Revista Científica Arbitrada Reporte Climatológico
ISSN (e): 3080 – 2504 / Depósito Legal: ZU2024000193
Vol.2 (2), julio-diciembre 2026

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM ESTRUTURA FIXA E TRACKER, SENDO AMBOS DE MESMA POTÊNCIA INSTALADA

Annete S. Faesarella*
https://orcid.org/0000-0002-1034-6123
Mayara S. M. Pareira**
https://orcid.org/0009-0004-1072-0826
Pedro Fernando Bongiorno. E.da Silva***
https://orcid.org/0009-0004-5468-1830

RECIBIDO: 13/03/2026 **ACEPTADO**: 12/06/2026 **PUBLICADO**: 08/09//2026

Cómo citar: Faesarella, A; Pareira, M; Bongiorno, P (2026). Análise comparativa entre sistemas de geração fotovoltaica com estrutura fixa e tracker, sendo ambos de mesma potência instalada. *Revista Científica Arbitrada Reporte Climatológico,* 2(2), 95-120. DOI: https://doi.org/10.36390/7rtnav64

RESUMEN

Este artigo apresenta um estudo comparativo entre dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede: um com estrutura fixa orientada para o norte e outro com rastreamento solar de um eixo (*single-axis tracker*). As simulações foram realizadas no *software PVSyst,* utilizando dados das usinas UFV Alto Rodrigues (RN) e UFV Tomé (CE). Os resultados demonstraram que o sistema com rastreamento obteve um ganho energético de 13,72% em relação ao sistema fixo, além de maior produtividade específica. Embora o índice de performance (PR) do sistema rastreador tenha sido ligeiramente inferior, ele apresentou um custo nivelado de energia (LCOE) menor e um *payback* simples de aproximadamente 4 anos. Dessa forma, o estudo demonstra que o uso do rastreamento solar proporciona maior eficiência técnica e viabilidade econômica, especialmente em regiões com alta irradiação solar, como o Nordeste brasileiro.

Palabras clave: energia fotovoltaica; rastreamento solar; eficiência energética; análise comparativa; PVSyst.

* Universidade São Francisco-Brasil, annete.faesarella@usf.edu.br

** Universidade São Francisco-Brasil, mayara.mazetti@mail.usf.edu.br

***Universidade São Francisco-Brasil, pedro.bongiorno@mail.usf.edu.br

Comparative analysis between fixed-structure and tracking photovoltaic generation systems with the same installed power

ABSTRACT

This article presents a comparative study between two grid-connected photovoltaic systems: one with a fixed north-oriented structure and another with a single-axis solar tracking system. The simulations were carried out using PVSyst software, based on data from the UFV Alto Rodrigues (RN) and UFV Tomé (CE) power plants. The results indicated that the tracking system achieved a 13.72% energy gain compared to the fixed system, as well as a higher specific productivity. Although the performance ratio (PR) of the tracking system was slightly lower, it presented a lower levelized cost of energy (LCOE), and a simple payback of about 4 years. Therefore, the study demonstrates that the use of solar tracking leads to greater technical efficiency and better economic feasibility, especially in regions with high solar irradiation such as northeastern Brazil

Keywords: photovoltaic energy; solar tracking; energy efficiency; comparative

1. INTRODUÇÃO

A crescente busca por fontes de energia renováveis tem incentivado a utilização da energia solar fotovoltaica como uma das principais opções para diversificar a matriz elétrica global (IEA, 2023). No Brasil, país com alta irradiação solar, o uso de sistemas fotovoltaicos tem crescido de forma acelerada, tanto em residências quanto em grandes usinas solares (ABSOLAR, 2024). A energia solar, além de ser uma fonte limpa e inesgotável, oferece benefícios como a redução das emissões de gases poluentes, a possibilidade de instalação em diferentes escalas (desde pequenos telhados até usinas de grande porte) e a diminuição da dependência de fontes não renováveis. Esses benefícios têm feito com que a tecnologia fotovoltaica se torne cada vez mais competitiva e relevante no contexto energético tanto nacional quanto internacional.

No contexto das usinas solares, o modo como os módulos fotovoltaicos são instalados tem um impacto direto na eficiência energética do sistema. Estruturas fixas são

frequentemente utilizadas em projetos comerciais e utilitários por causa de seu menor custo de implantação e simplicidade na construção. Por outro lado, as usinas equipadas com rastreamento solar (trackers) possibilitam seguir o trajeto do sol durante o dia, otimizando a captação da radiação e elevando a produção de energia elétrica. *as internas de la empresa, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores."*

Apesar de terem um custo inicial mais alto e exigirem mais cuidados na manutenção, os trackers têm sido amplamente utilizados em usinas de grande porte, principalmente com o objetivo de maximizar a produção de energia por área ocupada e aumentar o retorno do investimento (UFRJ & CEPEL 2023).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo conduzir uma análise comparativa entre usinas fotovoltaicas On-Grid de igual potência instalada, uma com estrutura fixa e outra com rastreador solar. A análise será realizada com base nos aspectos técnicos e energéticos, a fim de destacar os benefícios e as limitações de cada configuração, auxiliando na escolha mais apropriada para diferentes contextos de uso.

O artigo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre usinas fotovoltaicas e as normas e tecnologias relevantes, descreve as características técnicas de usinas com estrutura fixa e com rastreadores solares e detalha a metodologia adotada: um estudo de caso comparativo entre duas usinas On-Grid de mesma potência instalada, baseado em simulações de produção energética e em análise energética e econômica. Serão apresentados resultados quantitativos (geração anual, fator de capacidade, perdas e ganho percentual com trackers) em tabelas e gráficos, além de uma avaliação de custo-benefício (investimento inicial, LCOE e payback) e análises de sensibilidade a variáveis como irradiação e custo dos equipamentos. Por fim, o trabalho discute as vantagens e limitações de cada configuração e apresenta recomendações para aplicação prática e sugestões para pesquisas futuras

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Energia Solar no Brasil e no Mundo

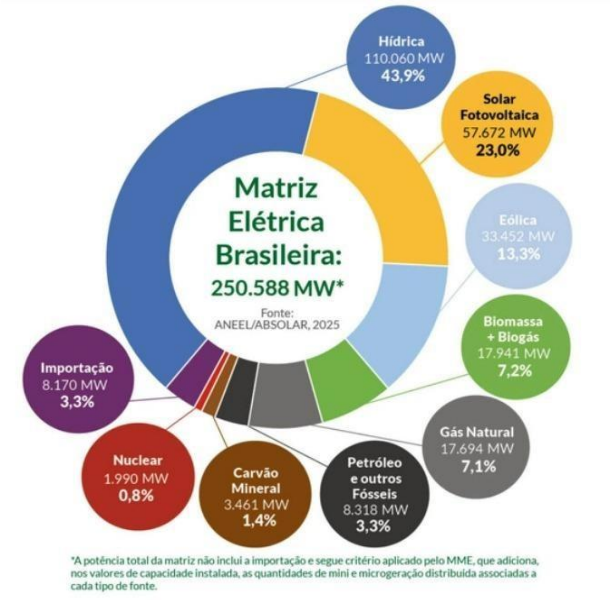
No mundo, a expansão da energia solar tem sido significativa nas últimas décadas e esse aumento de demanda tem levado à busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis, em especial devido aos desafios ambientais, como as mudanças climáticas e o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Países como China, Alemanha, Estados

Unidos e Índia lideram a instalação de usinas solares fotovoltaicas, impulsionados por políticas públicas de incentivo, avanços tecnológicos e a redução progressiva dos custos dos equipamentos, promovendo uma transição gradual para uma matriz energética mais limpa e diversificada (IEA, 2023).

A China, por exemplo, detém atualmente a maior capacidade instalada do planeta, tendo 6 das 10 maiores companhias em capacidade instalada de energia solar centralizada, desempenhando papel estratégico na produção de painéis solares e inversores.

No contexto brasileiro, a energia solar vem se destacando como uma das fontes renováveis de maior crescimento. Apesar do histórico predomínio damatriz elétrica baseada em hidrelétricas, o Brasil possui um dos maiores potenciais de irradiação solar do mundo, tornando-se ideal e economicamente viável para a geração fotovoltaica (ABSOLAR, 2024). Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostram que, em 2024, o Brasil ultrapassou a marca de 40 GW de capacidade instalada, posicionando-se como o maior mercado de geração solar da América Latina e um dos dez maiores do mundo (ANEEL, 2023). A figura 1 mostra a matriz elétrica brasileira.

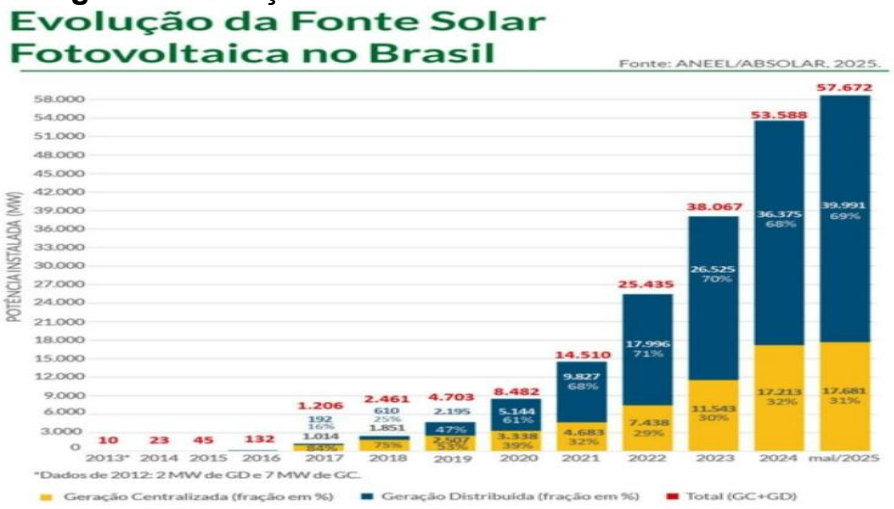
Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2025

A regulamentação brasileira também desempenhou papel fundamental nesse crescimento, principalmente através da Resolução Normativa nº 482/2012, que instituiu o Sistema de Compensação de Energia, permitindo que consumidores gerarem sua própria energia e utilizassem o excedente como créditos junto à distribuidora local (ANEEL, 2023). Outro ponto relevante é a contribuição da energia solar para a diversificação da matriz elétrica brasileira, reduzindo a vulnerabilidade a períodos de escassez hídrica e reforçando a segurança energética. Nesse sentido, a energia solar no Brasil não apenas complementa a geração hidrelétrica, como também promove benefícios ambientais e socioeconômicos. A figura 2 mostra a evolução da geração fotovoltaica no Brasil.

Figura 2: Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



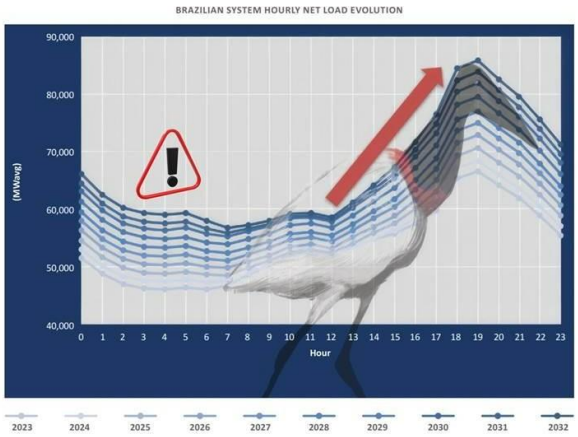
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2025

Duck Curve

Embora o foco do trabalho seja comparar usinas solares fotovoltaicas com estrutura fixa e as com rastreamento solar, vale ressaltar um fenômeno recente ligado ao aumento da presença de energia solar: a chamada Duck Curve, que no contexto brasileiro passou a ser conhecida como "Curva do Tuiuiú". Esse conceito descreve uma expressiva diminuição da demanda líquida durante o período diurno, devido à intensa geração fotovoltaica, seguida por uma elevação abrupta no início da noite, quando a produção solar se encerra e outras fontes precisam suprir imediatamente o sistema elétrico. Tal dinâmica já surge em }

para o Sistema Interligado Nacional (SIN) e deve se intensificar nos próximos anos, principalmente em regiões que apresentam forte expansão da geração solar, como o Nordeste (PUC-Rio, 2023; MAMEDE,2024). A Curva do Tuiuiú traz desafios à operação do sistema elétrico, exigindo maior flexibilidade das usinas despacháveis, bem como favorecendo soluções como armazenamento de energia em baterias, gerenciamento da demanda e o aperfeiçoamento dos contratos de suprimento. Mesmo não sendo o tema principal deste trabalho, esse fenômeno evidencia o papel fundamental do planejamento criterioso da expansão da energia solar no país, visando garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico nacional. A figura 3 mostra a evolução da demanda energética diária no Brasil

Figura 3: Evolução horária da demanda líquida no Brasil (*Curva do Tuiuiú*).



Fonte: Mamede, 2024

Esquema Básico de Geração Fotovoltaica

O sistema de geração fotovoltaica é fundamentado na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno ocorre quando a luz incide sobre materiais semicondutores, geralmente de silício, promovendo o deslocamento de elétrons e a geração de corrente elétrica contínua (CC) (CRESESB, 2020).

De maneira geral, o sistema fotovoltaico é composto pelos seguintes elementos principais:

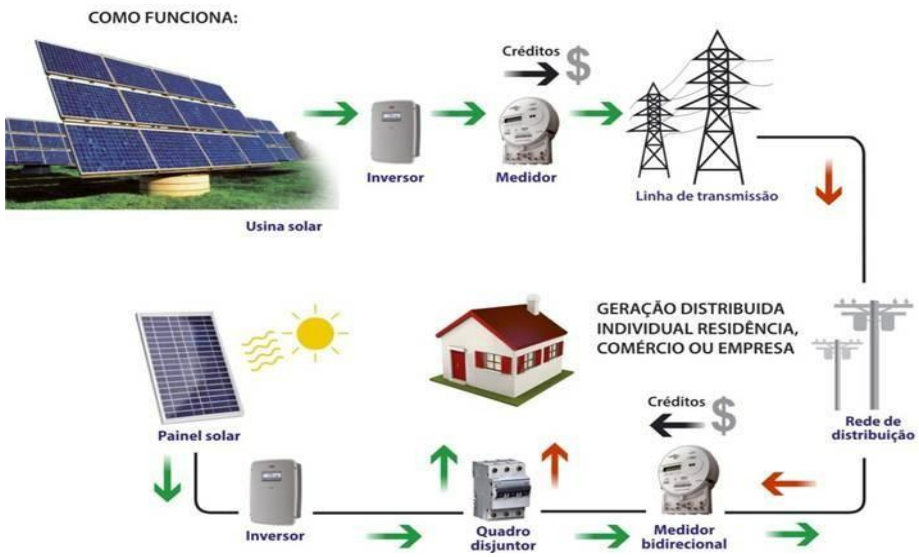
- **Módulos fotovoltaicos**: formados por células solares interconectadas em série e paralelo, responsáveis pela conversão da radiação solar em energia

elétrica;Controlador de carga: regula a tensão e a corrente provenientes dos módulos, protegendo o sistema contra sobrecargas e descargas profundas.

- Banco de baterias (quando utilizado): armazena a energia elétrica gerada, permitindo o fornecimento contínuo em períodos de baixa radiação solar ou durante a noite.
- Inversor: converte a corrente contínua (CC) produzida pelos painéis em corrente alternada (CA), compatível com os padrões da rede elétrica e equipamentos residenciais ou industriais.
- Sistema de proteção e monitoramento: engloba disjuntores, fusíveis, dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e sistemas de acompanhamento de desempenho do sistema (ANEEL, 2019).O fluxo de energia inicia-se com a incidência da radiação solar sobre os módulos fotovoltaicos. Nos sistemas conectados à rede (On-grid ou híbrido), o excedente de eletricidade pode ser injetado diretamente na rede elétrica gerando créditos para o consumidor, já no sistema não conectado à rede (Off-grid) as baterias são utilizadas para armazenar o excedente. (ANEEL, 2021).

Na figura 4 está representado um sistema de produção e distribuição de energia elétrica fotovoltaica.

Figura 4: Geração e distribuição de energia elétrica

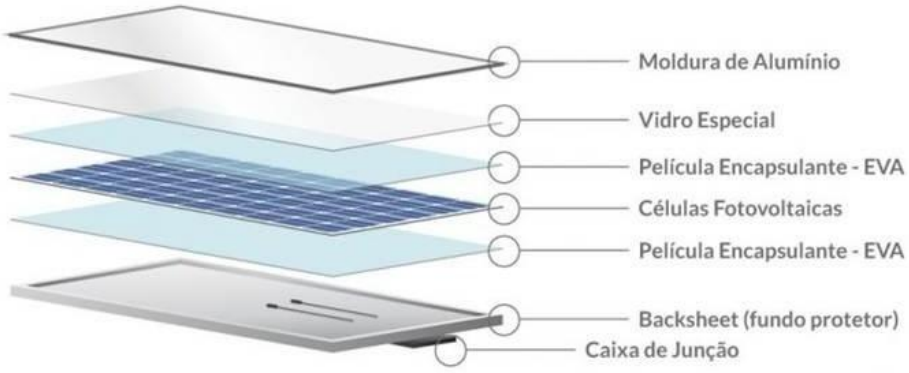


Fonte: ERSol, 2022

Funcionamento das Placas Solares

As placas solares também conhecidas como painéis fotovoltaicos são compostos por células fabricadas, em sua maioria, de silício monocristalino, policristalino ou filme fino, materiais semicondutores que possuem a capacidade de liberar elétrons quando expostos à luz solar. As placas são montadas em um painel de vidro, que protege as células, e envolvidas por uma moldura de alumínio, garantindo durabilidade e resistência. A figura 5 mostra o esquemático de uma típica placa fotovoltaica.

Figura 5: Componentes de um painel fotovoltaico



Fonte: Portal Solar, 2023

A eficiência do processo depende de fatores como intensidade da radiação solar, temperatura, orientação do módulo e sombreamentos parciais. Sistemas com rastreamento solar (trackers) permitem otimizar o ângulo de incidência da radiação, aumentando a geração elétrica em comparação com sistemas fixos (CRESESB, 2020).

Usinas Fotovoltaicas

As usinas fotovoltaicas são instalações de grande porte voltadas para a geração centralizada de energia elétrica, conectadas diretamente à rede de distribuição ou transmissão. Essas usinas são compostas por centenas ou milhares de módulos fotovoltaicos organizados em arranjos, além de inversores centrais, transformadores e sistemas de proteção e monitoramento (ANEEL, 2023).

O Brasil possui um excelente potencial para esse tipo de geração devido aos altos índices de radiação solar ao longo do ano. Segundo dados da ABSOLAR (2024), o país ultrapassou a marca de 40 GW de capacidade instalada, sendo grande parte proveniente de usinas solares On-Grid.

Estrutura Fixa versus Rastreador Solar (Tracker)

O modo de instalação dos módulos impacta diretamente a eficiência energética de uma usina. Quando se tem a instalação com estrutura fixa os painéis permanecem em uma posição fixa durante todo o dia e com inclinação definida de acordo com a latitude do local. Suas vantagens são o menor custo inicial, a simplicidade construtiva e a baixa manutenção. E como desvantagem se tem o menor aproveitamento da radiação solar ao longo do dia.

Por outro lado, as usinas equipadas com rastreador solar (tracker) permitem que os módulos fotovoltaicos acompanhem o movimento do sol ao longo do dia, ajustando automaticamente a inclinação e/ou a orientação dos painéis.

Esse mecanismo aumenta a incidência direta da radiação solar sobre as células, potencializando a geração de energia elétrica. Os trackers podem ser de um eixo, ajustando a rotação leste-oeste, ou de dois eixos, ajustando também a inclinação vertical, oferecendo maior ganho energético. O sistema é composto por motores elétricos, sensores de posição e controladores que determinam o ângulo ideal de cada painel, além de algoritmos de backtracking, que evitam sombreamento entre filas de módulos durante períodos de baixa altura solar. Apesar de exigirem um investimento inicial maior e maior manutenção, os trackers são amplamente utilizados em usinas de grande porte quando o objetivo é maximizar a produção de energia por área ocupada e melhorar o retorno do investimento (UFRJ & CEPEL, 2023).

A escolha entre estrutura fixa ou tracker (mostrada na figura 6) depende de fatores como área disponível, investimento inicial, meta de produção energética e viabilidade econômica do projeto.

Figura 6: Funcionamento de um sistema de rastreamento solar ativo



Fonte: Basen Green, 2023

Créditos de Energia (Sistema On-Grid)

Nos sistemas On-Grid, a energia gerada pelos painéis solares pode ser utilizada no consumo imediato ou, quando há excedente de geração, é injetada na rede elétrica pública. Esse processo segue as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, regulamentado pela Resolução Normativa nº 482/2012 e suas atualizações pela ANEEL (2023).

Quando o excedente de energia é enviado para a rede, o consumidor recebe créditos de energia, que podem ser utilizados em até 60 meses para abater o consumo em períodos nos quais a geração é menor, como à noite ou em dias nublados. Esse mecanismo torna a energia solar economicamente atrativa, pois reduz a dependência da rede elétrica e pode diminuir significativamente a fatura de energia (ANEEL, 2023).

Um dos principais benefícios do sistema de créditos é que ele permite a compensação remota, ou seja, os créditos gerados podem ser usados em outro imóvel do mesmo titular, desde que estejam sob a mesma concessionária. Esse modelo favorece tanto consumidores residenciais quanto empreendimentos de grande porte, como usinas solares centralizadas, viabilizando a geração de energia limpa em larga escala (ABSOLAR, 2024).

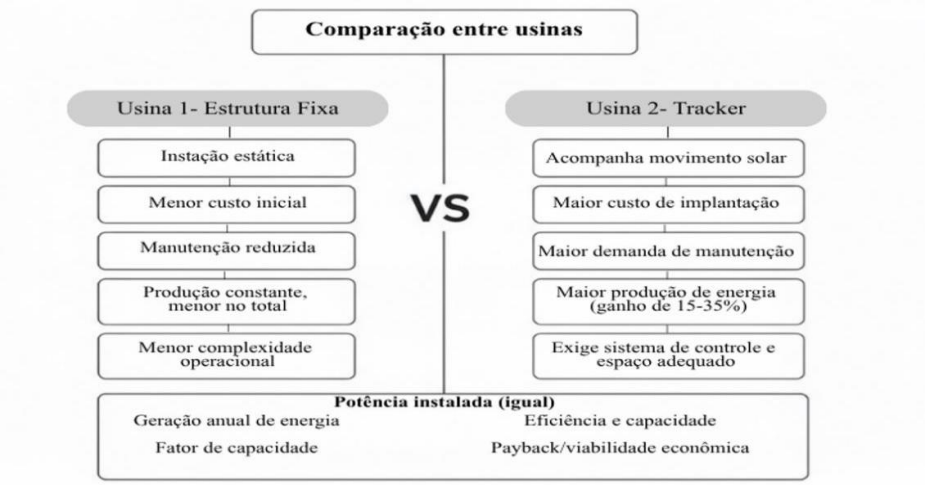
3. METODOLOGÍA

A metodologia utilizada neste trabalho combina pesquisa bibliográfica e estudo de caso comparativo. A primeira etapa consistiu no levantamento de artigos científicos, relatórios

técnicos, normas do setor que abordam sistemas fotovoltaicos On-Grid, estruturas fixas e rastreadores solares (trackers), bem como livros técnicos sobre o assunto. Esta pesquisa teórica forneceu subsídios para a definição dos parâmetros técnicos e para a compreensão dos fatores que influenciam a eficiência energética dos dois tipos de instalação.

Na segunda etapa, foi realizada a comparação entre duas usinas fotovoltaicas simuladas com mesma potência instalada, diferenciadas apenas pelo tipo de estrutura de montagem: uma com estrutura fixa e outra com rastreador solar (tracker). As simulações foram feitas no software PVsyst, considerando dados climáticos reais e parâmetros idênticos de módulos e inversores. A análise comparativa contemplará indicadores como energia gerada, fator de capacidade, eficiência global, ocupação de área e possíveis impactos econômicos, permitindo avaliar de forma objetiva os benefícios e limitações de cada configuração. A figura 7 mostra um fluxograma das etapas do estudo de caso.

Figura 7: Comparativo entre usinas fotovoltaicas de diferentes estruturas



Fonte: Próprio autor, 2025

Estudo de Caso

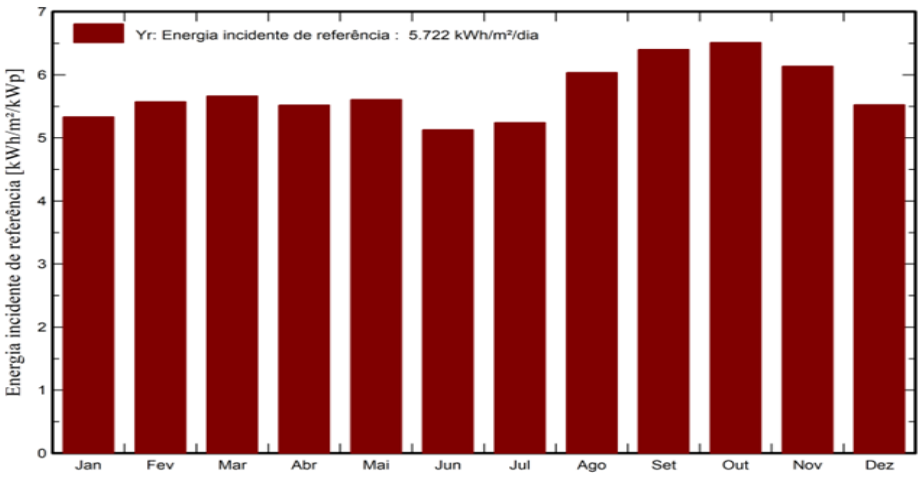
O presente estudo tem como objetivo comparar o desempenho energético de duas usinas fotovoltaicas conectadas à rede (sistema on-grid) localizadas no Nordeste brasileiro: a UFV Alto Rodrigues, situada no estado do Rio Grande do Norte, e a UFV Tomé, localizada no estado do Ceará. A análise foi realizada a partir de documentos técnicos, memoriais descritivos e simulações geradas no software PVsyst, com o propósito de compreender de

que forma as diferenças estruturais e tecnológicas influenciam na eficiência de geração e no aproveitamento da irradiância solar em cada localidade.

A UFV Alto Rodrigues possui uma potência instalada de 2 MWp, totalizando 2,587 MWp de potência pico, utilizando estrutura fixa voltada para o Norte, projetada para otimizar a captação solar ao longo do dia sem necessidade de movimentação mecânica. O sistema é composto por módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, inversores centrais e instalação em solo. Segundo o memorial descritivo, o arranjo fixo foi dimensionado para maximizar a geração durante as horas de maior insolação, com inclinação ajustada conforme a latitude da região.

A Figura 8 apresenta o gráfico de irradiância incidente obtido através da simulação no PVsyst, indicando uma média anual de 5,72 kWh/m²/dia. Observa-se maior intensidade solar entre os meses de agosto e outubro, período seco na região, que favorece o desempenho energético do sistema.

Figura 8: Energia incidente de referência no plano dos sensores da UFV Alto Rodrigues.

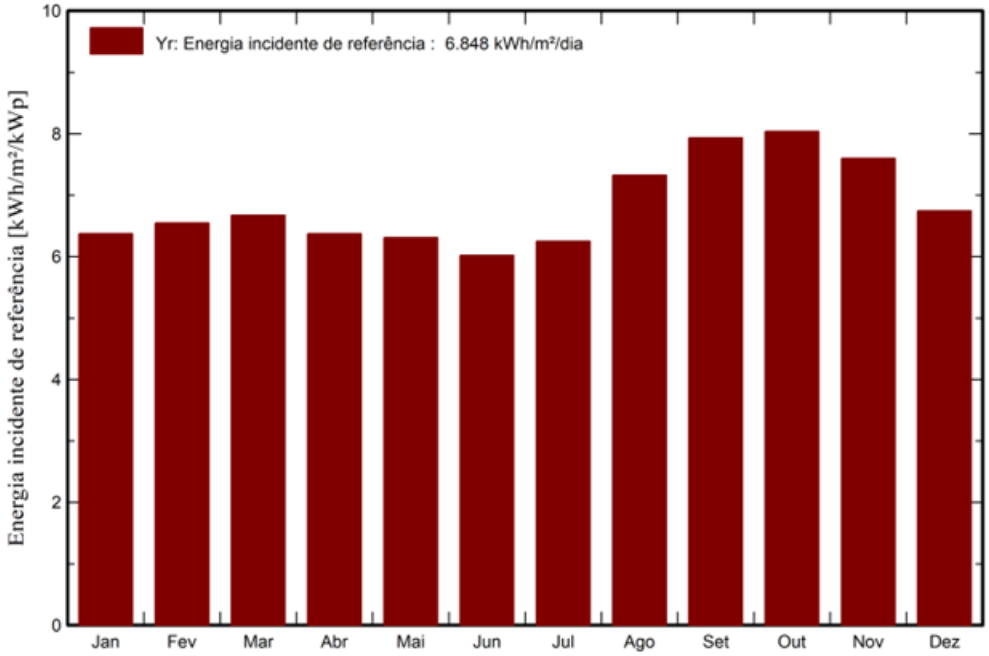


Fonte: Relatório de simulação *PVsyst,* 2025.

Por sua vez, a UFV Tomé, com potência instalada de 2MWp, totalizando 2,579 MWp, utiliza rastreadores solares de um eixo (trackers), os quais permitem o movimento dos módulos acompanhando o deslocamento aparente do Sol no plano horizontal. Essa tecnologia possibilita maior captação de irradiância ao longo do dia, reduzindo perdas angulares e aumentando o fator de desempenho do sistema.

A Figura 9 apresenta o gráfico de energia incidente de referência obtido no PVsyst, indicando uma média anual de 6,85 kWh/m²/dia, evidenciando o potencial solar ligeiramente superior da região cearense e o benefício adicional proporcionado pelo rastreamento solar.

Figura 9: Energia incidente de referência no plano dos sensores da UFV Tomé

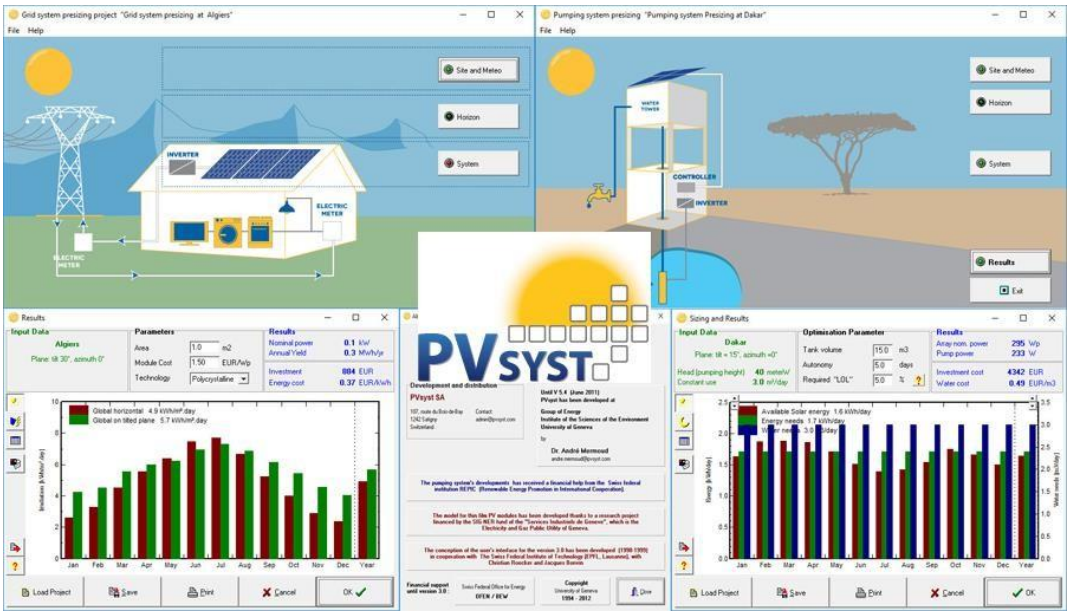


Fonte: Relatório de simulação *PVsyst,* 2025.

Os resultados demonstram que a diferença estrutural entre os sistemas fixos e os rastreadores tem impacto direto no aproveitamento da irradiância e na produção de energia elétrica. Essa influência será explorada no tópico Resultados e Discussões, com a comparação de indicadores como produtividade, desempenho energético e estimativas de custo de implantação de cada usina.

A análise comparativa entre as usinas solares fotovoltaicas UFV Alto Rodrigues (sistema fixo orientado para o Norte) e UFV Tomé (sistema com rastreamento solar de um eixo — single axis tracker) foi realizada a partir dos dados simulados no software PVSyst (Figura 10) e complementada com informações de projeto e memoriais descritivos.

Figura 10: Interface do *software* PVsyst e exemplos de simulação de sistemas fotovoltaicos



Fonte: Instituto Solar, 2020

Desempenho Energético e Índice de Performance (PR)

A UFV Alto Rodrigues, localizada no município de Alto Rodrigues (RN), apresentou uma produção anual simulada de 4.435,05 MWh, com índice de performance (PR) de 82,08%. Por sua vez, a UFV Tomé, situada no município de Limoeiro do Norte (CE), obteve 5.043,65 MWh/ano, com PR de 78,21%. O PR (Performance Ratio) representa a relação entre a energia efetivamente injetada na rede e a energia que seria gerada nas condições ideais de radiação solar. Ele permite avaliar as perdas do sistema, independentemente da irradiação local.

Mesmo com PR ligeiramente menor, a UFV Tomé apresentou maior produtividade específica (1.955 kWh/kWp.ano) devido ao ganho de captação proporcionado pelo rastreamento solar.

Cálculo do Ganho Energético Relativo ao Sistema Fixo

Para avaliar o benefício energético do uso do *tracker*, considerou-se a UFV Alto Rodrigues (fixa) como referência:

Equação (1) – Cálculo do ganho energético relativo

$$\text{Ganho (\%)} = \frac{E_{Tomé} - E_{Rodrigues}}{E_{Rodrigues}} \times 100 \quad \textbf{(1)}$$

Substituindo pelos valores simulados:

$$\text{Ganho (\%)} = \frac{5.043{,}65 - 4.435{,}05}{4.435{,}05} \times 100$$

$$\text{Ganho (\%)} = 0{,}1372 \times 100 = 13{,}72\%$$

Assim, o sistema de rastreamento apresentou um ganho energético de aproximadamente 13,72% em relação à estrutura fixa. Por outro lado, se o cálculo for feito tomando a UFV Tomé como base, observa-se que Alto Rodrigues produz cerca de 12,06% menos energia.

Essa diferença é coerente com a expectativa teórica para rastreadores de um eixo, que costumam proporcionar ganhos de 10% a 20%, dependendo da latitude e das condições climáticas locais.

Análise das Perdas do Sistema

As perdas de desempenho de cada sistema fotovoltaico foram extraídas dos relatórios de simulação do software *PVSyst*. A Tabela 1 apresenta a comparação das principais categorias de perdas para as usinas UFV Al Rodrigues e UFV Tomé, permitindo observar as diferenças nos rendimentos elétricos e térmicos entre as duas configurações.

Tabela 1 – Principais perdas de desempenho das usinas

Tipo de perda	UFV Alto Rodrigues	UFV Tomé
Perdas por sombreamento	0,0%	0,0%
Perdas por sujeira (*soiling*)	3,0%	3,0%
Perdas por cabos CC (DC *losses*)	1,2%	1,3%
Perdas por inversor (AC *losses*)	0,7%	0,8%
Perdas térmicas médias	5,2%	4,9%
LID – *Light Induced Degradation*	0,6%	0,6%
Degradação média dos módulos	0,4%/ano	0,4%/ano
Perda global estimada	≈17,0%	≈18,0%

Fonte: Dados obtidos das simulações no *software* PVSyst.

Observa-se que, embora o sistema com rastreador apresenta maiores perdas elétricas (devido à maior complexidade e movimentação), o ganho em captação solar mais que compensou essas perdas. A irradiação média diária incidente também reforça essa vantagem:

- UFV Alto Rodrigues → 5,72 kWh/m²/dia
- UFV Tomé → 6,85 kWh/m²/dia

A diferença de +1,13 kWh/m²/dia explica, em parte, a superioridade de geração da UFV Tomé.

Síntese Comparativa

A Tabela 2 resume os parâmetros técnicos essenciais das duas usinas simuladas, incluindo potência instalada, irradiação, produtividade e orientação dos módulos. Essa comparação técnica serve de base para avaliar o impacto do sistema de rastreamento solar sobre o desempenho energético

Tabela 2 – Comparativo técnico e energético entre as usinas

Parâmetro	UFV Alto Rodrigues (Fixa)	UFV Tomé (*Tracker*)
Potência Instalada (kWp)	2.587	2.580
Energia Anual (MWh/ano)	4.435,05	5.043,65
PR (%)	82,08	78,21
Produtividade Específica (kWh/kWp.ano)	1.714	1.955
Irradiação Média (kWh/m²/dia)	5,72	6,85
Ganho Energético (relativo)	–	+13,72%
Orientação	Fixa – Norte (Az = 0°)	*Tracker* eixo Norte-Sul
Localização	RN (Alto Rodrigues)	CE (Limoeiro do Norte)

Fonte: Dados obtidos das simulações no software PVSyst e memoriais descritivos.

Discussão Técnica

O aumento de aproximadamente 13,7% na geração elétrica anual demonstra o impacto positivo do rastreamento solar em regiões de alta irradiação direta, como o

Nordeste brasileiro.

Apesar do PR ligeiramente inferior em Tomé, o volume total de energia injetada compensa as perdas internas, resultando em um melhor aproveitamento do potencial solar local.

Em contrapartida, sistemas fixos, como o de Alto Rodrigues, apresentam maior estabilidade operacional e menor custo de manutenção, o que pode equilibrar o investimento inicial mais elevado exigido pelos sistemas *tracker*.

Análise Técnica e Econômica Comparativa

Além da análise energética, foi realizado um estudo econômico simplificado das duas usinas, considerando indicadores como receita anual, custo de operação e manutenção (O&M), payback simples e custo nivelado da energia (LCOE). Os cálculos foram baseados nos dados simulados no PVsyst, complementados por valores médios de mercado e parâmetros técnicos dos memoriais descritivos.

Foram adotadas as seguintes premissas:

- Preço médio de venda da energia: R$ 0,60/kWh;
- Vida útil do sistema: 25 anos;
- O&M anual: 1,2% do investimento inicial;
- Custo de implantação:
  - R$ 4,0 milhões/MWp (estrutura fixa);
  - R$ 4,5 milhões/MWp (estrutura com rastreador solar);
- Potência instalada: 2,6 MWp.

Cálculos Realizados

Equação (2) – Custo de Implantação (CAPEX)

$$C = P_{\text{inst}} \times C_{\text{MWp}} \qquad \textbf{(2)}$$

$$C_{\text{fixa}} = 2{,}6\,\text{MWp} \times 4{,}0\,\text{milhões/MWp} = R\$10{,}4\,\text{milhões}$$

$$C_{\text{tracker}} = 2{,}6\,\text{MWp} \times 4{,}5\,\text{milhões/MWp} = R\$11{,}7\,\text{milhões}$$

Equação (3) – Receita Anual Estimada

$$R = E_{\text{anual}} \times V_{\text{kWh}} \qquad \textbf{(3)}$$

$$R_{\text{fixa}} = 4.435.050\,\text{kWh} \times 0{,}60 = R\$2.661.030$$

$$R_{\text{tracker}} = 5.043.650\,\text{kWh} \times 0{,}60 = R\$3.026.190$$

Equação (4) – Custo Anual de Operação e Manutenção (O&M)

$$C_{\text{O\&M}} = C_{\text{investimento}} \times 0{,}012 \quad \textbf{(4)}$$

$$C_{\text{O\&M, fixa}} = 10{,}4 \times 0{,}012 = R\$124.800$$

$$C_{\text{O\&M, tracker}} = 11{,}7 \times 0{,}012 = R\$140.400$$

Equação (5) – Lucro Líquido Anual

$$L = R - C_{\text{O\&M}} \textbf{(5)}$$

$$L_{\text{fixa}} = 2.661.030 - 124.800 = R\$2.536.230$$

$$_{\text{tracker}} = 3.026.190 - 140.400 = R\$2.885.790$$

$$= \frac{R\$0{,}1206/\text{kWh}}{5.043.650 \times 25}$$

A Tabela 3 apresenta a síntese dos resultados técnicos e econômicos obtidos nas simulações das usinas UFV Alto Rodrigues e UFV Tomé, permitindo a comparação direta entre os principais indicadores de desempenho e custos.

Tabela 3 – Indicadores Econômicos das Usinas Avaliadas

Indicador	UFV Alto Rodrigues (Fixa)	UFV Tomé (Tracker)
Energia anual (kWh)	4.435.050	5.043.650
Receita anual (R$)	2.661.030	3.026.190
Investimento estimado (R$)	10.400.000	11.700.000
O&M anual (R$)	124.800	140.400
Lucro operacional anual (R$)	2.536.230	2.885.790
Payback simples (anos)	4,10	4,05
LCOE (R$/kWh)	0,1219	0,1206

Fonte: Elaboração própria com base em ANEEL (2024), CCEE (2025) e simulações no PVSyst (2025).

Discussão Econômica

Os resultados indicam que, embora o sistema com rastreamento solar (UFV Tomé) apresente investimento inicial 12% superior, ele também gera 13,7% mais

energia, o que se reflete em maior receita anual e menor LCOE.

O *payback* de ambos os sistemas é praticamente idêntico, mostrando que o rastreador se paga no mesmo horizonte temporal, mas oferece uma eficiência econômica superior ao longo do ciclo de vida do projeto.

Em síntese, para regiões de elevada irradiação direta como o Ceará, o uso de rastreadores é tecnicamente e economicamente vantajoso, enquanto sistemas fixos continuam sendo uma opção robusta para locais com ventos fortes, terrenos irregulares ou restrição orçamentária.

4. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que o estudo comparativo entre os sistemas fotovoltaicos de estrutura fixa e com rastreamento solar evidenciou ganhos significativos de eficiência energética e viabilidade econômica com a adoção do sistema automatizado. As simulações realizadas no *software* PVSyst, baseadas nas usinas UFV Alto Rodrigues (RN) e UFV Tomé (CE), demonstraram que o sistema com rastreamento de um eixo apresentou um ganho energético de 13,72% em relação ao sistema fixo, alcançando 5.043,65 MWh/ano de geração contra 4.435,05 MWh/ano da estrutura fixa.

Mesmo apresentando um índice de *performance* (PR) ligeiramente inferior (78,21% frente a 82,08%), o sistema rastreador obteve maior produtividade específica (1.955 kWh/kWp·ano) e um custo nivelado de energia (LCOE) inferior (R$ 0,1206/kWh contra R$ 0,1219/kWh), comprovando seu melhor desempenho técnico e econômico ao longo da vida útil do projeto. O payback simples, próximo de 4 anos, reforça a atratividade financeira do investimento, mesmo com um CAPEX 12,5% superior devido ao custo adicional dos rastreadores.

Esses resultados indicam que, em regiões de alta irradiação direta, como o Nordeste brasileiro, a utilização de rastreamento solar se mostra tecnicamente vantajosa e economicamente viável, maximizando a geração de energia e otimizando o retorno do investimento.

Em contrapartida, sistemas fixos, como o da UFV Alto Rodrigues, continuam sendo uma alternativa competitiva em locais com ventos intensos, topografia irregular ou limitações orçamentárias, pois apresentam menor complexidade

construtiva e custos reduzidos de manutenção.

Dessa forma, conclui-se que a adoção de rastreadores solares representa uma solução eficiente e sustentável para o setor de geração fotovoltaica, contribuindo para o aumento da produção energética nacional e para o fortalecimento das políticas de incentivo à energia limpa e renovável no Brasil.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2021). Banco de informações de geração. https://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2023). Banco de informações de geração. https://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. (2024). Boletim anual de geração distribuída e centralizada 2024. https://www.absolar.org.br

Basen Green. (2023). Como funciona a energia solar fotovoltaica ativa e passiva? https://www.basengreen.com/pt/how-does-solar-active-photovoltaic-solar-passive-work/

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. (2020). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CEPEL. https://www.cresesb.cepel.br

ERSol – Engenharia em Sistemas de Energia Solar. (2022). Geração e distribuição de energia elétrica. https://www.ersol.com.br

International Energy Agency. (2023). Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. https://www.iea.org/reports/renewables-2023

Instituto Solar. (n.d.). Software PVsyst: Ferramenta para simulação de sistemas fotovoltaicos. https://institutosolar.com/software-pvsyst/

Lassio, J. G., Branco, D. C., Magrini, A., & Matos, D. (2023). Environmental life cycle-based analysis of fixed and single-axis tracking systems for photovoltaic power plants: A case study in Brazil. Cleaner Engineering and Technology, 11, 100700. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100700

Mamede, D. (2024). A curva do Tuiuiú: Versão brasileira da Duck Curve. LinkedIn. https://www.linkedin.com/posts/daniel-mamede-8a0b8466_a-curva-do-tuiui%C3%BA-vers%C3%A3o-brasileira-da-activity-7269613217960644608-9Dd-/?originalSubdomain=pt

Portal Solar. (2023). Componentes de um painel fotovoltaico. https://www.portalsolar.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (2023). Comercialização de swaps de geração de energia solar no Brasil: O efeito curva do pato (Dissertação de mestrado). https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/producoes/consultaConteudoAcervo?&nrSeq=62396

Tangipar Engenharia. (2025). Relatório de simulação energética – Usina Fotovoltaica Alto Rodrigues (UFV II e III). Relatório técnico elaborado no software PVsyst V7.4.8.

Tangipar Engenharia. (2025). Relatório de simulação energética – Usina Fotovoltaica Tomé (UFV I e II). Relatório técnico elaborado no software PVsyst V7.4.8.