

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

JOALISSON WEBERSON SOUSA DE BRITO
RABECHE KEISE DA SILVA ARRUDA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INTEGRAÇÃO DE SISTEMA ATIVO
DE RASTREAMENTO SOLAR A MICRO USINAS FOTOVOLTAICAS**

Cajazeiras-PB
2026

JOALISSON WEBERSON SOUSA DE BRITO
RABECHE KEISE DA SILVA ARRUDA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INTEGRAÇÃO DE SISTEMA ATIVO
DE RASTREAMENTO SOLAR A MICRO USINA FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação, sob Orientação do Prof. Joab Sobreira de Andrade e Coorientação da Profa. Taciana Araujo de Souza.

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

B862m	Brito, Joalisson Weberson Sousa de. Modelagem computacional para integração de sistema ativo de rastreamento solar a micro usina fotovoltaica / Joalisson Weberson Sousa de Brito, Rabeche Keise da Silva Arruda.– 2026. 29f. : il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026. Orientador(a): Prof. Joab Sobreira de Andrade. Coorientador(a): Prof. Taciana Araujo de Souza. 1. Controle automático. 2. Rastreamento solar. 3. Usina fotovoltaica. 4. Energia solar. I. Arruda, Rabeche Keise da Silva. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.
IFPB/CZ	CDU: 681.5(043.2)

JOALISSON WEBERSON SOUSA DE BRITO
RABECHE KEISE DA SILVA ARRUDA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INTEGRAÇÃO DE SISTEMA ATIVO
DE RASTREAMENTO SOLAR A MICRO USINA FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 18 de junho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JOAB SOBREIRA DE ANDRADE**
Data: 23/07/2026 16:43:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joab Sobreira de Andrade – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **TACIANA ARAUJO DE SOUZA**
Data: 22/07/2026 09:12:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Taciana Araujo de Souza – IFPB-Reitoria
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **IGOR SOUZA OGATA**
Data: 22/07/2026 08:43:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Igor Souza Ogata – Universidade Estadual da Paraíba
Examinador

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação,

MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INTEGRAÇÃO DE SISTEMA ATIVO DE RASTREAMENTO SOLAR A MICRO USINA FOTOVOLTAICA

JOALISSON WEBERSON SOUSA DE BRITO

joalisson.weberson@academico.ifpb.edu.br

RABECHE KEISE DA SILVA ARRUDA

rabeche.keise@academico.ifpb.edu.br

TACIANA ARAÚJO DE SOUZA

taciana.souza@ifpb.edu.br

JOAB SOBREIRA DE ANDRADE

joab.andrade@ifpb.edu.br

RESUMO

Os sistemas de rastreamento solar de dois eixos representam uma tecnologia promissora para maximizar a captação de irradiação solar em micro usinas fotovoltaicas, embora demandem análises rigorosas de viabilidade técnica e econômica devido à sua maior complexidade estrutural e operacional. Este trabalho investiga a viabilidade técnico-econômica da integração de um sistema ativo de rastreamento solar de dois eixos aplicado a micro usinas de geração fotovoltaica. A metodologia consistiu, inicialmente, na modelagem computacional e simulação numérica em ambiente de fábrica virtual para avaliar os efeitos da carga de vento sobre a estabilidade estrutural do rastreador sob diferentes condições operacionais. Em seguida, avaliou-se a viabilidade econômica do sistema por meio do Custo Nivelado de Energia (LCOE), considerando os custos de implantação, operação, manutenção e a curva estimada de geração energética. Os resultados das simulações estruturais garantiram a integridade física do rastreador frente aos esforços de vento analisados, enquanto o estudo financeiro indicou que, apesar do maior investimento inicial, o ganho de geração superou o incremento de custos. Conclui-se que o sistema ativo de dois eixos se apresenta como uma alternativa economicamente viável e tecnicamente robusta em comparação aos sistemas de estrutura fixa convencionais, otimizando o custo-benefício da geração distribuída.

Palavras-Chave: dinâmica dos fluidos computacional; simulação computacional; geração distribuída; custo nivelado de energia; análise estrutural.

ABSTRACT

Two-axis solar tracking systems represent a promising technology for maximizing solar irradiance capture in micro photovoltaic plants, although they demand rigorous technical and economic feasibility analyses due to their greater structural and operational complexity. This work investigates the technical-economic feasibility of integrating an active two-axis solar tracking system applied to micro photovoltaic plants. The methodology initially consisted of computational modeling and numerical simulation in a virtual factory environment to evaluate the effects of wind load on the structural stability of the tracker under different operating conditions. Subsequently, the economic viability of the system was evaluated using the Levelized Cost of Energy (LCOE), considering the costs of deployment, operation, maintenance, and the estimated energy generation curve. The results of the structural simulations guaranteed the physical integrity of the tracker against the analyzed wind loads, while the financial study indicated that, despite the higher initial investment, the generation gain exceeded the cost increase. In conclusion, the active two-axis system presents itself as an

economically viable and technically robust alternative compared to conventional fixed-structure systems, optimizing the cost-benefit of distributed generation.

Keywords: computational fluid dynamics; computational simulation; distributed generation; levelized cost of energy; structural analysis.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil conta com um território de mais de 8 milhões de km² e uma população que passa dos 202 milhões de habitantes de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) e, portanto, enfrenta o desafio de aumentar a geração de energia elétrica de forma integrada e sustentável. Além disso, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) registrou o consumo de 558 GWh no ano de 2024, o que representa um aumento de 3,9% em relação ao ano anterior, indicando que a demanda por energia no país tende a aumentar.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2010-2019 previa a exploração do Rio Tapajós, Rio Teles Pires, linha Tucuruí-Macapá-Manaus, dentre outros (Ett *et al.*, 2011). Destas, apenas as obras do linha de Tucuruí e as usinas do Rio Teles Pires saíram do papel e hoje integram o Sistema Interligado Nacional (SIN). Contudo, pode-se observar que embora a construção de infraestruturas de geração de energia no Brasil, como hidrelétricas, tenha promovido o aumento da oferta de energia, ainda assim sofreu com a dependência de uma trajetória de longa duração (frequentemente acima de 50 anos), intrínseca aos sistemas de geração energia (Castro, 2021).

Dessa forma, o que se observa é que mudanças na matriz energética e nas tecnologias de conversão de energia não costumam ser implementadas rapidamente. Mesmo assim, no de 2024, a energia solar representou 9,3% da matriz energética brasileira, a eólica, 14,1% e a hidráulica, 55,3% (EPE, 2024). Para se alinhar às metas mundiais e fazer uma transição energética para fontes renováveis, o Brasil tem o desafio de diversificar e expandir a sua matriz energética.

A geração de energia solar no Brasil é dividida entre sistemas centralizados (usinas) e distribuídos (micro e miniusinas), e estes últimos entre geração na própria unidade consumidora e a modalidade de autoconsumo remoto. Em 2024, a micro e minigeração distribuída (MMGD) cresceu 36,6% comparada ao ano anterior, totalizando 42,27 GWh — dos quais 97% foram provenientes da fonte fotovoltaica. Isto é 5,6% da geração total de eletricidade no Brasil.

Embora seja difícil quantificar todos os empreendimentos de MMGD espalhados pelo país, é possível identificar a posição estratégica da Paraíba nesta modalidade de geração. De acordo com dados do Atlas Solarimétrico da Paraíba (Governo da Paraíba, 2023), o estado apresenta uma média diária de irradiação global horizontal de 5,73 kWh/m² por dia, valor superior à média diária da Região Nordeste (5,49 kWh/m²) que figura entre os maiores índices de irradiação solarimétrica do país. Em contexto mundial, esses valores se assemelham aos registrados em países como Espanha e Portugal, que possuem forte cultura voltada ao aproveitamento de energia solar (Tenório, 2025).

Embora a Paraíba possua atualmente 4.618 MW de potência outorgada e 119 empreendimentos de energia solar (de pequeno a grande porte), em variados níveis de licenciamento, a exploração da energia solar é uma realidade recente no estado. As primeiras plantas de geração solar fotovoltaica surgiram apenas em 2018 – e, em 2019, o estado contava com 108 MW de potência outorgada e em operação (Tenório, 2025). Nesse sentido, na Paraíba o contexto é de expansão na exploração de energia solar.

Diante da possível exaustão de fontes de energia convencional, combustíveis fósseis e carvão), estimada para o fim deste século ou início do próximo (Gajadharane *et al.*, 2016), a energia solar assume papel estratégico em uma transição energética, sendo uma alternativa com amplas aplicações (usinas, domicílios, instalações agropecuárias etc.) e de excelente custo-benefício a médio e longo prazo.

Uma forma de aumentar a eficiência são Sistemas Ativos de Rastreamento Solar (ASTS, na sigla em inglês) que são classificados dependendo de seus graus de liberdade, em sistemas de um eixo, dois eixos ou múltiplos eixos. Esses sistemas podem aumentar significativamente a quantidade de energia produzida, principalmente no início da manhã e no final da tarde, onde a relação angular da irradiação solar direta com a superfície é menor (Fuentes-Morales *et al.*, 2020). Singh *et al.* (2018) apontam um aumento de eficiência de 12% a 25% com utilização de sistemas de um eixo e de 30% a 45% com sistemas de dois eixos.

O objetivo de um sistema ativo de rastreamento é alcançar alta precisão no rastreamento solar, assim como minimizar perturbações, idealmente, com alta estabilidade e proporcionando sinais de controle suaves (Fuentes-Morales *et al.*, 2020). Para tal, o sistema faz uso de variados componentes, subsistemas de acionamento mecânico de transmissão, motores elétricos, sensores de posição solar e algoritmos com cálculo de posições solares, unidades de controle e interruptores de limite (Prinsloo; Dobson, 2015).

Senso assim, este trabalho apresenta a análise de viabilidade de integração de um sistema ativo de rastreamento solar em micro usinas e energia solar, desenvolvendo um sistema de base mecânica para rastreamento e implementação em micro usinas, com possibilidade de instalação em qualquer localidade, com o objetivo de disponibilizar um modelo que auxilie nas metas de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), a saber: (07) energia limpa e acessível; (10) redução de desigualdades; (11) cidades e comunidades sustentáveis e (13) ação contra a mudança global do clima.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A crescente expansão da geração distribuída fotovoltaica tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aumento da eficiência energética dos sistemas solares. Nesse contexto, os sistemas ativos de rastreamento solar destacam-se por possibilitarem o acompanhamento da trajetória aparente do Sol ao longo do dia, permitindo o melhor aproveitamento da incidência de radiação sobre os módulos e, conseqüentemente, aumento da geração de energia elétrica.

Embora os rastreadores solares apresentem potencial para elevar o desempenho energético de micro usinas fotovoltaicas, sua implementação envolve fatores técnicos e econômicos que influenciam diretamente a viabilidade da tecnologia. Aspectos relacionados aos sistemas de controle, estabilidade estrutural, resistência a carregamentos externos, consumo energético dos atuadores e custos adicionais de implantação devem ser considerados na análise do sistema.

2.1 Energia solar fotovoltaica e microgeração no Brasil

A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética brasileira, tradicionalmente dependente da fonte hídrica. Essa modalidade de geração permite reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais causados pelo acionamento de usinas termelétricas, que possuem elevados custos operacionais e alta emissão de gases de efeito estufa. No Brasil, a utilização desse tipo de modalidade é favorecida por um elevado potencial solar, com índices de irradiação global horizontal anual que variam de 1500 kWh/m² a 2350 kWh/m², superando significativamente países líderes no setor, como a Alemanha (Tenório, 2025).

No âmbito normativo, o setor é impulsionado principalmente pela Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabeleceu o sistema de compensação de energia para micro e minigeração distribuída. Através deste modelo, o sistema de geração é conectado à rede pública de distribuição junto à unidade consumidora, permitindo que a energia excedente seja injetada na rede para posterior compensação no consumo líquido.

A geração distribuída diferencia-se da centralizada – voltada à produção em larga escala e transmissão – e da isolada, que atende locais remotos sem conexão com a rede elétrica (Rosa; Gasparin, 2016).

A micro e minigeração de energia é regulamentada pela Resolução nº 687 (ANEEL, 2015) e consiste na produção de energia a partir de pequenas centrais que utilizam fontes renováveis de energia elétrica conectadas à rede por unidades consumidoras (Silva, 2019). Para sistemas *grid-tie* (conectados à rede elétrica) o sistema de geração solar não faz uso de banco de baterias, e o excedente é aproveitado como créditos de energia.

Dessa forma, a ANEEL (2017) define os sistemas de microgeração, minigeração da seguinte forma:

- I – microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- II – minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme a regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- III – sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2017).

Apesar do potencial técnico e das oportunidades de expansão, a disseminação da microgeração fotovoltaica no país ainda enfrenta desafios estruturais e econômicos. O investimento inicial elevado e o longo prazo de recuperação do capital (*payback*) são obstáculos críticos, especialmente para consumidores residenciais. Além disso, entraves tributários, como a incidência de ICMS sobre o consumo bruto em vez do líquido em diversos estados, e a necessidade de políticas públicas mais robustas para incentivos fiscais e linhas de financiamento facilitadas, são determinantes para a viabilidade econômica e popularização desta tecnologia na sociedade brasileira.

2.2 Sistemas Ativos de Rastreamento Solar

Os sistemas de rastreamento solar, ou *solar trackers*, são dispositivos mecânico-eletrônicos projetados com o objetivo fundamental de orientar coletores, painéis fotovoltaicos ou concentradores em direção ao sol ao longo do dia. A função primordial dessas tecnologias é maximizar a captação da radiação solar incidente, garantindo que o vetor solar permaneça o mais próximo possível da normal da superfície coletora (Fuentes-Morales *et al.*, 2020). Ao implementar um sistema de acompanhamento automático, é possível aumentar significativamente a eficiência de colheita energética em comparação a sistemas fixos, sendo essencial para aplicações de alta precisão, como o rastreamento em dois eixos (altitude-azimute).

A diferenciação entre sistemas ativos e passivos reside na forma como o movimento é gerado e controlado. Enquanto sistemas passivos geralmente dependem de propriedades físicas de fluidos que se expandem com o calor para orientar a estrutura, os sistemas ativos utilizam componentes eletrônicos e fontes externas de energia para realizar o posicionamento. Os sistemas ativos podem operar por meio de sensores ópticos que detectam a posição de maior luminosidade ou através de algoritmos matemáticos de alta precisão que calculam as coordenadas solares com base na localização geográfica e no tempo sideral.

Em termos de elementos padrão, um sistema de rastreamento ativo é composto por uma integração de *hardware* e *software*, incluindo microcontroladores (como Arduino ou PIC),

sensores de realimentação de ângulo, *drivers* de potência e atuadores, como motores de passo ou motores de corrente contínua (Prinsloo; Dobson, 2015). Esses componentes trabalham em conjunto para processar os dados de posicionamento e executar a movimentação física da estrutura. A compreensão desses elementos eletrônicos e lógicos estabelece a base necessária para a análise dos aspectos mecânicos, que definem as plataformas de suporte, os graus de liberdade e os mecanismos de transmissão de torque que sustentam o coletor solar.

2.3 Aspectos Mecânicos e Estruturais

Além dos sistemas de controle e posicionamento, o desempenho dos rastreadores solares também está diretamente relacionado às características mecânicas e estruturais do sistema. A movimentação contínua dos módulos fotovoltaicos exige estruturas capazes de suportar esforços mecânicos, cargas ambientais e condições operacionais variadas, mantendo estabilidade e precisão durante o funcionamento.

Nesse contexto, o dimensionamento adequado dos componentes mecânicos representa um fator essencial para a confiabilidade e a vida útil do sistema. Entre os principais elementos estruturais empregados em rastreadores solares destacam-se os atuadores lineares, mancais, engrenagens, suportes metálicos e mecanismos de transmissão de movimento, responsáveis pelo deslocamento angular dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia.

Com foco nesse aspecto, Cuong, Nha e Hong (2018) realizaram a análise dimensional de um atuador linear aplicado a sistemas de rastreamento solar, propondo um método de seleção para rastreadores de eixo único. O estudo considerou parâmetros como torque, capacidade de carga, amplitude de movimento e resistência mecânica, evidenciando que a escolha inadequada do atuador pode comprometer tanto a eficiência do rastreamento quanto a durabilidade estrutural do sistema.

Outro fator de elevada relevância corresponde à influência das cargas de vento sobre os rastreadores solares. Diferentemente das estruturas fixas, os sistemas móveis apresentam maior suscetibilidade a esforços dinâmicos devido à variação contínua da posição dos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, a estabilidade estrutural torna-se um parâmetro crítico para garantir segurança operacional e evitar falhas mecânicas.

Nesse sentido, Kamela, Zeundjua e Oduetse (2024) investigaram o efeito da carga de vento na estabilidade estrutural de rastreadores solares de dois eixos, analisando os impactos das forças aerodinâmicas sobre o desempenho e a integridade do sistema. Os resultados demonstraram que condições severas de vento podem aumentar significativamente os esforços estruturais, exigindo reforços mecânicos e estratégias de posicionamento de segurança para minimizar riscos operacionais.

Adicionalmente, aspectos relacionados ao arranjo físico dos módulos também influenciam diretamente o desempenho mecânico e energético dos sistemas de rastreamento. Jensen *et al.* (2022) desenvolveram um método de código aberto para cálculo do auto sombreamento em campos de coletores solares com rastreamento de dois eixos e geometria arbitrária. O estudo evidenciou que o espaçamento inadequado entre estruturas móveis pode provocar perdas de geração energética e limitar a eficiência global do sistema, tornando necessário o balanceamento entre aproveitamento da área disponível e minimização de sombreamentos.

Dessa forma, observa-se que os aspectos mecânicos e estruturais desempenham papel fundamental na implementação de sistemas ativos de rastreamento solar. Embora o rastreamento permita ganhos energéticos relevantes, sua aplicação demanda análises estruturais criteriosas, considerando fatores como estabilidade, resistência mecânica, carregamentos ambientais e confiabilidade operacional, os quais influenciam diretamente a viabilidade técnica e econômica da tecnologia.

2.4 Eficiência e Viabilidade

Conforme discutido anteriormente, o principal diferencial dos rastreadores é acompanhar a trajetória aparente do Sol, reduzindo perdas associadas ao desalinhamento angular entre os raios solares e a superfície dos módulos e aumentando a produção de energia elétrica ao longo do dia.

Diversos estudos têm demonstrado que a utilização de sistemas de rastreamento pode proporcionar ganhos significativos de geração energética quando comparados a sistemas fotovoltaicos convencionais de inclinação fixa. Esses ganhos variam conforme fatores como latitude, condições climáticas, tipo de rastreador empregado e geometria do arranjo fotovoltaico, sendo geralmente mais expressivos em sistemas de dois eixos devido à maior capacidade de alinhamento solar.

Mamodiya e Tiwari (2023) desenvolveram um sistema de rastreamento solar em malha fechada capaz de medir em tempo real a posição do Sol, permitindo o ajuste contínuo do posicionamento dos módulos fotovoltaicos. O estudo aplicou diferentes estratégias de controle com o objetivo de maximizar a eficiência energética do sistema, demonstrando aumento na captação de radiação solar em comparação aos sistemas estáticos convencionais. Em outra revisão, Singh *et al.* (2018) apontam um aumento de eficiência de 12 a 25% com utilização de sistemas de um eixo e de 30 a 45% com sistemas de dois eixos.

Entretanto, apesar dos ganhos de geração proporcionados pelos rastreadores solares, a implementação dessa tecnologia implica aumento dos custos de implantação, operação e manutenção. Componentes como motores, atuadores, sensores e sistemas de controle adicionam maior complexidade ao sistema fotovoltaico, elevando o investimento inicial e demandando manutenção periódica.

Dessa forma, a análise de viabilidade econômica torna-se fundamental para determinar se o aumento da geração energética compensa os custos adicionais associados ao sistema de rastreamento. Entre os principais indicadores utilizados para essa avaliação destacam-se o tempo de retorno do investimento (*payback*), o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o custo nivelado de energia (LCOE).

Nesse sentido, Kamela, Zeundjua e Oduetse (2024) propõem uma metodologia que culmina na análise da relação custo-benefício de sistemas solares com rastreamento de dois eixos utilizando o LCOE como parâmetro de análise econômica. Os resultados indicaram que, embora os rastreadores apresentem maior custo inicial, o aumento da produtividade energética pode reduzir o custo da energia gerada ao longo da vida útil do sistema, dependendo das condições operacionais e da escala de implantação.

Portanto, observa-se que a eficiência energética e a viabilidade econômica dos sistemas de rastreamento solar estão diretamente relacionadas ao equilíbrio entre ganho de geração e custos adicionais de implementação. Assim, a adoção dessa tecnologia requer análises técnicas e econômicas integradas, considerando não apenas o aumento da produção energética, mas também fatores estruturais, operacionais e financeiros envolvidos na aplicação do sistema.

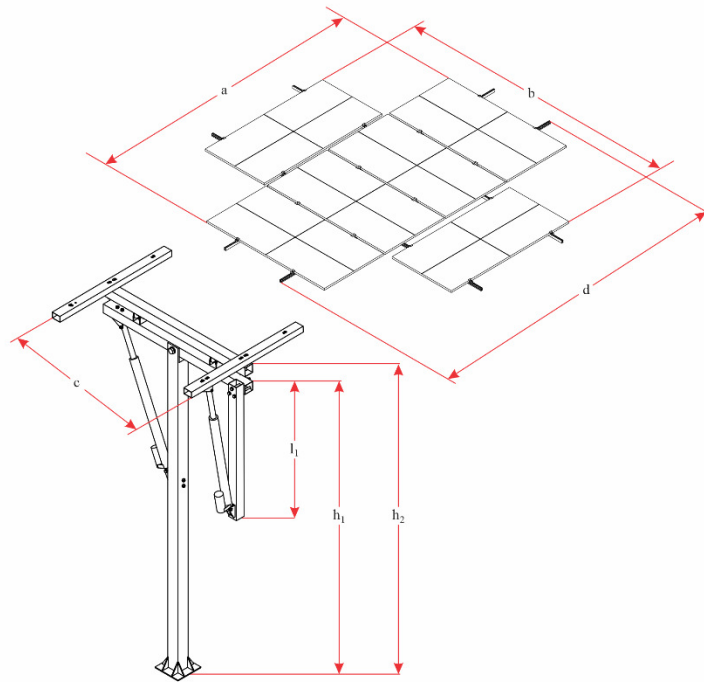
3 MÉTODO DA PESQUISA

Nesta seção são apresentados os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho, contemplando a adequação da estrutura e o dimensionamento do atuador, a estimativa da geração de energia, a avaliação do custo nivelado de energia e do desenvolvimento do *software* “Projeto Solaris” como ferramenta de apoio.

3.1 Estrutura

Neste trabalho, propõe-se o projeto de um rastreador solar de eixo duplo para seis painéis solares utilizando um mecanismo com dois atuadores lineares. Esta seção propõe a seleção de um método adequado para definir o atuador linear (Figura 1), elaborando um projeto utiliza o painel solar TSM-DE18 – 555 W de 555 Wp da marca Trina, com dimensões de 2278 mm x 1134 mm x 30 mm, e peso de 27,5 kg, por ser de uma fabricante brasileira e cumprir os critérios dimensionais. Portanto, na configuração proposta, os painéis solares têm uma, dimensões $a \times b = 4556 \text{ mm} \times 4556 \text{ mm}$ e massa $m = 165 \text{ kg}$. A altura do pilar é $h_1 = 2200 \text{ mm}$. A estrutura retangular para os painéis solares tem dimensões de $c \times d = 842 \text{ mm} \times 4636 \text{ mm}$. O eixo de rotação Leste-Oeste do sistema foi fixado no meio da largura da estrutura.

Figura 1 – Modelo mecânico de um rastreador solar de dois eixos.

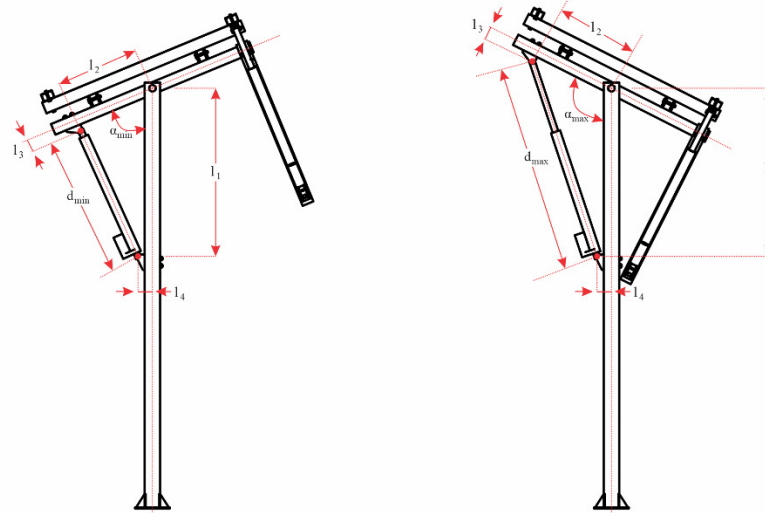


Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Para determinar as dimensões do mecanismo do atuador linear, foi definido o comprimento de l_1 , conforme mostrado nas Figuras 1 e 2, assim como os comprimentos de l_2 , l_3 , l_4 , conforme mostrado na Figura 2. De acordo com a metodologia proposta por Cuong, Nha e Hong (2018), o comprimento de l_1 deve ser menor que o do pilar h_1 . E o comprimento de l_2 deve ser menor que a largura c da estrutura. Para simplificar o problema, propõe-se as seguintes relações entre comprimentos, dispostas na Equação (1).

$$\begin{cases} l_1 = h_1/2 \\ l_2 = c/2 \\ l_3 = c/20 \\ l_4 = h_1/20 \end{cases} \quad (1)$$

Figura 2 – Sistema de orientação ao longo do eixo de rotação para o menor e maior ângulo de rotação.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

3.2 Geração

Os dados referentes à geração de energia do sistema fotovoltaico foram obtidos por meio do *software online* PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), desenvolvido pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia. A ferramenta foi utilizada para estimar a produção anual e mensal de energia com base em dados climáticos e de irradiância solar da localização analisada, considerando parâmetros técnicos do sistema fotovoltaico. As simulações realizadas neste trabalho foram empregadas para gerar estimativas de desempenho energético do sistema. Esse tipo de simulação é amplamente utilizado em estudos de dimensionamento e análise de viabilidade de sistemas de geração fotovoltaica.

Para a realização das simulações, foi utilizada a base de dados meteorológicos SARAH3, considerando a coordenada geográfica [-6.889, -38.5452], relativas ao IFPB Campus Cajazeiras, visto que Campus dispõe de uma planta de placas solares. De posse desses dados, foram simulados dois arranjos fotovoltaicos: um sistema com módulos fixos (*free-standing*) e um sistema com rastreador solar de dois eixos, com potência instalada de 3,33 kWp. Nas simulações, adotou-se um percentual de perdas globais do sistema de 14%, representando perdas associadas a fatores como temperatura, cabeamento, inversor e demais componentes do sistema.

3.3 Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE)

Para avaliar o desempenho econômico dos rastreadores solares fotovoltaicos, calcula-se o custo nivelado da energia elétrica (LCOE) produzida. A estimativa do custo nivelado da eletricidade “LCOE” requer a consideração do custo dos sistemas de geração de energia, bem como da energia gerada ao longo de sua vida útil, para fornecer um custo em R\$/kWh. A expressão para calcular o LCOE é apresentada na Equação (2), de acordo com o proposto por Bahrami, Okoye e Atikol (2017). Porém, é possível simplificar a equação de cálculo do LCOE em função do investimento inicial e custos operacionais, como disposto na Equação (3).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

onde:

t – ano;

C_t – custo no ano t , incluindo investimento inicial, operação e manutenção;

E_t – energia gerada no ano t ;

r – taxa de desconto anual;

n – vida útil do sistema (em anos).

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX_{vida\ útil}}{AEP_{vida\ útil}} \quad (3)$$

onde:

$CAPEX$ – investimento inicial;

$OPEX$ – custos operacionais (durante a vida útil);

AEP – produção anual de energia (durante a vida útil).

Para melhor atender os fins deste estudo, incorporou-se também o valor presente líquido (VPL) aos cálculos do custo nivelado, visto que o VPL traz os custos futuros e a geração de energia para o presente, descontando uma taxa de juros. Os parâmetros considerados para o VPL estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do valor presente líquido.

Período de análise (anos)	Taxa de desconto (%)
25	4,5

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

3.4 Calculadora

Com o objetivo de facilitar o dimensionamento e a análise de sistemas fotovoltaicos com rastreador solar, foi desenvolvido o *software* denominado Projeto Solaris. A aplicação foi projetada para automatizar cálculos relacionados à potência instalada, geração de energia, análise financeira e comparação entre sistemas fotovoltaicos fixos e sistemas com rastreamento solar de dois eixos.

O sistema foi desenvolvido utilizando tecnologias web, empregando as linguagens HTML, CSS e JavaScript para implementação da interface gráfica, estilização visual e processamento das informações, respectivamente. A aplicação apresenta arquitetura modular, sendo dividida em diferentes interfaces responsáveis pela coleta, processamento e apresentação dos dados ao usuário. Maiores detalhes em relação ao funcionamento da calculadora podem ser verificados na seção de resultados.

Para a realização dos cálculos do sistema fotovoltaico, foi desenvolvida uma base de dados contendo informações referentes aos estados e municípios brasileiros, incluindo valores médios de tarifa energética e índices de irradiação solar. Os dados foram organizados em arquivo no formato JSON, possibilitando armazenamento estruturado e acesso eficiente às informações.

A obtenção dos dados de irradiância solar foi realizada por meio da *API POWER*, disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2025), a qual fornece dados climáticos e ambientais aplicáveis a estudos energéticos. A coleta das informações considerou individualmente as coordenadas geográficas dos municípios brasileiros, permitindo maior precisão na estimativa de geração fotovoltaica.

Os dados das tarifas de energia elétrica foram obtidos a partir das informações disponibilizadas pela ANEEL, com base nos valores médios das concessionárias de cada estado brasileiro. Embora o sistema preencha automaticamente essas tarifas conforme o estado

selecionado, o usuário pode ajustá-las manualmente para adequar os resultados à realidade local analisada.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

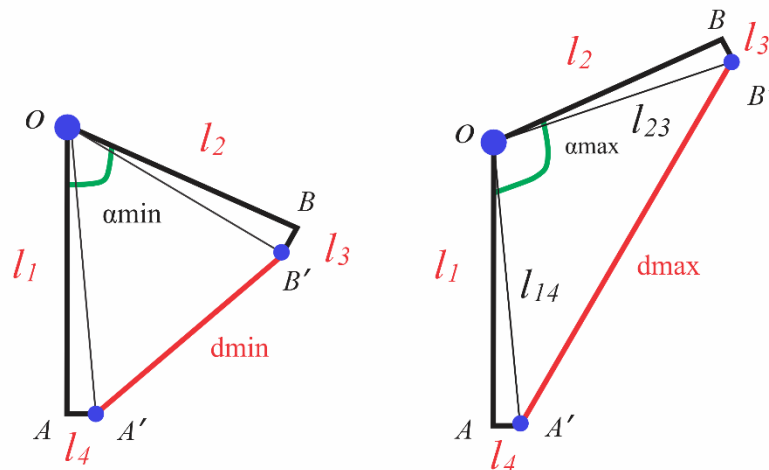
Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, contemplando as análises estrutural e dimensional do sistema proposto, a estimativa da geração de energia e a avaliação da viabilidade econômica por meio do custo nivelado de energia.

4.1 Estrutura

Um dos primeiros aspectos estruturais definidos na modelagem matemática foi o sistema de orientação ao longo do eixo. A Figura 3 apresenta o sistema de orientação ao longo do eixo de rotação, no qual $\alpha_{\min}$ representa o ângulo entre a estrutura de suporte e o eixo vertical (pilar), sendo também interpretado como o ângulo de inclinação inicial adotado no projeto do sistema. Considerando a simetria do mecanismo, o ângulo máximo de operação é definido como $\alpha_{\max} = \pi - \alpha_{\min}$ (Figura 3). A escolha do ângulo inicial está diretamente relacionada aos requisitos operacionais do sistema de rastreamento solar; e, para as características deste estudo, foi adotado um intervalo de variação de $\alpha_{\min}$ entre 0 e $\pi/2$, conforme proposto por Cuong, Nha e Hong (2018).

Com base nessa configuração geométrica, foram determinados os principais parâmetros de dimensionamento do atuador linear, incluindo o curso (D_{STR}), o comprimento mínimo ($d_{\min}$) na posição retraída e o comprimento máximo ($d_{\max}$) na posição estendida. Adicionalmente, foram avaliadas as condições de operação do atuador, como a força requerida (F), a velocidade de atuação e a tensão de alimentação, permitindo analisar o desempenho do sistema dentro das condições estabelecidas.

Figura 3 – Modelo de cálculo dimensional para o atuador linear.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Conforme descrito por Cuong, Nha e Hong (2018), as relações entre os parâmetros geométricos do sistema são expressas pelas equações apresentadas na Equação (4), as quais foram utilizadas como base para a obtenção dos resultados e análise do comportamento do mecanismo.

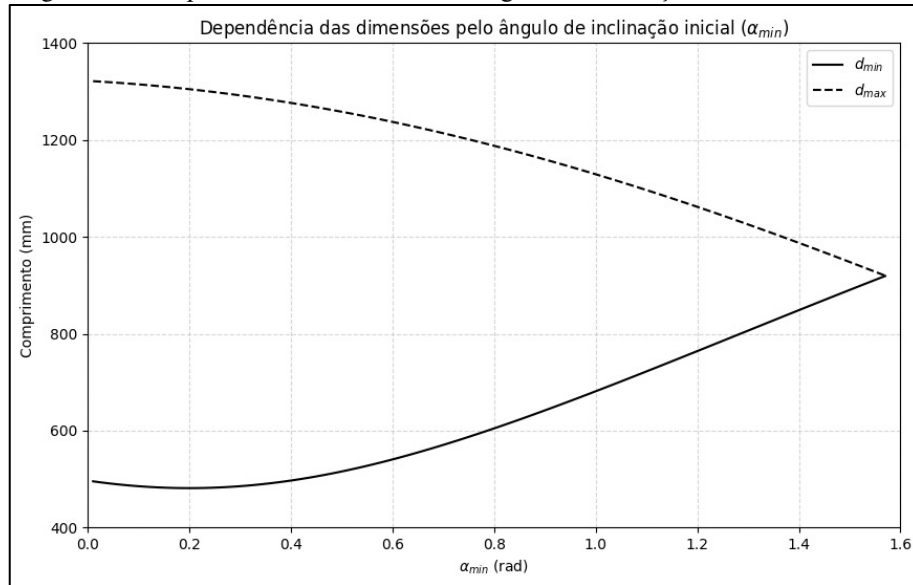
$$\begin{cases} OA' = \sqrt{OA^2 + AA'^2} \\ OB' = \sqrt{OB^2 + BB'^2} \\ \hat{A}OA' = \arctan\left(\frac{AA'}{OA}\right) \\ \hat{B}OB' = \arctan\left(\frac{BB'}{OB}\right) \end{cases} \quad (4)$$

Como pode ser observado na Figura 3, o comprimento totalmente retraído e totalmente estendido do atuador linear pode ser determinado a partir de relações trigonométricas, equacionando os valores de $d_{\min}$ e $d_{\max}$ da forma detalhada na Equação (05):

$$\begin{cases} d_{\min}^2 = OA'^2 + OB'^2 - 2OA' \cdot OB' \cos(\alpha_{\min} - \hat{A}OA' - \hat{B}OB') \\ d_{\max}^2 = OA'^2 + OB'^2 - 2OA' \cdot OB' \cos(\pi - \alpha_{\min} - \hat{A}OA' - \hat{B}OB') \end{cases} \quad (5)$$

A partir das Equações (1), (4) e (5), foram determinados os valores de $d_{\min}$ e $d_{\max}$ em função do ângulo de inclinação inicial $\alpha_{\min}$, evidenciando a dependência direta desses parâmetros com a configuração geométrica adotada. A relação entre $d_{\min}$ e $d_{\max}$ é ilustrada na Figura 4, permitindo visualizar o comportamento do atuador ao longo da variação angular do sistema.

Figura 4 – A dependência da dimensão no ângulo de inclinação mínimo inicial $\alpha_{\min}$.



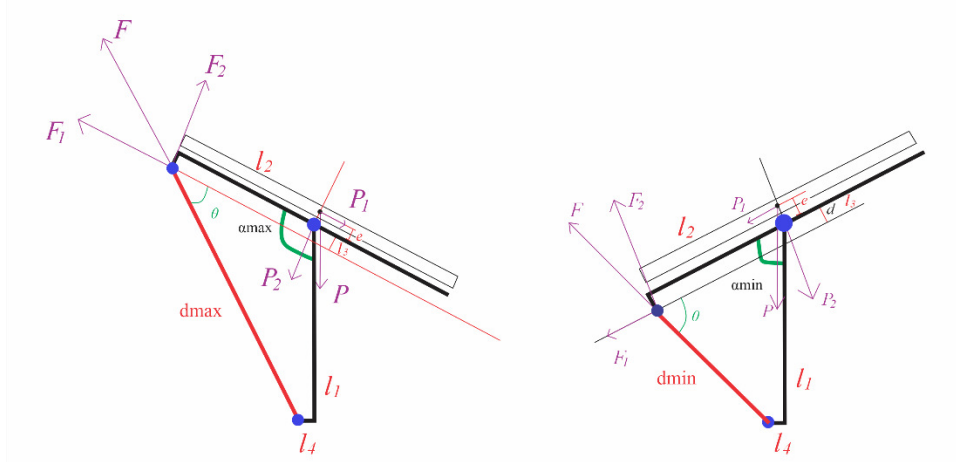
Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Observa-se que a redução do ângulo de inclinação mínimo implica em maior capacidade de captação de radiação solar, ao mesmo tempo em que resulta no aumento da demanda de deslocamento e, conseqüentemente, da energia associada ao movimento do sistema. Considerando a condição de $\alpha_{\min} = \pi/3$, obteve-se para o atuador linear os valores de $d_{\min} = 700$ mm e $d_{\max} = 1100$ mm, resultando em um curso (D_{STR}) de 400 mm.

Após a determinação das dimensões do atuador linear, a metodologia proposta avança para o cálculo dos parâmetros elétricos e mecânicos. A Figura 5 apresenta a análise das forças atuantes no centro de rotação, destacando a interação entre os esforços envolvidos no movimento do conjunto. Nesse contexto, F representa a força exercida pelo atuador linear para

sustentar e movimentar a estrutura, enquanto P corresponde à força gravitacional resultante do peso do painel fotovoltaico e de sua estrutura de suporte.

Figura 5 – Análise da força no sistema de rastreamento.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

O torque do atuador no centro de rotação do sistema de rastreamento é dado pela Equação (06). E o momento excêntrico do sistema de rastreamento é dado pela Equação (7).

$$M_{atuador} = F_1 \cdot l_3 + F_2 \cdot l_2 = F(\cos(\theta) \cdot l_3 + \sin(\theta) \cdot l_2) \quad (6)$$

$$M_e = P_1 \cdot e = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot e \quad (7)$$

onde:

m – é a massa dos painéis solares;

e – é a excentricidade ou a distância do centro do painel ao centro de rotação do sistema na direção perpendicular ao painel;

α – é o ângulo entre o painel solar e o eixo vertical.

O momento do vento em relação ao eixo de rotação do sistema é dado por Peterka e Derickson (1992), com base na Equação (8).

$$M_{vento} = C_M \cdot 0,613 \cdot v_{vento}^2 \cdot A \cdot b \quad (8)$$

onde:

C_M – é o coeficiente do momento do vento, dependendo do ângulo entre a direção do vento e os painéis solares;

v_{vento} – é a velocidade do vento (m/s);

A – é a área da superfície do painel solar (m²);

b – é a largura do painel solar em relação ao eixo de rotação.

Para a avaliação do momento devido à ação do vento, adotou-se o coeficiente de momento máximo de resistência, considerando $C_M = 0,6$, conforme recomendado por Peterka e Derickson (1992). Assumiu-se ainda que o sistema de rastreamento opera sob condição de vento correspondente ao nível 6, o que equivale a uma velocidade máxima de 13,8 m/s, representando uma situação crítica para análise do carregamento aerodinâmico.

No caso do sistema de rotação intermitente, o acionamento ocorre de forma cíclica, com sucessivas partidas ao longo da operação. Dessa forma, torna-se necessário considerar os efeitos dinâmicos associados à aceleração do sistema, incorporando o momento de inércia na modelagem. Assim, a equação que contempla essa contribuição é apresentada na Equação (9),

sendo utilizada para uma análise mais realista das solicitações atuantes durante o funcionamento.

$$M_{qt} = J \cdot \varepsilon_{\max} \quad (9)$$

onde:

$\varepsilon_{\max}$ – é a aceleração angular do sistema na inicialização (rad/s^2);

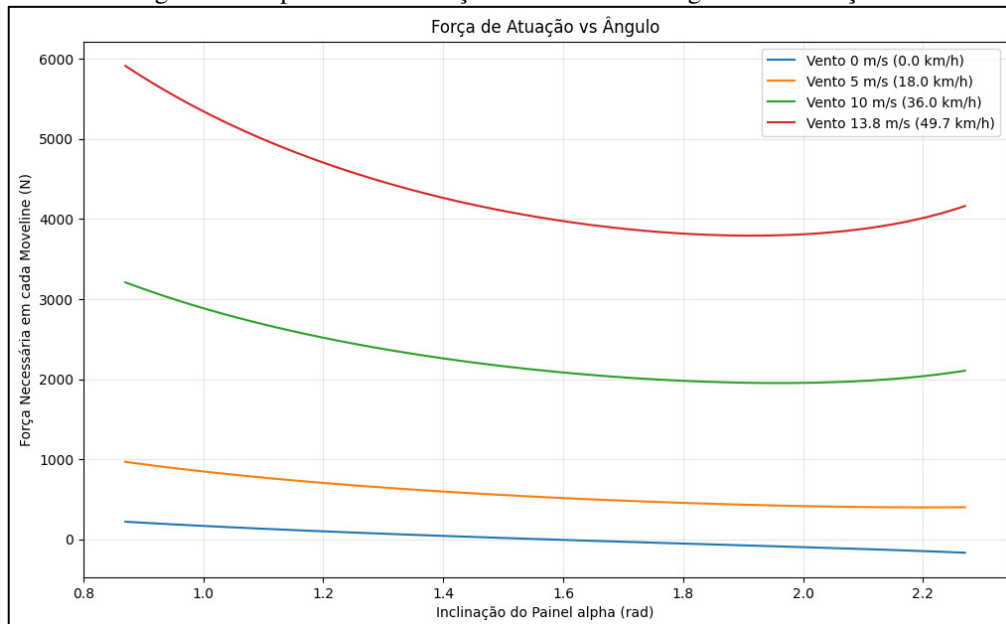
J – é o momento de inércia da parte rotativa (kg.m^2).

A equação de equilíbrio de torque do sistema de rotação em torno do ponto O é dada a seguir, na Equação (10).

$$M_{qt} = M_{\text{atuador}} - M_e - M_{\text{vento}} \quad (10)$$

A Figura 6 mostra a dependência da força F do atuador no ângulo de inclinação e em diferentes níveis de vento quando o sistema de acionamento tem aceleração angular inicial $\varepsilon_{\max} = 0,01 \text{ (rad/s}^2\text{)}$.

Figura 6 – Dependência da força F do atuador no ângulo de inclinação.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

A Figura 6 mostra que, quando a velocidade do vento é de nível 6 e o ângulo de inclinação está na faixa de $\pi/3$ a $2\pi/3$, o atuador do sistema de rastreamento deve ter uma força $F \approx 6000 \text{ N}$ no arranque. Optou-se por um atuador de 8000 N , definindo um fator de segurança de 1,3.

O modelo escolhido foi o atuador linear da marca Moveline com curso de 400 mm , tensão de entrada de 24 VCC , velocidade de 5 mm/s , força (carga máxima) de 8000 N , comprimento totalmente retraído 710 mm e comprimento totalmente estendido de 1110 mm . Alterações pontuais foram feitas para melhor acomodar o atuador à estrutura.

O dimensionamento do segundo atuador, responsável pelo movimento em torno do eixo de azimute, foi realizado de forma análoga ao primeiro, porém considerando as particularidades desse grau de liberdade. Diferentemente do eixo de elevação, o momento devido ao peso do conjunto não contribui significativamente, uma vez que o eixo de rotação é aproximadamente paralelo à direção da gravidade. Assim, o principal esforço a ser vencido é o momento gerado

pela ação do vento, calculado a partir da Equação (8), onde b representa a distância entre o eixo vertical de rotação e o centro de pressão do conjunto.

De posse de M_{vento} , a força requerida pelo atuador foi obtida por meio da Equação (11), onde l_{ef} é o braço de alavanca efetivo associado à geometria de fixação do atuador no plano horizontal, ou pela distância do ponto de fixação ao eixo vertical (r) multiplicada pelo ângulo entre o atuador e o braço.

$$F_2 = \frac{M_{vento}}{l_{ef}} = \frac{M_{vento}}{r \cdot \cos(\theta)} \quad (10)$$

Dessa forma, o dimensionamento considerou a condição mais crítica de carregamento devido ao vento, garantindo que o atuador selecionado seja capaz de realizar o posicionamento do sistema com segurança e confiabilidade operacional. O segundo atuador deve ter uma força aproximada a 5000 N. Para facilitar o diagrama elétrico, foram empregados dois atuadores do mesmo modelo, de 8000 N.

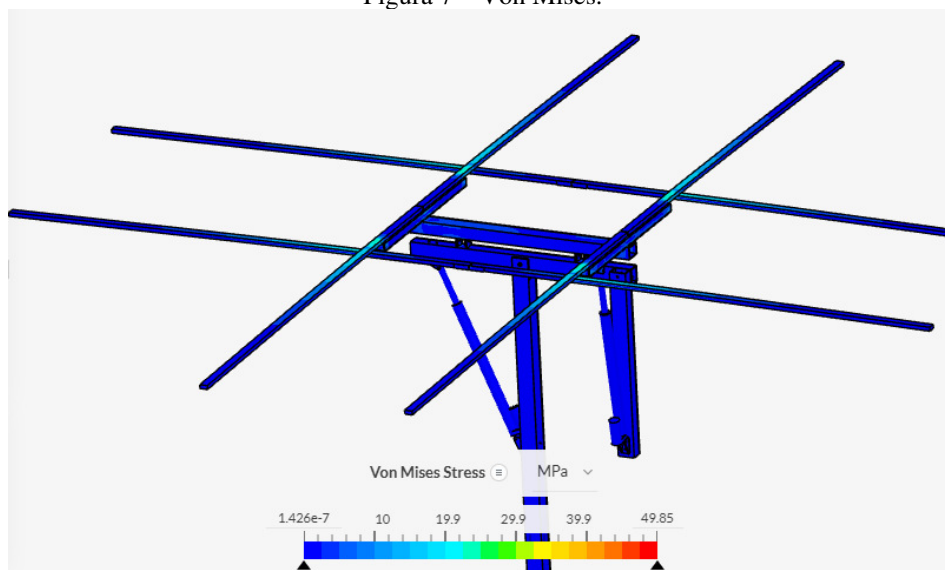
4.2 Análise Estrutural

Foi realizada uma análise estrutural estática da montagem com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico da estrutura sob carregamentos representativos de operação. A simulação foi conduzida em ambiente de elementos finitos do *software* SimScale, considerando materiais estruturais metálicos e condições de contorno compatíveis com a aplicação.

A estrutura foi submetida à ação da gravidade e a um carregamento externo equivalente a 2000 N, aplicado de forma distribuída sobre as superfícies de suporte dos módulos, representando o peso dos componentes instalados. A distribuição da carga foi realizada em múltiplas faces, garantindo uma representação mais realista do carregamento, evitando concentrações artificiais de tensão e a base da estrutura foi modelada com restrição fixa, impedindo deslocamentos e rotações, de modo a simular a fixação ao solo. Já os atuadores foram modelados como elementos de força axial, transmitindo esforços apenas na direção de seu eixo, desconsiderando a resistência a momentos, de forma a representar o comportamento real de juntas articuladas.

A análise de tensões, baseada no critério de Von Mises (Figura 7), indicou uma tensão máxima de aproximadamente 49,85 MPa, distribuída de forma não uniforme ao longo da estrutura, com maiores concentrações em regiões de conexão e transição geométrica. Assim, obteve-se fator de segurança aproximado de 4,15 para componentes em aço e 5,52 para alumínio 6061, indicando operação segura com margem adequada em relação ao escoamento dos materiais.

Figura 7 – Von Mises.

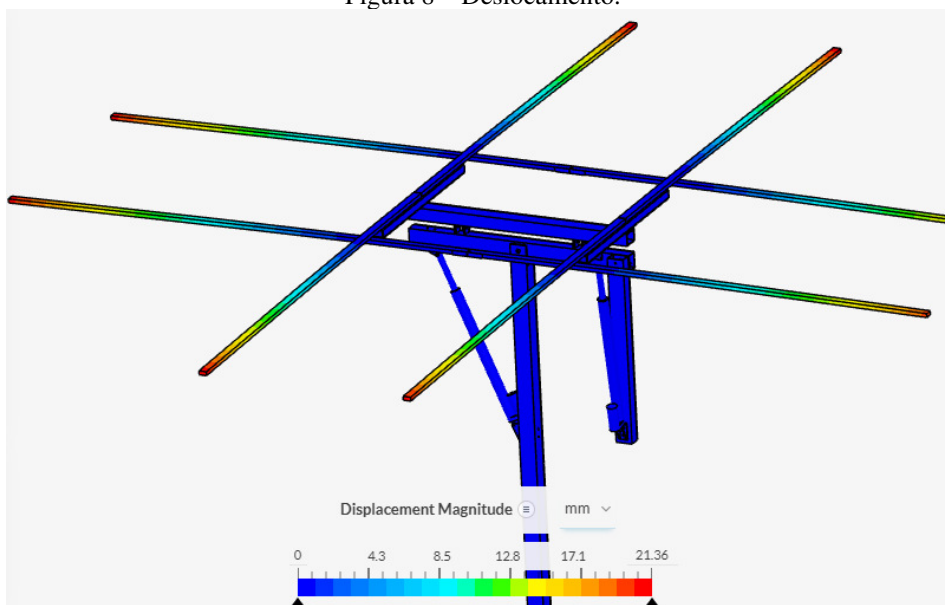


Fonte: elaborada pelos próprios autores.

O deslocamento máximo obtido foi de aproximadamente 21,36 mm (Figura 8), concentrado nas extremidades dos perfis estruturais, enquanto a região central e a base apresentaram deslocamentos reduzidos. Esse comportamento é característico de elementos submetidos à flexão. Embora as tensões estejam dentro de limites seguros, o deslocamento observado se aproxima dos limites usuais de projeto ($L/200$ a $L/300$), indicando que o desempenho estrutural é governado por critérios de rigidez.

Em relação ao deslocamento, verificou-se que as regiões próximas à base e à coluna principal apresentam deslocamentos mínimos, devido à restrição imposta; a região central da estrutura apresenta deslocamentos moderados; e as extremidades dos perfis horizontais concentram os maiores deslocamentos, configurando comportamento típico de vigas em balanço.

Figura 8 – Deslocamento.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

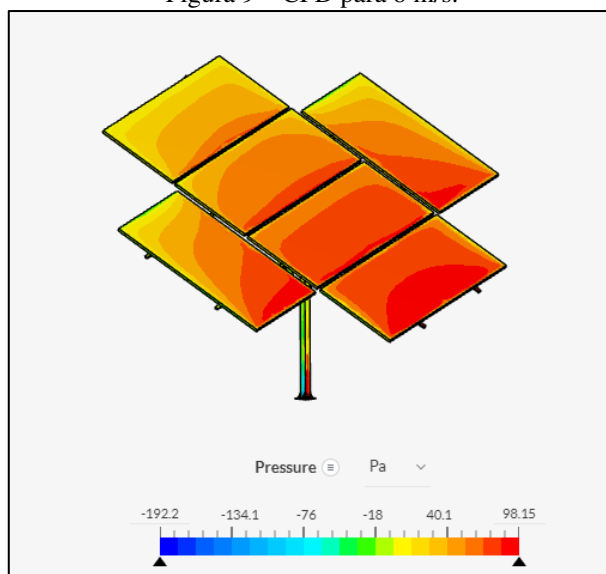
Os resultados demonstram que a estrutura apresenta comportamento seguro do ponto de vista da resistência mecânica, com tensões significativamente inferiores aos limites dos materiais. Entretanto, os deslocamentos nas extremidades indicam a necessidade de verificação quanto aos critérios de serviço, podendo ser reduzidos por meio do aumento da seção dos perfis, da inclusão de reforços estruturais ou da otimização da geometria da estrutura.

4.3 Análise de carga de vento

A análise CFD realizada para uma velocidade de vento de 8 m/s (Figura 9) evidencia uma distribuição não uniforme de pressão ao longo dos módulos do rastreador, com regiões de sobrepressão na face de incidência do vento, atingindo valores próximos de 98 Pa, e zonas de sucção na face oposta, com valores de até aproximadamente -192 Pa. Esse gradiente de pressão resulta em uma força aerodinâmica significativa, gerando não apenas esforço de arrasto, mas também um momento resultante sobre a estrutura, intensificado pela assimetria na distribuição das cargas devido à inclinação dos painéis.

Observa-se maior concentração de esforços nas regiões periféricas dos módulos, indicando pontos críticos para o dimensionamento estrutural e das fixações. De modo geral, os valores obtidos mostram-se coerentes com o regime de escoamento esperado para essa faixa de velocidade, fornecendo subsídios consistentes para a verificação da integridade estrutural do sistema.

Figura 9 – CFD para 8 m/s.



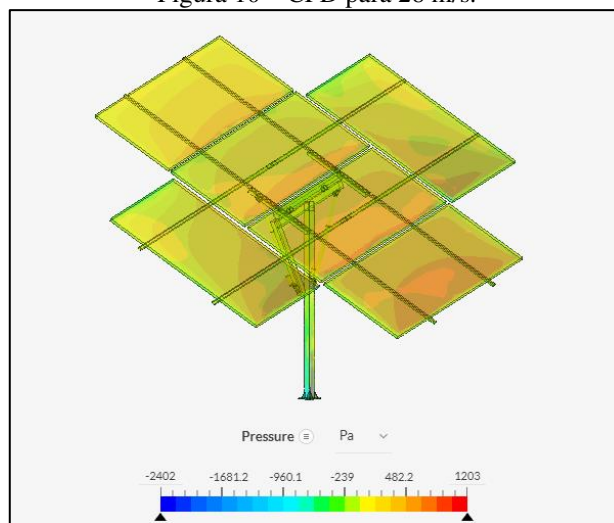
Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Para a condição de vento mais severa, com velocidade de 28 m/s, tida como situação severa para funcionamento, a Figura 10, a análise CFD evidencia uma intensificação significativa dos campos de pressão ao longo da estrutura do rastreador. Observam-se valores de sobrepressão que atingem aproximadamente 1200 Pa nas regiões diretamente expostas ao escoamento, enquanto as zonas de sucção alcançam cerca de -2400 Pa na face oposta, caracterizando um elevado gradiente de pressão. Essa diferença acentuada resulta em forças aerodinâmicas expressivas, com aumento substancial do esforço de arrasto e, principalmente, do momento fletor e tursor atuante sobre o eixo de rotação e o poste de sustentação.

A distribuição não uniforme das pressões, agravada pela geometria inclinada dos módulos, indica concentração de cargas nas extremidades e regiões periféricas, tornando esses pontos críticos para falhas estruturais ou deformações excessivas. Os resultados são compatíveis com o comportamento esperado para ventos de alta intensidade, demonstrando que

essa condição representa um cenário crítico de projeto, fundamental para a definição de estratégias de segurança, como posicionamento de sobrevivência do sistema.

Figura 10 – CFD para 28 m/s.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

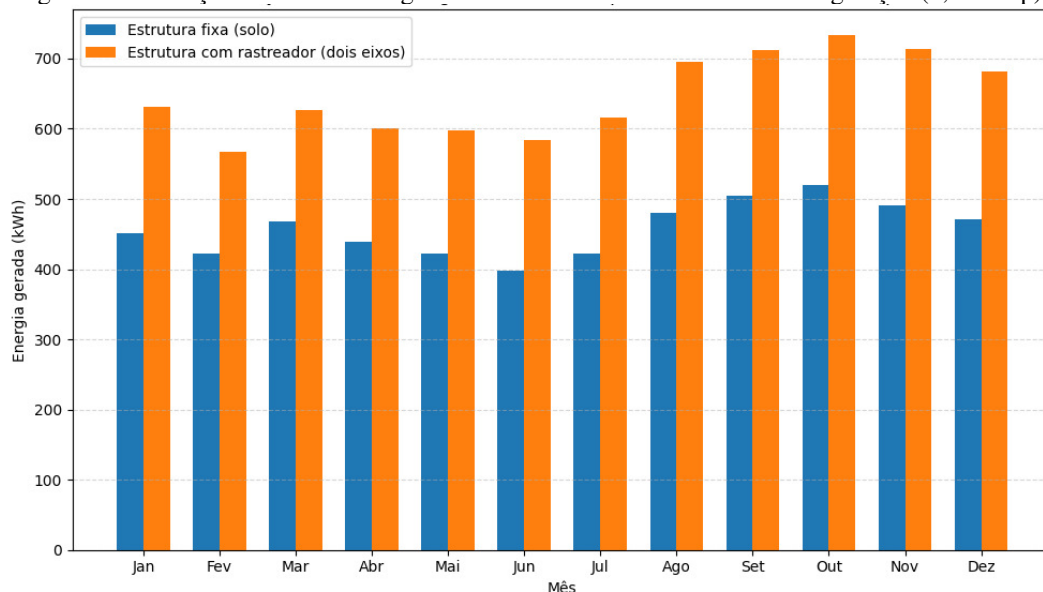
Esses resultados, quando analisados em conjunto a análise estrutural por elementos finitos (FEA), resultaram em um comportamento global satisfatório da estrutura, que apresentou fator de segurança próximo a 4, mesmo sob condições severas. Tal resultado indica que a configuração estrutural, composta por elementos em aço e alumínio, possui capacidade adequada para resistir às solicitações provenientes do escoamento, com boa distribuição de tensões e deformações dentro de limites aceitáveis.

Embora o modelo estrutural não contemple detalhadamente os elementos de fixação, a coerência entre os campos de pressão obtidos no CFD e a resposta estrutural observada no FEA reforça a confiabilidade do projeto em nível global, indicando que a estrutura é capaz de suportar as condições analisadas, restando como etapa complementar a verificação localizada das conexões, onde podem se concentrar pontos críticos.

4.4 Geração

Os resultados de geração de energia dos sistemas fotovoltaicos analisados são apresentados a seguir por meio de gráficos que ilustram a produção ao longo do ano, as simulações foram realizadas com auxílio do *software* online PVGIS. As simulações foram realizadas para duas configurações distintas (painéis fixos e rastreador) com uma capacidade instalada de 3,33 kWp, simulada para coordenadas no Município de Cajazeiras, no interior da Paraíba (Figura 11).

Figura 11 – Geração mensal de energia fotovoltaica na modalidade de microgeração (3,33 kWp).

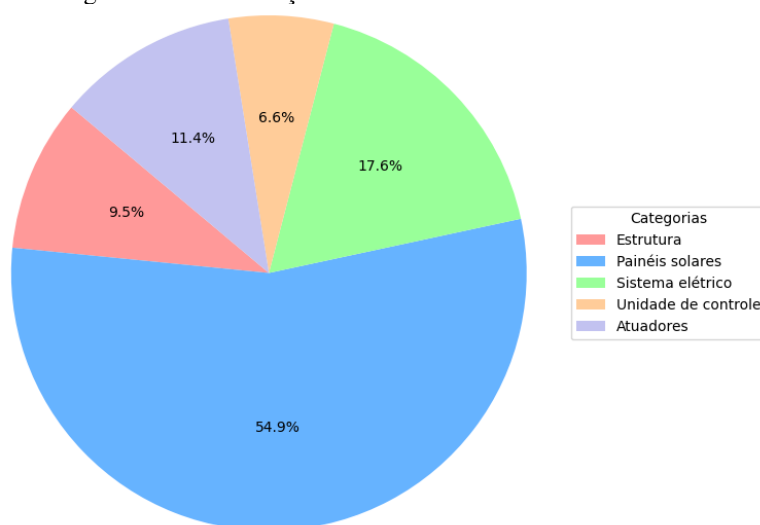


Fonte: elaborada pelos próprios autores.

4.5 Custo Nivelado de Eletricidade

No âmbito do custo nivelado de energia (LCOE), a composição de custos do protótipo/modelo pode ser verificada na Figura 12. A composição do investimento inicial de capital (CAPEX) para o sistema com rastreador é liderada pelos painéis solares, que concentram a maior parcela do orçamento com 54,9% do total. O restante do CAPEX distribui-se entre o sistema elétrico (17,6%), os atuadores responsáveis pela movimentação mecânica (11,4%), a estrutura de sustentação e eixos (9,5%) e, por fim, a unidade de controle que gerencia o algoritmo de rastreamento (6,6%), consolidando uma divisão onde 54,9% dos custos iniciais são destinados diretamente aos módulos de geração fotovoltaica e 45,1% são alocados nos sistemas de suporte, integração e automação do rastreador.

Figura 12 – Distribuição dos custos do sistema rastreador.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

As entradas para cálculo do custo nivelado estão dispostas na Tabela 2, para a modalidade de geração analisada. Os resultados dos cálculos foram dispostos na Tabela 3.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros para cálculo do LCOE (microgeração – 3,33 kWp).

SISTEMA DE 3,33 kWp		
	Fixo	Rastreador
Geração anual (kW/ano)	5.490	7.758
Custo do PV – CAPEX (BRL/kW)	3.874	4.313
Operação e manutenção – OPEX (BRL/kW)	34	38

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Tabela 3 – LCOE (microgeração – 3,33 kWp).

Sistema	LCOE (BRL/kWh)
Fixo	0,18
Rastreador	0,14

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Para a análise econômica foi considerada a tarifa convencional de energia elétrica, pois representa o valor médio pago pelo consumidor residencial do Grupo B (baixa tensão). Embora exista a modalidade tarifa branca com variação horária do preço da energia, optou-se pela tarifa convencional por ser a forma mais difundida de faturamento residencial e por simplificar a comparação com a geração fotovoltaica. O preço médio da tarifa convencional na Paraíba, à época do estudo, equivalia a R\$ 0,676 / kWh. Ajustada no período de vinte e cinco anos (mesmo período de análise do LCOE, a uma inflação de 5% a.a. e obteve-se o resultado final de R\$ 1,29 / kWh. Quando comparada ao custo de geração por kWh dos sistemas, representa redução de 86% no valor pago por kWh, para o sistema de painéis fixos e de 89% para o sistema com rastreador.

4.6 Calculadora

O *software* desenvolvido, denominado de “Projeto Solaris” possui funcionamento dinâmico e responsivo, permitindo a interação entre os módulos de entrada de dados, cálculo técnico, análise financeira e geração de relatórios. O sistema também implementa recursos de navegação entre telas, geração automática de resultados e exportação das informações em formato PDF. Na Figura 13 está ilustrada a Interface inicial do *software* Projeto Solaris.

Figura 13 – Interface inicial do *software* Projeto Solaris.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Com o intuito de melhorar a experiência de utilização do sistema, foi implementado um mecanismo de preenchimento automático (autocomplete) para os campos de estado e município. O recurso realiza sugestões automáticas durante a digitação, além de aceitar abreviações oficiais das unidades federativas (UF). O sistema também realiza tratamento de caracteres especiais e remoção de acentuação, permitindo buscas mais eficientes e reduzindo

erros de inserção de dados. A interface gráfica de entrada de dados do sistema está representada na Figura 14.

Figura 14 – Interface de entrada de dados do sistema.



DADOS DO PROJETO
Informe os dados para calcular seu sistema solar

📍 Estado:
Pereira (PB)

🏘 Município:
Cajazeiras

💡 Consumo mensal (kWh):
500
Consumo médio mensal da sua conta de luz

🔥 Tarifa de energia (R\$/kWh):
0.67565
Valor médio do kWh na sua região

← VOLTAR CALCULAR →

© 2026 Projeto Solaris - Sistema Solar com Rastreador

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

A metodologia de cálculo implementada no *software* baseia-se no consumo médio mensal informado pelo usuário, nos índices de irradiância solar da localidade selecionada e na tarifa de energia da região analisada. Com base nesses dados, o sistema dimensiona a potência necessária para atender à demanda energética da unidade consumidora e estima parâmetros como geração mensal e anual, quantidade de módulos fotovoltaicos necessários e desempenho energético do sistema, apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Resultados técnicos do dimensionamento fotovoltaico.



RESULTADOS
Potência e geração do seu sistema solar

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

- 📍 Localização: Cajazeiras - Paraíba
- ☀ Irradiação solar: 6.0842 kWh/m²/dia
- ⚡ Potência Instalada: **3.89 kWp**
- 📦 Número de Módulos: 7 módulos de 550W
- 📐 Área Necessária: 18.1 m²
- 🔋 Geração Mensal: 575 kWh/mês
- 📅 Geração Anual: 6902 kWh/ano
- 📈 Ganho com Rastreador: +35% de eficiência
- 🔥 Geração com Rastreador: 9318 kWh/ano

← VOLTAR PRÓXIMO: CUSTOS →

© 2026 Projeto Solaris - Sistema Solar com Rastreador

Fonte: elaborada pelos próprios autores.

O sistema também executa cálculos financeiros relacionados ao investimento inicial, economia mensal, economia anual e tempo de retorno do investimento (*payback*) (Figura 16). Adicionalmente, o programa realiza projeções de economia acumulada ao longo de 25 anos de funcionamento do sistema fotovoltaico.

Figura 16 – Interface da análise financeira do sistema fotovoltaico.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

O sistema ainda disponibiliza uma área específica destinada à comparação entre sistemas fotovoltaicos fixos e sistemas com rastreador solar de dois eixos, permitindo a visualização das diferenças relacionadas à geração energética, economia acumulada e desempenho financeiro de cada configuração, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Comparação entre sistema fotovoltaico fixo e sistema com rastreador solar de dois eixos.

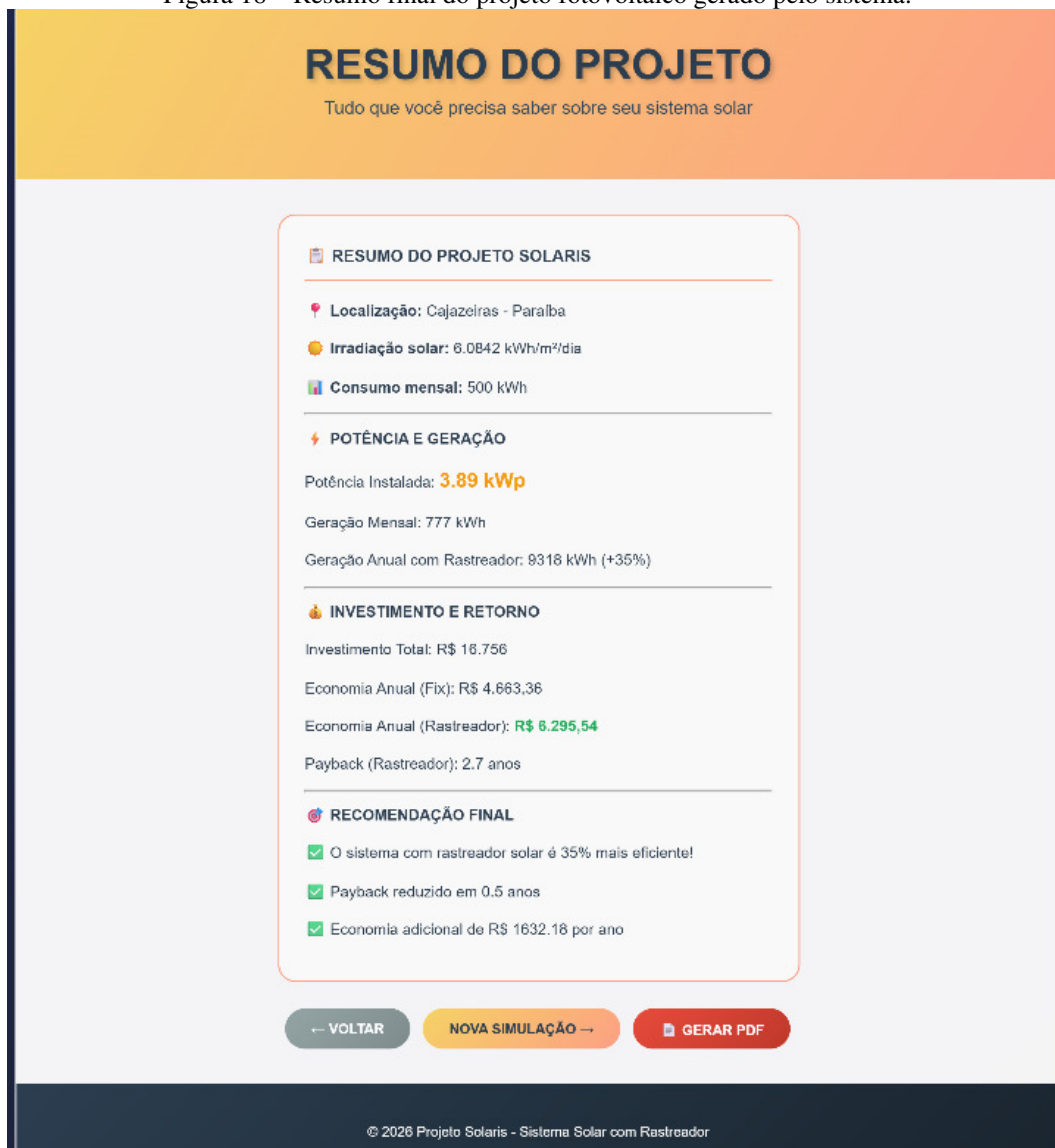


Fonte: elaborada pelos próprios autores.

Ao final do processo, o *software* apresenta um resumo completo contendo todas as informações calculadas durante a simulação, permitindo a análise consolidada do projeto

fotovoltaico. Além disto, como funcionalidade complementar, o sistema possui um mecanismo de exportação de relatórios em formato PDF. A Figura 18 evidencia o resumo final do projeto fotovoltaico gerado pelo sistema.

Figura 18 – Resumo final do projeto fotovoltaico gerado pelo sistema.



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho indicam que a integração de sistemas de rastreamento solar às usinas fotovoltaicas analisadas apresenta potencial de viabilidade técnica e econômica para aplicações de microgeração. A partir das modelagens desenvolvidas e das análises realizadas, observou-se que o custo nivelado de energia (LCOE) do sistema com rastreador mostrou-se inferior ao da estrutura fixa em ambos os cenários, atingindo R\$ 0,14/kWh na microgeração, enquanto o sistema fixo foi calculado como R\$ 0,18/kWh. Além disso, tais valores permaneceram significativamente abaixo das tarifas médias ajustadas ao longo de 25 anos, estimadas em R\$ 1,29/kWh, evidenciando a competitividade econômica da geração fotovoltaica ao longo de sua vida útil.

Nesse contexto, os resultados demonstram que a adoção do sistema de rastreamento solar constitui uma alternativa promissora para ampliação da produção energética. Embora os

rastreadores solares já sejam uma tecnologia amplamente difundida e consolidada comercialmente em usinas de grande porte (geração centralizada), sua aplicação na microgeração ainda enfrenta barreiras devido ao elevado custo relativo de implementação em pequena escala. No entanto, a análise demonstra que o melhor aproveitamento da radiação solar tende a compensar o aumento inicial de investimento relacionado aos componentes adicionais do sistema, como atuadores, controladores, sensores e estruturas móveis, bem como aos custos associados à instalação e manutenção. Dessa forma, a análise desenvolvida sugere que a incorporação do rastreador pode contribuir significativamente para a elevação do desempenho energético das usinas fotovoltaicas, desde que sejam considerados aspectos construtivos, confiabilidade eletromecânica e custos operacionais ao longo da vida útil do sistema.

Ressalta-se, entretanto, que este trabalho possui caráter predominantemente de modelagem e análise computacional, fundamentado em simulações e estimativas técnico-econômicas. Assim, embora os resultados obtidos indiquem viabilidade positiva para a implementação do sistema proposto, recomenda-se, como continuidade da pesquisa, o desenvolvimento e a construção de um protótipo físico do rastreador solar, de modo a validar experimentalmente os parâmetros analisados, avaliar o comportamento estrutural e operacional em condições reais de funcionamento e verificar fatores práticos relacionados à eficiência, confiabilidade, manutenção e durabilidade do sistema. Dessa forma, espera-se que futuras etapas possam consolidar os resultados apresentados e contribuir para o avanço da aplicação de sistemas de rastreamento solar em projetos fotovoltaicos de diferentes escalas.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Homologatória nº 3.378/2024, de 27 de agosto de 2024**. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2024, as Tarifas de Energia - TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD referentes à Energisa Paraíba Distribuidora de Energia - Energisa PB. 2024. Disponível: <https://leis.org/institucionais/br/aneel/lei/resolucao-homologatoria/2024/3378/resolucao-homologatoria-n-3378-2024-homologa-o-resultado-do-reajuste-tarifario-anual-de-2024-as-tarifas-de-energia-te-e-as-tarifas-de-uso-do-sistema-de-distribuicao-tusd-referentes-a-energisa-paraiba-distribuidora-de-energia-energisa-pb-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 3 set. 2025.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2026.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica nº 0056/2017 SRD/ANEEL, 24 de maio de 2017**. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. 2017. Disponível: <https://pt.scribd.com/document/367036280/ANEEL-Nota-Tecnica-estimativa-GD-0056-2017-SRD-ANEEL-pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 687/2015, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. 2015. Disponível: <https://atosoficiais.com.br/aneel/resolucao-normativa-n-687-2015-altera-a-resolucao->

normativa-no-482-de-17-de-abril-de-2012-e-os-modulos-1-e-3-dos-procedimentos-de-distribuicao-prodist?origin=instituicao. Acesso em: 3 set. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). API POWER. 2025. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 4 set. 2025.

BAHRAMI, Arian; OKOYE, Chiemeka Onyeka; ATIKOL, Ugur. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. **Renewable Energy**, v. 113, p. 563-579, dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117304998?via%3Dihub>. Acesso em: 4 set. 2025.

CARMO, João Mateus Dias do. **Otimização da captação de energia solar por meio da automação dos painéis solares**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CASTRO, Carlos Potiara. Hydropower and the geopolitics of renewable energies in the Amazon Basin. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 24, p. 1-21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200129r1vu2021L2AO>. Acesso em: 4 set. 2025.

CUONG, Ngo Xuan; NHA, Vo Quang; HONG, Nguyen Thi. A simplified calculation method of electric linear actuators for single-axis sun tracker. **Hue University Journal of Science: Natural Science**, v. 127, n. 1, p. 47-54, 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2024**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 4 set. 2025.

ETT, Gerhard; SAIKI, Gerson Y.; JARDINI, José A.; TANNURI, José G.; REIS, Lineu Belico dos; MASUDA, Mario; SANTOS, Milena L.; ARNEZ, Ricardo L. Vasquez; CASOLARI, Ronaldo P.; FRONTIN, Sérgio de Oliveira; SOUZA, Thales. Maturidade tecnológica das alternativas não convencionais de transmissão de energia. In: FRONTIN, Sérgio de Oliveira; ETT, Gerhard; SAIKI, Gerson Y.; JARDINI, José A. (org.) **Alternativas não convencionais para transmissão de energia elétrica**: estado da arte. Brasília: Teixeira, 2011. p. 391-442.

EUROPEAN COMMISSION. **PVGIS**: Photovoltaic Geographical Information System. Ispra: Joint Research Centre (JRC). Disponível em: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en. Acesso em: 25 maio. 2026.

FUENTES-MORALES, R. F.; DIAZ-PONCE, A.; PEÑA-CRUZ, M. I.; RODRIGO, P. M.; VALENTÍN-CORONADO, L. M.; MARTELL-CHAVEZ, F.; PINEDA-ARELLANO, C. A. Control algorithms applied to active solar tracking systems: a review. **Solar Energy**, v. 212, p. 203-219, dec. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20311300>. Acesso em: 4 set. 2025.

GAJADHARANE, Monika R.; GIJARE, Niranjana A.; JOSHI, Madhura H.; KANASE, Suraj P.; GHATGE, Mr. Dayanand A.; BAND, Mr. Sagar A. Design and development of mechanical solar tracking system. **International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)**, v. 6, n. 2, p. 704-709, jun. 2016. Disponível em: https://ijaems.com/upload_images/issue_files/1465478212-27%20IJAEMS-JUN-2016-6-Design%20and%20Development%20of%20Mechanical%20Solar%20Tracking%20System.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

GOVERNO DA PARAÍBA. **Atlas solarimétrico da Paraíba**. João Pessoa: Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos, 2023. Disponível em: <https://atlassolar.pb.gov.br/AtlasSolar/atlas-pt/capa-pt.html>. Acesso em: 6 set. 2025.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

JENSEN, Adam R.; SIFNAIOS, Ioannis; FURBO, Simon; DRAGSTED, Janne. Self-shading of two-axis tracking solar collectors: impact of field layout, latitude, and aperture shape. **Solar Energy**, v. 236, p. 215-224, 2022.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems**. 2. ed. [S. l.]: Academic Press, 2013.

KAMELA, Gosego; ZEUNDJUA, Tjiparuro; ODUETSE, Matsebe. Wind load analysis and cost assessment of a dual-axis stand-alone photovoltaic structure. **Engineering Research Express**, v. 6, n. 1, p. 1-18, 2024.

MAMODIYA, Udit; TIWARI, Neeraj. Dual-axis solar tracking system with different control strategies for improved energy efficiency. **Computers and Electrical Engineering**, v. 111, p. 1-22, 2023.

PETERKA, J. A.; DERICKSON, R. **Wind load design methods for ground-based heliostats and parabolic dish collectors**. United States: Sandia National, 1992. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/7105290/>. Acesso em: 4 set. 2025.

PRINSLOO, Gerro J.; DOBSON, Robert Thomas. **Solar tracking, sun tracking, sun tracker, solar tracker, follow sun, sun position**. África do Sul: SolarBooks, 2015.

ROSA, Antonio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 2, p. 140-147, dec. 2016.

SILVA, Herik Roberto Rodrigues. **Energia solar fotovoltaica: dimensionamento de uma micro usina para propriedade rural modelo na cidade de Pau dos Ferros-RN**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi Árido, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/09e17f53-b196-48f1-a29f-7771465bd984/content>. Acesso em: 3 dez. 2024.

SINGH, Rajesh; KUMAR, Suresh; GEHLOT, Anita; PACHAURI, Rupendra. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3263-3278, feb. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117313953?via%3Dihub>. Acesso em: 3 dez. 2024.

SIMSCALE GMBH. **SimScale**. Munique, Alemanha, 2026. Plataforma de software baseada em nuvem. Disponível em: <https://www.simscale.com>. Acesso em: 23 fev. 2026.

TENÓRIO, Camila Lima Gomes. **Análise da abordagem do meio socioeconômico nos estudos de impacto ambiental de empreendimentos de energia fotovoltaica na Paraíba**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

MATERIAL COMPLEMENTAR (QUANDO NECESSÁRIO)

5.1 ▪ QUESTIONÁRIOS APLICADOS

Descrever detalhes do(s) questionário(s) aplicado(s) e disponibilizá-lo(s) em nuvem via google drive com acesso aberto para todos. Gerar um QR Code para acesso.



5.2 ▪ FIGURAS ADICIONAIS

Descrever detalhes da(s) imagem(s) e disponibilizá-la(s) em nuvem via google drive com acesso aberto para todos. Gerar um QR Code para acesso.



	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Restrito

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Joalisson Brito
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Joalisson Weberson Sousa de Brito, DISCENTE (202112240032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 23/07/2026 18:27:30.

Este documento foi armazenado no SUAP em 23/07/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1923767
Código de Autenticação: c0d5e3815d

