



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas - ICEA
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica - COEE
Campus João Monlevade



Análise da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas de 7MWp: Um Estudo Comparativo entre Sistemas de Rastreamento Solar e Estruturas Fixas

Pedro Henrique Hubner Braulino

João Monlevade, MG

2024

Pedro Henrique Hubner Braulino

**Análise da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas de
7MWp: Um Estudo Comparativo entre Sistemas de
Rastreamento Solar e Estruturas Fixas**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Welbert Alves Rodrigues

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade, MG

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B825a Braulino, Pedro Henrique Hubner.

Análise da geração de energia em usinas fotovoltaicas de 7MWp [manuscrito]: um estudo comparativo entre sistemas de rastreo solar e estruturas fixas. / Pedro Henrique Hubner Braulino. - 2024. 59 f.

Orientador: Prof. Dr. Welbert Rodrigues.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Engenharia elétrica. 2. Energia solar - Produção. 3. Geração de energia fotovoltaica - Análise. 4. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Rodrigues, Welbert. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.311.243

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Henrique Hubner Braulino

**Análise da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas de 7MWp:
Um Estudo Comparativo entre Sistemas de Rastreamento Solar e Estruturas Fixas**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 17 de Dezembro de 2024

Membros da banca

Dr - Welbert Alves Rodrigues - Orientador - UFOP
Dr - Caio Meira Amaral da Luz - UFOP
Dr - Thainan Santos Theodoro - UFOP

Welbert Alves Rodrigues, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/03/2025



Documento assinado eletronicamente por **Welbert Alves Rodrigues, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/04/2025, às 08:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0893659** e o código CRC **6C53DC0F**.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma análise comparativa da performance de duas usinas fotovoltaicas de 7 MWp localizadas em Minas Gerais, uma com estruturas fixas e outra com rastreadores solares. O objetivo é identificar qual tecnologia proporciona melhor desempenho em termos de geração de energia e eficiência operacional. Para tanto, foram realizadas simulações no software PVsyst, analisando parâmetros como a geração anual de energia, o índice de performance (PR) e a energia injetada na rede ao longo dos meses. Os resultados mostraram que a usina de Curvelo, equipada com rastreadores solares, apresentou um desempenho superior em comparação à usina de Caeté, especialmente em meses de alta irradiância solar. Adicionalmente, foram consideradas as condições climáticas e a temperatura ambiente, que impactam diretamente a geração de energia, assim como aspectos relacionados às perdas energéticas de cada sistema. Conclui-se que a escolha entre os sistemas deve levar em conta tanto o aumento na geração de energia quanto uma análise econômica abrangente, fornecendo informações valiosas para profissionais e investidores do setor fotovoltaico.

Palavras-chave: energia solar, usinas fotovoltaicas, estruturas fixas, rastreadores solares, desempenho energético.

ABSTRACT

This undergraduate thesis presents a comparative analysis of the performance of two 7 MWp photovoltaic plants located in Minas Gerais, one with fixed structures and the other with solar trackers. The aim is to identify which technology provides better performance in terms of energy generation and operational efficiency. To achieve this, simulations were conducted using the PVsyst software, analyzing parameters such as annual energy generation, performance ratio (PR), and energy injected into the grid over the months. The results showed that the Curvelo plant, equipped with solar trackers, outperformed the Caeté plant, especially in months with high solar irradiance. Additionally, climatic conditions and ambient temperature were considered, as they directly impact energy generation, along with the economic aspects related to energy losses in each system. The study concludes that the choice between systems should account for both the increase in energy generation and a comprehensive economic analysis, providing valuable information for professionals and investors in the photovoltaic sector.

Keywords: solar energy, photovoltaic plants, fixed structures, solar trackers, energy performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação ilustrativa de um Rastreador solar	15
Figura 2 - Distância entre fileiras de módulos.....	16
Figura 3 - Usina fotovoltaica com rastreadores solares.....	18
Figura 4 - Gráfico comparativo da produção de energia entre sistemas fixos e com rastreadores solares em diferentes condições climáticas.....	23
Figura 5 - Relação entre temperatura e eficiência dos módulos fotovoltaicos	24
Figura 6 - Esquema da Disposição de Módulos com Rastreadores solares	25
Figura 7 – Diagrama de interligação entre Módulos Fotovoltaicos e Inversores.....	30
Figura 8 - Diagrama de interligação entre QGBT e Transformador	30
Figura 9 - Diagrama de interligação entre Cabine de Medição e Ponto de Conexão com a CEMIG	31
Figura 10 – Layout Geral da Usina em Caeté com a utilização de Estruturas de Mesa Fixa...31	
Figura 11 – Layout Geral da Usina em Curvelo com a utilização de Rastreadores Solares32	
Figura 12 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Caeté.....	33
Figura 13 – Opções de parametrização referente à orientação dos módulos no PVsyst	35
Figura 14 – Opções de parametrização referente ao sistema da usina no PVsyst.....	36
Figura 15 – Opções de parametrização referente às perdas do sistema simulado no PVsyst...37	
Figura 16 – Diagrama de Perdas do Sistema.....	39
Figura 17 – Diagrama de perdas do sistema da usina de estrutura fixa em Caeté.....	41
Figura 18 – Gráfico de Performance Ratio por meses do ano na usina de Caeté.....	42
Figura 19 – Diagrama de perdas do sistema da usina de estrutura fixa em Curvelo.....	43
Figura 20 – Gráfico de Performance Ratio por meses do ano na usina de Curvelo.....	44
Figura 21 – Gráfico comparativo entre as temperaturas de Curvelo e Caeté.....	47
Figura 22 – Gráfico de desempenho (PR) por meses do ano nas duas usinas.....	48
Figura 23 – Gráfico de energia injetada na rede por meses do ano nas duas usinas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração de energia nominal e simulada com as perdas reais em Caeté.....	42
Tabela 2 – Geração de energia nominal e simulada com as perdas reais em Curvelo	44
Tabela 3 – Resultados gerais obtidos do PVsyst da usina de Caeté com estrutura fixa.....	45
Tabela 4 – Resultados gerais obtidos do PVsyst da usina de Curvelo com rastreador solar....	45
Tabela 5 – Energia injetada na rede após as perdas do sistema	49
Tabela 6 – Geração de energia de cada usina normalizada pela irradiância dos locais	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Levantamento de exigências do local de instalação do projeto	17
Quadro 2 - Comparação da eficiência dos sistemas com rastreador solar e com sua ausência	18

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DAST – Dual Axis Sun Tracker (Rastreador Solar de Eixo Duplo)

IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)

MPPT – Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)

MWp – Megawatt-pico

NBR – Norma Brasileira

PV – Photovoltaic (Fotovoltaico)

QGBT – Quadro Geral de Baixa Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização.....	10
1.2 Motivação	11
1.3 Objetivo geral	11
1.4 Objetivos específicos	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 As dificuldades encontradas na construção de usinas solares em minigeração.....	13
2.3 Comparação entre Sistemas com e sem Rastreadores solares	20
2.4 Impacto das Condições Meteorológicas	22
2.5 Diretrizes Técnicas para a Construção de Usinas Fotovoltaicas	24
2.6 Estado da arte.....	27
3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA	28
3.1 Características gerais das usinas fotovoltaicas	28
3.1.1 Layout geral das usinas.....	31
3.2 Características meteorológicas nos locais das usinas	32
3.3 PVSYST.....	34
3.3.1 Diagrama de Perdas no PVSYST	38
4 RESULTADOS	41
5.1 Usina fotovoltaica com estrutura fixa em caeté.....	41
4.2 Usina fotovoltaica com Rastreador solar em curvelo	43
4.3 Comparação entre as usinas	45
4.4 Proposta para trabalhos futuros.....	51
5. CONCLUSÃO.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crise climática e a busca por soluções sustentáveis têm impulsionado uma mudança fundamental no setor energético global, destacando a importância da transição para fontes de energia renováveis, especialmente a solar fotovoltaica. O Brasil, com seu rápido crescimento econômico e urbanização, enfrenta uma crescente demanda por energia elétrica, o que torna a transição para fontes mais limpas uma prioridade (Dutra, 2016). Embora o país possua uma matriz energética diversificada, como relatado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), a exploração dessas fontes ainda é predominantemente focada em recursos hídricos, com mais de 60% da energia elétrica proveniente dessa fonte, enquanto alternativas como a solar representam menos de 2%.

O Sol, como principal fonte de energia do planeta, oferece um vasto potencial para a geração de eletricidade e calor. A energia solar, por ser inesgotável, se apresenta como uma alternativa viável aos métodos tradicionais que utilizam recursos finitos e não-renováveis (Pinho, 2014). Sua adoção, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa, traz benefícios como a criação de empregos especializados, o avanço tecnológico e o fortalecimento da sustentabilidade ambiental, social e econômica (Esposito, 2013).

O Brasil, enquanto uma economia autossuficiente, depende crucialmente do crescimento econômico para financiar seu avanço em direção a uma infraestrutura energética sustentável. O aumento da produção de energia oriunda de fontes renováveis não apenas impulsionaria o crescimento econômico nacional e mitigaria danos ambientais, mas também abre caminho para uma posição de destaque no cenário internacional e fortaleceria a competitividade do Brasil em relação a nações mais avançadas (Pao; Fu, 2018).

A energia renovável que mais contribui para a geração de empregos globalmente é a solar fotovoltaica. Até 2015, essa fonte foi responsável pela criação de 2,7 milhões de postos de trabalho em todo o mundo, de um total de 8,1 milhões gerados pelas energias renováveis. Isso equivale a aproximadamente 34,3% do total de empregos criados por fontes renováveis, ou seja, a cada três empregos gerados por energias renováveis, um está ligado à energia solar fotovoltaica (Rodrigues, 2017).

Ao impulsionar o avanço tecnológico e o desenvolvimento econômico, o consumo de energia elétrica emerge como um dos indicadores primordiais do crescimento econômico. Isso

se deve ao fato de que um maior poder de compra resulta na aquisição de mais bens, incluindo equipamentos elétricos e eletrônicos, o que, por sua vez, leva a um aumento no consumo de energia elétrica, tanto nas esferas industrial, comercial quanto residencial (Finkler, 2016).

1.2 MOTIVAÇÃO

A justificativa para a realização do estudo sobre a comparação de geração de energia entre duas usinas fotovoltaicas de minigeração está fundamentada na necessidade de ampliar o conhecimento técnico sobre projetos de energia renovável, especialmente em um contexto de crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis. Embora a energia solar fotovoltaica esteja em expansão, ainda existem desafios técnicos relacionados à escolha de tecnologias, otimização do layout e eficiência dos sistemas com ou sem rastreadores solares. Compreender esses aspectos é essencial para garantir que projetos de usinas solares sejam viáveis e eficientes em termos de custo e geração de energia (Rodrigues, 2017).

Este estudo técnico pode fornecer subsídios importantes para engenheiros e profissionais da área que buscam implementar soluções mais eficazes, levando em consideração as particularidades de cada local, como clima, topografia e infraestrutura. A investigação contribuirá para o desenvolvimento de métodos construtivos aprimorados e diretrizes técnicas que poderão ser aplicadas em projetos semelhantes, o que ajudará na expansão dessa tecnologia no Brasil e em outros países em desenvolvimento (Pinho, 2014).

Neste contexto, o presente estudo busca contribuir para a análise comparativa de duas usinas fotovoltaicas de 7 MWp localizadas em Minas Gerais, sendo uma equipada com sistema de rastreamento solar e a outra com estruturas fixas. A motivação se baseia na necessidade de avaliar qual tecnologia oferece melhor desempenho em termos de geração de energia, levando em consideração não apenas o potencial energético, mas também os aspectos econômicos e operacionais.

1.3 OBJETIVO GERAL

- Realizar uma análise comparativa da performance, através do PVsyst, de duas usinas fotovoltaicas de 7 MWp localizadas em Minas Gerais, uma utilizando estruturas fixas e a outra com rastreadores solares, com o intuito de identificar qual tecnologia oferece melhor desempenho em termos de geração de energia e eficiência operacional, considerando as características climáticas de cada região.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o impacto da utilização de sistemas com e sem rastreadores solares na otimização do aproveitamento da energia solar, comparando a eficiência energética cada solução.
- Simular, por meio do software PVsyst, a geração anual de energia das duas usinas, considerando as suas particularidades, bem como as perdas de cada tecnologia de fixação dos módulos.
- Avaliar o índice de performance anual (PR), utilizando dados obtidos por simulação, a fim de mensurar a eficiência de cada sistema na conversão de irradiância solar em energia elétrica.
- Comparar a energia injetada na rede, de acordo com os dados coletados do PVsyst, das duas usinas ao longo do ano e analisar como as condições climáticas, especialmente a irradiância e a temperatura, influenciam o desempenho de cada tecnologia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AS DIFICULDADES ENCONTRADAS NA CONSTRUÇÃO DE USINAS SOLARES EM MINIGERAÇÃO

A energia solar em uma geração pode sofrer inúmeras interferências, oscilando e sendo mutável a cada hora ou mesmo em questão de minutos. A necessidade de disponibilidade da radiação solar acaba sendo um fator determinante para se conseguir o aproveitamento das suas potencialidades. Ainda assim, são fatores nos quais acabam por impactar as condições climáticas (Vasconcellos; Limberger, 2012).

Atualmente se dispõe de inúmeras condições nas quais se consegue um aproveitamento da energia solar para fins de aproveitamento energético. Para tanto, é preciso levar em conta as premissas de construção dos projetos nos quais possam ser eficientes para se fazer o uso de tais recursos disponíveis (Raimo, 2007).

Partindo da consideração de que a energia solar além de uma fonte extensa de calor e luminosidade, pode ser abordada como forma de geração de energia elétrica. Tal processo de conversão se dá pelo efeito da geração da radiação atuando diretamente sobre materiais semicondutores trabalhados para esta finalidade (Pinho; Galdino, 2014).

O aproveitamento da energia solar para geração elétrica pode ser compreendido, de acordo com Pinho e Galdino (2014), por meio de dois principais fundamentos técnicos. O primeiro é a geração elétrica através do efeito fotovoltaico, que ocorre quando a radiação solar é absorvida por células solares, dispositivos eletrônicos que convertem a energia luminosa em elétrica. Ao serem expostas diretamente à luz solar, essas células geram uma diferença de potencial elétrico. A fim de melhorar o aproveitamento energético, pode-se utilizar concentradores solares para concentrar a radiação solar em um módulo fotovoltaico. O segundo fundamento refere-se à geração de eletricidade por meio do uso da radiação solar para aquecer materiais líquidos, sólidos ou gasosos. Ao incidir sobre esses materiais, o calor gerado é convertido em energia mecânica, que posteriormente é transformada em energia elétrica por meio da concentração dos raios solares.

O efeito fotovoltaico, base das tecnologias de aproveitamento da energia solar, ocorre quando os fótons da luz solar promovem o deslocamento de elétrons para uma camada de condução, gerando uma tensão elétrica e, como resultado, uma corrente elétrica. Esse processo, conforme descrito por Vasconcellos e Limberger (2012), viabiliza a transformação direta da energia solar em eletricidade, constituindo uma das mais promissoras formas de geração de energia limpa e renovável.

As oportunidades geradas pela tecnologia solar são capazes de aproveitarem uma fonte de energia limpa e renovável, para tanto, é preciso analisar os fatores nos quais são primordiais no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, dentre os quais podem ser destacados:

- A quantidade de radiação solar no local;
- Os custos envolvidos;
- As condições do local de disposição dos recursos;
- A disponibilidade de conhecimento técnico dos envolvidos (Kalogirou, 2009).

Na efetivação do aproveitamento das radiações solares é imprescindível analisar nos projetos de construção a distância de outras construções ou de outros corpos presentes nos quais possam afetar a quantidade de irradiância solar que incide nos módulos fotovoltaicos. (Kalogirou, 2009).

No que diz respeito a topografia da localização é preciso ater aos cuidados quanto aos ângulos em que ocorrem a incidência da radiação solar, a sua declividade e a orientação voltada para a tentativa de um melhor aproveitamento da luz do dia para diferentes estações do ano e levando em conta o máximo aproveitamento do tempo de exposição direta (Vasconcellos; Limberger, 2012).

As instalações de geração podem ser estabelecidas pela divisão em duas categorias com nas potências de geração nas suas instalações, com base nas regras estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2023):

1) Microgeração: Compreende potências cujo valores de até 75kW, ao serem caracterizadas por uma menor potência, são construídas por projetos simples, de fácil aprovação pelas distribuidoras e com um reduzido detalhamento de sua elaboração e uma agilidade de sua formulação;

2) Minigeração: Compreende potência valores variam entre 75kW e 5MW, com valores mais elevados estas usinas necessitam de formular projetos com uma riqueza de detalhes, assim, requerendo um maior prazo para a aceitação nas distribuidoras, além de muitas vezes serem requeridas melhorias geradas nas redes, tendo em vista que a infraestrutura disponibilizada próxima para o uso nem sempre está em compatibilidade para receber a potência gerada destes projetos.

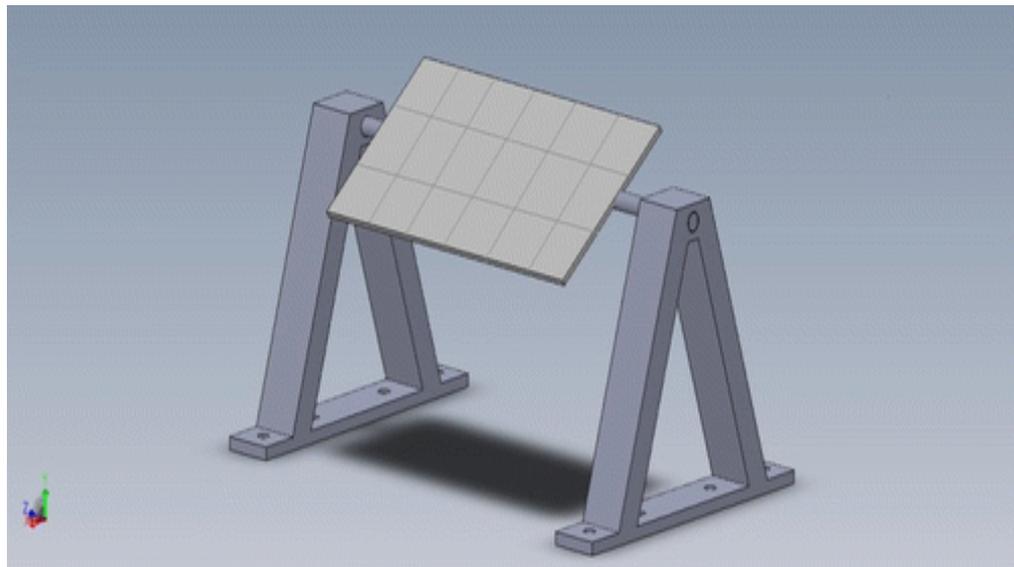
Para o fornecimento do potencial energético é preciso levar em conta os componentes presentes na usina, dentre os fundamentais é necessário ater aos módulos fotovoltaicos, com a presença de diferentes modelos elaborados no mercado, requer destacar que quanto maior a potência unitária, menor a quantidade de equipamentos a serem necessários (Fritsch, 2019).

O custo dos módulos é um fator que está diretamente relacionado aos materiais empregados, para uma maior eficiência, a qualidade dos compostos é essencial. Outro ponto de atenção em sua composição se deve as características de sua área ocupada, para uma maior geração requer um terreno ou espaço ocupado maior (Fritsch, 2019).

No que tange a escolha dos inversores, faz necessário analisar a potência e tensão de entradas. Esses valores, por sua vez, dependem da quantidade de módulos que compõem a série fotovoltaica, além de serem essenciais para promoverem a conversão da corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), permitindo inclusive a possibilidade de medição da energia produzida e garantindo a segurança do sistema (Duarte, 2021).

Os rastreadores solares podem ser ilustrados segundo a Figura 1 a seguir, os mesmos não são itens obrigatórios nos projetos, mas graças a sua capacidade de direcionamento dos módulos conseguem promoverem uma redução das quantidades de módulos e inversores aplicados na prática.

Figura 1 Representação ilustrativa de um Rastreador solar



Fonte: Adaptado de Racharla; Rajan (2017)

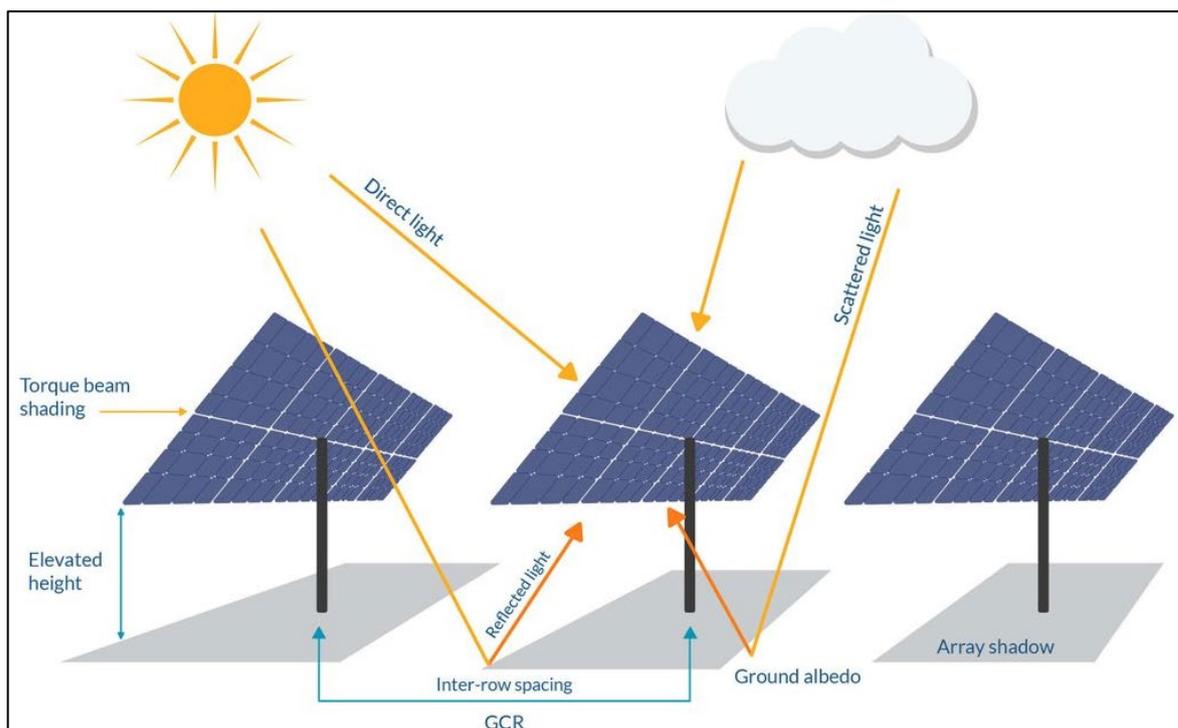
Como forma de aproveitamento máximo da radiação solar, os rastreadores solares ganham um destaque nos projetos maiores pela capacidade procederem a movimentação dos módulos fotovoltaicos para o acompanhamento do posicionamento do sol. O interesse em gerar a movimentação é manter ao longo do dia uma manutenção da posição perpendicular em relação ao sol (Duarte, 2021).

Com a aplicação desejada e dimensionada das usinas, o projeto exige a disponibilidade de um local para a construção, com isso, os terrenos em que conseguem dispor de local livre de interferências próximas em relação a exposição dos módulos a radiação devem ser priorizados (Trombini, 2021).

Quando um projeto já dispõe de um terreno fixo disponível, os equipamentos e as instalações acabam sendo pensados se adaptando as condições presentes, com isso, demandando uma construção com base na disponibilidade de espaço e de recursos (DUARTE, 2021).

A presença de distâncias entre os módulos é um fator preponderante para que sejam permitidas as atuações e também se consiga manter uma adequada captação dos raios solares, independentemente da presença ou não dos rastreadores solares, portanto, o projeto deve ser condicionado conforme tal proposito (Trombini, 2021). A figura 2 ilustra as condições de disposição correta.

Figura 2 - Distância entre fileiras de módulos



Fonte: Adaptada de Rodríguez (2021)

Outros fatores também devem ser priorizados para a colocação e como forma de atendimento das exigências mínimas necessárias, Trombini (2021), destaca os seguintes:

Quadro 1 - Levantamento de exigências do local de instalação do projeto

Poucos desníveis	A redução das irregularidades do solo facilita a disposição dos módulos, além de representar uma economia com a necessidade de terraplanagem. Quando se aplicam nos projetos os rastreadores solares, requer um alinhamento preciso das mesas para que assim a movimentação se dê de modo coordenado é preciso e com base no aproveitamento máximo da disponibilidade do solo.
Estabilidade do solo	A colocação dos equipamentos requer que o local apresente uma capacidade de suporte dos pesos presentes, além de favorecer a inserção de máquinas pesadas no local para a facilidade de instalação.
Espaço	Devida as quantidades de equipamentos a serem colocados, é preciso dispor de local suficiente para todo o aparato construtivo, além de deixar entre as instalações uma disposição de distâncias suficientes para a mobilização e acesso as operações e condições nas quais requerem uma devida manutenção.
Ausência de sombreamento	O local a ser instalado deve evitar a proximidade com outras construções elevadas ou vegetações nas quais possam em algum momento do dia gerarem o sombreamento. A presença de sobras compromete diretamente a eficiência dos módulos, nos quais em geral acabam por serem operados conforme o interesse em receberem uma maior incidência possível de radiações.

Fonte: Adaptada de Trombini (2021)

Em geral, a aplicação do rastreador solar se dá pelo fundamento da movimentação mecânica gerada nos módulos, contrapondo as disposições de mesa fixa pela capacidade de acompanhamento da inclinação do sol durante o dia Gil, et al. (2009).

Contudo, cabe destacar que o custo apresentado representa o principal gargalo de sua aplicação mais ampla, pelas suas características de composição mediante a movimentadores dos painéis e ainda requerendo uma comunicação continua com um acionamento dos movimentos, acabam representando um custo maior se comparado as mesas fixas (Duarte, 2021).

Perante as construções práticas, os rastreadores solares podem ser formulados com base em diferentes modelos, variando conforme os custos de sua aplicação e as condições do local de instalação e do projeto em si, com isso, destacam os modelos de seguidor com eixo vertical; eixo horizontal; polares de eixo único e seguidor com elevação azimutal (Prinsloo; Dobson, 2015).

A figura 3 apresenta um modelo de usina de minigeração que utiliza rastreadores solares como tecnologia de fixação dos módulos:

Figura 3 - Usina fotovoltaica com rastreadores solares



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Em relação a estudos realizados, destacam que o desempenho da performance dos projetos com rastreador solar devem ver analisados conforme a abundância ou não dos recursos solares, com isso, conseguiram obter os seguintes valores de dados da tabela 2 a seguir na qual apresenta alguns resultados procedidos em comparação com o rendimento de mesas fixas:

Quadro 2 - Comparação da eficiência dos sistemas com rastreador solar e com sua ausência

Li, Liu e Tang (2011)	Melhoria da eficiência de geração em 28% para as áreas em que são presentes a abundância dos recursos solares; Favorecimento do rendimento em valores de até 16% nas áreas com pouca incidência dos raios solares.
Mousazadeh, et al. (2009).	Perante uma demonstração algébrica permitiu um ganho teórico de até 57% de rendimento.
Prinsloo; Dobson (2015)	O rastreador solar gerou um incremento de geração média de 25,4% em relação a mesa fixa, em um dia com melhor aproveitamento dos recursos da radiação o salto de produção alcançou 36% a mais de energia elétrica.
Duarte (2021)	Dependendo das condições de uso e de formulação dos projetos, o ganho procedido de resultados gerados encontra-se para valores entre 20 a 40%.
Figueiredo; Martins (2017)	Perante a comparação dos custos, a implementação do rastreador solar apresentou um maior custo, porém os índices de maior geração acabaram apresentando um resultado financeiro maior em relação ao fixo, pagando o investimento em poucos anos de implementação.

Fonte: Dados da pesquisa (2023)

Ao se pensar na colocação dos rastreadores solares precisa ater a instalação, sendo a mesma de modo semelhante a estrutura de um monope, com a diferença de que o eixo da estrutura é o fator de promoção da movimentação das placas, mantendo a manutenção da inclinação de noventa graus em relação ao sol durante todo o tempo (Marcello, 2022).

Alguns aspectos negativos acabam por impactarem diretamente o rendimento e os custos envolvendo a sua implementação, nos quais se destacam:

- Maior investimento inicial do projeto;
- Maior dificuldade para proceder a instalação;
- Manutenção constante (Pina; Corrêa, 2018).

Ao contrapor as considerações de um rendimento maior e com a redução da área de construção, os rastreadores solares acabam sendo vantajosos para projetos maiores e robustos, conseguindo dispor de maiores recursos para compensar os seus custos, além de garantir a possibilidade de uma centralização de seus direcionamentos para que todos os módulos possam apresentar o mesmo comportamento (Pina; Corrêa, 2018).

As estruturas de mesas fixas e em grandes empreendimentos acabam demandando uma fixação de suas estruturas por meio da concretagem no terreno para a estabilidade estrutural, com isso, demandando uma análise inicial para o posicionamento dos módulos ou em condições de retrato ou paisagem (Marcello, 2022).

Com o deslocamento do sol durante o dia, a estrutura de mesa fixa pode apresentar problemas com o sombreamento em algum momento pela disposição das fileiras, para isso, é preciso analisar bem o projeto construtivo, desejando minimizar os espaços presentes e garantir que mesmo na incapacidade de manutenção da posição perpendicular em relação aos solares, se consiga dispor uma maior área superficial de contato direto com os raios (Prinsloo; Dobson, 2015). Na construção prática dos rastreadores solares, são observados os seguintes itens presentes:

- Sistema de acionamento mecânico composto por atuadores lineares, engrenagens e acionadores giratórios;
- Motores elétricos de corrente contínua, do tipo Servomotor, para promover a movimentação dos componentes;
- Sistema de baterias, na Sala Operação, afim de realizar o backup dos dados gerados;
- Algoritmo astronômico para realizar a movimentação correta dos componentes com base na localização e na data;
- Sensores compostos de albedômetro, piranômetros e células de referências para garantir um posicionamento mais adequado;
- Anemômetro para a aferição da velocidade dos ventos e posicionamento das estruturas com segurança (Prinsloo; Dobson, 2015).

No acionamento das movimentações com base no posicionamento solar, o rastreamento pode ser procedido mediante a um rastreamento ativo em que por meio de sensores e algoritmos se processa a realização das mudanças das posições dos módulos (Nascimento, 2015).

Existe ainda a disposição de um dispositivo de acionamento passivo em que o movimento de todo o mecanismo se dá pela incidência das radiações solares, assim com base na presença de tubos interconectados, sendo que no interior ao dispor de algum fluido ao ser aquecido se desloca internamente e procede uma movimentação dos componentes como forma de compensação do peso (Queiroz; Souza; Andrade, 2018).

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS COM E SEM RASTREADORES SOLARES

A crescente demanda por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis tem promovido uma série de avanços tecnológicos no campo da energia solar. Entre as inovações mais relevantes está o uso de sistemas de rastreamento solar, conhecidos como rastreadores solares, que são mecanismos projetados para ajustar o posicionamento dos painéis solares ao longo do dia, a fim de maximizar a captação da radiação solar. Esses sistemas são frequentemente comparados a arranjos estáticos, que permanecem fixos em um ângulo pré-determinado. A comparação entre sistemas fotovoltaicos com e sem rastreadores solares se concentra, principalmente, nos aspectos de eficiência, custo-benefício e viabilidade técnica, considerando as diversas condições climáticas e geográficas onde essas tecnologias são aplicadas.

Os sistemas de rastreamento solar, ao ajustarem automaticamente a posição dos módulos fotovoltaicos para seguir a trajetória do sol, podem aumentar significativamente a eficiência de geração de energia. De acordo com o estudo de Debastiani et al. (2022), que avaliou o impacto da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos estáticos e rastreáveis em Cascavel-PR, os sistemas com rastreadores solares mostraram um aumento de 37,2% na produção de energia em comparação com sistemas estáticos. Esse aumento é atribuído à capacidade dos rastreadores solares de manter os módulos em um ângulo ideal durante o dia, aproveitando ao máximo a irradiância solar, o que, por sua vez, reduz a temperatura máxima dos módulos e melhora sua eficiência.

Outro aspecto relevante na comparação entre sistemas com e sem rastreadores solares é o custo inicial e a complexidade da instalação. Sistemas com rastreadores solares exigem maior investimento inicial devido à necessidade de dispositivos mecânicos e eletrônicos para o rastreamento, além de manutenção adicional, o que pode torná-los menos atraentes em

determinadas condições econômicas. No entanto, como apontado por Vertemate et al. (2023), em um estudo comparativo de sistemas com módulos bifaciais e rastreadores solares em Sapucaia, Rio de Janeiro, apesar do custo mais elevado, o uso de rastreadores solares pode proporcionar um retorno econômico mais rápido em locais com alta incidência solar. A eficiência aumentada na geração de energia resulta em uma maior produção ao longo do tempo, compensando o investimento inicial.

O estudo de Rodriguez e Silva (2022) corrobora essas conclusões ao comparar dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede em Ilha Solteira, São Paulo, com rastreadores solares de dois eixos. Eles analisaram o desempenho de um sistema com módulos planos convencionais e outro com módulos concentradores, ambos equipados com rastreadores solares. Os resultados indicaram que o sistema com rastreadores solares proporcionou um desempenho superior, reforçando a ideia de que o uso de rastreadores é uma solução eficiente, especialmente em regiões de alta irradiância solar. No entanto, eles também ressaltam que a viabilidade técnica e econômica dos rastreadores solares depende das condições climáticas e do perfil de consumo energético local.

Outro fator importante a ser considerado é a eficiência térmica dos módulos fotovoltaicos em sistemas com e sem rastreadores solares. A eficiência dos painéis solares tende a diminuir à medida que a temperatura dos módulos aumenta. Em locais onde a temperatura ambiente é alta, o uso de rastreadores solares pode ajudar a mitigar esse efeito, mantendo os módulos em temperaturas mais baixas. Segundo o estudo de Vertemate et al. (2023), a capacidade dos rastreadores solares de reduzir a temperatura dos módulos em até 6,6% durante os meses mais quentes resultou em uma eficiência maior em comparação aos sistemas estáticos.

Em contrapartida, a simplicidade e o menor custo dos sistemas estáticos os tornam atrativos para aplicações em regiões onde a diferença na irradiância ao longo do dia é menos significativa. De acordo com Godinho et al. (2021), em regiões onde o sombreamento parcial é frequente, os sistemas sem rastreadores solares podem apresentar uma estabilidade maior, uma vez que não estão sujeitos à movimentação constante que pode gerar pontos de sombreamento ou falhas mecânicas. Eles apontam que, em locais com variabilidade solar e geográfica, como áreas montanhosas ou regiões com alta cobertura de nuvens, a escolha por sistemas estáticos pode ser mais adequada.

Outro ponto que deve ser considerado é a manutenção de sistemas com rastreadores solares, que envolve componentes mecânicos adicionais que podem estar sujeitos a falhas. Lima e Michels (2023) destacam que a presença de mais componentes eletrônicos e mecânicos aumenta a necessidade de manutenção periódica, o que pode ser uma desvantagem em locais

remotos ou de difícil acesso. Entretanto, como demonstrado por Scolari e Urbanetz (2023), a manutenção adicional pode ser compensada pelo aumento na geração de energia em longo prazo, especialmente em locais com alta incidência solar.

Por fim, a escolha entre sistemas com e sem rastreadores solares depende fortemente de uma análise custo-benefício que considere as condições climáticas, a localização geográfica, os custos de manutenção e o perfil de consumo energético. Em regiões com alta incidência solar, como grande parte do Brasil, os sistemas com rastreadores solares tendem a apresentar vantagens significativas em termos de eficiência energética. No entanto, em regiões onde o ganho energético adicional não compensa o custo extra, os sistemas estáticos ainda podem ser a melhor solução. Como sintetizado por Debastiani et al. (2022), a adoção de sistemas com rastreadores solares é uma decisão estratégica que deve ser ponderada com base nas condições locais e no retorno financeiro esperado.

2.4 IMPACTO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

A radiação solar é um dos principais fatores que influenciam a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A quantidade de energia produzida por um painel fotovoltaico é diretamente proporcional à radiação solar incidente sobre a superfície do painel. Em sistemas com rastreadores solares, o ângulo dos painéis é ajustado para maximizar a exposição à luz solar ao longo do dia. Segundo Sukma (2023), a radiação solar é o fator mais relevante para a produção de energia em sistemas com rastreadores solares. Em seu estudo, ele constatou que o uso de um sistema Dual Axis Sun Rastreador solar (DAST) aumentou a produção de energia em até 32% em dias ensolarados e 12% em dias nublados, comparado com sistemas fixos.

A equação que descreve a potência gerada por um painel fotovoltaico é dada por:

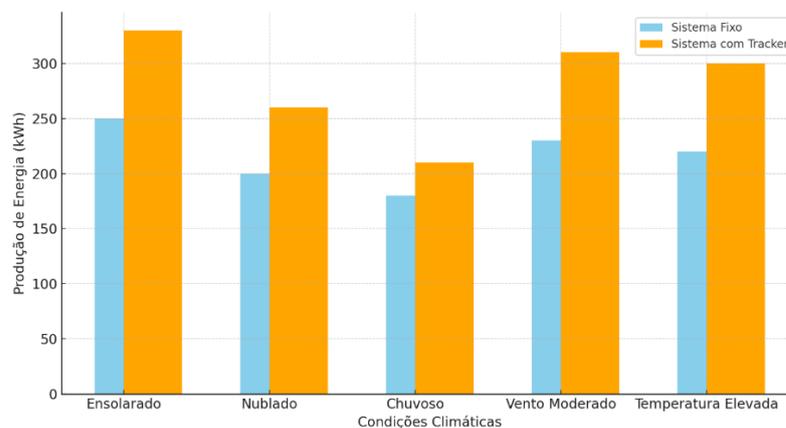
$$P = \eta \cdot A \cdot I_{sol} \cdot \cos \theta$$

Onde:

- P é a potência gerada;
- η é a eficiência do painel;
- A é a área do painel;
- I_{sol} é a irradiância solar;
- θ é o ângulo de incidência da radiação solar no painel.

A eficiência dos rastreadores solares pode ser representada pela capacidade de manter θ próximo de zero ao longo do dia, o que maximiza a captação de energia.

Figura 4 - Gráfico comparativo da produção de energia entre sistemas fixos e com rastreadores solares em diferentes condições climáticas



Fonte: Adaptado de Suckman, 2023.

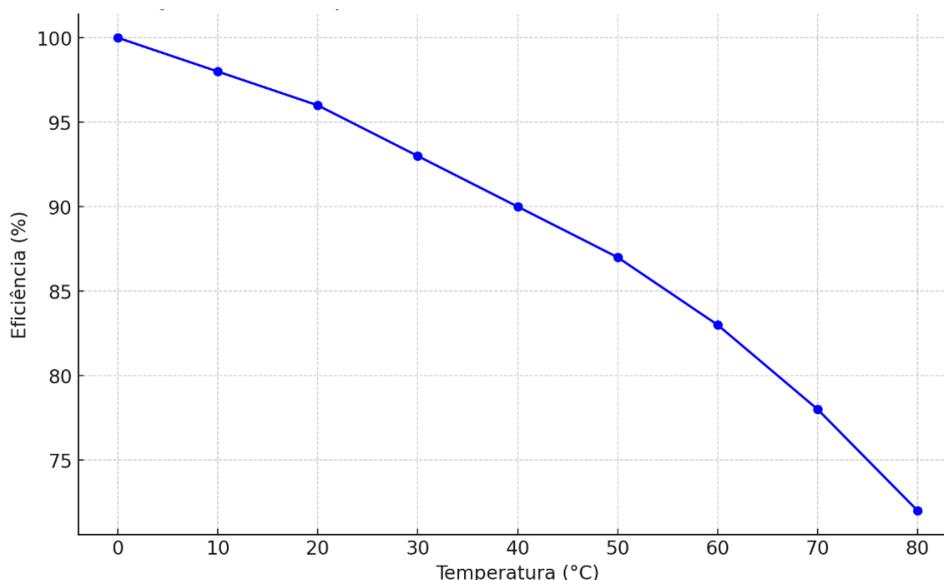
A temperatura afeta diretamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos. A eficiência de conversão dos painéis tende a diminuir conforme a temperatura dos módulos aumenta. O estudo de Afram Polus e Abdullah (2023) mostrou que o aumento da temperatura reduz a eficiência dos módulos em até 0,3% para cada incremento de 5°C. Em condições de alta temperatura, como em regiões desérticas, o uso de sistemas de resfriamento associado a rastreadores solares pode melhorar a eficiência. Em seu experimento, a aplicação de um sistema de resfriamento a água combinado com o rastreamento solar resultou em um aumento de 25,11% na eficiência fotovoltaica. A relação entre a temperatura e a eficiência do painel fotovoltaico pode ser modelada pela seguinte fórmula:

$$\eta(T) = \eta_{ref} \cdot [1 - \beta(T_{mod} - T_{ref})]$$

Onde:

- η é a eficiência do painel a uma temperatura;
- η_{ref} é a eficiência de referência do painel a uma temperatura;
- β é o coeficiente de temperatura (tipicamente entre 0,2% e 0,5% por grau Celsius);
- T é a temperatura atual do módulo.

Figura 5 - Relação entre temperatura e eficiência dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de Afram Polus e Abdullah, 2023.

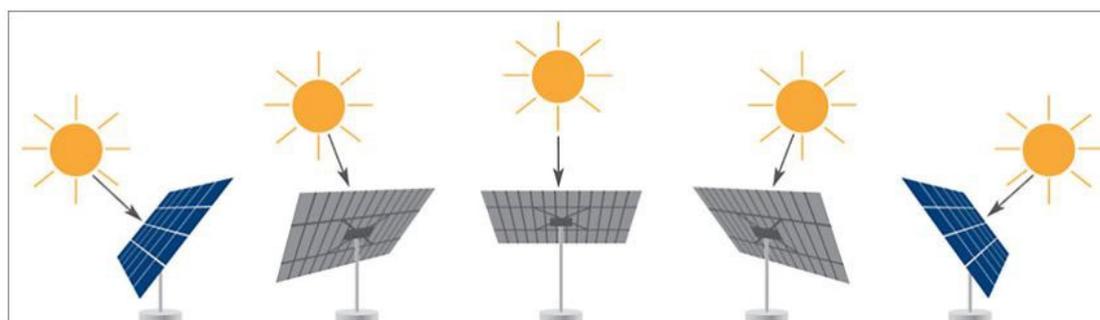
Como a eficiência dos módulos fotovoltaicos tende a diminuir conforme a temperatura aumenta. A eficiência decresce significativamente a partir dos 40°C, ilustrando a importância de manter temperaturas mais baixas para maximizar a produção de energia. O vento pode atuar de maneira benéfica ao resfriar os painéis solares, diminuindo sua temperatura e, conseqüentemente, aumentando a eficiência dos módulos. Bošnjaković et al. (2023) indicam que sistemas fotovoltaicos em regiões com ventos moderados podem ter uma queda de temperatura de até 10°C, o que melhora a eficiência dos painéis. No entanto, ventos muito fortes podem representar um desafio estrutural para os rastreadores solares, exigindo ajustes e reforços mecânicos para garantir sua durabilidade e segurança. O estudo aponta que os sistemas de energia fotovoltaica em grande escala podem suportar velocidades de vento de até 50 m/s sem falhas estruturais significativas.

2.5 DIRETRIZES TÉCNICAS PARA A CONSTRUÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS

A construção de usinas fotovoltaicas exige uma abordagem técnica rigorosa, com base em normas e regulamentações que garantem a eficiência, segurança e viabilidade econômica do projeto. As diretrizes aqui propostas para a construção e operação de usinas fotovoltaicas de minigeração consideram tanto as normas técnicas revisadas quanto os dados obtidos em análises de projetos existentes, especialmente no que se refere à disposição dos módulos, distâncias entre fileiras e a integração com a rede elétrica.

A escolha dos módulos deve considerar as características climáticas da região, como incidência solar e temperatura ambiente, já que esses fatores influenciam diretamente a eficiência do sistema. Em locais de alta irradiação, como regiões desérticas, a instalação de módulos bifaciais com rastreadores solares pode ser uma escolha vantajosa, aumentando a produção de energia em até 32% em condições ensolaradas (Zaghba et al., 2024).

Figura 6 - Esquema da Disposição de Módulos com Rastreadores solares



Fonte: Solar Motors, 2024.

A distância entre fileiras de módulos deve ser calculada de forma a evitar sombreamento entre os módulos ao longo do dia, garantindo que cada fileira receba a maior quantidade de luz solar direta possível. O espaçamento adequado entre as fileiras depende da latitude da usina e da inclinação dos módulos. A fórmula para calcular o espaçamento mínimo entre fileiras pode ser dada por:

$$D = \frac{H}{\tan(\alpha)}$$

Onde:

- D é a distância entre as fileiras,
- H é a altura da fileira,
- α é o ângulo solar no ponto de menor incidência (solstício de inverno, geralmente).

Em latitudes mais altas, o espaçamento entre fileiras precisa ser maior devido ao ângulo mais baixo de incidência solar no inverno. Em sistemas com rastreadores solares, o espaçamento pode ser reduzido, uma vez que os módulos se ajustam para evitar sombreamentos indesejados (Khairullah et al., 2023).

A integração eficiente com a rede elétrica envolve o uso de inversores adequados e uma infraestrutura de transmissão que permita a injeção da energia gerada de forma estável. Para usinas de minigeração, recomenda-se o uso de inversores centrais de alta potência, capazes de lidar com grandes volumes de energia. Além disso, a proteção contra variações de tensão e frequências da rede é fundamental para garantir a segurança do sistema. Deve-se optar por inversores centrais ou string, dependendo da configuração do projeto. Inversores com capacidade de rastreamento máximo de potência (MPPT) são essenciais para maximizar a eficiência energética (Sukma, 2023). A usina deve estar equipada com sistemas de proteção contra sobrecargas e variações de tensão, conforme as normas da ANEEL e da NBR 5410, que regulamentam a conexão de usinas solares à rede elétrica. Os disjuntores e dispositivos de proteção devem ser capazes de isolar a usina em caso de falha na rede.

A ventilação natural entre os módulos pode ser uma solução eficaz em áreas com boa circulação de ar, reduzindo a necessidade de sistemas de resfriamento mais complexos. A relação entre a velocidade do vento e a temperatura dos módulos fotovoltaicos deve ser considerada na escolha do layout da usina.

O monitoramento contínuo da operação da usina é fundamental para garantir sua eficiência e detectar falhas de forma rápida. O uso de sistemas de monitoramento em tempo real, permite o acompanhamento das variáveis climáticas e elétricas, como temperatura, irradiância, corrente e tensão. Esses sistemas devem ser capazes de ajustar automaticamente os parâmetros de operação para otimizar a produção de energia, como sugerido por Afraz et al. (2023), que demonstram o impacto positivo do monitoramento climático integrado em sistemas com rastreadores solares.

A construção de usinas fotovoltaicas também deve levar em conta o impacto ambiental local, especialmente em áreas rurais ou ecossistemas sensíveis. A escolha do local para a instalação da usina deve evitar áreas de preservação ambiental ou habitats de espécies ameaçadas. Além disso, é fundamental que o projeto da usina inclua sistemas de drenagem adequados, para evitar problemas com enchentes ou acúmulo de água na área da usina (Bošnjaković et al., 2023). Os materiais utilizados na construção, como os módulos fotovoltaicos e as estruturas de suporte, devem ser escolhidos com base na sua durabilidade e reciclabilidade. O uso de materiais recicláveis, como o alumínio, pode reduzir a pegada de carbono da usina e contribuir para a sustentabilidade do projeto.

A manutenção preventiva e corretiva é essencial para garantir a longevidade e eficiência da usina fotovoltaica. Além da limpeza regular dos módulos, é necessário monitorar o desempenho dos inversores, dos sistemas de proteção e dos rastreadores solares, quando

presentes. A substituição de componentes danificados ou com desempenho abaixo do esperado deve ser feita de acordo com as recomendações dos fabricantes e as normas técnicas vigentes.

2.6 ESTADO DA ARTE

Silva e Urbanetz Junior (2020) avaliaram a produtividade de dois módulos fotovoltaicos, um instalado em uma estrutura fixa e outro com rastreador de um eixo azimutal. Para maior precisão na análise, utilizou-se um programa de mapeamento solar em 3D, permitindo a identificação detalhada do percurso solar. O estudo apontou ganhos energéticos entre 18% e 35%, dependendo da estação do ano.

Segundo a Abinee (2012), em usinas de grande porte, é comum o uso de rastreadores solares acoplados à estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos, permitindo o direcionamento do gerador ao longo da trajetória solar. Esse sistema possibilita um aumento na produção de energia de aproximadamente 23% para rastreadores de um eixo e 28% para aqueles de dois eixos.

Lima e Sarrade (2016) realizaram um estudo sobre a aplicação de rastreadores solares de um eixo horizontal, analisando diferentes orientações e razões de cobertura do solo (CGR) no estado de Pernambuco. Por meio de simulações em software, verificou-se um aumento de eficiência de pelo menos 29,5% ao ano em comparação com um sistema fixo.

Silva e Rampinelli (2016) investigaram a correlação entre o aumento da geração de energia elétrica e a componente direta da radiação solar em sistemas com rastreadores de dois eixos e fixos. Os resultados demonstraram uma relação entre esses fatores, evidenciando ganhos no fator de capacidade (FC) entre 3,5% e 7,2%, além de um aumento na produtividade do sistema de 305 kWh/kW a 627 kWh/kW.

Frosi (2018) analisou o desempenho de um sistema fotovoltaico fixo e outro com rastreador de dois eixos, ambos localizados em Farroupilha, no Rio Grande do Sul. O objetivo foi avaliar o incremento real do rastreador de dois eixos em substituição ao sistema fixo ao longo de 21 dias, nos meses de setembro e outubro de 2017. Os resultados indicaram que o sistema com rastreador apresentou um desempenho médio 25% superior ao fixo, chegando a um aumento de até 36% em dias com pouca nebulosidade.

3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

Este trabalho consiste em realizar simulações utilizando o software PVsyst para avaliar a geração anual de energia de duas usinas fotovoltaicas, ambas com capacidade instalada de 7 MWp, localizadas em Minas Gerais, com aproximadamente 145 km de distância entre elas. As usinas possuem características idênticas em termos de potência, número de módulos e inversores, diferindo apenas na tecnologia de fixação dos módulos fotovoltaicos: uma usina utiliza mesas fixas, enquanto a outra adota rastreadores solares. A metodologia adotada segue os seguintes passos:

- **Coleta de dados:** Para realizar as simulações, foram levantados dados meteorológicos da região de instalação das usinas, incluindo radiação solar, temperatura ambiente e outras variáveis relevantes, obtidos de bancos de dados como o CRESESB e Meteonorm. Estes dados são fundamentais para a correta parametrização do PVsyst.
- **Simulação da geração de energia:** A simulação foi realizada para um período de um ano completo, levando em consideração as perdas térmicas, sombreamentos, e eficiência dos módulos e inversores. O PVsyst gerou os resultados da produção anual estimada de energia (em MWh) para ambos os sistemas.
- **Comparação dos resultados:** Com base nos resultados das simulações, foi realizada uma comparação detalhada entre a produção de energia das duas usinas. A análise considerou a quantidade total de energia gerada, a eficiência dos sistemas e o impacto do uso dos rastreadores em comparação à mesa fixa.

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS USINAS FOTOVOLTAICAS

O diagrama unifilar das usinas fotovoltaicas é uma representação simplificada do sistema elétrico, mostrando a interligação dos principais componentes desde os módulos fotovoltaicos até o ponto de conexão à rede elétrica. Ele detalha o fluxo de energia gerada, passando pelos inversores, transformadores, e dispositivos de proteção, permitindo uma visualização clara da estrutura do sistema e de como a energia é conduzida até o ponto de entrega.

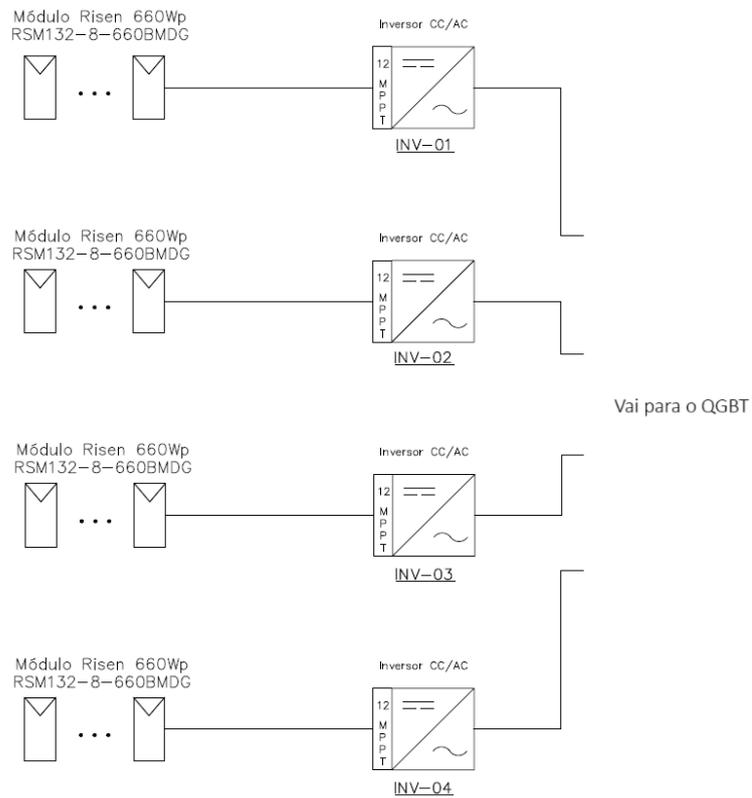
Cada usina é separada em 5 blocos de geração diferentes. Cada bloco possui um arranjo fotovoltaico com 1,4MWp de potência. Os principais equipamentos de cada bloco são compostos por:

- 2128 módulos fotovoltaicos, com potência nominal de 660Wp. Nas duas usinas foram utilizados o modelo RSM132, fabricado pela RISEN.
- 4 inversores com corrente nominal MPPT de 40A e a faixa de tensão de funcionamento entre 500~1500V, gerando assim uma tensão de saída em 800V. Em Curvelo, o modelo utilizado foi o SP-250K-H, fabricados pela SINENG, mesmo fabricante do modelo SP-275K-H, utilizado em Caeté.
- 1 QGBT composto por 4 chaves fusíveis trifásicas de corrente nominal de 250A cada (uma para cada saída CA-BT dos inversores), e um disjuntor geral caixa moldada trifásico com corrente nominal de 1250A.
- 1 transformador à óleo trifásico com potência de 1000kVA, tensão de 800V no primário e 13800V no secundário.
- 1 cabine de medição blindada, com 3 TPs de 15kV e 3 TCs de 13,8kV, um relé de proteção, um disjuntor tripolar à vácuo de 400A e um medidor bidirecional da CEMIG.

O sistema de interligação entre os módulos é realizado por séries fotovoltaicas compostas por 27 módulos.

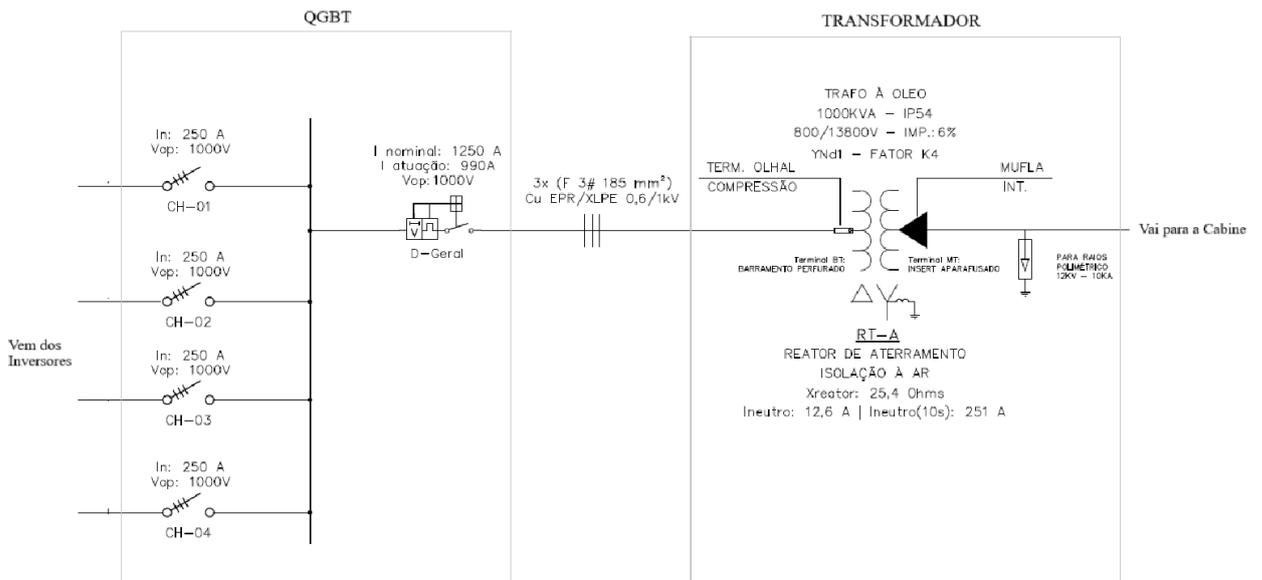
A usina que faz o uso de estruturas fixas para os módulos fotovoltaicos, usa o equipamento do fabricante Romagnole, com inclinação de 20° e os módulos voltados para o norte geográfico. Já a outra usina, que utiliza estruturas de rastreamento, usa o modelo STI-H250 da STi Norland, com capacidade de variação de inclinação entre -50° e +50° no sentido leste-oeste.

Figura 7 – Diagrama de interligação entre Módulos Fotovoltaicos e Inversores



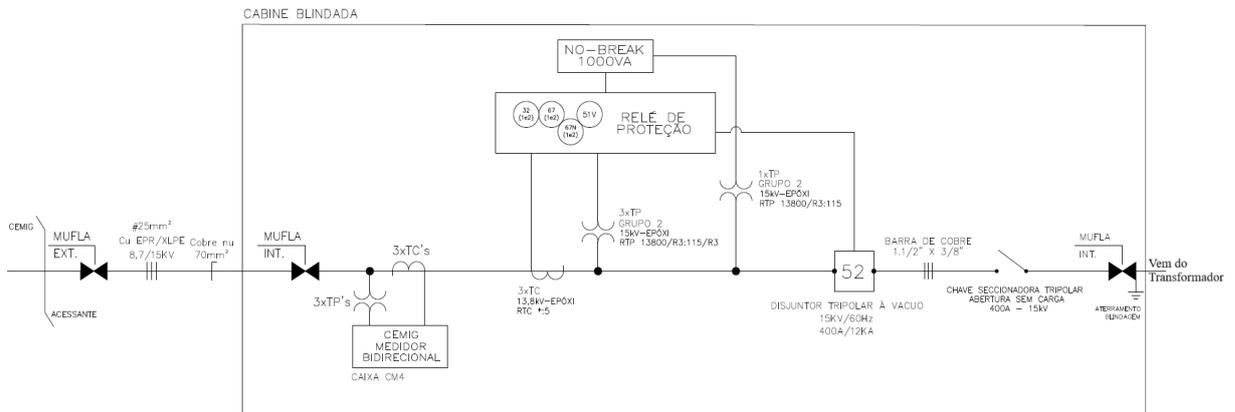
Fonte: Autor, 2024.

Figura 8 - Diagrama de interligação entre QGBT e Transformador



Fonte: Autor, 2024.

Figura 9 - Diagrama de interligação entre Cabine de Medição e Ponto de Conexão com a CEMIG

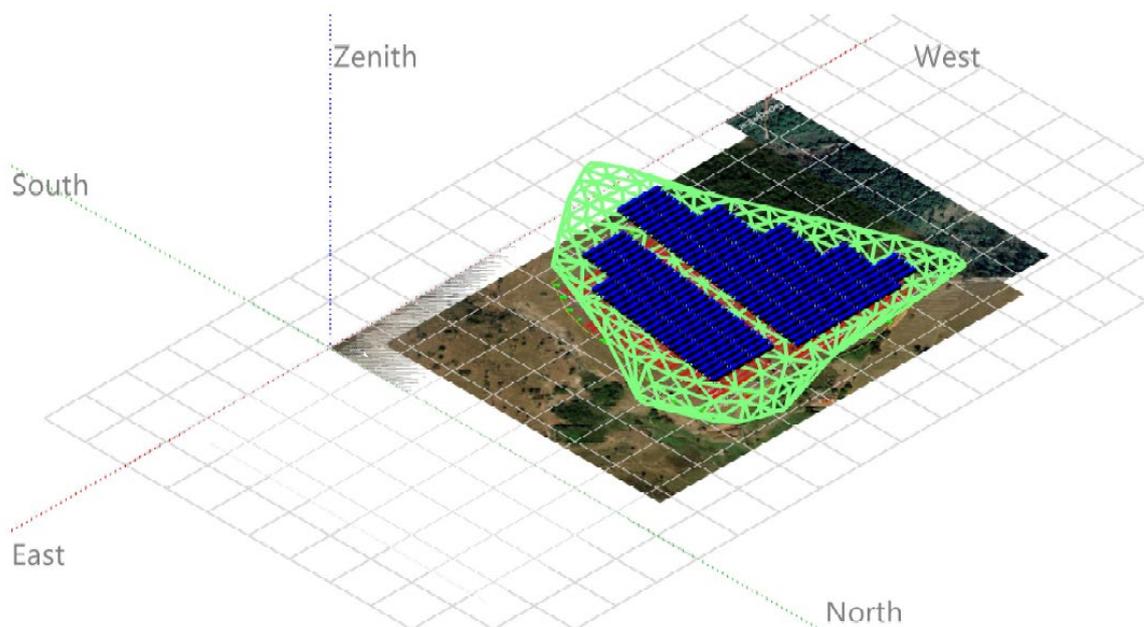


Fonte: Autor, 2024.

3.1.1 LAYOUT GERAL DAS USINAS

Para uma melhor compreensão do posicionamento e orientação das usinas fotovoltaicas analisadas, são apresentados a seguir os layouts gerais das duas usinas em relação aos eixos cardeais. O correto alinhamento dos módulos solares é um fator crítico para maximizar a captação da radiação solar, impactando diretamente na eficiência e na geração de energia.

Figura 10 – Layout Geral da Usina em Caeté com a utilização de Estruturas de Mesa Fixa

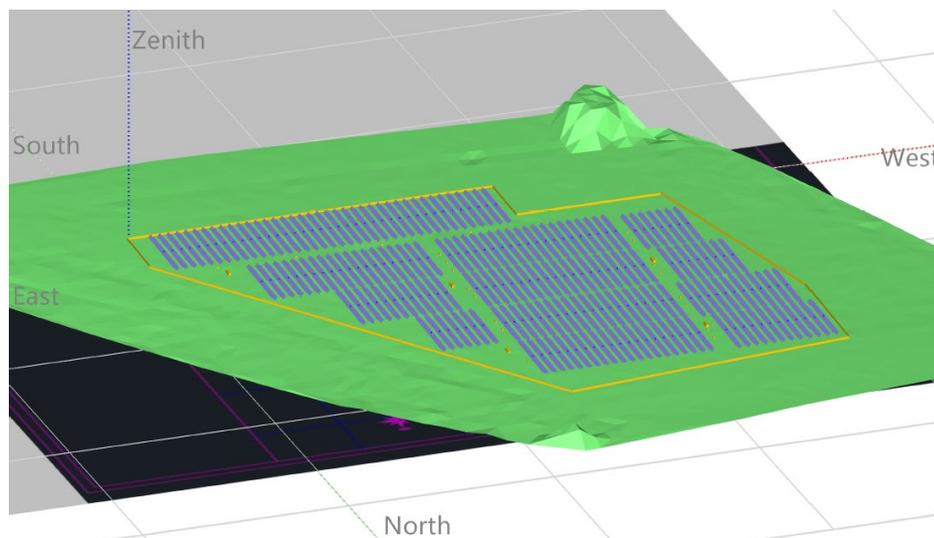


Fonte: Autor, 2024.

Na figura anterior, é possível observar que os módulos fotovoltaicos da usina com mesa fixa estão orientados em direção ao norte geográfico, com uma inclinação fixa, conforme as boas práticas para instalações no hemisfério sul. Essa orientação otimiza a captação da radiação solar ao longo do dia, permitindo que os módulos absorvam a maior quantidade possível de energia solar.

Já no caso da usina equipada com rastreadores solares, indicado na próxima figura, o layout destaca o movimento dos módulos no sentido Leste-Oeste, com inclinação variável ao longo do dia. Esse sistema de rastreamento solar ajusta a posição dos módulos de acordo com o ângulo do sol, garantindo uma captação mais eficiente da radiação solar desde o amanhecer até o final da tarde.

Figura 11 – Layout Geral da Usina em Curvelo com a utilização de Rastreadores Solares



Fonte: Autor, 2024.

3.2 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS NOS LOCAIS DAS USINAS

Conforme já mencionado aqui neste trabalho, as condições climáticas são fatores fundamentais no desempenho de usinas fotovoltaicas, uma vez que a radiação solar, a temperatura ambiente e outros parâmetros atmosféricos influenciam diretamente a eficiência e a produção de energia dos sistemas fotovoltaicos. Dentre esses fatores, a irradiância solar é o mais crítico, pois determina a quantidade de energia disponível para ser convertida pelos módulos em eletricidade. A variação dessa condição meteorológica ao longo do ano impacta diretamente o rendimento das usinas e pode trazer diferenças significativas na geração de energia entre os meses.

Neste trabalho, serão analisadas duas usinas de 7 MWp localizadas em diferentes cidades de Minas Gerais:

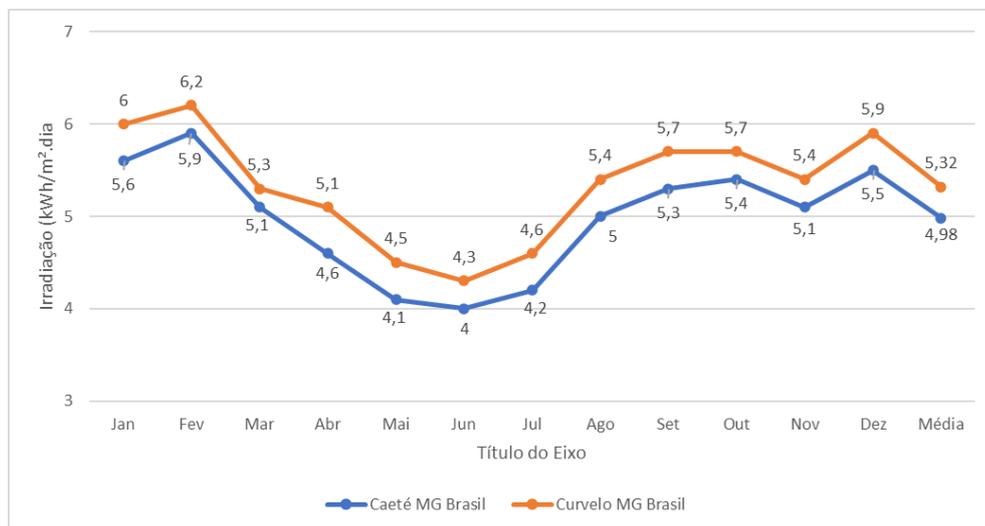
- Caeté – Estrutura composta por mesa fixa;
- Curvelo – Estrutura composta por rastreador solar;

Embora ambas compartilhem características semelhantes em termos de capacidade instalada e configuração técnica, as condições meteorológicas das regiões onde estão situadas podem resultar em variações na geração de energia.

Para este estudo, os dados meteorológicos foram extraídos do banco de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), uma das fontes mais confiáveis para informações sobre irradiância solar no Brasil. O Cresesb, vinculado ao CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), é uma referência em termos de fornecimento de dados confiáveis sobre a distribuição da irradiância solar em todo o território brasileiro, sendo amplamente utilizado para estudos e projetos no setor de energias renováveis.

A seguir, a figura 14 apresenta as irradiâncias para ambas as cidades:

Figura 12 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Caeté e Curvelo



Fonte: Adaptado de Cresesb, 2024.

Observa-se que a localização da usina em Caeté, equipada com mesa fixa, apresentou uma irradiância solar média anual de 4,98 kWh/m²/dia, enquanto que, em Curvelo, com a usina que utiliza rastreadores solares, registrou uma irradiância média superior de 5,32 kWh/m²/dia. Além disso, em quase todos os meses do ano, Curvelo apresentou valores de irradiância

superiores em comparação com Caeté. Essa diferença na disponibilidade de radiação solar impacta diretamente na produção de energia das usinas, sendo um ponto central nas simulações conduzidas.

A maior disponibilidade de irradiância em Curvelo favorece a usina com rastreadores solares, que, além de acompanhar o movimento do sol ao longo do dia, se beneficia da maior quantidade de radiação disponível na região. Isso resulta em um aumento da eficiência do sistema e maior geração de energia quando comparado à usina de mesa fixa em Caeté, onde a menor irradiância limita a produção de energia, mesmo que a usina seja bem orientada.

3.3 PVSYST

Para realizar as simulações analisadas neste estudo, foi utilizado o PVsyst, um software amplamente reconhecido como uma das ferramentas mais robustas e precisas para o dimensionamento, simulação e análise de sistemas fotovoltaicos. Esta ferramenta é utilizada mundialmente por profissionais da área de energia solar para modelar o desempenho de usinas solares em diferentes condições climáticas e configurações técnicas.

O PVsyst permite a inserção de uma vasta gama de parâmetros, como dados de irradiância solar, temperatura ambiente, características dos módulos fotovoltaicos, inversores, e outros componentes do sistema. Além disso, o software integra bases de dados meteorológicos, permitindo a simulação do comportamento do sistema fotovoltaico em condições reais, o que torna suas estimativas de geração de energia altamente confiáveis.

No contexto deste trabalho, o software foi configurado para considerar as especificidades de cada usina, como a tecnologia de mesa fixa utilizada em Caeté e os rastreadores solares instalados em Curvelo.

A figura 13, apresenta as opções de parametrização referente à orientação dos módulos fotovoltaicos. É possível observar que são necessárias informações como inclinação da fila fotovoltaica, azimute e espaçamento entre os eixos.

Figura 13 – Opções de parametrização referente à orientação dos módulos no PVsyst

Fonte: Autor, 2024.

O PVsyst também oferece relatórios detalhados que incluem, além da estimativa de geração de energia, informações sobre perdas do sistema, como sombreamento, desempenho dos inversores, e outros fatores que influenciam a produção final de energia. Isso possibilita uma análise mais rigorosa do comportamento do sistema fotovoltaico ao longo do tempo

A figura 14 mostra que o software permite configurar detalhadamente os componentes do sistema fotovoltaico, garantindo que o projeto esteja otimizado para as condições específicas da usina. A tela de parametrização do sistema oferece opções como:

- **Seleção do Módulo Fotovoltaico:** Escolha do modelo de módulo com base em especificações técnicas, como potência nominal, eficiência, coeficientes de temperatura e tipo de tecnologia.
- **Seleção do Inversor:** Configuração do modelo de inversor, considerando sua tensão de funcionamento, potência global e frequência de funcionamento.
- **Número de Módulos e Séries:** Configuração da quantidade de módulos conectados em série e em paralelo, garantindo o equilíbrio entre tensão e corrente dentro das faixas suportadas pelos inversores.

Figura 14 – Opções de parametrização referente ao sistema da usina no PVsyst

The screenshot displays the PVsyst configuration interface, organized into several sections:

- Sub-grupo:**
 - Nome e orientação do sub-grupo: Nome "PV Array", Ordem "1", Oriente "Tracker, eixo inclinado".
 - Ajuda para o dimensionamento: "Sem pré dim." selecionado, "Pnom desejado" 0,0 kWp, "ou superfície disponível(módulos)" 0 m².
- Seleção do módulo FV:**
 - Disponíveis: Filtro "Todos os módulos FV", "Módulo bifacial" selecionado, "Sistema bifacial" selecionado.
 - Seleção: "Risen Energy Co., Ltd", "660 Wp 32V Si-mono RSM132-8-660BMDG", "Desde 2022", "Manufacturer 2022".
 - Utilizar otimizador: .
 - Dimens. das tensões: Vmpp (60°C) 33,3 V, Vco (10°C) 47,8 V.
- Seleção do inversor:**
 - Disponíveis: Tensão de saída "800 V Tri 50Hz", "50 Hz" e "60 Hz" selecionados.
 - Seleção: "SINENG ELECTRIC CO.", "250 kW 880 - 1360 V TL 50/60Hz SP-250H1".
 - N.º de inversores: "4", "Tensão de funcionamento: 880-1360 V", "Potência global inv. 1000 kWca".
 - Utilize multi-MPPT: .
 - Tensão máxima entrada: "1500 V", "inversor com 12 MPPT".
 - Partilha de potência neste inversor: **Partilha de potência neste inversor**.
- Dimensionamento do grupo:**
 - Número de módulos e strings: "Mod. em série" 27 (entre 27 et 31), "Nr. strings" 80.
 - Perdas sobre-pot.: 4,7 %, "Rácio Pnom" 1.43.
 - Dimensionamento: Botão "Dimensionamento".
 - Condições de funcionamento:

Vmpp (60°C)	898 V
Vmpp (20°C)	1040 V
Vco (10°C)	1290 V
 - Irradiân. no plano: 1000 W/m².
 - Max. dados vs STC: "Max. dados" selecionado.
 - Potênc. Máx. em funcionamento: 1454 kW (em 1118 W/m² e 50°C).
 - Potência nom. grupo (STC): 1426 kWp.

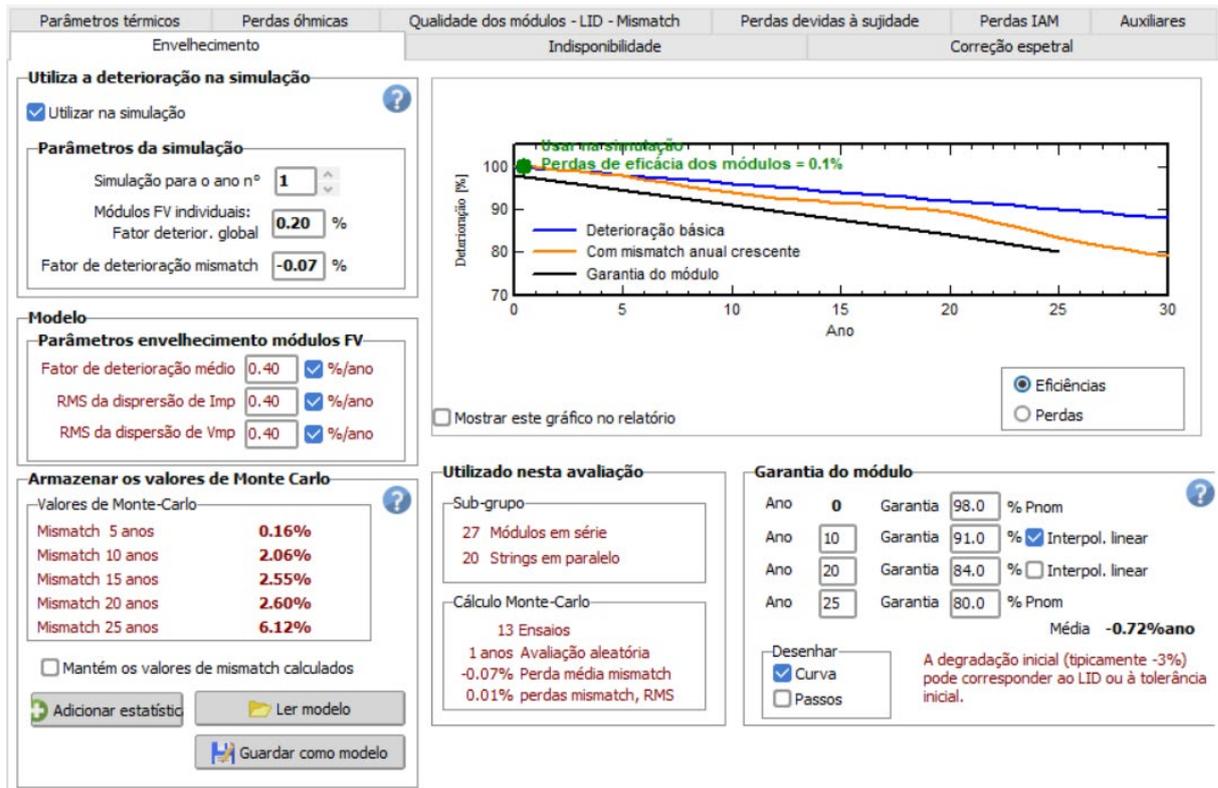
Fonte: Autor, 2024.

Um dos recursos mais importantes do PVsyst é a possibilidade de configurar detalhadamente as perdas associadas ao sistema fotovoltaico. Essas perdas representam fatores reais que afetam a eficiência e a produção de energia da usina. Na tela de configuração de perdas, é possível ajustar parâmetros como:

- **Parâmetros Térmicos:** Impacto da temperatura no desempenho dos módulos, considerando as condições climáticas do local e o coeficiente de temperatura dos módulos.
- **Perdas Ôhmicas:** Perdas causadas pela resistência elétrica nos cabos de corrente contínua (DC) e alternada (AC), que variam conforme o comprimento e a seção dos cabos.
- **Qualidade dos Módulos e Mismatch:** Perdas associadas a variações na qualidade dos módulos e ao desbalanceamento elétrico entre os módulos conectados em série.
- **Perdas por Sujidade:** Redução na produção de energia devido ao acúmulo de poeira, sujeira ou detritos sobre os módulos.
- **Envelhecimento:** Degradação dos módulos ao longo do tempo, com base em taxas estimadas de perda anual de eficiência.

A figura 15 exemplifica a interface do PVsyst para inserir e ajustar esses dados, permitindo a modelagem precisa das condições reais da usina. Essa análise detalhada é crucial para prever a produção de energia com maior precisão e planejar estratégias de manutenção que minimizem perdas ao longo da vida útil do sistema.

Figura 15 – Opções de parametrização referente às perdas do sistema simulado no PVsyst



Fonte: Autor, 2024.

O PVsyst também oferece relatórios detalhados que incluem, além da estimativa de geração de energia, informações sobre perdas do sistema, como sombreamento, desempenho dos inversores, e outros fatores que influenciam a produção final de energia. Isso possibilita uma análise mais rigorosa do comportamento do sistema fotovoltaico ao longo do tempo.

O software utiliza o cálculo do PR (Performance Ratio), como uma de suas principais métricas para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos. O PR é uma medida importante, calculado a partir da relação entre a energia efetivamente produzida pelo sistema e a energia que seria teoricamente gerada, levando em conta a irradiância solar disponível e a capacidade nominal instalada. Para isso, é considerando todas as perdas que ocorrem ao longo do processo, como perdas por sombreamento, eficiência dos inversores, mismatch, e perdas térmicas.

A fórmula utilizada para calcular o PR no PVsyst é:

$$PR = \frac{E \cdot G}{P_{nom} \cdot H_{POA}}$$

Onde:

- PR é a Performance Ratio,
- E é a energia produzida pelo sistema,
- G é a irradiância global de referência,
- P_{nom} a potência nominal do sistema e
- H_{POA} é a irradiação do plano dos módulos.

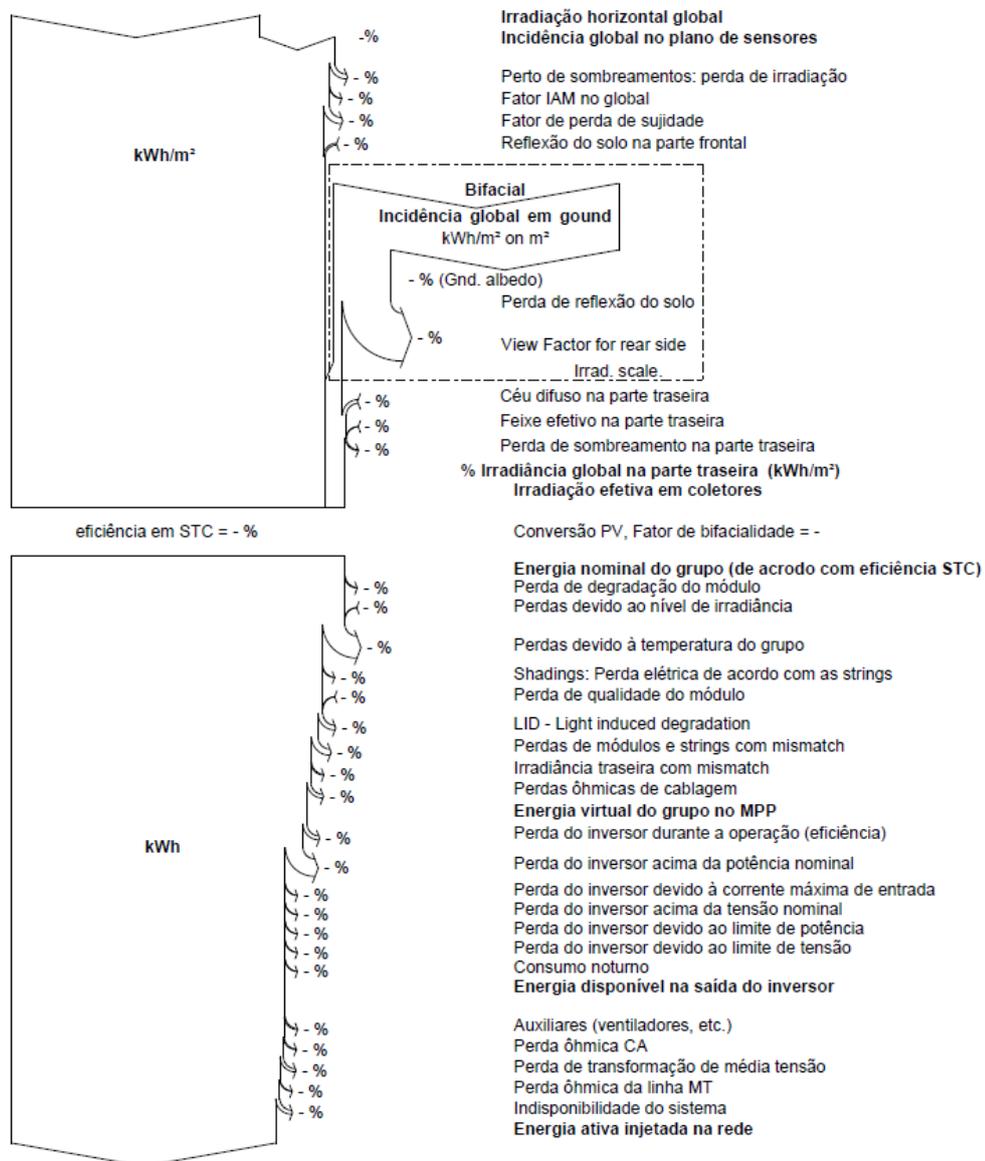
3.3.1 DIAGRAMA DE PERDAS NO PVSYST

O PVsyst inclui em suas simulações um diagrama de perdas que representa graficamente as diversas perdas ao longo do processo de conversão da energia solar em energia elétrica utilizável. Esse diagrama se faz importante para análise deste trabalho, já que permite uma visualização detalhada das principais etapas do sistema e das reduções na produção de energia em cada uma delas, desde a captação da radiação solar até a entrega da energia à rede.

As perdas começam com a captação da irradiância, que é afetada por fatores como o ângulo de inclinação dos módulos, a orientação e o sombreamento. No PVsyst, essas perdas são contabilizadas, permitindo uma simulação realista. Em condições reais, o sombreamento parcial de módulos ou a instalação inadequada pode reduzir a captação da radiação solar.

A figura 16 apresenta o diagrama do fluxo das perdas do sistema, de forma a facilitar o entendimento da sequência das perdas que envolvem um sistema real e que serão aplicados nas duas usinas analisadas aqui neste trabalho.

Figura 16 – Diagrama de Perdas do Sistema



Fonte: PVsyst, 2024.

Outro aspecto importante no diagrama de perdas é a eficiência dos componentes do sistema, como os inversores e cabos. O software calcula as perdas de conversão dos inversores e as perdas resistivas nos cabos, refletindo as limitações reais que ocorrem em qualquer sistema fotovoltaico. Em instalações reais, essas perdas são inevitáveis, mas podem ser minimizadas por um correto dimensionamento dos componentes e uma manutenção adequada.

Já as perdas por *mismatch*, ocorrem quando há variação de desempenho entre os módulos em uma mesma série, devido a diferenças de fabricação, degradação, sujeira ou sombreamento parcial. Essas discrepâncias entre os módulos afetam o rendimento da série

como um todo, pois a série fotovoltaica passa a funcionar na capacidade do módulo com menor desempenho.

Além disso, o PVsyst considera perdas térmicas, que ocorrem devido ao aquecimento dos módulos, especialmente em regiões de alta irradiância. Quando a temperatura dos módulos aumenta, sua eficiência cai, resultando em menor geração de energia. Essa perda térmica é comum em sistemas fotovoltaicos instalados em áreas com temperaturas elevadas e deve ser levada em conta no projeto.

Por fim, há as perdas relacionadas à disponibilidade do sistema e à degradação dos módulos. Em situações reais, o desempenho do sistema pode ser comprometido por paradas técnicas ou falhas nos equipamentos, além da degradação natural dos módulos ao longo dos anos, o que também é considerado no diagrama de perdas do PVsyst.

O diagrama de perdas no PVsyst, portanto, não só ilustra as perdas teóricas, mas também reflete as situações reais que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, apresentando uma visão detalhada de onde estão os principais pontos de ineficiência e como esses fatores influenciam a produção final de energia.

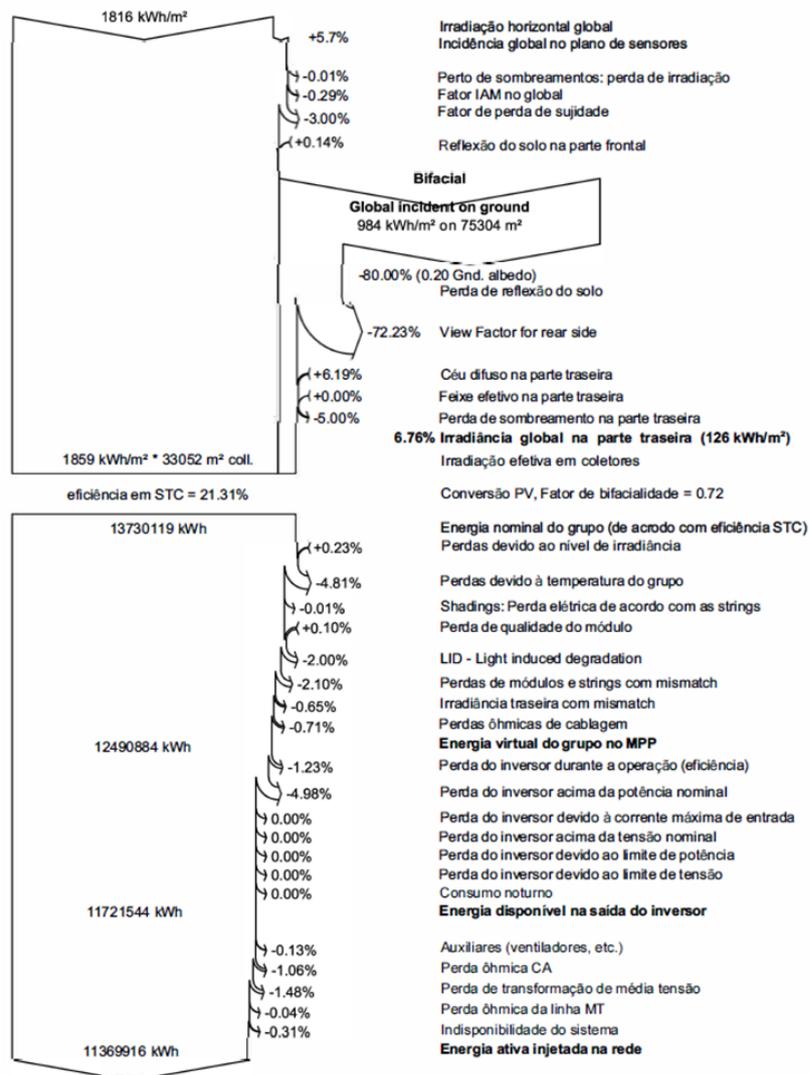
4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos das simulações de geração de energia realizadas no PVsyst para as usinas fotovoltaicas de Caeté e Curvelo.

5.1 USINA FOTOVOLTAICA COM ESTRUTURA FIXA EM CAETÉ

A Figura 17 apresenta o diagrama de perdas da usina de Caeté, que ilustra as perdas associadas às diversas etapas do processo de conversão de energia solar em eletricidade.

Figura 17 – Diagrama de perdas do sistema da usina de estrutura fixa em Caeté



Fonte: Autor, 2024.

As perdas em sistemas com estruturas fixas são geralmente atribuídas a fatores como sombreamento, sujeira nos módulos e perdas térmicas. Além disso, a eficiência de conversão

também pode ser afetada pela posição fixa dos módulos, que não otimizam a captura de irradiância ao longo do dia.

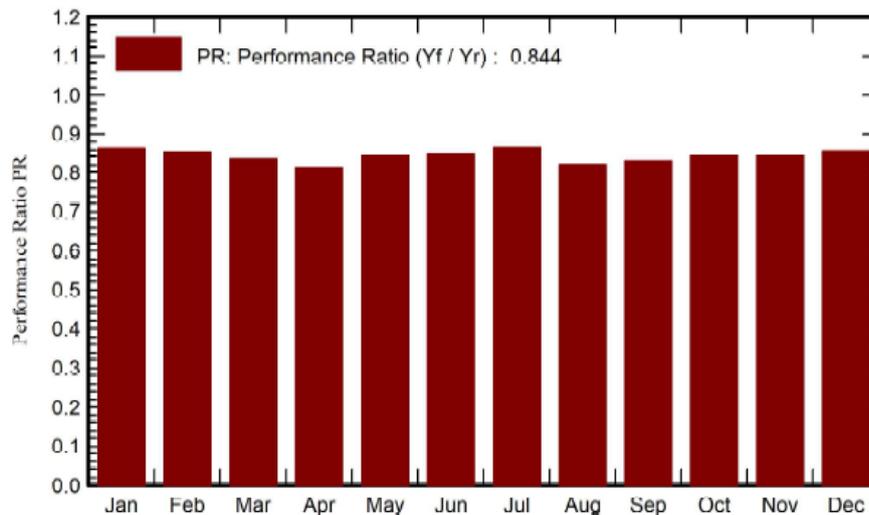
Tabela 1 – Geração de energia nominal e simulada com as perdas reais em Caeté

Geração de energia em Caeté	
Nominal	13.730,12 MWh/ano
Pós perdas	11.369,92 MWh/ano

Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar a tabela 1, observamos que existe uma diferença de 17% entre o potencial teórico e a realidade observada. Essa variação é comum em sistemas fotovoltaicos e decorre de diversas perdas durante o processo de conversão de energia.

Figura 18 – Gráfico de Performance Ratio por meses do ano na usina de Caeté



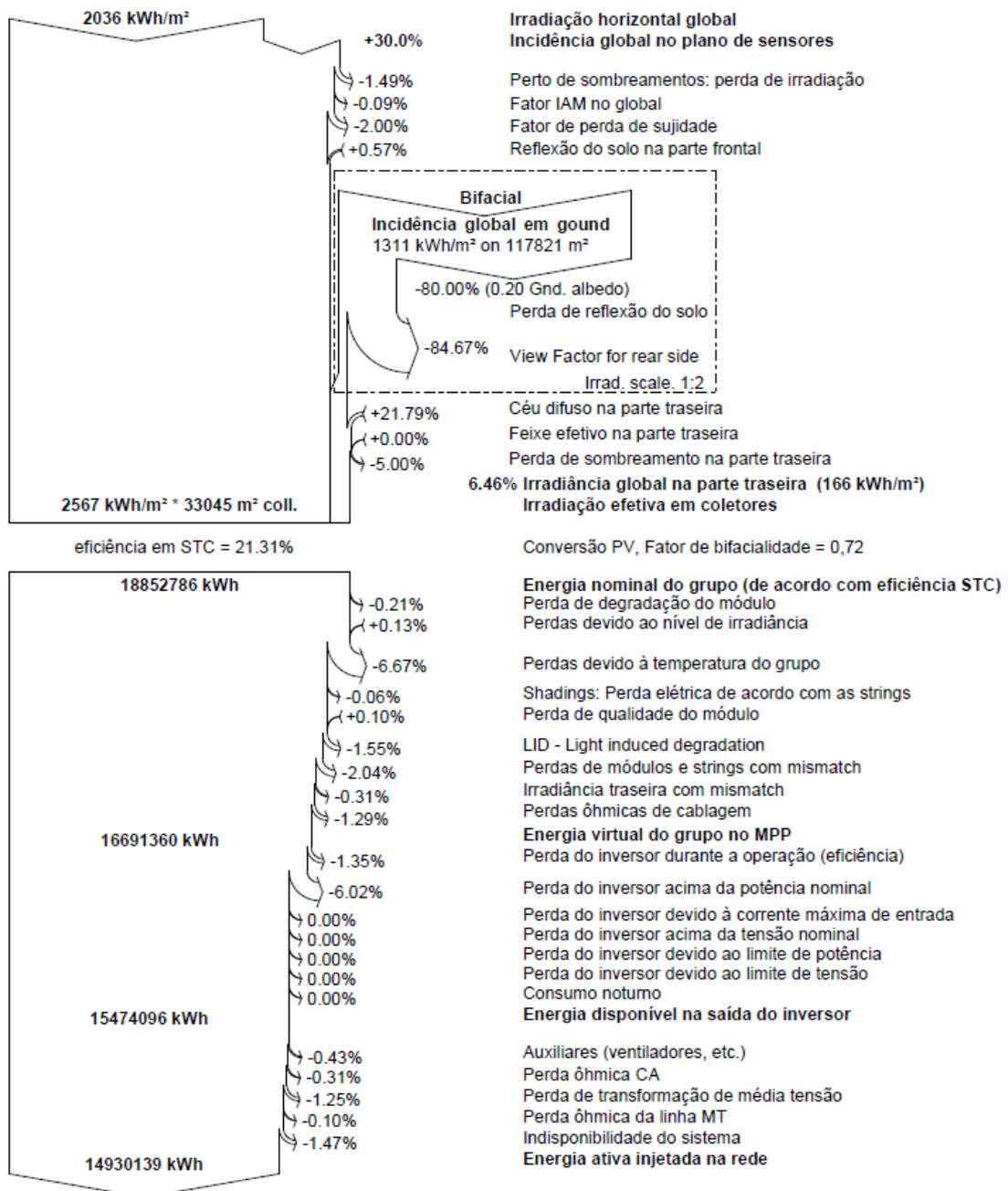
Fonte: Autor, 2024.

O índice de performance anual (PR) da usina de Caeté, calculado através das simulações realizadas no software PVsyst, é de 84,4%. Esse número é um parâmetro essencial para avaliar a eficiência do sistema na conversão da irradiância solar disponível em energia elétrica utilizável. Um PR acima de 80% é normalmente visto como aceitável, indicando que a usina opera de forma eficiente, apesar das perdas que possam ocorrer.

4.2 USINA FOTOVOLTAICA COM RASTREADOR SOLAR EM CURVELO

A Figura 19 apresenta o diagrama de perdas da usina de Curvelo, que ilustra as perdas associadas às diversas etapas do processo de conversão de energia solar em eletricidade. Esta usina conta com 190 estruturas de rastreadores solares.

Figura 19 – Diagrama de perdas do sistema da usina de estrutura fixa em Curvelo



Fonte: Autor, 2024.

A tabela 2 resume a discrepância entre o potencial teórico e a realidade prática simulada, sendo assim uma diferença de 21% entre os dois cenários.

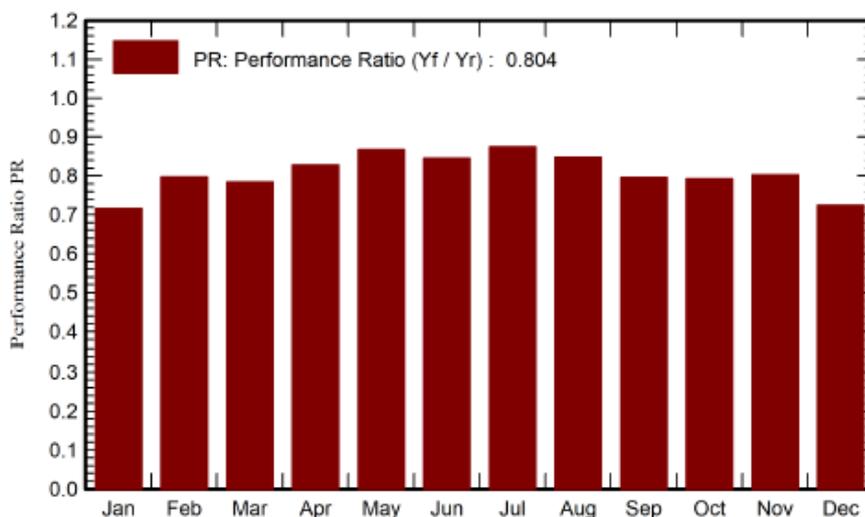
Tabela 2 – Geração de energia nominal e simulada com as perdas reais em Curvelo

Geração de energia em Curvelo	
Nominal	18.852,79 MWh/ano
Pós perdas	14.930,14 MWh/ano

Fonte: Autor, 2024.

Apesar de os rastreadores solares serem projetados para maximizar a captura de luz, ainda enfrentam perdas “clássicas” como sombreamento e eficiência dos módulos. Entretanto há de ser levado em consideração as perdas por falhas mecânicas, que diferente das estruturas fixas, demandam atenção e monitoramento constante para identificar e reparar os problemas.

Figura 20 – Gráfico de Performance Ratio por meses do ano na usina de Curvelo



Fonte: Autor, 2024.

O índice de performance anual (PR) da usina de Curvelo, obtido por meio das simulações no software PVsyst, é de 80,4%. Esse valor é um indicador importante para mensurar a eficiência do sistema na conversão da irradiância solar disponível em eletricidade utilizável.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS USINAS

Nesta seção, será realizada a comparação da produção das duas usinas fotovoltaicas de 7 MWp analisadas neste trabalho, com o objetivo de identificar a melhor opção para maximizar a geração de energia. As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados das simulações no PVsyst, abrangendo a usina com estrutura fixa em Caeté e a usina com rastreamento solar em Curvelo, ambas no estado de Minas Gerais.

Tabela 3 – Resultados gerais obtidos do PVsyst da usina de Caeté com estrutura fixa

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR Ratio
Janeiro	173,5	92,88	21,5	159	153,7	1.003.006	964.358	0.864
Fevereiro	165	79,82	21,7	159,3	154,2	995.659	956.502	0.855
Março	157	75,36	21,1	162,5	157,3	992.612	952.826	0.835
Abril	139,4	56,77	19,9	155,5	150,7	926.868	889.489	0.815
Mai	126,9	52,71	17,8	152,6	147,9	970.714	902.479	0.842
Junho	118,6	43,2	16,8	151,1	146,5	940.847	902.886	0.851
Julho	128,6	47,78	16,5	160,2	155,3	1.014.354	97.407	0.866
Agosto	155,1	47,92	17,7	161,6	176,1	1.091.225	1.047.301	0.821
Setembro	159,5	61,58	19,4	171,2	165,9	1.038.371	997.018	0.829
Outubro	168,4	72,82	20,8	168,2	162,9	1.041.168	1.000.024	0.847
Novembro	152,8	73,11	20,4	142,3	137,6	684.361	844.602	0.845
Dezembro	171,6	91,79	20,98	155,8	150,6	9.767.666	938.362	0.858
Total	1.816,40	795,73	19,54	1919,3	1858,9	11.875.948	11.369.916	0.844

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 4 – Resultados gerais obtidos do PVsyst da usina de Curvelo com rastreador solar

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR Ratio
Janeiro	205,3	88,52	24,85	257,9	250,1	1.421.188	964.358	0.716
Fevereiro	169,3	81,58	25,02	211,7	205,1	1.230.884	956.502	0.797
Março	174	76,79	24,23	219,2	212,5	1.254.847	952.826	0.784
Abril	154,8	58,54	22,8	203,1	197	1.228.051	889.489	0.829
Mai	142	47,39	20,87	193,3	187,6	1.222.850	902.479	0.868
Junho	132,9	36,49	19,46	186,7	181,4	1.201.853	902.886	0.846
Julho	148	33,87	19,23	210	204,2	1.339.005	97.407	0.875
Agosto	170,9	41,81	20,75	236,4	229,9	1.461.546	1.406	0.847
Setembro	177,7	60,91	22,01	233	226,2	1.353.274	1.301.472	0.796
Outubro	197	84,78	23,79	249,3	241,8	1.442.605	1.388.301	0.793
Novembro	175,7	88,74	23,25	218,1	211,2	1.276.809	1.229.440	0.803
Dezembro	188,1	95,46	24,41	227	219,7	1.302.876	1.156.470	0.726
Total	2.035,7	794,87	22,54	2.646	2.566,7	15.735.788	14.930.139	0.804

Fonte: Autor, 2024.

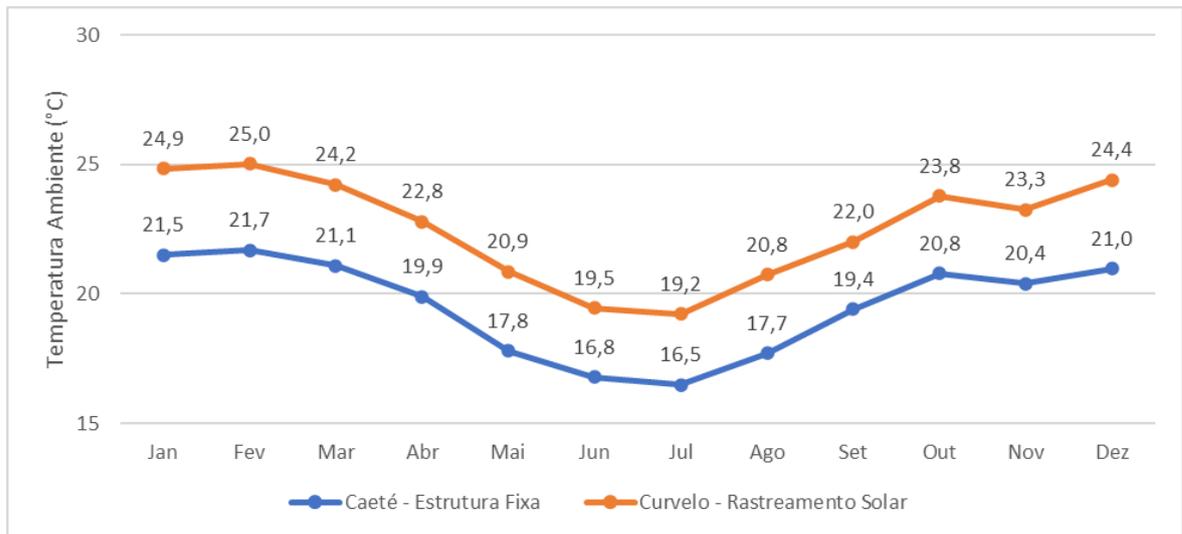
Os itens abreviados das colunas das Tabelas 3 e 4 têm os seguintes significados:

- **GlobHor**: Irradiação global horizontal, que representa a energia solar total recebida na superfície terrestre sem inclinação.
- **DiffHor**: Irradiação difusa horizontal, que mede a parcela de irradiância dispersa na atmosfera antes de chegar à superfície.
- **T_Amb**: Temperatura ambiente, fator que afeta a eficiência dos módulos fotovoltaicos.
- **GlobInc**: Incidência global no plano dos módulos, que avalia a quantidade de irradiância recebida diretamente sobre a superfície inclinada dos painéis.
- **GlobEff**: Irradiância global efetiva, corrigida para efeitos de IAM (Incidence Angle Modifier) e sombreamentos.
- **EArray**: Energia efetiva gerada na saída do arranjo fotovoltaico, antes das perdas.
- **E_Grid**: Energia final injetada na rede elétrica, após as perdas do sistema e conversões.
- **PR (Performance Ratio)**: Índice que mede a eficiência geral do sistema ao transformar a irradiância solar em eletricidade.

Ao analisar o gráfico comparativo das temperaturas ambientes entre as usinas de Caeté e Curvelo, na Figura 21, observamos diferenças significativas que podem impactar diretamente a eficiência e a geração de energia dos sistemas fotovoltaicos. Conforme já mencionado aqui neste trabalho, a temperatura ambiente é um fator crucial no desempenho de módulos fotovoltaicos, pois afeta sua eficiência: quanto maior a temperatura, menor a capacidade de conversão de energia dos módulos.

No caso de Caeté, a temperatura média ambiente ao longo do ano tende a ser mais amena em comparação com Curvelo, onde se observam picos mais elevados de temperatura em todos os meses do ano. As temperaturas mais baixas encontradas em Caeté, favorecem uma melhor performance dos módulos, permitindo uma maior eficiência na conversão de irradiância solar em energia elétrica. Já em Curvelo, as temperaturas mais elevadas ao longo do ano podem resultar em uma leve redução na eficiência dos módulos, especialmente em dias de alta irradiância.

Figura 21 – Gráfico comparativo entre as temperaturas de Curvelo e Caeté

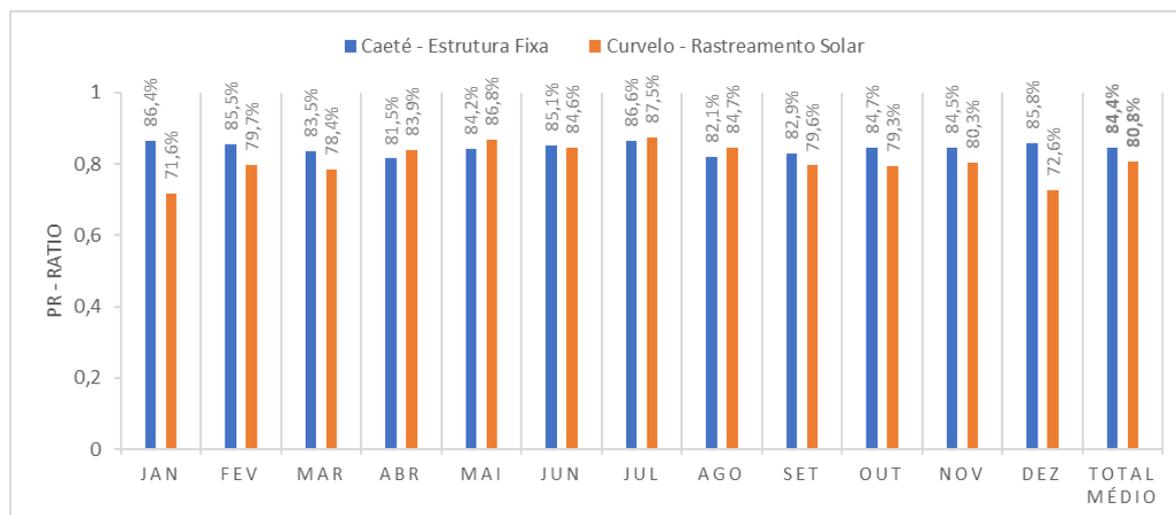


Fonte: Autor, 2024.

Já a Figura 22, apresenta o gráfico comparativo do índice de Performance Ratio (PR) das usinas analisadas aqui neste trabalho, com base nos dados extraídos do PVsyst. Os dados revelam diferenças marcantes no desempenho das usinas ao longo do ano. Nos três primeiros meses, a usina de Curvelo apresenta pior performance em relação a Caeté, refletindo as condições climáticas favoráveis da segunda, como temperaturas amenas, que contribuem para uma conversão de energia mais eficaz.

Entretanto, entre os meses de abril e agosto, por se tratarem de meses mais frios nos dois lugares, a usina de Curvelo se destaca com um PR superior, devido a uma combinação de fatores. A tecnologia de rastreamento solar, empregada em Curvelo, permite um aproveitamento mais eficiente da irradiância, mesmo em condições de temperaturas mais elevadas em relação à Caeté. Esse período coincide com meses de maior irradiância na região, quando o modelo de rastreamento eleva a captação de energia ao ajustar o ângulo dos módulos ao longo do dia, compensando parcialmente as perdas de eficiência causadas pelo calor.

Figura 22 – Gráfico de desempenho (PR) por meses do ano nas duas usinas



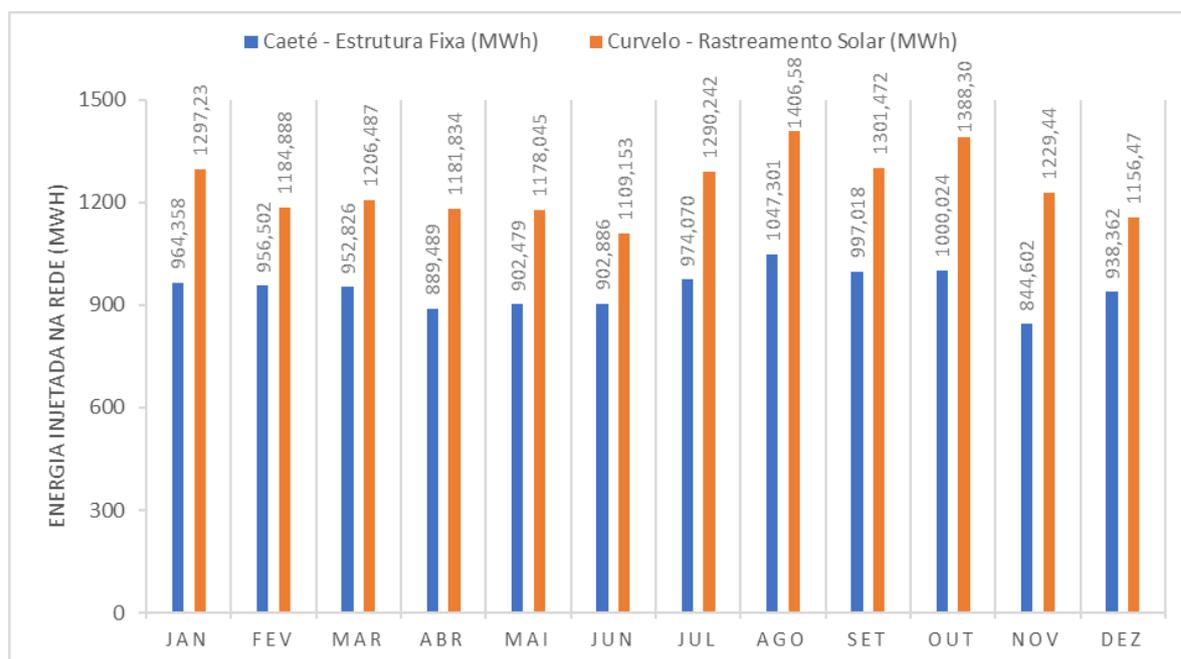
Fonte: Autor, 2024.

Entre setembro e o final do ano, a usina de Caeté volta a ter um PR superior. Essa variação pode ser explicada pelo aumento gradual das temperaturas, onde a estrutura fixa sofre menos com o impacto do calor em comparação com Curvelo. Apesar da ausência de rastreamento solar, as temperaturas mais baixas e estáveis permitem à usina operar com uma eficiência maior durante esses meses.

Essa análise demonstra como as condições sazonais, especialmente a variação de temperatura e a tecnologia de fixação dos módulos, influenciam diretamente o desempenho das usinas ao longo do ano. Em períodos mais quentes, a tecnologia de rastreadores solares compensa as perdas em Curvelo, enquanto em meses mais frios, a usina com estrutura fixa de Caeté se beneficia das condições climáticas mais favoráveis para atingir melhores resultados de performance.

Por fim, a Figura 23 apresenta os dados da energia final injetada na rede ao longo do ano entre as usinas de Caeté e Curvelo. Os valores revelam que a usina de Curvelo, equipada com rastreadores solares, supera consistentemente a de Caeté, que utiliza estrutura fixa. Em todos os meses do ano, a usina de Curvelo injeta mais energia na rede, com as diferenças variando conforme as condições climáticas e a eficiência do sistema.

Figura 23 – Gráfico de energia injetada na rede por meses do ano nas duas usinas



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 5 – Energia injetada na rede após as perdas do sistema

	Caeté - Estrutura Fixa (MWh)	Curvelo - Rastreamento Solar (MWh)	Diferença em MWh	Diferença percentual
Jan	964,358	1297,23	332,872	35%
Fev	956,502	1184,888	228,386	24%
Mar	952,826	1206,487	253,661	27%
Abr	889,489	1181,834	292,345	33%
Mai	902,479	1178,045	275,566	31%
Jun	902,886	1109,153	206,267	23%
Jul	974,070	1290,242	316,172	32%
Ago	1047,301	1406,579	359,278	34%
Set	997,018	1301,472	304,454	31%
Out	1000,024	1388,301	388,277	39%
Nov	844,602	1229,44	384,838	46%
Dez	938,362	1156,47	218,108	23%
Total	11369,917	14930,141	312,719*	33%*

* Média anual

Fonte: Autor, 2024.

Entre os meses de fevereiro e junho, a diferença entre a energia injetada pelas duas usinas se mantém relativamente estável, com Curvelo injetando, em média, 250 MWh a mais. Esse intervalo menor pode ser atribuído à maior eficiência da usina de Caeté em temperaturas mais amenas, onde a estrutura fixa apresenta um desempenho comparável ao sistema de rastreamento.

No entanto, nos meses mais ensolarados e quentes, como outubro e novembro, Curvelo apresenta um desempenho significativamente superior. Durante esse mês, a diferença chega próximo de 390 MWh, representando cerca de 40% a mais de energia injetada na rede em comparação com Caeté. Isso reflete o benefício do rastreamento solar, que permite uma captação de irradiância mais eficiente ao longo do dia, maximizando a geração de energia, especialmente em condições de maior irradiância solar.

Essa diferença ao longo do ano ressalta como a tecnologia de rastreadores solares da usina de Curvelo, que apresentou uma eficiência média anual de 33% a mais do que Caeté, proporciona uma vantagem consistente em termos de energia injetada na rede.

Entretanto, é importante considerar a diferença de irradiância entre as duas localidades. Curvelo apresenta uma irradiância média anual 12% superior à de Caeté, o que naturalmente impacta na capacidade de geração de energia e, conseqüentemente, na quantidade de energia injetada na rede.

Para garantir uma comparação justa entre as usinas fotovoltaicas, será realizada a normalização da produção de energia com base na irradiância global no plano dos módulos (GlobInc). A escolha desse parâmetro é crucial, pois permite isolar o impacto da diferença de irradiância entre as duas localidades, de forma que o desempenho das usinas seja comparado de maneira equitativa, independentemente dessa variação climática local. A irradiância no plano dos módulos reflete a quantidade de energia solar disponível para a geração de eletricidade, sem considerar perdas como o ângulo de incidência da radiação ou sombreamentos, fatores que são influenciados pelas tecnologias adotadas (mesa fixa e rastreadores solares).

Essa normalização é fundamental para avaliar o desempenho relativo das duas tecnologias, garantindo que as diferenças observadas na produção de energia sejam atribuídas às características específicas dos sistemas fotovoltaicos.

Será utilizada a seguinte equação para a normalização desse parâmetro:

$$E_{norm} = \frac{E}{H}$$

Onde:

- E_{norm} é a produção de energia normalizada (MWh/MWh/m²),
- E a produção anual de energia (MWh) e
- H é a Irradiância média anual global no plano dos módulos (MWh/m²).

A normalização da produção de energia das usinas analisadas, com base na fórmula anterior, resultou em valores distintos, conforme indicado na tabela a seguir:

Tabela 6 – Geração de energia de cada usina normalizada pela irradiância dos locais

Caeté	6,26 MWh/MWh/m ²
Curvelo	7,33 MWh/MWh/m ²

Fonte: Autor, 2024.

Com esses resultados, conclui-se que a usina que utiliza a tecnologia de rastreadores solares representa um potencial de geração de 16,5% a mais que a usina com mesas fixas, mesmo após a normalização.

Esses resultados indicam que, apesar da diferença de irradiância média entre as duas localidades, o desempenho da usina com rastreadores solares em Curvelo apresenta uma maior eficiência relativa, o que reflete o impacto das tecnologias utilizadas e a comparação entre elas em condições ambientais ajustadas.

Há de ser pontuado que, a decisão entre optar por um sistema de rastreamento solar ou um sistema fixo deve considerar não apenas o ganho em geração de energia, mas também uma análise econômica detalhada que leve em conta os custos e benefícios de cada alternativa.

4.4 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o desempenho energético seja um aspecto crucial na comparação entre sistemas com tracker e mesa fixa, a análise econômica completa é igualmente importante para decisões de investimento. Trabalhos futuros a este, podem incluir:

- **Custo Inicial:** Investigar a diferença nos custos de implementação, incluindo aquisição, transporte e instalação dos equipamentos.
- **Custo Operacional e de Manutenção:** Comparar os custos de manutenção preventiva e corretiva, destacando a maior complexidade e potencial necessidade de reparos mais frequentes em sistemas com tracker devido ao número de componentes móveis.
- **Custo do Ciclo de Vida:** Avaliar o custo total ao longo da vida útil de cada sistema, levando em conta depreciação e taxas de financiamento.

- **Receita Gerada:** Estimar a receita adicional que os sistemas com tracker podem gerar devido ao aumento da produção de energia e verificar se ela compensa os custos adicionais.

Um estudo mais detalhado pode incluir simulações financeiras considerando cenários variados, como flutuações nos preços de energia, incentivos fiscais e condições específicas do mercado local.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo sobre a construção e operação de uma usina fotovoltaica de minigeração forneceu uma análise técnica detalhada, destacando as melhores práticas para a instalação e otimização do desempenho de sistemas fotovoltaicos, com e sem rastreadores solares. Os objetivos propostos no início do trabalho foram atendidos, permitindo a compreensão das características técnicas dos principais componentes utilizados, a avaliação do impacto dos sistemas de rastreamento solar na eficiência energética, e a identificação de diretrizes técnicas essenciais para a construção e operação dessas usinas.

Um dos principais resultados deste estudo foi a constatação de que o uso de rastreadores solares, especialmente sistemas de dois eixos, pode aumentar significativamente a produção de energia em comparação com sistemas fixos. Isso é particularmente relevante em regiões com alta incidência solar, onde a eficiência desses sistemas maximiza o aproveitamento da irradiância ao longo do dia. No entanto, esse aumento de eficiência deve ser ponderado em relação ao maior custo inicial de implementação e à necessidade de manutenção mais frequente dos mecanismos de rastreamento.

Além disso, a análise das condições climáticas demonstrou a importância de fatores como temperatura e irradiação solar na eficiência dos módulos fotovoltaicos. Em regiões com altas temperaturas, por exemplo, a eficiência dos módulos pode diminuir consideravelmente. A utilização de monitoramento contínuo das variáveis climáticas também foi identificada como fator crucial para o desempenho ideal dos sistemas fotovoltaicos.

A revisão de normas técnicas, como a NBR 16274 e regulamentações da ANEEL, forneceu a base para a formulação de diretrizes práticas para a construção e operação de usinas fotovoltaicas de minigeração.

Por fim, o estudo ressalta que a escolha entre sistemas com e sem rastreadores solares deve ser baseada em uma análise custo-benefício detalhada, que leve em consideração as condições climáticas, a topografia do local e o perfil de consumo energético. Embora os rastreadores solares ofereçam vantagens em termos de aumento de eficiência, os sistemas fixos ainda podem ser uma opção viável em locais onde as condições climáticas e geográficas não justifiquem o investimento adicional.

REFERÊNCIAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** Jun., 2012.

AFRAM POLUS, Sally; ABDULLAH, Ranj Sirwan. Experimental performance evaluation of tracking photovoltaic system based on variable water flow rate with surface temperature. **Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, 2023. v. 45, n. 2, p. 5297-5309. DOI: 10.1080/15567036.2023.2209533.

ANEEL. 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/2IGf4Q0>>. Acesso em: fevereiro de 2020.1

BOŠNJAKOVIĆ, Mladen et al. Effects of Extreme Weather Conditions on PV Systems. **Sustainability**, 2023. DOI: 10.3390/su152216044.

BRASILEIRO, V.; SILVA, António Marinho da; LUIZ, Fernando; ANTUNES, Marcelo. Conversor bidirecional com três portas aplicado em sistemas autônomos e fotovoltaicos com integração à rede elétrica c.c.. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**. v. -, n. -, p. -, 2022. DOI: 10.59627/cbens.2016.1945.

CHUTANI, Ayush et al. Snow Sensing for Photovoltaic Single Axis Rastreador solar Systems. **Journal Article**, 2023. DOI: 10.1109/pvsc48320.2023.10360011.

DEBASTIANI, Gilson; NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; ACORCI, Jeferson Manenti; SIQUEIRA, Jair Antonio Cruz; SILVEIRA, Vander Fabio; SOUZA, Samuel Nelson Melegari de. Comparação do impacto da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos estáticos e com sistemas de rastreamento solar (L-O, L-O + N-S). **Research, Society and Development**. v. 11, n. 4, p. -, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i4.27220.

DUARTE. T.S. **Estudo de viabilidade de uma usina solar de 5 MW com rastreador solar.** 2021. 58 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 40, p. 85-113, dez. 2013

FIGUEIREDO, M. B. S.; MARTINS, T. M. **Comparativo Entre Usinas Fotovoltaicas: Usinas Com Sistema Rastreador solar Ou Com Estruturas Fixas.** Universidade Do Sul De Santa Catarina, Palhoça/SC, 2017.

FINKLER, Alessandro et al. **Relação do crescimento econômico e consumo de energia elétrica.** Salão do Conhecimento, 2016.

FRITSCH, L. **Dimensionamento de Usina Fotovoltaica para Autoprodução de Energia Elétrica na Indústria.** Curso de Engenharia de Energia - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FROSI, F.; CHESINI, D.; GABE, I. J.; BONA, J. C. **Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de Farroupilha - RS.** CBENS 2018 – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018, 2018.

GEHRKE, Poleana; MARTINS, Criciële C.; OLIVEIRA, Micael M.; MEDEIROS, Leonardo H. Modelos com inserção de sistemas fotovoltaicos na análise das perdas técnicas. **Congresso Brasileiro de Automática.** v. -, n. -, p. -, 2022. DOI: 10.20906/cba2022/3638.

GIL, Francisco J. G.; et al. A review of solar rastreador solar patents in Spain. In: **Wseas International Conference on Renewable Energy Sources**, 3, Tenerife-Espanha, 2009, p. 292–297.

GODINHO, Vinicius Cesar Rodrigues; SAMPAIO, Leonardo Poltronieri; SILVA, Sergio Augusto Oliveira da. Análise comparativa entre as técnicas de MPPT PSO e GSA em sistemas fotovoltaicos submetidos a condições de sombreamentos parciais. **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS.** v. -, n. -, p. -, 2021. DOI: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529827.

GONÇALVES, Gustavo Leite; SILVA, Louise Pereira da; SANTOS, Paula Rose de Araújo; CARVALHO, Monica; ABRAHÃO, Raphael. Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente. **Principia.** v. 1, n. 53, p. 103-111, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306A2020V1N53P103-111.

IRENA. **Renewable Energy Topic.** Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>. Acessada em 29 de março de 2017.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems.** 1a ed. San Diego (EUA): Elsevier, 2009.

KHAIRULLAH, Karam; MEKHILEF, Saad; RAWA, Muhyaddin. A fast and effective maximum power point tracking method under various weather conditions for grid-connected photovoltaic systems. **Proceedings Article,** 2023. DOI: 10.1109/CPERE56564.2023.10119605.

LI, Z.; LIU, X.; TANG, R. Optical performance of vertical single-axis tracked solar panels. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 64–68, 2011.

LIMA, Andrei Da Cunha; MICHELS, Leandro. Classificação de inversores fotovoltaicos sem transformador de acordo com a tensão de modo comum no lado de corrente contínua. **CONGRESSO BRASILEIRO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.** v. -, n. -, p. -, 2023. DOI: 10.53316/cbgd2023.014.

LIMA, Luiz Carlos A; SARRADE, Laurent. **Como otimizar a produção e a eficiência de usinas fotovoltaicas com o uso de rastreadores solares.** VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2016. Belo Horizonte, 2016.

MAMODIYA, Udit; TIWARI, Neeraj. Dynamic Monitoring and Analysis of Dual-Axis movement of SPV Power Plant Parameters under various Atmospheric Conditions. **International Journal of Energy and Environmental Research,** 2024. DOI: 10.37391/ijeer.12bdf03.

MARCELLO, I. C.; et al. **Análise técnico-econômica de uma usina fotovoltaica utilizando sistema de rastreadores solares com algoritmo backtracking.** 2022.

MOUSAZADEH, H.; et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800–1818, 2009.

NASCIMENTO, B. A. M. **Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar.** 2015. 2015.

OLIVEIRA, A. M., Silva, J. R., & Souza, C. L. Otimização Quantitativa de Sistemas Fotovoltaicos para Geração de Energia Elétrica. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, 2019, 34-48.

PAO HT, FU HC; Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. **Renew. Sustain. Energy**, 2018, 381-392.

PINA, J. H. M.; CORRÊA, V. J. **Implementação de Usinas Fotovoltaicas com Geração Compartilhada.** 2018.

PINHO, J. T; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro, mar. 2014.

PRINSLOO, G.; DOBSON, R. T. **Solar tracking.** Stellenbosch: SolarBoo7s. , p. 1-542, 2015.

QUEIROZ, J, R.; SOUZA, A. S.; ANDRADE, C. M. G. **Classificação de Rastreadores Solares: Uma Breve Revisão.** 2018. 8 f. Livre Docência (Engenharia Elétrica) - IFPR, Instituto Federal do Paraná, Parana, 2018.

RACHARLA, S.; RAJAN, K. Solar tracking system—a review. **International journal of sustainable engineering**, v. 10, n. 2, p. 72-81, 2017.

RAIMO, P. A. **Aquecimento de água no setor residencial.** 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-02052008-201058/publico/Aquecimento_de_Agua_no_Setor_Residencial.pdf. Acesso em 30 de outubro de 2023.

RODRIGUES, Frank Wesley et al. **A tendência de crescimento da energia fotovoltaica.** 2017.

RODRÍGUEZ, L. **Bifacial modules: a comprehensive guide on financial and technical performance of the next hot thing in solar** — RatedPower. 2023. Disponível em: <https://ratedpower.com/blog/bifacial-modules/>. Acesso em 29 de outubro de 2023.

RODRIGUEZ, Mauricio A.; SILVA, J. P. D. Resultados do primeiro ano de operação de sistemas fotovoltaicos com seguimento em dois eixos e módulos com e sem concentração. **Congresso Brasileiro de Energia Solar.** v. -, n. -, p. -, 2022. DOI: 10.59627/cbens.2016.2017.

SCOLARI, Bruno Sabino; URBANETZ, Jair. Panorama dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica amparados pela REN N° 482/2012 da ANEEL no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**. v. 9, n. 2, p. 151-160, 2023. DOI: 10.59627/rbens.2018v9i2.245.

SILVA, A. B., & SANTOS, M. C. Abordagem Qualitativa para a Análise dos Fatores de Adoção de Energias Renováveis na Indústria Brasileira. **Revista Brasileira de Engenharia Elétrica**, 2019, 45-58.

SILVA, Milena Paim; RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Influência da radiação direta do desempenho de um sistema fotovoltaico fixo e com rastreador solar**. 5° Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul. Araranguá, 2016.

SUKMA, Dian Yayan. Effect of Weather Dynamics to Energy Yield of Dual Axis Sun Rastreador solar-Based Solar PV generation. **Protek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro**, 2023. v. 10, n. 2, p. 80-80.

TROMBINI, P. B. **Análise da corrosão em elementos de fixação de uma usina fotovoltaica de solo**. Monografia (Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias) - Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2021. 2021. 62 f

VASCONCELLOS, L. E.M; LIMBERGER, M. A. C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil**: Contribuições da Eletrobrás, Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012. p. 27-34.

VENUGOPALASWAMY, S. et al. Dual Axis Solar Tracking System with Weather Monitoring System. **International Journal of Engineering Technology and Management Sciences**, 2024. v. 8, n. 2, p. 88-99. DOI: 10.46647/ijetms.2024.v08i02.011.

VERTEMATE, Alexandre; GOMES, Bruno Fogo; TAVARES, Caio da Silva; BEVILAQUA, L.; ZEFERINO, Silas da Rosa; LAUAND, Carlos Tadeu; BENTO, R. T. Usina com módulos bifaciais e estrutura Rastreador solar x usina com módulos monofaciais e estrutura fixa: comparação da geração de energia. **Cadernos de Pedagogia**. v. 20, n. 6, p. -, 2023. DOI: 10.54033/cadpedv20n6-027.

ZAGHBA, Layachi et al. Modeling and simulation of novel dynamic control strategy for grid-connected photovoltaic systems under real outdoor weather conditions using Fuzzy–PI MPPT controller. **International Journal of Modelling and Simulation**, 2022. v. 1, p. 1-10. DOI: 10.1080/02286203.2022.2094663.

ZAGHBA, Layachi; BENBITOUR, Messaouda Khennane. Simulation and experimental study of grid-connected photovoltaic power plants in a hot desert climate with fixed and dual-axis tracking. **Smart Science**, 2024. DOI: 10.1080/23080477.2024.2350808.

CRESESB. 2018. Disponível em: <<https://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: Agosto de 2024