

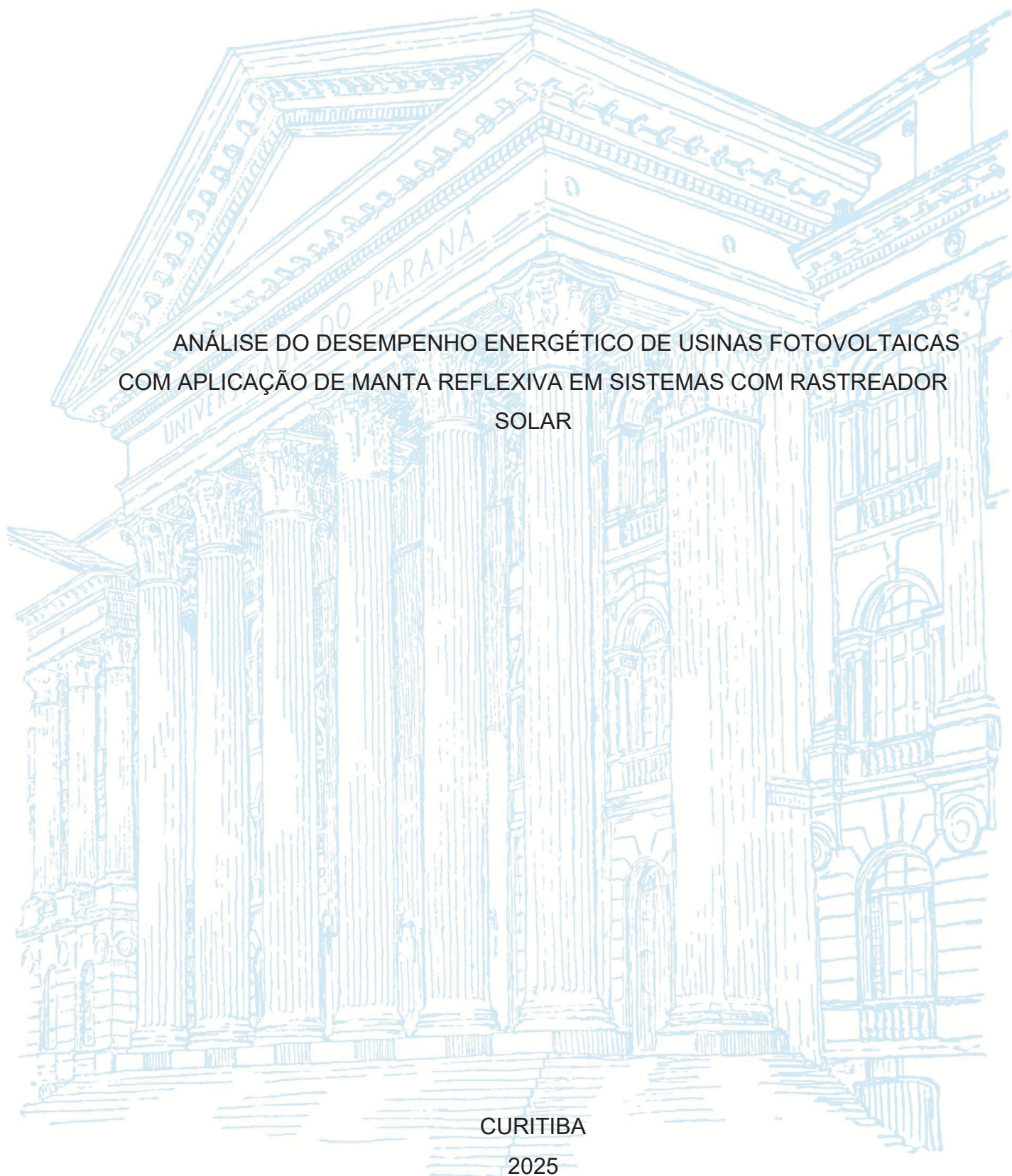
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLÁVIO HENRIQUE ALBUQUERQUE PEREIRA DE JESUS

ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE USINAS FOTOVOLTAICAS
COM APLICAÇÃO DE MANTA REFLEXIVA EM SISTEMAS COM RASTREADOR
SOLAR

CURITIBA

2025



FLÁVIO HENRIQUE ALBUQUERQUE PEREIRA DE JESUS

ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE USINAS FOTOVOLTAICAS
COM APLICAÇÃO DE MANTA REFLEXIVA EM SISTEMAS COM RASTREADOR
SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Juliana Almansa Malagoli

CURITIBA

2025

RESUMO

Os sistemas de energia renovável estão na vanguarda do setor energético, impulsionados pela necessidade mundial de diversificação da matriz elétrica e pela busca por tipos de geração de energia alternativas com baixa emissão de carbono. Dentre essas fontes de energia renovável, a energia solar fotovoltaica está sendo amplamente utilizada em razão da redução nos custos envolvidos para sua instalação, operação e manutenção. Com a crescente demanda por geração de energia limpa, os sistemas fotovoltaicos estão continuamente ofertando ao mercado soluções tecnológicas que visam a maximização da geração de energia, inicialmente predominavam os módulos monofaciais. Atualmente, os módulos bifaciais vêm sendo amplamente utilizados, proporcionando ganhos energéticos adicionais nos sistemas fotovoltaicos. A instalação dos sistemas fotovoltaicos pode ser realizada em diferentes tipos de estruturas: fixas sobre o solo, sobre coberturas ou em plataformas flutuantes, cada qual com características específicas e aplicações distintas. O foco deste trabalho é realizar a análise de usinas compostas por estruturas *tracker*, que funcionam como rastreadores solares que resultam em ganho energético em relação as estruturas fixas comumente utilizadas em instalações de solo. O próprio rastreador solar gera um ganho energético em relação a estrutura fixa e em conjunto com os rastreadores, podem ser aplicados elementos que maximizem ainda mais a geração de energia dos módulos fotovoltaicos, um desses elementos são as mantas reflexivas, que fornecem um aumento no albedo e em conjunto com os módulos bifaciais irão contribuir com o incremento na geração de energia. Portanto, o trabalho apresenta a análise de desempenho de usinas fotovoltaicas equipadas com mantas reflexivas em dois formatos de instalação distintos, instaladas no estado de Pernambuco, com o fornecimento de dados que podem quantificar o incremento energético dessa solução.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Rastreador Solar, Manta reflexiva, Geração de energia elétrica.

ABSTRACT

Renewable energy systems are at the forefront of the energy sector, driven by the global need to diversify the electricity matrix and to promote low-carbon energy Generation alternatives. Among the various renewable sources, photovoltaic solar energy has been widely adopted due to the significant reduction in installation, operation, and maintenance costs. With the growing demand for clean energy generation, photovoltaic systems have continuously introduced technological solutions aimed at maximizing energy production. While monofacial modules were initially predominant, bifacial modules are now widely used, offering additional energy gains in photovoltaic systems. Photovoltaic systems can be installed on a variety of structural types, such as fixed-ground mounts, rooftop systems, and floating structures, each with its own characteristics and applications. This study focuses on the performance analysis of power plants using solar tracking structures (*trackers*), which provide higher energy yields compared to traditional fixed-ground installations. In addition to the inherent energy gains from solar tracking, complementary elements can be implemented to further enhance photovoltaic generation. One of these elements is the reflective mat, which increases the albedo of the surface beneath the modules. When used in conjunction with bifacial modules, this feature can lead to significant gains in energy output. This work aims to present the performance analysis of photovoltaic power plants equipped with reflective mats in two different installations configurations, located in the state of Pernambuco, Brazil. The study provides quantitative data on energy gains associated with this solution.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy; Solar Tracker; Reflective Mat; Electric Energy Generation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURA DE FIXAÇÃO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	13
FIGURA 2 – RASTREADOR SOLAR <i>STI NORLAND</i>	14
FIGURA 3 - NCU (UNIADADE DE CONTROLE DO <i>TRACKER</i>).....	14
FIGURA 4 - RSU (UNIDADE DE SENSOR REMOTO).....	15
FIGURA 5 - TCU (UNDADE DE CONTROLE DO <i>TRACKER</i>).....	15
FIGURA 6 - MÓDULO FOTOVOLTAICO MONOFACIAL	16
FIGURA 7 - MÓDULO FOTOVOLTAICO BIFACIAL	16
FIGURA 8 - CURVA $I \times V$ DO MÓDULO BIFACIAL	17
FIGURA 9 - DADOS ELÉTRICOS DO MÓDULO BIFACIAL.....	17
FIGURA 10 - APLICAÇÃO DE MANTAS REFLEXIVAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	20
FIGURA 11 - MANTA REFLEXIVA APLICADA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	20
FIGURA 12 - APLICAÇÃO DAS MANTAS NO CENÁRIO 1	21
FIGURA 13 - APLICAÇÃO DAS MANTAS NO CENÁRIO 2	22
FIGURA 14 - TERRENO SEM MANTA REFLEXIVA (CENÁRIO 3).....	22
FIGURA 15 - TERRENO COM MANTA REFLEXIVA EM TODA EXTENSÃO (CENÁRIO 2)	23
FIGURA 16 - TERRENO COM MANTA REFLEXIVA PARCIAL (CENÁRIO 1).....	23
FIGURA 17 - PONTOS DE SUJIDADE NAS MANTAS REFLEXIVAS.....	26

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA 2023	9
TABELA 2 – CARACTERÍSTICA DE TEMPERATURA DO MÓDULO BiHiKu7 CANADIAN SOLAR	18
TABELA 3 – VALORES DE REFERÊNCIA DO SOFTWARE <i>PV_{syst}</i> PARA ALBEDO	19
TABELA 4 – ALARMES QUE IMPEDIRAM A GERAÇÃO DE ENERGIA	24
TABELA 5 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 1.....	25
TABELA 6 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 2.....	25
TABELA 7 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 3.....	25
TABELA 8 – COMPARAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE CONSOLIDADO...	26

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABGE	- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	- Balanço Energético Nacional
CIGS	- Cobre Índio Gálio Selênio
CIS	- Cobre Índio Selênio
EDP	- Energias de Portugal (empresa)
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GW	- Gigawatt
HRS	- Helios Reflect System (Sistema de Reflexão Helios – Thrace Group)
IxV	- Curva Corrente (I) versus Tensão (V)
kWac	- Quilowatt em corrente alternada
kWp	- Quilowatt-pico
MMGD	- Micro e Minigeração Distribuída
MW	- Megawatt
NCU	- Network Control Unit (Unidade de Controle de Rede)
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	- Organização das Nações Unidas
PERC	- Passivated Emitter and Rear Cell (Emissor Passivado e Célula Traseira)
PV	- Photovoltaic (Fotovoltaico)
PVsys	- Photovoltaic System Simulation Software (Software de Simulação de Sistemas Fotovoltaicos)
RSU	- Remote Sensor Unit (Unidade de Sensor Remoto)
STI	- STI Norland (Fabricante de estruturas trackers fotovoltaicas)
TCU	- Tracker Control Unit (Unidade de Controle do Rastreador)
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
Wp	- Watt-pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA	10
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.2 Objetivos específicos.....	10
1.3 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL.....	12
2.2 SISTEMAS DE FIXAÇÃO COM RASTREADOR - <i>TRACKER</i>	13
2.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS.....	15
2.4 REFLEXÃO NO SOLO	18
2.5 MANTAS REFLEXIVAS E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	28
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energias renováveis está alinhada com os princípios da transição energética que estamos presenciando, esse cenário resulta na aplicação de diversas fontes de energia com baixa pegada de carbono. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a transição energética exige a transformação da matriz elétrica, com a redução da participação de combustíveis fósseis e o estímulo a medidas de eficiência energética. Segundo a Petrobras (2024), uma transição energética eficiente deve ser conduzida de forma gradual e integrada, contemplando a descarbonização e eletrificação progressivas, o desenvolvimento de novos produtos de baixo carbono e o uso de diferentes fontes de energia.

Fontes de energia renovável são consideradas inesgotáveis por se renovarem constantemente, e incluem modalidades como hídrica, solar, eólica, biomassa, geotérmica e oceânica, conforme apontado pela Empresa de Pesquisa Energética. Ainda segundo a EPE (2025), a matriz elétrica brasileira é composta majoritariamente por fontes hidrelétricas, seguidas pela solar e eólica, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA 2023

Fonte de energia	Participação na matriz
Hidráulica	58,9%
Eólica	13,2%
Solar	7,0%
Gás natural	5,3%
Bagaço de cana	5,1%
Outras fontes	10,4%

FONTE: Próprio Autor (2025). Adaptado de: BEN (2024)

Levando em consideração a energia solar fotovoltaica, tem-se um crescimento considerável na utilização dessa fonte tanto no Brasil quanto no mundo, esse cenário se concretiza, principalmente pela democratização ao uso da tecnologia. Independentemente de onde o agente esteja posicionado, a ideia central das fontes renováveis é ter a maior geração disponível e alguns pilares norteiam a premissa de maximização dessa geração, podemos citar dois itens importantes, que é a eficiência dos equipamentos de conversão e geração, e redução de espaço de implantação dos geradores, esses aspectos técnicos e físicos estão diretamente conectados com a solar fotovoltaica.

1.1 PROBLEMA

A necessidade pela maximização da geração de energia exige dos pesquisadores, fabricantes e demais agentes a busca por alternativas que possam ser aplicadas nos sistemas fotovoltaicos. Uma abordagem atualizada é a aplicação de mantas reflexivas, que contribuem com o aumento de albedo para os módulos bifaciais e por consequência têm-se um ganho de geração de energia. De acordo com Neris (2025), a utilização de mantas reflexivas — ou membranas — pode elevar a eficiência energética em usinas fotovoltaicas, gerando ganhos de até 15 % em sistemas com rastreadores solares, embora a literatura científica ainda seja escassa nessa área.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral deste trabalho, a investigação sobre o ganho energético a partir da utilização de mantas reflexivas se torna um ponto importante para aplicação em larga escala em usinas fotovoltaicas, por motivos diversos, que serão abordados no decorrer do trabalho.

1.2.2 Objetivos específicos

- Especificar conceitos básicos dos sistemas fotovoltaicos;
- Abordar sobre a importância dos sistemas fotovoltaicos na transição energética;
- Analisar tendências de incremento na geração de energia solar fotovoltaica;
- Estruturar a aplicação de mantas reflexivas para aumento da geração de energia;
- Realizar a análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com a aplicação das mantas reflexivas;
- Fazer o comparativo entre sistemas fotovoltaicos que utilizam as mantas reflexivas e sistemas sem aplicação das mantas reflexivas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Alguns elementos surgem como componentes para o aumento da geração de energia, seja a evolução tecnológica ou a atuação de dispositivos que aumentem a perspectiva de geração. Os módulos fotovoltaicos inicialmente eram monofaciais, com geração a partir da chegada do fóton de energia apenas na sua área frontal. Atualmente, encontram-se módulos bifaciais, com possibilidade de geração a partir da área frontal e traseira, gerando um ganho percentual na geração de energia. Esse cenário também tem contribuição das estruturas de fixação, que iniciaram com estruturas fixas e que posteriormente evoluíram para os rastreadores solares.

De acordo com o portal Energês (2025), os módulos bifaciais podem gerar até 15% a mais de energia em relação aos monofaciais, em função do aproveitamento da irradiância no ambiente. Segundo Mozetic et al. (2024), testes realizados indicaram ganhos de até 6% em comparação com módulos monofaciais.. Segundo Coelho et al. ([s.d.]), em um estudo de seis meses foi identificado ganho de 2% a 3% na geração de energia em sistemas com rastreadores solares, em comparação a estruturas fixas, sendo os valores dependentes das condições climáticas, do albedo e da localização. De acordo com a Amara Zero (2022), em um estudo comparativo entre diferentes estruturas de fixação, observou-se que uma configuração fixa com inclinação de 15° para o norte apresentou desempenho inferior ao *tracker* com ângulo de rotação de 45° leste-oeste, sendo verificado um ganho de 26,34% em favor do rastreador solar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

As fontes renováveis são de extrema importância no mundo em que estamos vivendo, a mudança de pensamentos da sociedade que se voltam para o desenvolvimento sustentável está em evidência. A Organização das Nações Unidas (ONU, [s.d.]) ressalta a relevância do acesso à energia limpa e sustentável, destacando-a no ODS nº 7, que integra a Agenda 2030.

A aplicação dos sistemas fotovoltaicos encara uma democratização na sua utilização, isso é comprovado pelo sucesso, da Micro e Minigeração distribuída (MMGD De acordo com a ANEEL (2025), a potência instalada em micro e minigeração distribuída no Brasil cresceu aproximadamente 8,85 GW em 2024, beneficiando mais de um milhão de unidades consumidoras..

A EDP destaca que os sistemas fotovoltaicos promovem diversos impactos sociais positivos, tais como a criação de postos de trabalho, a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o fomento ao desenvolvimento regional, o incremento da segurança energética e o avanço de novas tecnologias (EDP, [s.d.]).

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

As energias naturais renováveis estão presentes na matriz elétrica brasileira a um tempo considerável, De acordo com a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 2015), a primeira usina hidrelétrica do Brasil entrou em operação em 1883, na cidade de Diamantina, em Minas Gerais. A partir desse marco histórico, considerando as condições geográficas do território nacional, a matriz elétrica brasileira consolidou-se com predominância das usinas hidrelétricas. Em 1997, foi instalado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) o primeiro sistema fotovoltaico em operação no Brasil. Conforme registrado pela revista *PV Magazine Brasil* (2023), esse sistema era composto por um inversor de 2 kW e 78 módulos fotovoltaicos de 32 Wp cada..

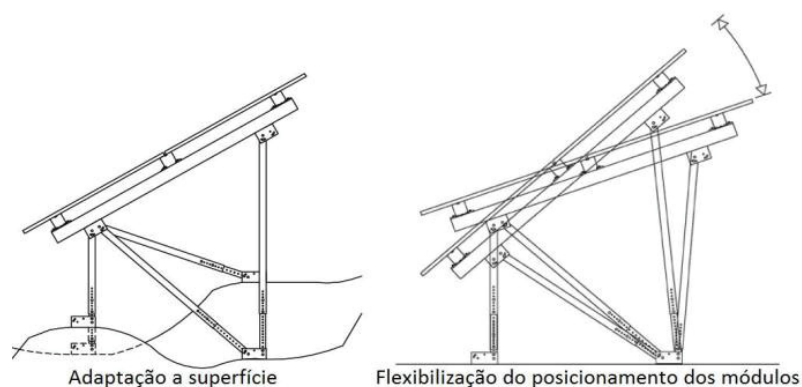
Nas regras atuais, tem-se instalações de sistemas fotovoltaicos *off-grid*, que é aquele que não está conectado à rede e sistemas *on-grid*, que estão conectados à rede, dentro das opções desses sistemas, podem ter usinas para o mercado livre de energia, como exemplo, o autoprodutor, em complemento existem usinas que se configuram como geração centralizada, já a geração distribuída, pelas regras da ANEEL indicadas pela Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 são configuradas como

as centrais geradoras de energia elétrica renovável não despacháveis, incluindo as usinas fotovoltaicas estão limitadas atualmente a 3 MW de potência.

2.2 SISTEMAS DE FIXAÇÃO COM RASTREADOR - *TRACKER*

Segundo Galdino (2024), as estruturas de fixação de sistemas fotovoltaicos são as estruturas nas quais os módulos fotovoltaicos encontram-se fixos, bem como serve para possibilitar a ventilação necessária para resfriamento dos módulos. A importância das estruturas de fixação é necessária devido a influência que esse componente assume em relação aos módulos, promovendo a segurança energética e mecânica, conforme solicitações do fabricantes. Ao instalar uma estrutura de fixação é necessário que esse componente possa se adaptar ao terreno, ou qualquer superfície, no qual ele será instalado visando o posicionamento adequado dos módulos em termos de orientação e angulação, a Figura 1 apresenta um exemplo de estrutura de fixação para usinas em solo.

FIGURA 1 – ESTRUTURA DE FIXAÇÃO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



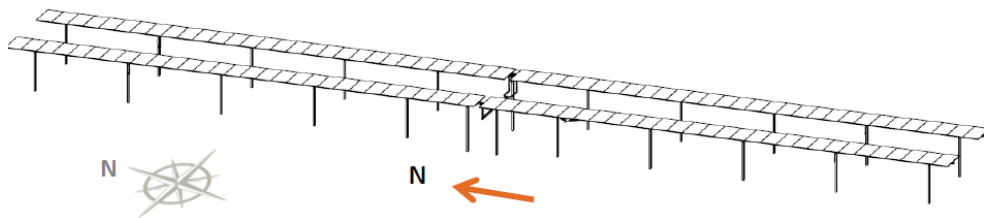
FONTE - Pinho e Galdino (2024)

O autor Trevelin (2014) indica que um sistema de rastreamento solar é aquele que permite a um sistema de painéis solares acompanhar o movimento do sol, aumentando assim a incidência solar captada. Esse cenário de maximização de energia por conta do rastreador é acompanhado de algumas contrapartidas, como por exemplo o aumento do *CAPEX*, maior espaço para sua instalação e maiores cuidados com os terrenos.

De acordo com XIAO (2023), existem dois tipos de rastreadores solares, sendo o passivo e ativo, onde as estruturas passivas não necessitam de fonte de

alimentação externa para sua atuação, possuindo um foco na tecnologia dos materiais, como por exemplo a expansão e contração térmicas, já os rastreadores ativos, utilizam controladores, sensores e atuadores para que possam realizar o rastreamento solar. Além disso, usou-se os rastreadores do tipo ativos, do fabricante *STI Norland*, do modelo STI-H250, com fileiras duplas, conforme indicado na Figura 2.

FIGURA 2 – RASTREADOR SOLAR *STI NORLAND*



FONTE - Manual de manutenção STI Norland

O rastreador é composto por toda parte mecânica de sustentação dos módulos fotovoltaicos, além dos componentes que fazem a estrutura se tornar móvel. Como característica do modelo, os módulos são orientados em norte-sul e seu sentido de giro é o leste-oeste, com faixa de giro entre $+55^\circ$ e -55° .

Os principais componentes do rastreador que promovem o giro da estrutura são *NCU (Network Control Unit)*, *RSU (Remote Sensor Unit)* e *TCU (Tracker Control Unit)*. A *NCU* é o componente que recebe informações da unidade de sensor remoto (*RSU*) e avalia as condições climáticas e de posição do *tracker*, com as informações detectadas, a *NCU* envia os dados para que as *TCU's* possam girar o *tracker* para a posição desejada. Os componentes estão identificados nas Figuras 3,4 e 5.

FIGURA 3 - NCU (UNIADADE DE CONTROLE DO TRACKER)



FONTE - Manual da NCU Procedimento de montagem

FIGURA 4 - RSU (UNIDADE DE SENSOR REMOTO)



FONTE - Manual de instalação da RSU

FIGURA 5 - TCU (UNDADE DE CONTROLE DO TRACKER)



FONTE - Manual de manutenção STI Norland

2.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS

De acordo com a NBR 16690 (ABNT, 2019), “módulo fotovoltaico é uma unidade formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica”. O módulo fotovoltaico é um dos principais elementos dentro de um sistema fotovoltaico, sendo o dispositivo que capta a fonte primária de energia proveniente do sol.

A tecnologia dos módulos fotovoltaicos evoluiu de forma significativa ao longo dos anos, com o incremento de eficiência e de potências fornecidas por cada módulo. Segundo Villalba (2012), os módulos foram divididos inicialmente como os silício monocristalino e policristalino, filme fino, amorfo, microamorfo, célula híbrida, CIS e CIGS e telureto de cádmio, massivamente tinha-se a utilização dos módulos com células de silício mono e policristalinas, bem como módulos compostos por células com utilização monofacial.

Segundo Braga et. Al. (2024), a primeira célula solar bifacial de silício prática e alta eficiência foi demonstrada por Mohlecke, Zanesco e Luque em 1994. No entanto, a tecnologia bifacial só alcançou grandes patamares com a popularização com a produção dos módulos tipo PERC (Emissor Passivado e Célula Traseira).

De acordo com o Canal Solar (2019), os módulos fotovoltaicos bifaciais podem apresentar um acréscimo de geração em torno de 30% em relação aos módulos monofaciais, mas para atingir essa porcentagem é necessário que uma série de fatores possam auxiliar no recebimento da energia do sol pela célula fotovoltaica, principalmente o modo e local de instalação. O modo de instalação terá impacto em termos da altura no qual os módulos estarão instalados e o seu ângulo de inclinação, como comparativo, um módulo bifacial em telhado terá um incremento de geração menor do que um módulo monofacial, já em estruturas de solo, esse incremento tende a aumentar em termos percentuais. Outro fator de impacto é o local de instalação, De acordo com Villalva (2019), “um solo pouco reflexivo vai proporcionar pouco rendimento adicional. Um solo que reflete muita luz poderá oferecer um aumento expressivo na geração de usinas solares com módulos bifaciais”. As Figuras 6 e 7 apresentam os módulos monofaciais e bifaciais, respectivamente.

FIGURA 6 - MÓDULO FOTOVOLTAICO MONOFACIAL



FONTE - Renesola (2025)

FIGURA 7 - MÓDULO FOTOVOLTAICO BIFACIAL

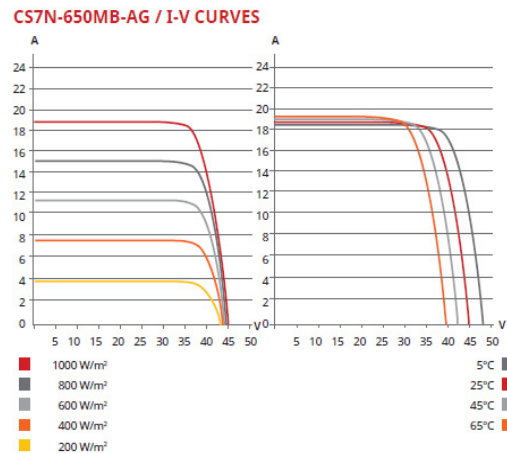


FONTE - Intelbras (2025)

Todos os módulos fotovoltaicos possuem uma curva $I \times V$ característica, essa curva apresenta a real situação tanto do módulo fotovoltaico quanto do sistema

composto por vários módulos em relação a sua construção, apresentando os dados elétricos pertinentes ao objeto a ser medido. Esse dado tão relevante não mostra alterações na comparação entre módulos bifaciais e monofaciais, cada um segue com os seus dados específicos sem alteração nas propriedades das suas curvas. A diferença nos dados obtidos entre os módulos bifaciais e monofaciais são encontrados na própria folha de dados do componente, onde os fabricantes indicam o ganho de bifacialidade para condições específicas de reflexão no solo, as Figuras 8 e 9 apresenta a curva IxV do módulo fotovoltaico da Canadian Solar e a folha de dados de um módulo bifacial do mesmo fabricante, respectivamente.

FIGURA 8 - CURVA IxV DO MÓDULO BIFACIAL



FONTE - Datasheet Canadian Solar família BiHiKu7

FIGURA 9 - DADOS ELÉTRICOS DO MÓDULO BIFACIAL

ELECTRICAL DATA STC*							
		Nominal Max. Power (P _{max})	Opt. Operating Voltage (V _{mp})	Opt. Operating Current (I _{mp})	Open Circuit Voltage (V _{oc})	Short Circuit Current (I _{sc})	Module Efficiency
CS7N-635MB-AG		635 W	37.3 V	17.03 A	44.4 V	18.27 A	20.4%
	Bifacial Gain**						
	5%	667 W	37.3 V	17.89 A	44.4 V	19.18 A	21.5%
	10%	699 W	37.3 V	18.74 A	44.4 V	20.10 A	22.5%
CS7N-640MB-AG		640 W	37.5 V	17.07 A	44.6 V	18.31 A	20.6%
	Bifacial Gain**						
	5%	672 W	37.5 V	17.92 A	44.6 V	19.23 A	21.6%
	10%	704 W	37.5 V	18.78 A	44.6 V	20.14 A	22.7%
CS7N-645MB-AG		645 W	37.7 V	17.11 A	44.8 V	18.35 A	20.8%
	Bifacial Gain**						
	5%	677 W	37.7 V	17.97 A	44.8 V	19.27 A	21.8%
	10%	710 W	37.7 V	18.84 A	44.8 V	20.19 A	22.9%
CS7N-650MB-AG		650 W	37.9 V	17.16 A	45.0 V	18.39 A	20.9%
	Bifacial Gain**						
	5%	683 W	37.9 V	18.03 A	45.0 V	19.31 A	22.0%
	10%	715 W	37.9 V	18.88 A	45.0 V	20.23 A	23.0%
CS7N-655MB-AG		655 W	38.1 V	17.20 A	45.2 V	18.43 A	21.1%
	Bifacial Gain**						
	5%	688 W	38.1 V	18.06 A	45.2 V	19.35 A	22.1%
	10%	721 W	38.1 V	18.93 A	45.2 V	20.27 A	23.2%
	20%	786 W	38.1 V	20.64 A	45.2 V	22.12 A	25.3%

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

** Bifacial Gain: The additional gain from the back side compared to the power of the front side at the standard test condition. It depends on mounting (structure, height, tilt angle etc.) and albedo of the ground.

FONTE - Datasheet Canadian Solar família BiHiKu7

2.4 REFLEXÃO NO SOLO

Em sua definição, o albedo é a razão entre os fluxos de radiação solar refletido e incidente, e constitui um parâmetro importante no estudo de mudanças climáticas, desertificação, queimadas e impactos ambientais (Silva et al. apud Américo, 2015).

Apesar da abrangência da definição de Albedo, a utilização dessa área de estudos está diretamente ligada aos sistemas fotovoltaicos, onde a reflexão do solo pode ser um aliado no incremento de geração ou um vilão pelo aumento de temperatura, para entender os dois cenários é necessário levar em consideração principalmente o tipo de módulo utilizado.

Os módulos fotovoltaicos possuem variação no desempenho a partir da variação de temperatura, a afirmação de que um módulo é de determinada potência é realizada a partir de testes em condições padrões de fábrica. Como exemplo, para afirmarmos que um módulo possui uma potência de 650 Wp, ele foi testado em uma condição de temperatura na célula de 25°C, nas aplicações reais, essa temperatura tende a se elevar consideravelmente, de acordo com a ABNT NBR 16690 (2020) “Em condições normais de operação, a temperatura das células fotovoltaicas aumenta significativamente acima da temperatura ambiente. Por exemplo, um aumento típico de temperatura de 35 °C é comum em relação à temperatura ambiente em módulos fotovoltaicos de silício cristalino operando no ponto de máxima potência, mesmo com menos de 1000 W/m² de irradiância e com ventilação adequada.” Com a influência da temperatura na célula fotovoltaica, o módulo fotovoltaico não está mais sob condição de teste, na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de temperatura do módulo fotovoltaico do fabricante Canadian Solar.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICA DE TEMPERATURA DO MÓDULO BiHiKu7 CANADIAN SOLAR

Especificação	Dado
Coeficiente de temperatura (P _{máx})	-0,4 % / °C
Coeficiente de temperatura (V _{oc})	-0,26 % / °C
Coeficiente de temperatura (I _{sc})	0,05 % / °C
Temperatura de operação nominal	41 +- 3 °C

FONTE: Próprio Autor (2025). Adaptado de: *Datasheet* Canadian Solar

A potência do módulo tende a ser reduzida a cada incremento de temperatura em relação a condição padrão de teste, se levarmos em consideração a

aplicação de um módulo fotovoltaico monofacial, quanto maior for o albedo da instalação, maior será a incidência de raios solares serão refletidos no módulo, e por consequência a temperatura na célula irá aumentar, reduzindo a potência do módulo fotovoltaico.

Nas aplicações com sistemas fotovoltaicos, a Tabela 3 apresenta valores para ganhos de bifacialidade e coloca como condição que esses valores dependem de alguns fatores e menciona especificamente o albedo. Segundo Dias (2023), a partir de um estudo prático, foram encontrados ganhos de bifacialidade de 10,72 % para brita branca, 9,60 % para areia clara e 2,79 % para brita preta. O autor Villalba (2019) utilizou valores padronizados de albedo, tomando como referência o *software* de simulação *PVsyst*, esses valores são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – VALORES DE REFERÊNCIA DO SOFTWARE *PVsyst* PARA ALBEDO

Superfície	Albedo (%)
Ambiente urbano	14 – 22
Grama	15 – 25
Neve fresca	82
Neve molhada	55 – 75
Asfalto seco	9 – 15
Asfalto úmido	18
Concreto	25 – 35
Telhas vermelhas	33
Alumínio	85
Cobre	74
Aço galvanizado novo	35
Aço galvanizado sujo	8

FONTE: Próprio Autor (2025). Adaptado de: Canal Solar (2022)

2.5 MANTAS REFLEXIVAS E SUAS APLICAÇÕES EM SISTEMAS

FOTOVOLTAICOS

A utilização de mantas reflexivas em usinas fotovoltaicas vem apresentando bons resultados em termos da sua finalidade, algumas empresas no exterior e no próprio Brasil estão ofertando esses produtos para as usinas. A empresa Thrace Group apresenta o material HRS (*Helios Reflect System*), que segundo a empresa, é um material inovador de tecido permeável e reciclável com o objetivo de melhorar o desempenho de usinas fotovoltaicas, na Figura 10 temos um exemplo de aplicação das mantas.

FIGURA 10 - APLICAÇÃO DE MANTAS REFLEXIVAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



FONTE - THRACE GROUP (2025)

No Brasil, também temos empresas que fornecem soluções para o mercado, como por exemplo a SolarPex do grupo Rafitec, que propõe a utilização de um tecido de polipropileno altamente refletivo, conforme mostrado na Figura 11.

É ponto comum aquele em que os fabricantes retratam os benefícios da manta reflexiva, trazendo ganhos não apenas no incremento energético, como também no controle de vegetação e na erosão dos terrenos, que também são itens críticos na operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos em usinas de solo.

FIGURA 11 - MANTA REFLEXIVA APLICADA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



FONTE - RAFITEC (2025)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

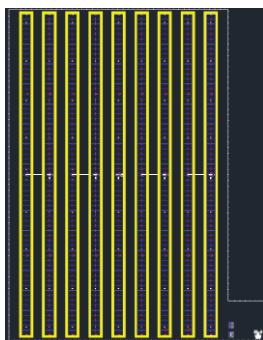
O estudo foi baseado a partir da análise da diferença de geração de energia elétrica após instalação de mantas reflexivas nas usinas fotovoltaicas, em formatos distintos para análise comparativa.

Os sistemas fotovoltaicos que serão analisados possuem mesma configuração e são instalados na região nordeste, no estado de Pernambuco . Cada usina é composta por 576 módulos fotovoltaicos do fabricante Risen Energy modelo RSM144-6-410BMDG, totalizando uma potência pico de 236,16 kWp, conectados a dois inversores do fabricante Sungrow Power, modelo SG110CX, totalizando uma potência nominal de 220 kWac, na estrutura de fixação, foi utilizado o tracker da STI Norland, modelo H-250, as três usinas são enquadradas em minigeração distribuída de fonte solar fotovoltaica e não possuem carga associada a essa usina, ou seja, as instalações serão apenas de geração de energia, sem consumo considerável.

A fonte dos dados de geração foi diretamente do portal de monitoramento dos inversores, através da versão Web do *IsolarCloud* e em casos de divergência ou falta de dados, realizaram-se a coleta diretamente no equipamento, evitando divergências por fluxo de dados no sistema de monitoramento. Para análise comparativa do melhor formato de instalação das mantas, foi realizado um estudo com três formatos de instalação distintos.

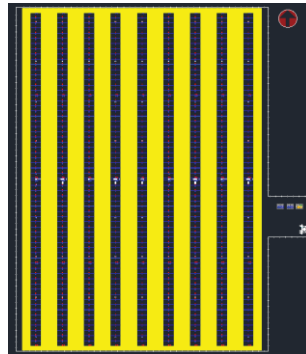
- Cenário 1: Usina com mantas de 3 metros de largura, cobrindo a área embaixo dos módulos excedendo em cerca de 48 cm nas laterais dos módulos, conforme Figura 12;
- Cenário 2: Usina com mantas de 5 metros de largura, cobrindo todo o terreno pertencente aos módulos fotovoltaicos, conforme Figura 13;
- Cenário 3: Usina sem aplicação da manta

FIGURA 12 - APLICAÇÃO DAS MANTAS NO CENÁRIO 1



FONTE - PRÓPRIO AUTOR (2025)

FIGURA 13 - APLICAÇÃO DAS MANTAS NO CENÁRIO 2



FONTE – Próprio Autor (2025)

Para aplicação das mantas, foi necessário realizar o tratamento do terreno através do controle de vegetação para uniformidade da fixação das mantas, também foram utilizados grampos metálicos com 15 cm de altura e 7 cm de largura que deveriam ser cravados no terreno. Para aplicação do cenário 1 foram estimados 2520 grampos, já para o cenário 2, foram estimados 2574 grampos. Após instalação das mantas, foi realizada a limpeza geral no material para retirada de sujeira por conta da movimentação dos colaboradores participantes da atividade. As Figuras 14 a 16 apresentam o terreno com a aplicação das mantas.

FIGURA 14 - TERRENO SEM MANTA REFLEXIVA (CENÁRIO 3)



FONTE - Próprio Autor (2025)

FIGURA 15 - TERRENO COM MANTA REFLEXIVA EM TODA EXTENSÃO (CENÁRIO 2)



FONTE – Próprio Autor (2025)

FIGURA 16 - TERRENO COM MANTA REFLEXIVA PARCIAL (CENÁRIO 1)



FONTE – Próprio Autor (2025)

A análise dos dados foi realizada entre os meses de abril a julho de 2024, fazendo a análise direta da geração de energia em cada uma das usinas geradoras, para o aumento da assertividade dos dados foi verificado o histórico de falhas dos inversores de cada usina, conforme Tabela 4.

TABELA 4 – ALARMES QUE IMPEDIRAM A GERAÇÃO DE ENERGIA

Usina	Falha	Início	Fim
Cenário 1	Baixa Resistência de isolamento	23/06/2024 – 15:13	23/06/2024 – 15:23
Cenário 1	Queda de rede	18/07/2024 – 15:13	18/07/2024 – 15:14
Cenário 1	Queda de rede	21/07/2024 – 13:13	21/07/2024 – 13:17
Cenário 2	Queda de rede	04/04/2024 – 17:22	04/04/2024 – 17:47
Cenário 2	Queda de rede	17/04/2024 – 07:18	17/04/2024 – 07:52
Cenário 2	Queda de rede	25/05/2024 – 12:58	25/05/2024 – 14:05
Cenário 2	Queda de rede	21/07/2024 – 13:13	21/07/2024 – 13:17
Cenário 3	Queda de rede	17/04/2024 – 07:18	17/04/2024 – 07:52
Cenário 3	Queda de rede	25/05/2024 – 12:58	25/05/2024 – 14:05

FONTE: Próprio Autor (2025). Adaptado de: Canal Solar (2022)

Foram desconsiderados da contagem, as falhas com baixa duração ou aquelas que não impediram a injeção de potência na usina, como por exemplo o ajuste de TCU's para alteração da posição do *tracker* facilitando as intervenções da equipe de campo, **foi realizada a desconsideração das mudanças climáticas não previstas**, como tempo nublado, considerando-se que todas as usinas estão submetidas ao mesmo clima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados foram coletados no monitoramento dos inversores e coletas manuais diretamente dos equipamentos, as Tabelas 5 a 7 apresentam os dados de geração nos meses de abril a agosto de cada cenário proposto.

TABELA 5 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 1

Mês	Geração	Observação
Abril	18.705,90	A partir do dia 16/04/2024
Maio	37.357,70	-
Junho	33.319,00	-
Julho	36.488,90	-
Agosto	26.168,00	Até dia 20/08/2024
Total do período	152.039,50	

FONTE: Próprio Autor (2025).

TABELA 6 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 2

Mês	Geração	Observação
Abril	18.809,10	A partir do dia 16/04/2024
Maio	37.866,50	-
Junho	33.928,20	-
Julho	37.827,10	-
Agosto	26.503,30	Até dia 20/08/2024
Total do período	154.934,20	-

FONTE: Próprio Autor (2025).

TABELA 7 – DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ABRIL A AGOSTO/2024 – CENÁRIO 3

Mês	Geração	Observação
Abril	17.453,00	A partir do dia 16/04/2024
Maio	35.097,70	-
Junho	30.971,90	-
Julho	34.975,80	-
Agosto	24.587,30	Até dia 20/08/2024
Total do período	143.085,70	-

FONTE: Próprio Autor (2025).

A partir dos dados obtidos, realiza-se o comparativo entre os três cenários propostos no estudo, a composição está apresentada na Tabela 8. Com ganhos percentuais de 8,28% em relação ao cenário sem aplicação da manta, o Cenário 2, com aplicação de manta completa no terreno, se mostrou um formato de maior

incremento de geração na usina, em relação ao Cenário 1, com aplicação parcial da manta, identificou-se um ganho percentual de 2,02 %.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE CONSOLIDADO

Mês	Geração do período	Ganho % em relação ao Cenário 3
Cenário 1	152.039,50	6,26 %
Cenário 2	154.934,20	8,28 %
Cenário 3	143.085,70	0 %

FONTE: Próprio Autor (2025).

Outros pontos relevantes na aplicação do material estão relacionados com a redução da necessidade de tratamento de vegetação manual em curtos espaços de tempo, além da diminuição da erosão do terreno, no entanto, foi identificado um aumento da velocidade de escoamento da água da chuva direcionadas pelas mantas, podendo provocar no médio a longo prazo problemas na durabilidade da drenagem existente.

Um grande problema observado na aplicação do material é na sua sujidade. Por natureza dos dispositivos da estrutura de fixação, é normal que tenham intervenções de equipes técnicas de manutenção nos componentes do *tracker*, dessa forma todo serviço realizado pelos técnicos gerava pontos de sujidade nas mantas, a Figura 17 apresenta os pontos mencionados.

FIGURA 17 - PONTOS DE SUJIDADE NAS MANTAS REFLEXIVAS



FONTE - PRÓPRIO AUTOR (2025)

Em períodos de chuva, pela geografia do terreno, era natural o deslocamento de terra para as mantas, causada pelo próprio fluxo de água pluvial no local, resultando na necessidade de limpeza constante das mantas para que obtenha-se um resultado mais significativo. Para efeito deste estudo, a atuação de limpeza das mantas foi realizada de forma pontual, sem recorrência, então os dados estão submetidos a aleatoriedade dos pontos de sujeira, ressalta-se que esses pontos ocupam uma pequena área de manta, que pode não resultar em diferenças significativas nas análises.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da manta reflexiva em sistemas fotovoltaicos com estrutura *tracker* está sendo consideradas, tanto na Europa, quanto em algumas usinas no Brasil, os seus benefícios no incremento de geração de energia, conservação do terreno em termos de erosão e no controle de vegetação justificam a possibilidade da sua aplicação. Neste sentido os ganhos energéticos entre 6 % e 8 % foram encontrados na pequena amostragem apresentada no capítulo 4, resultando na necessidade de estudos mais aprofundados sobre a tecnologia e seus impactos.

Alguns pontos de atenção precisam ser considerados na análise de implementação, como por exemplo o custo financeiro atrelado ao serviço e aquisição de materiais são pontos cruciais, independentemente do momento da sua aplicação. Esse custo poderá ser atrelado ao investimento inicial da usina ou após o início da operação do gerador, no caso deste estudo, toda implantação foi posterior a fase de construção do gerador.

O principal fator de justificativa para aplicação do material é relacionado com o aumento de energia, mas também pode-se levar em consideração a eliminação ou redução da degradação dos módulos fotovoltaicos, que é uma questão intrínseca aos módulos e que toda instalação estará submetida. É comum encontrar no mercado módulos com garantia de geração entre 25 a 30 anos, com degradação de potência assegurada pelos fabricantes durante esse período, então as mantas são elementos que podem reduzir os efeitos de redução de produção dos módulos fotovoltaicos.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns itens são recomendados para trabalhos futuros, desde o tema relacionado aos sistemas fotovoltaicos, quanto as mantas aplicadas e eles são listados a seguir.

- Estudo de geração por período superior a 12 meses, levando em consideração as porcentagens de ganho por cada período do ano;
- Consideração das falhas dos dispositivos gerais, como TCU e módulos fotovoltaicos;
- Análise de viabilidade financeira da implantação das mantas reflexivas;

- Consequências do uso da manta reflexiva na drenagem existente.

REFERÊNCIAS

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **História das usinas hidrelétricas**. São Paulo: ABGE, 2015. Disponível em: <https://www.abge.org.br/downloads/9%20%20HIST%C3%93RIA%20DAS%20USINAS%20HIDREL%C3%89TRICAS.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

PV MAGAZINE BRASIL. **Com 26 anos em operação, o primeiro sistema fotovoltaico do Brasil**. 16 nov. 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/11/16/com-26-anos-em-operacao-o-primeiro-sistema-fotovoltaico-do-brasil/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

AMARA ZERO. **Análise comparativa entre estruturas de fixação do tipo tracker e monoposte envolvendo duas usinas solares**. 11 jul. 2022. Disponível em <https://amaranzero.com.br/blog/analise-comparativa-entre-estruturas-de-fixacao-do-tipo-tracker-e-monoposte-envolvendo-duas> . Acesso em 15 ago. 2025.

AMÉRICO, Isabela Baesso; NUÑEZ, Daniel Noe Coaguila; HERNANDEZ, Fernando Braz Tangerino. Controle do albedo como estratégia de preservação ambiental em escala de microbacia hidrográfica através de práticas de sensoriamento remoto. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690: sistemas fotovoltaicos — características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRAGA, Daniel Sena; DINIZ, Antonia Sônia Alves Cardoso; CASSINI, Denio Alves; SANTANA, Vinícius Augusto Camatta; KAZMERSKI, Lawrence L. Desempenho de módulos fotovoltaicos bifaciais sob diferentes condições operacionais no estado de Minas Gerais no Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**, 10., 2024, Natal. Anais [...]. Natal: [s.n.], 2024.

DIAS, Douglas Lamas; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Modelagem, simulação e análise de desempenho de uma planta solar com módulos mono e bifaciais em distintos tipos de solo. **Revista Brasileira de Energia**, v. 29, n. 4, p. 68-88, 4º trimestre 2023. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://amaranzero.com.br/blog/analise-comparativa-entre-estruturas-de-fixacao-do-tipo-tracker-e-monoposte-envolvendo-duas>. Acesso em: 16 ago. 2025.

EDP. **Impacto social e ambiental da energia solar: sustentabilidade**. [S. l.], 7 nov. 2024. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/impacto-social-energia-solar/> . Acesso em: 19 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Clima e energia**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>. Acesso em: 16 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica**. [s.l.]: EPE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 16 ago. 2025.

INTELBRAS. **Módulo fotovoltaico bifacial monocristalino 540 W EMSH 540BM HC**. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/modulo-fotovoltaico-bifacial-monocristalino-540-w-emsh-540bm-hc>. Acesso em: 20 ago. 2025.

MOZETIC, Júlia Hartmann; DECKMANN, Indhirha; OLIVEIRA, Fernando Schuck de; GASPARIN, Fabiano Perin. Análise da curva I-V de módulo fotovoltaico bifacial para determinação de ganho bifacial e eficiência energética. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 10. **Anais** [...]. Natal: [s.n.], 2024.

NERIS, Alessandra. **Membranas reflexivas maximizam a eficiência solar e reduzem custos em usinas fotovoltaicas**. *pv-magazine Brasil*, 17 fev. 2025. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2025/02/17/membranas-reflexivas-maximizam-a-eficiencia-solar-e-reduzem-custos-em-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 16 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Brasília: ONU Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 16 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,85 GW em 2024**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024>. Publicado em: 17 jan. 2025. Atualizado em: 20 jan. 2025. Acesso em: 16 ago. 2025.

PETROBRAS. **Tudo sobre transição energética: o que é, qual a importância, principais benefícios e mais**. Rio de Janeiro: Petrobras, 14 jun. 2024. Atualizado em: 31 jul. 2025. Disponível em: https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/tudo-sobre-transicao-energetica-o-que-e-qual-a-importancia-principais-beneficios-e-mais?gad_source=1&gad_campaignid=20943803028&gbraid=0AAAAAqvyogP0P43zMAvtSJEYaE-7fVzbt&gclid=Cj0KCQjwgvnCBhCqARIsADBLZoKJ9ZIsuCJw-6yU_a34-ypHByHRNWMHyUmaMVuA92d02oumLdAKSQaAl19EALw_wcB. Acesso em: 16 ago. 2025.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESSES, mar. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), e altera outras disposições. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 19 ago. 2025.

RENESOLA. **[Fotografia de módulo fotovoltaico monofacial]**. Renesola, 2025. Disponível em: https://pt.renesola-energy.com/product_1/977678892752330752.html. Acesso em: 20 ago. 2025.

TREVELIN, Felipe Camargo. **Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. ISBN 978-85-365-0978-5.

VILLALVA, Marcelo. **Conheça os módulos solares bifaciais e quais são suas vantagens**. Canal Solar, 14 jul. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-bifaciais/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

YANG, Zihan; XIAO, Zhiquan. **A review of the sustainable development of solar photovoltaic tracking system technology**. *Energies*, v. 16, n. 23, p. 7768, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16237768>.