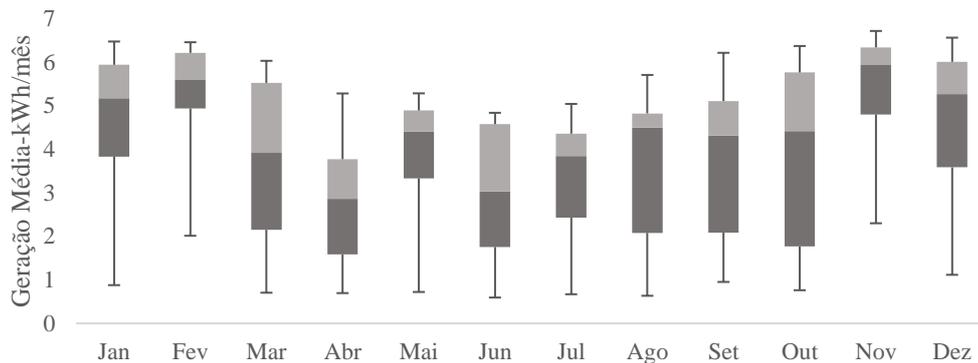


Figura 4 - Dispersão de dados da geração média mensal de 2022 em kWh/mês.

Foram também determinadas a produtividade total do sistema (Y_F) e a produtividade de referência (Y_R). A comparação entre essas produtividades está registrada nas Tabelas 3 e 4.

Para a produtividade de referência na Tabela 3, é possível identificar que as médias e as somas de cada ano são muito parecidos, apesar dos meses em cada ano serem inconsistentes. Essa produtividade de referência é calculada usando dados do INMET. Nota-se que o mês de maior produtividade para o ano de 2021 foi em dezembro, com 184,78 kWh/kWp, enquanto para o mesmo período do ano seguinte foi inferior em 2,1%. Já para o ano de 2022, o melhor mês foi janeiro, com 190,42 kWh/kWp, apresentando uma diferença percentual de 17,7%.

É possível identificar diferenças nos valores de abril, maio e julho, que têm valores 20% maiores em relação ao mesmo período do ano anterior. Como já explicado acima, essas discrepâncias ocorrem porque a irradiação solar global do plano inclinado calculado não corresponde aos dados do sistema fotovoltaico. O outro motivo citado foi a falta de medição de alguns dias em certos meses.

Tabela 3: Produtividade de Referência (Y_R) em kWh/kWp para 2021-2022.

Mês	Y_R -2021-	Y_R -2022-	Diferença Percentual
Janeiro	156,63	190,42	17,7%
Fevereiro	175,94	186,62	5,7%
Março	143,57	140,27	-2,4%
Abril	156,00	118,58	-31,5%
Mai	140,28	117,45	-19,4%
Junho	91,81	89,64	-2,4%
Julho	143,57	113,82	-26,1%
Agosto	113,83	128,20	11,2%
Setembro	126,35	140,49	10,1%
Outubro	147,27	148,04	0,5%
Novembro	165,98	183,53	9,6%
Dezembro	184,78	188,81	2,1%
Média	145,50	145,49	-0,01%
Soma	1746,01	1745,88	-0,01%

Então, é possível verificar na Tabela 4 que o ano de 2021 foi 5,4% melhor que o ano de 2022, atingindo uma produtividade total de 1550,26 kWh/kWp, enquanto em 2022 foi de 1471,71 kWh/kWp. Para constatar isso, o mês de abril demonstra esse problema, pois houve uma redução de 68% em relação ao mesmo período de 2021, assim como uma redução de 29% para o mês de julho. Por fim, o melhor mês para 2021 foi fevereiro com 160 kWh/kWp, e para 2022 foi novembro com 163 kWh/kWp. Essas discrepâncias ocorrem, como explicado anteriormente, devido às diferenças entre os dados de irradiação solar global do plano inclinado calculado e os dados do sistema fotovoltaico, bem como a falta de medição em alguns dias de determinados meses.

Tabela 4: Produtividade total do sistema (Y_F) para 2021-2022 em kWh/kWp.

Mês	Y_F	Y_F	Diferença
	2021	2022	Percentual
Janeiro	135,01	148,35	9,0%
Fevereiro	160,50	150,62	-6,6%
Março	106,14	114,57	7,4%
Abril	143,24	84,95	-68,6%
Maiο	127,70	119,38	-7,0%
Junho	96,49	94,73	-1,9%
Julho	132,99	103,03	-29,1%
Agosto	103,12	113,13	8,8%
Setembro	119,78	112,99	-6,0%
Outubro	120,93	120,85	-0,1%
Novembro	144,68	163,44	11,5%
Dezembro	159,68	145,27	-9,9%
Média	129,19	122,61	-5,4%
Soma	1550,26	1471,31	-5,4%

Na Figura 5, são comparados os fatores de capacidade dos anos de 2021 e 2022, juntamente com suas variações anuais. Para o ano de 2021, os valores do fator de utilização variaram de 13% no mês de junho (valor mínimo) a 22% nos meses de fevereiro e dezembro (valor máximo). Já para o ano de 2022, a variação foi de 13% no mês de junho (valor mínimo) a 23% em novembro (valor máximo). Esses valores representam o percentual de tempo que a usina operou em plena carga.

Em relação à variação entre os anos, o mês de abril teve a maior queda, com uma redução de 8% de 2021 para 2022, seguido de julho com 4%. Essas quedas nos valores são resultado de problemas de dados no sistema. O desempenho médio do fator de capacidade foi de 18% para o ano de 2021 e de 17% para o ano de 2022, demonstrando um melhor fator de capacidade para 2021

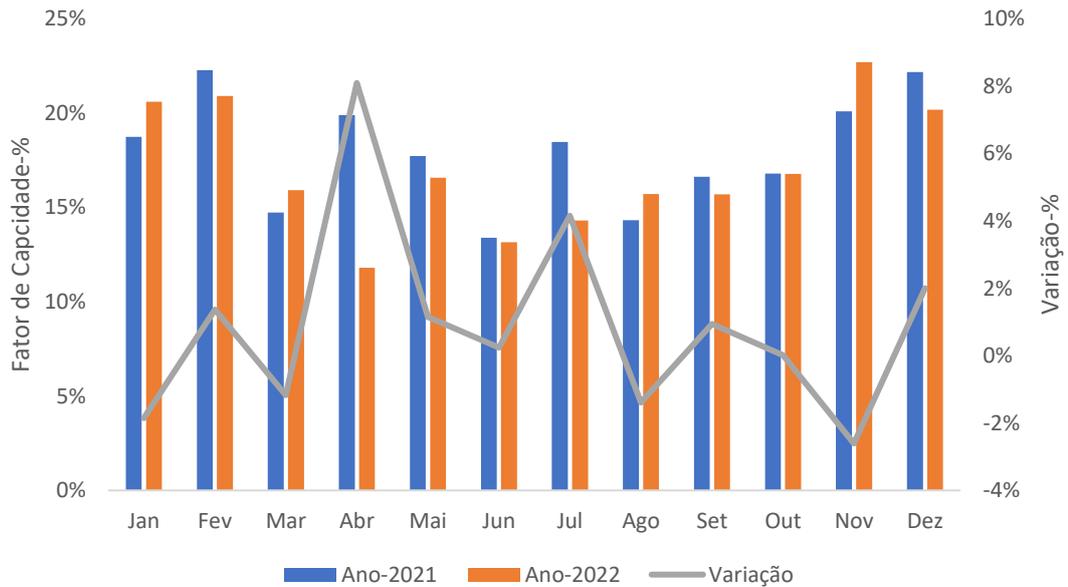


Figura 5 - Comparação de Fator de capacidade dos anos de 2021 e 2022 em %.

Calculou-se a razão de performance (PR) para os dois períodos. No ano de 2021, a razão de performance média do sistema foi de 89%, enquanto para 2022 foi de 85%. É importante mencionar que esses valores são calculados com base na irradiação solar global do plano inclinado do banco de dados INMET, o que pode resultar em algumas diferenças em relação à irradiação solar real.

4. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar dados reais de um sistema fotovoltaico composto por 3 módulos, com uma potência instalada de 0,99 kWp, a fim de avaliar seu desempenho ao longo dos anos em termos de geração de energia elétrica e irradiação solar no plano incidente. Utilizaram-se dados do INMET para obter informações sobre a irradiação solar.

Foram calculados indicadores de desempenho, como a produtividade do sistema (YF), produtividade de referência (YR), índice de performance (PR) e fator de capacidade (Fc). Para a irradiação solar no plano incidente, aplicaram-se fórmulas que permitiram converter os dados de radiação global do INMET para realizar os cálculos de desempenho.

Os resultados obtidos mostram que o ano de 2021 teve um melhor desempenho em relação ao ano de 2022, como demonstrado pela produtividade do sistema, onde se percebe uma diminuição de 8% de um ano para o outro. É importante ressaltar que, com base na irradiação solar global do plano inclinado, foram identificadas discrepâncias nos cálculos dos dados analisados, uma vez que os dados solares do sistema fotovoltaico são ligeiramente diferentes daqueles calculados experimentalmente pelo INMET.

Por fim, constatou-se que o sistema fotovoltaico, ao ser medido ao longo dos meses, pode não conseguir registrar dados em todos os dias, o que pode afetar a análise do desempenho de um ano para outro. Para compensar essas limitações, é necessário continuar analisando os dados desse sistema nos próximos anos para obter uma melhor identificação do desempenho geral do sistema. Essas informações são fundamentais para a análise e aprimoramento do projeto e do funcionamento da planta piloto bioclimática, possibilitando a implementação de medidas corretivas e o aperfeiçoamento das estratégias de utilização da energia solar. Além disso, a comparação entre os anos fornece insights valiosos para otimizar o desempenho e a eficiência do sistema em futuras operações.

Referências

- Infográfico. ABSOLAR. (2023, July 12). <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>
- Aneel Sinaliza Novo Recorde para Expansão da Geração em 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica. (n.d.). <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-sinaliza-novo-recorde-para-expansao-da-geracao-em-2023>
- Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza -- 2.ed. -- São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/97885170008980>. Acesso em: 30/01/2023.
- Bosqued, A. & Palero, S. & Sanjuan, Cristina & Soutullo, Silvia & Enríquez, Ricardo & Ferrer Tevar, Jose Antonio & Martí-Herrero, Jaime & J.Heras, & Guzman, Juande & Jiménez, María José & R.Bosqued, & Heras, M.R.. (2006). Arfrisol, bioclimatic Architecture and solar cooling Project. https://www.researchgate.net/publication/308414732_Arfrisol_bioclimatic_Architecture_and_solar_cooling_Project.
- IEA (2023), Tracking Clean Energy Progress 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>, Licença: CC BY 4.0
- Hafiz M. Abd-ur-Rehman, Fahad A. Al-Sulaiman, Aamir Mehmood, Sehar Shakir, Muhammad Umer (2018). The potential of energy savings and the prospects of cleaner energy production by solar energy integration in the residential buildings of Saudi Arabia. *Journal of Cleaner Production*, Volume 183, Pages 1122-1130, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.187>.
- Hui, Sam C M & Chan, S. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. https://www.researchgate.net/publication/281901499_Integration_of_green_roof_and_solar_photovoltaic_systems.
- Kaliakatsos D, Nicoletti F, Paradisi F, Bevilacqua P, Arcuri N. (2022). Evaluation of Building Energy Savings Achievable with an Attached Bioclimatic Greenhouse: Parametric Analysis and Solar Gain Control Techniques. *Buildings*. 12(12):2186. <https://doi.org/10.3390/buildings12122186>.
- M. Washim Akram, M. Hasannuzaman, Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce. (2023) Global technological advancement and challenges of glazed window, facade system and vertical greenery-based energy savings in buildings: A comprehensive review. *Energy and Built Environment*, Volume 4, Issue 2, Pages 206-226, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.11.003>.
- NTEEL Solar. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica é Instalado na Planta Piloto Bioclimática. Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica. 18/12/2020. Disponível em: <https://nteelsolar.ufsc.br/2020/12/18/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-instalado-na-plata-piloto-bioclimatica/>. Acesso em: 25/07/2023.
- Marc Medrano, Albert Castell, Gerard Fontanals, Cecilia Castellón, Luisa F. Cabeza. (2008). Economics and climate change emissions analysis of a bioclimatic institutional building with trigeneration and solar support. *Applied Thermal Engineering*, Volume 28, Issues 17–18, Pages 2227-2235, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.019>.
- 3 métodos de Previsão de Séries Temporais - PUC-Rio. (n.d.). https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16824/16824_4.PDF
- Stasi, R., Liuzzi, S., Paterno, S., Ruggiero, F., Stefanizzi, P., & Stragapede, A. (2020). Combining bioclimatic strategies with efficient HVAC plants to reach nearly-zero energy building goals in Mediterranean climate. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102479. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102479>
- Stuart Bowden e Christiana Honsberg. Solar radiation on a tilted surface. *PVEducation*. (n.d.). <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>