

INFLUÊNCIA DO ALBEDO NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS: ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA PILOTO EM FLORIANÓPOLIS-SC

Thamires Alves Silva – alvesthamires907@gmail.com

Marília Braga

Lessandro Formagini

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina, Laboratório Fotovoltaica-UFSC

Resumo. Apesar de avanços na capacidade instalada de energia solar, a análise de desempenho de módulos bifaciais é crucial para maximizar a produção energética desta fonte. Neste artigo, um estudo detalhado de métricas de desempenho é conduzido em uma planta fotovoltaica piloto com módulos bifaciais de última geração, considerando diferentes solos e albedos. As metodologias aplicadas no trabalho envolvem a correção da taxa de desempenho (Performance Ratio – PR) para módulos bifaciais, considerando a irradiação incidente na parte posterior dos módulos e a temperatura. A análise revela a importância da PR bifacial corrigida por temperatura na avaliação das demais perdas do sistema, possibilitando a identificação de falhas e outros fatores causadores de subdesempenho. Ao integrar o albedo na análise de PR, o ganho bifacial presente no cálculo da PR convencional é eliminado, permitindo uma análise mais fidedigna das perdas do sistema. No entanto, o efeito sazonal ainda é perceptível nos gráficos, indicando a influência das temperaturas, que no contexto brasileiro quase sempre representam a maior perda. A correção da PR bifacial por temperatura elimina esse efeito, permitindo isolar e melhor avaliar as demais perdas do sistema. Observou-se uma diferença de até 2,3% entre os valores de PR convencional, com um aumento da diferença acompanhando o aumento do albedo sob o sistema, mostrando que as diferenças ocorrem, majoritariamente, em função do ganho bifacial. A PR bifacial, por outro lado, já apresenta valores bastante coincidentes, com uma diferença máxima entre os sistemas de 0,7%, mostrando uma compensação adequada do ganho bifacial para os diferentes níveis de albedo. A PR bifacial corrigida por temperatura apresenta uma diferença máxima de 0,8%, pouco acima da PR bifacial, podendo indicar que as diferenças nas perdas por temperatura entre os sistemas são bastante similares e pouco impactadas pelo albedo do solo.

Palavras-chave: Métricas de Desempenho, Performance Ratio (PR), Módulos Bifaciais.

1. INTRODUÇÃO

Na COP21, também conhecida como Acordo de Paris, o Brasil comprometeu-se a reduzir suas emissões de carbono, almejando a mitigação do efeito estufa e o combate ao aquecimento global. Apesar de possuir uma matriz energética majoritariamente limpa, fundamentada em hidrelétricas, o país ainda exerce impacto ambiental significativo, alterando cursos de rios, desmatando leitos e influenciando a fauna e flora em áreas onde represas são instaladas. Nesse contexto, outras fontes de energias renováveis surgem como alternativa viável em âmbito nacional.

Segundo dados divulgados em julho de 2023 pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil alcançou uma capacidade instalada de energia solar de 32 GW (PANORAMA, 2023), superando mais que o dobro da potência instalada na Usina Hidrelétrica de Itaipu. No entanto, a problemática reside na categoria dos leilões de energia, em que as energias renováveis se enquadram nas fontes alternativas, competindo na categoria Energia Nova A-5, ao lado de usinas hidrelétricas e termelétricas, que, devido ao menor custo, são mais competitivas no mercado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023).

Inicialmente, os módulos solares eram pequenos e robustos, caracterizados por tecnologias e métodos de fabricação pouco eficientes, resultando em produtos de alto custo e difícil acesso. Contudo, com o avanço tecnológico e a redução dos custos de produção, tornou-se possível desenvolver módulos cada vez maiores, finos e eficientes. Os chamados wafers de silício, por sua natureza bifacial, têm a capacidade intrínseca de gerar corrente elétrica em ambos os lados. No entanto, devido às práticas de metalização e encapsulamento predominantes, apenas a parte frontal dos módulos era utilizada. Recentemente, avanços tecnológicos permitiram a redução de custos e viabilização de topologias de célula ou módulo que permitem explorar a bifacialidade em sistemas FV, com a coleta da irradiação solar pela parte frontal e posterior dos módulos FV.

A 14ª edição do International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) relata que foram comercializados 295 GW de módulos solares em 2022 globalmente, culminando em uma capacidade instalada acumulada global de mais de 1.198 TW (VDMA, 2023). Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil conta atualmente com cerca de 16.604 unidades de usinas fotovoltaicas, operando com uma potência total aproximada de 10,4 GW (ANEEL, 2023). A instalação dessas usinas requer a aplicação de um rigoroso método de avaliação, cujas métricas de desempenho são estabelecidas pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) através da IEC 61724-1.

Este artigo examina o impacto do cálculo adequado das figuras de mérito com suas devidas correções, para a estimação de desempenho de sistemas bifaciais. Com foco na métrica de Taxa de Desempenho (PR), examinaremos seus conceitos fundamentais e estudos de caso, fazendo comparações entre a PR tradicional, a PR bifacial e a PR bifacial corrigida pela temperatura. Essa análise será baseada em dados obtidos de uma usina piloto localizada no Laboratório Fotovoltaico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), situado em Florianópolis, Santa Catarina (www.fotovoltaica.ufsc.br).

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição de sistemas e instrumentação

A planta piloto tem como principal objetivo a análise de desempenho e maximização da geração de módulos bifaciais de silício cristalino e monofaciais de telureto de cádmio (CdTe) sob condições extremas de temperatura, irradiância e diferentes albedos. Além disso, a planta piloto permite a avaliação, em pequena escala, da confiabilidade de diversos equipamentos empregados em uma usina FV, desde os próprios módulos FV até inversores e rastreadores. A Fig. 1 apresenta uma imagem aérea da planta piloto localizada em Florianópolis-SC, na sede do laboratório Fotovoltaica/UFSC (27,43°S, 48,44°O).

A planta piloto possui capacidade instalada de aproximadamente 100 kWp, divididos em seis sistemas, sendo um deles composto por módulos de CdTe e os demais por módulos bifaciais de silício cristalino (c-Si). Os sistemas foram instalados em diferentes tipos de solo, visando a análise do ganho energético proporcionado por solos com diferentes albedos. O solo considerado como referência é o de bica corrida, presente na estação de albedo da planta piloto no sistema fixo de c-Si bifacial, no sistema de CdTe e em um dos sistemas de c-Si bifacial em rastreador. Os demais solos foram colocados em ordem gradiente de refletividade, sendo eles, de leste a oeste: areia, caulim, e brita branca.

A presente análise terá como foco os quatro sistemas bifaciais, visando a avaliação de métricas de desempenho aplicadas a sistemas deste tipo. A Tab. 1 apresenta as principais características elétricas dos quatro sistemas avaliados. Os sistemas são idênticos, empregando os mesmos módulos e inversores FV e mesma configuração elétrica.



Figura 1 – Imagem aérea da usina fotovoltaica piloto localizada na sede do laboratório Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis-SC (27,43°S, 48,44°O). O Norte está apontado aproximadamente para o canto inferior esquerdo da imagem.

Tabela 1 – Principais características dos sistemas avaliados.

Inversor	Tipo de Solo	Coefficiente de Albedo	Número de Módulos	Potência do Módulo	Potência Instalada	Coefficiente de Temperatura	Coefficiente de Bifacialidade
Inversor 1	Brita Branca	0,52	26	645Wp	16,77 kWp	-0,35%	0,7
Inversor 2	Caulim	0,43	26	645Wp	16,77 kWp	-0,35%	0,7
Inversor 3	Areia	0,41	26	645Wp	16,77 kWp	-0,35%	0,7
Inversor 4	Bica Corrida	0,26	26	645Wp	16,77 kWp	-0,35%	0,7

A *Performance Ratio (PR)* é utilizada para medir o desempenho de sistemas FV, permitindo avaliação conforme as condições do local e a comparação entre diferentes tecnologias. Neste estudo, uma análise completa é realizada para obter resultados precisos, abrangendo diversas variáveis elétricas e ambientais.

Sensores instalados ao longo dos rastreadores medem a temperatura dos módulos e irradiância incidente no plano dos módulos, tanto frontal, quanto posterior, através de células de referência (IMT Si) e piranômetros classe A (EKO MS-80S). Os dados elétricos de geração dos sistemas são registrados pelos próprios inversores, tanto para o lado CC como

para o lado CA, havendo ainda redundância na medição pelo lado CA, onde também foram instalados multimedidores. A qualidade e confiabilidade dos dados é garantida por filtros, excluindo dias de desligamento para manutenção, substituição de módulos e eventos extremos como ciclones. Os dados são registrados a cada segundo, mas, devido ao tamanho das tabelas, as médias por minuto são usadas para análises.

2.2 Métricas de desempenho

PR tradicional:

Segundo a IEC 61724-1, que estabelece as diretrizes para os cálculos de métricas de desempenho de sistemas fotovoltaicos, a PR é um indicador da qualidade do sistema e permite a comparação entre instalações em diferentes locais e orientações. A PR é calculada conforme a Eq. (1).

$$PR = \frac{G_{stc} \times E_m}{Pot_{str} \times H_{POA}} \quad (1)$$

Onde:

G_{stc} é a irradiância padrão prevista pela norma de $1000W/m^2$.

E_m é a energia gerada pelo sistema no período avaliado.

Pot_{nom} é a potência instalada do sistema.

H_{POA} é a irradiação medida no plano frontal dos módulos durante o período avaliado.

A potência instantânea pode ser obtida pela própria tabela de aquisição ou pelo produto entre a corrente e tensão do sistema. A PR inclui todas as perdas do sistema, como sombreamentos, perdas por reflexão, sujeira, descasamento elétrico entre módulos, resistência do cabeamento, etc. (IEC, 2021).

Há também a PR corrigida por temperatura, que tem como objetivo compensar as perdas por temperatura visando permitir uma análise mais detalhada das demais perdas do sistema.

PR para módulos bifaciais (PR_{BIF}):

A PR já se consolidou como uma métrica reconhecida no mercado; contudo, sua aplicabilidade em módulos bifaciais suscita questionamentos. A principal distinção entre módulos convencionais e bifaciais reside na ausência de backsheet nos últimos, permitindo a incidência de radiação solar na parte traseira dos módulos. A geração “extra” proveniente da parte traseira dos módulos ainda não está incorporada na potência nominal dos módulos comercializados, sendo considerada uma produção adicional. Entretanto, é crucial compreender como mensurar esse ganho adicional proporcionado pela parte traseira. Esse ganho gerado pelo albedo é determinado por um coeficiente de bifacialidade, que é informado nos *datasheets* pelos fabricantes, e os métodos para obtê-los não serão detalhados neste artigo.

A avaliação convencional da PR em módulos bifaciais, especialmente em locais com alta reflexão do solo, resulta em valores de PR significativamente elevados. Isso não apenas dificulta a compreensão do verdadeiro estado de saúde do sistema, como também pode mascarar fatores de perda do sistema.

A prevista na IEC 61724-1, surge como uma abordagem de normalização da PR levando em consideração o ganho na parte traseira. Na seção de Resultados e Discussões, exploraremos mais as diferenças nas aplicações de ambas as PRs nos estudos de caso para um mesmo sistema.

O fator de bifacialidade é uma constante que modifica a fórmula tradicional usada para calcular o desempenho de módulos convencionais quando é multiplicado pelos valores de irradiância incidentes na parte traseira. Essa modificação é expressa pela Eq. (2).

$$PR_{BIF} = \frac{G_{stc} \times E_m}{Pot_{str} \times (H_{POA} + (H_{APOA} \times \alpha))} \quad (2)$$

Onde:

G_{stc} é a irradiância padrão prevista pela norma de $1000W/m^2$.

E_m é a energia gerada pelo sistema no período avaliado.

Pot_{nom} é a potência instalada do sistema.

H_{POA} é a irradiação medida no plano frontal dos módulos durante o período avaliado.

H_{APOA} é a irradiação medida no plano traseiro dos módulos durante o período avaliado.

α é o coeficiente de bifacialidade fornecido no datasheet do fabricante do módulo

PR para módulos bifaciais corrigida por temperatura (PR_{BIF_T}):

A temperatura ambiente é um dos principais fatores que determinam a temperatura de operação das células FV, e tem um papel significativo na geração. O aumento da temperatura da célula provoca diminuição da tensão (de forma quase linear para uma irradiância constante) e elevação da corrente. Todavia, o acréscimo na corrente é muito pequeno e insuficiente para compensar a perda de potência causada pela redução da tensão. (PINHO; GALDINO, 2014).

A PR bifacial corrigida por temperatura, calculada conforme as Equações (3), (4) e (5), é uma métrica crucial em sistemas fotovoltaicos, avaliando a eficiência de módulos solares bifaciais após correções térmicas. A norma IEC 60904-1-2 fornece diretrizes para sua aplicação, garantindo uma avaliação precisa do desempenho. Essa métrica considera a influência da temperatura na produção de energia, sendo essencial para compreender o verdadeiro potencial de sistemas bifaciais em diferentes condições climáticas.

$$PR_{BIF_T} = \frac{G_{stc} \times E_m}{Pot_{str} \times BIF \times C_{Temp}} \quad (3)$$

$$BIF = H_{POA} + (H_{APOA} \times \alpha) \quad (4)$$

$$C_{Temp} = 1 + \lambda(Temp_m - 25^\circ) \quad (5)$$

Onde:

G_{stc} é a irradiância padrão prevista pela norma de $1000W/m^2$.

E_m é a energia gerada pelo sistema no período avaliado.

Pot_{nom} é a potência instalada do sistema.

H_{POA} é a irradiação medida no plano frontal dos módulos durante o período avaliado.

H_{APOA} é a irradiação medida no plano traseiro dos módulos durante o período avaliado.

α é o coeficiente de bifacialidade fornecido no datasheet do fabricante do módulo.

$Temp_m$ é a temperatura medida para o sistema.

λ é o coeficiente térmico informado no datasheet pelo fabricante do módulo.

2.3 Disponibilidade e tratamento de dados

Para calcular essas métricas, os dados desempenham um papel fundamental nas análises. O tratamento e a filtragem adequada dos dados são essenciais para obter resultados precisos. O método empregado no artigo "A photovoltaic degradation evaluation method applied to bifacial modules" envolve cinco etapas, demonstradas na Fig. 2, as quais foram adotadas como base na metodologia aplicada (MANNINO et al., 2023). Essas etapas são:

Passo 1: Aquisição de Dados.

Passo 2: Definição de parâmetros

Passo 3: Qualidade e Disponibilidade de dados

Passo 4: Aplicação de filtros

Passo 5: Estimativa PR , PR_{BIF} e PR_{BIF_T}

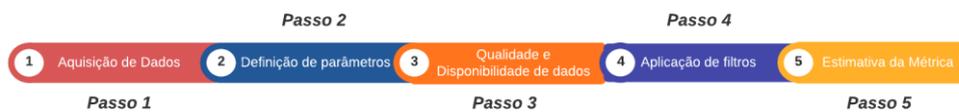


Figura 2 – Etapas para aquisição e tratamento de dados.

Passo 1: Aquisição de dados

Os equipamentos empregados para aquisição de dados de irradiação foram piranômetros e células de referência, de forma independente e redundante. Os piranômetros destacam-se por sua precisão, proporcionada pela própria construção mecânica, que permite medições em ângulos mais amplos e resposta espectral ampla. Os sensores EKO MS-80S, empregados neste projeto, por se tratar de sensores digitais, apresentam ainda um coeficiente de erro associado padronizado e são sensores Classe A. Por outro lado, as células de referência têm limitações relacionadas à resposta espectral e ao ângulo de incidência e, no caso específico deste projeto, por serem sensores analógicos, qualquer inconsistência na integridade do equipamento e suas conexões pode resultar em um erro aleatório associado às medições, dificultando linearizações precisas. O piranômetro foi o sensor principal utilizado, enquanto as células foram empregadas como redundância de dados. As medidas das variáveis elétricas são realizadas pelos próprios inversores pelo lado CC e CA. No lado CA, há ainda redundância na medição das grandezas elétricas, que são realizadas também por multimedidores.

A resolução temporal desempenha um papel crucial na análise de perdas ambientais, como as enfrentadas em cenários de sombreamento ou dias nublados. Registros de dados por segundo são ideais para discernir as variações nas perdas, embora a análise possa ser desafiadora. A aplicação de filtros adequados pode facilitar essa tarefa. Os dados originalmente registrados por segundo foram convertidos para minutos, sendo esta a resolução temporal escolhida para

os cálculos das métricas. Todos os filtros foram aplicados nos dados brutos, e somente após essa etapa, a resolução temporal foi alterada para mensal, seguida pela aplicação dos métodos de cálculo.

Passo 2: Definição de parâmetros

A definição de parâmetros implica na avaliação e seleção das colunas a serem utilizadas, bem como sua separação. A organização dos dados é fundamental, uma vez que envolve arquivos extensos registrados a cada minuto durante um período predefinido. No estudo de caso em questão, o período abrange 14 meses, do dia 4 de agosto de 2022 até 31 de outubro de 2023. Os conjuntos de dados (*datasets*) são compostos por diversas colunas, tornando o arquivo mais pesado e dificultando o processamento. Para evitar esse problema, nesta etapa, são identificadas e selecionadas apenas as colunas necessárias para análise, e o período específico é salvo em uma nova tabela.

Passo 3: Qualidade e disponibilidade de dados

Após a separação dos dados é necessário definir algumas métricas de qualidade que se adequem ao seu sistema. A escolhidas para este sistema são descritas abaixo.

- Os horários válidos do dia estão situados no intervalo das 7:00 até 18:00;
- O dia deve conter no mínimo 80 pontos de dados registrados em horários válidos do dia;
- O mês deve ter disponibilidade mínima de 50% dos dias válidos;
- Deve haver simultaneidade dos dados registrados para todas as variáveis no ponto analisado;

Durante a fase de aquisição de dados, vários fatores podem comprometer a confiabilidade e, em alguns casos, a integridade do registro dessas informações. Esses eventos podem resultar em lacunas no *dataframe*, o que dificulta a análise subsequente. Para lidar com essas lacunas, foi desenvolvida uma metodologia que utiliza as redundâncias de medições de irradiância do sistema, descrita no fluxograma da Fig. 3.

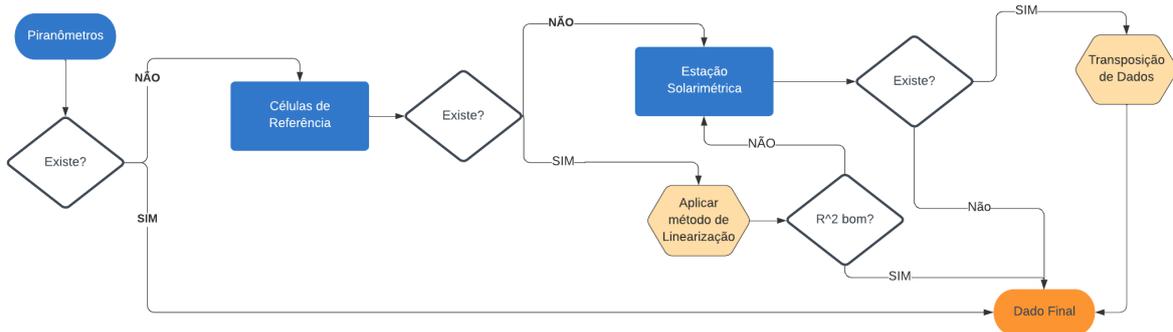


Figura 3 – Fluxograma descrevendo a metodologia de preenchimento de dados faltantes com base em medidas redundantes de irradiância.

A metodologia emprega os dados do sensor principal e do sensor secundário durante o mesmo período. Isso envolve a comparação entre os piranômetros e as células de referência, respectivamente. A linearização é então aplicada para determinar o fator de correção que é posteriormente utilizado nas células de referência durante os períodos em que o gap filling foi aplicado. Quando não há dados disponíveis em ambos os sensores, os dados provenientes das estações solarimétricas são transpostos para cada rastreador, e o erro esperado é calculado.

Passo 4: Aplicação de filtros

O filtro primário a ser aplicado é a simultaneidade de dados, garantindo uma comparação justa entre todos os sistemas em cada ponto específico. Em seguida, durante a conversão de resolução temporal, foi estabelecido um critério para o número mínimo de pontos. Para intervalos de 1 dia, são necessários no mínimo 80 minutos em horários válidos. Após essa etapa, as métricas de desempenho são calculadas.

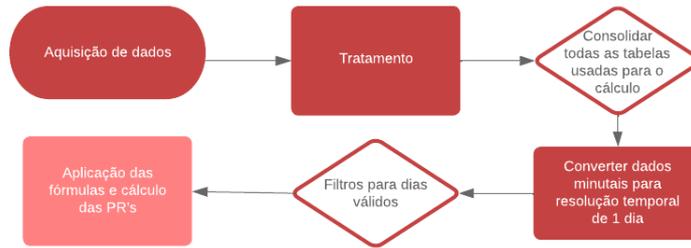
Passo 5: Estimativa PR, PR_{BIF} e PR_{BIFT} 

Figura 4 – Fluxograma sobre processo do cálculo da métrica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de contabilizar as diferenças intrínsecas entre os sistemas instalados sobre os diferentes tipos de solo, os mesmos foram medidos inicialmente sob condições de baixo albedo, sendo que durante esse período de *baseline* os solos foram cobertos por uma lona preta. Desta forma, foi possível mensurar os ganhos e perdas intrínsecos de cada rastreador sem influência do solo.

O período de medidas de *baseline* foi de três meses, para os quais os resultados de PR são apresentados na Tab. 2. Idealmente, o período de *baseline* deveria cobrir um ciclo sazonal inteiro, de modo a se quantificar as diferenças entre os sistemas nas diferentes épocas do ano, sob diversas condições, de modo a se obter um valor mais representativo. Contudo, o tempo de execução deste e da maioria dos projetos inviabiliza este tipo de medição, se fazendo necessária a aproximação adotada neste estudo. Os resultados deste período, com albedo padrão para todos os sistemas, permitem inferir que as diferenças observadas durante o *baseline* não estão relacionadas ao albedo do solo, mas sim a diferenças intrínsecas entre os sistemas.

Durante o período de *baseline* espera-se que as figuras de mérito sejam semelhantes, visto que as condições de albedo dos sistemas são similares. Contudo, apesar de a lona preta cobrir igualmente o solo em todos os rastreadores, não é garantido que a reflexão seja uniforme, em função de fatores externos que podem ainda influenciar nos resultados, como o efeito de borda, no qual o rastreador da extremidade acaba recebendo maior irradiação que os demais. Este efeito pode ser observado nos resultados para o sistema “Brita Branca”, que fica na extremidade da planta piloto: ele apresenta a maior PR convencional, que considera apenas a irradiação frontal; contudo, este efeito é compensado nas PRs bifaciais. As diferenças observadas nos resultados apresentados pela Tab. 2, portanto, representam as diferenças intrínsecas entre os sistemas, seja ela por uma questão de *layout* da planta, características elétricas dos módulos ou outros componentes do sistema. Observa-se que as diferenças máximas são da ordem de 3,6%.

Tabela 2 – Resultado das métricas avaliadas para os sistemas durante o período de *baseline*, quando todos os solos foram cobertos por uma lona preta.

Sistema	PR Convencional		PR Bifacial		PR Bifacial Corrigida por Temperatura	
	Valor	Diferença	Valor	Diferença	Valor	Diferença
Bica Corrida	92,6%	0,0%	89,4%	0,0%	92,6%	0,0%
Areia	91,5%	-1,1%	87,5%	-1,9%	90,6%	-2,0%
Caulim	90,4%	-2,2%	86,2%	-3,2%	89,2%	-3,4%
Brita Branca	93,8%	1,2%	88,6%	-0,8%	91,8%	-0,8%

Os resultados da Tab. 2 ainda podem ser utilizados para uma primeira interpretação destas diferentes métricas. Observa-se que a PR convencional apresenta valores bastante elevados, quando comparados com valores usuais de sistemas monofaciais, isso se dá, pois, toda a geração da parte posterior dos módulos é considerada como energia extra, que acaba compensando parcialmente as perdas do sistema. A PR bifacial, por outro lado, visa compensar esse ganho empregando os valores de irradiação na face posterior dos módulos, além da incidente na parte frontal. Isso resulta em valores mais baixos, obviamente, e em um indicador que se traduz mais facilmente em uma avaliação de perdas dos sistemas, visto que não há ganhos mascarando-as. A eficiência bifacial corrigida por temperatura tende a apresentar valores mais altos do que a bifacial, uma vez que ela compensa também o efeito da temperatura no módulo, que é inerte a tecnologia e representa, em muitos casos, a maior fração das perdas do sistema. Desta forma, este indicador busca isolar as demais perdas do sistema. No caso desta análise, observa-se que, apesar do ambiente de baixo albedo, os ganhos

bifaciais se sobrepõem às perdas por temperatura, uma vez que a PR convencional ainda se mostra maior do que a PR bifacial corrigida por temperatura.

Cada uma destas métricas é aplicável em diferentes cenários, mas de forma geral pode-se colocar que a PR convencional não é adequada para avaliar o desempenho de sistemas bifaciais de forma absoluta, pois impede a correta avaliação das perdas do sistema. Adicionalmente, a PR considerando a bifacialidade proporciona uma avaliação mais equitativa de sistemas bifaciais instalados sobre diferentes solos, corrigindo a geração com base na quantidade de irradiação no plano frontal somada à irradiação na parte traseira, normalizando os resultados.

Após o período de *baseline*, as medições de dados foram iniciadas com o sistema em sua configuração original. Cada tipo de solo da planta piloto possui um albedo específico, que é levado em conta nas análises através do coeficiente de albedo empregado nas equações apresentadas para o cálculo das métricas. Vale destacar que o albedo é uma característica física de materiais, e representa a quantidade de luz refletida como um percentual da incidente. Contudo, o albedo não pode ser convertido diretamente em ganhos energéticos em sistemas FV, pois existem outros fatores, principalmente de geometria solar e questões elétricas dos módulos, que influenciam no ganho efetivo da parte traseira do sistema. De forma geral, solos mais claros têm maior tendência a refletir os comprimentos de onda da radiação solar, enquanto solos mais escuros possuem um coeficiente de albedo menor, o que reduz a reflexão e aumenta a absorção dos raios solares pelo solo.

Os resultados de PR convencional para os quatro sistemas bifaciais analisados neste projeto são apresentados na Fig. 5. Observam-se variações ao longo dos meses, causadas pelas condições ambientais características das estações do ano, bastante presentes na localidade do estudo, que apresenta clima subtropical úmido (Cfa) de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013). Além das condições ambientais, as diferentes épocas do ano influenciam a inclinação solar, principalmente se tratando de uma localidade com latitude intermediária (27,43°S), causando maiores perdas por ângulo de incidência nos períodos mais próximos ao solstício de inverno.

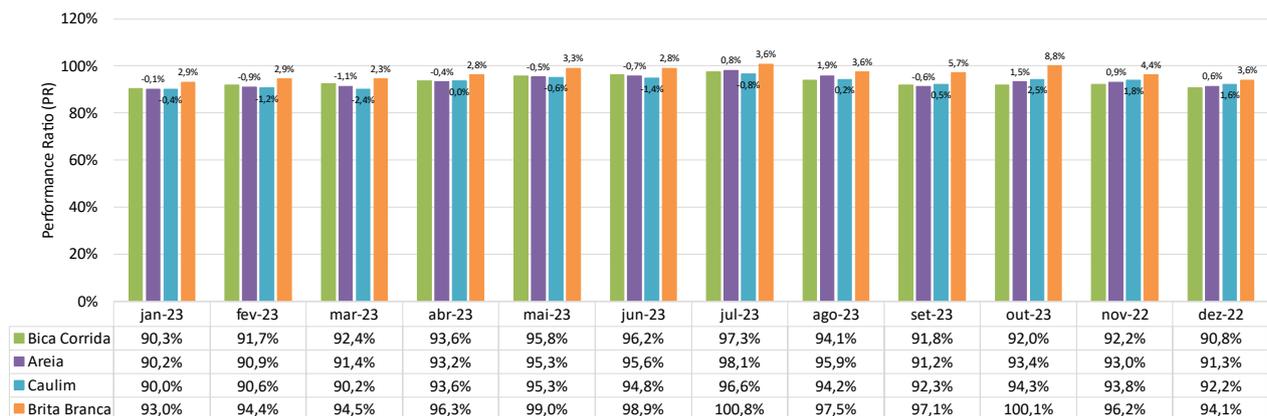


Figura 5 – Resultados de PR convencional mensal para os sistemas analisados.

As diferenças entre sistemas, por outro lado, estão relacionadas aos diferentes tipos de solos onde os sistemas estão instalados. Como a métrica de PR convencional não leva em consideração a irradiação incidente nas costas dos módulos, os ganhos bifaciais dos sistemas se apresentam como taxas de desempenho mais elevadas para aqueles com maiores albedos. Os sistemas estão dispostos em ordem crescente dos coeficientes de albedo dos solos, sendo a bica corrida o que apresenta menor albedo, e a brita branca, o maior. Essa diferenciação é especialmente evidente nos meses de verão, quando os ângulos de incidência são menores e os valores de irradiação maiores.

Os valores anuais de PR convencional dos sistemas são apresentados na Tab. 3, bem como os resultados corrigidos com base nas diferenças encontradas durante o período de *baseline* (Tab. 2). Observa-se que os índices corrigidos pelas diferenças intrínsecas medidas durante o período de *baseline* mostram que a PR acompanha o aumento do albedo dos diferentes sistemas; contudo, longe de ser de forma proporcional. A diferença entre os resultados para o solo brita branca (maior albedo, 52%) e bica corrida (menor albedo, 26%) é de 2,7%.

Tabela 3 – Resultado das métricas avaliadas para os sistemas durante o período do projeto, medidas e corrigidas pelo *baseline*.

Sistema	PR Convencional		PR Bifacial		PR Bifacial Corrigida por Temperatura	
	Medida	Corrigida	Medida	Corrigida	Medida	Corrigida
Bica Corrida	92,7%	92,7%	87,5%	87,5%	91,9%	91,9%
Areia	92,7%	93,8%	84,9%	86,8%	89,2%	91,2%
Caulim	92,6%	94,8%	85,0%	88,2%	89,3%	92,7%
Brita Branca	96,2%	95,0%	86,6%	87,4%	91,2%	92,0%

A Fig. 6 apresenta os resultados mensais de PR bifacial para os sistemas avaliados, enquanto a Tab. 3 apresenta os valores anuais e corrigidos pelo período de *baseline*. Ao analisar a Fig. 6 e incorporar o albedo no cálculo da taxa de desempenho do sistema, nota-se que a tendência de queda entre os inversores com diferentes tipos de solo não é mais evidente. Isso ocorre devido à normalização da geração para este efeito. No entanto, mesmo com essa normalização, o efeito da sazonalidade ainda está presente na figura, indicando a influência das temperaturas e ângulo de incidência solar nos índices.

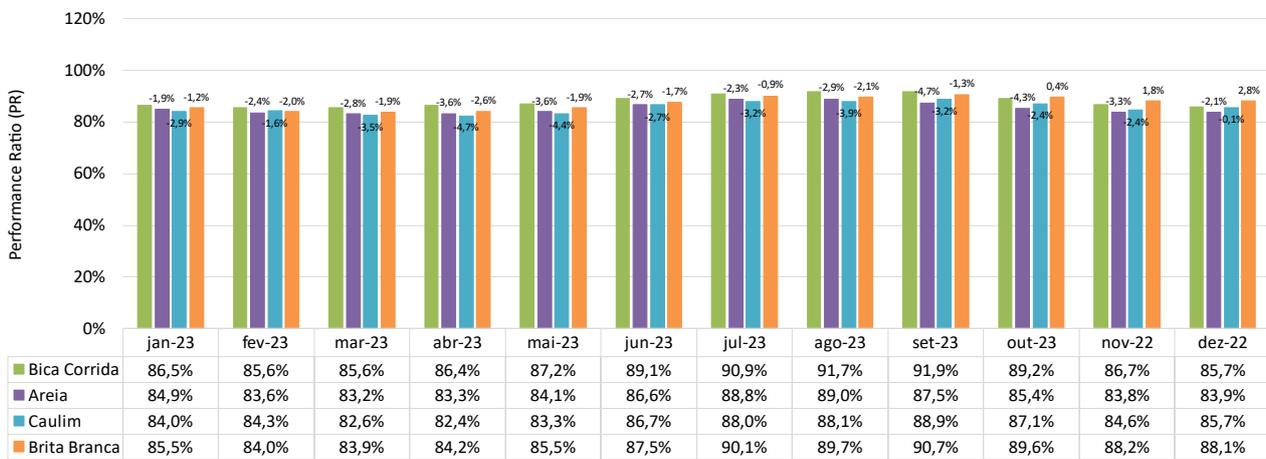


Figura 6 – Resultados de PR bifacial mensal para os sistemas analisados.

A Fig. 7 apresenta a taxa de desempenho bifacial corrigida por temperatura mês a mês para os sistemas avaliados. Além de eliminar as diferenças entre sistemas em diferentes tipos de solo, a correção por temperatura da PR bifacial retirou dos resultados as perdas por temperatura, principal fator contribuinte para a sazonalidade observada nos resultados anteriores. Além disso, os diferentes níveis de irradiação incidente nos sistemas acarretam também diferenças na temperatura de operação dos módulos, resultando em perdas distintas por temperatura. Estas perdas também são compensadas por esta métrica, pois a temperatura medida nas costas dos módulos é utilizada na correção. Sendo assim, obtêm-se resultados muito próximos para o desempenho dos sistemas analisados (Tab. 3), com diferença máxima absoluta de apenas 0,8%, mostrando a eficácia da métrica em compensar os ganhos de bifacialidade e perdas por temperatura nestes sistemas.

A Fig. 8 traz um resumo dos resultados apresentados, ilustrando os valores de PR convencional, bifacial e bifacial compensada por temperatura para os quatro sistemas avaliados. Todos os valores já apresentam a correção com base nos valores obtidos durante o período de *baseline*. Observa-se de forma clara uma diferença de até 2,3% entre os valores de PR convencional, com um aumento da diferença acompanhando o aumento do albedo sob o sistema, mostrando que as diferenças ocorrem, majoritariamente, em função do ganho bifacial.

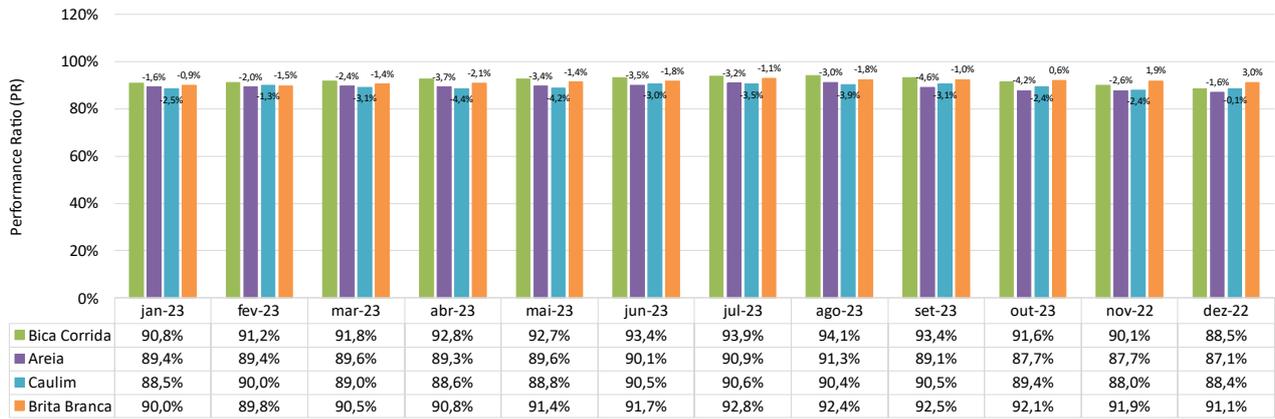


Figura 7 – Resultados de PR bifacial compensada pela temperatura mensal para os sistemas analisados.

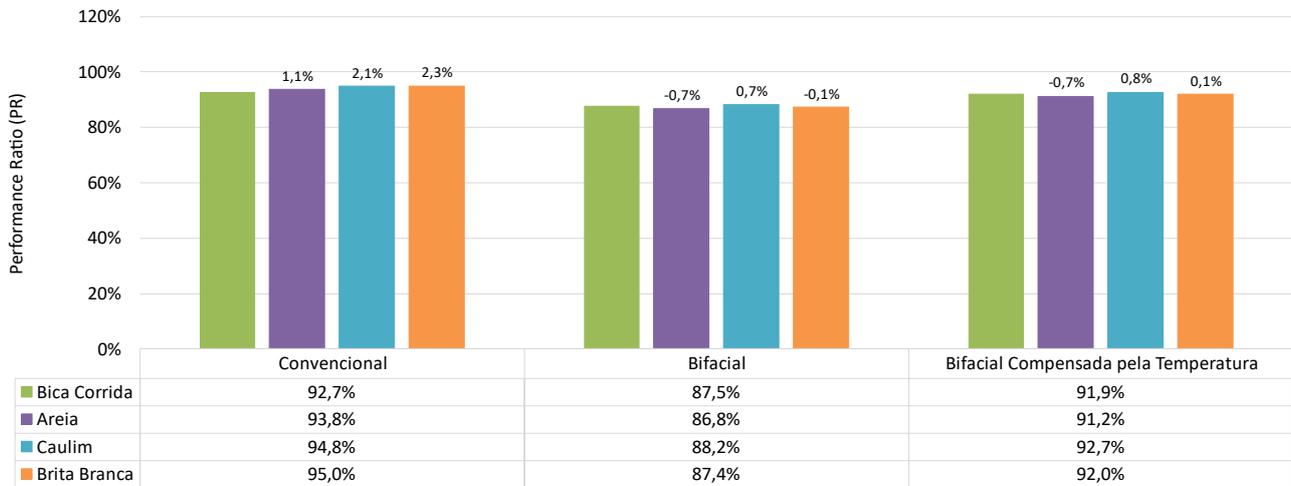


Figura 8 – Resultados das figuras de mérito corrigidas pelo *baseline* para os sistemas analisados.

A PR bifacial, por outro lado, já apresenta valores bastante coincidentes, com uma diferença máxima entre os sistemas de 0,7%. Mostrando uma compensação adequada do ganho bifacial para os diferentes níveis de albedo. A PR bifacial corrigida por temperatura, ao contrário das expectativas, apresenta uma diferença máxima de 0,8%, insignificamente acima da PR bifacial, podendo indicar que as diferenças nas perdas por temperatura entre os sistemas são bastante similares e pouco impactadas pelo albedo do solo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, o cálculo dos diferentes tipos de PR para sistemas eletricamente idênticos, mas sobre diferentes tipos de solo com albedos variando de 0,26 a 0,52, permitiu avaliar a eficácia das métricas empregadas na correção da PR por bifacialidade e temperatura. Ao analisar os dados apresentados, foi possível concluir que o impacto da temperatura e do coeficiente de bifacialidade é significativo nos sistemas e não deve ser ignorado. Portanto, é essencial utilizar PRs adicionais, além da convencionalmente empregada, para uma avaliação mais precisa. Além disso, ao avaliar o desempenho de uma usina em grande escala, a correção da bifacialidade se torna indispensável, pois permite observar o verdadeiro desempenho sem superestimar o sistema, como ocorreria com uma PR que não a considera. Embora a PR bifacial corrigida pela temperatura possa não ser amplamente utilizada em avaliações de projetos de usinas, é de extrema importância para analisar o desempenho durante a sua operação. Como demonstrado, essa abordagem elimina as perdas causadas pela temperatura, proporcionando uma visão mais precisa do desempenho do objeto em análise.

