



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Mariani Corrêa Casagrande

**Agrovoltaico:** Aplicação e Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos na Agricultura

Araranguá

2023

Mariani Corrêa Casagrande

**Agrovoltáico:** Aplicação e Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos na Agricultura

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Elzeire Bremerman  
Corientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2023

Casagrande, Mariani Corrêa

Agrovoltaicos: Aplicação e Desempenho de Sistemas  
Fotovoltaicos na Agricultura / Mariani Corrêa Casagrande ;  
orientador, Leonardo Elizeire Bremerman, coorientador, Giuliano  
Arns Rampinelli, 2023.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade  
Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em  
Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Energia solar fotovoltaica. 3.  
Sistema agrovoltaico. I. Bremerman, Leonardo Elizeire. II.  
Rampinelli, Giuliano Arns. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

Mariani Corrêa Casagrande

**Agrovoltáticos: Aplicação e Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos na Agricultura**

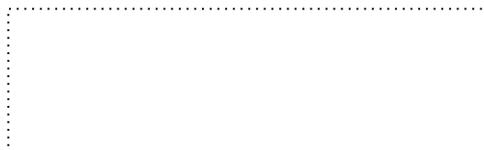
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Energia.

Araranguá, 06 de novembro de 2023.



Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof.º Leonardo Elizeire Bremerman, Dr.

Orientador



Prof.ª Letícia Toretí Scarabelot,  
Lenergy Energia Solar



Prof.º André Possamai Rosso,  
SENAI

Araranguá, 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e inspiração ao longo deste processo acadêmico.

À minha amada família, em especial aos meus pais, Everson e Gisele, e à minha irmã Manuela, agradeço por todo o apoio incondicional, encorajamento e amor que sempre me proporcionaram. À minha amável avó Selma, agradeço por sua presença constante e por ser uma fonte de inspiração.

Ao meu namorado Ricardo, expesso minha gratidão pela compreensão, paciência e incentivo durante os momentos desafiadores deste percurso acadêmico.

Às minhas queridas amigas e colegas de faculdade, Bianca e Júlia, agradeço pela parceria, amizade e troca de conhecimentos ao longo desta jornada acadêmica.

Quero expressar um agradecimento especial aos meus professores e orientadores, Giuliano Arns Rampinelli e Leonardo Elezeire Bremermann. Sou profundamente grata pela contribuição inestimável de ambos, que não apenas enriqueceram academicamente este projeto, mas também desempenharam um papel fundamental no fortalecimento do meu crescimento como estudante.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste projeto, o meu muito obrigada. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, e estou profundamente grata por ter tido o apoio de pessoas tão especiais em minha vida.

The mind that opens to a new idea will never return to its original size.

Albert Einstein

## RESUMO

A implementação de fontes de energia renovável, notadamente a energia solar fotovoltaica, representa uma solução concreta e viável, caracterizada por uma inserção exponencial no panorama energético. Os sistemas agrovoltaicos se destacam ao integrar a geração solar com atividades agrícolas, proporcionando não apenas energia limpa, mas também otimização do uso da terra e diversificação de renda para os agricultores. O presente trabalho avaliou quatro sistemas agrovoltaicos em cinco regiões brasileiras, utilizando o *software System Advisor Model (SAM)* para uma análise detalhada do fator de capacidade e produtividade de cada sistema. Em todas as regiões, os resultados evidenciaram a eficácia desses sistemas, destacando o sistema agrovoltaico com rastreador de 1 eixo horizontal e módulo bifacial como a opção mais vantajosa. Na Região Nordeste, por exemplo, o sistema apresentou um fator de capacidade de 19,62% e uma elevada produtividade de 1719,08 kWh/kWp, posicionando o sistema como líder em desempenho entre as regiões analisadas. Na região Centro-Oeste, o fator de capacidade anual resultou em 18,67% e sua produtividade anual em 1635,22 kWh/kWp. Em seguida a região Sudeste o fator de capacidade e produtividade resultou em 17,54% e 1536,66 kWh/kWp, respectivamente. E na região Sul com 16,64% de fator de capacidade e produtividade anual de 1457 kWh/kWp. Por outro lado, a Região Norte registrou resultados ligeiramente inferiores, com um fator de capacidade de 16,08% e uma produtividade de 1408,98 kWh/kWp, evidenciando variações regionais significativas. No entanto, é crucial ressaltar que, sendo uma tecnologia relativamente nova no Brasil, a complexidade das interações entre a geração de energia e as práticas agrícolas exige uma compreensão mais aprofundada para otimizar a implementação desses sistemas, considerando as peculiaridades de cada cultura e região. Essa conclusão ressalta não apenas o potencial energético, mas também os benefícios ambientais associados à geração de energia limpa e à melhoria da eficiência agrícola. Investir na implementação de sistemas agrovoltaicos no Brasil surge como uma medida estratégica para beneficiar tanto o setor agrícola quanto a matriz energética do país, mas requer um compromisso contínuo com a pesquisa e desenvolvimento para garantir o sucesso a longo prazo dessa inovadora abordagem.

**Palavras-chave:** energia solar fotovoltaica; produtividade agrovoltaica; sistema agrovoltaico; rastreador solar; fator de capacidade; agricultura.

## ABSTRACT

The implementation of renewable energy sources, notably photovoltaic solar energy, represents a concrete and viable solution, characterized by an exponential insertion in the energy panorama. Agrovoltaic systems stand out by integrating solar generation with agricultural activities, providing not only clean energy, but also optimizing land use and income diversification for farmers. This work evaluated four agrovoltaic systems in five Brazilian regions, using the System Advisor Model (SAM) software for a detailed analysis of the capacity and productivity factor of each system. In all regions, the results showed the effectiveness of these systems, highlighting the agrovoltaic system with a 1-horizontal axis tracker and bifacial module as the most advantageous option. In the Northeast Region, for example, the system presented an capacity factor of 19.62% and a high productivity of 1719.08 kWh/kWp, positioning it as a leader in performance among the regions analyzed. In the Central-West region, the annual capacity factor was calculated at 18.67% and its annual productivity at 1,635.22 kWh/kWp. Then in the Southeast region, the capacity and productivity factor was improved by 17.54% and 1536.66 kWh/kWp, respectively. And in the South region with 16.64% capacity factor and annual productivity of 1457 kWh/kWp. On the other hand, the North Region recorded slightly lower results with a capacity factor of 16.08% and a productivity of 1408.98 kWh/kWp, showing significant regional variations. However, it is crucial to highlight that, as it is a relatively new technology in Brazil, the complexity of the interactions between energy generation and agricultural practices requires a deeper understanding to optimize the implementation of these systems, considering the peculiarities of each culture and region. This conclusion highlights not only the energetic potential but also the environmental benefits associated with generating clean energy and improving agricultural efficiency. Investing in the implementation of agrovoltaic systems in Brazil appears as a strategic measure to benefit both the agricultural sector and the country's energy matrix but requires a continuous commitment to research and development to ensure the long-term success of this innovative approach.

**Keywords:** photovoltaic solar energy; agrovoltaic productivity; agrovoltaic system; solar tracker; capacity factor; agriculture.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	16
Figura 2 - Participação na Produção Agrícola Brasileira por Região.....	17
Figura 3 - (a) Movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano no hemisfério Sul; (b)Variação da Declinação Solar ( $\delta$ ) em quatro posições da Terra. .	21
Figura 4 - (a) Ângulos $\theta_z, \alpha$ e $\gamma_s$ representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Superfície inclinada em relação ao plano horizontal, com os ângulos $\beta, \gamma, \gamma_s$ e $\theta$ .....	23
Figura 5 - (a) Irradiância direta incidente sobre superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre superfície inclinada.....	23
Figura 6 - Componentes da radiação solar.....	24
Figura 7 - Composição módulo monofacial. ....	26
Figura 8 - Comparação módulo monofacial e bifacial.....	27
Figura 9 - Composição módulo bifacial.....	27
Figura 10 - Modelos de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica on-grid e off-grid. ....	29
Figura 13 - Estrutura fixa para sistema fotovoltaico.....	30
Figura 14 - Sistema de rastreamento de eixo único, horizontal.....	31
Figura 15 - Sistema de rastreamento de eixo único, vertical.....	31
Figura 16 - Rastreador solar de dois eixos.....	32
Figura 17 - Principais culturas da região Sul destacadas no estado de Rio Grande do Sul.....	34
Figura 18 - Principais culturas da região Sudeste destacadas no estado de Minas Gerais.....	35
Figura 19 - Principais culturas da região Centro-Oeste destacadas no estado de Minas Gerais.....	36
Figura 20 - Principais culturas da região Nordeste destacadas no estado de Pernambuco.....	37
Figura 21 - Principais culturas da região Norte destacadas no estado de Roraima.....	38
Figura 11 - Uso dual da terra, em Heggelbach, na Alemanha.....	39
Figura 12 - O sistema agrovoltaiico em Heggelbach, na Alemanha.....	40

Figura 22 - Visão geral dos projetos e instalações da APV com localização. O gradiente de cores indica a média de longo prazo da soma diária/anual da radiação horizontal global [kwh/m²].....	41
Figura 23 - Análise fator de capacidade anual na região Sul .....	55
Figura 24 - Análise fator de capacidade anual na região Sudeste. ....	57
Figura 25 - Análise fator de capacidade anual na região Centro-Oeste. ....	60
Figura 26 - Análise fator de capacidade anual na região Nordeste. ....	62
Figura 27 - Análise fator de capacidade anual na região Norte. ....	64
Figura 28 - Análise de quatro sistemas agrovoltáticos região Sul. ....	66
Figura 29 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa e com módulo bifacial, região Sul.....	67
Figura 30 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Sul. ....	68
Figura 31 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Sul.....	69
Figura 32 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáticos região Sudeste. ....	70
Figura 33 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Sudeste. ....	71
Figura 34 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Sudeste. ....	72
Figura 35 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Sudeste.....	72
Figura 36 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáticos região Centro-Oeste.....	73
Figura 37 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Centro-Oeste. ....	75
Figura 38 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Centro-Oeste. ....	75
Figura 39 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Centro-Oeste. ....	76
Figura 40 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáticos região Nordeste. ....	77

Figura 41 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Nordeste. ....	78
Figura 42 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Nordeste .....	79
Figura 43 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Nordeste. ....	80
Figura 44 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Norte...	81
Figura 45 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Norte.....	82
Figura 46 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Norte.....	83
Figura 47 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Norte. ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Visão mundial dos agrovoltáicos existentes com especificações técnicas e culturas cultivadas.....	43
Tabela 2 - Lista das cidades brasileiras simuladas.....	48
Tabela 3 - <i>Datasheet</i> módulo fotovoltaico. ....	49
Tabela 4 - <i>Datasheet</i> inversor. ....	49
Tabela 5 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos, região Sul. .....	54
Tabela 6 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Sul.....	55
Tabela 7 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Sudeste.....	56
Tabela 8 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Sudeste.....	57
Tabela 9 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Centro-Oeste (continua).....	59
Tabela 10 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Centro-Oeste.....	59
Tabela 11 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Nordeste.....	61
Tabela 12 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Nordeste.....	62
Tabela 13 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Norte. ....	63
Tabela 14- Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Norte. ....	64
Tabela 15 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáicos região Sul .....	66
Tabela 16 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Sul. ....	67
Tabela 17 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáicos região Sudeste .....	69
Tabela 18 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Sudeste	70

Tabela 19 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Centro-Oeste.....	73
Tabela 20 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Centro-Oeste.....	74
Tabela 21 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Nordeste. .....	77
Tabela 22 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Nordeste. .....	78
Tabela 23 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Norte..	81
Tabela 24 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Norte.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABBU	Associação Brasileira de Bibliotecas Universitárias Brasileiras
ACRL	Association of College and Research Libraries
BC	Biblioteca Central
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BN	Biblioteca Nacional
BU	Biblioteca Universitária
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCN	Catálogo Coletivo Nacional
CDD	Classificação Decimal de Dewey
CDU	Classificação Decimal Universal
COMUT	Programa de Comutação Bibliográfica
EaD	Educação a distância
ENEGEP	Encontro Nacional de Engenharia de Produção
ERIC	Education Resources Information Center
FC	Fator de Capacidade
FIES	Financiamento ao Estudante do Ensino Superior
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IES	Instituição de Educação Superior
IMVP	International Motor Vehicle Program
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional
MARC	Machine Readable Cataloging
MEC	Ministério da Educação
MFV	Mapa do Fluxo de Valor
MIT	Massachusetts Institute of Technology
APV	Usinas Agrovoltáicas
UFV	Usinas Fotovoltáicas
YF	Produtividade Fotovoltáica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
2.1	OBJETIVOS GERAIS .....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
3.1	RADIAÇÃO SOLAR .....	20
3.2	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	25
<b>3.2.1</b>	<b>Módulo Monofacial</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Módulo Bifacial</b> .....	<b>26</b>
3.3	USINAS FOTOVOLTAICAS (UFV) .....	28
3.4	TIPOS DE ESTRUTURAS .....	29
<b>3.4.1</b>	<b>Estruturas fixas</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Estrutura com rastreamento solar</b> .....	<b>30</b>
3.4.2.1	<i>Rastreadores solares de um eixo</i> .....	30
3.4.2.2	<i>Rastreadores solares de dois eixos</i> .....	31
3.5	AGRICULTURA NO BRASIL .....	32
<b>3.5.1</b>	<b>Região Sul</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Região Sudeste</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Região Centro-Oeste</b> .....	<b>35</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Região Nordeste</b> .....	<b>36</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Região Norte</b> .....	<b>38</b>
3.6	USINAS AGROVOLTAICAS (APV).....	39
<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
5.1	SOFTWARE SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL) .....	47
5.2	SISTEMA AGROVOLTAICO REFERÊNCIA.....	48
5.3	SISTEMA AGROVOLTAICO COM ESTRUTURA FIXA.....	49
5.4	SISTEMA AGROVOLTAICO COM RASTREADOR SOLAR 1 EIXO HORIZONTAL .....	50
5.5	CARACTERÍSTICA DO SISTEMA AGROVOLTAICO COM MÓDULO MONOFACIAL.....	50
5.6	CARACTERÍSTICA DO SISTEMA COM MÓDULO BIFACIAL.....	51

5.7	ÍNDICES DE MÉRITO.....	51
5.7.1	Fator de Capacidade (FC).....	52
5.7.2	Produtividade .....	52
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
6.1	FATOR DE CAPACIDADE (FC).....	53
6.1.1	Resultados Região Sul .....	53
6.1.2	Resultados Região Sudeste.....	56
6.1.3	Resultados Região Centro-Oeste .....	58
6.1.4	Resultados Região Nordeste .....	61
6.1.5	Resultados Região Norte .....	63
6.2	PRODUTIVIDADE.....	65
6.2.1	Resultados Região Sul .....	65
6.2.2	Resultados Região Sudeste.....	69
6.2.3	Resultados Região Centro-Oeste .....	73
6.2.4	Resultados Região Nordeste .....	76
6.2.5	Resultados Região Norte .....	80
7	CONCLUSÃO .....	86
	REFERÊNCIAS .....	88

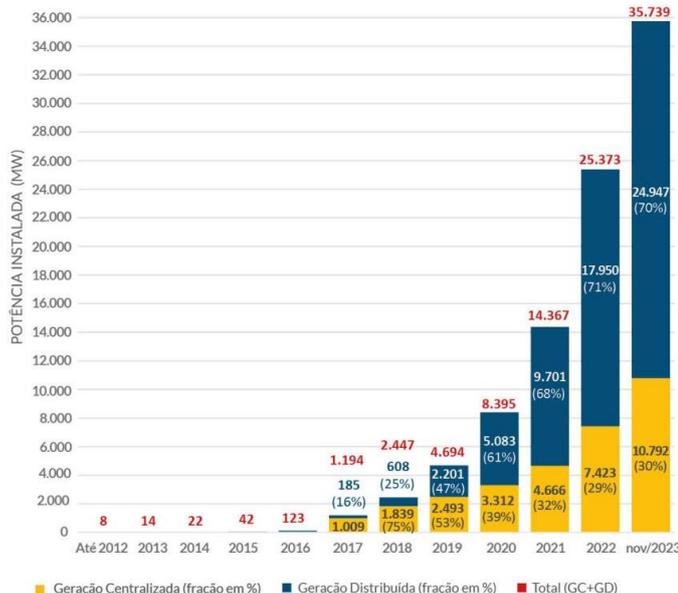
# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia renovável tem se tornado uma prioridade global, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Solomon *et al.*, 2009). Entre as diversas fontes de energia renováveis, a energia fotovoltaica se destaca como uma solução sustentável e de grande potencial.

Nesse contexto, os sistemas agrovoltaicos surgem como uma alternativa, combinando a geração de energia solar com atividades agrícolas. Esses sistemas permitem o uso dual do solo, integrando a produção de alimentos e a geração de eletricidade. Ao aproveitar as áreas agrícolas existentes para a instalação de módulos fotovoltaicos, os sistemas agrovoltaicos oferecem benefícios adicionais, como otimização do uso da terra e diversificação de renda para os agricultores (Goetzberger; Zastrow, 1981).

A sinergia entre as regiões com alta incidência de radiação solar e a produção agrícola destaca a oportunidade de aproveitar essas áreas para implementar sistemas agrovoltaicos. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar (Absolar, 2023), a energia solar deve crescer 10 gigawatts (GW) em 2023, ou 42,4% ante a potência solar estimada para o fechamento de 2022, alcançando mais de 35 gigawatts (GW), do final de 2020 para o final de 2021 cresceu 65%, ultrapassando 13 gigawatts (GW), conforme mostra figura 1.

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil

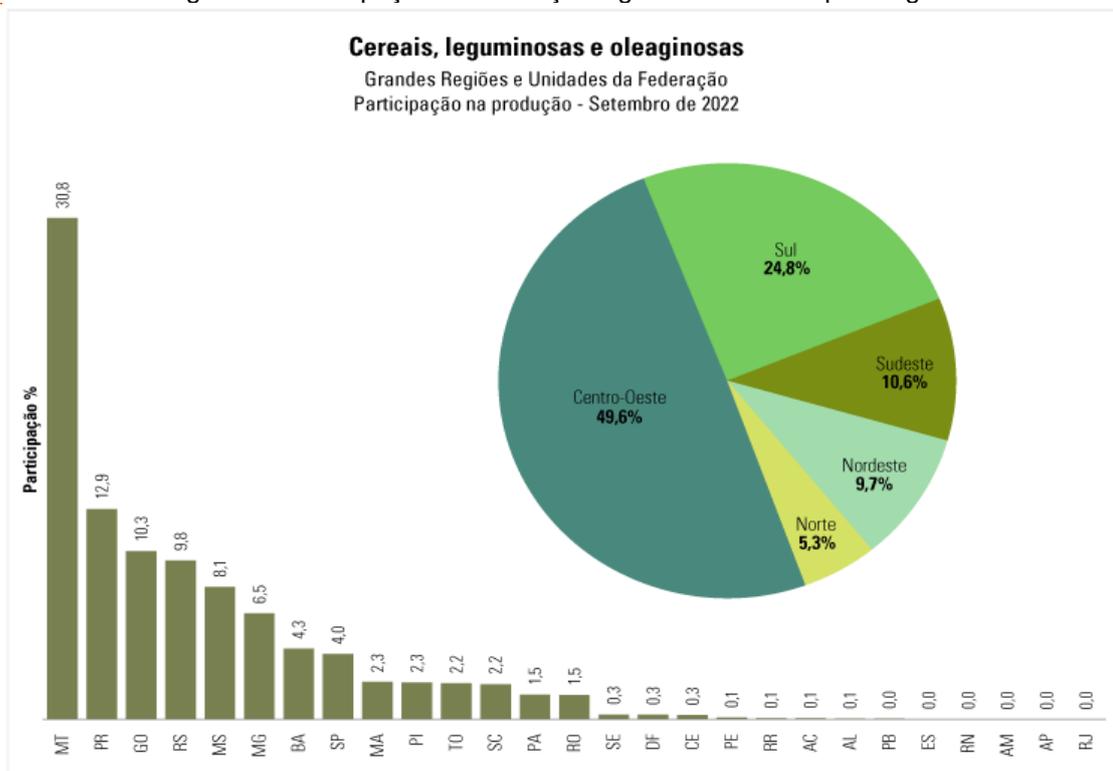


Fonte: ABSOLAR, 2023.

O Brasil, com seu considerável potencial para a integração da energia solar à agricultura, emerge como líder global na produção de alimentos. Os indicadores de setembro para a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2022 indicam um aumento de 3,4%, atingindo 261,9 milhões de toneladas em relação a 2021. A expansão da área a ser colhida, estimada em 6,8% e totalizando 73,2 milhões de hectares, representa um indicador positivo para o setor agrícola brasileiro (Agência IBGE Notícias, 2023). Essa abordagem não apenas impulsiona o segmento de energia renovável, mas também fomenta o desenvolvimento sustentável da agricultura, fortalecendo a segurança alimentar e catalisando o crescimento socioeconômico do país (Shahzad *et al.*, 2020).

No Brasil, as regiões com elevada incidência de radiação solar coincidem com centros produtivos agrícolas significativos. O Centro-Oeste destaca-se na produção de culturas como soja, milho e algodão, enquanto o Sul é propício para o trigo, arroz, frutas e hortaliças. O Nordeste apresenta uma variedade de culturas, incluindo cana-de-açúcar, mandioca, frutas tropicais e castanha-de-caju, conforme indicado pelo (IBGE, 2017).

Figura 2 - Participação na Produção Agrícola Brasileira por Região.



Fonte: IBGE, 2020.

Investir na tecnologia de sistemas agrovoltáicos no Brasil oferece uma série de vantagens. Um estudo realizado por Marrou (2013) destaca que essa integração pode trazer benefícios econômicos, ambientais e sociais. Os sistemas agrovoltáicos permitem a diversificação de renda para os agricultores, pois além da produção agrícola, eles passam a gerar eletricidade para venda ou autoconsumo. Além disso, essa tecnologia pode garantir o desenvolvimento rural, promovendo a geração de empregos e a inclusão social nas comunidades agrícolas.

Diante desse contexto, é evidente o encorajamento e o potencial dos sistemas agrovoltáicos como uma solução alternativa e sustentável para o Brasil, combinando a produção agrícola com a geração de energia renovável.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar e analisar o desempenho energético de um sistema agrovoltaico em diferentes regiões do Brasil, utilizando diferentes tipos de estruturas e módulos fotovoltaicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Compactuando com o objetivo geral descrito anteriormente, abaixo segue os específicos:

- a) Simular um sistema agrovoltaico em diferentes tipos de estruturas, incluindo estruturas fixas e rastreadores solares;
- b) Simular um sistema agrovoltaico com diferentes módulos fotovoltaicos, sendo eles módulos monofaciais e módulos bifaciais;
- c) Avaliar o desempenho energético do sistema em diferentes regiões do Brasil;
- d) Analisar e comparar a eficiência do sistema em cada região, considerando fatores como radiação solar, condições climáticas e produção agrícola;
- e) Identificar as regiões mais adequadas para a implementação de sistemas agrovoltaicos, levando em conta a eficiência energética.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

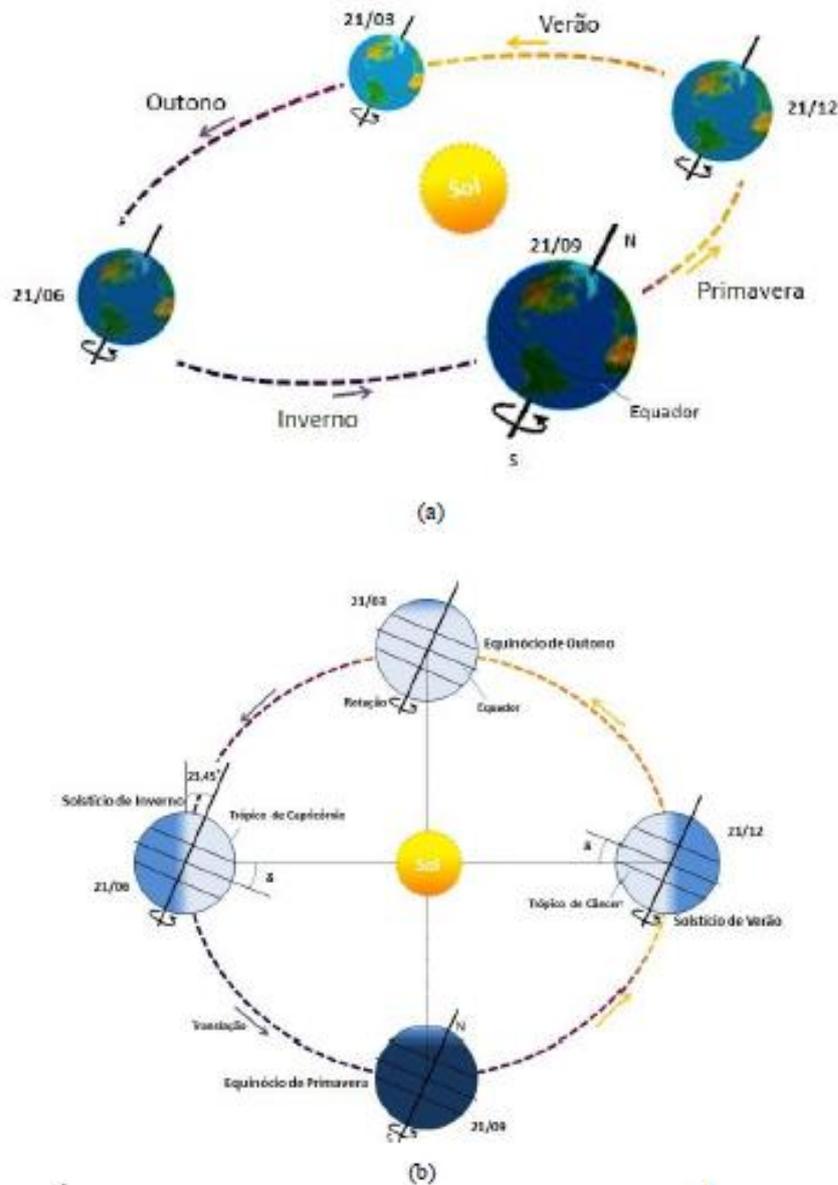
Nesta seção, serão apresentadas as referências bibliográficas essenciais para o embasamento deste trabalho, além de explorar conceitos-chave que são fundamentais para a compreensão e conclusão da pesquisa.

#### 3.1 RADIAÇÃO SOLAR

A Terra, em sua jornada anual em torno do Sol, segue uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade ( $\varepsilon \approx 0,017$ ). Além disso, o eixo da Terra apresenta uma inclinação de aproximadamente 23,45 graus em relação ao plano normal à elipse. Essa inclinação, combinada com o movimento de translação, é responsável pela ocorrência das estações do ano. Ao observarmos o movimento aparente do Sol ao meio-dia solar ao longo do ano, percebemos que o ângulo entre os raios solares e o plano do Equador varia entre +23,45° graus ao redor do dia 21 de junho (solstício de inverno no hemisfério Sul) e -23,45° graus em 21 de dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Esse ângulo é conhecido como Declinação Solar ( $\delta$ ) e é positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21 de março (equinócio de outono), os raios solares se alinham com o plano do Equador ( $\delta = 0$ ) (Pinho; Galdino, 2014).

Essas características estão intrinsecamente ligadas à rotação da Terra. A figura 3 (a) ilustra o movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano no hemisfério Sul, enquanto a figura 3 (b) mostra a variação da Declinação Solar ( $\delta$ ) em quatro posições da Terra ao longo do ano. Ao analisar a figura 3 (b), pode-se observar a variação da duração dos dias ao longo do ano para uma determinada localidade, resultado da inclinação do eixo da Terra. Por exemplo, nas localidades do hemisfério Sul, os dias são mais longos no solstício de verão e mais curtos no solstício de inverno. No Equador, a duração dos dias é sempre igual e nas proximidades dessa região as variações ao longo do ano são mínimas. Também é possível notar que nos equinócios a duração dos dias é a mesma em qualquer localidade (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 3 - (a) Movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano no hemisfério Sul;  
 (b) Variação da Declinação Solar ( $\delta$ ) em quatro posições da Terra.



Fonte: Pinho; Galdino (2014).

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do País se concentra em regiões mais distantes do Equador (Pereira *et al.*, 2017).

As características angulares e a rotação da Terra são de extrema importância, pois permitem otimizar o aproveitamento da radiação solar, ajustando a posição dos módulos fotovoltaicos de acordo com a latitude local e o período do ano em que se deseja obter maior energia. No Hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação

solar fixo deve ser orientado para o Norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local (Pereira *et al.*, 2017).

A radiação solar, ou irradiância solar, é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície por uma unidade de área desta superfície, geralmente medida em Watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ) (Pereira *et al.*, 2017).

A constante solar ( $I_0$ ) é definida como o valor da irradiância extraterrestre que chega sobre uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média Terra-Sol, e tem valor aproximado de  $1.367 W/m^2$  (adotado pelo *WRC - World Radiation Center*). A excentricidade da elipse que descreve a trajetória da Terra em torno do Sol resulta em uma variação no valor da irradiância extraterrestre ao longo do ano (Pinho; Galdino, 2014).

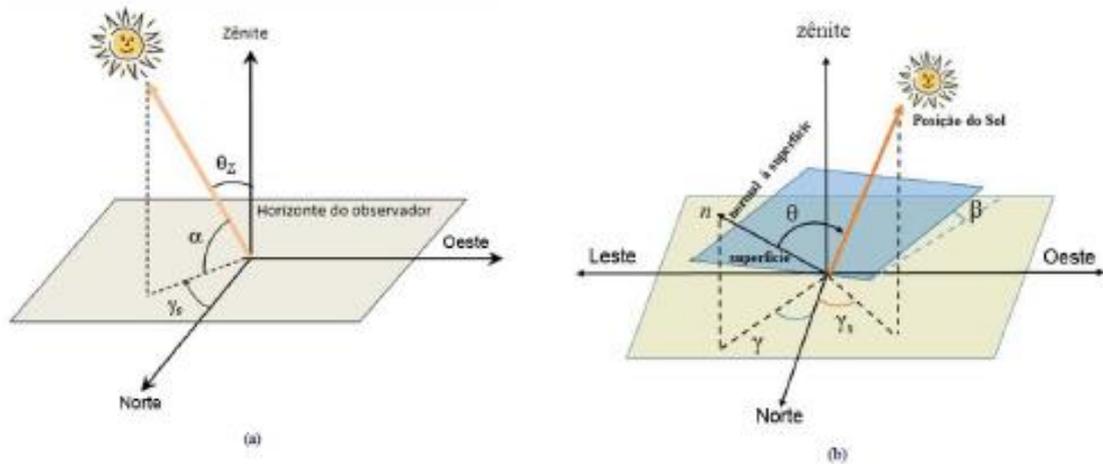
Existem diversas relações geométricas entre os raios solares que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre. O ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é o ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite). A altura ou elevação solar ( $\alpha$ ) é o ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador). Os ângulos acima são ângulos complementares, ou seja, ( $z + \alpha = 90^\circ$ ) (Pinho; Galdino, 2014).

O ângulo azimutal do Sol ( $s$ ), também chamado azimute solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte ( $0^\circ$ ) geográfico, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste) (Pinho; Galdino, 2014).

$$-180^\circ \leq s \leq 180^\circ$$

O ângulo azimutal da superfície ( $\gamma$ ) é o ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas convenções do azimute solar. Já a inclinação da superfície de captação ( $\beta$ ) é o ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal ( $0^\circ$  até  $90^\circ$ ). E o ângulo de incidência ( $\theta$ ) é aquele formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação (Pinho; Galdino, 2014).

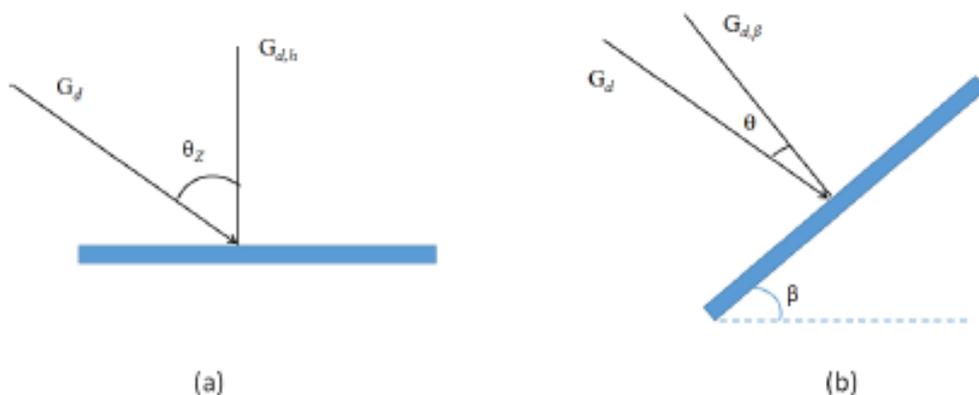
Figura 4 - (a) Ângulos  $\theta_z$ ,  $\alpha$  e  $\gamma_s$  representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Superfície inclinada em relação ao plano horizontal, com os ângulos  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  e  $\theta$ .



Fonte: Pinho; Galdino (2014).

Os ângulos ( $\theta_z$ ) e ( $\theta$ ) permitem calcular a componente direta da irradiância que incide normalmente a um plano horizontal ( $G_{d,h}$ ) ou a qualquer superfície inclinada ( $G_{d,\beta}$ ), desde que conhecida a componente direta da irradiância incidente sobre a superfície. Essa informação é necessária para os cálculos de irradiância solar direta coletada por dispositivos de conversão de energia solar. A Figura abaixo indica o ângulo de incidência da irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal e sobre uma superfície inclinada (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 5 - (a) Irradiância direta incidente sobre superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre superfície inclinada.



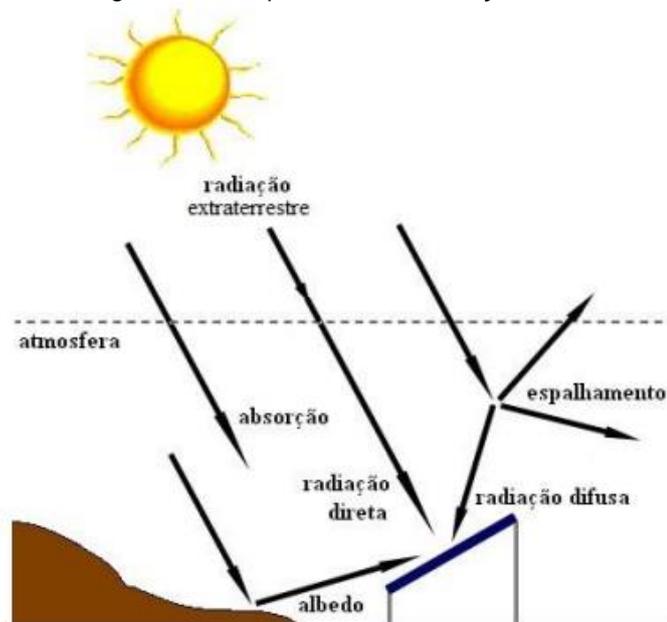
Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

A irradiância solar que incide sobre uma superfície é composta por uma componente direta e por outra componente difusa. A primeira apresenta direção de

incidência direta na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera (Pinho; Galdino, 2014).

O ambiente de entorno pode alterar a radiação absorvida, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos e o solo, podem fazer com que haja uma terceira componente refletida, o albedo. Apresentando os três componentes que interagem com a superfície, a Figura 6 destaca o esquema de radiação solar sobre a superfície receptora, originando uma resultante da soma das componentes direta, difusa e o albedo. Essa resultante é chamada de radiação global (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 6 - Componentes da radiação solar.



Fonte: PINHO, J. T.; GALDINO, M. A., 2014.

A disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução) (ANEEL, 2008).

## 3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A energia fotovoltaica é a energia gerada a partir da radiação eletromagnética proveniente do sol convertida em energia elétrica através dos chamados módulos fotovoltaicos (Silva; Carmo, 2017).

Um módulo fotovoltaico é um dispositivo composto por células fotovoltaicas, estas são normalmente feitas de silício cristalino ou materiais semicondutores orgânicos. Essas células fotovoltaicas são interconectadas eletricamente, formando o módulo (Wenham *et al.*, 2013).

### 3.2.1 Módulo Monofacial

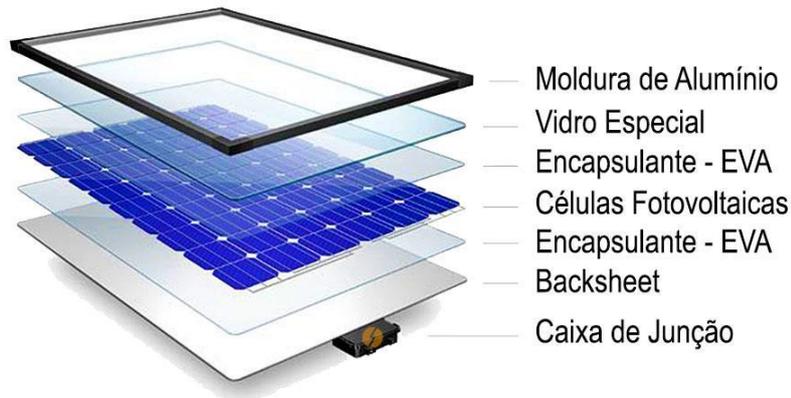
Os módulos monofaciais são a configuração tradicional de módulos fotovoltaicos, eles são amplamente utilizados em instalações solares convencionais e são eficazes em locais com exposição direta e consistente à luz solar. A eficiência típica dos módulos monofaciais varia de 15% a 22%, dependendo da tecnologia e design (Song *et al.*, 2017).

A base do módulo é formada por células fotovoltaicas, frequentemente feitas de silício cristalino. Essas células são responsáveis por converter a luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico (Green *et al.*, 2019). As células fotovoltaicas são encapsuladas em material transparente, frequentemente EVA (etileno-acetato de vinila), e laminadas entre camadas de vidro na face frontal. A parte traseira é protegida por um material de encapsulamento (*backsheet*), oferecendo resistência mecânica e proteção contra condições ambientais (Bhattacharya; Mukhopadhyay, 2016). A Figura 7 apresenta a estrutura típica de um desses módulos monofaciais.

Um módulo fotovoltaico monofacial captura a luz solar apenas pela sua face frontal, onde as células fotovoltaicas estão posicionadas. A face traseira não é projetada para capturar a luz, resultando em uma eficiência de conversão de luz solar inferior àquela de módulos bifaciais (Al-Aqtash *et al.*, 2016).

A eficiência do módulo monofacial é determinada pela sua capacidade de converter a luz solar incidente em eletricidade, sendo esta influenciada pela qualidade das células fotovoltaicas, design e materiais utilizados na construção do módulo (Portal Solar, 2023).

Figura 7 - Composição módulo monofacial.



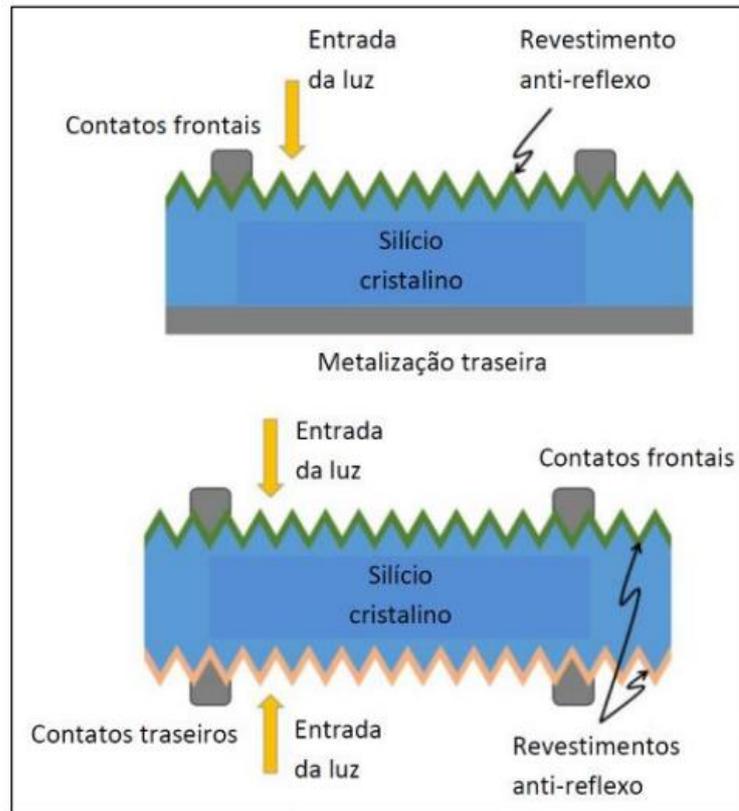
Fonte: Portal Solar, 2023.

### 3.2.2 Módulo Bifacial

A introdução dos módulos fotovoltaicos bifaciais representa uma evolução significativa no campo da energia solar, especialmente diante da estagnação observada no rendimento dos módulos fotovoltaicos convencionais nos últimos anos. Esses novos dispositivos têm se destacado ao oferecer benefícios notáveis em termos de eficiência, ocupação de área e desempenho financeiro (Comparotto et al., 2014; Guerrero-Lemus *et al.*, 2016).

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos bifaciais é semelhante ao de um módulo fotovoltaico convencional. Como mostrado na Figura 8, a diferença está atrelada ao fato de o módulo bifacial ser capaz de receber luz dos dois lados, na parte frontal absorvendo diretamente a luz irradiada do sol e na parte traseira recebendo a luz refletida do solo em que o módulo está instalado (Fernández, 2020).

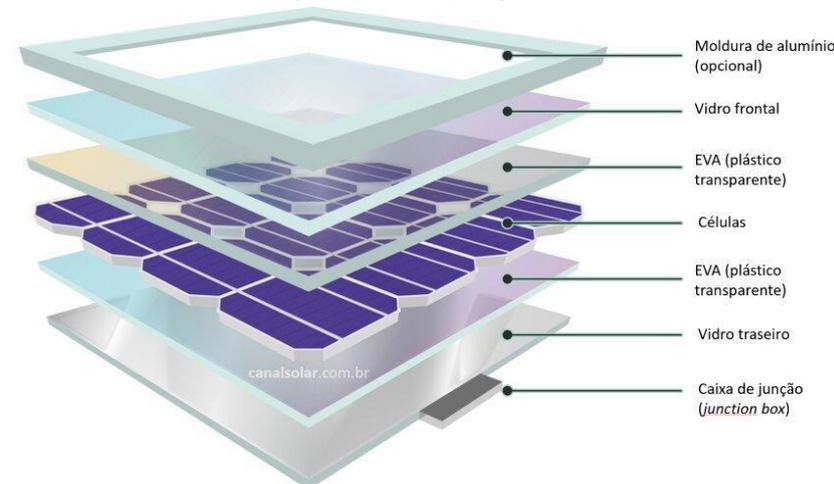
Figura 8 - Comparação módulo monofacial e bifacial.



Fonte: Canal Solar (2019a).

Conforme a Figura 9, ao contrário do padrão convencional dos módulos fotovoltaicos, o módulo bifacial apresenta uma lâmina de vidro em sua face posterior, substituindo a folha traseira de tedlar, conhecida como *backsheet*, encontrada nos módulos.

Figura 9 - Composição módulo bifacial.



Fonte: Canal Solar (2019b).

A eficiência dos módulos bifaciais é geralmente maior, variando de 20% a 30% ou mais, tornando-os especialmente vantajosos em locais com condições de iluminação variadas ou onde a luz refletida é uma consideração importante (Song *et al.*, 2017).

O índice de transparência na parte posterior dos módulos fotovoltaicos pode ter uma variação entre 70% e 80%, que é chamado de índice de bifacialidade, conforme afirma Zimmer (2022). Ele é a razão entre a eficiência obtida pela parte traseira do módulo e a eficiência obtida pela frente do módulo, ambos os lados submetidos à mesmas condições de STC (Guerrero-Lemus *et al.*, 2016; Picard, 2021).

Além do índice de bifacialidade dos módulos fotovoltaicos, um dos fatores que pode afetar diretamente no ganho de energia com módulos bifaciais é a superfície onde ele será instalado, podendo ter alterações dependendo do local de instalação (Yanagi, 2006).

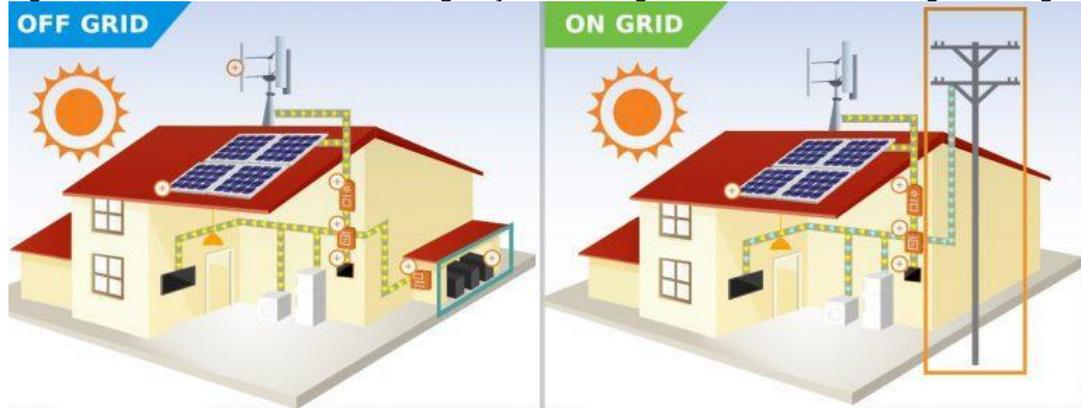
### 3.3 USINAS FOTOVOLTAICAS (UFV)

Os sistemas fotovoltaicos são definidos como uma associação de módulos em que o Sol atua como a principal fonte de energia. Essas associações podem ser em série e/ou paralelo, formando um arranjo fotovoltaico capaz de converter a energia solar em energia elétrica. A combinação de módulos é conectada a inversores, responsáveis por converter a energia gerada (em corrente contínua) em energia elétrica em corrente alternada (Rampinelli, 2010).

É possível classificar esses sistemas em dois principais, os sistemas isolados e os conectados à rede elétrica. O primeiro, os sistemas off-grid, são independentes da rede concessionária ou cooperativas, e necessitam de equipamentos de armazenamento, como as baterias (Alves, 2019).

Já nos sistemas conectados à rede elétrica, os sistemas on-grid, o inversor converte as correntes CC em CA e sincroniza toda a geração com a rede pública. Sempre que houver um excedente de energia, este é enviado à rede convencional de distribuição pública, e o relógio medidor gira no sentido contrário, gerando créditos para o consumidor (Pereira, 2019).

Figura 10 - Modelos de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica on-grid e off-grid.



Fonte: Revista Potência, 2023.

Os créditos gerados pelo sistema são descontados no valor da tarifa mensal de energia elétrica da residência, comércio ou indústria, sendo obrigatório o pagamento das taxas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e da demanda contratada.

### 3.4 TIPOS DE ESTRUTURAS

Existem diferentes tipos de estruturas utilizados na instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica. Cada tipo de estrutura é projetado para atender as diferentes necessidades e condições específicas.

#### 3.4.1 Estruturas fixas

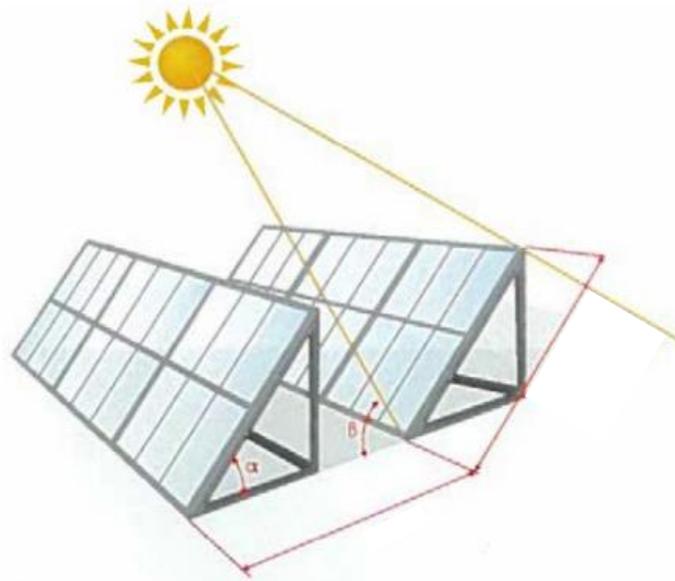
As estruturas fixas são amplamente utilizadas e são consideradas uma opção comum e de instalação simples para sistemas de energia solar fotovoltaica. Essas estruturas são fixadas no solo, em telhados, carport, entre outros e são protegidas pelos módulos fotovoltaicos em uma posição fixa.

O sistema fixo é caracterizado pela ausência de partes móveis, o que significa que os ângulos de inclinação e azimute dos módulos permanecem fixos. Por não terem capacidade de movimento, esses sistemas aproveitam apenas uma parte da irradiação direta disponível, uma vez que não conseguem acompanhar o movimento do sol ao longo do dia (Gasparin; Krenzinger, 2017).

É importante considerar as características específicas do local e os objetivos do projeto ao optar por um sistema fixo, levando em conta a quantidade de irradiação

solar disponível e as necessidades de geração de energia (Gasparin; Krenzinger, 2017).

Figura 11 - Estrutura fixa para sistema fotovoltaico



Fonte: Lopes, 2013.

### 3.4.2 Estrutura com rastreamento solar

A estrutura com rastreamento solar é um sistema avançado que permite que os módulos fotovoltaicos sigam o movimento do sol ao longo do dia, ajustando seus ângulos de orientação para otimizar a captação de luz solar. Essa tecnologia tem sido amplamente estudada e aplicada em diversos projetos ao redor do mundo, demonstrando melhorias significativas na eficiência de geração de energia solar fotovoltaica.

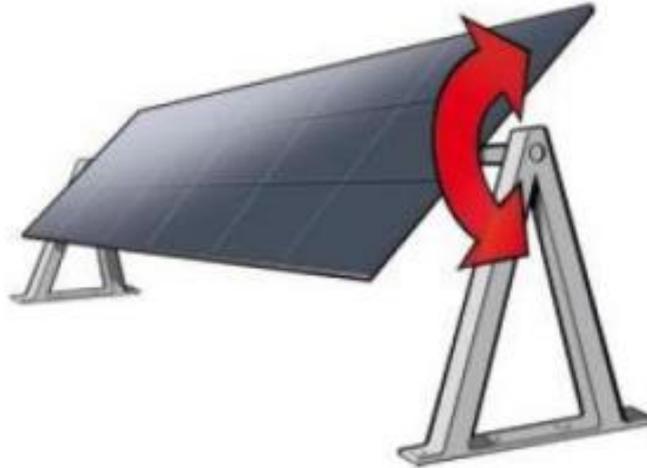
#### 3.4.2.1 *Rastreadores solares de um eixo*

Sistemas com rastreadores monoaxiais ou de um único eixo têm apenas um eixo de rotação, podendo ser horizontal ou vertical, o qual permite que os módulos acompanhem o movimento do sol de Leste a Oeste ou de Norte a Sul.

Os de eixo horizontal são os mais comuns, o eixo variável é conduzido na direção Norte-Sul (rastreado o sol de Leste a Oeste) ou na direção Leste-Oeste (com seguimento Norte-Sul), o ângulo de inclinação é fixo e igual a zero, ilustrado na Figura 14.

Já o de eixo vertical, Figura 15, apresenta ângulo de inclinação fixo, porém o ângulo azimute varia. O acompanhamento do ângulo azimutal será de acordo com o sentido do sol, amanhecendo orientado a Leste, e no final do dia a Oeste (Martins, 2016).

Figura 12 - Sistema de rastreamento de eixo único, horizontal.



Fonte: Martins, 2016.

Figura 13 - Sistema de rastreamento de eixo único, vertical.



Fonte: Martins, 2016.

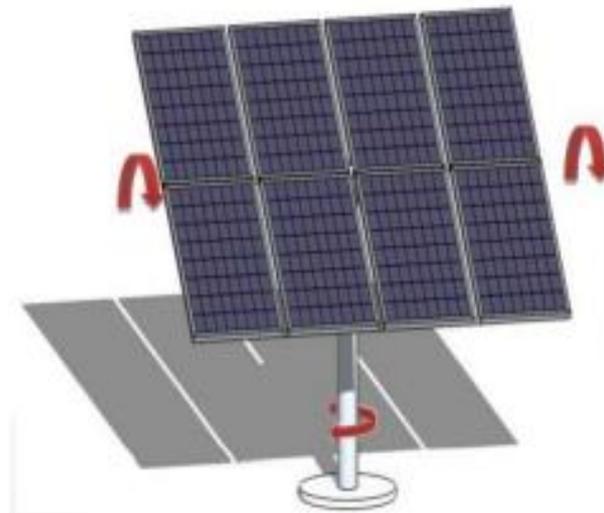
Esse tipo de rastreador apresenta menor custo e menor precisão. No entanto, a eficiência energética desse tipo de configuração de eixo é maior em regiões equatoriais, onde a incidência dos raios solares não varia expressivamente com o movimento da Terra em relação ao sol (Vieira, 2014).

#### 3.4.2.2 *Rastreadores solares de dois eixos*

Os rastreadores solares de dois eixos, por sua vez, possuem dois eixos de rotação, permitindo que os módulos sigam tanto o movimento do sol de leste a oeste (horizontalmente) quanto o movimento vertical ao longo do dia. Essa tecnologia oferece um acompanhamento mais preciso do sol e, portanto, pode alcançar um maior aumento na geração de energia em comparação com os rastreadores solares de um eixo (Antonio; Pereira, 2014).

Esses rastreadores de eixo duplo normalmente apresentam uma melhoria de 35% a 40% na saída quando comparados aos módulos fixos (Appleyard, 2009).

Figura 14 - Rastreador solar de dois eixos.



Fonte: VIEIRA, R.G, 2014.

Ao permitir que os módulos fotovoltaicos sejam ajustados continuamente para obter a melhor orientação em relação ao sol, esses sistemas são capazes de captar uma quantidade significativamente maior de luz solar e convertê-la em energia elétrica. No entanto, essa configuração de dois eixos é mais complexa em termos de mecânica e controle de posição, além de ter um custo mais elevado, embora seja mais preciso. Além disso, a implementação desse tipo de rastreador requer uma área maior de terreno devido aos movimentos em todas as direções.

### 3.5 AGRICULTURA NO BRASIL

Nos últimos 40 anos, o Brasil transformou sua posição de importador de alimentos em um relevante provedor global. A ascensão foi impulsionada por investimentos significativos em pesquisa agrícola, resultando em avanços científicos,

adoção de tecnologias inovadoras e eficácia de políticas públicas, além da competência dos agricultores. Diante da perspectiva de uma população mundial projetada para alcançar 8,5 bilhões até 2030, com o Brasil estimando atingir 230 milhões de habitantes, a capacidade do país em responder às demandas crescentes de alimentos destaca-se como um elemento vital para o futuro (EMBRAPA, 2018).

As próximas décadas delineiam mudanças cruciais na distribuição demográfica global, com mais de 90% da população dos países em desenvolvimento, especialmente na África Subsaariana e Ásia, urbanizando-se até 2030. Essa transformação trará implicações significativas no consumo de alimentos, água e energia. No contexto global e nacional, as projeções indicam um cenário positivo para a contínua expansão da produção agrícola brasileira, com a expectativa de ultrapassar 290 milhões de toneladas de grãos até 2027, conforme dados da Embrapa. (EMBRAPA, 2018).

### **3.5.1 Região Sul**

A região Sul do Brasil destaca-se por sua diversidade geográfica e agrícola, caracterizada por planaltos, como o Planalto Atlântico, e a exuberante Mata das Araucárias ao norte, contrastando com a vastidão da planície dos Pampas ao sul, onde predominam gramíneas. O clima subtropical da região oferece estações do ano distintas, incluindo invernos com geadas e, em alguns lugares, presença de neve (EMBRAPA, 2023).

A produção agrícola na região Sul reflete um cenário dinâmico e moderno, impulsionado pela expansão da soja voltada para exportação. A modernização agrícola é evidente, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná, onde se destacam o cultivo extensivo de soja, arroz e trigo. No último censo de 2017, as lavouras temporárias foram lideradas pela soja, que alcançou uma produção de 17 milhões de toneladas, seguida pelo arroz com 8,4 milhões de toneladas. Nas lavouras permanentes, a produção de pêssegos destacou-se com 104 mil toneladas, enquanto as plantações de uvas contribuíram significativamente com 756 mil toneladas, como mostra a figura 17, demonstrando a diversificação e a relevância econômica local (IBGE, 2017).

A região Sul não apenas se destaca como pilar essencial na produção agrícola nacional, mas também como um exemplo de adaptação e modernização,

consolidando sua posição como protagonista na economia agrícola do país (Syngenta Digital, 2023).

Figura 15 - Principais culturas da região Sul destacadas no estado de Rio Grande do Sul.



Fonte: IBGE, 2017.

### 3.5.2 Região Sudeste

A região Sudeste do Brasil é caracterizada por um relevo diversificado, destacando-se as serras, além de planícies costeiras que formam amplas baixadas litorâneas. Em relação ao clima, varia desde tropical no litoral, com estações distintas de verão chuvoso e inverno seco, até tropical de altitude nos planaltos, com consideráveis variações de temperatura. A vegetação, predominantemente Mata Atlântica, sofre com a devastação causada pela urbanização e expansão agrícola, sendo que em Minas Gerais predomina a vegetação de Cerrado e Caatinga (EMBRAPA, 2023).

Na região Sudeste, a agricultura é caracterizada pelo uso de alta tecnologia, resultando em atividades agrícolas altamente produtivas. Apesar de subordinada à indústria, a agricultura destaca-se pelos altos índices de produtividade e pela qualidade do solo (EMBRAPA, 2023).

Segundo o último censo de 2017, as principais culturas na região Sudeste nas lavouras temporárias foram a cana-de-açúcar, com uma produção de 66 milhões de

toneladas, seguida pelo milho, que atingiu 60 milhões de toneladas. Nas lavouras permanentes, destacaram-se 918 mil toneladas de laranja e uma produção de 13,8 milhões de toneladas de café, como ilustra na figura abaixo, evidenciando a diversidade e a importância econômica da agricultura na região (IBGE, 2017).

Figura 16 - Principais culturas da região Sudeste destacadas no estado de Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2017.

### 3.5.3 Região Centro-Oeste

A região Centro-Oeste do Brasil destaca-se por seu relevo dividido em três áreas principais: planalto central, planalto meridional e a vasta planície do Pantanal. Caracterizado por um clima tropical semiúmido, a região experimenta duas estações bem definidas, com um inverno seco e um verão extremamente quente e chuvoso, apresentando temperaturas que variam de cerca de 15 °C nos meses mais frios a 40 °C nos mais quentes (EMBRAPA, 2023).

O Centro-Oeste é marcado pela presença da maior planície alagada do mundo, o Pantanal, e pela predominância da vegetação de Cerrado, com árvores baixas e espaçadas, além da extensão da Floresta Amazônica no norte de Mato Grosso. A região é um epicentro da mecanização agrícola, com a expansão desta

prática em direção à Amazônia, impulsionando a fronteira agrícola para o norte do país (EMBRAPA, 2023).

Essencialmente agrícola, a região é composta pelos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal, representando os maiores produtores de grãos do Brasil. Na última década, nas lavouras temporárias, a soja se destacou como a principal cultura, registrando uma produção de 29,8 milhões de toneladas, seguida pelo milho com expressivos 28,6 milhões de toneladas. Nas lavouras permanentes, a produção de banana atingiu 44,7 mil toneladas, enquanto o café contribuiu com 7 milhões de toneladas, consolidando a diversidade e importância da agricultura na região Centro-Oeste (IBGE, 2017).

Figura 17 - Principais culturas da região Centro-Oeste destacadas no estado de Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2017.

### 3.5.4 Região Nordeste

A região Nordeste do Brasil é marcada por um relevo diversificado, que inclui planaltos, planícies e depressões. Planaltos antigos, como a Borborema e a bacia do rio Parnaíba, são aplainados pela erosão, enquanto chapadas, como a Diamantina, e depressões, como o sertão, compõem a topografia da região. O clima variado inclui desde áreas semiáridas no sertão, com altitudes entre 200 e 500 metros, até regiões

úmidas próximas à costa, como a planície costeira que se estende do Maranhão ao Piauí. A região experimenta três principais tipos de climas: tropical, semiárido e equatorial úmido (EMBRAPA, 2023).

Na agricultura nordestina, destacam-se culturas tradicionais como cana-de-açúcar, algodão, tabaco e caju, além da produção expressiva de frutas tropicais irrigadas, como manga, abacaxi, caju, banana, acerola e goiaba. A região, caracterizada por sua diversidade agrícola, abriga sistemas agrícolas distintos, desde a agricultura familiar nas áreas semiáridas até a monocultura de exportação na Zona da Mata, impulsionada pela produção de hortifruti (Brasil Brasileiro, 2023).

Nas lavouras temporárias, a cana-de-açúcar assume o protagonismo, alcançando uma produção de 10,3 milhões de toneladas, seguida pela mandioca com 148 mil toneladas. Já nas lavouras permanentes, a banana destaca-se com 240 mil toneladas, e a uva contribui significativamente com uma produção de 164 mil toneladas. Essa diversidade agrícola reflete a capacidade adaptativa da região diante das variações climáticas e topográficas, consolidando seu papel crucial na produção agrícola nacional (IBGE, 2017).

Figura 18 - Principais culturas da região Nordeste destacadas no estado de Pernambuco



Fonte: IBGE, 2017.

### 3.5.5 Região Norte

A Região Norte do Brasil exibe um relevo diversificado, composto por planaltos, depressões e planícies, destacando-se as áreas planas ao longo do rio Amazonas, como a extensa planície amazônica. A influência do clima equatorial úmido prevalece na região, com aproximadamente 50% da umidade para as chuvas vindo da floresta. O clima é caracterizado por temperaturas elevadas e abundantes chuvas ao longo do ano. Em algumas áreas restritas, como Tocantins e Pará, predomina o clima tropical, com duas estações bem definidas (EMBRAPA, 2023).

A agricultura na Região Norte tem se destacado como um centro de crescimento do agronegócio brasileiro. As práticas agrícolas ainda são predominantemente extensivas, com ênfase na busca por tecnologia. Na produção de lavouras temporárias, a soja desponta com 80,4 mil toneladas, seguida pela mandioca com 40 mil toneladas. Já nas lavouras permanentes, destacam-se 53 mil toneladas de banana e 5 mil toneladas de laranja. Rondônia contribui para a produção nacional de soja, milho e gado, enquanto Roraima destaca-se na produção de bananas, laranjas e peixes destinados ao mercado urbano de Manaus. Essa diversidade agrícola reflete o potencial e a promissora trajetória da agricultura na região (IBGE, 2017).

Figura 19 - Principais culturas da região Norte destacadas no estado de Roraima.



Fonte: IBGE, 2017.

### 3.6 USINAS AGROVOLTAICAS (APV)

O conceito inovador da usina agrovoltaica (APV) foi criado em 1981, pelos físicos alemães Adolf Goetzberger e A. Zastrow, também conhecida como agrovoltaica. A ideia deles era elevar os módulos fotovoltaicos a 2 metros acima do solo e aumentar o espaçamento entre eles para evitar o sombreamento excessivo das lavouras (Goetzberger; Zastrow, 1981). Os sistemas agrovoltaicos são uma combinação entre sistemas fotovoltaicos e agricultura em uma mesma unidade de terra, gerando o aproveitamento total da terra. Esse sistema fornece oportunidades que vão desde o aumento significativo da agricultura, valor agregado das áreas rurais e conhecimento de como o sistema fotovoltaico pode apoiar práticas agrícolas sustentáveis e promover o crescimento das culturas.

Esses sistemas são projetados para ficarem acima das áreas cultiváveis, permitindo que a geração de eletricidade seja simultânea com a produção de alimentos ou cultivos, como ilustra a figura 11. O espaçamento entre as fileiras também é um diferencial desse sistema, visto que dependendo da cultura, é necessária radiação solar para o seu desenvolvimento (Dupraz, 2011a).

Figura 20 - Uso dual da terra, em Heggelbach, na Alemanha.



Fonte: Adaptado de Fraunhofer, 2020.

Figura 21 - O sistema agrovoltáico em Heggelbach, na Alemanha.



Fonte: Fraunhofer, 2018.

Existem diversos tipos de APV, variando desde a instalação de módulos fixos sobre estruturas elevadas, até a utilização sistemas de rastreamento solar para acompanhar o movimento do sol ao longo do dia e maximizar a geração de energia.

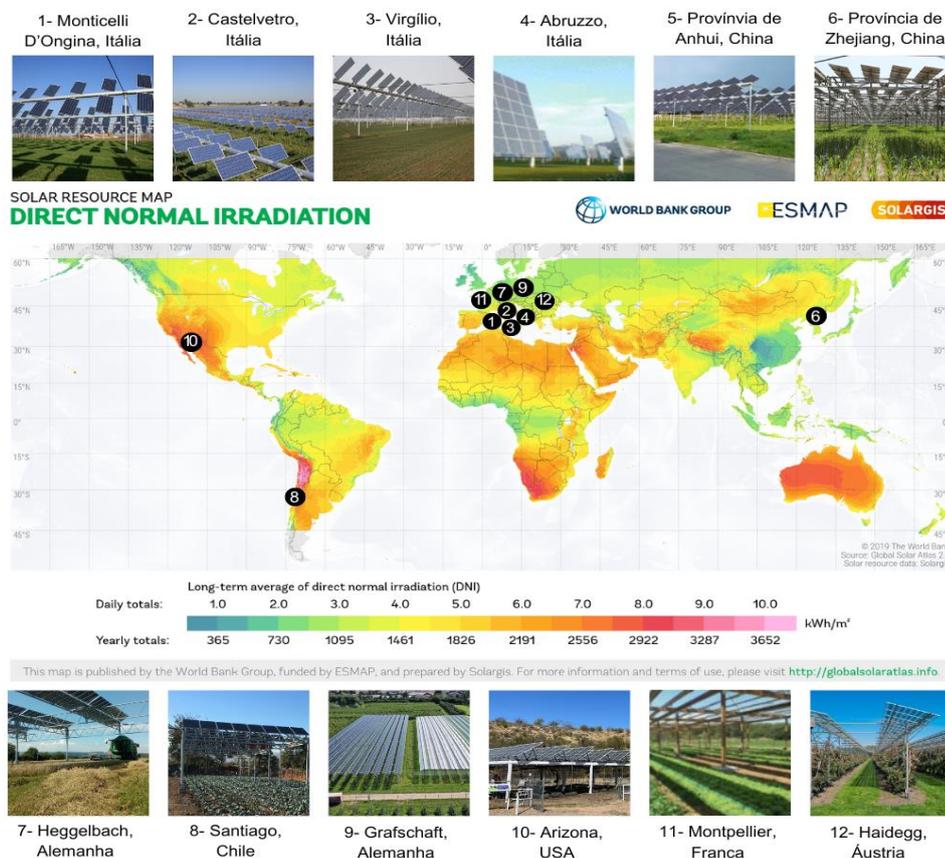
As características técnicas estão em constantes estudos e variam entre regiões e empresas. Alguns projetos de APV já usam estruturas móveis que permitem o rastreamento solar. Estes maximizam o rendimento fotovoltaico e, ao mesmo tempo, melhoram a disponibilidade de luz, permitindo o crescimento suficiente das culturas (Valle *et al.*, 2017).

As usinas agrovoltáicas são uma inovação que está ganhando destaque devido ao seu potencial promissor no mercado global. Diante desse cenário, surge a necessidade de aprofundar o entendimento dos sistemas agrovoltáicos e explorar sua viabilidade em diferentes regiões do mundo.

## 4 ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, diversas instalações de usinas agrovoltaicas (APV) têm sido realizadas em várias partes do mundo, abrangendo diferentes regiões e países. Em 2004, o engenheiro japonês Akira Nagashima desenvolveu o primeiro sistema agrovoltaico (aqui referido como “compartilhamento solar”). Nagashima projetou diversos campos de teste com diferentes taxas de sombreamento baseado no conceito do ponto de saturação de luz de cada cultura com a ideia de compartilhar o excesso de radiação solar com sistemas fotovoltaicos para gerar eletricidade (Nagashima, 2005). Na Europa, diversos projetos APV foram implementados nos últimos anos. Além de várias instalações de pesquisa realizadas na França e na Alemanha, três projetos APV comerciais, patenteados como 'Agrovoltaico', foram realizados no norte da Itália. Esses sistemas foram instalados utilizando módulos solares montados a uma altura de 4 a 5 metros, com tecnologia de rastreamento solar (Rem Tec, 2017).

Figura 22 - Visão geral dos projetos e instalações da APV com localização. O gradiente de cores indica a média de longo prazo da soma diária/anual da radiação horizontal global [kwh/m<sup>2</sup>].



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na França, em Montpellier, uma instalação piloto de pesquisa APV no sul do país foi dividida em dois subsistemas, com diferentes densidades de módulos fotovoltaicos, para investigar o efeito na distribuição solar e no rendimento energético (Dupraz, 2011b).

Na Alemanha, o Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE) tem liderado a pesquisa em APV. Em 2016, o Fraunhofer ISE construiu uma planta de pesquisa APV no sul da Alemanha, em Heggelbach. Possui 720 módulos bifaciais e uma capacidade de 194 kWp. Os módulos solares são montados com vão de 5 metros. O projeto mostrou que com o sistema, a eficiência do uso da terra aumentou de 60% a 86% e as colheitas adaptou-se de forma mais eficaz durante os períodos de seca em 2017 e 2018. Em colaboração, três outras plantas piloto foram realizadas perto de Santiago, no Chile, para investigar a implementação do APV e seu impacto nas plantações em diferentes zonas climáticas (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2022).

O desempenho dos sistemas agrovoltáicos em terras secas também está sendo investigado pelo grupo de pesquisa Barron-Gafford nos EUA. Uma planta de pesquisa APV de pequena escala foi recentemente instalada no Arizona como parte da instalação de pesquisa da Biosfera 2 (Barron-Gafford *et al.*, 2019). Nesses estudos, os pesquisadores estão concentrando seus esforços não apenas nos benefícios potenciais do APV para o cultivo de culturas por meio de alterações no microclima, mas também na investigação de como o dossel da cultura pode fornecer um efeito de resfriamento nos módulos fotovoltaicos em regiões áridas.

Enquanto na Europa e na América predominam pesquisas de pequena escala e algumas instalações comerciais de médio porte, a China está implementando a tecnologia APV em grande escala.

Embora a tecnologia APV esteja sendo cada vez mais aplicada em todo o mundo, é importante ressaltar que há uma escassez de pesquisas científicas que examinem seus impactos nos parâmetros agrônômicos, como desempenho e produtividade das culturas. Além disso, regiões com limitações de terras e áreas áridas com alta radiação solar são consideradas os locais mais promissores para a aplicação da tecnologia APV, tanto em termos de produção de eletricidade quanto dos efeitos sinérgicos no cultivo de culturas.

Tabela 1 - Visão mundial dos agrovoltáicos existentes com especificações técnicas e culturas cultivadas.

	<b>Cidade</b>	<b>País</b>	<b>Potência [kWp]</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Cultura cultivada</b>	<b>Produção Prevista [kWh/ano]</b>	<b>Nº de módulos</b>
1	Monticelli D'Ongina	Itália	3.230	Rastreador solar – 2 eixos	Trigo de inverno, milho	4.842.000	11535
2	Castelvetro	Itália	1.294	Rastreador solar – 2 eixos	Trigo de inverno, milho	1.890.000	4620
3	Virgílio	Itália	2.150	Rastreador solar – 2 eixos	Trigo de inverno, milho	3.325.000	7680
4	Abruzzo	Itália	800	Rastreador solar	Pasto, tomate, melancia, trigo	-	67
5	Província de Anhui	China	544	Rastreador solar – 2 eixos	-	887.000	1680
6	Província de Zhejiang	China	30.000	Rastreador solar – 2 eixos	Arroz	40.000.000	-
7	Heggelbach	Alemanha	194	Fixo	Trigo de inverno, grama de trevo, aipo, batata	256.000	-
8	Santiago	Chile	-	Fixo	Brócolis e couve-flor	21.437	-
9	Gelsdorf	Alemanha	258	Fixo e Rastreador Solar 1 eixo	Maçã	-	-
10	Arizona	EUA	-	Fixo	Repolho, couve, tomate	-	-
11	Montpellier	França	-	Parcial	Pepino, feijão, alface	-	-
12	Haidegg	Áustria	340	Fixo	Frutas	385.000	-

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O estudo realizado por Amaducci, Yin e Colauzzi (2018) teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema agrovoltáico combinado com uma cultura de milho por meio de simulações computacionais. O estudo utilizou dados climáticos de 40 anos de um local no norte da Itália e foram considerados diferentes configurações dos módulos fotovoltaicos, variando a densidade deles e o tipo de estrutura do sistema agrovoltáico (Amaducci et al., 2018).

Uma das partes principais do estudo foi que a redução da radiação solar global sob o sistema agrovoltáico foi mais influenciada pela densidade dos módulos fotovoltaicos do que pelo tipo de estrutura. Os resultados observaram uma redução média da radiação de 29,5% para densidade dupla e 13,4% para densidades simples, enquanto o tipo de estrutura resultou em uma redução média de 23,2% para estrutura com rastreadores solares e 20,0% para estrutura fixa (Amaducci et al., 2018).

Essa redução da radiação solar teve efeitos significativos na temperatura média, na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo. Em média, as condições sob o sistema agrovoltáico foram mais favoráveis para o crescimento das plantas em comparação com o cultivo em pleno sol. Especificamente o rendimento médio de grãos de milho foi maior e mais estável sob o sistema agrovoltáico em comparação com o cultivo em pleno sol (Amaducci et al., 2018).

Além disso, o estudo destacou que a vantagem de cultivar milho à sombra do sistema agrovoltáico aumentou proporcionalmente o estresse hídrico. Isso sugere que os sistemas agrovoltáicos podem aumentar a resiliência das culturas às mudanças climáticas, proporcionando condições mais tolerantes de crescimento, especialmente em períodos de escassez de água (Amaducci et al., 2018).

Em resumo, os resultados do estudo indicam que os sistemas agrovoltáicos podem oferecer benefícios, como redução da radiação solar, melhoria do microclima, aumento da eficiência do uso da água e maior estabilidade no rendimento das culturas (Amaducci et al., 2018).

Em Valle *et al.* (2017), foi realizado um experimento para avaliar um sistema agrovoltáico aprimorado usando módulos fotovoltaicos com rastreadores em comparação com um sistema agrovoltáico fixo. O objetivo era investigar os efeitos do rastreamento solar e do controle do microclima na produção agrícola e elétrica. O estudo foi realizado em Montpellier, França, e foram estudadas duas variedades de alface em três estações diferentes.

O sistema agrovoltáico original era composto por módulos fotovoltaicos fixos instalados com um ângulo de 25° em relação à horizontal. Dois sistemas agrovoltáicos com rastreadores solares de 1 eixo foram adicionados em 2014 nos lados Leste e Oeste do subsistema fixo, com 3 e 4 faixas de módulos fotovoltaicos horizontais, respectivamente (Valle *et al.*, 2017).

Os resultados mostraram que a implementação do rastreamento solar teve um impacto significativo no aumento da produção elétrica em comparação com as

estruturas fixas e apresentou uma maior eficiência no aproveitamento da radiação solar. Além disso, observou-se um aumento na radiação transmitida para as plantas, o que promoveu um crescimento ainda maior da biomassa. Essas descobertas indicaram que o rastreamento solar regular foi particularmente eficaz durante as estações com alta radiação solar (Valle *et al.*,2017).

Além do rastreamento solar regular, foi proposto um modo de rastreamento controlado que permite modificar o microclima durante períodos específicos de acordo com as necessidades da cultura. Foi observado que o rastreamento controlado foi mais benéfico durante os períodos de alta temperatura e alta demanda evaporativa (Valle *et al.*,2017).

A produção de eletricidade por unidade de área de terra foi contínua para todos os sistemas agrovoltaicos nas três estações experimentais. Foi constatado que os sistemas agrovoltaicos apresentaram uma alta eficiência no uso da terra, com uma maior produção de eletricidade e uma produção de biomassa próxima ou até mesmo superior à produção em condições de pleno sol (Valle *et al.*,2017).

O estudo conduzido por Dupraz, C. *et al.* (2011b) investigou o efeito do sombreamento parcial dos módulos em sistemas agrovoltaicos no microclima e no crescimento das culturas. Os pesquisadores analisaram como o sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos afeta as condições microclimáticas, como temperatura, radiação solar e umidade do ar, e como essas condições influenciam o crescimento e o desenvolvimento das culturas cultivadas sob os módulos.

O sombreamento parcial teve um efeito variável nas diferentes culturas estudadas. Algumas culturas, como o trigo, encontraram uma redução média de 10% na taxa de crescimento devido à menor disponibilidade de luz solar. No entanto, outras culturas, como o milho, foram menos experimentadas, com uma diminuição média de apenas 5% na taxa de crescimento (Dupraz, C. *et al.* 2011b).

Esses resultados indicam que o sombreamento parcial dos módulos solares em sistemas agrovoltaicos pode afetar o microclima e o crescimento das culturas, com diferentes culturas sendo apoiadas de maneiras distintas. Essas informações são essenciais para o planejamento e o manejo adequados desses sistemas, permitindo uma melhor seleção de culturas e a otimização da produção agrícola e energética (Dupraz, C. *et al.* 2011b).

Em Prannay R. et al. (2017) foi investigado o potencial de implementação de sistemas agrovoltaicos em fazendas de uva na Índia. O estudo analisou dados meteorológicos e agronômicos.

O estudo demonstrou que a instalação de sistemas agrovoltaicos nas fazendas de uva na Índia poderia gerar eletricidade significativa. A energia gerada por esses sistemas foi estimada em uma média de 10,24 kWh por metro quadrado de terra ao longo de um ano (Prannay et al., 2017).

Além da geração de eletricidade, os sistemas agrovoltaicos também foram associados a um aumento na produção de uvas. O estudo observou um aumento médio de 22,3% na produção de uvas quando comparado com as áreas sem sombreamento dos módulos (Prannay et al., 2017).

A presença dos módulos fotovoltaicos nas fazendas de uva também resultou em uma redução média de 32,6% na evapotranspiração das plantas. Isso indica uma melhor conservação de água e maior eficiência no uso dos recursos hídricos (Prannay et al., 2017).

Com base nesses resultados, conclui-se que a implementação de sistemas agrovoltaicos em fazendas de uva na Índia possui um grande potencial tanto para a geração de eletricidade renovável como para o aumento da produção agrícola. Além disso, a redução na evapotranspiração das plantas indica um uso mais eficiente dos recursos hídricos. Essas descobertas sugerem que a adoção de sistemas agrovoltaicos pode trazer sentimentos psicológicos e ambientais para os agricultores de uva na Índia (Prannay et al., 2017).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os passos das análises realizadas para a simulação de sistemas agrovoltáicos em cidades representativas de cada região brasileira, considerando quatro tipos de sistemas agrovoltáicos diferentes.

### 5.1 SOFTWARE SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)

A simulação do sistema agrovoltáico foi realizada utilizando o *software* SAM (*System Advisor Model*), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). O SAM é uma ferramenta de modelagem e análise de sistemas de energia renovável que permite a avaliação de sistemas fotovoltaicos, eólicos, híbridos e outros tipos de projetos de energia. Para alimentar o *software* SAM com dados meteorológicos precisos foi utilizada uma fonte de dados climáticos, o *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA).

Para garantir a representatividade das condições meteorológicas em diferentes regiões, foram selecionadas cidades estrategicamente localizadas em diferentes partes do país. As cidades selecionadas, conforme indicado na Tabela 2, abrangem diversas regiões do Brasil. Santa Maria foi escolhida para representar a região Sul, enquanto Belo Horizonte foi designada como representante da região Sudeste. Campo Grande foi selecionada para representar a região Centro-Oeste, Petrolina foi a escolha para a região Nordeste, e Boa Vista foi a cidade escolhida para representar a região Norte. Essa abordagem visa tornar as conclusões mais abrangentes e aplicáveis em âmbito nacional, considerando as peculiaridades climáticas e as variações nas condições de irradiação solar em diferentes regiões do Brasil.

Tabela 2 - Lista das cidades brasileiras simuladas.

Cidade	Estado	Região	Latitude	Longitude
Santa Maria	Rio Grande do Sul	Sul	29° 41' 10" S	53° 48' 25" O
Belo Horizonte	Minas Gerais	Sudeste	19° 48' 56" S	43° 57' 15" O
Campo Grande	Mato Grosso	Centro-Oeste	20° 28' 11" S	54° 38' 24" O
Petrolina	Pernambuco	Nordeste	9° 23' 19" S	40° 30' 8" O
Boa Vista	Roraima	Norte	2° 49' 24" N	60° 39' 21" O

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## 5.2 SISTEMA AGROVOLTAICO REFERÊNCIA

Neste estudo, a simulação de um sistema agrovoltáico foi conduzida nas cidades mencionadas na Tabela 2, o sistema agrovoltáico foi simulado para solos típicos de cada região, mas a cultura específica não foi definida. O sistema proposto é composto por 1440 módulos fotovoltaicos do modelo JKM400M-72L-V, conforme indicado na Tabela 3. Esses módulos são fabricados pela empresa Jinko Solar e possuem uma potência nominal de 400W por módulo. A organização do sistema ocorre em quatro arranjos, cada um contendo 20 fileiras (strings) de 18 módulos, totalizando uma potência nominal de 576,461 kW. Essa configuração resulta em uma produção de energia com tensão e corrente máxima de acordo com as especificações técnicas.

No contexto deste projeto, foram empregados 4 inversores do fabricante Sungrow, modelo SG125HV, conforme detalhado na Tabela 4. Esses inversores possuem uma faixa de tensão de entrada de 1200 a 860 V, acompanhada por uma corrente de entrada máxima especificada. Sua saída é caracterizada por uma tensão de 220/380V, adequada para a integração do sistema à rede elétrica local, operando a uma frequência de 60 Hertz (Hz).

Em virtude de restrições apresentadas pelo *software* utilizado, todos os resultados foram duplicados, considerando que o sistema final será equipado com uma capacidade de 1.152.000 W, totalizando 8 inversores e 2880 módulos. O

dimensionamento do sistema foi elaborado com o propósito de integrar a produção de energia solar às atividades agrícolas, seguindo uma abordagem sustentável e eficiente para atender às demandas energéticas da região.

Tabela 3 - *Datasheet* módulo fotovoltaico.

<b>Módulo Fotovoltaico JKM400M-72L-V</b>	
Potência máxima nominal	400 W
Tensão de circuito aberto Voc	49,8 V
Eficiência	19,88%
Máxima tensão do sistema	1500 V

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 4 - *Datasheet* inversor.

<b>Inversor SG125HV</b>	
Corrente Contínua - CC	
Intervalo de tensão	860 – 1450 V
Corrente de entrada máxima	148 A
Máxima tensão do sistema	1500 A
Corrente Alternada - CA	
Potência nominal	125 kW
Tensão nominal do sistema	600 V
Eficiência máxima	98,9%

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

### 5.3 SISTEMA AGROVOLTAICO COM ESTRUTURA FIXA

Para a simulação dos sistemas agrovoltáicos com estrutura fixa, adotou-se uma abordagem própria. A orientação escolhida para os módulos foi voltada para o norte, a fim de maximizar o desempenho. Além disso, a inclinação dos módulos foi definida igual à latitude da cidade onde o sistema foi implantado, com o propósito de maximizar a exposição à luz solar ao longo do dia.

A razão de cobertura de solo (GCR), que representa a proporção da área total ocupada pelos módulos em relação à área total disponível, foi definida em 30%, isso permite que parte do terreno seja usada para fins agrícolas ou outros usos, combinando efetivamente a produção de energia solar com atividades terrestres.

As estruturas de suporte dos módulos foram simuladas a uma altura de 5 metros acima do solo, proporcionando espaço adequado para operações agrícolas. Além disso, o espaçamento entre as fileiras de módulos foi definido em 4,5 metros para garantir uma disposição eficiente dos módulos e permitir a passagem de maquinaria agrícola ou outras necessidades práticas.

#### 5.4 SISTEMA AGROVOLTAICO COM RASTREADOR SOLAR 1 EIXO HORIZONTAL

A simulação de sistemas agrovoltáicos com rastreadores solares de um eixo horizontal envolveu a configuração de parâmetros específicos para otimizar a captação de energia solar. A orientação das estruturas de módulos foi definida para o Norte. A inclinação dos módulos foi mantida em zero graus, significando que eles foram posicionados horizontalmente. Isso permite que os rastreadores solares girem em torno de um eixo horizontal, acompanhando o movimento aparente do sol de Leste a Oeste durante o dia.

Além disso, os módulos foram configurados com uma rotação em relação à horizontal de 45°, garantindo que pudessem ajustar sua inclinação vertical para seguir a trajetória do sol no céu. A razão de cobertura do solo (GCR) foi mantida em 30%. As estruturas que suportam os módulos foram simuladas a uma altura de 5 metros acima do solo, e o espaçamento entre as fileiras foi fixado em 4,5 metros.

#### 5.5 CARACTERÍSTICA DO SISTEMA AGROVOLTAICO COM MÓDULO MONOFACIAL

Na simulação dos sistemas agrovoltáicos com módulos monofaciais, os parâmetros específicos foram derivados do módulo fotovoltaico Jinko Solar modelo JKM400M-72L-V. Esses detalhes, obtidos do *software* SAM, garantem uma representação precisa e realista das condições do sistema durante a simulação. A utilização desses dados contribui para a precisão e confiabilidade dos resultados

obtidos na análise do desempenho dos sistemas fotovoltaicos monofaciais, seja em configurações de estruturas fixas ou com rastreadores solares de um eixo horizontal.

## 5.6 CARACTERÍSTICA DO SISTEMA COM MÓDULO BIFACIAL

Nas simulações do sistema fotovoltaico com módulos bifaciais da marca Jinko Solar, modelo JKM400M-72L-V, foram aplicadas configurações minuciosas nos parâmetros específicos no *software* SAM. Esse tipo de módulo exige atenção especial, pois possui a capacidade única de captar luz de ambos os lados. Na face frontal ele absorve diretamente a luz solar irradiada, enquanto na parte traseira recebe a luz refletida do solo onde está instalado (Fernández, 2020).

Três parâmetros essenciais foram ajustados minuciosamente durante a simulação: fração de transmissão, bifacialidade e altura de distância ao solo. No primeiro caso foi adotado o valor de 0,013, que representa a porcentagem da área da linha da matriz permitindo a transmissão de luz da frente para a traseira. Quanto à bifacialidade, adotou-se o valor de 0,7, indicando a eficiência relativa do lado traseiro em comparação com o lado frontal do módulo. Por último, a altura de distância ao solo, fixada em 5 metros, representa a distância vertical entre o solo e a parte inferior do módulo fotovoltaico. Essa configuração específica foi aplicada em diferentes estruturas, tanto em sistemas agrovoltáticos fixos quanto em sistemas com rastreadores solares de um eixo horizontal (*System Advisor Model*, 2018).

## 5.7 ÍNDICES DE MÉRITO

O estudo do desempenho de sistemas fotovoltaicos contribui para o desenvolvimento e operação, trazendo maior confiabilidade para os sistemas (Mello, 2016). Os índices de mérito, ou índices de desempenho, são parâmetros que representam características de materiais ou equipamentos de acordo com a sua performance de conversão de energia (Fusano, 2013). Os índices de mérito de performance do sistema FV foram propostos inicialmente pela organização *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm* (IEA-PVPS). Um dos objetivos de monitorar um sistema FV é identificar falhas no sistema (IEA-PVPS, 2014). Os parâmetros de performance podem ser usados para definir a performance de um sistema fotovoltaico conectado à rede no que diz respeito ao aproveitamento

da radiação solar, produção de energia e efeitos das perdas do sistema. Estes parâmetros são respectivamente: fator de capacidade (FC), produtividade anual (YF ou *Final Yield*) e desempenho global ou razão de performance (PR ou *Performance Ratio*) (Benedito, 2009).

### 5.7.1 Fator de Capacidade (FC)

O fator de capacidade (FC) é definido pela razão entre a produção de energia elétrica entregue à rede e a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 horas por dia na potência do sistema em condição padrão (potência nominal). (Rampinelli, 2010).

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt}{\int_{\Gamma} P_{STD}(t) \cdot dt} \quad (1)$$

Onde FC é o fator de capacidade do sistema,  $E_{CA}$  é a energia elétrica entregue à rede,  $E_{STD}$  é a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 horas por dia na potência do sistema em condição padrão,  $P_{CA}$  é a potência elétrica entregue à rede e  $P_{STD}$  é a potência do sistema na condição padrão (Rampinelli, 2010).

### 5.7.2 Produtividade

O índice de produtividade é definido como a energia convertida por kWp instalado. Este índice indica o número de horas que o sistema deveria operar em sua potência em condição padrão para converter a mesma quantidade de energia convertida no período considerado (Rampinelli, 2010). A produtividade do sistema pode ser calculada a partir da Eq. (2).

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\Gamma} \cdot \int P_{CA}(t) \cdot dt \right) \right] \quad (2)$$

Ou, alternativamente:

$$Y_F = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Potência FV (kWp)}} \quad (3)$$

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão analisados em cada cidade, representando distintas regiões do país. Os fatores primariamente investigados incluirão o fator de capacidade (FC) e a produtividade (YF) do sistema agrovoltaico analisado. Essa abordagem permitirá uma comparação abrangente desses fatores, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do desempenho desses sistemas em diferentes ambientes regionais.

### 6.1 FATOR DE CAPACIDADE (FC)

Utilizando o *software*, foi possível obter resultados detalhados sobre o fator de capacidade de cada sistema agrovoltaico, os quais serão analisados.

#### 6.1.1 Resultados Região Sul

Na Tabela 5, os resultados das simulações para a região Sul, especificamente na cidade de Santa Maria – Rio Grande do Sul, foram apresentados para os quatro tipos de sistemas agrovoltaicos: estrutura fixa com módulo monofacial, estrutura fixa com módulo bifacial, rastreador solar de 1 eixo horizontal usando módulo monofacial e rastreador solar de 1 eixo horizontal com módulo bifacial.

Tabela 5 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltaicos, região Sul.

Fator de Capacidade								
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial		Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	FC	%	FC	%	FC	%	FC	%
Jan	0,140	13,97	0,16	15,81	0,194	19,40	0,21	20,96
Fev	0,139	13,94	0,16	15,60	0,177	17,74	0,19	19,25
Mar	0,131	13,08	0,15	14,54	0,154	15,39	0,17	16,77
Abr	0,124	12,42	0,14	13,54	0,137	13,68	0,15	14,75
Mai	0,124	12,39	0,13	13,23	0,121	12,06	0,13	12,93
Jun	0,105	10,46	0,11	11,20	0,098	9,84	0,11	10,64
Jul	0,115	11,53	0,12	12,38	0,110	11,04	0,12	11,92
Ago	0,130	13,02	0,14	14,11	0,135	13,48	0,15	14,55
Set	0,139	13,91	0,15	15,06	0,156	15,55	0,17	16,67
Out	0,153	15,33	0,17	16,52	0,186	18,60	0,20	19,73
Nov	0,157	15,68	0,17	17,05	0,209	20,88	0,22	22,13
Dez	0,135	13,52	0,15	15,04	0,183	18,27	0,20	19,60
<b>Anual</b>	<b>0,133</b>	<b>13,27</b>	<b>0,15</b>	<b>14,50</b>	<b>0,155</b>	<b>15,48</b>	<b>0,17</b>	<b>16,64</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O fator de capacidade (FC) para cada sistema foi calculado mensalmente, com o resultado anual na última linha. A primeira coluna (FC) exibe os valores do fator de capacidade, obtidos pela Equação 1, enquanto a segunda coluna mostra o percentual correspondente do FC. Os resultados variaram de 9% a 22%, sendo os valores mais baixos registrados nos meses de inverno, junho, julho e agosto, quando a irradiação solar é reduzida.

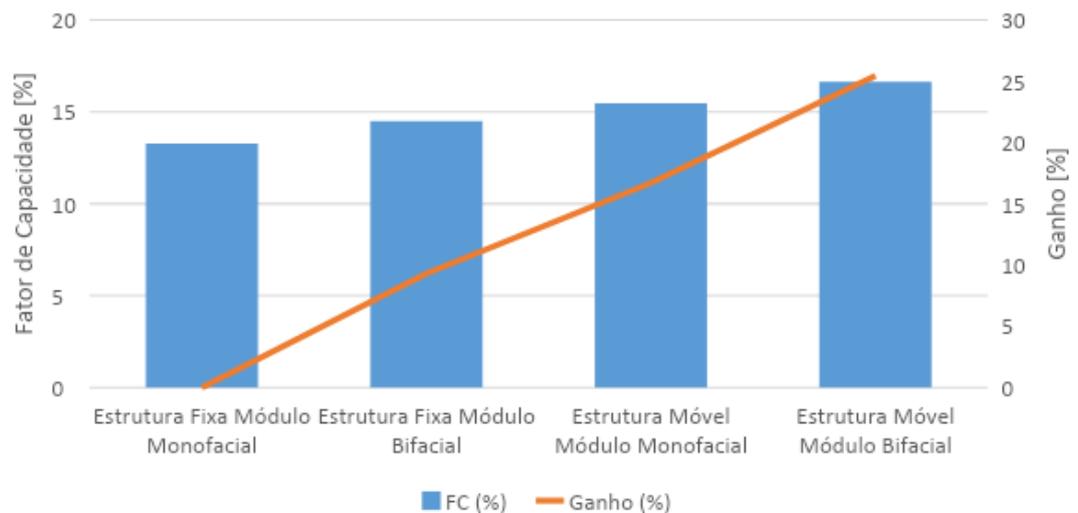
É possível analisar o ganho percentual do fator de capacidade em cada sistema, Tabela 6, tendo como referência o sistema agrovoltaico com estrutura fixa e módulo monofacial. Essa abordagem permite uma comparação direta do desempenho relativo de cada sistema ao longo do ano, destacando variações mensais e consolidando os resultados em uma métrica anual.

Tabela 6 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Sul.

Ganho Percentual FC (%)			
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	13,15	38,83	50,05
Fev	11,86	27,23	38,04
Mar	11,21	17,68	28,22
Abr	9,02	10,13	18,79
Mai	6,80	-2,62	4,39
Jun	7,13	-5,91	1,75
Jul	7,37	-4,24	3,42
Ago	8,42	3,53	11,75
Set	8,26	11,75	19,78
Out	7,75	21,31	28,70
Nov	8,74	33,18	41,15
Dez	11,28	35,17	45,01
<b>Anual</b>	<b>9,31</b>	<b>16,69</b>	<b>25,46</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 23 - Análise fator de capacidade anual na região Sul



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Conforme ilustra a Figura 23, o sistema agrovoltáico com estrutura fixa e módulo bifacial exibiu um aumento consistente em relação ao sistema de referência, registrando um ganho percentual anual de 9,31%. Os piores meses foram maio, junho e julho, nos quais os ganhos foram ligeiramente inferiores, atingindo valores de 6,8%, 7,13% e 7,37%, respectivamente. A capacidade do módulo bifacial de captar luz tanto na frente quanto na parte traseira contribuiu para esse desempenho positivo, destacando sua eficácia em condições variadas.

Em contrapartida, o sistema com rastreador solar de 1 eixo e módulo monofacial apresentou um aumento anual de 16,69%, evidenciando uma melhoria

significativa na eficiência ao longo do ano. No entanto, nos meses de maio, junho e julho não foram observados ganhos, o sistema de referência se sobressaiu. Isso sugere que a combinação de menor irradiação solar pode ter impactado negativamente a eficiência do sistema nesses períodos específicos. Este resultado ressalta a importância de considerar não apenas a eficiência anual, mas também as variações mensais ao avaliar o desempenho de sistemas agrovoltáicos.

O sistema mais eficiente, como previsto, foi o que combinou rastreador solar com módulo bifacial, alcançando um notável aumento percentual anual de 25,46%. Embora tenha experimentado os menores ganhos nos meses de menor desempenho, em comparação com os outros sistemas, sua capacidade de ajustar a orientação para maximizar a exposição solar contribuiu para um desempenho excepcional ao longo do ano.

### 6.1.2 Resultados Região Sudeste

Na tabela 7, são apresentados os resultados do fator de capacidade das simulações realizadas para a região Sudeste, com foco na cidade de Belo Horizonte – Minas Gerais. Os resultados, organizados mensalmente e anualmente, referem-se a quatro tipos distintos de sistemas agrovoltáicos.

Tabela 7 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Sudeste

Fator de Capacidade								
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial		Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	FC	%	FC	%	FC	%	FC	%
Jan	0,124	12,37	0,14	13,84	0,161	16,05	0,17	17,43
Fev	0,130	13,03	0,14	14,48	0,177	17,73	0,19	19,00
Mar	0,117	11,69	0,13	13,06	0,146	14,60	0,16	15,84
Abr	0,139	13,88	0,15	15,22	0,168	16,76	0,18	17,95
Mai	0,139	13,94	0,15	15,12	0,160	15,99	0,17	17,09
Jun	0,139	13,92	0,15	15,12	0,157	15,73	0,17	16,82
Jul	0,142	14,17	0,15	15,49	0,158	15,78	0,17	16,97
Ago	0,156	15,60	0,17	17,08	0,182	18,20	0,19	19,50
Set	0,142	14,20	0,16	15,65	0,175	17,50	0,19	18,83
Out	0,133	13,28	0,14	14,49	0,166	16,59	0,18	17,73
Nov	0,132	13,22	0,14	14,49	0,171	17,14	0,18	18,34
Dez	0,113	11,26	0,12	12,42	0,141	14,11	0,15	15,20
<b>Anual</b>	<b>0,134</b>	<b>13,38</b>	<b>0,15</b>	<b>14,70</b>	<b>0,163</b>	<b>16,33</b>	<b>0,18</b>	<b>17,54</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Os resultados mensais e anuais do fator de capacidade foram obtidos para os quatro tipos de sistemas agrovoltáicos mencionados na tabela acima. Destaca-se que o quarto sistema, composto por rastreador solar de um eixo horizontal e módulo bifacial, apresentou o maior valor anual, 17,54%. Essa observação pode ser correlacionada com a localização na região Sudeste, onde há maior incidência de radiação solar e um clima propício para a eficiência desse tipo de sistema.

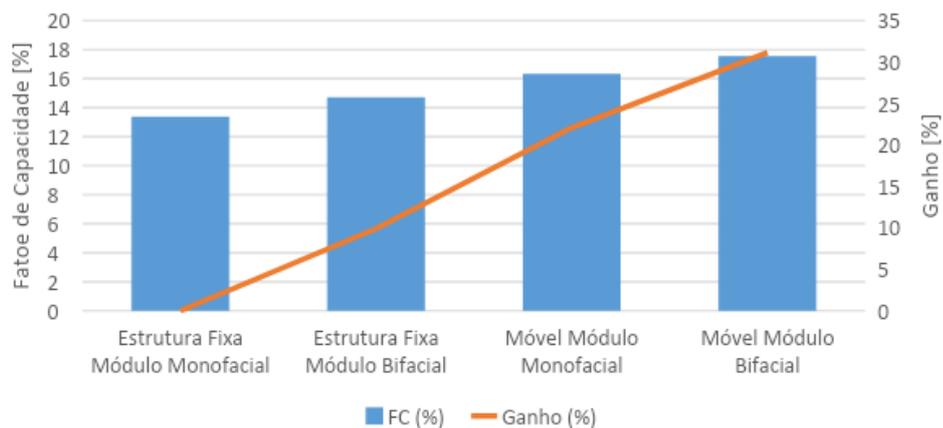
A Tabela 8 destaca a análise comparativa do ganho percentual dos sistemas agrovoltáicos em relação ao sistema de referência. Os resultados são visualmente representados no gráfico subsequente, fornecendo uma representação gráfica clara dessas comparações.

Tabela 8 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Sudeste.

Ganho Percentual FC (%)			
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	11,92	29,83	40,95
Fev	11,14	36,03	45,77
Mar	11,72	24,89	35,42
Abr	9,66	20,72	29,35
Mai	8,49	14,74	22,62
Jun	8,62	12,97	20,79
Jul	9,35	11,37	19,80
Ago	9,50	16,68	24,98
Set	10,22	23,29	32,63
Out	9,13	24,89	33,53
Nov	9,58	29,62	38,73
Dez	10,31	25,35	35,04
<b>Anual</b>	<b>9,91</b>	<b>22,08</b>	<b>31,13</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 24 - Análise fator de capacidade anual na região Sudeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Conforme evidenciado na Tabela 8 e ilustrado na Figura 24, o sistema que utiliza estrutura fixa e módulo bifacial apresentou um ganho comparativo em relação ao sistema fixo, variando aproximadamente de 8% a 12%. O menor ganho foi observado no mês de maio, enquanto o maior ocorreu em dezembro, resultando em um ganho anual de 9,91%.

No caso do segundo sistema, caracterizado pelo rastreador solar e módulo monofacial, observou-se uma variação mensal de ganho que oscilou entre 11% e 36%, destacando-se o mês de fevereiro com o maior ganho, de 36,03%, e o mês de julho com o menor, registrando 11,37%. A análise anual revelou uma variação de ganho significativa, atingindo 22,08%. Essa variação expressiva ao longo do ano pode ser atribuída à capacidade da estrutura móvel em acompanhar a trajetória solar, otimizando assim a captação de radiação, fator relevante para a região Sudeste.

No terceiro sistema agrovoltáico, que emprega rastreador solar e módulo bifacial, observou-se uma diferença expressiva nos ganhos. O melhor desempenho mensal ocorreu em fevereiro, alcançando 45,77% de ganho, enquanto o mês de julho apresentou o menor ganho, atingindo 19,80%. A análise anual revelou um ganho global de 31,13%. Esses resultados destacam a eficiência superior desse sistema, especialmente nos meses em que a incidência solar é mais intensa. A utilização de módulos bifaciais, combinada com a capacidade de rastreamento solar, potencializa a captação de energia, tornando esse sistema uma escolha estratégica para otimizar a produção de energia ao longo do ano.

### **6.1.3 Resultados Região Centro-Oeste**

Nos resultados a seguir foi realizada uma análise específica para a região Centro-Oeste, com simulações feitas para a cidade de Campo Grande, no estado do Mato Grosso. Esta região é conhecida por seu clima característico, marcado por altas temperaturas e uma significativa incidência solar ao longo do ano. A Tabela 9 apresenta os resultados do fator de capacidade para cada sistema agrovoltáico, tanto em análises mensais quanto anuais. Vale ressaltar que a escolha de sistemas eficientes nesse contexto é crucial, considerando a intensidade da irradiação solar e suas variações sazonais.

Tabela 9 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltaicos região Centro-Oeste.

Fator de Capacidade								
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial		Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	FC	%	FC	%	FC	%	FC	%
Jan	0,147	14,69	0,16	16,42	0,200	19,97	0,22	21,54
Fev	0,129	12,87	0,14	14,39	0,169	16,91	0,18	18,31
Mar	0,141	14,08	0,15	15,49	0,178	17,79	0,19	19,12
Abr	0,136	13,62	0,15	14,92	0,165	16,49	0,18	17,64
Mai	0,150	15,02	0,16	16,29	0,169	16,88	0,18	18,05
Jun	0,144	14,39	0,16	15,59	0,155	15,49	0,17	16,62
Jul	0,154	15,38	0,17	16,67	0,167	16,72	0,18	17,91
Ago	0,139	13,86	0,15	15,34	0,157	15,73	0,17	17,10
Set	0,156	15,64	0,17	17,18	0,186	18,64	0,20	20,07
Out	0,144	14,44	0,16	15,98	0,179	17,89	0,19	19,34
Nov	0,138	13,80	0,15	15,44	0,182	18,19	0,20	19,69
Dez	0,129	12,88	0,15	14,61	0,170	17,00	0,19	18,56
<b>Anual</b>	<b>0,142</b>	<b>14,23</b>	<b>0,16</b>	<b>15,70</b>	<b>0,173</b>	<b>17,31</b>	<b>0,19</b>	<b>18,67</b>

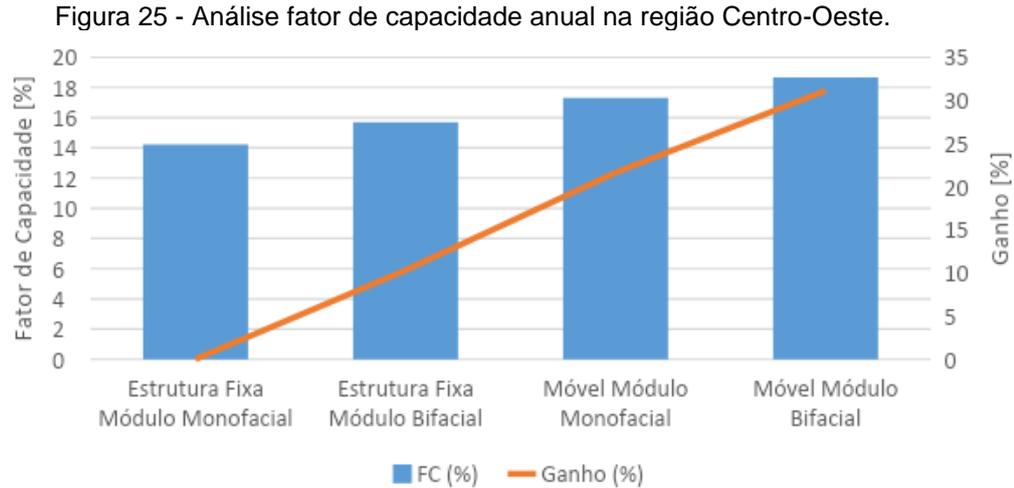
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Tabela 10 e na Figura 25, são apresentados os ganhos percentuais dos sistemas agrovoltaicos em comparação com o sistema de referência, que possui estrutura fixa e módulo monofacial. Esses ganhos foram analisados em termos percentuais, tanto em uma base mensal quanto anual. O gráfico fornece uma visualização clara e comparativa desses ganhos, destacando as variações anuais.

Tabela 10 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Centro-Oeste.

Ganho Percentual FC (%)			
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	11,78	35,92	46,60
Fev	11,88	31,39	42,29
Mar	10,04	26,35	35,81
Abr	9,50	21,01	29,46
Mai	8,42	12,40	20,15
Jun	8,38	7,68	15,50
Jul	8,40	8,74	16,48
Ago	10,69	13,49	23,33
Set	9,86	19,16	28,31
Out	10,64	23,89	33,95
Nov	11,84	31,79	42,62
Dez	13,40	32,01	44,11
<b>Anual</b>	<b>10,33</b>	<b>21,64</b>	<b>31,15</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ao comparar o sistema fixo com módulo bifacial com o sistema de referência, observou-se um ganho médio em torno de 10% nos dados mensais, com variações ao longo do ano. Notavelmente, o menor ganho ocorreu no mês de junho, 8,38%, coincidindo com uma possível redução na irradiação solar devido às características sazonais. Por outro lado, o maior ganho foi registrado no mês de dezembro, 13,40%, sugerindo uma correlação positiva com um aumento na irradiação solar durante esse período.

O segundo sistema, equipado com rastreador solar e módulo monofacial, apresentou ganhos mensais e anuais expressivos, destacando-se com um aumento anual de 21,64%. Os ganhos mensais variaram entre 7% e 35%, sendo janeiro o mês de maior destaque com um ganho de 35,92%, enquanto junho registrou o menor ganho, atingindo 7,68%. A mobilidade conferida pela estrutura móvel pode ter cumprido um papel significativo nesse desempenho, adaptando-se de maneira mais eficaz às condições cambiantes da região.

Por fim, ao comparar o sistema com rastreador solar e módulo bifacial com o sistema de referência, observou-se, conforme esperado, o maior ganho. Janeiro destacou-se como o mês de maior desempenho, atingindo um aumento de 46,60%, quase o dobro da geração do sistema de referência. Por outro lado, junho registrou o menor ganho, com 15,50%. No acumulado anual, o sistema agrovoltáico com rastreador e módulo bifacial apresentou um ganho expressivo de 31,15%. Esses resultados reforçam a eficácia dessa configuração em aproveitar a irradiação solar

variável ao longo do ano na região Centro-Oeste, consolidando sua superioridade em relação ao sistema de referência.

#### 6.1.4 Resultados Região Nordeste

Na Tabela 11 serão apresentados os resultados do fator de capacidade para a região Nordeste, considerando quatro sistemas agrovoltáicos. A cidade de Petrolina – Pernambuco, foi escolhida como local de referência. É relevante destacar a correlação desses resultados com o clima, a irradiação solar específica da região Nordeste e a latitude de Petrolina. Esses elementos climáticos e geográficos exercem um papel fundamental na compreensão da eficiência e desempenho dos sistemas agrovoltáicos, proporcionando uma análise mais abrangente e contextualizada.

Tabela 11 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Nordeste.

Fator de Capacidade								
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial		Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	FC	%	FC	%	FC	%	FC	%
Jan	0,135	13,48	0,15	15,14	0,177	17,70	0,19	19,23
Fev	0,138	13,83	0,15	15,39	0,180	17,97	0,19	19,42
Mar	0,146	14,63	0,16	16,16	0,185	18,50	0,20	20,00
Abr	0,133	13,29	0,15	14,63	0,162	16,23	0,18	17,53
Mai	0,139	13,93	0,15	15,25	0,167	16,68	0,18	17,96
Jun	0,139	13,94	0,15	15,22	0,165	16,51	0,18	17,73
Jul	0,141	14,10	0,15	15,48	0,169	16,86	0,18	18,15
Ago	0,163	16,30	0,18	17,86	0,200	20,00	0,21	21,46
Set	0,155	15,54	0,17	17,05	0,194	19,45	0,21	20,87
Out	0,156	15,61	0,17	17,10	0,203	20,35	0,22	21,75
Nov	0,149	14,93	0,16	16,47	0,197	19,68	0,21	21,13
Dez	0,142	14,16	0,16	15,79	0,187	18,72	0,20	20,21
<b>Anual</b>	<b>0,145</b>	<b>14,48</b>	<b>0,16</b>	<b>15,97</b>	<b>0,182</b>	<b>18,23</b>	<b>0,20</b>	<b>19,62</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

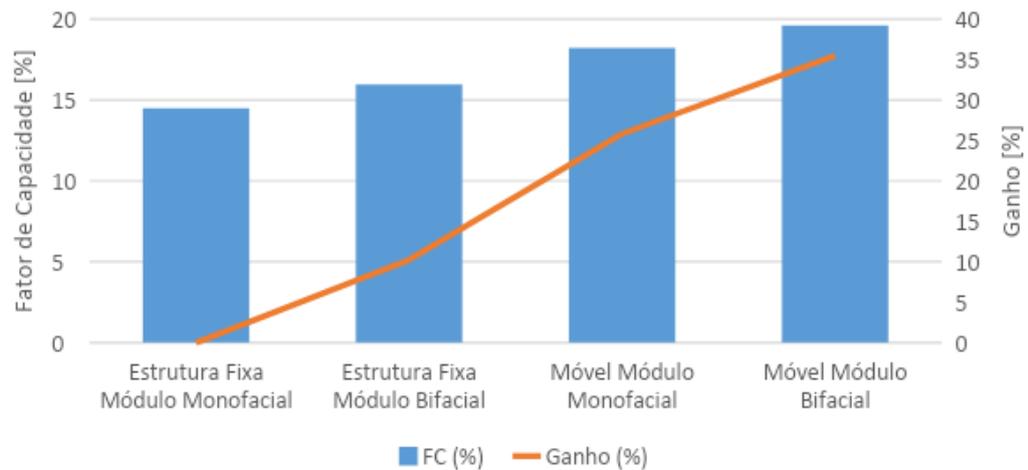
A partir da análise desses quatro sistemas foi possível obter o fator de capacidade e os resultados dos ganhos percentuais entre eles, utilizando o sistema agrovoltáico de referência, no caso, o de estrutura fixa e módulo monofacial. O fator de capacidade é apresentado na Tabela 12, contendo valores mensais e anuais, enquanto os ganhos anuais foram visualizados na Figura 26.

Tabela 12 - Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Nordeste.

Ganho Percentual FC (%)			
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	12,34	31,32	42,66
Fev	11,31	29,99	40,46
Mar	10,47	26,46	36,68
Abr	10,08	22,18	31,95
Mai	9,48	19,76	28,94
Jun	9,13	18,39	27,14
Jul	9,80	19,59	28,74
Ago	9,52	22,68	31,61
Set	9,71	25,16	34,30
Out	9,55	30,32	39,34
Nov	10,34	31,78	41,49
Dez	11,51	32,15	42,68
<b>Anual</b>	<b>10,24</b>	<b>25,83</b>	<b>35,48</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 26 - Análise fator de capacidade anual na região Nordeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na análise inicial, a comparação entre o sistema de referência e o sistema fixo com módulo bifacial revelou variações nos ganhos percentuais, oscilando de 9,13% a 12,34% ao longo dos meses. Esses resultados destacam a influência do tipo de sistema adotado, sendo janeiro o mês com o maior ganho e junho com o menor. O ganho anual, totalizando 10,24%, sublinha a relevância da escolha do sistema na eficiência do aproveitamento solar.

Na comparação com o sistema agrovoltáico com rastreador solar e módulo monofacial, observou-se um ganho percentual anual expressivo de 25,83%. Ao analisar os resultados mensais, destacam-se variações, sendo dezembro o melhor mês, com o maior ganho, 32,15%, e junho o mês com o menor ganho, 18,39%. Essas

variações podem ser correlacionadas com fatores como a irradiação solar específica de cada mês, características sazonais e a eficiência do sistema em acompanhar a trajetória solar ao longo do dia.

Conforme esperado, o sistema com rastreador solar e módulo bifacial apresentou o melhor desempenho, com um ganho percentual anual significativo de 35,48%. Ao observar os resultados mensais, destaca-se o mês de dezembro, com um ganho de 42,68%, quase o dobro do ganho em relação ao sistema de referência, enquanto junho registrou o menor ganho, com 27,14%. Essas variações podem ser atribuídas às condições climáticas específicas da região Nordeste, incluindo a intensidade da irradiação solar e as características sazonais que influenciam diretamente no desempenho do sistema.

### 6.1.5 Resultados Região Norte

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos por meio do *software* para a cidade de Boa Vista, em Roraima, referentes aos fatores de capacidade mensais e anuais de quatro diferentes sistemas agrovoltáicos. Essa análise visa fornecer uma compreensão abrangente do desempenho desses sistemas.

Tabela 13 - Fator de Capacidade em quatro sistemas agrovoltáicos região Norte.

Fator de Capacidade								
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial		Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	FC	%	FC	%	FC	%	FC	%
Jan	0,13	13,47	0,15	14,91	0,17	17,21	0,19	18,62
Fev	0,13	12,91	0,14	14,32	0,16	16,41	0,18	17,81
Mar	0,14	14,29	0,16	15,62	0,18	18,11	0,20	19,52
Abr	0,13	12,82	0,14	14,04	0,16	15,84	0,17	17,16
Mai	0,12	11,50	0,13	12,68	0,14	13,81	0,15	15,06
Jun	0,11	10,81	0,12	12,01	0,12	12,44	0,14	13,71
Jul	0,11	10,93	0,12	12,10	0,13	12,75	0,14	13,97
Ago	0,11	10,57	0,12	11,75	0,13	12,95	0,14	14,13
Set	0,12	12,09	0,13	13,36	0,15	15,05	0,16	16,36
Out	0,11	10,84	0,12	12,06	0,14	13,86	0,15	15,05
Nov	0,11	11,09	0,12	12,37	0,14	14,29	0,16	15,53
Dez	0,12	11,65	0,13	13,03	0,15	14,88	0,16	16,21
<b>Anual</b>	<b>0,12</b>	<b>11,91</b>	<b>0,13</b>	<b>13,18</b>	<b>0,15</b>	<b>14,79</b>	<b>0,16</b>	<b>16,08</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

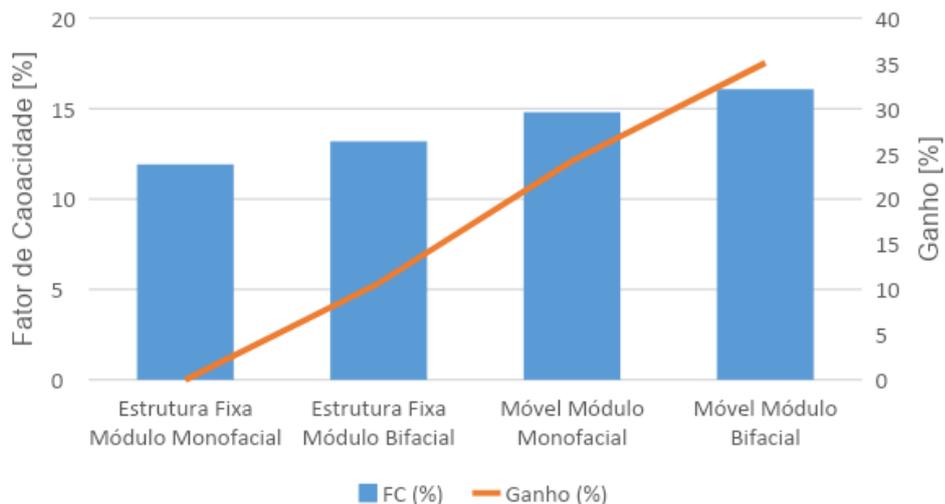
A partir dos dados fornecidos na tabela anterior, foi possível calcular o ganho percentual em relação ao sistema de referência, que utiliza estrutura fixa e módulo monofacial. Esses resultados estão detalhados na tabela 14, apresentando valores mensais e anuais. Além disso, a Figura 27 ilustra os ganhos anuais, destacando a linha percentual de variação.

Tabela 14- Ganho percentual do fator de capacidade entre sistemas, região Norte.

Ganho Percentual FC (%)			
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	10,71	27,81	38,26
Fev	10,95	27,10	37,94
Mar	9,36	26,78	36,63
Abr	9,52	23,57	33,86
Mai	10,24	20,01	30,89
Jun	11,17	15,10	26,85
Jul	10,69	16,73	27,86
Ago	11,14	22,49	33,68
Set	10,52	24,50	35,29
Out	11,32	27,88	38,87
Nov	11,51	28,77	40,02
Dez	11,77	27,68	39,09
<b>Anual</b>	<b>10,69</b>	<b>24,21</b>	<b>35,07</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 27 - Análise fator de capacidade anual na região Norte.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

No sistema com estrutura fixa e módulo bifacial, observou-se uma variação do ganho percentual na faixa de 9% a 11%. O melhor desempenho ocorreu em

dezembro, com um ganho de 11,77%, enquanto março registrou o menor ganho, 9,36%. A variação anual totalizou 10,69%.

No segundo sistema, que envolve um sistema agrovoltáico com rastreador solar e módulo monofacial, registrou-se um acréscimo de 24,21% no ganho anual. O desempenho mensal variou, apresentando o melhor resultado em janeiro, com 27,81%, e o menor em junho, com 15,10%. Vale ressaltar que os índices pluviométricos mais elevados na região, ocorrendo nos meses de maio e junho, coincidem com os menores valores de ganho observados. Essa correlação destaca a influência direta das condições climáticas na geração de energia solar, evidenciando a interconexão entre fatores meteorológicos e eficiência do sistema agrovoltáico.

Por último, no terceiro sistema, que envolve um sistema com rastreador solar e módulo bifacial, registrou-se um ganho de 35,07% no período anual. O desempenho mensal revelou o melhor resultado em novembro, com 40,02%, e o pior em junho, novamente, com 26,85%. Essa variação destaca a influência sazonal nas condições de irradiação solar e sua repercussão na eficiência do sistema.

## 6.2 PRODUTIVIDADE

Os resultados para a produtividade de cada região do Brasil foram obtidos através dos dados do *software* (SAM).

### 6.2.1 Resultados Região Sul

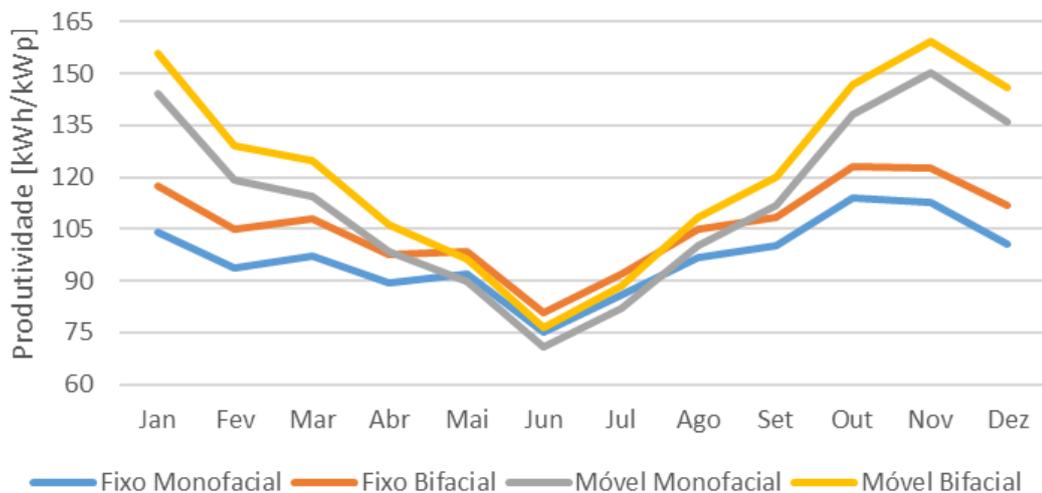
Através da Tabela 15, os resultados obtidos por meio da aplicação da equação 2, proporcionam a base para uma análise comparativa das produtividades em quatro sistemas agrovoltáicos distintos. Esses sistemas abrangem estruturas fixas e com rastreadores solares, assim como a utilização de módulos monofaciais e bifaciais. Essa análise específica foi conduzida na região Sul, na cidade de Santa Maria – Rio Grande do Sul. A Figura 28 ilustra visualmente esses resultados, evidenciando a curva de geração solar típica da região Sul, com declínio nos meses de maio, junho e julho. Essa sazonalidade ressalta a influência direta nas eficiências dos sistemas agrovoltáicos ao longo do ano.

Tabela 15 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltáicos região Sul

Produtividade (kWh/kWp)				
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	103,94	117,61	144,31	155,97
Fev	93,71	104,82	119,22	129,35
Mar	97,28	108,19	114,48	124,73
Abr	89,43	97,50	98,49	106,23
Mai	92,15	98,41	89,73	96,19
Jun	75,29	80,65	70,83	76,61
Jul	85,76	92,07	82,12	88,69
Ago	96,85	105,01	100,27	108,23
Set	100,19	108,46	111,96	120,00
Out	114,08	122,92	138,39	146,81
Nov	112,88	122,74	150,33	159,32
Dez	100,57	111,91	135,94	145,84
<b>Anual</b>	<b>1162,11</b>	<b>1270,30</b>	<b>1356,07</b>	<b>1457,99</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 28 - Análise de quatro sistemas agrovoltáicos região Sul.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Tabela 16 foram apresentados os resultados derivados da tabela anterior, destacando a comparação entre os sistemas, utilizando o sistema agrovoltáico de referência, que possui estrutura fixa e módulo monofacial. A tabela ilustra o aumento na produtividade, acompanhado do ganho percentual, tanto em análises mensais quanto anuais.

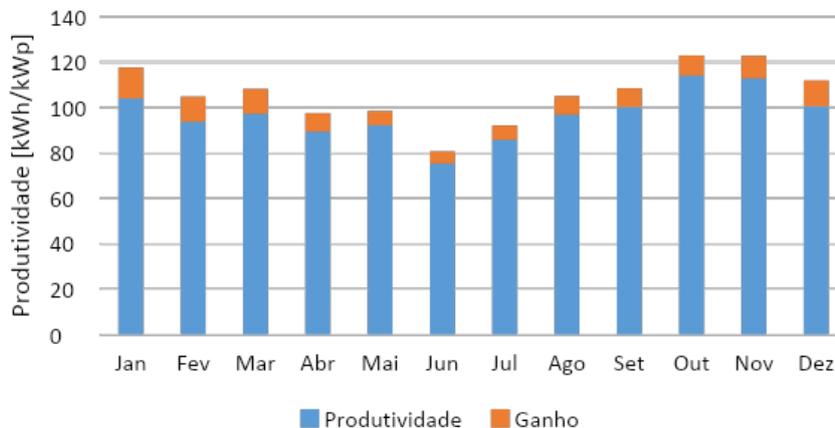
Tabela 16 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Sul.

Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%
Jan	13,67	13,15	40,36	38,8	52,03	50,05
Fev	11,11	11,86	25,51	27,2	35,65	38,04
Mar	10,90	11,21	17,20	17,7	27,45	28,22
Abr	8,07	9,02	9,06	10,1	16,81	18,79
Mai	6,27	6,80	-2,41	-2,6	4,05	4,39
Jun	5,37	7,13	-4,45	-5,9	1,32	1,75
Jul	6,32	7,37	-3,63	-4,2	2,94	3,42
Ago	8,16	8,42	3,42	3,5	11,38	11,75
Set	8,28	8,26	11,78	11,8	19,81	19,78
Out	8,84	7,75	24,31	21,3	32,74	28,70
Nov	9,87	8,74	37,45	33,2	46,45	41,15
Dez	11,34	11,28	35,37	35,2	45,27	45,01
<b>Anual</b>	<b>108,19</b>	<b>9,31</b>	<b>193,96</b>	<b>16,7</b>	<b>295,88</b>	<b>25,46</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 29, apresentada abaixo, utilizando o sistema agrovoltaico com estrutura fixa e módulo monofacial como ponto de referência, realizou-se uma comparação com um sistema análogo, equipado com módulos bifaciais. Como antecipado, constatou-se um incremento na produtividade, evidenciando o ganho adicional proporcionado pela capacidade dos módulos bifaciais. O ganho anual foi de 9,31%, com o maior ganho mensal ocorrendo em janeiro, atingindo 13,67%. O menor ganho, como já esperado, foi em junho, atingindo 7,13%, correlacionado com a radiação solar nesse período.

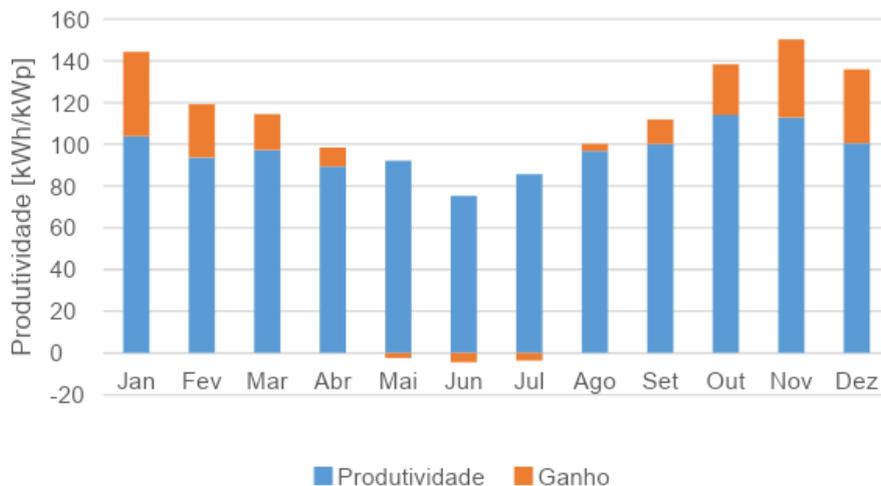
Figura 29 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa e com módulo bifacial, região Sul.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na análise subsequente, conforme evidenciado na Figura 30 abaixo, procedeu-se à comparação entre o sistema de referência e a configuração que incorpora o sistema com rastreador solar de 1 eixo horizontal. Como previsto, o sistema com rastreador demonstrou uma produtividade superior em relação ao sistema anterior e ao de referência. Esse acréscimo pode ser atribuído à habilidade do rastreador solar de ajustar a orientação dos módulos para seguir a trajetória aparente do sol, otimizando assim a exposição à luz solar. O ganho anual foi de 16,70%, sendo que nos meses esperados com menor geração (maio, junho e julho) o sistema de referência permaneceu como a melhor opção. Como observado anteriormente, o melhor desempenho ocorreu no mês de janeiro, 38,80%.

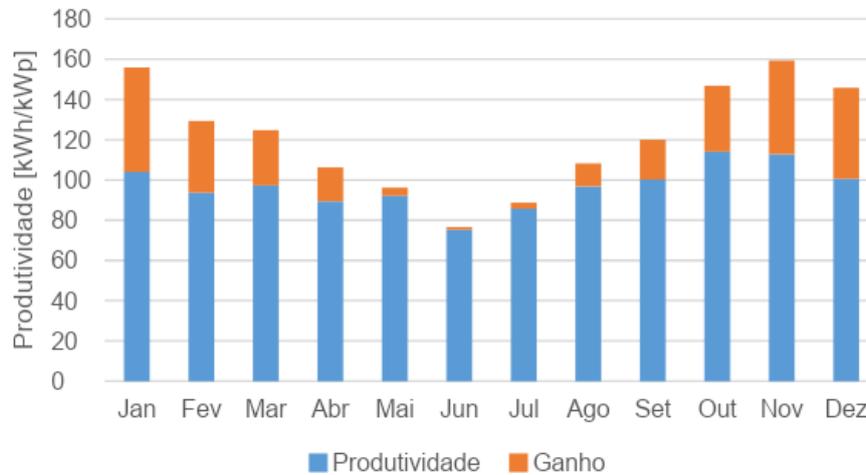
Figura 30 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Sul.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Por último, a comparação entre o sistema referência com o sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, mostrada na Figura 31, evidenciou-se liderança no incremento da produtividade. Essa configuração ofereceu eficiência superior, beneficiando-se tanto da capacidade bifacial quanto da capacidade de rastreamento solar. Estes resultados são de suma relevância ao considerar aspectos climáticos e de irradiação específicos da região sul, onde a otimização da captação solar desempenha papel crucial na eficiência global do sistema agrovoltáico. O ganho percentual anual foi de 25,46%, menor mês de geração foi junho com 1,75%, e o maior em janeiro 50,05%.

Figura 31 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Sul.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## 6.2.2 Resultados Região Sudeste

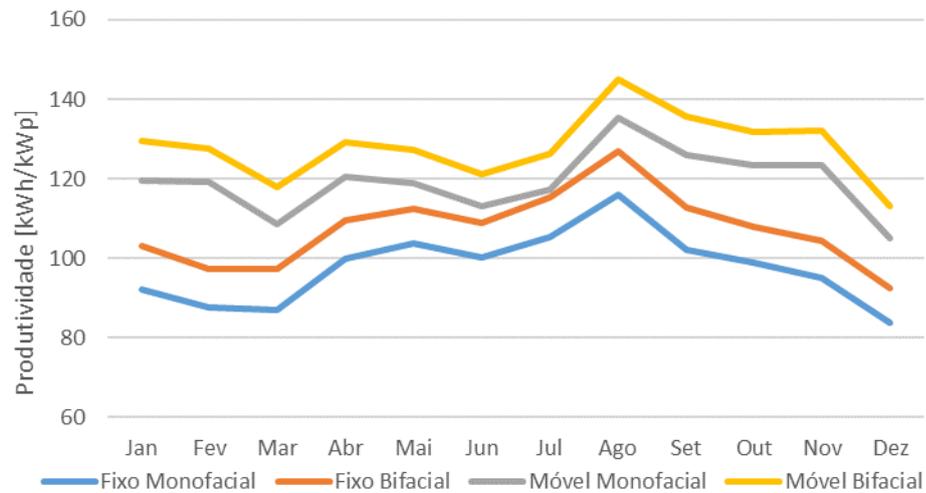
Na Tabela 17 são apresentados os resultados referentes à produtividade dos quatro sistemas agrovoltaicos. Esses dados foram obtidos por meio da aplicação da equação 2, mencionada anteriormente no trabalho, e as simulações foram realizadas para a cidade de Belo Horizonte – Minas Gerais. A Figura 32 ilustra esses resultados, proporcionando uma representação gráfica da produtividade dos sistemas analisados.

Tabela 17 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Sudeste

Meses	Produtividade (kWh/kWp)			
	Estrutura Fixa Módulo Monofacial	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	92,00	102,96	119,44	129,68
Fev	87,57	97,32	119,12	127,65
Mar	87,00	97,20	108,66	117,82
Abr	99,94	109,59	120,65	129,27
Mai	103,69	112,49	118,98	127,15
Jun	100,25	108,89	113,25	121,09
Jul	105,41	115,26	117,39	126,28
Ago	116,06	127,09	135,41	145,05
Set	102,22	112,67	126,02	135,57
Out	98,81	107,83	123,40	131,94
Nov	95,20	104,32	123,40	132,07
Dez	83,75	92,38	104,98	113,10
<b>Anual</b>	<b>1171,89</b>	<b>1288,00</b>	<b>1430,70</b>	<b>1536,66</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 32 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Sudeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A análise comparativa entre os sistemas foi realizada tomando como referência o sistema com estrutura fixa e módulo monofacial. A partir dessa referência foram obtidos os valores de aumento na produtividade e as porcentagens de ganho para cada sistema, conforme apresentado na Tabela 18. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho relativo de cada configuração de sistema agrovoltaico.

Tabela 18 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Sudeste

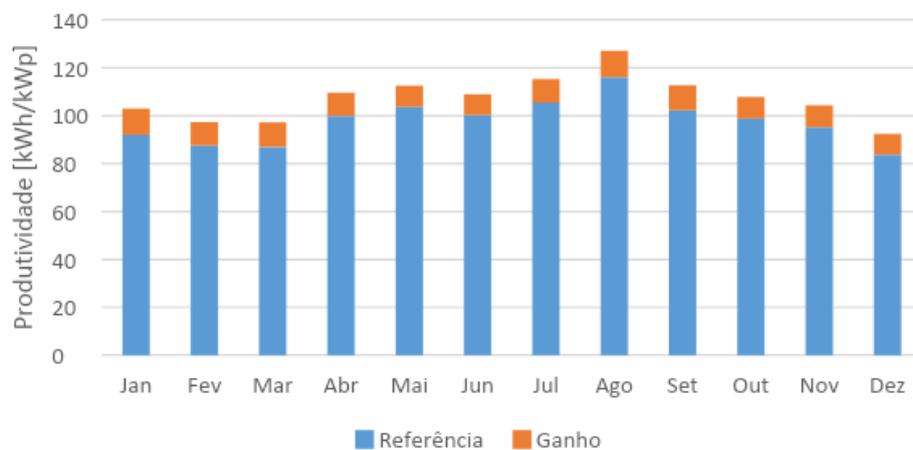
Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%
Jan	10,97	11,92	27,44	29,8	37,68	40,95
Fev	9,75	11,14	31,55	36,0	40,08	45,77
Mar	10,19	11,72	21,66	24,9	30,82	35,42
Abr	9,65	9,66	20,71	20,7	29,33	29,35
Mai	8,80	8,49	15,29	14,7	23,45	22,62
Jun	8,64	8,62	13,00	13,0	20,84	20,79
Jul	9,85	9,35	11,98	11,4	20,87	19,80
Ago	11,03	9,50	19,36	16,7	28,99	24,98
Set	10,45	10,22	23,80	23,3	33,35	32,63
Out	9,02	9,13	24,59	24,9	33,13	33,53
Nov	9,12	9,58	28,20	29,6	36,87	38,73
Dez	8,63	10,31	21,23	25,4	29,35	35,04
<b>Anual</b>	<b>116,11</b>	<b>9,91</b>	<b>258,81</b>	<b>22,1</b>	<b>364,77</b>	<b>31,13</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ao comparar o sistema agrovoltaico de referência com o de estrutura fixa e módulo bifacial, constatou-se um aumento na produtividade na ordem de 10%,

evidenciando a capacidade dos módulos bifaciais se sobressaírem. Os resultados mensais variaram, sendo janeiro o mês com o maior ganho percentual, 11,92%, e maio o mês com o menor, 8,49%. O ganho anual totalizou 9,91%. Essa variação está correlacionada com as características climáticas da região, destacando a importância da irradiação solar específica para o desempenho dos sistemas agrovoltáicos. Essa análise comparativa está ilustrada de forma gráfica na Figura 33, onde é possível visualizar o comportamento e o ganho mensal do sistema agrovoltáico.

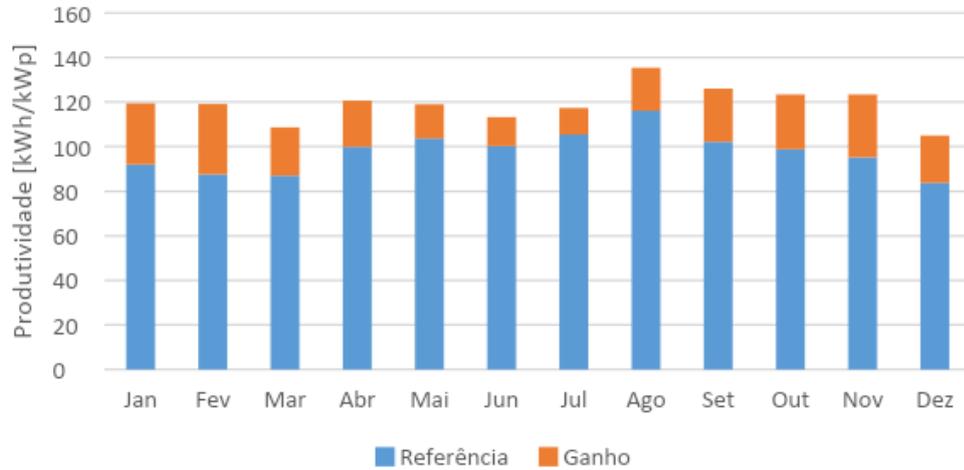
Figura 33 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Sudeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 34 evidenciou-se, na segunda análise de produtividade, a comparação entre o sistema com rastreador solar e módulo monofacial. O pico de ganho de produtividade ocorreu em fevereiro, atingindo 36%, enquanto o menor ganho foi registrado em julho, com 11,4%. No acumulado do ano, esse sistema apresentou um aumento de 22,1%, totalizando um acréscimo significativo de 258,81 kWh/kWp. Esses resultados destacam a variabilidade sazonal na eficiência do sistema.

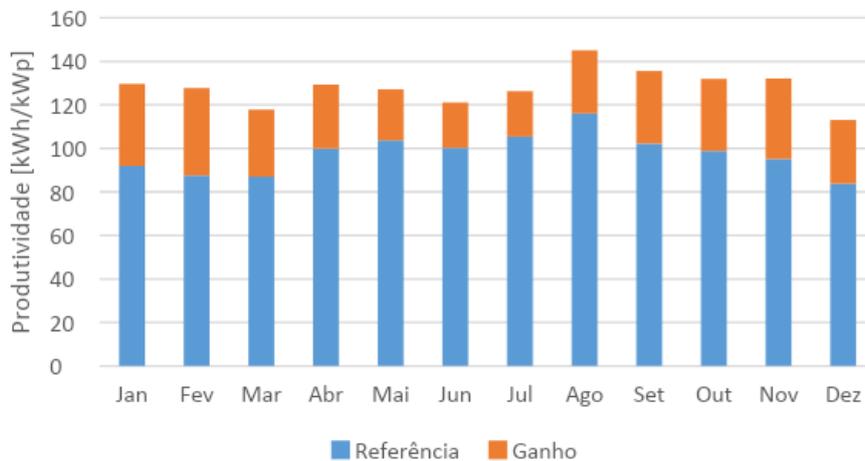
Figura 34 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Sudeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 35, ao comparar o sistema com rastreador solar e módulo bifacial, como antecipado, observou-se o maior ganho percentual anual, atingindo 31,13%, o que se traduz em um aumento significativo de 364,77 kWh/kWp. O pico de produtividade foi registrado em fevereiro, com um notável incremento de 45,77%, quase o dobro da produtividade em relação ao sistema de referência. Em contraste, o menor ganho foi registrado em julho, com 19,80%. Esses resultados destacam a eficácia do sistema com rastreador e módulo bifacial, especialmente em condições de alta irradiação solar.

Figura 35 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Sudeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

### 6.2.3 Resultados Região Centro-Oeste

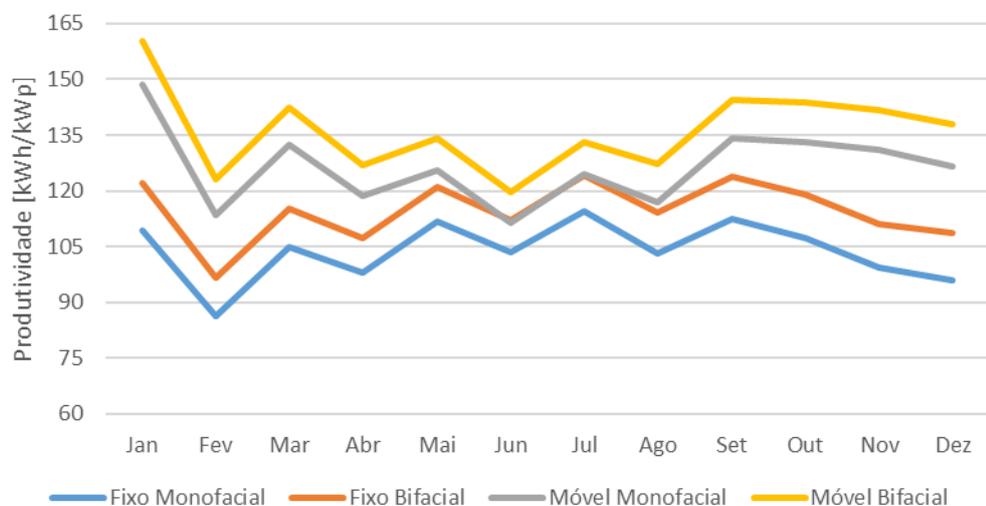
Os dados apresentados na Tabela 19 contemplam análises mensais e anuais da produtividade dos quatro sistemas agrovoltaicos em Campo Grande, no Mato Grosso do Sul. A Figura 36 complementa essas informações, ilustrando a curva específica de produtividade para a região, proporcionando uma visão mais abrangente e contextualizada do desempenho ao longo do ano.

Tabela 19 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Centro-Oeste.

Produtividade (kWh/kWp)				
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	109,31	122,19	148,58	160,25
Fev	86,46	96,73	113,60	123,02
Mar	104,75	115,27	132,36	142,27
Abr	98,09	107,42	118,70	127,00
Mai	111,76	121,17	125,61	134,28
Jun	103,58	112,27	111,53	119,64
Jul	114,42	124,04	124,42	133,28
Ago	103,14	114,17	117,06	127,21
Set	112,63	123,73	134,21	144,51
Out	107,44	118,87	133,10	143,91
Nov	99,39	111,16	130,99	141,75
Dez	95,83	108,67	126,50	138,10
<b>Anual</b>	<b>1246,81</b>	<b>1375,66</b>	<b>1516,67</b>	<b>1635,22</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 36 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Centro-Oeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A partir dos dados coletados, foram realizadas comparações entre os sistemas agrovoltáticos e o sistema de referência. Os resultados dessas análises, incluindo o aumento e o ganho percentual, estão apresentados de forma detalhada na Tabela 20.

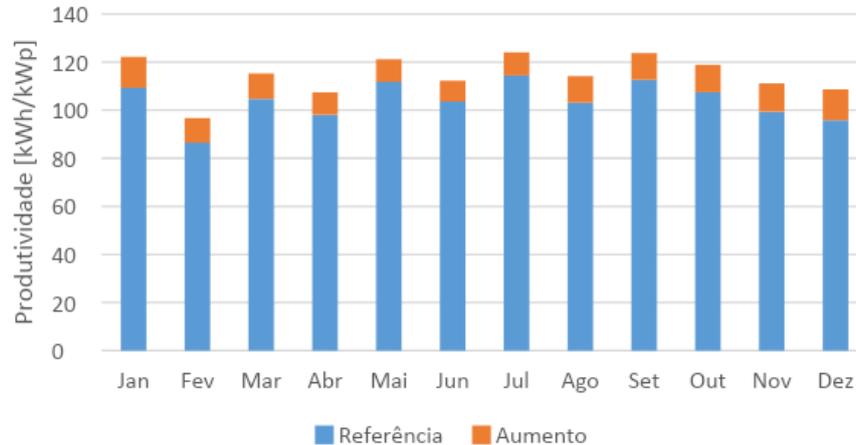
Tabela 20 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Centro-Oeste.

Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%
Jan	12,88	11,78	39,26	35,9	50,94	46,60
Fev	10,27	11,88	27,14	31,4	36,56	42,29
Mar	10,51	10,04	27,60	26,4	37,51	35,81
Abr	9,32	9,50	20,61	21,0	28,90	29,46
Mai	9,41	8,42	13,86	12,4	22,52	20,15
Jun	8,68	8,38	7,95	7,7	16,06	15,50
Jul	9,62	8,40	10,00	8,7	18,86	16,48
Ago	11,02	10,69	13,92	13,5	24,06	23,33
Set	11,10	9,86	21,58	19,2	31,88	28,31
Out	11,43	10,64	25,66	23,9	36,47	33,95
Nov	11,77	11,84	31,60	31,8	42,36	42,62
Dez	12,84	13,40	30,68	32,0	42,27	44,11
<b>Anual</b>	<b>128,85</b>	<b>10,33</b>	<b>269,86</b>	<b>21,6</b>	<b>388,40</b>	<b>31,15</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 37 evidencia-se a comparação entre o sistema com estrutura fixa e módulo bifacial e o sistema de referência. Verifica-se uma variação percentual de 8% a 13%, sendo dezembro o mês de maior ganho, com 13,40%, e junho o de menor, com 8,38%. Essa variação resulta em um ganho anual totalizando 10,33%, com aumento de 128,85 kWh/kWp por ano.

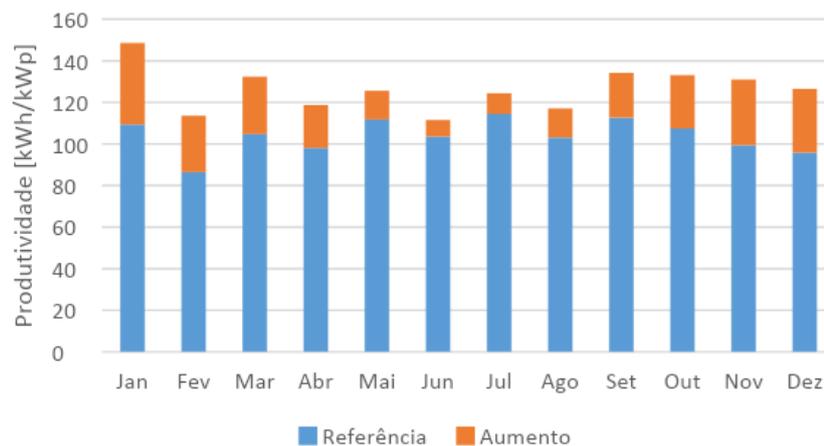
Figura 37 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Centro-Oeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 38 é apresentada a comparação entre o sistema com rastreador solar e módulo monofacial e o sistema de referência. Observa-se um aumento significativo, alcançando 21,6% no ganho anual, o que representa um acréscimo de 269,86 kWh/kWp por ano. O melhor desempenho mensal foi registrado em janeiro, com um aumento de 39,26%, enquanto o menor ganho ocorreu em junho, atingindo 7,95%.

Figura 38 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Centro-Oeste.

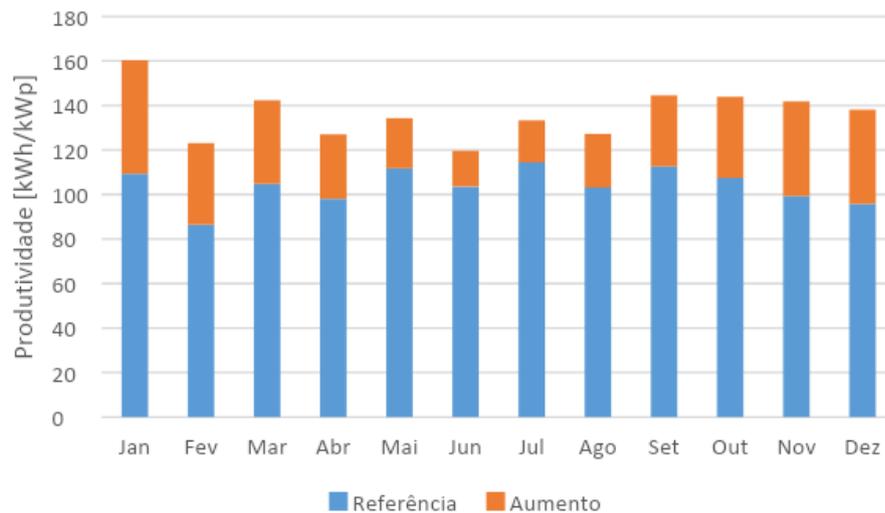


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 39, conforme previsto, o sistema mais eficiente em comparação com os demais, rastreamento solar 1 eixo e módulo bifacial, apresentou um aumento na produtividade de 31,15% anual, totalizando 388,40 kWh/kWp. O destaque vai para janeiro, com o melhor desempenho mensal de 46,60%, enquanto junho registrou o

menor aumento, atingindo 15,50%. Esses resultados evidenciam a eficácia do sistema agrovoltáico com rastreamento solar na região, reforçando a importância dessa tecnologia para otimizar a geração de energia.

Figura 39 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Centro-Oeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

#### 6.2.4 Resultados Região Nordeste

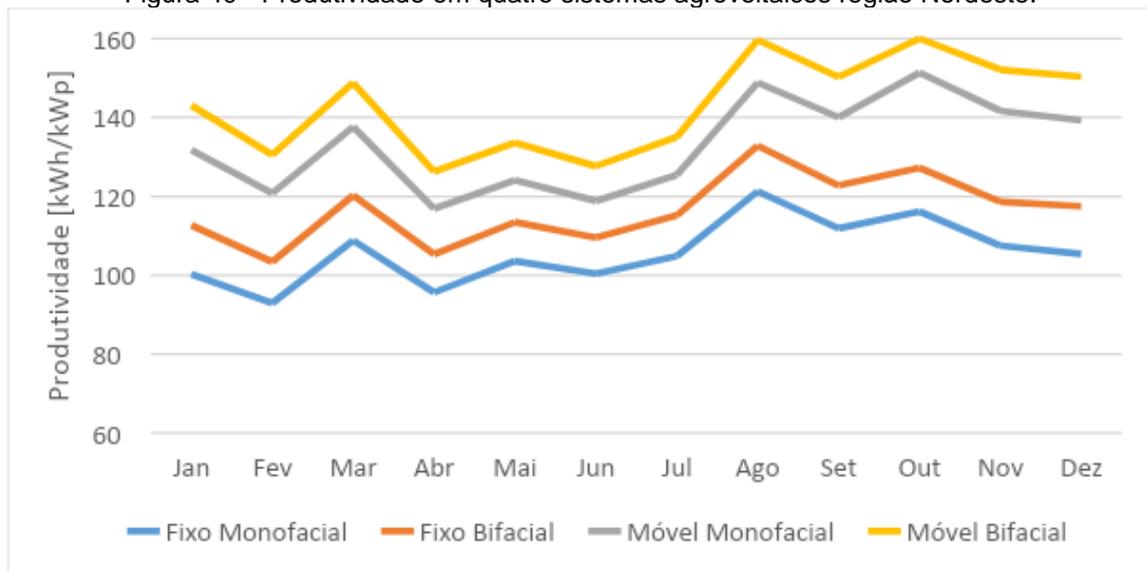
A Tabela 21 apresenta os resultados da produtividade obtidos por meio da equação 2, previamente mencionada, utilizando dados da cidade de Petrolina - Pernambuco. Os valores contemplam a produtividade mensal e anual. Na Figura 40 são exibidos os dados de produtividade mensal para quatro tipos de sistemas agrovoltáicos, delineando a curva de produtividade característica da região. Esses resultados refletem a eficiência e o desempenho dos sistemas agrovoltáicos em Petrolina, considerando as condições climáticas e características específicas da região.

Tabela 21 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Nordeste.

Produtividade (kWh/kWp)				
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	100,29	112,67	131,70	143,07
Fev	92,91	103,42	120,78	130,51
Mar	108,85	120,25	137,65	148,78
Abr	95,66	105,31	116,88	126,22
Mai	103,62	113,45	124,10	133,61
Jun	100,40	109,56	118,86	127,65
Jul	104,88	115,16	125,43	135,03
Ago	121,30	132,84	148,81	159,64
Set	111,89	122,76	140,04	150,27
Out	116,16	127,25	151,38	161,85
Nov	107,50	118,61	141,66	152,10
Dez	105,37	117,50	139,25	150,34
<b>Anual</b>	<b>1268,84</b>	<b>1398,78</b>	<b>1596,55</b>	<b>1719,08</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 40 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Nordeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A partir dos dados fornecidos na Tabela 22, foi realizada uma comparação entre os sistemas, utilizando o sistema agrovoltaico de referência. Os resultados incluem o valor do aumento mensal e anual da produtividade, refletindo no ganho percentual de cada sistema, como mostrado na tabela abaixo.

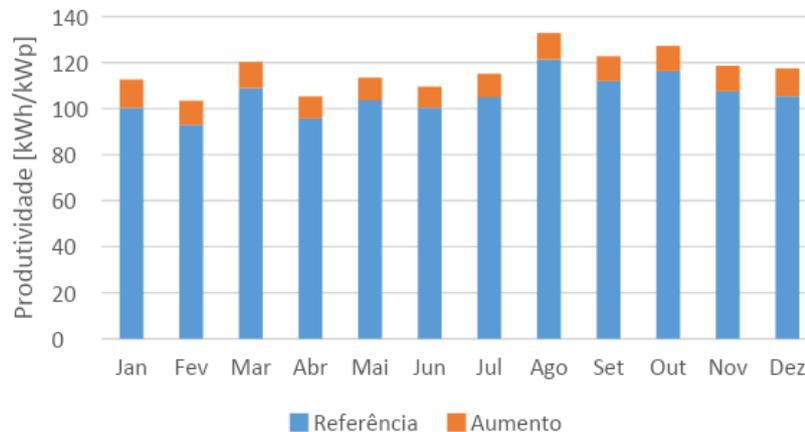
Tabela 22 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Nordeste.

Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%
Jan	12,38	12,34	31,41	31,3	42,78	42,66
Fev	10,50	11,31	27,86	30,0	37,59	40,46
Mar	11,40	10,47	28,80	26,5	39,92	36,68
Abr	9,64	10,08	21,22	22,2	30,56	31,95
Mai	9,83	9,48	20,48	19,8	29,99	28,94
Jun	9,16	9,13	18,47	18,4	27,25	27,14
Jul	10,28	9,80	20,55	19,6	30,15	28,74
Ago	11,54	9,52	27,52	22,7	38,34	31,61
Set	10,87	9,71	28,15	25,2	38,37	34,30
Out	11,09	9,55	35,22	30,3	45,70	39,34
Nov	11,12	10,34	34,16	31,8	44,61	41,49
Dez	12,12	11,51	33,87	32,1	44,97	42,68
<b>Anual</b>	<b>129,93</b>	<b>10,24</b>	<b>327,71</b>	<b>25,8</b>	<b>450,24</b>	<b>35,48</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 41 é possível observar a produtividade e o ganho percentual do primeiro sistema comparado, que utiliza uma estrutura fixa e módulo bifacial. Conforme previsto, a variação de ganho manteve-se em torno de 10%, com um acréscimo anual de 10,24% em relação ao sistema de referência. O menor ganho ocorreu no mês de junho, atingindo 9,10%, enquanto o maior ganho foi registrado em janeiro, alcançando 12,34%. Esse desempenho resultou em um aumento anual significativo de 129,93 kWh/kWp.

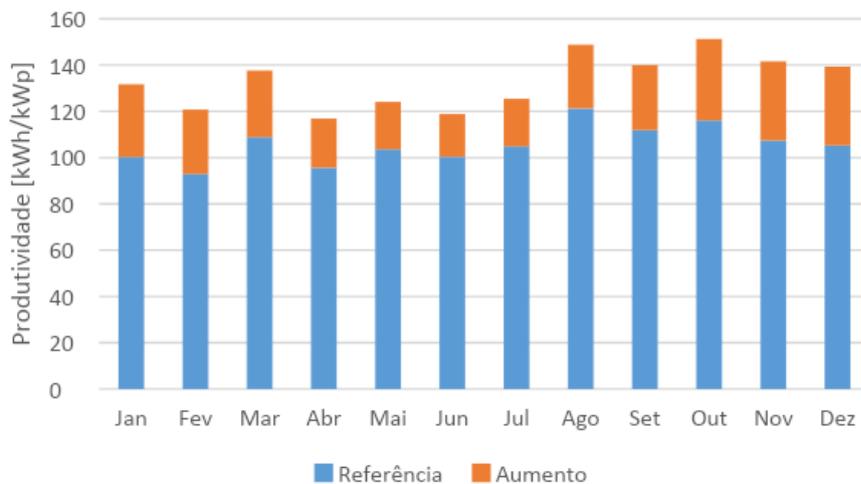
Figura 41 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Nordeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 42, ao comparar o sistema com rastreamento solar 1 eixo e módulo monofacial, foi evidenciado um ganho mais expressivo, atingindo 25,80% anual. O destaque ficou para o mês de dezembro, com um aumento de 32,1%, enquanto o menor ganho ocorreu em um mês de junho com menor irradiação, registrando 18,4%. O ganho anual totalizou 327,71 kWh/kWp, reforçando a eficiência desse sistema na região de Petrolina - Pernambuco.

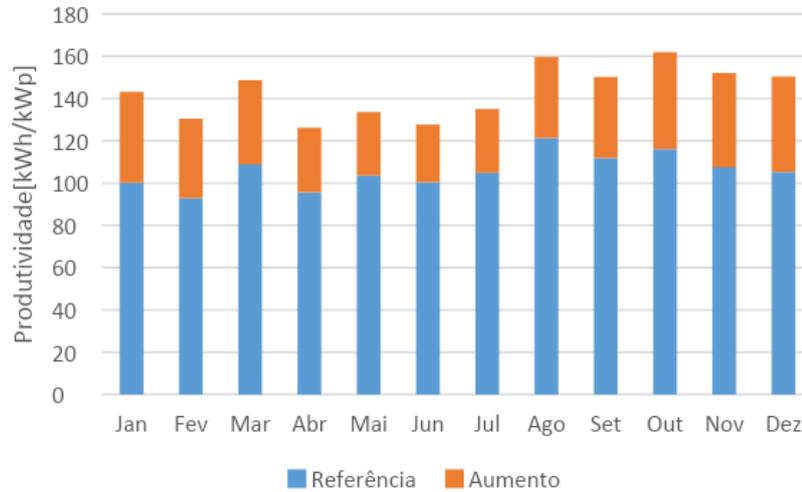
Figura 42 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Nordeste



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 43, ao comparar o sistema com rastreamento solar e módulo bifacial, foi constatado um aumento anual significativo de 450,24 kWh/kWp, representando um ganho expressivo de 35,48%. O mês de dezembro se destacou com o maior incremento, atingindo 42,68%, enquanto junho registrou o menor ganho, alcançando 27,14%.

Figura 43 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Nordeste.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

### 6.2.5 Resultados Região Norte

Na região norte, especificamente em Boa Vista, Roraima, os resultados da produtividade, conforme apresentados na Tabela 23, foram obtidos por meio da aplicação da equação 2. Esses dados refletem a performance de quatro sistemas agrovoltáicos distintos. Os resultados são apresentados de forma mensal e anual, proporcionando uma visão abrangente do desempenho ao longo do tempo. A Figura 44 ilustra detalhadamente a variação da produtividade ao longo dos meses, oferecendo uma compreensão mais visual e dinâmica dessas informações.

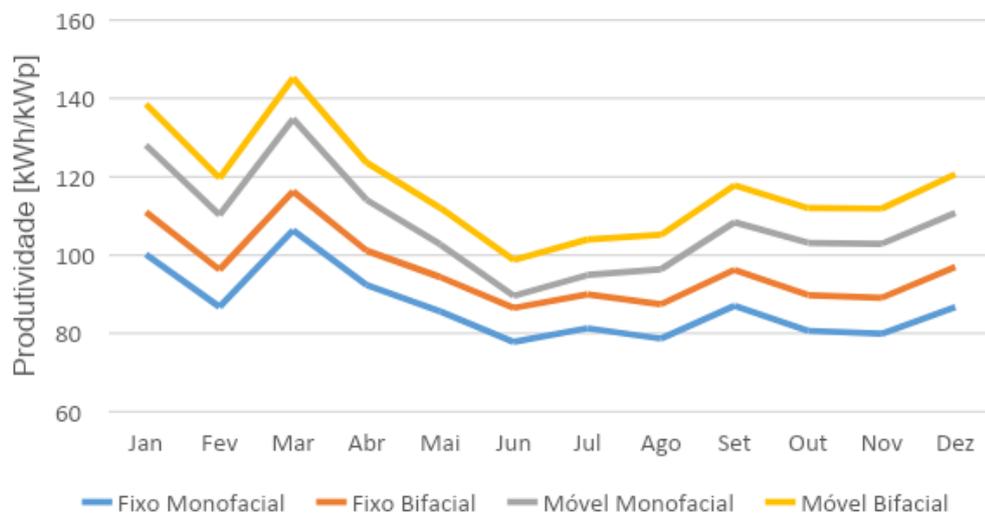
Importante destacar que a região norte geralmente possui características climáticas específicas, como elevadas temperaturas ao longo do ano e uma relativa constância na quantidade de horas de luz solar diárias. Esses fatores podem influenciar diretamente na produtividade dos sistemas agrovoltáicos, proporcionando uma análise mais detalhada e contextualizada desses resultados.

Tabela 23 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Norte.

Produtividade (kWh/kWp)				
Meses	Estrutura Fixa Módulo Monofacial	Estrutura Fixa Módulo Bifacial	Rastreador Solar Módulo Monofacial	Rastreador Solar Módulo Bifacial
Jan	100,19	110,93	128,06	138,52
Fev	86,74	96,24	110,25	119,66
Mar	106,30	116,25	134,77	145,24
Abr	92,31	101,09	114,06	123,56
Mai	85,60	94,36	102,72	112,04
Jun	77,80	86,49	89,54	98,69
Jul	81,30	89,99	94,89	103,94
Ago	78,65	87,42	96,34	105,14
Set	87,05	96,21	108,38	117,77
Out	80,63	89,75	103,10	111,96
Nov	79,88	89,07	102,85	111,84
Dez	86,71	96,92	110,71	120,60
<b>Anual</b>	<b>1043,16</b>	<b>1154,71</b>	<b>1295,69</b>	<b>1408,98</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 44 - Produtividade em quatro sistemas agrovoltaicos região Norte.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Com base nos dados apresentados anteriormente, foi possível realizar uma comparação entre os sistemas, considerando o sistema de referência. Os resultados dessa análise, contemplando o aumento da produtividade e o ganho percentual, estão detalhados na Tabela 24. Esses dados são apresentados de forma mensal e anual, oferecendo uma visão abrangente e detalhada do desempenho de cada sistema ao longo do tempo. Essa análise comparativa é crucial para compreender como diferentes configurações de sistemas agrovoltaicos respondem às condições climáticas específicas da região norte.

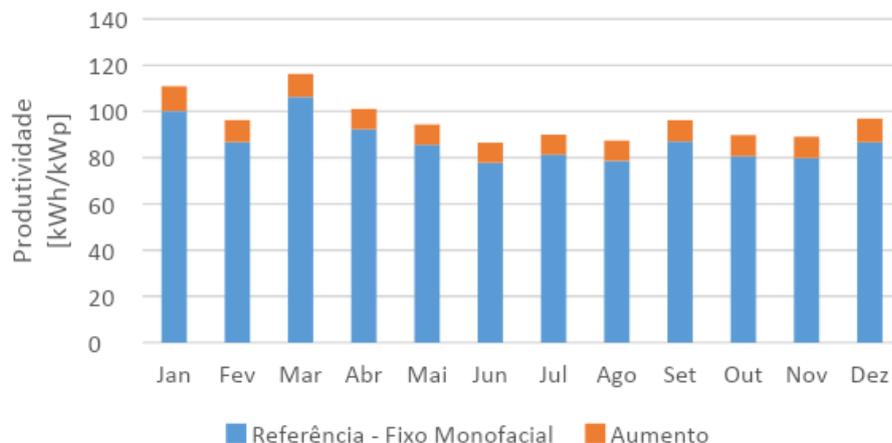
Tabela 24 - Comparação da produtividade entre sistemas, região Norte.

Meses	Estrutura Fixa Módulo Bifacial		Rastreador Solar Módulo Monofacial		Rastreador Solar Módulo Bifacial	
	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%	Aumento [kWh/kWp]	%
Jan	10,73	10,71	27,86	27,8	38,33	38,26
Fev	9,49	10,95	23,51	27,1	32,91	37,94
Mar	9,95	9,36	28,47	26,8	38,94	36,63
Abr	8,79	9,52	21,75	23,6	31,26	33,86
Mai	8,77	10,24	17,13	20,0	26,44	30,89
Jun	8,69	11,17	11,74	15,1	20,89	26,85
Jul	8,69	10,69	13,60	16,7	22,65	27,86
Ago	8,77	11,14	17,69	22,5	26,49	33,68
Set	9,16	10,52	21,33	24,5	30,72	35,29
Out	9,12	11,32	22,48	27,9	31,34	38,87
Nov	9,20	11,51	22,98	28,8	31,97	40,02
Dez	10,21	11,77	24,00	27,7	33,89	39,09
<b>Anual</b>	<b>111,56</b>	<b>10,69</b>	<b>252,53</b>	<b>24,2</b>	<b>365,82</b>	<b>35,07</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Na análise comparativa, o sistema com estrutura fixa e módulo monofacial, conforme ilustrado na Figura 45, revelou um ganho percentual anual de 10,69% em relação ao sistema de referência. Isso se traduz em um acréscimo de 111,56 kWh/kWp na produtividade anual. O desempenho mensal mostrou variações, sendo janeiro o melhor mês, com um ganho de 10,71%, e junho registrando o menor ganho, com 8,69%.

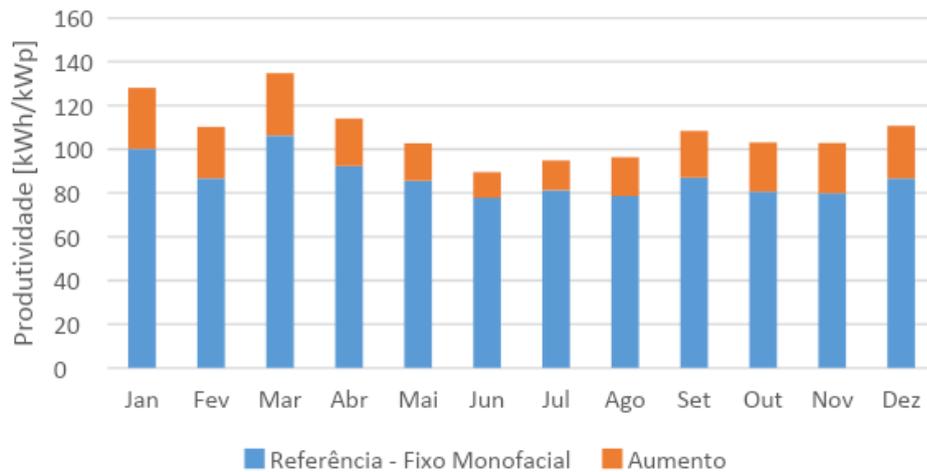
Figura 45 - Produtividade Sistema referência x Sistema com estrutura fixa com módulo bifacial, região Norte.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ao empregar o sistema com rastreador solar e módulo monofacial, observou-se, na Figura 46, um incremento mais substancial, totalizando 252,53 kWh/kWp anualmente, representando um ganho percentual de 24,2% em relação ao sistema de referência. Novembro foi o mês de destaque, registrando o maior ganho mensal de 28,8%, enquanto junho apresentou o menor ganho mensal, com 15,10%. Esses resultados indicam a efetividade dessa configuração específica na região norte.

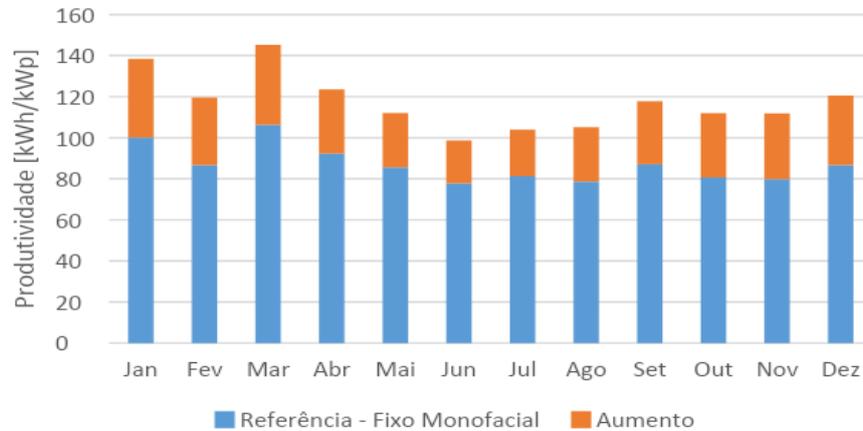
Figura 46 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo monofacial, região Norte.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

É importante observar que a Figura 47 destaca a comparação com o sistema mais eficiente, que utiliza rastreador solar 1 eixo e módulo bifacial. Como previsto, este sistema demonstrou ser superior aos demais, apresentando um ganho percentual anual na produtividade de 35,07%, resultando em um acréscimo de 365,82 kWh/kWp por ano. O mês de novembro se destacou como o melhor, com um ganho de 40,02%, enquanto junho registrou o menor ganho, atingindo 26,85%.

Figura 47 - Produtividade Sistema referência x Sistema com rastreador solar 1 eixo horizontal com módulo bifacial, região Norte.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A análise de diversos estudos sobre sistemas agrovoltáicos em diferentes regiões do mundo oferece perspectivas valiosas para a implementação dessas tecnologias no contexto agrícola brasileiro. O estudo conduzido por Amaducci, Yin e Colauzzi (2018) na Itália revelou que a redução da radiação solar sob o sistema agrovoltáico teve efeitos positivos no crescimento das plantas, resultando em maior rendimento de grãos de milho. Essa descoberta sugere que, no Brasil, onde as condições climáticas variam amplamente, os sistemas agrovoltáicos podem contribuir para aumentar a produtividade agrícola, proporcionando condições mais favoráveis para o cultivo.

O experimento realizado por Valle *et al.* (2017) em Montpellier, França, destacou o impacto positivo do rastreamento solar na produção elétrica e no crescimento das culturas. Essa abordagem pode ser relevante para o Brasil, especialmente em regiões com alta incidência solar, como o Nordeste, onde sistemas agrovoltáicos com rastreamento solar podem otimizar a geração de eletricidade e promover um ambiente propício ao crescimento das culturas.

No estudo de Dupraz, C. *et al.* (2011b), que investigou o efeito do sombreamento parcial dos módulos em sistemas agrovoltáicos, observou-se uma influência variável nas culturas de trigo. Essa informação é crucial ao considerar a diversidade agrícola do Brasil, permitindo adaptar os sistemas agrovoltáicos às necessidades específicas de diferentes culturas em diferentes regiões do país.

Ao correlacionar esses achados com o estudo realizado na Índia sobre sistemas agrovoltáicos em fazendas de uva (Prannay R. Malu, Utkarsh S. Sharma e

Joshua M. Pearce, 2017), podemos inferir que a implementação desses sistemas no cultivo de uvas no Brasil poderia resultar não apenas em geração significativa de eletricidade renovável, mas também em aumento na produção de uvas e eficiência no uso da água.

## 7 CONCLUSÃO

A análise abrangente das distintas regiões do Brasil, levando em consideração suas características climáticas e agrícolas, conjuntamente com os estudos sobre sistemas agrovoltáicos, proporciona conclusões de relevância significativa. No escopo dessa pesquisa, foram contempladas questões relacionadas ao fator de capacidade e da produtividade dos sistemas em avaliação.

O sistema agrovoltáico com rastreamento solar de um eixo horizontal e módulo fotovoltaico bifacial demonstrou o melhor desempenho, apresentando um aumento variando de 25,46% a 35,48% em todas as regiões do Brasil. Em seguida, o sistema com rastreamento solar de um eixo horizontal e módulo fotovoltaico monofacial variou de 16,70% a 24,20%, seguido pelo sistema com estrutura fixa e módulo fotovoltaico bifacial, que teve um aumento de 9,31% a 10,69% em relação ao sistema de referência com estrutura fixa e módulo fotovoltaico monofacial.

A região Nordeste sobressaiu-se em todos os sistemas examinados, destacando-se pela correlação entre sua irradiação solar significativa, localização geográfica e padrões sazonais distintos. O sistema que adotou o rastreamento solar e módulo fotovoltaico bifacial registrou o melhor desempenho, apresentando um aumento de produtividade de 35,07%. Isso resultou em uma produtividade anual de 1719,07 kWh/kWp.

Na região Centro-Oeste, observou-se uma variação de desempenho entre 10,33% e 31,15%, em comparação com o sistema de referência. Vale ressaltar que o sistema com estrutura fixa e módulo fotovoltaico bifacial apresentou a menor porcentagem de aumento, enquanto o sistema de rastreamento solar e módulo fotovoltaico bifacial registrou o desempenho mais destacado, atingindo uma produtividade anual de 1635,22 kWh/kWp.

A região Sudeste, a análise revelou uma variação de aumento de desempenho situada entre 9,91% e 31,13%, quando comparada ao sistema de referência. Destaca-se que o sistema com rastreamento solar e módulo fotovoltaico bifacial foi responsável pelo alcance da maior porcentagem de aumento, culminando em uma produtividade anual de 1536,66 kWh/kWp.

Na região Sul, as características específicas do local influenciaram diretamente no desempenho dos sistemas analisados. O sistema de estrutura fixa destacou-se pela eficácia notável nos meses de maio, junho e julho, otimizando a captação da irradiação solar durante o inverno. Contudo, ao considerar o desempenho anual, o sistema de rastreamento solar com módulo bifacial superou as expectativas, apresentando um aumento de 25,46% em relação ao sistema de referência. Isso resultou em uma produtividade anual aproximada de 1457,99 kWh/kWp.

A região Norte apresentou resultados desfavoráveis comparados com as demais regiões do Brasil, possivelmente às condições climáticas particulares e à proximidade geográfica com a linha do equador. A elevada incidência de chuvas na região pode ser correlacionada com a sua proximidade à Amazônia, evidenciando esse resultado. A produtividade anual na região Norte, considerando o sistema agrovoltáico com rastreamento solar e módulo fotovoltaico bifacial, foi registrada em 1408,98 kWh/kWp.

Dada a intrincada natureza do estudo, torna-se imperativo conduzir análises mais aprofundadas visando determinar as culturas mais apropriadas para cada região. Pesquisas internacionais sugerem que culturas como milho, alface, trigo e uva apresentam perspectivas promissoras para a integração em sistemas agrovoltáicos.

Em resumo, os estudos internacionais sobre sistemas agrovoltáicos proporcionam discernimentos aplicáveis ao contexto agrícola brasileiro, destacando o potencial dessas tecnologias para otimizar a eficiência agrícola, fomentar a geração de energia renovável e mitigar desafios regionais específicos no Brasil. Contudo, a implementação de sistemas agrovoltáicos demanda uma análise minuciosa das condições particulares de cada região, das características das culturas locais e das variações climáticas. É relevante salientar que este estudo se concentrou exclusivamente nas considerações agrícolas e de energia solar, sem abranger análises econômicas.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Panorama solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Infográfico. Vol 29. (2023). Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05 abr. 2023.
- AGRIVOLTAICS. Disponível em: <https://www.barrongafford.org/agrivoltaics.html>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- AL-AQTASH, N. *et al.* Design and Implementation of a Photovoltaic Solar Tracking System. **Energies**, 9(5), 360, 2016.
- ALVES, M. de O. L. **Energia solar**: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 76 p. TCC (Graduação) – Bacharel em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, João Molevade, MG, 2019. Disponível em: [https://200.239.128.125/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA\\_EnergiaSolarEs tudo.pdf](https://200.239.128.125/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEs tudo.pdf). Acesso em: 13 mai. 2023.
- AMADUCCI, S.; YIN, X.; COLAUZZI, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. **Applied Energy**, [s. l.], v. 220, p. 545–561, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304197>. Acesso em: 31 out. 2023.
- ANTONIO, S. A.; PEREIRA, H. A. Análise de um seguidor solar unidirecional em um dia parcialmente nublado. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**. 2014. Disponível em: <https://www.novoscursos.ufv.br/projetos/ufv/gesep/www/wp-content/uploads/49.pdf>. Acesso em: 15 maio 2023.
- APPLEYARD, D. **Solar Trackers**: Facing the Sun. Renewable Energy World. 2009. Disponível em: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/06/solar-trackers-facing-the->. Acesso em: 15 maio 2023.
- BARRON-GAFFORD, G. A. *et al.* Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 2, n. 9, p. 848–855, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0364-5>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. 2009. 110f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia.
- BHATTACHARYA, R.; MUKHOPADHYAY, A. Encapsulation Technologies for Photovoltaic Modules: A Review and Critical Comparison. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 155, 258-269, 2016.

BRASIL BRASILEIRO. **Nordeste**. Disponível em: <https://brasilbrasileiro1001.wordpress.com/nordeste/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CANAL SOLAR. **BYD lança no mercado nacional módulo bifacial de alta eficiência que alcança até 481 Wp**. 2019a. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/byd-mercado-nacional-modulo-bifacial-481wp/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CANAL SOLAR. **Diferença entre módulos bifaciais e monofaciais**. 2019b. Disponível em: [https://canalsolar.com.br/diferenca-entre-modulos-bifaciais-e-monofaciais/#:~:text=Existem%20dois%20tipos%20de%20m%C3%B3dulos,faces%20\(frontal%20e%20traseira\)/](https://canalsolar.com.br/diferenca-entre-modulos-bifaciais-e-monofaciais/#:~:text=Existem%20dois%20tipos%20de%20m%C3%B3dulos,faces%20(frontal%20e%20traseira)/). Acesso em: 20 nov. 2023.

COMPAROTTO, C. *et al.* Bifacial n-type solar modules: indoor and outdoor evaluation, In: **Proc. 29th EU PVSEC**, Amsterdam, The Netherlands, 2014.

DUPRAZ, C *et al.* **To mix or not to mix**: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems. 2011a.

DUPRAZ, C. *et al.* Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 36, n. 10, p. 2725–2732, 2011b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111001194>. Acesso em: 27 abr. 2023.

EMBRAPA. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>. Acesso em: 20 nov. 2023.

EMBRAPA. **Região Sul**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/contando-ciencia/regiao-sul>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FERNÁNDEZ, Eloi Fernández y (org.). **O sol vai voltar amanhã**: um espectro de análises sobre a energia fotovoltaica. Rio de Janeiro: Lexikon, 2020.

FRAUNHOFER. **Agrophotovoltaics Goes Global: from Chile to Vietnam**. 2019. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2018/agrophotovoltaik-goes-global-from-chile-to-vietnam.html>. Acesso em: 04 abr. 2023.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. **Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition**. [s.l.], 2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2023.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. 2013. Tese (Doutorado) - Curso

de Curso de Engenharia Industrial Elétrica/eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GASPARIN, F. P; KRENZINGER, A. DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM DEZ CIDADES BRASILEIRAS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DO PAINEL. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Porto Alegre, v, n. 8, p.10-17, jul. 2017. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/search/titles?searchPage=3>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GOETZBERGER, A.; ZASTROW, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. **International Journal of Solar Energy**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 55–69, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>. Acesso em: 5 abr. 2023.

GREEN, M. A *et al.* Solar Cell Efficiency Tables (Version 16). Progress in Photovoltaics: **Research and Applications**, vol. 8, p. 377-384, 2000.

GREEN, M. A.; EMERY, K.; KING, D. L., IGARI, S.; WARTA, W. Solar cell efficiency tables (version 54). Progress in Photovoltaics: **Research and Applications**, 27(1), 3-12, 2019.

GUERRERO-LEMUS, R. *et al.* Bifacial solarphotovoltaics - A technology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.60, p.1533-1549, 2016.

IBGE. **Censo Agro 2017**. Disponível em: [https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo\\_agro/resultadosagro/pdf/rs.pdf](https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/pdf/rs.pdf). Acesso em: 20 nov. 2023.

IBGE. Produção Agropecuária. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 05 abr. 2023.

LOPES, R. J., 2013. Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos. 111 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora, Lisboa

MALU, P. R.; SHARMA, U. S.; PEARCE, J. M. Agrivoltaic potential on grape farms in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 23, p. 104-110, 2017.

MARROU, H. *et al.* Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 44, p. 54–66, 2013. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01137075v2/document>. Acesso em: 05 abr. 2023.

MARROU, H.; DUFOUR, L.; WERY, J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 50, p. 38–51, 2013.

MARTINS, F. O. **Seguidor solar de dois eixos**. 62p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa,

2016. Disponível em: [https://run.unl.pt/bitstream/10362/27882/1/Martins\\_2016.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/27882/1/Martins_2016.pdf). Acesso em: 15 maio 2023.

MELLO, Arthur Durigon. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede a partir da determinação de índices de mérito**. 2016. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/164812/TCC%20%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2023.

NEOSOLAR. **COMO INSTALAR PLACA SOLAR FOTOVOLTAICA**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/como-instalar-placa-solar/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. DOI: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PEREIRA, N. X. Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada. 2019. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/181288/pereira\\_nx\\_me\\_soo.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/181288/pereira_nx_me_soo.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 27 abr. 2023.

PICARD, J. As muitas vantagens da célula N-Type. **Canal Solar**, 26 de nov. 2021, disponível em: <https://canalsolar.com.br/as-muitas-vantagens-da-celula-n-type/>. Acesso em: 25 jun. 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, Rio de Janeiro, 2014.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Pannel Solar**. 2023a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>. Acesso em: 20 nov. 2023.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo De Características Elétricas E Térmicas De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2010. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

REM TEC. **TECNOLOGIA AGROVOLTAICO®**. Disponível em: <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaco/>. 2017. Acesso em: 30 abr. 2023.

REVISTA POTÊNCIA. **Energia solar: sistemas on-grid e off-grid**. Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/eletricista-consciente/instalacao-fotovoltaica/energia-solar-sistemas-on-grid-e-off-grid/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SHAHZAD, Mohsin *et al.* Relation of environment sustainability to CSR and green innovation: A case of Pakistani manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119938, 2020.

SOLOMON, S. *et al.* Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 106, n. 6, p. 1704–1709, 2009. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0812721106>. Acesso em: 5 abr. 2023.

SONG, D. *et al.* Enhancing the Efficiency of Bifacial Dye-Sensitized Solar Cells through Optimizing the Porosity of TiO<sub>2</sub> Photoanodes. **Journal of Power Sources**, 2017.

SYNGENTA DIGITAL. **Regiões agrícolas do Brasil: descubra quais são as principais**. Disponível em: <https://blog.syngentadigital.ag/regioes-agricolas-brasil/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SYSTEM ADVISOR MODEL. **Preview of SAM's New Model for Bifacial PV Modules**. YouTube. 1h00m. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=ZaKj4W1tCLU&ab\\_channel=SystemAdvisorModel/](https://www.youtube.com/watch?v=ZaKj4W1tCLU&ab_channel=SystemAdvisorModel/). Acesso em: 20 nov. 2023.

VALLE, B. *et al.* Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. **Applied Energy**, [s. l.], v. 206, p. 1495–1507, 2017.

VIEIRA, R. G. **Análise do Desempenho Entre um Painel Solar Estático e com Rastreamento no Município de Mossoró-RN**. 85p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA, Mossoró, Rio Grande do Norte. 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/tede/519>. Acesso em: 15 maio 2023.

WENHAM, S. R. *et al.* **Applied Photovoltaics**. [s.l.]: Routledge, 2013.

YANAGI, Silvia de Nazaré Monteiro. **Albedo de uma floresta tropical amazônica: medições de campo, sensoriamento remoto, modelagem, e sua influência no clima regional**. 2006. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - Mg, 2006.

ZIMMER, Anderson. **Módulos fotovoltaicos: Fronteiras tecnológicas e um estudo comparativo**. 2022. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022.