

Análise da Taxa de Performance de Sistemas Fotovoltaicos em uma Região Semiárida

Francisco Wesley de Souza Fonseca ^[1], Romênia Gurgel Vieira ^[2] e Maria Izabel da Silva Guerra ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi Árido; franciscotst@outlook.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi Árido; romenia.vieira@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi Árido; izabel.guerra@ufersa.edu.br

Resumo: O incentivo da utilização de fontes renováveis de energia impulsionou o aumento da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica no Brasil. Avaliar o desempenho do destes sistemas é importante identificação do bom funcionamento ou indicar a ocorrência de perdas no sistema. Neste sentido, a taxa de desempenho também denominada *Performance Ratio* desempenha um papel fundamental na determinação do comportamento dos sistemas, considerando as diversas formas de perdas. Além disto, é fundamental para auxiliar o dimensionamento e implementação de sistemas fotovoltaicos. Este estudo tem como objetivo calcular a *Performance Ratio* de 106 sistemas fotovoltaicos de diversas potências, interligados à rede e situadas na região semiárida do Rio Grande do Norte. A estimativa da taxa de desempenho foi realizada através da análise da irradiância incidente no plano dos painéis fotovoltaicos e da potência de saída. A partir dos resultados obtidos, foi possível efetuar o cálculo da *Performance Ratio* dos sistemas com pleno funcionamento de janeiro a dezembro de 2022. Após a análise completa foi possível determinar os desempenhos mensais e anuais de cada planta fotovoltaica analisada. Este estudo destaca a importância da avaliação dos sistemas implementados na região e fornece informações valiosas para implantação de novos sistemas.

Palavras-chave: Taxa de desempenho; Rio Grande do Norte; Energia solar; Sistemas fotovoltaicos

Abstract: Encouraging the use of renewable energy sources has led to an increase in the installed capacity of grid-connected photovoltaic systems in Brazil. Evaluating the performance of these systems is important to identify whether they are working properly or whether there are losses in the system. In this sense, the performance ratio, also known as the *Performance Ratio*, plays a fundamental role in determining the behavior of systems, considering the various forms of losses. It is also essential for helping to design and implement photovoltaic systems. The aim of this study is to calculate the *Performance Ratio* of 106 photovoltaic systems of various powers, interconnected to the grid and located in the semi-arid region of Rio Grande do Norte. The performance ratio was estimated by analyzing the irradiance incident on the plane of the photovoltaic panels and the power output. Based on the results obtained, it was possible to calculate the *Performance Ratio* of the systems in full operation from January to December 2022. Once the analysis was complete, it was possible to determine the monthly and annual performance of each photovoltaic plant analyzed. This study highlights the importance of evaluating the systems implemented in the region and provides valuable information for implementing new systems.

Key-words: Performance rate; Rio Grande do Norte; Solar energy; Photovoltaic systems

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento do recurso solar no Brasil deve ser considerado uma alternativa viável para complementação das fontes convencionais de energia, tendo em vista que uma maior diversidade da matriz elétrica pode contribuir para o equilíbrio do sistema de transmissão e distribuição de energia [1]. A região Nordeste destaca-se por ter o maior potencial de aproveitamento da energia solar, devido aos altos índices de irradiância registrados e às condições climáticas favoráveis [2]. Tal fato impulsiona a implantação de mais plantas fotovoltaicas no Brasil, especialmente no Rio Grande do Norte (RN) [3].

Segundo Benevit [4], com o intuito de popularizar a utilização dessa fonte de geração de energia elétrica, muitos países resolveram adotar diversos sistemas de incentivos. No Brasil foi implementado um sistema de compensação a partir da energia injetada na rede, essa medida possibilitou uma maior implementação de centrais solares residências, pois foi a partir deste sistema de compensação, essas centrais solares puderam ser conectados à rede pública e introduzir o excedente da geração na rede elétrica.

Essa popularização da comercialização dos sistemas fotovoltaicos acarretou na necessidade de estudos acerca do desempenho e dos custos associados a implantação de novos sistemas. Um dos indicadores mais relevantes para a determinação do rendimento de um sistema fotovoltaico é a taxa de desempenho (PR, do inglês *Performance Ratio*). Este índice relaciona a energia gerada e a energia estimada a partir da potência nominal de uma usina fotovoltaica, ou seja, indica a porcentagem de energia que está realmente disponível para

ser consumida ou exportar para a rede, sendo possível identificar e quantificar o efeito geral de perdas em um determinado sistema [5].

Nesse contexto, diversos autores desenvolveram estudos relacionados ao rendimento de sistemas fotovoltaicos ao decorrer dos anos. Uma revisão do desenvolvimento da taxa de desempenho apontou que os índices de desempenho de plantas fotovoltaicas evoluíram de 0,5 para 0,75 no final da década de 1980, passando de 0,7 a 0,8 na década de 1990, para mais de 0,8 atualmente, sendo possível atingir a margem de 0,9 de rendimento em determinados casos. Vale ressaltar a possibilidade de alcançar um modesto aumento para cerca de 0,92, a partir da análise detalhada de perdas presentes nos sistemas atuais, da minimização de sombreamento e da melhoria em diversos componentes [6].

Schardt e Heesen [7], desenvolveram um estudo entre 2012 e 2019, que consistiu na análise generalizada da taxa de desempenho de 32.744 plantas solares instaladas em países europeus. Os sistemas considerados estão instalados nos Países Baixos, Bélgica, Luxemburgo, Alemanha, França e Itália. A taxa de desempenho dos sistemas que funcionaram ininterruptamente de 2015 a 2019 foram de 0,73 nos Países Baixos, Bélgica, Luxemburgo, França e Itália. Entre todos os países avaliados a Alemanha alcançou a maior taxa de desempenho com 0,74. Os autores afirmam ainda que não houve tendência de aumento do desempenho com relação aos sistemas implementados após 2018.

Dhimish [8] analisou oito mil sistemas fotovoltaicos distribuídos em território inglês utilizando o conhecido indicador PR e os dados de sistemas operacionais ao longo de cinco anos. A partir dos dados compilados, ele observou que o PR médio mensal para estes sistemas examinados foi de 0,86, a Midlands que é um condado metropolitano localizado no centro da Inglaterra, obteve o maior rendimento mensal constatado com 0,88, o sul e o norte da Inglaterra apresentaram 0,85 e 0,84, respectivamente.

Também foi desenvolvida uma revisão do desempenho de sistemas fotovoltaicos residenciais na França, com o objetivo de analisar a qualidade de sistemas fotovoltaicos usando a PR. Para este estudo foram analisados dados operacionais de 6.868 sistemas fotovoltaicos por um período de dois anos e o valor médio encontrado foi de 0,76 [9].

Como levantado, foram desenvolvidos diversos estudos ao redor do mundo e ao analisar estes dados é possível enxergar valores distintos para a taxa de desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes lugares do mundo, considerando que a geração de energia solar depende primordialmente de condições atmosféricas e geográficas, localidades em que a irradiância é alta tendem a ser mais propícias para implementação de centrais solares [10].

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar [2], a taxa de desempenho de um gerador solar fotovoltaico implementado em território brasileiro, bem dimensionado, instalado com equipamentos de alta qualidade e certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), pode alcançar um rendimento médio anual de 0,8. Através da análise de desempenho também é possível estimar com maior precisão os custos de geração para sistemas a serem implementados.

Vale destacar que, cada vez mais, usinas de grande porte, geralmente instaladas sobre estruturas metálicas, de solo ou com eixo que possibilita seguir a trajetória aparente do sol, têm sido implementadas prioritariamente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do país, pois apresentam os maiores índices de rendimentos médios anuais [2].

Vale destacar que o RN é um estado com altos níveis de irradiância solar durante a maior parte do ano, devido seu clima predominantemente ensolarado, e dispõe de uma posição privilegiada para a geração de energia elétrica por meio de usinas fotovoltaicas, devido sua localização em latitudes próximas a linha do Equador. Além disto, o regime de incidência solar sofre menos com variações durante os ciclos sazonais, por estar localizada em zonas de baixa latitude [11].

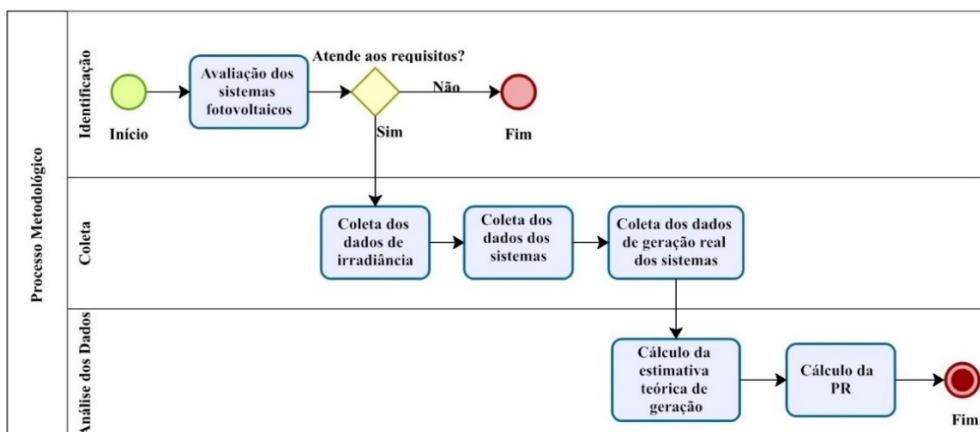
Uma análise mais abrangente dos dados de desempenho e rendimento dos sistemas fotovoltaicos é necessário para nortear o planejamento do futuro da geração de energia solar fotovoltaica. Diante deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a taxa de desempenho de sistemas fotovoltaicos implantados no Brasil, especificadamente no estado do Rio Grande do Norte, visto que uma é uma região que apresenta um clima semiárido, baixos índices pluviométricos e altos índices de temperatura e irradiância. O estudo é realizado através do comparativo dos valores coletados de energia gerada e potência instalada de 106 plantas fotovoltaicas com os valores teóricos calculados a partir da equação que descreve a PR e da irradiância solar média incidente nos painéis fotovoltaicos das plantas analisadas.

Este trabalho está estruturado em quatro seções. A Seção 1 descreve a introdução, abordando uma revisão da literatura, objetivos gerais e específicos, a motivação e a contextualização do tema. A seção 2, apresenta a metodologia utilizada para realização do estudo. A Seção 3, apresenta os resultados deste estudo, e a seção 04 as conclusões que foram constatadas a partir dos resultados obtidos.

2. METODOLOGIA

A estimativa da taxa de desempenho dos sistemas fotovoltaicos analisados é calculada a partir dos dados de geração mensal entre os meses de janeiro a dezembro de 2022, com no mínimo um ano de operação de forma contínua, realizada na região do semiárido. Para realização dos cálculos teóricos, os dados de irradiância foram coletados no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB) a partir das coordenadas geográficas em que estão localizados os sistemas, posteriormente é feito a caracterização do sistema, com todos os dados específicos necessários para o cálculo da estimativa de geração teórica, para então estimar a taxa de desempenho dos sistemas. A Figura 1 ilustra a metodologia utilizada para o cálculo da PR dos 106 sistemas fotovoltaicos que atenderam aos requisitos necessários para o presente estudo.

Figura 1: Fluxograma do processo metodológico de cálculo da PR (autoria própria).



2.1. Caracterização dos sistemas fotovoltaicos

Para realizar a análise da taxa de desempenho foi necessário efetuar o estudo acerca da potência de saída dos sistemas estudados, A partir destes dados, foram coletadas as informações referentes à localização da planta, e as características dos módulos fotovoltaicos e dos inversores. A Tabela 1 exemplifica todos os requisitos necessários para realização da caracterização dos sistemas fotovoltaicos, utilizados como base para esta pesquisa.

Tabela 1: Caracterização dos sistemas (autoria própria).

<i>Localização do Sistema Fotovoltaico</i>	
Local:	
Endereço:	
Latitude:	
Longitude:	
<i>Dados dos Geradores</i>	
Número de Módulos:	
Fabricante dos Módulos:	
Modelo dos Módulos:	
Potência de Pico Total (kWp):	
Área do Módulo [m²]	
Área Total [m²]	
Eficiência do Módulo [%]	
<i>Dados dos Inversores</i>	
Número de Inversores:	
Fabricante e Modelo:	
Potência (kW):	

Após à caracterização de cada um dos sistemas fotovoltaicos estudados utilizando a Tabela 1, foi monitorado extraído e compilado os dados de energia gerada de cada planta fotovoltaica. Em seguida, foi possível calcular a taxa de desempenho e desenvolver as análises pertinentes da pesquisa.

2.2. Cálculo da Taxa de Performance

O programa de sistemas de energia fotovoltaica da Agência Internacional de Energia (IEA) estabelece os parâmetros que representam a quantidade de energia para o sistema fotovoltaico e seus componentes através da norma IEC 61724 [12].

A partir desses parâmetros é possível efetuar o cálculo da PR e apresentar a performance de um sistema de modo geral, considerando as perdas do sistema, como por exemplo, perdas por sombreamento, sujeidade, elevação da temperatura, perdas elétricas no inversor, dentre outras. Assim, é possível realizar a comparação entre sistemas instalados em locais e condições distintas, pois neste método, os valores de irradiância solar e geração são normalizados, tornando possível a análise do funcionamento de um sistema solar fotovoltaico de acordo com o período desejado [13].

Três parâmetros de rendimento presentes na norma IEC 61724 podem ser utilizados para definir a taxa de desempenho geral do sistema com relação ao recurso solar, ao efeito geral de perdas e à geração de energia do sistema [14]. Esses parâmetros são o rendimento de referência, rendimento final do sistema e índice de desempenho.

Para determinar a energia teórica é necessário ter acesso a alguns dados específicos do sistema analisado. Para realização do cálculo são utilizados os dados de Irradiância local (I_r), a eficiência dos módulos (E_f), Área total (A_t) da usina determinada a partir da área do módulo e da quantidade de módulos do sistema e por fim o período da análise (P), expresso pela Eq. (1).

O cálculo da PR é realizado dividindo a energia gerada do sistema indicado em kWh de um sistema fotovoltaico pela energia de geração estimada do sistema, calculado também em kWh para um mesmo período de análise, expresso nas Equações (1) e (2). Em que o rendimento real, é representado pela variável de Energia Real, o que representa a energia realmente gerada pelo sistema.

$$\text{Energia Teórica [kWh]} = A_t \cdot E_f \cdot I_r \cdot P \quad (1)$$

$$PR = \frac{\text{Energia real [kWh]}}{\text{Energia teórica [kWh]}} \quad (2)$$

Através das Equações (1) e (2), e da coleta dos dados exemplificados na Tabela 1, torna-se possível a realização dos cálculos e estimar a taxa de performance de todos os sistemas fotovoltaicos analisados. Para esta finalidade, foi desenvolvida uma planilha de cálculo que associa os valores teóricos e reais por meio das equações (2) e (1) respectivamente. Por meio desta, foi possível calcular a diferença mensal entre a geração real e teórica e a taxa de desempenho geral do sistema para o período de janeiro a dezembro do ano de 2022. A Tabela 2 demonstra a planilha desenvolvida para realização dos cálculos da taxa de desempenho.

Tabela 2: Planilha de cálculo da PR (autoria própria).

Cálculo de Taxa de Desempenho												
Meses	JAN/2022 à DEZ/2022											
Irradiação local [kWh/m2.dia]												
Tempo [Dias do mês]												
Energia Teórica [kWh]												
Energia Gerada [kWh]												
Diferença [kWh]												
Performance Ratio (PR):												
Datasheet do Módulo:												

A partir da metodologia de cálculo apresentada nesta seção, foi calculado a taxa de desempenho para 106 sistemas fotovoltaicos que atenderam aos requisitos necessários para o presente estudo. Os resultados serão analisados e discutidos na Seção 3.

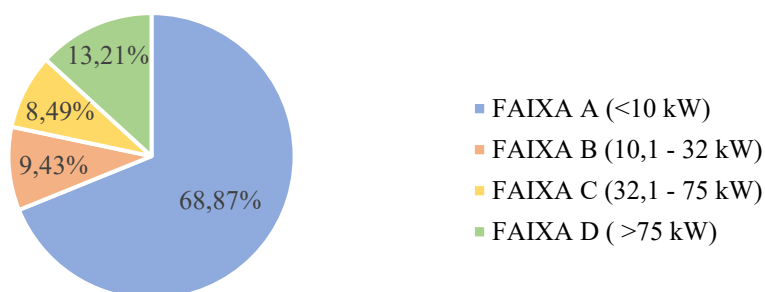
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os principais resultados obtidos a partir dos dados coletados. Este estudo tem como principal objetivo analisar a taxa de desempenho de sistemas fotovoltaicos em uma região semiárida, bem como verificar se os valores obtidos por meio da metodologia anteriormente detalhada são satisfatórios e coerentes com os dados históricos mencionados na seção de introdução.

3.1. Taxa de Desempenho – Performance Ratio

A taxa de desempenho para os 106 sistemas estudados foi analisada considerando todos os sistemas em um grupo geral, além de analisar a performance para diferentes faixas de potência. As faixas de potência foram classificadas como: Faixa A, que compreende sistemas com até 10 kW de potência, Faixa B, que corresponde a sistemas entre 10 e 32 kW, Faixa C entre 32 e 75 kW, e por fim, Faixa D referente a sistemas com potência superior a 75 kW. O objetivo de analisar os sistemas em diferentes faixas de potência é analisar os desempenhos, verificando os valores mínimos, médios e máximos apresentados. As categorias definidas estão representadas na Figura 2, apresentando, em percentual, a quantidade de sistemas que se enquadram em cada faixa de potência dos 106 sistemas fotovoltaicos analisados.

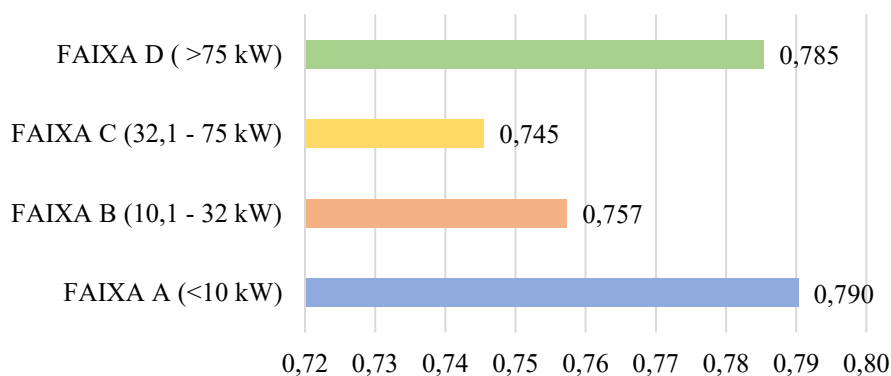
Figura 2: Proporção de sistemas por faixa de potência (autoria própria).



Dentre os sistemas analisados, 73 dos sistemas analisados se enquadram na faixa de potência até 10 kW (Faixa A) e correspondem a mais de 68%. Esta é uma parcela significativa dentre os sistemas analisados, e é justificado devido a popularização de sistemas fotovoltaicos residenciais nos últimos anos. Entre 10 kW e 32 kW (Faixa B) foram analisados 10 sistemas, correspondendo a 9,43%; 9 sistemas entre 32 kW e 75 kW (Faixa C), correspondente a 8,49% e, por fim, a segunda maior amostra são sistemas de maior porte, enquadrados em minigeração e acima de 75 kW (Faixa D), com mais de 13% do total das amostras, o que equivale a 14 sistemas.

A partir da divisão dos sistemas por faixa de potência foi possível determinar a PR média de acordo com o porte dos sistemas. A Figura 3 apresenta média geral de performance para cada uma das faixas de potências definidas.

Figura 3: PR média para cada faixa de potência (Autoria própria).

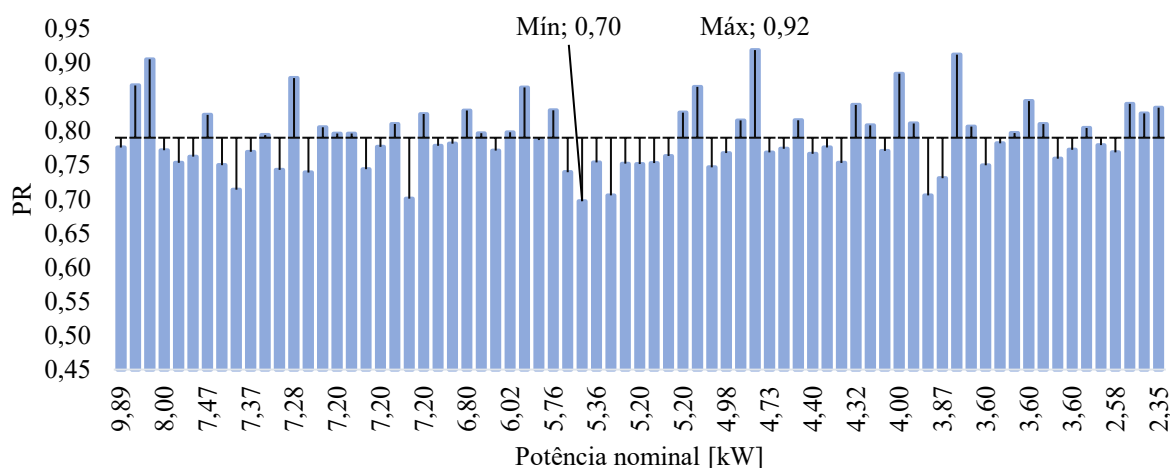


Analisando a Figura 3, é possível verificar que o melhor indicador da taxa de desempenho está na Faixa A, com uma taxa de desempenho de 0,79 de rendimento. São sistemas de menor porte, onde os módulos de geração estão instalados mais próximos à carga, consequentemente menos propensos a um alto índice de perdas, portanto, tendem a apresentarem melhor rendimento. Por outro lado, a segunda melhor média da PR são os sistemas de minigeração, Faixa D, que apresentam média superior a 0,78. Nesta faixa de potência de sistemas fotovoltaicos, há uma demanda de investimento bastante significativo, e de um modo geral, são implementados com equipamentos de alta qualidade, executados com mão obra qualificada, além de um melhor gerenciamento e manutenção. Tais características refletem em taxas de performance maiores, quando comparados à outras faixas de potência. Com 0,745 e 0,757, aparecem os sistemas das Faixas B e C, respectivamente.

3.1.1. PR para Sistemas Fotovoltaicos na Faixa A

Foram analisados 73 sistemas fotovoltaicos com potência inferior a 10 kW. Observando a Figura 4 é possível verificar os valores da PR obtidos, bem como analisar os valores da média geral, o valor mínimo e máximo para esta categoria. O valor médio da PR para estes sistemas foi de 0,79, enquanto o valor mínimo apresentado foi de 0,7. Observa-se, portanto, uma tendência de funcionamento com rendimento acima de 0,7 nesta categoria de sistemas analisados. É importante ressaltar que foram verificados 3 sistemas operando acima de 0,9 de rendimento, evidenciando a possibilidade de alcançar níveis de rendimento ainda melhores do que os apresentados, utilizando equipamentos de alta qualidade e reduzindo a perspectiva de perdas no sistema.

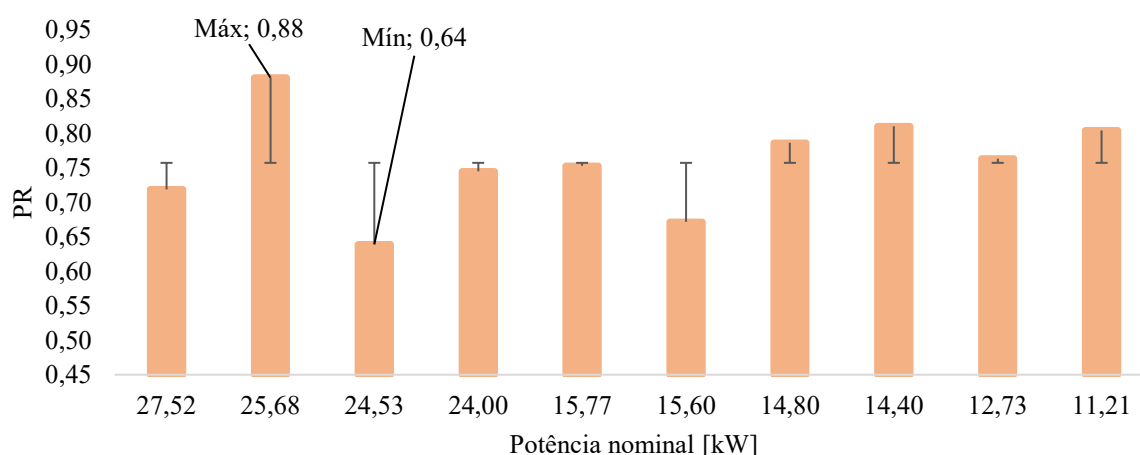
Figura 4: PR na faixa A (Autoria própria).



3.1.2. PR para Sistemas Fotovoltaicos na Faixa B

Para os sistemas na Faixa B foram analisados 10 sistemas fotovoltaicos. Analisando a Figura 5 é possível constatar os valores da PR obtidos, bem como analisar os valores médios, mínimos e máximos para esta categoria. O valor médio da PR para estes sistemas foi de 0,757, enquanto o valor mínimo apresentado foi de 0,64, já o valor máximo constatado foi de 0,88. Dentre os sistemas analisados nesta faixa de potência, dois deles apresentaram valores da PR abaixo de 0,7, dois outros sistemas também apresentaram valores acima de 0,8 de rendimento. Quando comparado o resultado desta categoria com o da Faixa A, é possível verificar uma tendência de geração com rendimento médio inferior. Além disso, ainda apresentam valores máximos inferiores e valores mínimos superiores, possivelmente por se tratar de sistemas de porte intermediário, com maior tendência de perdas, quando comparado a sistemas de menor porte.

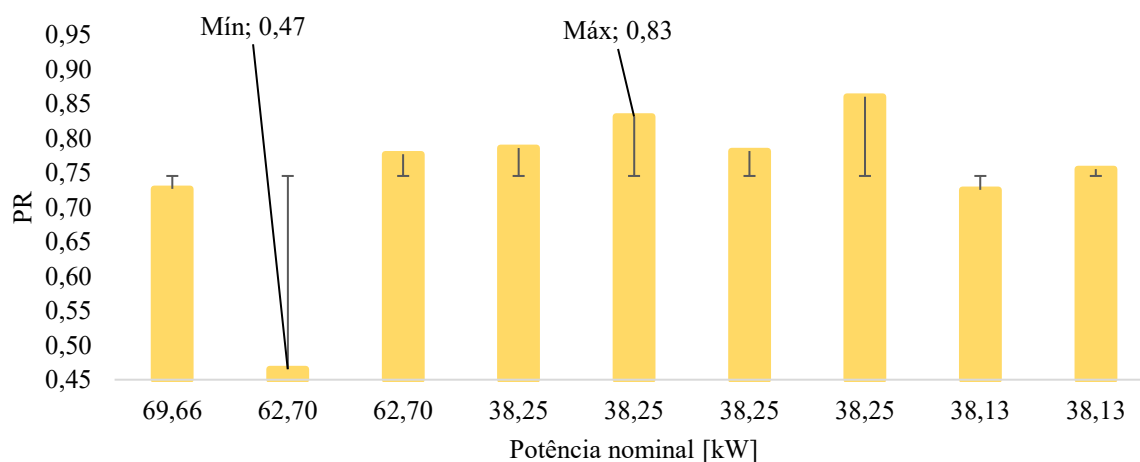
Figura 5: PR na faixa B (Autoria própria).



3.1.3. PR para Sistemas Fotovoltaicos na Faixa C

Analisando 9 sistemas com faixa de potência entre 10 kW e 32 kW, é possível constatar através da Figura 6 os valores mínimo, médio e máximo da PR obtida. O valor médio da PR para estes sistemas foi de 0,745. Apesar de ligeiramente inferior quando comparado às categorias analisadas nos itens 3.1.1 e 3.1.2, o valor encontrado é semelhante ao dos sistemas da Faixa B. O valor mínimo apresentado foi de 0,47. Esta foi a menor taxa de performance calculada para os sistemas estudados. O segundo menor valor geral constatado foi de 0,64 e dentre os sistemas analisados neste faixa de potência, o segundo menor valor encontrado foi de 0,73, ambos muito superiores ao valor mínimo, evidenciando graves problemas neste sistema específico. Descartando esta amostra deste sistema com baixo rendimento, o valor mínimo apresentado é de 0,73, enquanto a média sobe para 0,78. Vale ressaltar que dois sistemas superaram os 0,8 de PR, 0,83 e 0,86 como valor máximo determinado. Tais análises evidenciam a importância da avaliação da taxa de performance com um dos indicadores do bom funcionamento do sistema fotovoltaico.

Figura 6: PR na faixa C (Autoria própria).

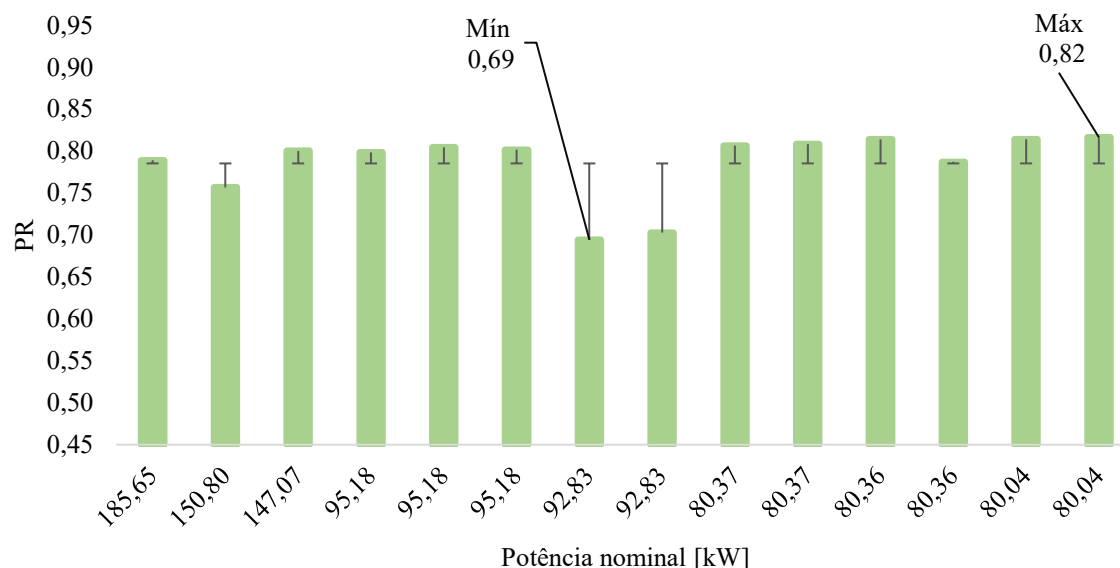


3.1.4. PR para Sistemas Fotovoltaicos na Faixa D

Foram analisadas 14 plantas com potência superior à 75 kW. São sistemas enquadrados em minigeração, de acordo com a resolução normativa ANEEL nº 1.000. Através da Figura 7 é possível verificar os valores mínimo, médio e máximo da PR obtida. O valor médio da PR para estes sistemas foi de 0,785. Analisando a taxa de performance nas quatro faixas de potência, foi a segunda melhor PR encontrada no estudo e ligeiramente inferior aos da Faixa A com 0,79. Na Faixa D, o valor mínimo se aproxima dos 0,7 de rendimento, no qual, apenas um sistema apresentou um valor de PR com 0,69, já o segundo menor valor foi de 0,7, os demais valores constatados superaram os 0,75, alcançando 0,82 de valor máximo. É importante destacar que entre os

14 sistemas avaliados 8 superaram a margem de 0,8, e o valor médio apresentado ficou muito próximo do valor máximo, evidenciando uma tendência de alto rendimento para sistemas de minigeração, que devido ao alto investimento, se trata de sistemas mais robustos, geralmente com equipamentos de alta qualidade e com monitoramento de operação para prevenção de perdas.

Figura 7: PR na faixa de potência D (Autoria própria).



Através da Tabela 3 é possível verificar de forma resumida os valores obtidos. É possível verificar que os valores de PR para Faixa A são superiores às demais faixas de potência, apresentando os maiores valores de mínimo, médio e máximo, 0,7, 0,79 e 0,92 respectivamente. Analisando de modo geral, as taxas de performance calculadas não apresentam discrepâncias significativas, entretanto o valor mínimo de PR apresentado na Faixa C de 0,47 é significativamente baixo quando comparado aos demais mínimos, e ao que foi discutido e contextualizado durante o trabalho.

Dentre os mínimos, com exceção da Faixa C, as Faixas A e D apresentam valores aproximados, com aproximadamente 0,7 de PR, enquanto a Faixa B apresenta rendimento inferior às duas citadas com 0,64, mesmo com valor abaixo das faixas A e D, ainda assim apresenta um valor relativamente alto quando comparado ao valor verificado na faixa C.

Diferente das variações nos valores de mínimo, tanto os valores médios quanto os máximos verificados nas faixas citadas, apresentam valores mais próximos e constantes, os menores valores de médio obtidos também são referentes às faixas que apresentam os menores valores de mínimo que são as Faixas B e C, com 0,76 e 0,75 respectivamente, as Faixas A e D já apresentam valores próximos a 0,8 de PR, que é um rendimento esperado para sistemas instalados em território nacional. Enquanto os máximos apresentam valores superiores a 0,8, destaca-se a Faixa A com um máximo de 0,92, que é um rendimento muito peculiar e ainda difícil de ser alcançado de forma simples e requer atenção com todos os detalhes relacionados à operação e manutenção desses sistemas, além de necessitarem de equipamentos de alta qualidade e certificação, as Faixas B e C, apresentam também ótimos valores de PR com 0,88 e 0,86 respectivamente, por fim a Faixa D apresenta uma PR de 0,82. A Tabela 3 apresenta os valores de mínimos, médios e máximos, para cada faixa de potência, obtidos através da análise dos 106 sistemas fotovoltaicos.

Tabela 3: Resumo dos valores mínimos, médios e máximos da PR para cada faixa de potência (Autoria própria).

Faixa de Potência	Valores de PR		
	Mínimo	Médio	Máximo
FAIXA A (<10 kW)	0,70	0,79	0,92
FAIXA B (10,1 - 32 kW)	0,64	0,76	0,88
FAIXA C (32,1 - 75 kW)	0,47	0,75	0,86
FAIXA D (>75 kW)	0,69	0,79	0,82

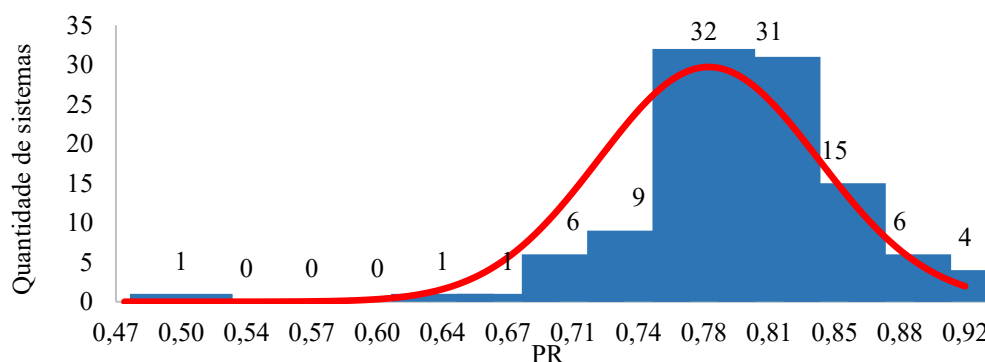
3.1.5. PR geral

Além da análise realizada para diferentes faixas de potência, também foi possível analisar a taxa de performance dos 106 sistemas estudados, verificando os valores de máximo, médio e mínimo, bem como verificar a distribuição dos sistemas pelas faixas de potência e sua distribuição normalizada.

Através da Figura 8 é possível verificar a frequência da quantidade de observações para cada intervalo. Neste caso, os intervalos no eixo horizontal fazem referência a PR dos sistemas analisados, ou seja, dentre os 106 sistemas, 32 estão inseridos no intervalo de 0,74 a 0,78, 31 estão entre 0,78 e 0,81 de PR, ao analisar também a linha de distribuição normalizada, torna-se evidente que a grande maioria dos sistemas estão propícios à apresentarem taxa de desempenho entre 0,71 a 0,88, sendo possível alcançar uma performance ainda melhor em casos específicos.

Vale ressaltar que 97 das 106 plantas estudados apresentam performance superior a 0,71, e 56 dos 106 apresentam PR acima de 0,78 representando mais de 50% dos sistemas analisados, coerente com dados registrados no Atlas Brasileiro de Energia Solar, no qual afirma que a média anual de rendimento para sistemas implementados em território nacional possa ser normalizada em aproximadamente 0,8 [2]. A Figura 8 apresenta a quantidade de sistemas fotovoltaicos por classes dadas entre faixas da PR e a linha representa a distribuição normalizada.

Figura 8: Histograma com distribuição normalizada (Autoria própria).



Através da Tabela 4 é possível verificar os valores de máximo, média e mínimo dos 106 sistemas fotovoltaicos analisados. A média geral encontrada apresenta o valor de 0,78, que é próximo aos 0,8 assim como esperado, entretanto os valores de mínimo e máximo apresentam valores de PR muito significativos. O valor mínimo encontrado foi de 0,47 que é um valor significativamente negativo tendo em vista tudo que foi contextualizado ao decorrer deste estudo, já o valor máximo encontrado foi de 0,92 que é positivamente significativo, como dito anteriormente.

Tabela 4: Valores de máximo, média e mínimo da PR geral (Autoria própria).

Mínimo	Média	Máximo
0,47	0,78	0,92

3.2. Estudo Comparativo

Com o intuito de realizar uma análise comparativa entre os valores obtidos no estudo em questão e os resultados previamente publicados, desenvolveu-se a Tabela 5 que sintetiza os dados relativos aos valores de PR encontrados.

Tabela 5: Comparação dos valores de PR com trabalhos previamente publicados (Autoria própria).

Referência	Local da aplicação do estudo	PR
Schardt e Heesen, (2021)	Países baixos	0,73
	Bélgica	
	Luxemburgo	
	França	
	Itália	
	Alemanha	0,74
Dhimish, (2020)	Midlands	0,88
	Sul da Inglaterra	0,85
	Norte da Inglaterra	0,84
Leloux <i>et al.</i> , (2012)	França	0,76
Pereira <i>et al.</i> , (2017)	Brasil	0,80
Autoria propria, (2023)	Região semiárida brasileira	0,78

Com base na análise nos valores de PR fornecidos pelos estudos, é possível constatar que, de acordo com os autores Schardt e Heesen (2021), países como Países Baixos, Bélgica, Luxemburgo, França e Itália apresentam uma consistência notável, mantendo seus valores de PR em torno de 0,73. Esses resultados sugerem que a eficiência desses países é bastante homogênea. Por outro lado, a Alemanha se destaca ligeiramente superior, com PR de 0,74, indicando uma eficiência um pouco superior em relação aos demais países mencionados.

De acordo com Dhimish (2020), as regiões de Midlands, Sul e Norte da Inglaterra, exibem valores de PR variando entre 0,84 e 0,88. Isso indica uma relativa uniformidade na eficiência dos sistemas fotovoltaicos nessas áreas. No estudo realizado por Leloux *et al.* (2012), observou-se que na França o valor de PR foi de 0,76, tornando-se inferior aos valores encontrados nos dados dos estudos dos autores Schardt e Heesen. Essa diferença sugere-se que a eficiência na França quando em comparação é menor do que os outros países.

O Brasil obteve um PR de 0,80, conforme indicado no estudo conduzido pelos autores Pereira *et al.* (2017). Este valor é superior aos demais estudos, o que sugere que a eficiência dos sistemas fotovoltaicos do Brasil pode ser considerados elevados aos demais quando em comparação. Por fim, com base nos demais estudos, o presente trabalho representa a pesquisa realizada na região semiárida brasileira do estado do Rio Grande do Norte, onde foi registrado um valor de PR de 0,78, o que está de acordo com a eficiência encontrada em outros lugares do Brasil.

4. CONCLUSÃO

Com base nos dados analisados, observa-se um aumento notável da eficiência dos sistemas fotovoltaicos em todo o mundo. Esse aumento pode ser atribuído à popularização crescente da geração de energia solar fotovoltaica, junto ao aumento substancial nos investimentos em pesquisa de novas tecnologias e do aprimoramento das tecnologias já existentes.

Os resultados obtidos através da análise comparativa também sugerem que a PR dos sistemas fotovoltaicos pode oscilar de acordo com condições climáticas, na localização geográfica e tecnologia empregada. No entanto, as discrepâncias identificadas não apresentam variações significativas, o que reforça a confiabilidade da geração de energia solar fotovoltaica em diversas partes do mundo, com desempenho consistentemente positivo.

Também se verifica que a média da PR dos sistemas instalados em território semiárido brasileiro supera os valores de PR determinados em países Europeus como França, Bélgica, Itália e Alemanha que são países desenvolvidos, e que apresentam acervo tecnológico de alta qualidade. Além disso, apresentou uma eficiência semelhante e coerente com o que foi apontado como normalizado para sistemas instalados em território brasileiro. Por outro lado, ainda apresenta uma menor taxa de rendimento quando comparado aos valores encontrados em diferentes regiões da Inglaterra.

Considerando os valores máximos de PR determinados na presente análise, é possível afirmar que os sistemas instalados na região semiárida brasileira têm potencial para apresentar uma média de desempenho ainda mais elevada do que a já constatada, isso se deve ao fato de que muitos desses sistemas alcançaram valores superiores a 0,8, e três deles registraram valor de PR superior a 0,9. Isso sugere que o desempenho observado nesses sistemas pode ser estudado e posteriormente replicado na implementação de novos sistemas fotovoltaicos que buscam alcançar uma elevada taxa de performance.

REFERÊNCIAS

- [1] M. L. D. dos Santos, H. T. Q. Lemos, A. A. F. de Moura, E. P. da Rocha, e G. L. D. L. Nogueira, “Simulação de conversor buck-boost com RPMP por P&O aplicado a módulos fotovoltaicos”, *Rev. Eletrônica Eng. Elétrica E Eng. Mec.*, vol. 5, nº 1, Art. nº 1, jun. 2023, doi: 10.21708/issn27635325.v5n1.a11855.2023.
- [2] E. B. Pereira *et al.*, *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE, 2017. Acesso em: 10 de agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/thisInformationItemHomePage.html>
- [3] A. C. F. Wanderley e A. L. P. S. Campos, “PERSPECTIVAS DE INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO RIO GRANDE DO NORTE”, *HOLOS*, vol. 3, p. 3–14, ago. 2013, doi: 10.15628/holos.2013.1493.
- [4] M. G. Benevit, “Desafios para a implementação da geração solar fotovoltaica domiciliar conectada ao sistema interligado no Brasil : um estudo comparativo”, 2017, Acesso em: 11 de agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179939>
- [5] B. Marion *et al.*, “Performance parameters for grid-connected PV systems”, em *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005., jan. 2005, p. 1601–1606. doi: 10.1109/PVSC.2005.1488451.
- [6] W. van Sark, N. Reich, B. Müller, A. Armbruster, K. Kiefer, e C. Reise, “Review of PV performance ratio development”, maio 2012. doi: 10.13140/2.1.2138.7204.
- [7] J. Schardt e H. te Heesen, “Performance of roof-top PV systems in selected European countries from 2012 to 2019”, *Sol. Energy*, vol. 217, p. 235–244, mar. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.02.001.
- [8] M. Dhimish, “Thermal impact on the performance ratio of photovoltaic systems: A case study of 8000 photovoltaic installations”, *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 21, p. 100693, out. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100693.
- [9] J. Leloux, L. Narvarte, e D. Trebosc, “Review of the performance of residential PV systems in France”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, nº 2, p. 1369–1376, 2012.
- [10] A. Ferreira *et al.*, “Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, p. 181–191, jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.102.
- [11] S. G. Dantas, “OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NO SEMIÁRIDO DO BRASIL”.
- [12] I. Standard 61724, “Photovoltaic system performance monitoring Guidelines for measurement, data exchange and analysis”. Geneva, Switzerland, 1998.
- [13] R. L. Yang, M. B. de Souza, G. M. Tiepolo, J. U. Junior, e D. V. Freitas, “ESTIMATIVA DA TAXA DE DESEMPENHO A PARTIR DA POTÊNCIA DE SAÍDA PARA UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM CURITIBA”, *Congr. Bras. Energ. Sol. - CBENS*, 2020, Acesso em: 12 de agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/822>
- [14] A. Woyte, M. Richter, D. Moser, S. Mau, N. Reich, e U. Jahn, “Monitoring of photovoltaic systems: Good practices and Systematic Analysis”.