

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Samuel Argenton Pas

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS EM
ESTRUTURA DE SUPORTE DE ALTURA MODERADA E INCLINAÇÃO FIXA**

Florianópolis

2024

Samuel Argenton Pas

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS EM
ESTRUTURA DE SUPORTE DE ALTURA MODERADA E INCLINAÇÃO FIXA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Marília Braga

Coorientadora: Anelise Medeiros Pires

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Pas, Samuel Argenton
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS
EM ESTRUTURA DE SUPORTE DE ALTURA MODERADA E INCLINAÇÃO
FIXA / Samuel Argenton Pas ; orientador, Marília Braga,
coorientador, Anelise Medeiros Pires, 2024.
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Estruturas de Fixação. 3.
Módulos Bifaciais. 4. Simulação de Sistemas Fotovoltaicos.
I. Braga, Marília. II. Pires, Anelise Medeiros . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

Samuel Argenton Pas

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS
EM ESTRUTURA DE SUPORTE DE ALTURA MODERADA E INCLINAÇÃO
FIXA**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 23 de fevereiro de 2024



Documento assinado digitalmente

Miguel Moreto

Data: 24/02/2024 15:58:25-0300

CPF: ***.850.100-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Eng. Marília Braga
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Anelise Medeiros Pires
Co-orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Helena Flávia Naspolini, Dra
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Gustavo Xavier de Andrade Pinto, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Daniel Odilio dos Santos, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha família, amigos e ao meu esforço e coragem.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a minha família e amigos. Esta jornada foi marcada por desafios e momentos difíceis e, vocês foram fundamentais para construir grandes e incríveis memórias durante esse período, me divertindo e auxiliando durante todo o tempo. Sou uma pessoa extremamente otimista e feliz porque tenho vocês ao meu lado.

Quero expressar um agradecimento especial à minha orientadora Má e coorientadora Ane. Vocês foram estrelas que brilharam, durante esses anos de trabalho juntos, vocês me ensinaram muito mais do que está escrito no presente estudo. Com vocês aprendi sobre comprometimento, a trabalhar em equipe, que colegas de trabalho podem se tornar amigos admiráveis e também a ser alguém melhor. Agradeço por fazerem o Samuel ser um outro alguém depois de vocês.

Além disso, gostaria de agradecer ao Leonardo Guilherme por todo auxílio e carinho durante os 3 anos que estivemos juntos. Mesmo sem que eu precisasse pedir ajuda, você sempre esteve presente, pronto para auxiliar. Muito obrigado!

Também gostaria de expressar minha gratidão ao Bruno de Marco e Vinícius Cantú. Vocês foram colegas de trabalho incríveis durante minha jornada no Fotovoltaica UFSC. Deixo aqui o meu agradecimento por toda a colaboração ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Por último, gostaria de agradecer a Canadian Solar e a IBRAP pela doação dos equipamentos que possibilitaram a elaboração desse estudo. Além disso, todo o apoio da equipe do Laboratório Fotovoltaica UFSC, mesmo que indiretamente, todos auxiliaram na construção dos resultados.

“Em todo o espaço há energia... é (só) uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia.”
(TESLA, Nicola, 1900).

RESUMO

O objetivo deste estudo é validar a eficácia da estrutura de fixação não convencional de módulos conhecida como EcoGround. Foi realizada uma análise de produtividade (yield) e da taxa de desempenho (Performance Ratio – PR) de módulos bifaciais instalados nesta inovadora estrutura de fixação. Esta solução de fixação de módulos fotovoltaicos apresenta diversas vantagens, como uma maior potência instalada por área, agilidade na instalação, ser compacta, entre outras características relevantes. A estrutura está implantada no Laboratório Fotovoltaica UFSC em Florianópolis-SC (27,4°S, 48,4°O), com uma inclinação fixa de 15°. Notavelmente, a estrutura se destaca pela proximidade ao solo e pelo uso de alumínio extrudado, diferenciando-se das estruturas convencionais disponíveis no mercado. O objetivo deste trabalho é investigar se as características únicas dessa instalação impactam negativamente a geração de energia. Além disso, é apresentado um estudo comparativo entre o desempenho medido e simulado, utilizando o software PVsyst. Apesar de ser uma estrutura modular, fácil de instalar e que minimiza o uso de alumínio, este tipo de solução ainda não é amplamente adotado no mercado fotovoltaico. Os resultados revelam um desempenho satisfatório para o clima local, com uma produtividade mensal medida de 113,2 kWh/kWp, em comparação com a produtividade mensal prevista por simulações de 102,1 kWh/kWp. Quanto à PR, a média foi de 90,9% para a PR medida e 93,4% para a PR simulada, ao longo de um ano. Apesar da inclinação padronizada da estrutura, que não é otimizada para Florianópolis-SC, o sistema apresentou uma produtividade notável, média de 1.358,6 kWh/kWp.ano durante o período avaliado, demonstrando eficiência consistente. Esses resultados sugerem que, apesar das características singulares da estrutura EcoGround, sua influência sobre a produção de energia é favorável. A estrutura, embora não convencional no mercado, revela-se como uma alternativa eficaz, proporcionando uma solução sustentável e eficiente para a geração de energia fotovoltaica.

Palavras-chave: Estruturas de Fixação; Módulos Bifaciais; Simulação de Sistemas Fotovoltaicos.

ABSTRACT

The objective of this study is to validate the effectiveness of the unconventional module mounting structure known as EcoGround. An analysis of productivity (yield) and performance ratio (PR) was conducted for bifacial modules installed on this innovative mounting structure. This photovoltaic module mounting solution offers several advantages, such as higher installed power per area, installation agility, compactness, and other relevant features. The structure is deployed at the Photovoltaic Laboratory UFSC in Florianópolis-SC (27.4°S, 48.4°W) with a fixed inclination of 15°. Notably, the structure stands out for its proximity to the ground and the use of extruded aluminum, distinguishing it from conventional structures available in the market. The aim of this work is to investigate whether the unique characteristics of this installation negatively impact energy generation. Additionally, a comparative study is presented between measured and simulated performance using the PVsyst software. Despite being a modular and easy-to-install structure that minimizes the use of aluminum, this type of solution is not yet widely adopted in the photovoltaic market. The results reveal satisfactory performance for the local climate, with a measured monthly productivity of 113.2 kWh/kWp compared to the predicted monthly productivity of 102.1 kWh/kWp from simulations. Regarding PR, the average was 90.9% for the measured PR and 93.4% for the simulated PR over the course of a year. Despite the standardized inclination of the structure, not optimized for Florianópolis-SC, the system demonstrated notable productivity, averaging 1,358.6 kWh/kWp.year during the evaluated period, showing consistent efficiency. These results suggest that, despite the unique characteristics of the EcoGround structure, its influence on energy production is favorable. The structure, although unconventional in the market, proves to be an effective alternative, providing a sustainable and efficient solution for photovoltaic energy generation.

Keywords: Fixing Structures; Bifacial Modules; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	19
Figura 2 - Estrutura EcoGround Norte 15°.	21
Figura 3 – Estrutura cristalina do SiO ₂	24
Figura 4 – Representação níveis de energia, bandas de condução e de valência.	26
Figura 5 – Junção PN e região de depleção.....	27
Figura 6 – Desenho esquemático de uma visão interna da célula fotovoltaica.	28
Figura 7 – Representação da associação de células fotovoltaicas em um módulo fotovoltaico.....	30
Figura 8 – Representação estrutural de um módulo fotovoltaico convencional.	30
Figura 9 – Junção PN e região de depleção.....	32
Figura 10 – Componentes da irradiação solar.	33
Figura 11 – Modelo de fixação em um determinado tipo de telhado.....	35
Figura 12 – Modelo de fixação no solo.....	35
Figura 13 – Vista panorâmica do Laboratório Fotovoltaica UFSC.....	36
Figura 14 – Vista panorâmica traseira do Laboratório Fotovoltaica UFSC.....	37
Figura 15 – Estrutura EcoGround instalada no Laboratório Fotovoltaica UFSC	37
Figura 16 – Representação lateral da estrutura EcoGround e suas dimensões.	38
Figura 17 – A estação solarimétrica do Laboratório Fotovoltaica UFSC.	40
Figura 18 – Simulação de modelagem tridimensional e projeção de sombreamento para um dia no mês de junho (a) e outro dia no mês de dezembro (b). As simulações foram realizadas por meio do software Ecotect.	42
Figura 19 – Diferentes níveis de sombreamento ao longo do ano, conforme mostrado nos registros norte (a), intermediário (b) e sul (c).	43
Figura 20 – Fluxograma dos critérios de avaliação dos dados utilizados para a análise de <i>yield</i>	45
Figura 21 – Fluxograma dos critérios de avaliação dos dados utilizados para a análise de PR.	46
Figura 22 – Percentual de dias válidos em cada mês para análise de Yield e PR.	46
Figura 23 – Percentual de dias válidos para cada mês.	50
Figura 24– Produtividade mensal medida para os subsistemas 1 (norte), 2 (intermediário) e 3 (sul).....	51

Figura 25–PR mensal medida para os subsistemas 1 (norte), 2 (intermediário) e 3 (sul).	53
Figura 26 – Irradiação global horizontal média diária medida e prevista com base em dados históricos, assim como a temperatura ambiente média prevista e medida.....	53
Figura 27 – Produtividade obtidos a partir da simulação no PVsyst com dados históricos (previsto) e medidos (esperado) e produtividade medida.	54
Figura 28 –PR obtidos a partir da simulação no PVsyst com dados históricos (prevista) e medidos (esperada) e PR medida.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções dos componentes que constituem o módulo fotovoltaico.	31
Tabela 2 – Módulo Canadian Solar CS3U-375MB-AG, principais parâmetros (STC).	39
Tabela 3 – Inversor SMA Sunny Boy 1200, principais parâmetros.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CdTe - Telureto de Cádmio

CIGS – Dissenleto de Cobre e Índio e Gálio

COP – Conferência das Nações Unidas Sobre Mudanças do Clima

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EVA – Etileno Acetato de Vinilo

IEE – Instituto de Energia e Ambiente

LID – degradação induzida pela luz

MME – Ministério de Minas e Energia

Mono-Si – Silício Monocristalino

Multi-Si – Silício Multicristalino

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PR – Performance Ratio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	A ENERGIA SOLAR E SUA HISTÓRIA NO BRASIL.....	17
1.2	CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR E JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS	18
1.3	A ESTRUTURA ECOGROUND.....	20
1.4	OBJETIVOS	21
1.4.1	OBJETIVO GERAL	21
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR.....	23
2.1.1	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	23
2.1.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E MÓDULOS CONVENCIONAS	26
2.1.3	MÓDULOS BIFACIAIS E O ALBEDO	31
2.2	ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO CONVENCIONAIS	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	O LABORATÓRIO FOTOVOLTAICA-UFSC	36
3.2	COMPONENTES FÍSICOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	37
3.3	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS DADOS	41
3.4	SOFTWARE E SIMULAÇÃO.....	47
3.4.1	O ATLAS SOLARIMÉTRICO.....	47
3.4.2	O SOFTWARE PVSYSY.....	48
3.4.3	SIMULAÇÕES DO SISTEMA	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS	51
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS PREVISTOS, ESPERADOS E MEDIDOS	53

4.3	COMPARATIVO DO VALOR DE POTÊNCIA POR ÁREA: ESTRUTURA CONVENCIONAL X ECOGROUND	55
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 A ENERGIA SOLAR E SUA HISTÓRIA NO BRASIL

Em 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico, um fenômeno físico no qual a luz incidente é capaz de gerar uma corrente elétrica. Os elétrons presentes no material semicondutor absorvem os fótons da luz solar. Estes fótons, carregados de energia, permitem que os elétrons se movimentem, resultando na geração de uma corrente elétrica. (PORTAL SOLAR, 2022)

O estudo do efeito fotovoltaico rendeu um prêmio Nobel para Albert Einstein em 1922. Desde então, foram realizadas diversas pesquisas que proporcionaram a geração de energia solar através de módulos fotovoltaicos. Sabe-se que a energia solar fotovoltaica é uma fonte sustentável e renovável, que utiliza a luz solar para gerar energia e abastecer cidades e diversas demandas como iluminação, aquecimento, ventilação, aparelhos eletrônicos, entre outras.

A energia solar no Brasil teve um importante marco passo em 2012, quando foi lançada a resolução normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), normativa que incentivou a energia fotovoltaica por introduzir o sistema de compensação. No sistema de compensação é permitido que o excesso de eletricidade gerado pelos consumidores seja injetado na rede elétrica e compensado na conta de luz. Atualmente há sistemas fotovoltaicos em diversos telhados espalhados pelo Brasil, gerando energia a nível residencial, sendo as residências auto consumidores desse tipo de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade. Tudo isso nasceu do incentivo da criação dessa normativa de 2012 (EPD, 2023).

Segundo o site do governo brasileiro, em relação a geração de energia através da fonte solar, o Brasil se tornou em 2020 o oitavo maior país em capacidade instalada (GOV, 2023). Este feito é resultado do clima tropical brasileiro propício somado a todas as medidas que foram tomadas para incentivar esse tipo de energia, como citado anteriormente, a resolução normativa 482.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em 2021, o Brasil conquistou o quarto lugar no ranking dos países que mais instalaram energia solar (ABSOLAR, 2022), mostrando como ano a ano esse tipo de geração de energia está ganhando importância e espaço no cenário brasileiro. Outro ponto importante é a sustentabilidade desta fonte de energia: desde 2012 até 2021, a energia solar evitou no Brasil

uma emissão de mais de 12,5 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera. Esta declaração foi feita na Conferência das Nações Unidas para Mudanças Climáticas, a COP26 que ocorreu em Glasgow na Escócia (ABSOLAR, 2021).

1.2 CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR E JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS

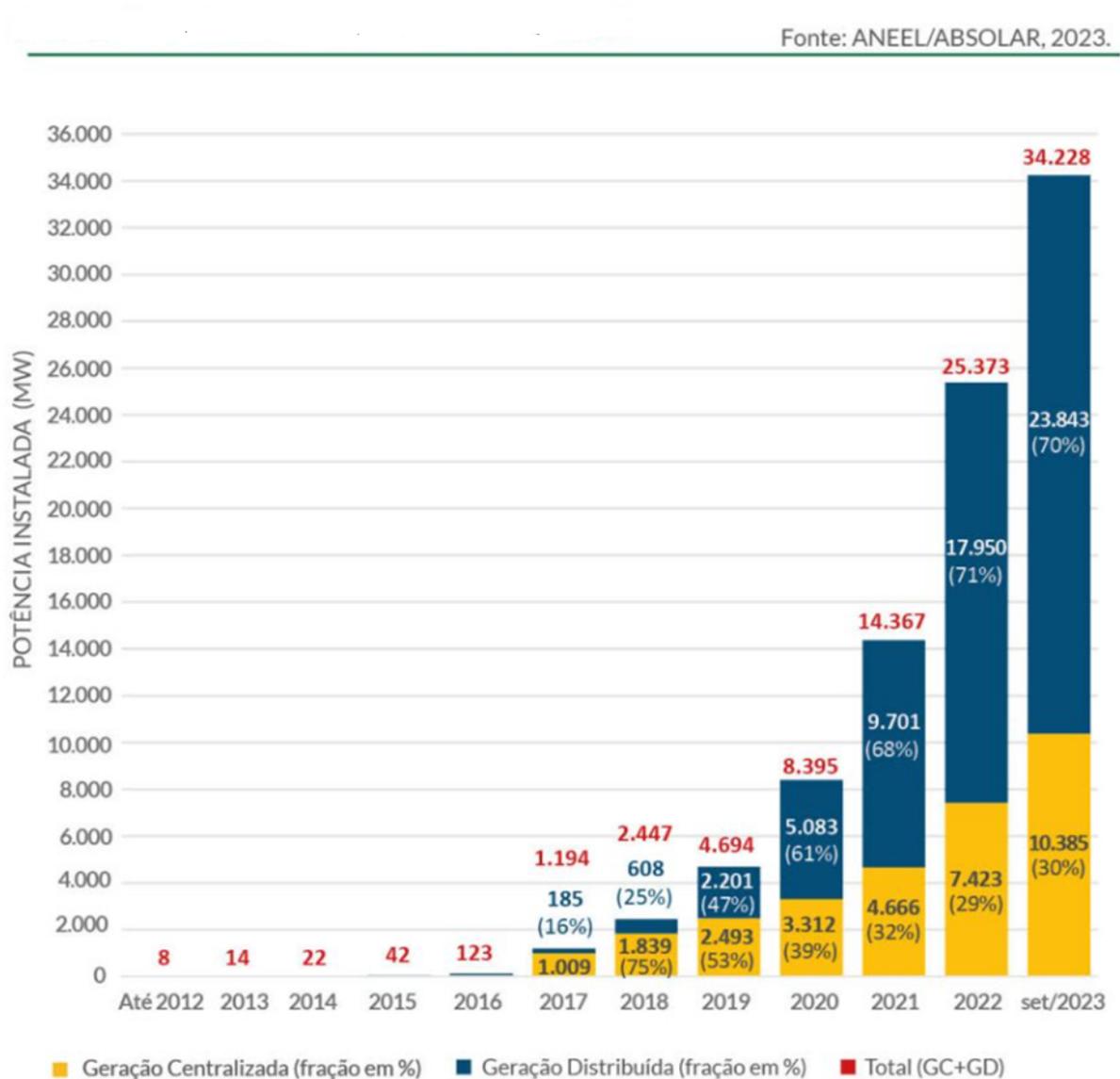
O crescimento da energia solar se tornou evidente ao redor de todo o mundo. Em 2022 foi divulgado que a energia fotovoltaica se tornou a segunda mais utilizada no planeta, com uma capacidade total de um terawatt (TW) — o equivalente a um trilhão de watts (EDP, 2023).

Focando sobre seu crescimento no Brasil, sabe-se que a primeira usina solar em 2011 foi instalada no país, no município sertanejo do Ceará, sendo que essa também foi a primeira usina solar da América Latina (EDP, 2023). Além das usinas de geração centralizada, existem usinas de geração distribuída e pequenos sistemas fotovoltaicos instalados em residências, demonstrando a atual popularização desse tipo de geração de energia.

Já trazendo para um contexto mais atual, a energia solar hoje fica atrás apenas da fonte hídrica e alcançou o posto de segunda maior fonte de energia no Brasil, com 23,9 gigawatts (GW) em operação, segundo levantamento ABSOLAR. O resultado foi obtido através da soma de usinas e sistemas próprios de geração de energia, como o uso doméstico. Além do mais, segundo Arthur Siqueira, Engenheiro Eletricista e integrante do Grupo de Pesquisa em Governança Energética da IEE/USP, em 2023 o Brasil alcançou a marca de 1,6 milhões de sistemas instalados em todo o país, sendo que 79% deles são residenciais (ABSOLAR, 2023).

Segundo o Ministério de Minas e Energia, a fonte solar entre janeiro de 2023 e setembro de 2023 teve um acréscimo de 3 GW na modalidade de geração centralizada, representando 43,9% do aumento geral na capacidade acrescentada de geração de energia (MME/EPE, 2023), ou seja, pode-se dizer que, neste período, a energia solar representou quase metade da expansão da matriz energética (em potência) do nosso país. A evolução da tecnologia é apresentada na Figura 1. É observado que os 3 GW de crescimento informados pelo MME é representado pela parte de geração centralizada que se encontra em amarelo na Figura 1.

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR (2023).

Como é amplamente reconhecido, esta é uma área que tem recebido crescente atenção e está em constante expansão. É natural presumir que esse aumento de interesse seja acompanhado por investimentos e pesquisas adicionais. O novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) irá investir R\$ 41,5 bilhões em usinas solares, correspondendo a mais da metade da geração de energia prevista pelo PAC (MME/EPE, 2023). Além disso, segundo o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, a energia solar tende a crescer muito mais com o hidrogênio verde, ou seja, trazendo muito mais investimentos para pesquisa na área e sendo o abastecimento dos futuros eletrolisadores para a produção do hidrogênio verde.

Para chegar nas tecnologias atuais, diversas pesquisas e aperfeiçoamentos foram feitos nas células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos que são conhecidos hoje. Em 1883, o norte-americano Charles Fritts criou a primeira célula solar que possuía uma eficiência de 1%. Já em 1954, o laboratório norte-americano Bell descobriu que semicondutores de silício dopado com certas impurezas, eram hipersensíveis à luz. Dessa forma, elevaram a eficiência das células para 6%. Em 1957, a corrida espacial decorrente da guerra fria, impulsionou o desenvolvimento das células fotovoltaicas e sua eficiência chegou a mais de 15%. Nos anos seguintes, diversos tipos de células foram desenvolvidos, como de silício monocristalino (mono-Si), silício multicristalino (multi-Si), telureto de cádmio (CdTe), entre outras, sendo que as pesquisas desenvolvidas foram aumentando a eficiência das células e diminuindo seu preço e, por isso, atualmente são difundidas em nível global (Iberdrola, 2023).’

Como informado anteriormente, é de conhecimento que hoje a fonte de geração fotovoltaica se tornou a segunda mais utilizada no planeta devido as inúmeras pesquisas que foram feitas, desenvolvendo cada vez mais os módulos e sistemas fotovoltaicos e deixando eles mais baratos para serem comercializados. Portanto, as pesquisas possuem um cunho essencial para a evolução. Esse estudo desenvolvido como trabalho final de curso, foi analisado o desempenho de módulos bifaciais instalados em um novo tipo de estrutura, tal estudo foi realizado com o intuito de garantir inovação e *insights* para essa área tão importante.

1.3 A ESTRUTURA ECOGROUND

A solução EcoGround, estrutura apresentada na Figura 2, é uma proposta de estrutura padronizada, compacta e versátil, que se destaca por sua capacidade de ser implantada em solo ou sobre coberturas niveladas. Com uma montagem rápida, essa estrutura é ideal para diversos tipos de terrenos ou superfícies, sendo adaptável conforme as características ambientais e climáticas do local de instalação. Sua fixação à superfície pode ser realizada em vigas, estacas ou blocos de concreto, dimensionados de acordo com as especificidades de cada ambiente.

Figura 2 - Estrutura EcoGround Norte 15°.



Fonte: IBRAP (2023)

A estrutura é fixada ao solo por suportes que geralmente deixam os módulos fotovoltaicos próximos ao solo. Essa proximidade dificulta a instalação e manutenção do sistema, além de reduzir a incidência de irradiação na parte traseira dos módulos, diminuindo os benefícios da bifacialidade. Uma alternativa é usar suportes elevados, mas isso pode aumentar os custos e a carga de vento que precisa ser suportada pela estrutura.

Devido à latitude local, a inclinação ideal para implementar um sistema fotovoltaico em Florianópolis (cidade na qual foi conduzido o presente estudo) é de 27°. No entanto, em contraste com essa inclinação ideal, a estrutura padronizada possui um ângulo fixo de 15°. Sobre essa disparidade, um estudo realizado por PAS (2022) acerca da estrutura Ecoground sugere que, devido à menor inclinação nas estruturas padronizadas, é viável adotar um layout que maximize a potência por área. Ao considerar a redução nas alturas ao longo do eixo vertical, esse arranjo resulta em menos sombreamento, possibilitando a proximidade entre as estruturas e os módulos fotovoltaicos.

1.4 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo avaliar a produtividade real e a taxa de desempenho de módulos bifaciais instalados na estrutura EcoGround, além de avaliar a eficácia do modelo de simulação para esse tipo de configuração.

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar uma análise abrangente da produtividade (*yield*) e da *Performance Ratio* (PR) de um sistema composto por módulos bifaciais instalados em estrutura de fixação não convencional.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a produtividade (*yield*) do sistema fotovoltaico;
- Analisar a *Performance Ratio* (PR) do sistema fotovoltaico;
- Realizar uma simulação de módulos bifaciais no PVsyst, sendo a simulação feita com dados de irradiação global horizontal históricos do Atlas Brasileiro de Energia Solar;
- Realizar uma simulação de módulos bifaciais no PVsyst, sendo a simulação feita com dados medidos em campo;
- Comparar os resultados das simulações com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar e com dados medidos em campo;
- Comparar as simulações com dados medidos em campo e as análises de produtividade e PR feitas com esses mesmos dados;
- Fazer um comparativo de potência por área de módulos instalados em estrutura convencional e instalados na estrutura EcoGround.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR

2.1.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

Para compreender plenamente o funcionamento do efeito fotovoltaico, é essencial ter conhecimento de alguns conceitos adicionais. Inicialmente, é crucial entender a teoria de Max Planck sobre a quantização de energia, familiarizar-se com a existência do efeito fotoelétrico, explorar as bandas de energia em sólidos cristalinos e compreender os níveis de energia na camada de valência que determinam a condução ou não do elétron. Somente através dessa compreensão abrangente é possível entender os detalhes que envolvem a manifestação do efeito fotovoltaico.

A quantização de energia de Max Planck afirma que a energia pode ser quantificada, dessa forma, ela pode apenas ser emitida ou absorvida apenas em quantidades discretas, chamadas de quanta. Max fez duas suposições sobre a quantização de energia e a condição para absorção de energia, o que provou justamente sobre a restrição de ser apenas quantidades discretas. Com seus estudos, foi possível provar que um oscilador somente absorve ou emite energia quando há uma mudança de estado quântico (SILVA, 2020).

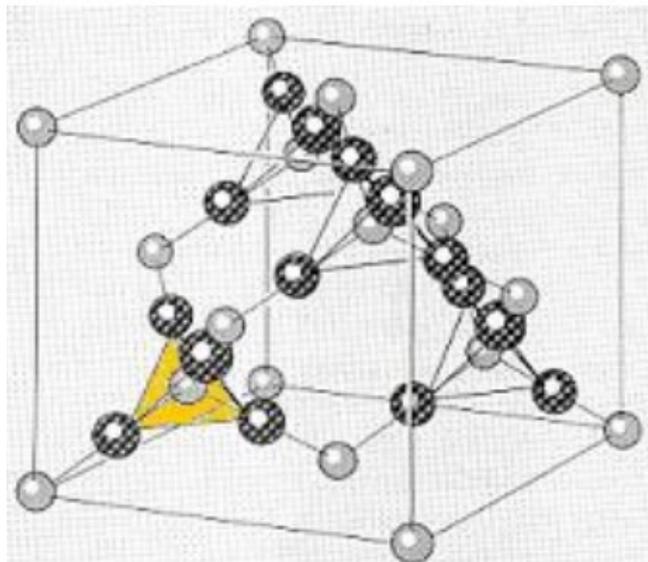
A teoria de Max Planck é importante para o entendimento do efeito fotovoltaico, uma vez que explica como os fótons podem transferir sua energia aos elétrons, sobre os quanta (energia quantizada), assim, podem ser emitidas ou absorvidas apenas em quantidades discretas, nesse contexto, para o efeito fotovoltaico os quanta de energia são os fótons que são as partículas de luz.

Já sobre o efeito fotoelétrico, é importante destacar que esse efeito consiste na emissão de elétrons por um material quando ele é exposto à luz. O efeito fotoelétrico é explicado pela teoria de Planck. É de conhecimento que os fótons são os quanta e podem transferir sua energia aos elétrons, fazendo com que esses por sua vez, possam ser ejetados do material. SILVA (2020, p. 36) na sua revisão sobre o efeito fotovoltaico, traz a definição do efeito fotoelétrico:

Conforme Eisberg e Resnick (1994), Hertz em 1886 e 1887 ao se debruçar sobre o estudo que culminou na constatação das ondas eletromagnéticas, verificou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorria com maior facilidade quando se fazia incidir luz ultravioleta sobre o eletrodo negativo. A ejeção de elétrons de metais mediante a incidência de luz sobre eles é denominada efeito fotoelétrico.

Por fim, é necessário compreender as bandas de energia em sólidos cristalinos. As bandas de energia são regiões do espaço de energia onde os elétrons podem existir. Os sólidos cristalinos têm duas bandas de energia principais: a banda de valência e a banda de condução. Os elétrons na banda de valência não podem conduzir corrente elétrica, enquanto os elétrons na banda de condução podem. SILVA (2020) traz em seu estudo uma análise dos sólidos cristalinos que são caracterizados por uma estrutura periódica de disposição dos seus átomos, chamadas de rede cristalina. Essa estrutura é formada pela repetição de um padrão geométrico ao longo do cristal, na Figura 3 é apresentado a estrutura do SiO₂ (dióxido de silício ou sílica).

Figura 3 – Estrutura cristalina do SiO₂



Fonte: Disponível em: < <https://11nq.com/edisciplinasuspbr> > Acesso em: 01/01/2023

De acordo com KITTEL (2006), os sólidos cristalinos podem ser classificados de acordo com o tipo de ligação química entre os seus átomos. Os principais tipos de ligação química são:

- Ligação covalente: os átomos compartilham elétrons para formar ligações entre si. Os sólidos covalentes, como o diamante e o grafeno, são geralmente duros e quebradiços;
- Ligação iônica: os átomos perdem ou ganham elétrons para formar íons com cargas opostas. Os sólidos iônicos, como o sal e o óxido de cálcio, são geralmente duros e quebradiços;

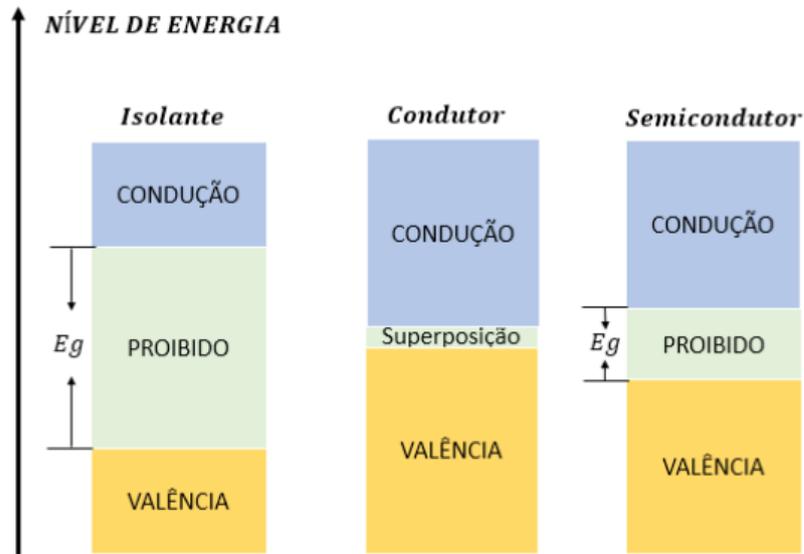
- Ligação metálica: os átomos compartilham elétrons livres para formar um mar de elétrons. Os sólidos metálicos, como o cobre e o ferro, são geralmente maleáveis e dúcteis.

Sobre as redes cristalinas e os níveis de energia para formação das bandas de condução ou bandas proibidas, SILVA (2020) afirma que:

Quando o número de átomos é muito grande, como em uma rede cristalina, os níveis de energia tornam-se próximos a ponto de serem considerados uma faixa contínua de energia permitidas aos elétrons, que são as bandas de energia. Da mesma forma que em um átomo existem intervalos de energia que o elétron não pode assumir, nos sólidos também há intervalos de energia que os elétrons não podem assumir. Essas regiões de energia proibida são chamadas de bandas proibidas. Entre duas bandas consecutivas existe uma faixa denominada banda proibida.

A banda de energia mais baixa que contém elétrons é a banda de valência, os elétrons dessa banda não podem se mover livremente pelo sólido, já a banda de energia mais alta que contém elétrons é chamada de banda de condução, nela os elétrons podem se mover livremente pelo sólido, dessa forma, gerar corrente elétrica. Na Figura 4 é possível observar a representação do nível de energia para os materiais isolantes, condutores e semicondutores. E_g representa a quantidade de energia necessária para levar um elétron da banda de valência para a banda de condução. Nos materiais condutores há uma sobreposição entre as duas bandas, fazendo que os elétrons se movimentem mais facilmente e gerem a corrente elétrica. Já nos materiais semicondutores e isolantes, é necessário um gasto energético E_g para realizar essa movimentação, notando que para o material isolante essa quantidade de energia é muito maior e considerável SILVA (2020).

Figura 4 – Representação níveis de energia, bandas de condução e de valência.



Fonte: SILVA (2020).

O efeito fotovoltaico é o processo de geração de corrente elétrica a partir da luz. O processo ocorre em materiais semicondutores, os quais tem condutividade elétrica intermediária entre a dos metais e a dos isolantes. Quando um fóton, que é uma partícula de luz, atinge um elétron na banda de valência, o mesmo pode transferir sua energia para o elétron. Se a energia do fóton for maior do que a diferença de energia entre as duas bandas, o elétron pode subir para a banda de condução. Quando o elétron está na banda de condução, ele é livre para se mover pelo material, sendo que o movimento do elétron cria uma corrente elétrica. Para explicar o efeito fotovoltaico, SILVA (2020) escreveu:

O efeito fotovoltaico é a geração de uma corrente elétrica em uma junção pn, sob certas condições. Quando um quantum de luz com valor de energia $h\nu$ maior que a largura E_g da banda proibida entre a banda de valência e a banda de condução do cristal incide na célula fotovoltaica, é absorvido por um elétron da banda de valência. Consequentemente o elétron salta para a banda de condução e deixa um buraco em seu lugar, o que é descrito como a formação de um par elétron-buraco. A existência da diferença de potencial na região de depleção faz com que o elétron se movimente para a região n e o buraco para a região p. Para uma iluminação constante haverá formação de elevado número de pares elétron-buraco, que resultarão numa corrente elétrica caso a região p e a região n sejam conectadas por um condutor.

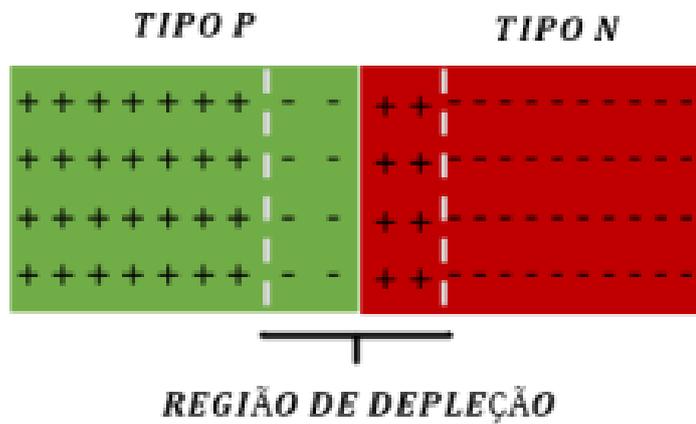
2.1.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E MÓDULOS CONVENCIONAS

Para entender o funcionamento das células fotovoltaicas, é necessário entender sobre a junção PN. Essa junção, representada na Figura 5, é formada por dois semicondutores com

propriedades elétricas diferentes. Quando estes dois semicondutores são unidos, os elétrons livres de um lado da junção se difundem para o outro lado, dessa forma, caso a junção PN seja conectada a um circuito, pode-se criar um fluxo de corrente elétrica. SILVA (2020) escreveu sobre a junção PN:

Supondo um momento antes da superposição entre os semicondutores dopados, sabe-se que o lado p possui elétrons que podem se movimentar em sua rede cristalina e no lado n, há buracos que também podem se movimentar pelo cristal. Quando os lados são agrupados, os elétrons do lado n migram para o lado p e os buracos do lado p migram para o lado n. No equilíbrio térmico a interface entre os lados assume a configuração demonstrada na figura a seguir e recebe o nome de região de depleção (FEYNMAN et al., 2008; CHAVES et al., 2005).

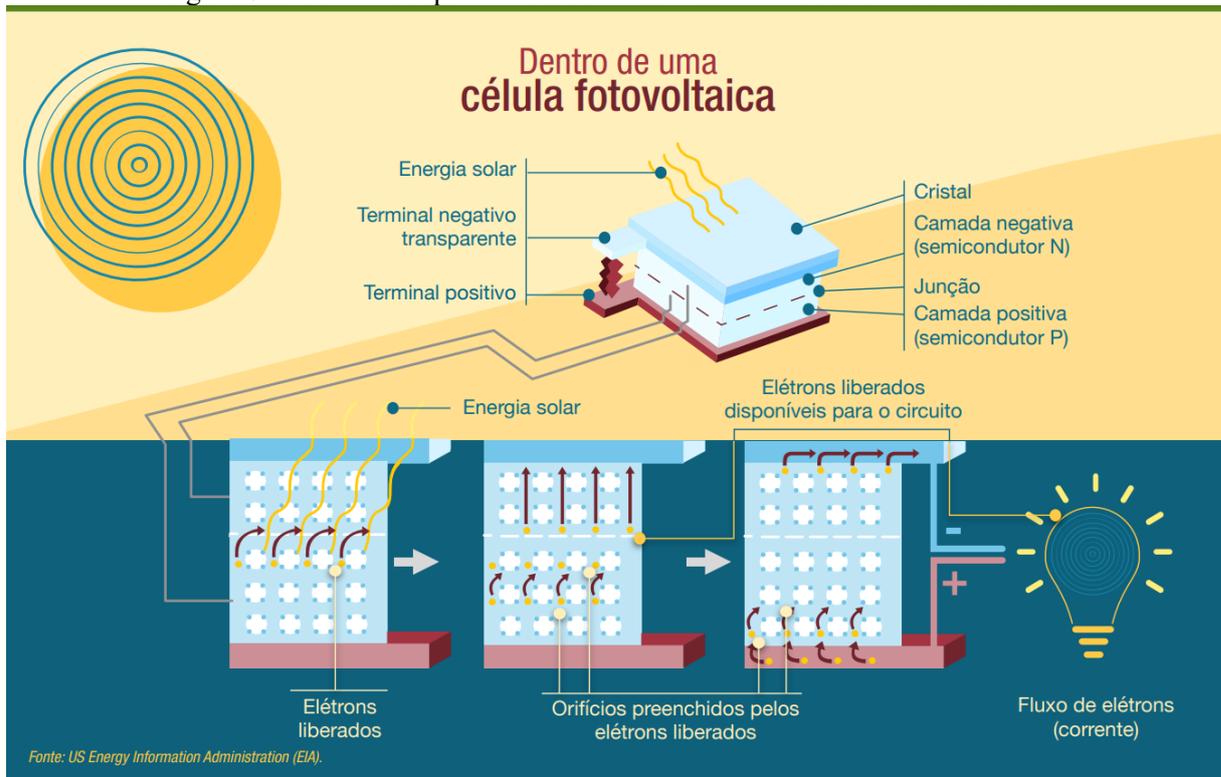
Figura 5 – Junção PN e região de depleção.



Fonte: SILVA (2020).

Na Figura 6 é apresentado o desenho de uma célula fotovoltaica, onde é apresentada a junção PN citada, além da circulação de elétrons livres e dos buracos liberados e preenchidos pela movimentação deles, notando que a geração da corrente elétrica ocorre quando a junção PN é conectada a um circuito.

Figura 6 – Desenho esquemático de uma visão interna da célula fotovoltaica.



Fonte: Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/inovacao/celulas-fotovoltaicas-fotoeletricas>> Acesso em: 03/01/2023.

Como explicado na subseção 1.2 desse documento, a primeira célula fotovoltaica foi criada em 1883 e com eficiência de 1%. Atualmente, existem diversos tipos de células de diferentes tipos de tecnologias com eficiências muito maiores. CREMASCO (2021) traz um estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, sendo que as tecnologias mais conhecidas são:

- **Silício Monocristalino (mono-Si):** As células monocristalinas são fabricadas a partir de um lingote de silício monocristalino, criado por meio do processo Czochralski. Esse processo envolve o derretimento de silício de alta pureza e a solidificação lenta do material. O lingote de silício é então cortado em *wafers*, que são as placas finas que formam as células fotovoltaicas. Os *wafers* são tratados quimicamente para remover impurezas e aumentar a eficiência da célula. As células de silício monocristalino podem chegar a uma eficiência de 26,7% (FRAUNHOFER, 2020);
- **Silício Multicristalino (multi-Si):** As células de silício multicristalino são uma alternativa às células de silício monocristalino. Elas são mais baratas de fabricar e têm uma vida útil mais longa, são menos eficientes do que as

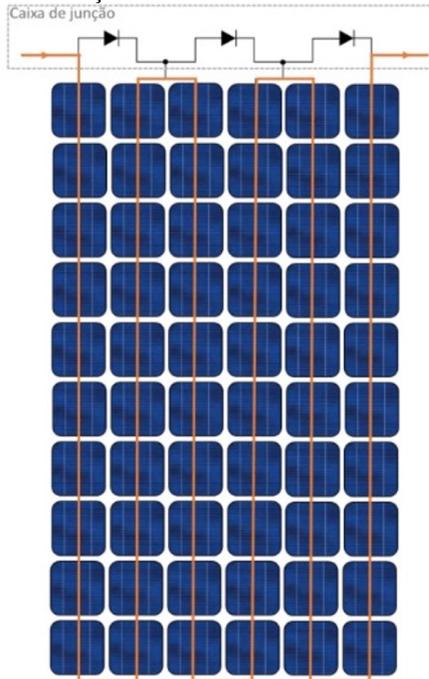
células de silício monocristalino, sendo que a eficiência máxima de células de silício multicristalino atingida em laboratório é de 22,3% (FRAUNHOFER, 2020);

- Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS): Essas células solares são uma tecnologia promissora para a geração de energia solar. Elas são fabricadas a partir de um filme fino de material semicondutor que é depositado em um substrato de vidro ou plástico. Elas são caracterizadas por um alto coeficiente de absorção, sendo que a eficiência máxima das células CIGS alcançada em laboratório é de 23,4% (PINHO et al, 2014) e (FRAUNHOFER, 2020);
- Telureto de Cádmio (CdTe): CdTe entre as tecnologias de filme fino é a que ocupa a maior participação no mercado CREMASCO (2021). Elas são fabricadas a partir de um filme fino de telureto de cádmio, que é depositado em um substrato de vidro ou plástico. Em uma comparação com as células de silício, elas possuem a desvantagem de seu elemento ser menos abundante, e sua eficiência máxima atingida em laboratório é de 21% (FRAUNHOFER, 2020).

Os módulos fotovoltaicos são compostos por diversas células conectadas em série, formando um circuito para a geração de corrente elétrica. Na Figura 7 há uma representação da associação das células para formarem um módulo fotovoltaico.

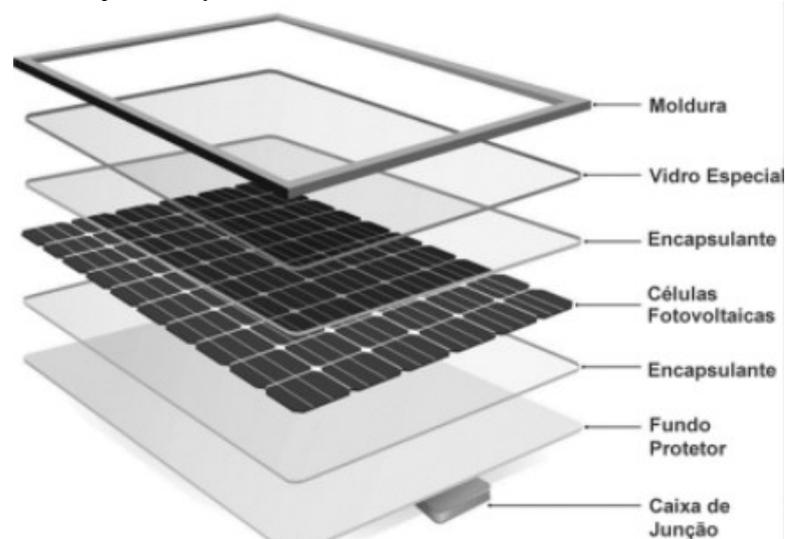
Os módulos fotovoltaicos são construídos para resistir às condições ambientais adversas a que estão sujeitos. Para isso, as células fotovoltaicas são encapsuladas em uma película de etileno acetato de vinilo (EVA). O EVA é um material flexível, translúcido e não reflexivo da radiação solar, ele também é um isolante elétrico, o que é importante para evitar que a corrente elétrica percorra caminhos indesejados. Para estabilizar a estrutura do módulo, são usadas molduras de alumínio e uma placa de vidro. As molduras de alumínio são leves e resistentes, e a placa de vidro protege as células de agentes atmosféricos. Uma representação da estrutura de um módulo fotovoltaico é apresentada abaixo na Figura 8 e seus componentes são descritos na Tabela 1.

Figura 7 – Representação da associação de células fotovoltaicas em um módulo fotovoltaico.



Fonte: Anelise Medeiros Pires.

Figura 8 – Representação estrutural de um módulo fotovoltaico convencional.



Fonte: Disponível em:

<[http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/004_documentos_instrucao/01_cadernos_de_instrucao\(ci\)/port_n_061_dec_13jan2023.html](http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/004_documentos_instrucao/01_cadernos_de_instrucao(ci)/port_n_061_dec_13jan2023.html)> Acesso em: 12/12/2023

Tabela 1 – Funções dos componentes que constituem o módulo fotovoltaico.

Componente	Descrição
Moldura	É responsável pela fixação e proteção do módulo, geralmente feita em alumínio.
Vidro	É um material essencial que protege as células e os condutores, permitindo que a luz seja convertida em eletricidade. O vidro é especial, com baixo teor de ferro, camada antirreflexo e superfície texturizada.
Encapsulante	É uma película que protege as células fotovoltaicas da umidade e de materiais externos. Ele também ajuda a otimizar a condução elétrica entre as células. O encapsulante mais utilizado é o EVA.
Células Fotovoltaicas	São componentes eletrônicos que convertem a luz solar em energia elétrica. Elas são feitas de materiais semicondutores e funcionam por meio do efeito fotovoltaico.
<i>Backsheet</i>	É uma camada de material plástico que protege as células fotovoltaicas da umidade e de elementos externos. Ele também fornece isolamento elétrico adicional.
Caixa de Junção	É um componente importante de um módulo fotovoltaico. Ela tem a função de trazer as conexões elétricas do módulo para o exterior. Ao escolher uma caixa de junção, é importante considerar a qualidade do plástico, a qualidade da vedação, o tipo de conexão da fita e a qualidade dos diodos de <i>bypass</i> .

Fonte: Disponível em:

<[http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/004_documentos_instrucao/01_cadernos_de_instrucao\(ci\)/port_n_061_dec_13jan2023.html](http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/004_documentos_instrucao/01_cadernos_de_instrucao(ci)/port_n_061_dec_13jan2023.html)> Acesso em: 12/12/2023

2.1.3 MÓDULOS BIFACIAIS E O ALBEDO

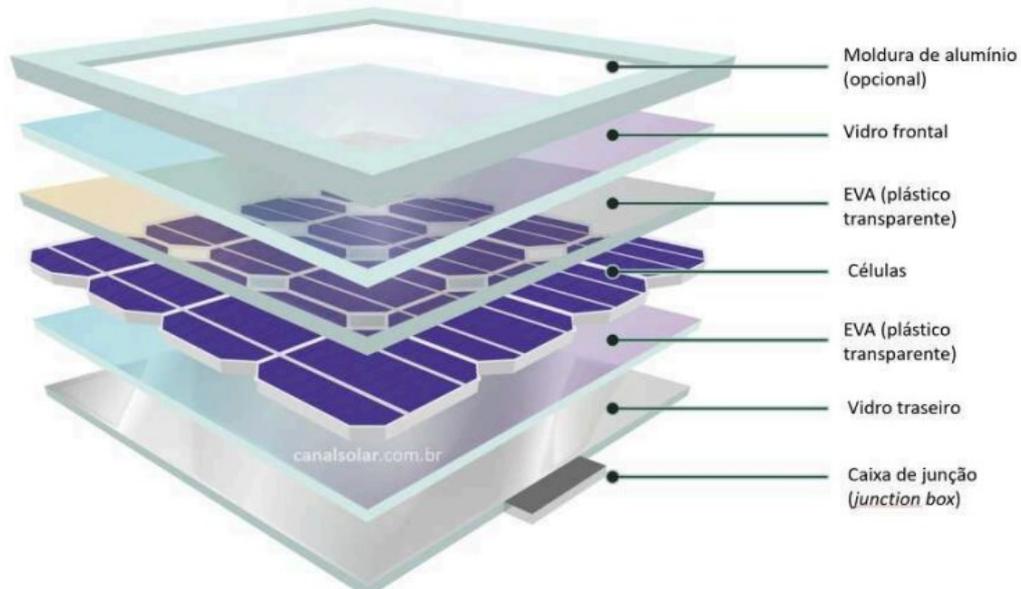
Os módulos fotovoltaicos bifaciais fazem uso de células com algumas distinções em relação às empregadas nos módulos convencionais. De acordo com informações do CANAL SOLAR (2022), ao contrário das células fotovoltaicas convencionais, que são cobertas na parte traseira, as células bifaciais possuem uma metalização semelhante a frontal na face posterior, possibilitando a absorção de luz solar em ambas as faces. Adicionalmente, enquanto os módulos convencionais (monofaciais) têm a parte traseira revestida por uma folha polimérica opaca

(*backsheet*), os módulos bifaciais podem contar com uma folha plástica transparente ou até mesmo uma segunda lâmina de vidro na face posterior. Essas características estruturais estão esquematizadas na Figura 9.

O termo "albedo" refere-se à porção da radiação solar que é refletida pelo solo. Em virtude dessa distinção estrutural nos módulos bifaciais, eles têm a capacidade de capturar a irradiação solar em ambas as faces (frontal e traseira), resultando na geração de energia em ambos os lados.

Segundo o CANAL SOLAR (2022), além das diferenças estruturais, é crucial abordar a diferença de durabilidade entre os dois tipos de módulos. Módulos bifaciais com vidro na parte traseira geralmente apresentam uma garantia estendida de 5 anos em comparação aos módulos monofaciais. Em razão da discrepância construtiva em relação aos módulos monofaciais, os bifaciais com vidro traseiro têm um risco reduzido de microfissuras nas células fotovoltaicas, visto que o centro do módulo sofre menos estresse mecânico.

Figura 9 – Junção PN e região de depleção.



Fonte: CANAL SOLAR (2022).

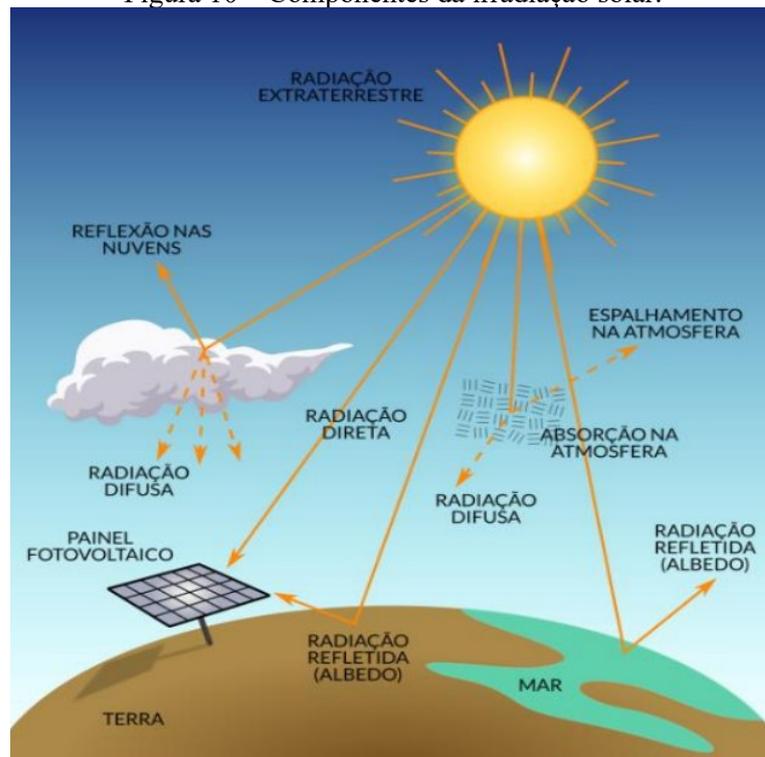
Módulos bifaciais, diferentes dos convencionais, apresentam a característica de gerar energia pela parte frontal e também pela traseira, justamente por causa do seu fator de bifacialidade que permite esse fato. Para compreendermos os módulos fotovoltaicos bifaciais, um componente crucial neste estudo, é necessário primeiro abordar a temática da radiação solar e suas componentes. De acordo com a IBERDROLA (2021), o Sol emite energia na forma de

radiação de ondas curtas, propagando-se em todas as direções através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. No entanto, fluxo energético passa por um processo de enfraquecimento na atmosfera, influenciado pela presença de nuvens e pela absorção por moléculas de gases ou partículas em suspensão. Após atravessar a atmosfera, a radiação solar atinge as superfícies oceânicas e continentais da Terra, onde é refletida ou absorvida.

A radiação solar possui diversas componentes. Segundo SOUZA (2019) são 5 componentes que estão sendo apresentadas na Figura 10 e descritas abaixo:

As componentes da radiação são descritas como: Irradiância extraterrestre: irradiância solar que atinge o topo da camada atmosférica da Terra. Irradiação direta: irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência. Irradiação difusa: irradiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Irradiação refletida (albedo): irradiação refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). Irradiação global: quantidade resultante da soma das irradiações solares direta, difusa e albedo.

Figura 10 – Componentes da irradiação solar.



Fonte: SOUZA (2019).

2.2 ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO CONVENCIONAIS

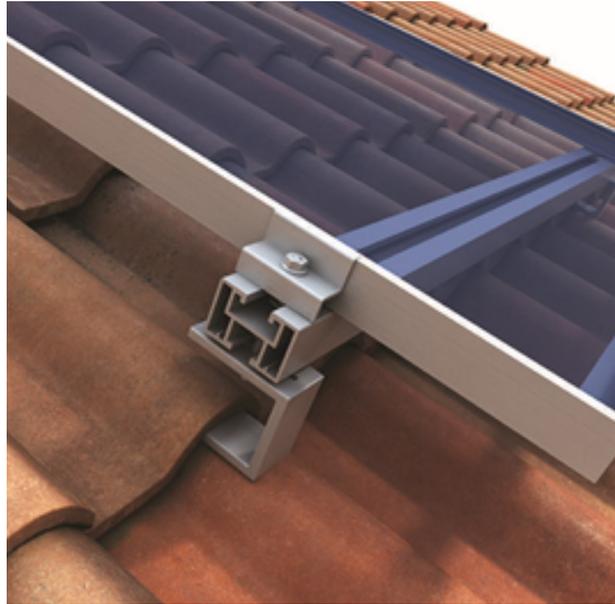
As estruturas convencionas de fixação de sistemas FV são feitas a partir de aço galvanizado e/ou alumínio e utilizam fixadores dos mesmos materiais. Essas estruturas são fixadas no solo ou telhado com uma angulação fixa de acordo com sua construção, podendo variar a angulação para cada região, buscando um ângulo otimizado para cada local, dessa forma, otimiza-se a geração.

Sistemas de suporte para fixação de módulos fotovoltaicos podem ser projetados para serem fixados com ganchos em telhados de barro, ou até mesmo inclinados sobre uma laje para garantir a inclinação ideal dos módulos fotovoltaicos. A maioria das estruturas de fixação para módulos fotovoltaicos são projetadas para aplicações universais, incluindo coberturas de telha de barro, telha de concreto, telhado metálico, telha de fibrocimento, seguidores solares e fixação direta no solo (PORTAL SOLAR, 2023).

Há dois tipos de estruturas de fixação diferentes e muito utilizadas, são elas as estruturas para telhados e estruturas para o solo, sendo que dentre elas há várias tecnologias diferentes como parafuso prisioneiro, gancho com trilho, fixação para telhas metálicas, entre outros. Abaixo é apresentado na Figura 11 um exemplo de estrutura em telhado e na Figura 12 um exemplo de estrutura em solo.

Segundo LAU (2017), os sistemas fotovoltaicos em solo são uma solução ideal para projetos de grande porte, seja para geração centralizada ou distribuída. Eles permitem que os módulos fotovoltaicos sejam posicionados de forma ideal para captar a luz solar, garantindo maior eficiência. As fixações são realizadas por meio de bases de concreto ou estacas, que oferecem estabilidade e segurança. Essa configuração é comumente empregada em projetos que exigem alta potência, como usinas solares ou fazendas solares.

Figura 11 – Modelo de fixação em um determinado tipo de telhado.



Fonte: LAU (2017).

Figura 12 – Modelo de fixação no solo.



Fonte: PORTAL SOLAR (2023).

3 METODOLOGIA

3.1 O LABORATÓRIO FOTOVOLTAICA-UFSC

O sistema fotovoltaico analisado neste trabalho está instalado no Laboratório Fotovoltaica-UFSC, localizado em Florianópolis-SC (27,4°S, 48,4°O). Na Figura 13, é mostrada uma visão panorâmica do laboratório, destacando a parte frontal. Já na Figura 14, é apresentada uma visão panorâmica oposta, com destaque em laranja para o sistema em análise. O sistema EcoGround é apresentado em detalhes na Figura 15.

Figura 13 – Vista panorâmica do Laboratório Fotovoltaica UFSC.



Fonte: O Autor.

Figura 14 – Vista panorâmica traseira do Laboratório Fotovoltaica UFSC.



Fonte: O Autor.

Figura 15 – Estrutura EcoGround instalada no Laboratório Fotovoltaica UFSC



Fonte: O Autor.

3.2 COMPONENTES FÍSICOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A estrutura empregada para a colocação dos módulos fotovoltaicos é fabricada com perfis de alumínio moldados. Os perfis são distribuídos em três modelos padronizados, cada um destinado a uma parte específica da estrutura. Os módulos são fixados nos perfis por meio

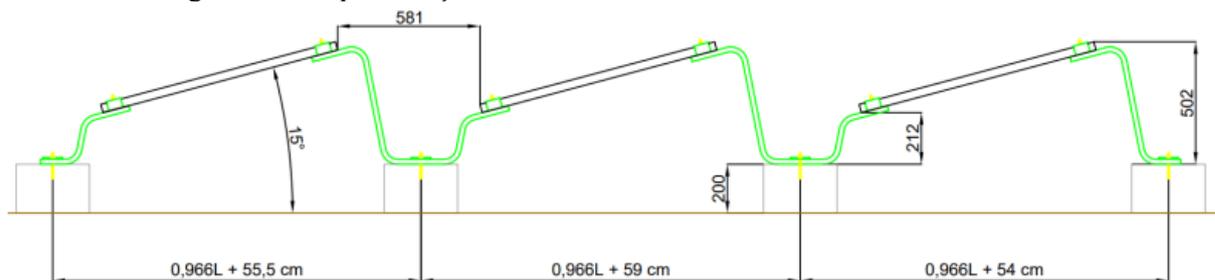
de braçadeiras de alumínio e parafusos de aço inoxidável. A estrutura é fixada ao solo por meio de parafusos em blocos de concreto individuais, conforme apresentado na Figura 16.

A estrutura EcoGround é padronizada, apresentando uma inclinação fixa de 15° , que nem sempre é a mais adequada para a localidade, podendo limitar a geração de energia. A inclinação constante pode ser uma restrição para a eficiência energética. Portolan dos Santos e R  ther (2014) conduziram um estudo abrangente sobre o posicionamento dos módulos fotovoltaicos em 27 capitais brasileiras. Os resultados indicam que, em Florianópolis-SC, um sistema fotovoltaico com inclina  o de 15° recebe apenas 5% menos radia  o solar em compara  o com um sistema de inclina  o ótima (27°). Esses resultados indicam que a angula  o padronizada da estrutura Ecoground, diferente da inclina  o ótima de 27° , não resulta em grandes perdas para o sistema fotovoltaico.

A estrutura EcoGround destaca-se por várias vantagens, sendo uma delas o mapa de vento elaborado pela própria empresa fabricante. Este mapa desempenha um papel crucial no dimensionamento de diversos aspectos da instala  o da estrutura, com a escolha do tipo de funda  o sendo um dos principais. A velocidade do vento na região    considerada na determina  o das sugestões da empresa para os tipos de funda  o adequados, tais como viga corrida, blocos de concreto, estaca escavada, entre outros. Cada uma dessas op  es de funda  o    acompanhada pela carga que a ancoragem deve suportar, proporcionando uma abordagem personalizada e segura para a instala  o da estrutura EcoGround, adaptada às condi  es específicas da região.

Os módulos são dispostos a um ângulo de 15° , com eleva  o de 0,412 m em rela  o ao solo e com separa  o horizontal de 581 mm. Sobre a superfície do solo, imediatamente abaixo do sistema, foram incorporadas telhas metálicas de alumínio. As telhas metálicas visam aumentar o albedo do solo e evitar o desenvolvimento de vegeta  o. Segundo PVsyst (Versão 7.1) o valor estimado para o albedo das telhas metálicas    de 0,85.

Figura 16 – Representa  o lateral da estrutura EcoGround e suas dimensões.



Fonte: Vinícius Cant  .

Para nossa análise, foi feito o estudo em um sistema fotovoltaico que é composto por 3 *strings*, cada uma delas é composta por 4 módulos do modelo Canadian Solar CS3U-375MBAG de 375 Wp (Watt-pico). Cada uma das *strings* está conectada a um inversor modelo SMA Sunny Boy 1200, inversores de 1200 W (Watt). Há 12 módulos e 3 inversores idênticos divididos em 3 *strings*, sendo que a utilização de módulos e inversores idênticos em todos os sistemas minimiza as incertezas associadas às análises. Na Tabela 2 é apresentado os parâmetros dos módulos, enquanto a Tabela 3 apresenta os parâmetros dos inversores.

Tabela 2 – Módulo Canadian Solar CS3U-375MB-AG, principais parâmetros (STC).

Características	Valor
Corrente de Máxima Potência	9,43 A
Máxima Potência	375 W
Tensão de Máxima Potência	39,8 V
Corrente de Curto-Circuito	9,93 A
Tensão de Circuito Aberto	47,6 V
Coefficiente de Temperatura	-0,36% / °C
Fator de Bifacialidade	70%

Fonte: Canadian Solar INC., 2015.

Tabela 3 – Inversor SMA Sunny Boy 1200, principais parâmetros.

Características	Valor
Máxima Tensão CC	400 V
Máxima Potência CC	1.320 W
Máxima Potência CA	1.200 W
Máxima Corrente CC	12,6 A
Máxima Corrente CA	6,1 A
Tensão de Saída CA	265 V
Máxima Eficiência / Eficiência Europeia	92,1% / 90,9%

Fonte: SMA Solar Technology.

As grandezas elétricas foram coletadas por meio de medidores Carlo Gavazzi instalados no lado de corrente contínua (CC) dos sistemas, o que exclui as perdas associadas ao inversor e reduz as incertezas. Os dados foram coletados de agosto de 2020 a julho de 2021, com resolução temporal de 1 minuto.

Para avaliar o desempenho de cada *string*, buscou-se identificar discrepâncias no rendimento dos módulos instalados em cada fileira (norte, intermediária e sul). Cada string, juntamente com seu inversor correspondente, forma um sistema independente e foram analisados separadamente.

Os dados de irradiância utilizados na análise de desempenho dos sistemas fotovoltaicos foram obtidos de uma célula de referência IMT, modelo Si-02-PT100, instalada com inclinação correspondente a do sistema na estação solarimétrica do laboratório Fotovoltaica UFSC. A resolução temporal desses dados é de 1 minuto.

Nas simulações foram realizadas no software PVsyst. Foram utilizados dados de irradiância global horizontal provenientes do piranômetro Kipp & Zonen, modelo SMP22, e dados de temperatura ambiente coletados pelo sensor Lufft WS600, ambos situados na estação solarimétrica do Laboratório Fotovoltaica UFSC que é apresentada a seguir na Figura 17.

Figura 17 – A estação solarimétrica do Laboratório Fotovoltaica UFSC.



Fonte: O Autor.

3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS DADOS

A presença de elementos construtivos nas proximidades de sistemas fotovoltaicos pode causar sombreamento, o que pode reduzir a irradiação recebida pelos módulos e, conseqüentemente, o seu desempenho. Para analisar o impacto do sombreamento, empregou-se o software Ecotect, seguindo a metodologia de Zomer e Rüter (2017).

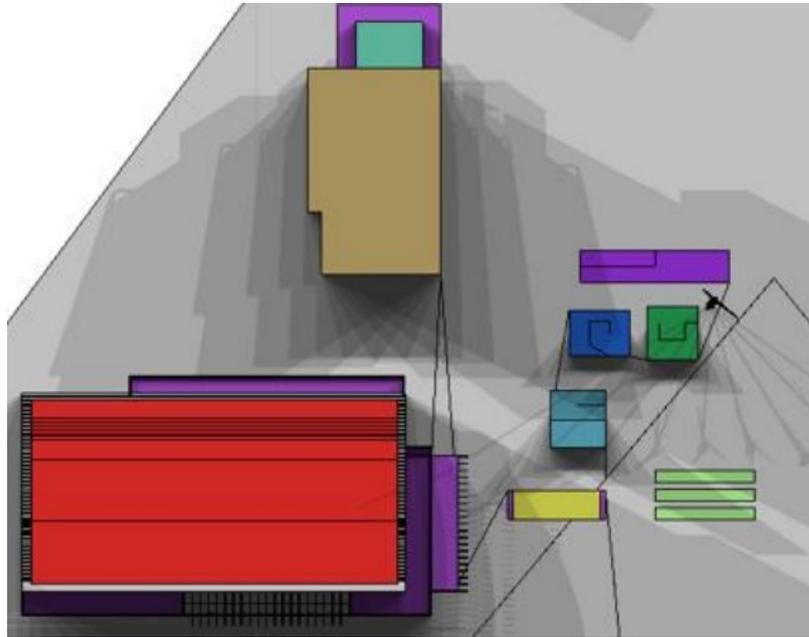
A Figura 18 apresenta a representação do Laboratório Fotovoltaica UFSC em 3D, com ela é feita uma análise de sombreamento durante um dia completo para um mês de inverno e de verão, essa análise é melhor observada na Figura 19 que traz os níveis de sombreamento para os 3 sub-sistemas, apresentando o sombreamento em porcentagem para cada hora do dia em cada respectivo mês.

Observando as Figuras 18 e 19, é notório que os três sub-sistemas EcoGround são afetados pelo sombreamento provocado pelas estruturas e sistemas fotovoltaicos adjacentes. Para minimizar o impacto desse sombreamento na avaliação do desempenho dos sistemas, aplicou-se um filtro horário, excluindo da análise momentos em que um ou mais dos sub-sistemas estivessem sombreados.

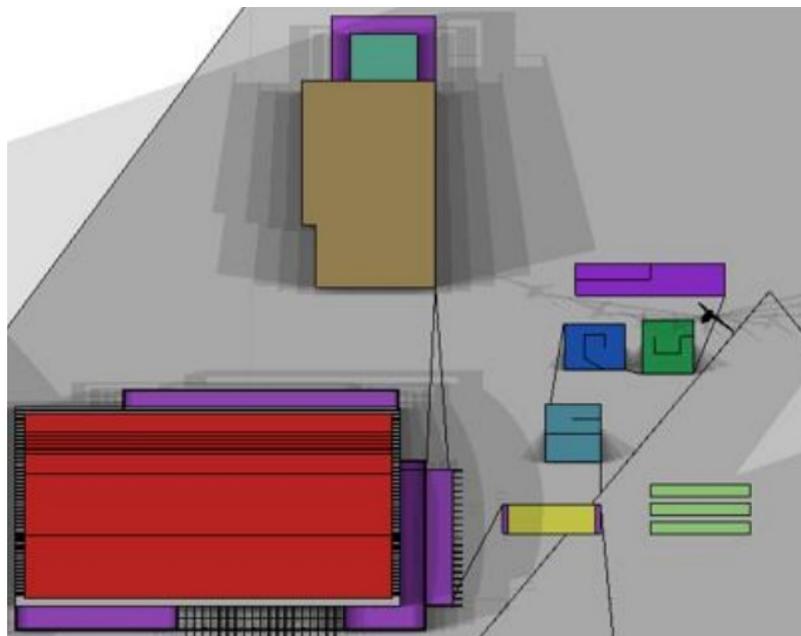
Com esse filtro, foram considerados apenas os dados nos horários entre 10:00 e 16:00, período em que o sombreamento dos sistemas avaliados é insignificante ou nulo em todos os meses do ano.

A análise da Figura 18, correspondente as figuras (a) e (b), revela que, nos meses de junho e julho, caracterizados pelo inverno e, portanto, por uma altitude solar reduzida, ocorre sombreamento próximo ao meio-dia nos sub-sistemas 1 (norte) e 2 (intermediário), causado pela presença de uma turbina eólica ao norte dos sistemas.

Figura 18 – Simulação de modelagem tridimensional e projeção de sombreamento para um dia no mês de junho (a) e outro dia no mês de dezembro (b). As simulações foram realizadas por meio do software Ecotect.



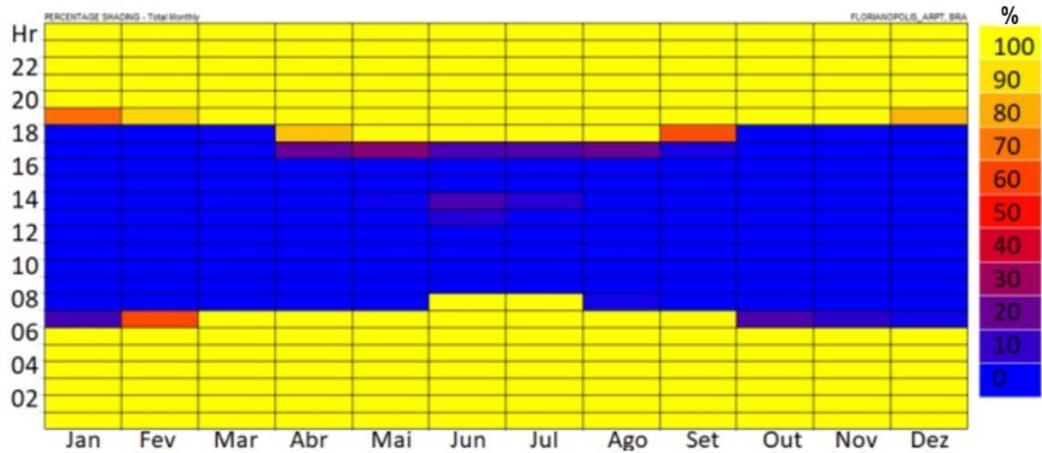
(a)



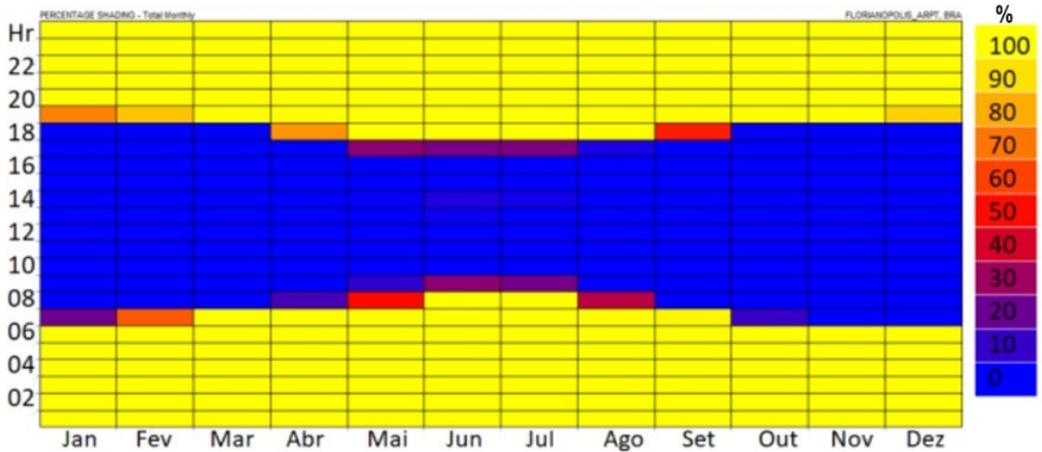
(b)

Fonte: Clarissa Zomer.

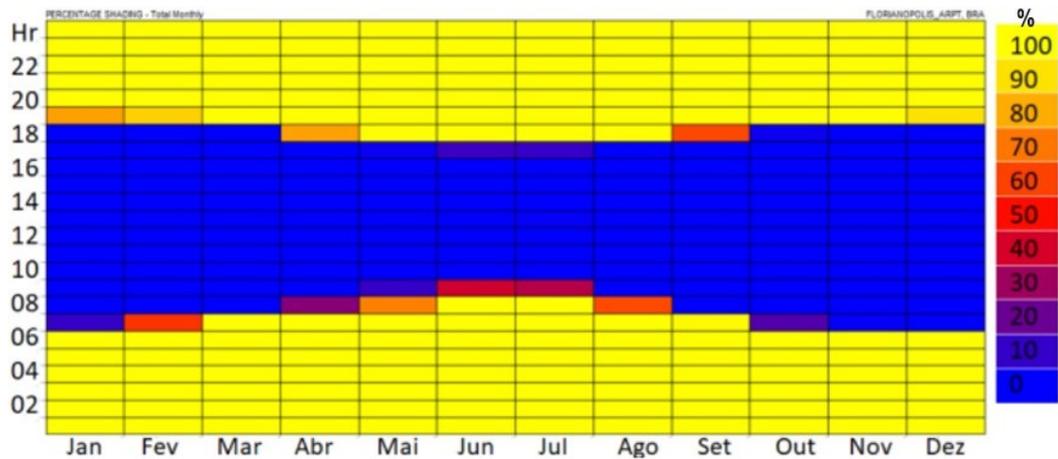
Figura 19 – Diferentes níveis de sombreamento ao longo do ano, conforme mostrado nos registros norte (a), intermediário (b) e sul (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Clarissa Zomer.

Para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, foi realizada uma análise da produtividade mensal, conforme definido pela norma IEC 61724-3:2016 (IEC, 2016). A produtividade mensal, ou yield, é calculada de acordo com os parâmetros apresentados abaixo e a relação apresentada na equação (1).

E = Energia gerada pelo sistema ao longo do um mês (em kWh);

P_{nom} = Potência nominal do sistema (em kWp).

$$Yield = \frac{E}{P_{nom}} \quad (1)$$

Uma vez que os sistemas estão localizados no mesmo local, possuem a mesma orientação e recebem a mesma quantidade de irradiação solar, a produtividade emerge como uma métrica apropriada para a comparação entre os sistemas. Para lidar com meses com dias inválidos, foi feita uma extrapolação na produtividade mensal usando uma aproximação linear. Isso envolve a divisão do valor de produtividade do mês pelo percentual de dias válidos correspondente ao mês em questão.

Apesar da extrapolação, foram considerados dados representativos para o mês apenas aqueles calculados a partir de pelo menos metade dos dias esperados, conforme detalhado anteriormente. É importante notar que, para essa análise, foram utilizados dados ao longo de todo o dia. O filtro aplicado para remover os horários de sombreamento foi utilizado exclusivamente na análise de PR.

A segunda análise realizada foi o cálculo do *Performance Ratio* (PR), que fornece percentual correspondente à parcela de energia entregue em relação ao valor máximo possível. A equação (2)) apresenta a formulação para o cálculo da PR, que é a relação entre os seguintes parâmetros:

E = Energia produzida pelo sistema (em kWh);

G = Irradiância global de referência (padrão de 1000 W/m²);

P_{nom} = Potência nominal do sistema (em kWp);

H_{poa} = irradiação no plano dos módulos (em kWh/m²).

$$PR = \frac{(E \times G)}{(P_{nom} \times H_{poa})} \quad (2)$$

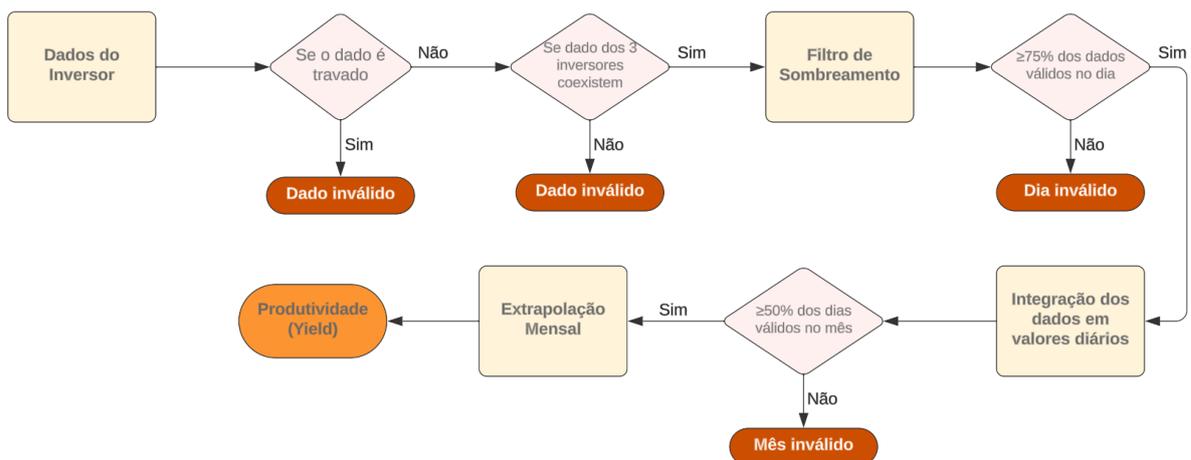
A PR é uma métrica fundamental para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, pois considera não apenas a energia produzida, mas também as condições ambientais, como a irradiação solar incidente.

Os dados obtidos foram submetidos a dois filtros para garantir a confiabilidade e a acurácia das análises. O primeiro filtro removeu entradas duplicadas e presas. Havendo uma quantidade maior que um dado por horário, apenas um deles foi considerado. Além disso, no caso em que o dado subsequente era igual ao anterior, apenas um deles foi aceito.

O segundo filtro garantiu a simultaneidade de dados para cada minuto do período analisado. Ou seja, apenas minutos nos quais todos os três sub-sistemas e a célula de irradiância de 16° possuíam dados válidos foram considerados. Isso evita que o desempenho de um sistema seja favorecido simplesmente pelo fato de outro não ter dados disponíveis.

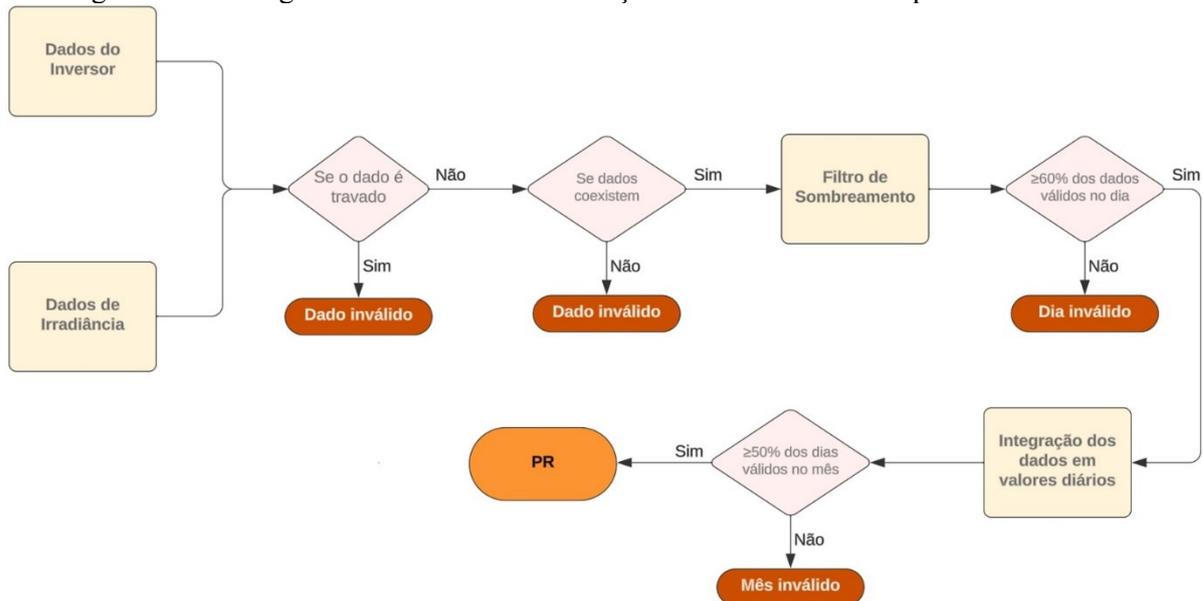
Para a análise de produtividade, foram desconsiderados os dias com menos de 75% de dados válidos em relação ao número esperado de pontos de medição para o inversor. O valor considerado foi de 60% para o indicador de PR, levando em condições os dados de potência e de irradiância. Na Figura 20 é apresentado o fluxograma para a validação dos dados utilizados para a análise de *yield*, enquanto na Figura 21 é apresentado o fluxograma para a validação dos dados utilizados para a análise de PR.

Figura 20 – Fluxograma dos critérios de avaliação dos dados utilizados para a análise de *yield*.



Fonte: O Autor.

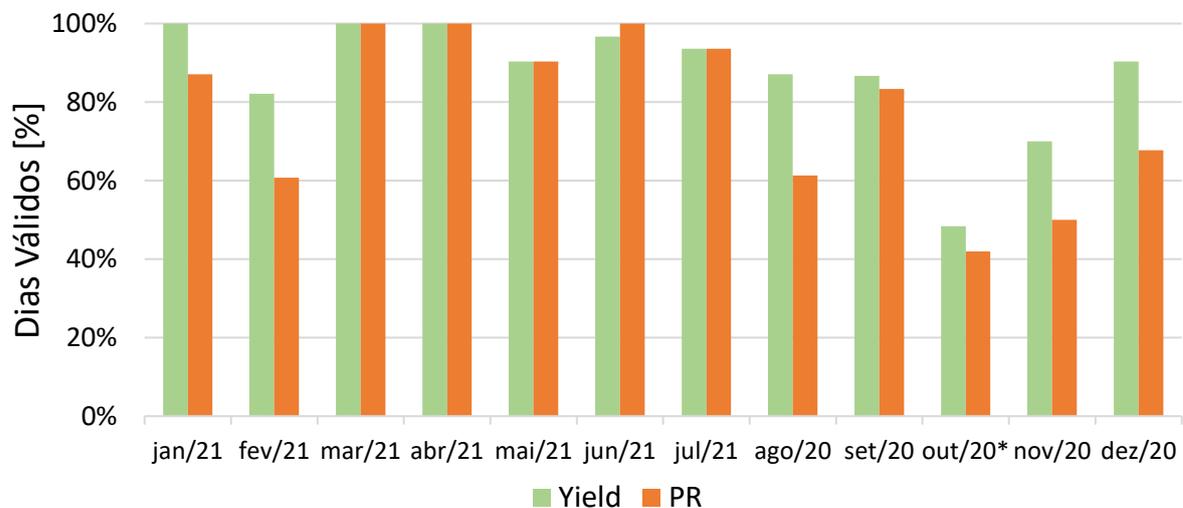
Figura 21 – Fluxograma dos critérios de avaliação dos dados utilizados para a análise de PR.



Fonte: O Autor.

A Figura 22 apresenta o percentual de dias válidos em cada mês durante o período analisado para ambas as análises (*yield* e PR) após a aplicação dos filtros mencionados. Considerou-se como representativos para o mês apenas aqueles calculados com base em pelo menos metade dos dias válidos correspondentes. Destaca-se que o mês de outubro de 2020 é marcado com um asterisco (*) devido a ter menos de 50% de seus dias considerados válidos, tanto para a análise de PR quanto para a análise de produtividade.

Figura 22 – Percentual de dias válidos em cada mês para análise de Yield e PR.



Fonte: O Autor.

3.4 SOFTWARE E SIMULAÇÃO

3.4.1 O ATLAS SOLARIMÉTRICO

Para algumas das simulações, foram utilizados os dados do atlas solarimétrico (PEREIRA, 2017). A criação do Atlas Brasileiro de Energia Solar resultou de uma colaboração entre pesquisadores de diversas instituições. Esse trabalho abrange um conteúdo interdisciplinar que engloba desde a aplicação de conceitos astronômicos até a compreensão da física dos processos radiativos na atmosfera. Além disso, o atlas envolve a geração de cenários para aplicação dos recursos de energia solar disponíveis no território brasileiro.

A base de dados abrangendo a radiação solar em suas diversas componentes foi gerada a partir de 17 anos de imagens de satélite, abrangendo o período de 1999 a 2015. A melhoria na modelagem numérica e a extensão da série temporal dos dados, via satélite, possibilitaram a redução das incertezas nas estimativas da irradiância solar na superfície, proporcionando uma avaliação mais precisa da variabilidade espacial e temporal da radiação solar incidente. Com o propósito de contribuir para o planejamento do setor elétrico brasileiro, o Atlas Brasileiro de Energia Solar disponibiliza uma base de dados pública com informações cientificamente embasadas sobre o potencial e a variação espacial e temporal do recurso energético solar no território brasileiro, (PEREIRA, 2017).

Segundo o site do governo brasileiro (GOV, 2023), nesta segunda edição do Atlas Solarimétrico, foram utilizados registros de dados via satélite acumulados ao longo de mais de 17 anos. Além disso, diversas melhorias foram incorporadas às parametrizações do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, com o objetivo de aprimorar ainda mais a confiabilidade e a precisão da base de dados gerada, a qual está disponível para acesso público.

Levando em conta o rigoroso teor na criação do Atlas Brasileiro, ele é uma fonte de dados abundante e que pode ser utilizado para diversas aplicações. Sobre o modelo de dados PEREIRA (2017) escreveu:

O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi elaborado com emprego do modelo físico de transferência radiativa, BRASIL-SR, desenvolvido com base no modelo GKSS (Stuhlmann et al., 1990) e adaptado para a climatologia e condições atmosféricas sazonais típicas observadas no Brasil. O modelo BRASIL-SR, utiliza dados de cobertura de nuvens obtidos a partir de imagens digitais do satélite geoestacionário GOES posicionado sobre a América do Sul. Além das informações de cobertura de nuvens, a execução do modelo requer o uso de base de dados de topografia, albedo de superfície, dados climatológicos de temperatura, umidade relativa e visibilidade atmosférica para todo o território brasileiro. Os resultados produzidos pelo modelo foram validados por meio de comparação estatística com base em dados medidos

empregando piranômetros instalados na rede nacional de estações meteorológicas automáticas operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais - rede SONDA - operado pelo LABREN/INPE.

3.4.2 O SOFTWARE PVSYST

O PVsyst é um software de simulação de sistemas fotovoltaicos desenvolvido pela empresa suíça PVsyst as, utilizado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores para projetar, dimensionar e avaliar sistemas fotovoltaicos. Desenvolvido especificamente para atender às necessidades de arquitetos, engenheiros e pesquisadores, o programa PVsyst oferece uma variedade de módulos, incluindo análise econômica, sombreamento e armazenamento de energia. Além disso, destaca-se pela capacidade de importar dados e pelo acesso a uma base de dados abrangente e confiável (PVSYST, 2021). O PVsyst oferece uma ampla gama de recursos, incluindo:

- Simulação de irradiação solar;
- Simulação de perdas de corrente;
- Simulação de sombreamento;
- Simulação de desempenho térmico;
- Simulação de custos.

O PVsyst é um software que permite realizar estudos, dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos. O PvSyst é uma ferramenta de simulação projetada para auxiliar no dimensionamento de projetos de sistemas fotovoltaicos, destacando-se pela precisão dos resultados devido à consideração de diversas variáveis. Essa aplicação é amplamente utilizada por projetistas de sistemas fotovoltaicos.

3.4.3 SIMULAÇÕES DO SISTEMA

Para validar o modelo de simulação do sistema em questão, foram realizadas duas simulações para o mesmo sistema. A primeira simulação utilizou dados de irradiação global horizontal e temperatura ambiente provenientes da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar. O objetivo era obter valores previstos de *Performance Ratio* (PR) e de

produtividade, calculados a partir de um banco de dados consolidado que se baseia em uma série histórica de dados satélite, verificados por medições em solo.

A segunda simulação utilizou dados ambientais medidos em campo, para o período de avaliação. Seu objetivo final foi obter valores de produtividade e PR levando em consideração as condições dos dados medidos em campo, no período analisado. Ambas as simulações abrangeram o mesmo período de análise mencionado na seção anterior (de 01 de agosto de 2020 a 31 de julho de 2021).

Para a simulação, as três *strings* foram consideradas como apenas um sistema, isso significa que a análise de PR e produtividade foi realizada para um sistema composto por 12 módulos, 3 inversores e 3 *strings*.

Para a análise de sombreamento, foi utilizado um modelo tridimensional (3D) que considerou os elementos construtivos que geram sombras no sistema. Isso evitou a necessidade de filtrar os dados para horários de sombreamento, pois temos essa condição nos cenários de simulação e com dados medidos.

A incorporação do modelo 3D do sistema permitiu o uso de um modelo bidimensional (2D) para fileiras ilimitadas, visando calcular parâmetros relevantes para a análise de bifacialidade. Foram consideradas as seguintes condições:

- Altura do sistema: 0,41 metros em relação ao solo;
- Albedo do solo: 0,85, devido à presença de telhas metálicas;
- Fator de transparência do sistema: 2,6%.

O albedo geral do sistema, utilizado para o cálculo da radiação refletida pelo solo e incidente na parte frontal dos módulos FV, permaneceu como 0,20, uma vez que as telhas metálicas estão situadas apenas diretamente abaixo dos sistemas.

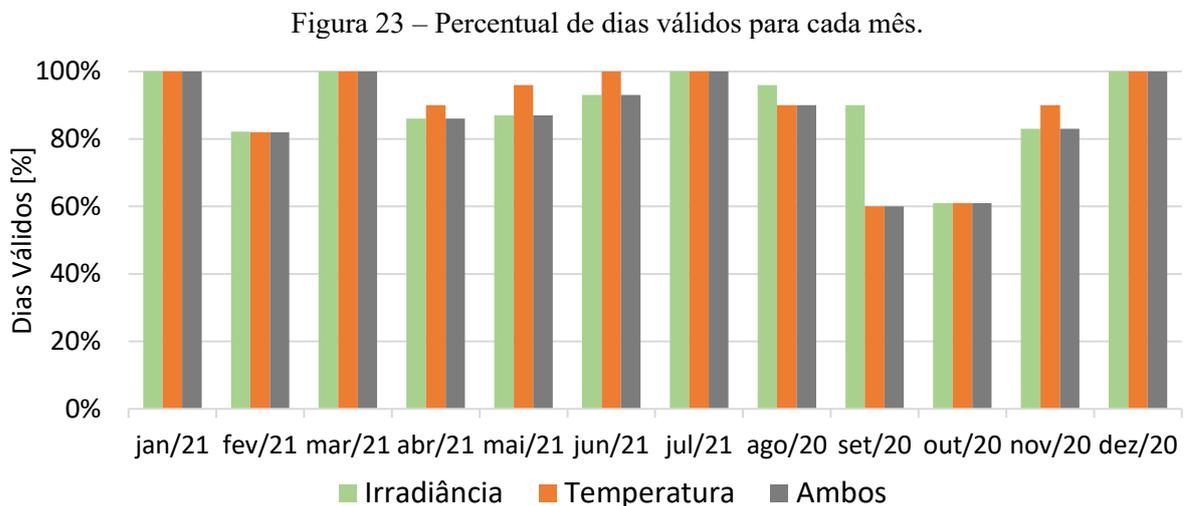
Como se trata de uma estrutura onde temos um livre fluxo das rajadas de vento, foi considerado na modelagem térmica do sistema, os valores padrões destinados a um sistema com livre circulação de ar, com uma constante padrão de $29 \text{ W/m}^2\text{K}$ e um fator de vento de $0 \text{ W/m}^2\text{K m/s}$.

A degradação induzida pela luz (LID) foi estimada em 2,5%, conforme indicado no datasheet do fabricante. As perdas devido à sujeira foram mantidas como constantes ao longo do ano, estabelecendo-se um valor fixo de 2,0%.

Na segunda simulação, utilizaram-se dados medidos em campo para determinar o desempenho esperado do sistema. Os dados de irradiância global horizontal e de temperatura ambiente foram obtidos na estação solarimétrica.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram aplicados 3 filtros que são listados abaixo, foram retirados os dias inválidos da análise e quantificados os dias restantes, os resultados são apresentados na Figura 23 através de um percentual para cada mês.

- Eliminação de dados repetidos e bloqueados;
- Garantia da simultaneidade de dados para cada minuto do período analisado;
- Desconsideração de dias com menos de 60% de dados válidos.



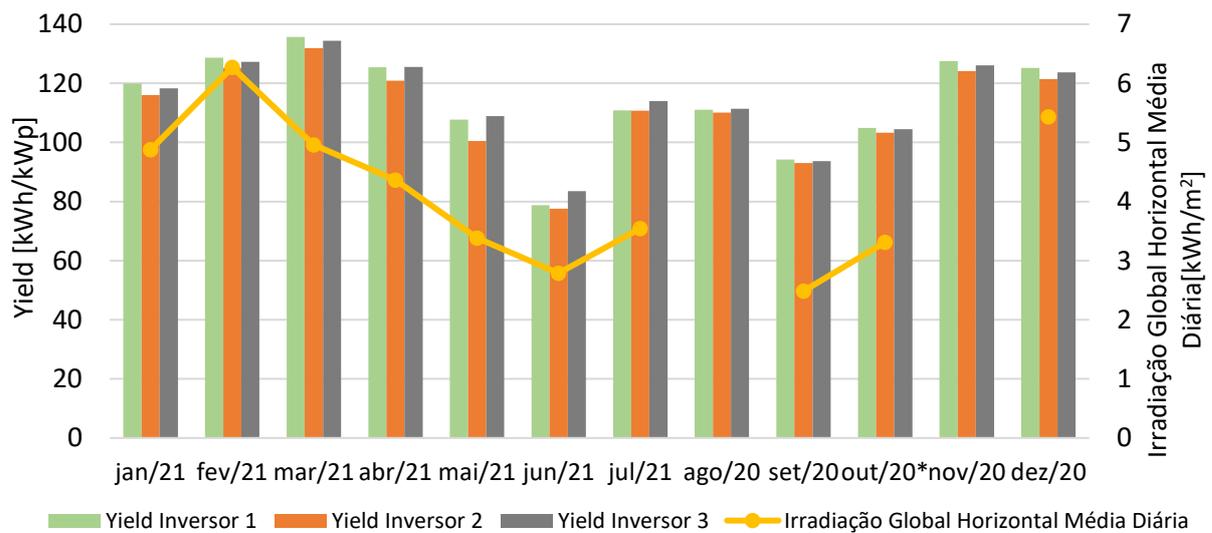
Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS

Aplicando a metodologia detalhada previamente e a equação (1), foram encontrados os índices de produtividade para todos os meses do período de análise. Na Figura 24 são apresentados os resultados. A irradiação global horizontal média diária, representada no eixo secundário, foi utilizada apenas como referência. Os dados de irradiância provenientes da célula de referência inclinada apresentaram uma quantidade inferior de dados válidos por dia. Por este motivo a irradiação horizontal é utilizada como referência para representar a variação de irradiação ao longo do período da análise. Nos meses de agosto e novembro, a irradiação global horizontal não é exibida, uma vez que esses meses não atingiram a quantidade mínima de dados.

Figura 24– Produtividade mensal medida para os subsistemas 1 (norte), 2 (intermediário) e 3 (sul).



Fonte: O Autor.

O período de análise iniciou em agosto de 2020 e encerrou em julho de 2021. No entanto, optou-se por fazer a apresentação no formato de janeiro a dezembro para facilitar a visualização da sazonalidade observado nos resultados. Os rótulos do eixo x indicam o mês e o ano de origem dos dados. Os resultados obtidos foi de 1369,9 kWh/kWp.ano para o subsistema 1, 1334,7 kWh/kWp.ano para o subsistema 2 e 1371,1 kWh/kWp.ano para o subsistema 3.

O mês de junho apresentou produtividade significativamente inferior aos demais meses. Essa situação pode ser atribuída à menor incidência solar e maior sombreamento durante

este mês, em função da altitude solar, que é mínima durante no solstício de inverno (21/06/2021).

A análise de sombreamento indica que os subsistemas 1 e 2 são impactados por sombreamento entre as 13:00 e 14:00 horas nos meses de junho e julho, o que resulta em um desempenho reduzido. No entanto, o sistema 3 também manifestou menor desempenho, possivelmente devido aos dias excessivamente nublados e baixa irradiância em junho de 2021.

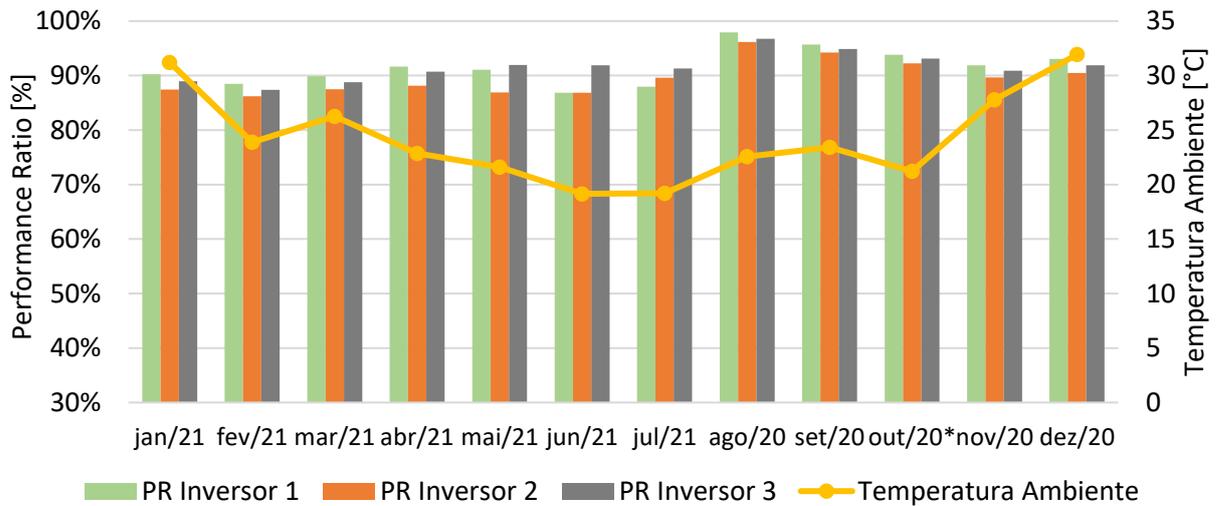
Aplicando a metodologia anteriormente delineada e a equação (2), foram computados os valores de PR para todos os meses do período em análise. Os resultados são apresentados na Figura 25, acompanhados da média mensal da temperatura ambiente. As médias anuais de PR foram de 91,5%, 89,6% e 91,5%, para os subsistemas 1 (norte), 2 (intermediário) e 3 (sul), respectivamente.

Nota-se que, apesar de o sombreamento externo não uniforme afetar de maneira mais acentuada o subsistema 1, o subsistema 2 é o que apresenta desempenho inferior. Isso pode ser explicado pela obstrução da irradiação incidente na parte posterior do módulo, tanto pela fileira do subsistema 1 quanto pela fileira do subsistema 3. É importante ressaltar que, em sistemas de maior porte, a maioria das *strings* estaria sujeita a uma situação semelhante à apresentada para o subsistema 2. Portanto, esse valor de PR é mais representativo para sistemas que adotam essa configuração de módulo bifacial em estrutura EcoGround com solo altamente refletivo.

Como mencionado anteriormente, o mês de junho é marcado por um sombreamento expressivo, enquanto julho apresenta um sombreamento mais moderado para os subsistemas 1 (norte) e 2 (intermediário). O subsistema 1 é mais impactado pelo sombreamento, como ilustrado na Figura 25. Essa condição afeta a taxa de desempenho desses subsistemas nesses meses. A PR do subsistema 1 é superior à dos demais (na maior parte do ano), tornando-se inferior apenas nos dois meses nos quais há sombreamento parcial do sistema.

A variação abrupta de PR entre julho e agosto pode estar associada ao acúmulo de sujeira sobre as telhas metalizadas instaladas sob o sistema. Isso diminui o albedo dessas telhas e, conseqüentemente, a PR dos sistemas.

Figura 25–PR mensal medida para os subsistemas 1 (norte), 2 (intermediário) e 3 (sul).

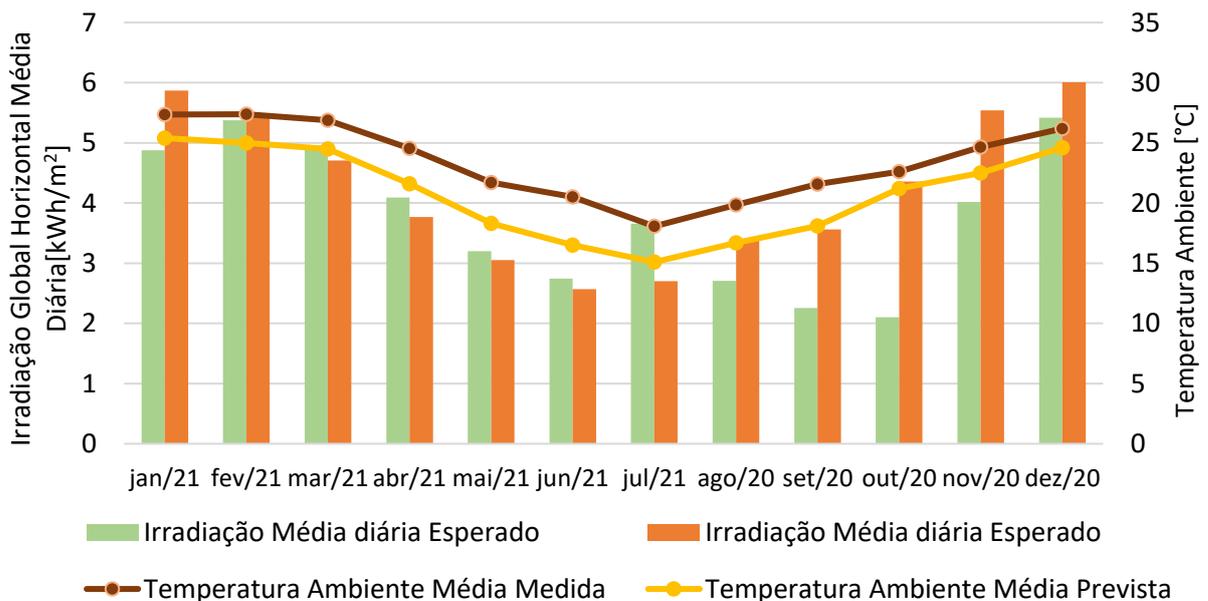


Fonte: O Autor.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS PREVISTOS, ESPERADOS E MEDIDOS

A Figura 26 apresenta os valores diários médios de irradiação medidos e previstos com base na série histórica para o local (PEREIRA, 2017), bem como os valores médios de temperatura ambiente medidos e previstos.

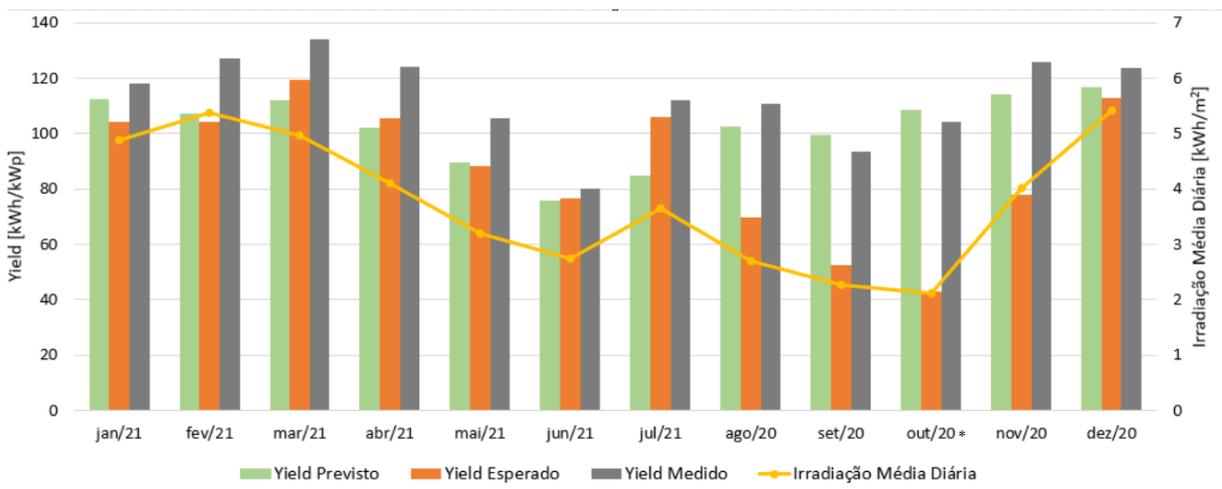
Figura 26 – Irradiação global horizontal média diária medida e prevista com base em dados históricos, assim como a temperatura ambiente média prevista e medida.



Fonte: O Autor.

A Figura 27 apresenta a evolução mensal da produtividade simulada com os dados provenientes do Atlas Solarimétrico e com os dados de irradiação do piranômetro SMP22. É evidente que há uma diferença significativa na comparação nos meses entre agosto e novembro, nos quais a produtividade esperada ficou notavelmente abaixo das demais. Essa disparidade pode ser justificada pela escassez mais pronunciada de dados para esses meses.

Figura 27 – Produtividade obtidos a partir da simulação no PVsyst com dados históricos (previsto) e medidos (esperado) e produtividade medida.

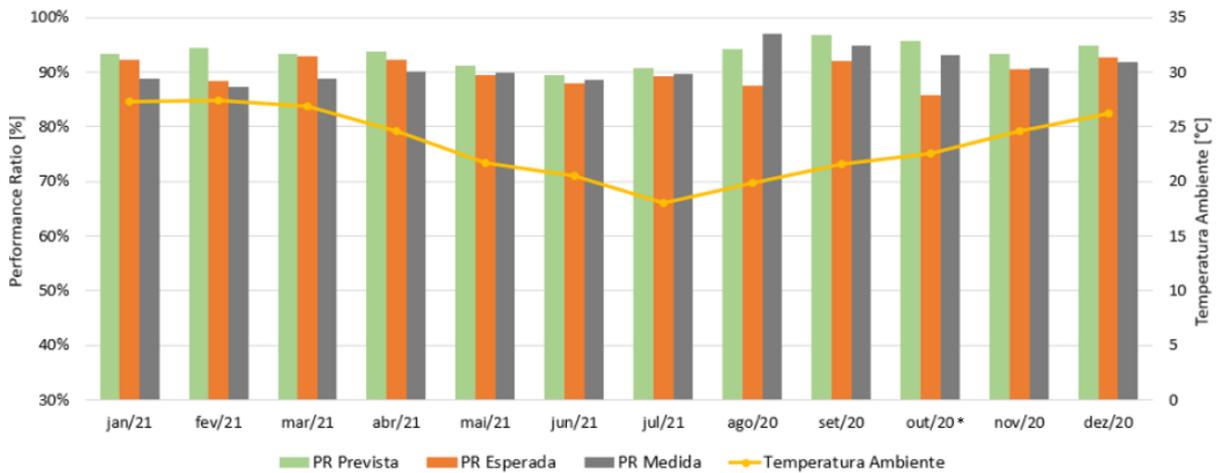


Fonte: O Autor.

De maneira geral, a irradiação média medida superou a prevista, resultando em valores de produtividade superiores às expectativas. Outros fatores que podem contribuir para esse cenário são as incertezas associadas ao coeficiente de albedo, uma vez que se sabe que houve variação desse coeficiente ao longo do período analisado. Por fim, destaca-se que esses resultados podem estar relacionados ao modelo de simulação, uma vez que se trata de um sistema não convencional para módulos bifaciais e relativamente próximo ao solo.

A Figura 28 apresenta os resultados da simulação da PR para o sistema bifacial com dados ambientais históricos (prevista) e dados medidos (esperada), a PR medida também é apresentada. De maneira geral, os resultados obtidos foram muito próximos, com a PR prevista registrando uma *performance* superior na maior parte do ano, exceto no mês de agosto.

Figura 28 –PR obtidos a partir da simulação no PVsyst com dados históricos (prevista) e medidos (esperada) e PR medida.



Fonte: O Autor.

O resultado superior da PR prevista no mês de agosto pode estar associado à inserção de uma telha de alumínio sob o sistema para aumentar o albedo. No entanto, devido a exposição as condições climáticas ao aumento gradativo da sujeira na superfície das telhas, esse valor foi diminuindo ao longo dos meses.

Além disso, a PR prevista ser superior pode ser atribuída ao fato de que a temperatura média prevista apresentou valores mais baixos do que a temperatura média medida ao longo de todo o período analisado. Assim, a PR medida exibiu maiores perdas devido às temperaturas mais elevadas.

Para o período analisado, a diferença média entre a PR prevista e a PR medida foi de aproximadamente 3%. Esse valor é considerado baixo, indicando que a simulação alcançou um nível significativo de representatividade para a situação real.

4.3 COMPARATIVO DO VALOR DE POTÊNCIA POR ÁREA: ESTRUTURA CONVENCIONAL X ECOGROUND

A estrutura EcoGround é uma solução de fixação de módulos fotovoltaicos (FV) ao solo. Ela é caracterizada por um ângulo de inclinação fixo de 15° e espaçamento entre fileiras menor do que as estruturas metálicas convencionais. Esse espaçamento reduzido tem impacto limitado no sombreamento entre as fileiras, pois a estrutura tem um ângulo de inclinação baixo e apenas um módulo em cada fileira, o que minimiza as diferenças de altura.

Com espaçamento otimizado, é possível instalar 3.087 módulos em um hectare (10.000m²), o que resulta em um total de 1,16 MWp. Em uma estrutura metálica tradicional na mesma área, seria possível instalar 2772 módulos, totalizando 1,04 MWp. Assim, a estrutura EcoGround proporciona uma densidade de potência instalada 11,4% superior às estruturas convencionais.

É importante ressaltar que a maior densidade de potência não necessariamente se traduz em um melhor retorno energético, pois diferentes cenários apresentam distintas perdas.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com base nos dados coletados no Laboratório Fotovoltaica – UFSC mostram que a produtividade do sistema está de acordo com as expectativas para a cidade de Florianópolis, com exceção do mês de junho, onde a produtividade foi reduzida devido a períodos de sombreamento. Considerando o período todo analisado, chegou-se em uma produtividade média mensal de 113,2 kWh/kWp.

A taxa de desempenho (PR) alcançou valores elevados em todos os meses, conforme previsto nas simulações. Essa alta PR é atribuída à natureza bifacial dos módulos analisados. Nos módulos bifaciais, toda a energia proveniente da irradiância refletida na parte traseira do módulo é um ganho adicional para a geração, resultando em PR superior à observada em módulos convencionais, podendo até superar 100% quando o ganho bifacial se sobrepõe às demais perdas do sistema.

As simulações realizadas para o sistema fotovoltaico bifacial instalado no Laboratório Fotovoltaica – UFSC indicam produtividade média mensal de 88,3 kWh/kWp (esperada) e 102,1 kWh/kWp (prevista), enquanto a produtividade medida foi de 113,2 kWh/kWp. As discrepâncias entre os valores previstos, esperados e medidos podem ser justificadas por uma série de fatores, tais como:

- A maior indisponibilidade de dados para os meses em que as diferenças foram mais pronunciadas: Os meses de agosto, setembro, outubro e novembro apresentaram uma quantidade inferior de dados válidos por dia, o que pode ter afetado a precisão da previsão.
- A irradiação média medida superou a prevista: Essa diferença pode ser atribuída a fatores como a escassez de dados para os meses entre agosto e novembro, a incerteza associada ao coeficiente de albedo e a possível variação desse coeficiente ao longo do período analisado.
- As incertezas associadas ao coeficiente de albedo: O coeficiente de albedo é um valor que representa a fração da radiação solar incidente que é refletida por uma superfície. Ele pode variar ao longo do tempo devido a fatores como a presença de sujeira ou acúmulo de poeira nas telhas de alumínio instaladas sob o sistema.

- A opacidade da telha devido à exposição às intempéries: A telha de alumínio pode apresentar uma opacidade maior ao longo do tempo devido à exposição às intempéries, o que pode reduzir o albedo e, conseqüentemente, a produtividade.
- O modelo de simulação: O modelo de simulação utilizado pode não ser o mais adequado para essa análise específica, pois trata-se de um sistema não convencional para módulos bifaciais, relativamente próximo ao solo.

Os resultados da PR indicam uma média de 90,9% para a PR medida, enquanto os valores de PR apresentados pela simulação foram de 90,1% para a PR esperada e 93,4% para a PR prevista. A diferença entre a PR prevista e a PR medida pode ser justificada por uma série de fatores, como:

- A temperatura média prevista ser menor do que a temperatura média medida. Sistemas fotovoltaicos tendem a ter maiores perdas em temperaturas mais elevadas, justificando, assim, o fato de a PR prevista ser maior.
- O uso de um modelo de simulação que pode não ser o mais adequado para essa análise específica, pois trata-se de um sistema não convencional para módulos bifaciais, relativamente próximo ao solo.

No entanto, a diferença entre a simulação realizada com os dados do Atlas (PR prevista) e a PR medida foi de apenas cerca de 2,5%, demonstrando que os resultados da simulação foram bastante próximos da situação real. Quando se utiliza o valor de PR esperada (com dados medidos como entrada), essa diferença diminui para 0,8%.

Os resultados obtidos indicam que o sistema fotovoltaico bifacial instalado no Laboratório Fotovoltaica – UFSC está apresentando um desempenho satisfatório. A produtividade está em linha com as expectativas para a cidade de Florianópolis, com exceção do mês de junho, onde a produtividade foi reduzida devido a períodos de sombreamento. A alta PR também é um resultado positivo, demonstrando o potencial dos módulos bifaciais para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Os resultados da PR indicam que o sistema fotovoltaico bifacial instalado no Laboratório Fotovoltaica – UFSC está apresentando um desempenho satisfatório. A PR média de 90,9% é superior à média esperada para um sistema convencional.

O sistema tendo um resultado de yield e PR elevados, evidenciou a eficácia da estrutura que constitui o foco deste trabalho de conclusão de curso. A eficiência comprovada contribuiu significativamente para o desempenho otimizado do sistema fotovoltaico. Assim, recomenda-se a adoção dessa estrutura, em uma série de aplicações:

- Locais onde a altura representa uma restrição, como em lajes de edificações onde o sistema FV não deve ser visto do nível do solo para preservar a arquitetura original ou motivos estéticos.
- Locais onde há restrição de área e a natureza compacta da estrutura permite uma maior densidade de potência.
- Lajes de edificações como shoppings, supermercados, hospitais, terminais rodoviários e aeroportuários, etc.

Para instalações de menor escala, como residências e usinas de GD, a estrutura apresenta vantagens notáveis. A padronização da estrutura e o fornecimento do mapa de vento pela fabricante eliminam a necessidade de contratar um profissional especializado para dimensionar esses parâmetros. Isso não apenas simplifica o processo, mas também representa uma economia significativa no orçamento, o que é particularmente benéfico para empreendimentos de menor porte.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Brasil avança no ranking mundial da fonte solar.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/brasil-avanca-no-ranking-mundial-da-fonte-solar/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

ABSOLAR. **Energia solar é a 2ª maior fonte energética do país: Como ter em casa?.** Disponível em: [https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-e-a-2a-maior-fonte-energetica-do-pais-como-ter-em-casa/#:~:text=A%20energia%20solar%20é%20a,Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20\(ABSOLAR\)](https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-e-a-2a-maior-fonte-energetica-do-pais-como-ter-em-casa/#:~:text=A%20energia%20solar%20é%20a,Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20(ABSOLAR).). Acesso em: 23 nov. 2023.

ABSOLAR. **Energia solar já evitou a emissão de 12,5 milhões de toneladas de.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-ja-evitou-a-emissao-de-125-milhoes-de-toneladas-de-co2/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

ABSOLAR. **Infográfico.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

CANADIAN Solar – **Datasheet.** Disponível em: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2020/05/Canadian_Solar-Datasheet-BiKu_CS3U-MB-AG_EN.pdf. Acesso em: 28 nov 2023.

CANALSOLAR. **Diferença entre módulos bifaciais e monofaciais.** 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/diferenca-entre-modulos-bifaciais-e-monofaciais/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

CREMASCO, N. (n.d.). **Estudo dos fatores que reduzem o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes tecnologias no estado do Paraná,** Curitiba 2021. Disponível em: https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno01/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pesscodnr=161489&p_cadedocpescodnr=129. Acesso em: 28 nov. 2023

EDP. **Energia Solar no Brasil: histórico, cenário atual e previsões.** Disponível em: <https://empresas.edp.com.br/blog/energia-solar-no-brasil/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

EDP. **Qual é a origem da energia solar? Conheça a história.** Disponível em: <https://empresas.edp.com.br/blog/origem-da-energia-solar/>. Acesso em: 22 nov. 2023.

FRAUNHOFER, **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaic Report.** 2020. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de>. Acesso em: 02 dez. 2023

GOV. **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 24 nov. 2023.

GOV. **Brasil se torna o oitavo maior país do mundo em capacidade instalada para geração de energia solar.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-se-torna-o-oitavo-maior-pais-do-mundo-em-capacidade-instalada-para-geracao-de-energia-solar>. Acesso em: 22 nov. 2023.

GOV. **Obter dados do atlas brasileiro de energia solar (atlas solar).** Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-dados-do-atlas-brasileiro-de-energia-solar-atlas-solar>. Acesso em: 03 jan. 2024.

GOV. **Os avanços e o futuro da energia solar no Brasil são destaques na rodada de painéis no estande do país na COP27.** Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/brasil-na-cop/os-avancos-e-o-futuro-da-energia-solar-no-brasil-sao-destaques-na-rodada-de-paineis-no-estande-do-pais-na-cop-27>. Acesso em: 24 nov. 2023.

IBERDROLA. **Células fotovoltaicas.** 22 abr. 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/celulas-fotovoltaicas-fotoeletricas>. Acesso em: 25 nov. 2023.

IBERDROLA. **Radiação solar.** 22 abr. 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/compromisso-social/radiacao-solar>. Acesso em: 09 dez. 2023.

IBRAP. **Ecoground norte 15°.** Disponível em: https://ibrap.com.br/foto_ecoground_norte. Acesso em: 26 nov. 2023.

IEC. (2016) IEC 61724-3:2016 **photovoltaic system performance— part 3: energy evaluation method.**

KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. Grupo Gen-LTC, Oitava Edição. 2006.

LAU, L. **Estruturas para sistemas fotovoltaicos: tipos e características importantes**. 26 nov. 2017. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/estruturas-parasistemas-fotovoltaicos-tipos-e-caracteristicas-importantes/>. Acesso em: 16 jan. 2024.

LOPES, J. P. de C., & ANDRADE, J. A. B. de. (2023). **Esquematização de estrutura de usina de energia solar no brasil: uma revisão de literatura**. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(4), 1528–1537. <https://doi.org/10.51891/rease.v9i4.9354>

PAS, S. A., CANTÚ, V. V., BRAGA, M., PIRES, A. M., & RÜTHER, R.. **Análise de desempenho e simulação de módulos bifaciais instalados em estrutura de suporte não convencional**. 2022.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

PORTAL Solar. **História da Energia Solar: Quem Criou a Energia Solar?** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 22 nov. 2023.

PORTAL Solar. **Suporte para placa solar: onde comprar e como afixar?**. 29 jun. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/suporte-placa-solar>. Acesso em: 19 jan. 2024.

PORTOLAN dos Santos, Í., & RÜTHER, R. (2014). **Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil**. *Renewable Energy*, 63, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.008>.

PVSYST – Photovoltaic software. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SILVA, J. R. (2020). **Uma sequência de ensino investigativa para a abordagem do efeito fotovoltaico**, Volta Redonda, 2020.

SMA sunny boy 1200. (2010). Sunny Boy 1200 / 1700 / 2500 / 3000 Beproofde techniek voor veilige investeringen.

SOUZA, M. B., TONOLO, E. A., YANG, R. L., TIEPOLO, G. M., & JUNIOR, J. U. **Determinação da irradiação difusa a partir da irradiação global horizontal-estudo para a cidade de Curitiba**, 2019.

ZOMER, C. and RÜTHER, R., **Simplified method for shading-loss analysis in BIPV systems – part 1: Theoretical study**. *Energy and Buildings*, 2017. 141: p. 69-82.