

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

ISAAC EMANUEL DE SOUSA SOTÉRIO DE AQUINO

**DESENVOLVIMENTO E TESTE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE RASTREAMENTO SOLAR PARA CONCENTRADOR
PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)**

Cajazeiras-PB
2026

ISAAC EMANUEL DE SOUSA SOTÉRIO DE AQUINO

**DESENVOLVIMENTO E TESTE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE RASTREAMENTO SOLAR PARA CONCENTRADOR
PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)**

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. Leonardo Pereira de Lucena Filho e Coorientação do Prof. Marco Damasceno de Sousa.

Cajazeiras-PB
2026

IFSPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva

Catálogo na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

A657d Aquino, Isaac Emanuel de Sousa Sotério de.

Desenvolvimento e teste experimental de um sistema automatizado de rastreamento solar para concentrador parabólico composto (CPC) / Isaac Emanuel de Sousa Sotério de Aquino. - Cajazeiras, 2026.

32f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

Orientador: Prof. Leonardo Pereira de Lucena Filho.

Coorientador: Prof. Marco Damasceno de Sousa.

1. Sistema fotovoltaico. 2. Sistema automatizado. 3. Rastreamento solar. 4. Concentrador parabólico composto. I. Instituto Federal do Sertão da Paraíba. II. Título.

IFSPB/CZ

CDU: 621.311.243 : 681.5 (043.2)

ISAAC EMANUEL DE SOUSA SOTÉRIO DE AQUINO

**DESENVOLVIMENTO E TESTE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE RASTREAMENTO SOLAR PARA CONCENTRADOR
PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)**

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 ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA**
Data: 16/08/2026 17:17:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo Pereira de Lucena Silva – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **MARCO DAMASCENO DE SOUSA**
Data: 17/08/2026 09:53:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marco Damasceno de Sousa – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ**
Data: 15/08/2026 16:15:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Ricardo de Oliveira Queiroz – IFSertãoPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

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,

DESENVOLVIMENTO E TESTE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE RASTREAMENTO SOLAR PARA CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)

ISAAC EMANUEL DE SOUSA SOTÉRIO DE AQUINO

isaac.soterio@academico.ifpb.edu.br

MARCO DAMASCENO DE SOUSA

marco.sousa@ifpb.edu.br

LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA

lucena.leonardo@ifpb.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação experimental de um sistema automatizado de rastreamento solar aplicado a um concentrador parabólico composto acoplado a células fotovoltaicas. O objetivo foi desenvolver uma plataforma experimental capaz de acompanhar o movimento aparente do Sol e avaliar a influência de diferentes estratégias de controle sobre o erro de rastreamento e o desempenho elétrico do arranjo fotovoltaico. A plataforma foi desenvolvida integrando uma estrutura mecânica de um grau de liberdade, sistema de acionamento eletromecânico, instrumentação e controle eletrônico baseado em microcontrolador Arduino. A avaliação experimental foi realizada comparando três condições de operação: sistema fixo, rastreamento em malha aberta e em malha fechada. O erro de rastreamento foi determinado por meio de um dispositivo baseado no princípio de funcionamento de um gnomon, enquanto o desempenho elétrico foi avaliado a partir das medições da potência gerada pelo sistema fotovoltaico. Os resultados demonstraram que o rastreamento em malha fechada apresentou melhor desempenho, resultando em um erro absoluto médio de rastreamento de $3,91^\circ$, enquanto o sistema fixo e em malha aberta apresentaram valores de $9,72^\circ$ e $4,82^\circ$, respectivamente. Os resultados demonstraram que o rastreamento solar é relevante para a operação de concentradores parabólicos compostos, uma vez que os maiores erros absolutos médios de rastreamento ao longo do dia resultaram em menor estabilidade na geração elétrica. Esse comportamento evidencia que a estratégia em malha fechada se mostrou mais confiável, pois, mesmo apresentando pequenos erros residuais após as correções, o desempenho elétrico do sistema não foi afetado de forma significativa.

Palavras-Chave: sistema fotovoltaico; sistema automatizado; rastreamento solar; concentrador parabólico composto.

ABSTRACT

This work presents the development and experimental validation of an automated solar tracking system applied to a compound parabolic concentrator coupled with photovoltaic cells. The objective was to develop an experimental platform capable of tracking the apparent motion of the Sun and evaluating the influence of different control strategies on tracking error and the electrical performance of the photovoltaic array. The platform was developed by integrating a one-degree-of-freedom mechanical structure, an electromechanical drive system, instrumentation, and electronic control based on an Arduino microcontroller. The experimental evaluation was performed by comparing three operating conditions: fixed system, open-loop tracking, and closed-loop tracking. The tracking error was determined using a device based on

the operating principle of a gnomon, while the electrical performance was evaluated from measurements of the power generated by the photovoltaic system. The results demonstrated that closed-loop tracking provided the best performance, resulting in a mean absolute tracking error of 3.91° , whereas the fixed and open-loop systems presented values of 9.72° and 4.82° , respectively. The results demonstrated that solar tracking is relevant to the operation of compound parabolic concentrators, since the highest mean absolute tracking errors throughout the day resulted in lower stability in electrical power generation. This behavior indicates that the closed-loop strategy was more reliable because, despite exhibiting small residual errors after corrections, the electrical performance of the system was not significantly affected.

Keywords: photovoltaic system; automated system; solar tracking; compound parabolic concentrator.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia fotovoltaica tem se tornado cada vez mais relevante na matriz energética atual, com a produção de energia oriunda da fonte solar atingindo 70,7 TWh no ano de 2024 no Brasil, valor que supera em 39,6% a produção registrada em 2023, que foi de 50,6TWh (EPE, 2025). Além disso, as aplicações de sistemas solares térmicos, impulsionadas pelo desenvolvimento dos concentradores parabólicos compostos (*Compound Parabolic Concentrator* – CPC) nos últimos cinquenta anos, têm sido amplamente utilizadas na área da produção de energia solar, uma vez que captam a incidência da radiação solar para aquecimento ou geração de eletricidade por meio da sua concentração, o que tem levado pesquisadores a intensificarem os esforços para investigar e aprimorar o desempenho desses sistemas (Tian *et al.*, 2018).

Entre as tecnologias de concentração solar, os CPCs caracterizam-se por usar espelhos curvos para focalizar luz solar direta e difusa em um ponto receptor. Por serem capazes de aproveitar tanto a energia térmica como a elétrica, tornam-se adequados para aplicações industriais e residenciais que demandam ambas as fontes de energia (Eames; Norton, 1993). Ademais, os CPCs apresentam ângulos de aceitação amplos, o que os torna apropriados para regiões com condições climáticas variáveis (Sallaberry *et al.*, 2015; Su; Riffat; Pei, 2012). Essa versatilidade amplia o potencial de aplicação da energia solar em diferentes contextos geográficos e climáticos, como os observados no Brasil, país de dimensões continentais.

Para que essa concentração funcione de forma aceitável, é essencial que o concentrador siga com precisão a trajetória aparente do Sol ao longo do dia. Nesse contexto, os rastreadores solares surgem como uma inovação fundamental, com o intuito de otimizar o desempenho desses sistemas, maximizando a geração de energia e sendo capazes, inclusive, de reduzir significativamente o Custo Nivelado da Energia — definido como o custo médio total de construção e operação de um sistema energético ao longo de sua vida útil, dividido pela produção total de energia durante esse período (Kumba *et al.*, 2024).

Um rastreador solar é um dispositivo empregado para ajustar a posição, especialmente de painéis fotovoltaicos, em azimute e/ou elevação, e requer um alto nível de precisão para garantir que a luz solar seja direcionada com exatidão ao dispositivo de geração de energia, maximizando a captação da radiação direta (Musa *et al.*, 2023). No caso de Concentradores Parabólicos, essa precisão é ainda mais crucial, pois esses sistemas dependem exclusivamente da irradiância direta (DNI) e qualquer desalinhamento faz com que o concentrador sofra perdas ópticas, devido ao foco inadequado da radiação solar em seu receptor, mesmo quando apresenta boa qualidade (Sallaberry *et al.*, 2015).

Essas observações sustentam a relevância do desenvolvimento de sistemas automatizados de rastreamento solar capazes de manter o concentrador adequadamente alinhado com a trajetória aparente do Sol. Para validar o desempenho desses sistemas, torna-se

necessário quantificar o erro de rastreamento e analisar sua influência sobre a geração elétrica das células fotovoltaicas.

Abordar essa questão atende a uma necessidade prática e acadêmica, pois através de um dispositivo que consiga manter o alinhamento do concentrador adequado, é possível avaliar como o erro de rastreamento solar influencia no desempenho de coletores parabólicos de baixa concentração aplicados a células fotovoltaicas para geração de energia elétrica. Esse problema de pesquisa decorre de uma lacuna identificada na literatura: embora muitos estudos demonstrem os benefícios gerais do rastreamento, poucos avaliam sistematicamente o erro de apontamento em campo e correlacionam esse erro às perdas de eficiência (Rodríguez-Muñoz; Bove; Alonso-Suárez, 2026).

Existem revisões detalhadas que avaliam diversos tipos de sistemas de rastreamento, incluindo sistemas ativos, passivos, de eixo único, de duplo eixo e híbridos, e que analisam seu desempenho sob diferentes condições ambientais (Kumba *et al.*, 2024), bem como estudos que investigam e comprovam o ganho na maximização da captação da radiação solar, melhorando a produção geral de energia de painéis fotovoltaicos com rastreamento (Kabir; Jihad; Chowdhury, 2025). No campo dos concentradores parabólicos, trabalhos como o de KV., T. e Reddy (2013) descrevem projetos de concentradores parabólicos com sistemas de rastreamento integrados e avaliam, experimentalmente, sua eficiência térmica.

Outros estudos investigam detalhadamente o efeito do rastreamento. Para Fadhil, Fayadh e Wali (2019), a utilização de rastreadores solares de 1 grau de liberdade possibilita um incremento substancial na captação de energia solar, variando entre 27% e 32% em comparação com sistemas fotovoltaicos fixos. Esses resultados corroboram que a precisão do rastreamento impacta diretamente a eficiência do concentrador.

De modo geral, contudo, a literatura ainda carece de estudos que demonstrem a criação de rastreadores aplicados a concentradores e que relacionem o erro de rastreamento medido às variações de eficiência do concentrador em condições reais de operação. A relevância desse tema é sustentada tanto pela necessidade de expansão das fontes renováveis quanto pelas evidências teóricas e experimentais de que o rastreamento preciso maximiza a captação de energia solar.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema automatizado de rastreamento solar para um concentrador parabólico composto (CPC) acoplado a células fotovoltaicas, realizando testes sob diferentes estratégias de controle. Para isso, foi desenvolvido e instrumentado um sistema experimental composto por concentrador parabólico, sistema de rastreamento solar e células fotovoltaicas, possibilitando a coleta de dados nos modos de operação estático, em malha aberta e malha fechada. O erro instantâneo de rastreamento solar foi determinado por meio de uma metodologia geométrica baseada no uso de um gnomon, enquanto o desempenho elétrico foi avaliado a partir das medições de tensão, corrente e potência geradas pelo sistema. A comparação entre as diferentes estratégias de operação permitiu analisar a influência do erro de rastreamento sobre o comportamento elétrico das células fotovoltaicas, bem como avaliar a eficiência das estratégias de controle implementadas.

A metodologia adotada neste trabalho foi de natureza experimental, com abordagem quantitativa e qualitativa, baseada na construção e instrumentação de um protótipo de rastreamento solar aplicado a um concentrador parabólico de baixa concentração acoplado a células fotovoltaicas. Os ensaios foram conduzidos em campo, considerando as três condições de operação definidas, com a coleta simultânea de dados de erro de rastreamento e parâmetros elétricos do sistema, incluindo tensão, corrente e potência gerada. A análise dos dados foi conduzida de forma comparativa, permitindo avaliar o impacto do rastreamento no desempenho elétrico do sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia solar concentrada e concentradores de baixa concentração

O uso de dispositivos de concentração tem constituído, nos últimos 50 anos, uma alternativa para o aproveitamento da energia solar que incide sobre um receptor, concentrando a radiação solar para aquecimento ou geração de eletricidade. O crescente interesse por essa tecnologia tem impulsionado pesquisas para aprimorar o desempenho óptico desses sistemas. Entre os concentradores, destaca-se o concentrador parabólico composto, cujo projeto busca atingir a máxima razão teórica de concentração compatível com o ângulo de aceitação (Tian *et al.*, 2018).

Os CPCs são concentradores não formadores de imagem capazes de aceitar radiação incidente dentro de um intervalo relativamente amplo de ângulos e direcioná-la ao absorvedor por meio de uma ou mais reflexões internas nas superfícies parabólicas e, desde sua proposição por Winston em 1974, constituem uma família de dispositivos ópticos amplamente utilizados em sistemas de energia solar (Kalogirou, 2009). Entre as suas diversas aplicações, os CPCs destacam-se como componentes de sistemas térmico solares, fotovoltaicos (PV) e fotovoltaico-térmicos (PVT) (Tian *et al.*, 2018).

O desempenho dos concentradores solares está diretamente relacionado ao correto alinhamento com a posição aparente do Sol. O ângulo de aceitação constitui uma característica fundamental do sistema óptico, sendo definido como o maior ângulo para o qual todos os raios incidentes sobre o concentrador são transmitidos ao receptor. Assim, o sistema de rastreamento deve manter o concentrador orientado de forma que a radiação solar incida dentro do seu ângulo de aceitação, o que justifica a necessidade de utilizar mecanismos de rastreamento com precisão, caso contrário, podem ocorrer perdas ópticas, reduzindo a eficiência do coletor (Sallaberry *et al.*, 2015).

2.2 Fundamentos da Geometria Solar aplicados ao rastreamento

A Geometria Solar estuda as relações angulares e posicionais entre o Sol e um observador na superfície da Terra, sendo essencial para o dimensionamento e otimização de sistemas de energia solar. Para maximizar a eficiência desses sistemas, especialmente daqueles que utilizam concentração solar ou rastreamento do Sol, é necessário conhecer alguns conceitos de parâmetros geométricos relacionados ao movimento aparente do Sol na abóbada celeste (Kumba *et al.*, 2024; Melo, 2019). Nesse contexto, os principais parâmetros geométricos empregados em sistemas de rastreamento solar são apresentados a seguir.

2.2.1 Movimento aparente do Sol

O movimento aparente do Sol resulta da rotação da Terra em torno do seu próprio eixo, realizada no sentido de oeste para leste. Como consequência, o Sol parece deslocar-se de leste a oeste na esfera celeste, descrevendo uma trajetória paralela ao plano do equador celeste (Güçler *et al.*, 2022).

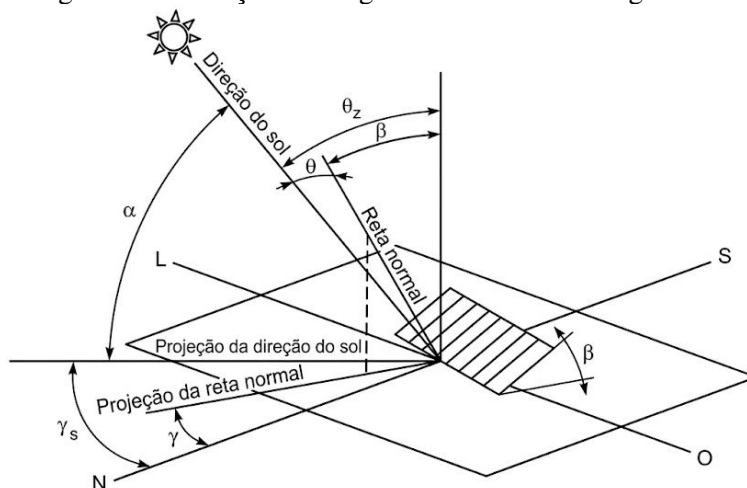
2.2.2 Ângulo horário

Representa a posição aparente do Sol no céu em relação ao meio-dia solar verdadeiro. Esse parâmetro corresponde ao deslocamento angular provocado pela rotação da Terra e é calculado a partir do tempo solar local ou verdadeiro. Considerando que a Terra realiza uma rotação de 360° em aproximadamente 24 horas, o Sol apresenta um movimento aparente de 15° por hora (Ahsan; Ahmad; Badar, 2019; Silva, 2021; Kumba *et al.*, 2024).

2.2.3 Coordenadas topocêntricas: elevação (ou altitude), zênite e azimute

Em termos geométricos, o ângulo de elevação ou altitude solar (α) é definido como o ângulo entre os raios solares e um plano horizontal, conforme ilustrado na Figura 1. Esse ângulo está diretamente relacionado ao ângulo zenital solar (θ_z), seu complemento, que representa o ângulo formado entre os raios solares e a direção vertical; assim, quanto maior a altitude do Sol, menor será o ângulo zenital (Kalogirou, 2009; Guimarães, 2003).

Figura 1 – Indicação dos ângulos notáveis em energia solar.



Fonte: ABNT (2023).

O ângulo azimutal solar (γ) corresponde à posição do Sol no horizonte, sendo medido em um plano horizontal a partir de uma direção de referência. No Hemisfério Norte, essa referência é o sul verdadeiro, enquanto no Hemisfério Sul é o norte verdadeiro. Esse ângulo indica o deslocamento angular do Sol ao longo do horizonte durante o dia (Kalogirou, 2009).

2.2.4 Irradiância Direta Normal (DNI)

Nos sistemas de concentração solar, o desempenho do concentrador depende da disponibilidade da irradiância direta normal (*Direct Normal Irradiance* - DNI), uma vez que apenas a componente direta da radiação pode ser concentrada pelas superfícies refletoras (Kalogirou, 2009). A DNI corresponde à quantidade de radiação recebida por unidade de área por uma superfície que permanece sempre perpendicular (ou normal) aos raios solares, constituindo um dos principais parâmetros empregados na avaliação do potencial energético de sistemas solares concentradores e sistemas de rastreamento solar (Boutahir *et al.*, 2022).

2.3 Rastreadores solares

A eficiência da captação da energia por painéis fotovoltaicos depende diretamente do posicionamento desses painéis em relação ao Sol. Quanto melhor o alinhamento entre os raios solares e a superfície do painel, maior tende a ser a geração de energia. Para manter esse alinhamento ao longo do dia, utilizam-se os chamados rastreadores solares, equipamentos projetados para ajustar automaticamente a posição dos painéis conforme o movimento aparente do Sol. A necessidade de rastreamento torna-se mais evidente em sistemas com dispositivos concentradores, pois o aumento da razão de concentração reduz o ângulo de aceitação da radiação, exigindo maior precisão no alinhamento (Amelia *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2018).

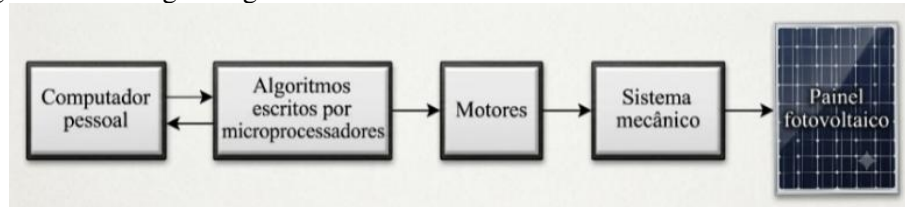
Os rastreadores podem ser classificados quanto ao número de eixos de rotação que possuem e pela tecnologia empregada em seu acionamento, que pode ser passiva ou ativa (Alcatrão *et al.*, 2023). Os principais tipos são apresentados a seguir.

2.3.1 Rastreadores solares passivos e ativos

Os rastreadores solares passivos acompanham o movimento aparente do Sol sem o emprego de sistemas eletrônicos de controle ou sensores. Seu funcionamento baseia-se em fenômenos físicos, como a expansão térmica de fluidos, diferenças de pressão ou o uso de materiais com memória de forma, enquanto os rastreadores solares ativos utilizam sensores e dispositivos eletromecânicos para corrigir a orientação dos painéis solares ou superfície coletora (Amelia *et al.*, 2020). Nos sistemas ativos, a posição aparente do Sol pode ser determinada por sensores ópticos conectados a microprocessadores, cálculos baseados em data e hora, ou ainda a combinação dessas abordagens (Melo, 2019).

Os rastreadores solares cronológicos operam em malha aberta, acompanhando o movimento solar utilizando cálculos previamente programados, sem a necessidade de sensores de realimentação. Nesse sistema, um computador ou microcontrolador calcula a trajetória do Sol a partir da data e do horário e envia comandos ao motor responsável pela movimentação da estrutura. Geralmente, o motor é programado para girar cerca de 15° por hora (Melo, 2019; Amelia *et al.*, 2020). O fluxograma genérico desse sistema é descrito na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma genérico do controle em malha aberta de um rastreador solar.

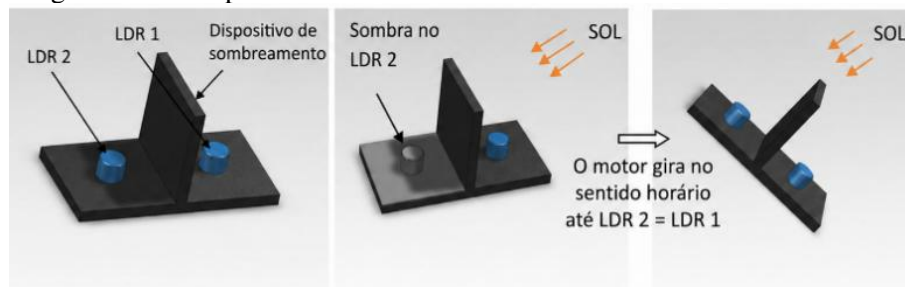


Fonte: Adaptado de Melo (2019).

KV., T. e Reddy (2013) propuseram um rastreador solar em malha aberta baseado em acionamentos intermitentes a cada 30 minutos, intervalo em que o Sol percorre aproximadamente 7,5°. Essa estratégia torna o sistema mais econômico, contudo, durante o intervalo entre os reposicionamentos, permite erros temporários de alinhamento, que podem comprometer o desempenho óptico.

Os sistemas de rastreamento ativo também podem operar em malha fechada, utilizando microprocessadores e sensores eletro-ópticos, configuração amplamente utilizada. Nesses sistemas, sensores dependentes de luz (*Light Dependent Resistor* - LDR) detectam diferenças na incidência de radiação. Em geral, utiliza-se um par de sensores para rastreamento em um eixo e dois pares para dois eixos, associados a um elemento de sombreamento que auxilia na identificação do desalinhamento em relação ao Sol, conforme ilustrado na Figura 3 (Hafez; Yousef; Harag, 2018).

Figura 3 – Princípio de trabalho de um sistema de rastreamento com LDR.

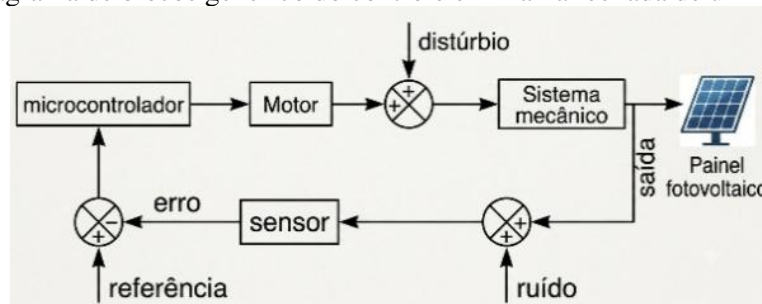


Fonte: Adaptado de Hafez, Yousef e Harag (2018).

Pigozzo Filho (2013) desenvolveu um sistema de controle em malha fechada para posicionamento de um coletor solar utilizando dois sensores de radiação solar instalados no

plano de abertura da parábola. Quando há diferença entre as leituras dos sensores, o controlador aciona um atuador linear para corrigir a orientação do coletor e restabelecer o alinhamento com o Sol. O diagrama de blocos genérico desse sistema é descrito na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos genérico do controle em malha fechada de um rastreador solar.



Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Rastreadores de eixo único e de dois eixos

Outra classificação considera o modo de movimento dos rastreadores solares, dividindo-os em sistemas de eixo único e rastreadores de dois eixos (Kalogirou, 2009).

Os rastreadores de eixo único utilizam apenas um eixo de rotação para acompanhar o movimento aparente do Sol. Conforme a orientação desse eixo, podem ser horizontais, verticais ou inclinados. Destacam-se por apresentarem menor complexidade mecânica, menor custo de implementação e menor consumo energético em relação aos sistemas de dois eixos. Entretanto, proporcionam menores ganhos energéticos por realizarem o rastreamento em apenas uma direção (Hafez; Yousef; Harag, 2018).

Para Fadhil, Fayadh e Wali (2019), a utilização de rastreadores solares com 1 grau de liberdade aumentam a captação de energia entre 27% e 32% em comparação com sistemas fotovoltaicos fixos, devido ao movimento azimutal que acompanha a trajetória solar de leste a oeste e otimiza o ângulo de incidência da radiação.

Os rastreadores de dois eixos acompanham o movimento solar nos planos horizontal e vertical já que possuem dois eixos de rotação, geralmente perpendiculares. Essa configuração proporciona melhor aproveitamento da radiação incidente, porém aumenta a complexidade mecânica e de controle, além de maiores exigências estruturais devido ao peso (Melo, 2019).

2.4 Erro de rastreamento solar

Em sistemas de energia solar, a precisão do alinhamento é um fator determinante para a eficiência do sistema, pois qualquer desvio gera um ângulo de incidência diferente de zero, reduzindo a quantidade de energia captada (Ahsan; Ahmad; Badar, 2019). Para avaliar a precisão do rastreamento, mede-se o Erro Instantâneo de Rastreamento Solar (*Instantaneous Solar Tracking Error* – ISTE), definido como a discrepância angular entre a posição real do Sol no céu e a orientação do sistema (Angulo-Calderón *et al.*, 2022).

Sistemas fotovoltaicos convencionais toleram erros de alguns graus sem perdas significativas na geração de energia, porém, sistemas de concentração solar são mais sensíveis e exigem algoritmos capazes de proporcionar maior precisão no posicionamento (Melo, 2019).

O erro de rastreamento pode ter diferentes origens, sendo as principais associadas às limitações mecânicas da estrutura, que impedem o rastreamento em determinadas posições solares e resultam em erros mais elevados no início e no final do dia (Silva, 2021).

A determinação experimental do ISTE constitui uma importante ferramenta para avaliar o desempenho de sistemas de rastreamento solar, permitindo quantificar a capacidade do controlador em manter o concentrador alinhado à trajetória aparente do Sol ao longo do dia.

Nesse contexto, a comparação do erro obtido sob diferentes estratégias de operação, como sistemas fixos, em malha aberta e em malha fechada, possibilita analisar a eficiência do rastreamento e sua influência sobre o desempenho concentradores fotovoltaicos aplicados a geração de energia elétrica em células fotovoltaicas considerando condições reais de operação.

3 MÉTODO DA PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como quantitativa e experimental, tendo como objetivo desenvolver e validar experimentalmente um sistema automatizado de rastreamento solar aplicado a um concentrador parabólico de baixa concentração. Para validar o sistema, foram realizadas medições do erro de rastreamento e do desempenho elétrico das células fotovoltaicas sob diferentes estratégias de controle. O desenvolvimento da plataforma seguiu as etapas propostas por Maribondo (2000), compreendendo projeto informacional, conceitual, preliminar, detalhado, fabricação e testes.

3.1 Plataforma experimental

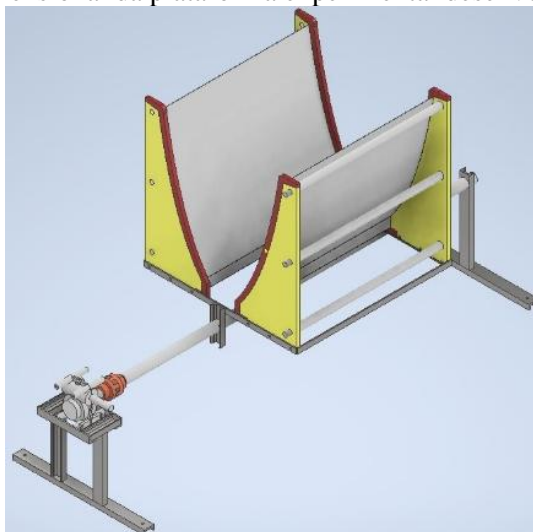
Inicialmente, foi estabelecida uma estrutura geral da plataforma, definindo-se um sistema de rastreamento solar com um grau de liberdade, destinado ao acompanhamento do movimento aparente do Sol no sentido Leste-Oeste.

A estrutura responsável pelo suporte mecânico, movimentação, instrumentação e controle do sistema foi concebida a partir de um CPC previamente construído em um projeto de pesquisa no IFSertãoPB-Campus Cajazeiras.

Durante a etapa do projeto preliminar, foram elaborados modelos tridimensionais em ambiente CAD, utilizando o *software* Autodesk Inventor, com o objetivo de definir as dimensões gerais da plataforma e auxiliar no planejamento da fabricação. Os modelos virtuais serviram como referência para a construção física da estrutura, permitindo visualizar previamente o posicionamento dos principais elementos mecânicos.

Foram desenvolvidos especificamente para este trabalho a base estrutural do rastreador, o eixo principal de movimentação, o suporte da caixa de redução, o suporte do motor, a base de fixação do gnomon, o suporte dos sensores LDR, a caixa destinada ao acondicionamento do circuito eletrônico e os acoplamentos necessários à transmissão do movimento. A Figura 5 apresenta o modelo tridimensional desenvolvido durante a etapa de projeto.

Figura 5 – Modelo tridimensional da plataforma experimental desenvolvido em ambiente CAD.



Fonte: Autoria própria (2026).

A fabricação foi realizada empregando diferentes processos de manufatura. A estrutura metálica foi construída por meio de operações de corte, soldagem, usinagem e montagem mecânica, enquanto outros componentes, como os suportes do motor, do gnomon e dos LDRs, além do acoplamento entre o motor e a caixa de redução, foram fabricados por manufatura aditiva utilizando impressão 3D.

Para realizar o movimento da estrutura, foi empregado um motor universal de corrente contínua de 24V acoplado a uma caixa de redução mecânica com relação de transmissão de 1:37. Essa configuração foi selecionada visando fornecer o torque necessário ao deslocamento do concentrador, mantendo uma velocidade reduzida e adequada às características do rastreamento.

Após a conclusão da montagem mecânica, a plataforma recebeu o sistema eletrônico de controle, responsável pelo acionamento do conjunto motor-redutor, aquisição dos dados experimentais e controle das estratégias de rastreamento. A integração entre os sistemas mecânico e eletrônico resultou na plataforma experimental utilizada em todos os ensaios apresentados neste trabalho. A Figura 6 apresenta a plataforma completamente montada.

Figura 6 – Plataforma experimental desenvolvida.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.2 Sistema de controle e instrumentação

O sistema de controle foi desenvolvido utilizando um microcontrolador Arduino Uno, responsável pelo processamento dos sinais provenientes dos sensores, execução dos algoritmos de controle, acionamento do sistema de movimentação e aquisição dos dados elétricos produzidos pelo conjunto fotovoltaico. Além da operação automática, o sistema dispõe de acionamento manual por meio de botões, permitindo o posicionamento inicial do concentrador e a realização de procedimentos de calibração.

Para o acionamento do motor foi utilizado um módulo driver BTS7960, selecionado devido à sua capacidade de operar com motores de corrente contínua de 24V e fornecer a corrente necessária para o funcionamento seguro do sistema. O controle da velocidade e do sentido de rotação foi realizado por meio de sinais PWM (*Pulse Width Modulation*) gerados pelo Arduino.

Com o objetivo de proporcionar maior suavidade ao movimento da estrutura e reduzir esforços mecânicos durante os reposicionamentos, foi utilizada uma rotina de controle denominada *rampPWM*, proposta por Sousa *et al.* (2026). Essa função realiza a variação gradual do sinal PWM durante as etapas de partida e parada do motor, promovendo aceleração e desaceleração progressivas e contribuindo para a estabilidade mecânica da plataforma.

Para a implementação do rastreamento em malha fechada foi utilizado um par de sensores LDR, instalados em lados opostos de um dispositivo de sombreamento, seguindo a mesma metodologia observada em Hafez, Yousef e Harag (2018). À medida que ocorre o desalinhamento entre o concentrador e a direção da radiação incidente, estabelece-se uma diferença de iluminação entre os sensores, produzindo valores distintos de tensão nas entradas analógicas do Arduino, que envia um sinal para o acionamento do motor e consequentemente a correção na inclinação do sistema. A Figura 7 apresenta a disposição dos sensores LDR bem como o dispositivo de sombreamento utilizado.

Figura 7 – Dispositivo de sombreamento contendo os sensores LDR.



Fonte: Autoria própria (2026).

Além do rastreamento em malha fechada, o sistema foi projetado para operar em malha aberta. Nessa estratégia, o reposicionamento do concentrador é realizado com base em intervalos de tempo previamente programados, sem a utilização de sensores de realimentação para correção da posição.

Para a implementação da estratégia em malha aberta, foi necessário determinar experimentalmente o tempo de acionamento do motor correspondente ao deslocamento angular de aproximadamente 15° , valor equivalente ao movimento aparente do Sol ao longo de uma hora (Kumba *et al.*, 2024). O tempo de acionamento do motor poderia ser determinado por meio da modelagem dinâmica do conjunto motor-redutor, considerando a aceleração, a desaceleração e a integração da velocidade angular ao longo da rampa de acionamento. Entretanto, esse procedimento exige o conhecimento detalhado dos parâmetros eletromecânicos do motor, como momento de inércia, torque disponível, atrito viscoso, atrito estático e resposta transitória do sistema, além da influência da redução mecânica empregada. Como tais parâmetros não estavam disponíveis pelo fabricante e sua determinação experimental demandaria instrumentação específica, optou-se por uma metodologia de calibração experimental.

Inicialmente, determinou-se a rotação real do motor utilizando um sensor de presença. A partir do número de pulsos registrados durante um intervalo conhecido de tempo, foi obtida a velocidade de rotação do conjunto em rotações por minuto (rpm). Como o motor está acoplado a uma caixa de redução com relação de 1:37, a velocidade efetiva do eixo responsável pela movimentação do concentrador foi obtida pela Equação 1

$$n_s = \frac{n_m}{37} \quad (1)$$

em que:

- a) n_s é a rotação do eixo de saída da redução;
- b) n_m representa a rotação do motor.

Conhecida a rotação do eixo de saída, calculou-se a velocidade angular do sistema por meio da Equação 2

$$\omega = \frac{360 * n_s}{60} \quad (2)$$

em que:

- a) ω representa a velocidade angular no eixo (°/s).

Em seguida, determinou-se o tempo necessário para que a estrutura realizasse um deslocamento de 15°, conforme a Equação 3

$$t = \frac{\theta}{\omega} \quad (3)$$

em que:

- a) t é o tempo de acionamento do motor (s);
- b) θ representa o deslocamento angular desejado (15°).

Dessa forma, o tempo calculado foi ajustado iterativamente por meio de ensaios experimentais até que cada acionamento resultasse em uma correção angular de aproximadamente 15°. Para verificar o deslocamento angular obtido, utilizou-se a leitura da sombra projetada pelo gnomon como referência, permitindo validar experimentalmente o ângulo percorrido pelo rastreador e ajustar o tempo de acionamento considerando os efeitos da rampa PWM e da redução mecânica do sistema.

Para a medição da tensão elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico, foi utilizado um sensor de tensão F031-06 conectado a uma entrada analógica do microcontrolador. Inicialmente, também foi avaliada a utilização do sensor de corrente ACS712 para a medição direta da corrente elétrica. Entretanto, devido às baixas correntes produzidas pelo módulo fotovoltaico sob as condições de operação adotadas e às limitações de resolução e sensibilidade do ACS712 na faixa de medição utilizada, foram observadas leituras instáveis e, em alguns instantes, valores negativos decorrentes do offset característico do sensor e das incertezas associadas ao conversor analógico-digital do microcontrolador. Por isso, optou-se por determinar a corrente de forma indireta, empregando uma carga resistiva de 3,3 kΩ e aplicando a Lei de Ohm, a partir da tensão medida sobre o resistor. Dessa forma, a corrente elétrica (I) foi calculada pela relação da Equação 4, em que V é a tensão medida pelo sensor sobre o resistor e R representa o valor real do resistor previamente determinado com um multímetro. A potência elétrica foi encontrada a partir do produto entre os valores de tensão medidos e a corrente calculada.

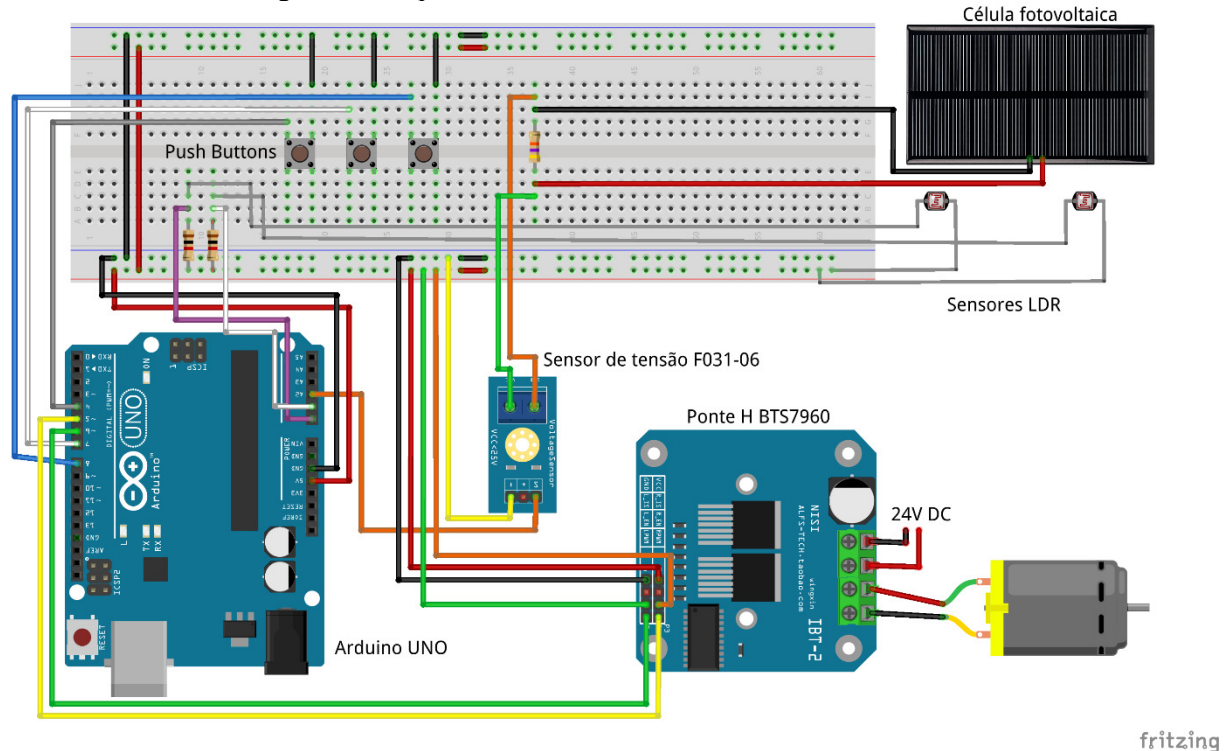
$$I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

Todos os dados adquiridos pelo sistema foram enviados ao computador por meio da interface serial do Arduino, permitindo o registro das informações durante toda a realização dos ensaios.

O sistema dispõe ainda de botões de acionamento manual, permitindo o posicionamento do concentrador durante os procedimentos de calibração e um botão de início/parada geral do

rastreamento. O esquemático completo do sistema de controle desenvolvido pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Esquemático do sistema de controle desenvolvido.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.3 Estratégias de rastreamento e procedimento experimental

A avaliação experimental foi realizada em três condições distintas de operação do rastreador com concentrador solar: sistema fixo, rastreamento em malha aberta e em malha fechada. Cada condição de operação foi avaliada em um dia distinto procurando selecionar períodos de baixa nebulosidade para minimizar a influência das condições atmosféricas sobre os resultados.

No material complementar é possível acessar o fluxograma geral do procedimento experimental adotado, contemplando as três estratégias de operação avaliadas. Inicialmente, o sistema era configurado conforme a estratégia selecionada e, posteriormente, executava-se o procedimento específico de posicionamento e aquisição dos dados elétricos.

Os ensaios foram realizados das 8h às 16h, intervalo correspondente ao período de maior disponibilidade da radiação solar direta no *campus* Cajazeiras do IFSertãoPB (6°53'25.013" S, 38°32'37.490" W). Em ambas as estratégias de rastreamento, o sistema permaneceu estacionário durante intervalos de 1 hora, sendo reposicionado apenas ao término de cada período.

Na condição de sistema fixo, o concentrador permaneceu imóvel durante todo o experimento. No ensaio em malha aberta, o reposicionamento foi realizado automaticamente considerando o movimento aparente do Sol de 15°/hora. O tempo de acionamento do motor foi previamente calculado e ajustado para que a estrutura realizasse a correção angular correspondente.

Já na estratégia em malha fechada, a correção da posição foi realizada utilizando os sensores LDR como elementos de realimentação. O Arduino comparava os sinais provenientes

dos sensores e acionava o motor sempre que havia uma diferença entre as leituras fora da faixa de tolerância.

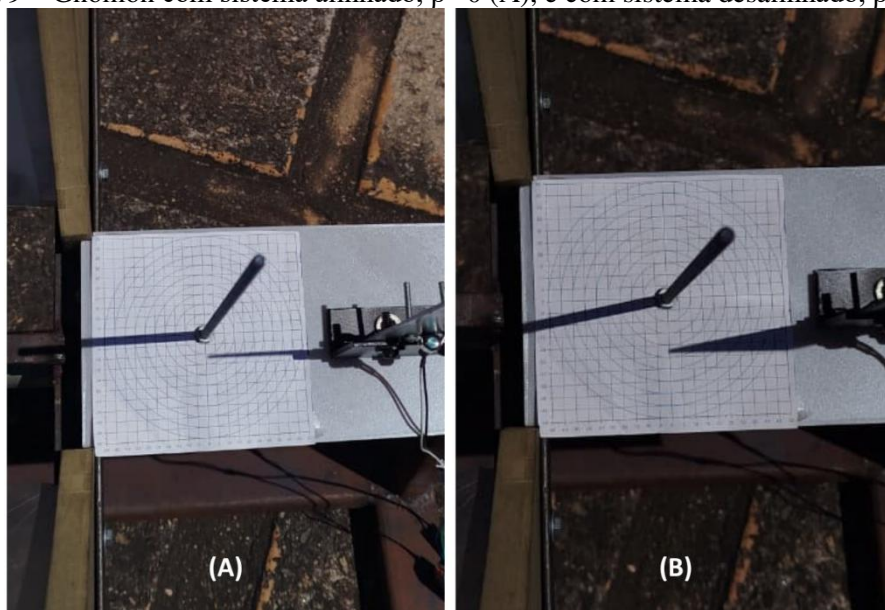
Os dados de tensão e corrente foram registrados em intervalos de 12 minutos, totalizando 5 leituras entre cada reposicionamento.

3.4 Determinação do erro de rastreamento

Para avaliar a precisão do sistema do rastreamento, foi determinada experimentalmente a componente zenital do Erro Instantâneo de Rastreamento Solar (*Instantaneous Solar Tracking Error* – ISTE), conforme a metodologia proposta por Ângulo-Calderón *et al.* (2022). A diferença angular entre a direção da radiação incidente e a orientação do sistema pode ser decomposta em duas componentes independentes: erro no eixo azimutal (α) e erro no eixo zenital (β). A composição vetorial dessas componentes resulta no erro instantâneo total de rastreamento (θ).

Para isso, foi desenvolvido um dispositivo baseado no princípio de funcionamento de um gnomon. O dispositivo foi instalado no mesmo plano de movimentação do concentrador parabólico e é constituído de uma haste vertical de 200 mm de altura, cuja sombra é projetada sobre um plano graduado nos eixos X e Y. A escala do gnomon aborda valores de -50 mm a +50 mm, com marcações espaçadas de 5 mm e círculos concêntricos, permitindo a leitura das coordenadas da sombra projetada. A Figura 9 apresenta o gnomon desenvolvido e sua instalação na plataforma experimental.

Figura 9 – Gnomon com sistema alinhado, $\beta \approx 0$ (A), e com sistema desalinhado, $\beta \neq 0$ (B).



Fonte: Autoria própria (2026).

A metodologia proposta por Angulo-Calderón *et al.* (2022) permite determinar as componentes azimutal (α) e zenital (β) do ISTE, bem como o erro instantâneo total (θ). Mas, por a plataforma experimental desenvolvida possuir um grau de liberdade, realizando o rastreamento exclusivamente no eixo correspondente ao movimento aparente do Sol entre Leste e Oeste. Dessa forma, foi determinada a componente do erro correspondente ao eixo de movimentação da estrutura, não sendo calculado o ISTE total.

As coordenadas da sombra da haste do gnomon foram registradas manualmente a cada 30 minutos, quando o sistema se encontrava desalinhado com o Sol, e imediatamente antes e imediatamente após cada reposicionamento do concentrador. Como o movimento da estrutura

ocorre no eixo zenital, a componente do ISTE foi determinada a partir da projeção da sombra no eixo Y, conforme a Equação 5

$$\beta = \arctan\left(\frac{y}{h}\right) \quad (5)$$

em que:

- a) β representa o Erro Instantâneo de Rastreamento Solar no eixo zenital ($^{\circ}$);
- b) y corresponde ao deslocamento da sombra projetada no eixo Y (mm);
- c) h é a altura da haste do gnomon, igual a 200 mm.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Esta seção apresenta os resultados obtidos durante a pesquisa.

4.1 Validação da estrutura experimental desenvolvida

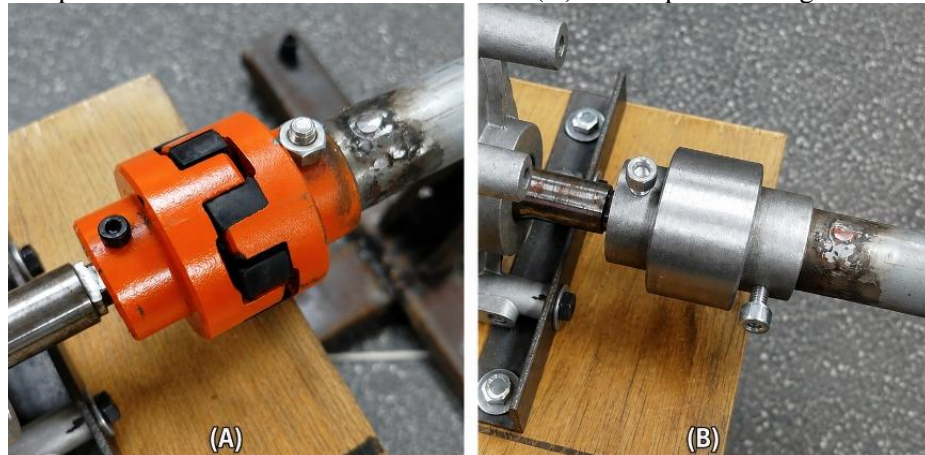
O principal resultado do trabalho consistiu no desenvolvimento de uma plataforma automatizada destinada ao rastreamento solar de um concentrador parabólico composto, integrando estrutura mecânica, instrumentação para controle e aquisição dos dados e dispositivo para medição do erro de rastreamento. Diferentemente de um processo puramente construtivo, o desenvolvimento da plataforma ocorreu de forma iterativa, envolvendo sucessivas etapas de projeto, fabricação, montagem, testes laboratoriais e aperfeiçoamentos até que fossem alcançadas condições adequadas para a realização dos ensaios experimentais.

A estrutura foi projetada para permitir a movimentação do concentrador exclusivamente no eixo correspondente ao movimento no sentido Leste-Oeste sem que ocorresse travamentos ou perda de torque do conjunto de acionamento (motor e caixa de redução). O movimento angular do concentrador ocorreu de forma suave, característica atribuída à caixa de redução mecânica empregada, que reduziu a velocidade de saída do motor e aumentou o torque disponível, e à implementação da função *rampPWM*, responsável pela aceleração e desaceleração progressiva do motor durante o acionamento. Essa estratégia adotada reduziu os impactos mecânicos do movimento, dando maior estabilidade estrutural.

Durante a etapa de fabricação, foi utilizado inicialmente um acoplamento elástico comercial entre o eixo de saída da caixa de redução e o eixo de movimentação do concentrador. Entretanto, verificou-se que o elemento elastomérico, sob o peso da estrutura, sofria deformações, devido à sua flexibilidade, comprometendo a sincronia entre os eixos e inviabilizava completamente a movimentação da estrutura.

Como solução, o componente foi substituído por um acoplamento rígido usinado em aço SAE 1045 (material disponível na oficina do IFSertãoPB), fabricado especificamente para esta aplicação considerando as dimensões do antigo acoplamento. A substituição proporcionou a transmissão direta do torque entre os eixos, além de dar sincronismo e estabilidade necessários ao movimento. Embora esse tipo de acoplamento não tenha a capacidade de compensar eventuais desalinhamentos na montagem, a sua utilização mostrou-se mais adequada às condições de operação da plataforma desenvolvida. Na Figura 10 é possível observar os acoplamentos.

Figura 10 - Acoplamento elástico inicialmente utilizado (A) e o acoplamento rígido desenvolvido (B).



Fonte: Autoria própria (2026).

Concluída essa etapa, a estrutura passou a realizar todo o curso de movimentação previsto no projeto, permitindo o deslocamento contínuo do concentrador entre as posições de Leste e Oeste sem ocorrência de travamentos ou perda de torque.

Após a consolidação do sistema de transmissão principal, iniciou-se a etapa de integração entre o motor elétrico e a caixa de redução mecânica. Como esses componentes possuíam geometrias e diâmetros de eixos distintos, foi necessário desenvolver um elemento intermediário capaz de transmitir o torque do motor para a caixa de redução de forma segura e com baixo custo de fabricação.

O componente projetado para tal aplicação foi desenvolvido em ambiente CAD e fabricado por meio de impressão 3D utilizando filamento PETG, tecnologia escolhida por permitir rápida fabricação e baixo custo durante a fase de desenvolvimento do protótipo. A peça foi instalada entre o eixo do motor e o eixo de entrada da caixa de redução.

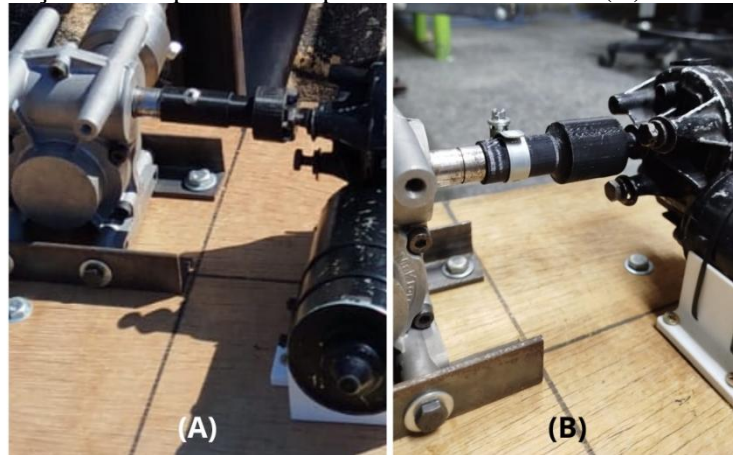
Durante os testes laboratoriais iniciais, o componente apresentou funcionamento satisfatório, permitindo o acionamento do sistema de movimentação e a realização dos primeiros ensaios de calibração do rastreador. Entretanto, durante a fase experimental, também foi observada uma falha mecânica no conjunto de transmissão. Em um dos ensaios, houve a perda da característica de autotravamento da caixa de redução, permitindo que a estrutura movimentasse o eixo de saída quando deveria permanecer estacionário. Como consequência, durante a tentativa de reposicionamento do concentrador através do acionamento manual, ocorreu o cisalhamento da peça responsável pelo acoplamento entre o eixo do motor e a redução.

A ocorrência dessa falha evidenciou que o componente inicialmente projetado não apresentava resistência mecânica suficiente para suportar situações excepcionais de carregamento, embora atendesse adequadamente às condições normais de operação do sistema.

Após a identificação da falha, o componente foi completamente redesenhado em ambiente CAD, aumentando-se a espessura das regiões submetidas aos maiores esforços mecânicos, reforçando as áreas de transmissão de torque e melhorando a distribuição das tensões ao longo do componente, fabricado novamente por impressão 3D e submetido a novos testes laboratoriais antes da retomada das atividades em campo. Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos com as devidas correções, garantindo que os ensaios analisados fossem realizados com a plataforma operando normalmente.

A Figura 11 apresenta a comparação entre a primeira versão e o componente desenvolvido após a ruptura.

Figura 11 – Comparação entre o primeiro acoplamento desenvolvido (A) e a versão reprojetada (B).



Fonte: Autoria própria (2026).

Sob o ponto de vista eletrônico, o sistema de controle apresentou funcionamento estável durante todo o período de testes. Todo o algoritmo de controle foi desenvolvido na linguagem C/C++ utilizando a plataforma Arduino IDE, sendo implementadas rotinas específicas para leitura dos sensores, acionamento do motor, aquisição dos dados elétricos e comunicação serial com o computador. O microcontrolador Arduino Uno, escolhido principalmente por sua ampla disponibilidade de bibliotecas, facilidade de programação e elevada confiabilidade em aplicações de controles embarcados, executou continuamente os algoritmos de controle sem ocorrência de travamentos, reinicializações ou interrupções inesperadas.

Da mesma forma, o módulo driver BTS7960 respondeu adequadamente aos comandos enviados pelo microcontrolador, garantindo o acionamento do motor em ambos os sentidos de rotação.

Os comandos manuais implementados por meio dos *push buttons* apresentaram funcionamento consistente, sem atrasos perceptíveis na resposta ou falhas de acionamento, sendo utilizados durante os procedimentos de calibração e posicionamento inicial da plataforma antes do início de cada ensaio e para retornar à posição central após o término dos testes. Realizada a calibração, todo o processo de rastreamento foi conduzido automaticamente, não sendo necessária intervenção do operador.

Outro aspecto importante do desenvolvimento consistiu na implementação das duas estratégias de rastreamento utilizadas nesta pesquisa: operação em malha aberta e operação em malha fechada. Embora ambas utilizem o mesmo hardware eletrônico, cada estratégia exigiu algoritmos específicos de controle.

Na estratégia em malha fechada, foram utilizados sensores LDR posicionados em lados opostos de um dispositivo de sombreamento. O algoritmo compara os valores obtidos pelos sensores e determina automaticamente o sentido de rotação necessário para reposicionar o concentrador sempre que a diferença entre as leituras ultrapassa uma banda de tolerância previamente estabelecida.

Foram necessários alguns testes práticos para a definição da banda de tolerância utilizada pelo controlador. Valores muito pequenos provocavam acionamento sucessivo do motor em resposta a pequenas flutuações nas leituras dos sensores, evitando oscilações da estrutura em torno da posição de equilíbrio (*hunting*). Assim, o valor que proporcionou o melhor equilíbrio entre a estabilidade mecânica e a precisão do posicionamento foi correspondente a 10 unidades do conversor analógico-digital do Arduino.

Na estratégia em malha aberta, o controlador realizou os reposicionamentos exclusivamente em função do tempo transcorrido, assumindo que o deslocamento aparente do

Sol pode ser compensado por acionamentos previamente programados do motor. Para isso, foi necessário determinar experimentalmente o tempo de acionamento correspondente ao deslocamento angular aproximado de 15° , conforme descrito na metodologia.

Além do sistema de controle, também foi desenvolvido o sistema de aquisição dos dados das células fotovoltaicas. As leituras fornecidas pelo sensor de tensão permaneceram estáveis ao longo dos ensaios e mostraram concordância com medições realizadas por um multímetro digital durante a etapa de calibração. Da mesma forma, a utilização de um resistor para determinação indireta da corrente elétrica permitiu obter valores consistentes durante toda a campanha experimental, possibilitando o cálculo da potência elétrica instantânea produzida pelo sistema fotovoltaico.

Por fim, o gnomon empregado para determinação do desvio angular foi desenvolvido e mostrou-se capaz de medir experimentalmente o erro de rastreamento apresentado pelo sistema durante a sua operação. A posição inicial da plataforma foi definida diariamente com base nas coordenadas solares obtidas por meio do software SunEarthTools, onde é possível ver a melhor trajetória do Sol na região de referência, garantindo que todos os ensaios fossem iniciados sob a mesma condição geométrica de alinhamento.

De modo geral, os testes de validação demonstraram que a plataforma experimental apresentou comportamento mecânico, eletrônico e estrutural adequado à realização dos ensaios propostos. As adaptações implementadas durante o desenvolvimento aumentaram a robustez do sistema, permitindo a obtenção dos resultados experimentais apresentados nas seções seguintes.

4.2 Erro de rastreamento

O desempenho das estratégias de rastreamento foi avaliado por meio da componente zenital do Erro Instantâneo de Rastreamento Solar (ISTE), determinada a partir das leituras realizadas com o gnomon descrito na Seção 3.3.

As medições foram realizadas ao longo do período experimental, permitindo comparar o comportamento do sistema nas três estratégias de operação avaliadas: sistema fixo, rastreamento em malha aberta e rastreamento em malha fechada.

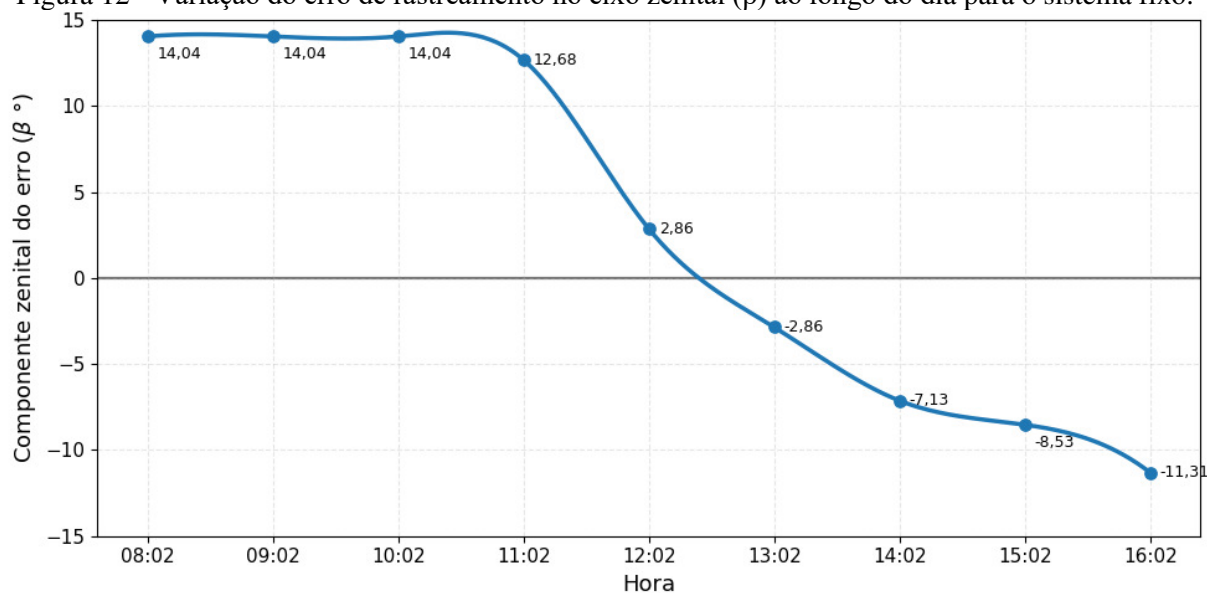
Para cada estratégia foram analisados a evolução temporal do erro, erro máximo observado, erro médio, erro absoluto médio e o comportamento após cada reposicionamento.

4.2.1 Sistema fixo

O sistema nessa condição permaneceu completamente estacionário durante todo o período experimental, permitindo avaliar exclusivamente a influência do movimento aparente do Sol sobre o desalinhamento entre o eixo óptico do concentrador e a direção da radiação solar incidente.

A Figura 12 apresenta a evolução temporal do erro de rastreamento durante o ensaio realizado com o concentrador sem realizar nenhuma correção na sua posição.

Figura 12 - Variação do erro de rastreamento no eixo zenital (β) ao longo do dia para o sistema fixo.



Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que o desalinhamento não apresentou um comportamento contínuo ao longo do dia. No início da manhã foram registrados os maiores desvios positivos, superiores ao limite de medição do gnomon ($>14^\circ$). À medida que o Sol se aproximou da posição de alinhamento da estrutura, o erro diminuiu progressivamente, atingindo valores próximos de $2,86^\circ$ por volta do meio do período experimental. No decorrer da tarde, o sinal de erro tornou-se negativo, indicando que a direção aparente do Sol passou para o lado oposto da orientação do concentrador, alcançando valores de desalinhamento aproximadamente de $-11,31^\circ$ ao final do período de teste.

Como o concentrador permaneceu estacionário durante todo o experimento, o alinhamento ocorreu apenas em um curto intervalo do dia, correspondente ao instante em que a direção da radiação incidente coincidiu com a orientação da estrutura. Antes desse instante, o concentrador encontrava-se orientado à frente da posição aparente do Sol, originando erros positivos. Após a passagem do Sol por essa direção de referência, o desalinhamento passou a ocorrer no sentido oposto, resultando em erros negativos.

O Quadro 1 traz os principais indicadores utilizados para caracterizar o comportamento do rastreador durante a condição de operação fixa. O erro máximo representa o maior desalinhamento observado entre o concentrador e a posição aparente do Sol, o erro mais próximo de zero corresponde ao melhor alinhamento entre o concentrador e a radiação incidente, enquanto o erro médio indica a tendência geral do desalinhamento ao longo do período experimental. O erro absoluto médio (EAM) corresponde à média dos valores absolutos dos erros medidos, sendo um indicador empregado para quantificar a magnitude média do erro, independentemente do seu sentido. Dessa forma, quanto menor o valor do EAM, maior a proximidade entre a orientação do concentrador e a direção da radiação solar incidente, tornando esse parâmetro particularmente adequado para comparar diferentes estratégias de rastreamento solar.

Quadro 1 – Indicadores do erro de rastreamento para o sistema fixo.

Parâmetro	Valor
Erro máximo observado	$> 14^\circ$
Erro mínimo observado	$\pm 2,86^\circ$
Erro médio	$3,09^\circ$

Erro absoluto médio	9,72°
---------------------	-------

Fonte: Autoria própria (2026).

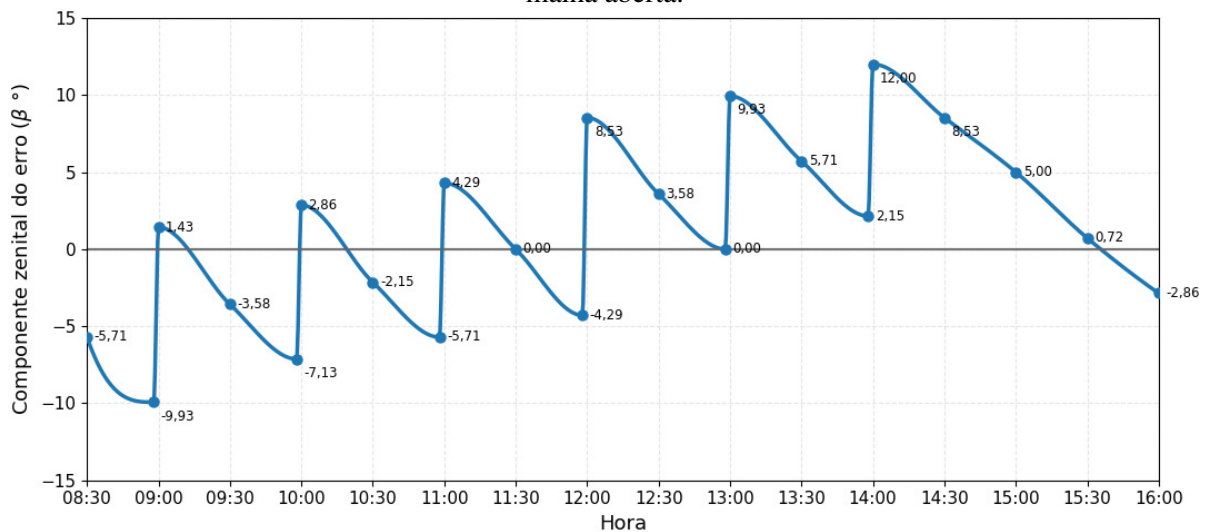
O elevado valor do erro absoluto médio (9,72°) demonstra que, durante grande parte do dia, houve um desvio significativo do eixo óptico do concentrador em relação a radiação incidente. Esse comportamento era esperado, uma vez que sistemas fixos não possuem qualquer mecanismo capaz de compensar o deslocamento aparente do Sol ao longo da abóbada celeste.

4.2.2 Sistema em malha aberta

O ensaio para a determinação do erro de rastreamento no eixo zenital com o sistema operando em malha aberta foi realizado sob condições de céu ensolarado com poucas nuvens, conforme registros meteorológicos do INMET. Durante o experimento, a estrutura permaneceu estacionária durante intervalos de uma hora, sendo reposicionada automaticamente ao término de cada período por meio de um tempo de acionamento previamente determinado para produzir, aproximadamente, um deslocamento angular de 15°, correspondente ao movimento aparente do Sol.

A Figura 14 apresenta a evolução do erro de rastreamento zenital ao longo do ensaio. As medições foram realizadas imediatamente antes e imediatamente depois de cada reposicionamento da estrutura e meia hora após o ajuste, permitindo observar simultaneamente o crescimento do erro durante o dia.

Figura 14 - Variação do erro de rastreamento no eixo zenital (β) ao longo do dia para o sistema em malha aberta.



Fonte: Autoria própria (2026).

Ao final do período experimental, a última correção programada, às 15h, não foi executada. Isso ocorreu porque o acúmulo progressivo do erro de rastreamento, associado às limitações do curso mecânico da plataforma, aproximava o concentrador do limite físico de deslocamento permitido pelo conjunto experimental. Como o protótipo desenvolvido não dispunha de sensores ou chaves de fim de curso para impedir automaticamente o avanço além desse limite, optou-se por interromper o reposicionamento nessa etapa, preservando a integridade mecânica da estrutura e evitando esforços que poderiam comprometer o conjunto de acionamento. Essa limitação não compromete a interpretação dos resultados obtidos ao longo do ensaio, mas evidencia a importância da incorporação de dispositivos de fim de curso em futuras versões da plataforma experimental.

Observa-se que o erro de rastreamento aumentou progressivamente entre os reposicionamentos, comportamento de certa forma esperado para o sistema em malha aberto, no qual não existem sensores de realimentação para posicionar o concentrador em relação à posição aparente do Sol. Embora cada acionamento promovesse uma redução imediata do erro, o reposicionamento não restabelecia completamente o alinhamento inicial, fazendo com que um erro residual permanecesse após cada correção.

Esse comportamento pode ser observado pela evolução dos erros imediatamente após os reposicionamentos. Na primeira correção, o erro foi reduzido para aproximadamente $1,43^\circ$, enquanto, nas correções seguintes, os valores passaram para $2,86^\circ$, $4,29^\circ$, $8,53^\circ$, $9,93^\circ$ e $12,00^\circ$, evidenciando um acúmulo progressivo do desvio angular ao longo do dia.

O acúmulo progressivo desse erro demonstra que pequenas diferenças entre o deslocamento angular programado e o deslocamento efetivamente realizado pela estrutura tornam-se cumulativas quando não existe um mecanismo de realimentação capaz de corrigi-las. Como consequência, o concentrador passa a operar cada vez mais distante da direção real da radiação solar incidente, mesmo realizando reposicionamentos periódicos.

A principal causa desse comportamento está associada à própria estratégia de controle empregada. O tempo de acionamento do motor foi determinado experimentalmente para representar um deslocamento aproximado de 15° por hora. Entretanto, o movimento aparente do Sol não ocorre exatamente a uma taxa angular constante em relação ao eixo de movimentação da plataforma, além de existirem influências decorrentes da dinâmica do conjunto motor-redutor, das características mecânicas da transmissão e das pequenas variações da velocidade efetiva do motor. Como essas diferenças não podem ser corrigidas ao longo do experimento, o erro residual tende a aumentar sucessivamente após cada reposicionamento. O Quadro 3 resume os principais indicadores obtidos durante os testes em malha aberta.

Quadro 3 – Indicadores do erro de rastreamento para o sistema em malha aberta.

Parâmetro	Valor
Erro máximo observado	12°
Menor erro após correção	$1,43^\circ$
Erro médio	$1,06^\circ$
Erro absoluto médio	$4,82^\circ$

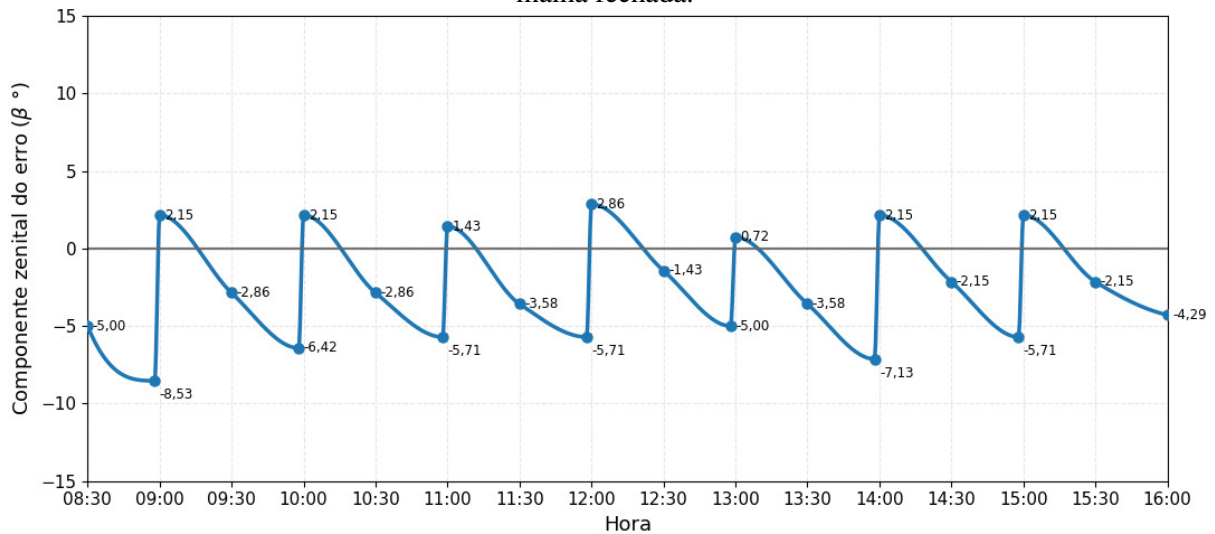
Fonte: Autoria própria (2026).

4.2.3 Sistema em malha fechada

Diferentemente do sistema fixo, nessa estratégia o concentrador era reposicionado automaticamente quando a diferença entre os sinais dos sensores LDR ultrapassava a tolerância estabelecida, permitindo avaliar a capacidade do controlador em reduzir o desalinhamento em relação à posição aparente do Sol a cada hora.

O ensaio foi realizado em 05 de agosto de 2026, entre 8h e 16h, mantendo-se a estratégia de reposicionamento programada em intervalos de uma hora e registros intermediários do erro de rastreamento a cada trinta minutos. Ao longo do experimento, foram realizadas 23 medições do gnomon, contemplando todas as leituras previstas. Em cada horário de reposicionamento, registrou-se o erro de rastreamento imediatamente antes da correção e, após o ajuste do sistema, efetuou-se uma nova medição para verificar a redução do erro. Nos horários intermediários, foram realizadas medições adicionais para acompanhar a evolução do erro entre dois reposicionamentos consecutivos. A Figura 13 apresenta a variação do erro de rastreamento ao longo do ensaio, antes e após as correções realizadas.

Figura 13 - Variação do erro de rastreamento no eixo zenital (β) ao longo do dia para o sistema em malha fechada.



Fonte: Autoria própria (2026).

Observou-se que o desalinhamento apresentou um comportamento dentro do esperado através da revisão de literatura, aumentando gradualmente entre dois reposicionamentos consecutivos do sistema e aproximando-se de zero imediatamente após para correção. Esse comportamento evidencia a correta atuação do sistema de controle em malha fechada.

Esse comportamento demonstra que o algoritmo de controle foi capaz de compensar o deslocamento angular do Sol ao longo do dia, impedindo que o erro se acumulasse ao longo do período de experimento, como observado nos ensaios anteriores.

O maior erro de rastreamento observado imediatamente antes das correções foi de $-8,53^\circ$, registrado às 9h, enquanto o menor erro antes do reposicionamento foi de $-4,29^\circ$, registrado no último intervalo do teste, às 16h. Após cada correção, o desalinhamento foi reduzido para valores entre $0,72^\circ$ e $2,86^\circ$, evidenciando a eficiência da estratégia de reposicionamento adotada. Observa-se ainda que o erro acumulado entre duas correções consecutivas não apresentou crescimento uniforme ao longo do dia. Nas primeiras horas da manhã foram registrados os maiores desvios, seguidos por uma redução da magnitude do erro próximo ao meio-dia e um novo aumento no início da tarde. Esse comportamento está associado à geometria do movimento aparente do Sol e à variação da sua posição no céu, fatores que influenciam a velocidade de variação do ângulo de incidência sobre o coletor e, consequentemente, a taxa de crescimento do erro de rastreamento.

Embora o sistema tenha reduzido significativamente o desvio angular após cada reposicionamento, não foi observado erro de rastreamento nulo. Esse comportamento era esperado, pois o algoritmo de controle emprega uma banda de tolerância de 10 unidades do conversor analógico-digital, evitando oscilações contínuas do sistema (*hunting*). Além disso, fatores inerentes ao sistema, como a resolução dos sensores LDR, a resposta dinâmica do conjunto motor-redução, pequenas deformações estruturais e as limitações mecânicas de uma plataforma com um grau de liberdade contribuem para a permanência de um pequeno erro residual após as correções. Dessa forma, o controlador buscou manter o erro dentro de uma faixa aceitável de operação.

O Quadro 2 resume os principais indicadores obtidos durante o ensaio.

Quadro 2 – Indicadores do erro de rastreamento para o sistema em malha fechada.

Parâmetro	Valor
Erro máximo observado	$-8,53^\circ$

Menor erro após correção	0,72°
Erro médio	-2,85°
Erro absoluto médio	3,91°

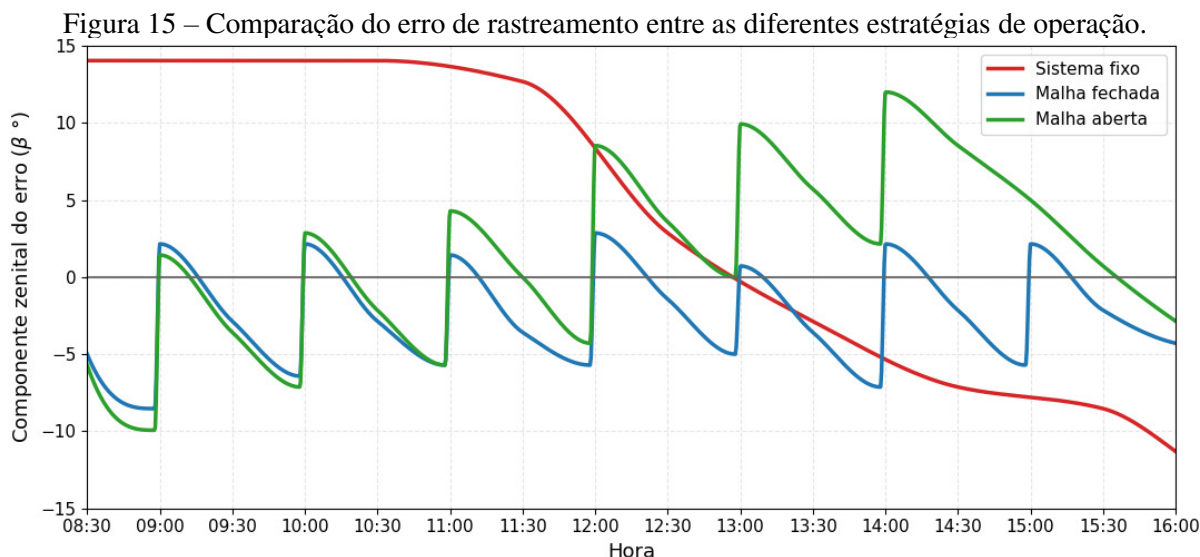
Fonte: Autoria própria (2026).

Comparando-se os resultados, observa-se uma redução de aproximadamente 60% no erro médio absoluto, que passou de 9,72° no sistema fixo para 3,91° com o sistema operando em malha fechada. Essa diferença evidencia a eficiência dessa estratégia na manutenção do alinhamento entre o concentrador e a direção da luz solar disponível.

Enquanto no sistema fixo o desalinhamento aumentou continuamente ao longo do dia, no rastreamento em malha fechada verificou-se um comportamento cíclico, onde houve o crescimento gradual do erro no intervalo entre duas correções consecutivas e sua redução imediata após cada reposicionamento. Esse padrão confirma experimentalmente o correto funcionamento do algoritmo de controle implementado.

Comparando-se os resultados obtidos nas três estratégias avaliadas, observa-se que o sistema em malha aberta apresentou desempenho intermediário. Em relação ao sistema fixo, verificou-se redução aproximada de 50% no erro absoluto médio, que passou de 9,72° para 4,82°, mostrando que o reposicionamento periódico foi capaz de melhorar significativamente o alinhamento entre o concentrador e a posição aparente do Sol.

Mas, quando comparado ao sistema em malha fechada, cujo erro absoluto médio foi de 3,91°, verifica-se que a ausência de realimentação compromete a precisão do posicionamento ao longo do tempo. Enquanto o controlador em malha fechada corrige os desvios acumulados, o sistema em malha aberta permanece dependente exclusivamente da programação temporal dos movimentos, tornando inevitável o crescimento gradual do erro residual durante o período experimental. Na Figura 15 é possível observar a comparação gráfica do erro nos três modos de operação e a sua evolução no tempo.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados confirmam que, embora o rastreamento em malha aberta tenha reduzido significativamente o desvio angular em comparação com o sistema fixo, sua precisão deteriorou-se progressivamente ao longo do dia em razão da ausência de realimentação da posição do concentrador. Esse comportamento está de acordo com o princípio de funcionamento desse tipo de estratégia de controle, na qual a posição é estimada a partir de

parâmetros previamente definidos, sem qualquer verificação da orientação efetivamente alcançada pela estrutura.

A influência desse comportamento sobre o desempenho elétrico do concentrador será analisada nas próximas seções, por meio da comparação entre as três estratégias de operação.

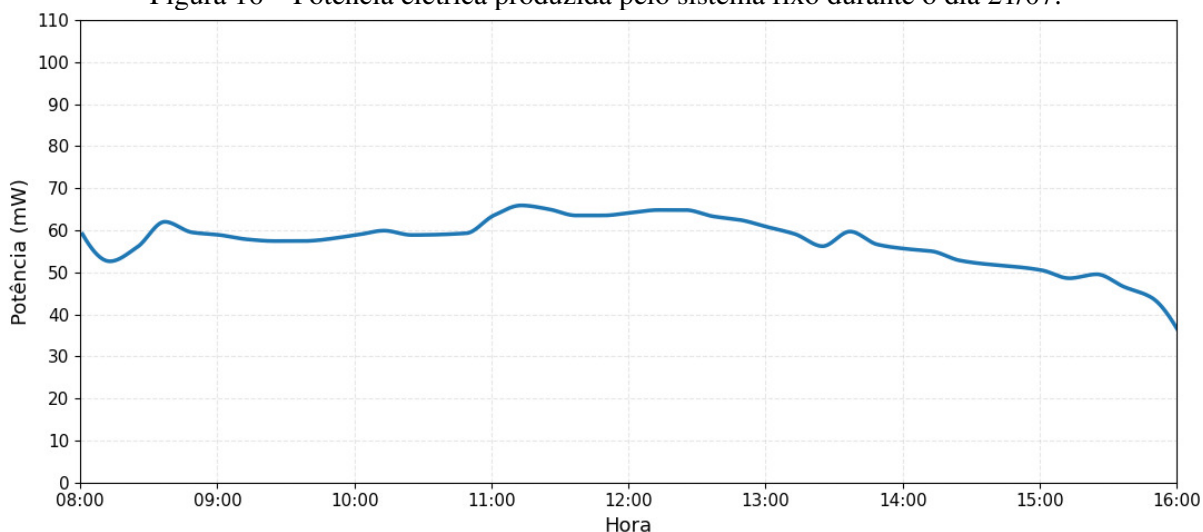
4.3 Desempenho elétrico do sistema fotovoltaico

Nesse subtópico, serão apresentados os resultados experimentais referentes à tensão, à corrente e à potência elétrica produzidas pelo sistema fotovoltaico com concentrador durante a operação nas estratégias de rastreamento adotadas. Assim como realizado na análise do erro de rastreamento apresentada na seção anterior, a comparação entre as diferentes estratégias permite avaliar a influência do alinhamento solar sobre o desempenho elétrico do concentrador fotovoltaico. Ressalta-se que os ensaios foram conduzidos em dias distintos, sujeitos a diferentes condições de nebulosidade e irradiância solar, razão pela qual a comparação concentra-se principalmente no comportamento temporal das grandezas elétricas, e não exclusivamente em seus valores absolutos.

Durante os ensaios, observou-se que a tensão elétrica apresentou valores superiores à tensão nominal do conjunto de células fotovoltaicas na maioria dos instantes do experimento. Esse comportamento era esperado, uma vez que a tensão de dispositivos fotovoltaicos não permanece constante, variando em função da irradiância incidente, da temperatura das células e da utilização do concentrador. A utilização do CPC aumentou a densidade de radiação incidente sobre as células fotovoltaicas, demonstrando que sua utilização contribui para um incremento da tensão gerada. Assim, os maiores valores de tensão observados durante o ensaio podem ser atribuídos à combinação entre a concentração óptica promovida pelo refletor parabólico e as condições instantâneas de irradiância e temperatura durante o período de medição.

A Figura 16 apresenta a potência elétrica produzida pelo sistema na condição fixa. Observa-se que a geração aumenta gradativamente durante o período da manhã, atingindo seu maior valor nas proximidades do meio-dia, quando o concentrador permanece naturalmente mais alinhado com a direção da radiação incidente. Após esse período, verifica-se redução da potência gerada em decorrência do aumento progressivo do erro de rastreamento apresentado anteriormente. Esse comportamento evidencia que, na ausência de um mecanismo de rastreamento, o concentrador permanece adequadamente alinhado apenas durante um intervalo limitado do dia, reduzindo a quantidade de radiação refletida sobre as células fotovoltaicas nos demais horários.

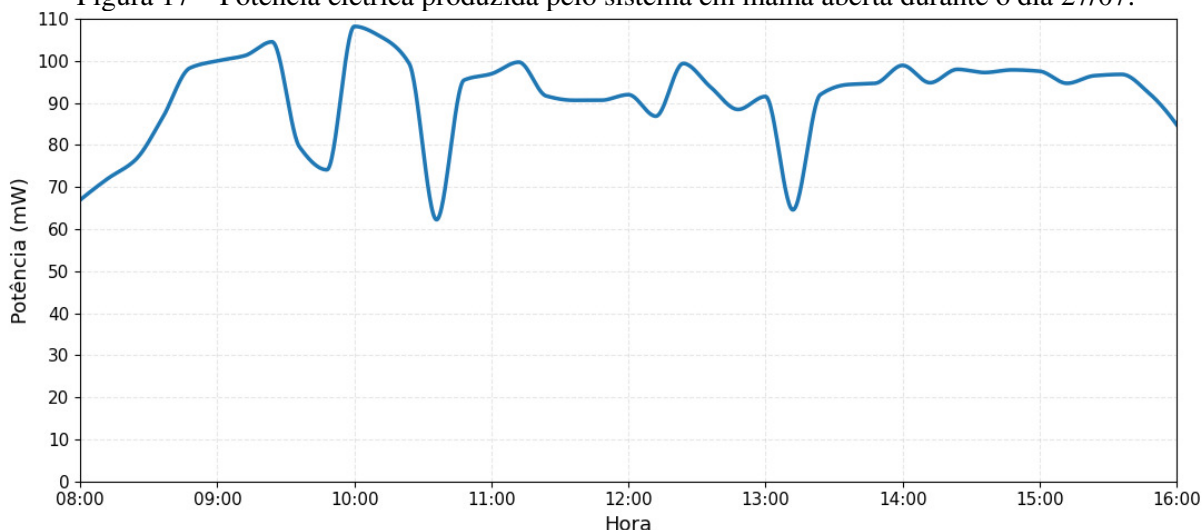
Figura 16 – Potência elétrica produzida pelo sistema fixo durante o dia 21/07.



Fonte: Autoria própria (2026).

A potência obtida durante o dia para o rastreamento em malha aberta é apresentada na Figura 17. Diferentemente do sistema fixo, observa-se que a potência elétrica apresenta sucessivos ciclos de aumento e redução ao longo do dia. Após cada correção de posicionamento realizada pelo rastreador, ocorreu, em alguns momentos, um aumento imediato da potência gerada, seguido de uma redução até a correção seguinte. Em outros momentos, entretanto, observou-se o comportamento oposto: após a correção, a potência foi reduzida e aumentou gradualmente ao longo do tempo, em razão do acúmulo do erro de rastreamento durante o dia. Esse comportamento está diretamente relacionado à estratégia de controle implementada, na qual o concentrador é reposicionado em intervalos previamente definidos, sem a utilização de sensores para realimentação da posição solar.

Figura 17 – Potência elétrica produzida pelo sistema em malha aberta durante o dia 27/07.

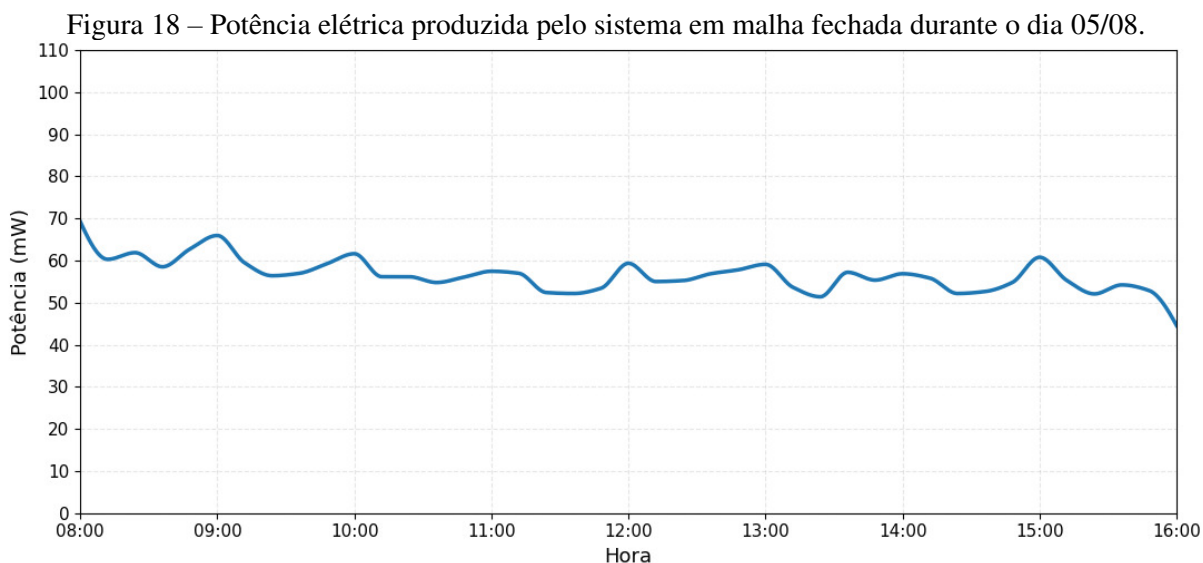


Fonte: Autoria própria (2026).

Embora a estratégia em malha aberta tenha proporcionado ganhos em relação ao sistema fixo, observou-se que o erro residual aumentou gradativamente ao longo do dia, conforme discutido na Seção 4.2. Esse comportamento decorre do fato de que a trajetória aparente do Sol não corresponde exatamente a um deslocamento angular constante de 15° por hora. Como o controlador realiza apenas correções temporizadas, pequenas diferenças entre a posição prevista

e a posição real do Sol acumulam-se durante a operação, refletindo-se diretamente na redução gradual da potência elétrica observada após cada correção.

Os resultados experimentais obtidos para o rastreamento em malha fechada são apresentados na Figura 18. Apesar de o ensaio ter sido realizado em um dia sob condições de nebulosidade variável, observa-se que a potência elétrica apresentou comportamento significativamente mais uniforme ao longo do período experimental, quando comparada as estratégias apresentadas anteriormente. As oscilações observadas ao longo da curva estão associadas principalmente às variações instantâneas da irradiância decorrentes da passagem de nuvens, e não ao desalinhamento do concentrador.



Fonte: Autoria própria (2026).

Sempre que houve disponibilidade de radiação solar direta suficiente para o funcionamento dos sensores LDR, o controlador reposicionou automaticamente o concentrador, reduzindo o erro de rastreamento e restabelecendo o alinhamento com a posição aparente do Sol. Dessa forma, o sistema manteve a geração elétrica relativamente estável, mesmo diante das variações meteorológicas, demonstrando robustez frente às mudanças de irradiância e evidenciando a eficiência do controle em malha fechada na compensação dos desvios angulares.

A comparação entre as três estratégias evidencia comportamentos distintos da geração elétrica ao longo do dia. O sistema fixo apresenta um intervalo reduzido de maior geração, nas proximidades do meio-dia, e tende a apresentar redução da potência nos períodos de menor disponibilidade de radiação solar. No rastreamento em malha aberta, a potência oscila em função das correções periódicas realizadas pelo controlador, refletindo o aumento progressivo do erro de rastreamento entre dois reposicionamentos consecutivos. Em contrapartida, o rastreamento em malha fechada mantém o concentrador continuamente próximo da condição de alinhamento, produzindo uma resposta elétrica mais uniforme sempre que há disponibilidade de radiação solar direta.

4.4 Relação entre o erro de rastreamento e o desempenho elétrico

De modo geral, resultados obtidos demonstram que o erro de rastreamento constitui um dos principais fatores responsáveis pela variação do desempenho elétrico do concentrador fotovoltaico. À medida que o desalinhamento aumenta, reduz-se a parcela da radiação solar refletida pelo concentrador que efetivamente incide sobre as células fotovoltaicas, diminuindo a geração elétrica. Em contrapartida, estratégias capazes de limitar continuamente esse erro

favorecem o melhor aproveitamento da radiação incidente, proporcionando condições mais adequadas para a conversão fotovoltaica.

O comportamento do erro com o sistema fixo, valores elevados no início e no final do período experimental, foi acompanhado pela evolução da potência elétrica, que apresentou crescimento gradual durante a manhã, atingindo seus maiores valores justamente no intervalo em que o erro de rastreamento foi menor, seguido por uma redução progressiva durante a tarde, à medida que o desalinhamento aumentava novamente.

No rastreamento em malha aberta, observou-se que a potência elétrica apresentou oscilações diretamente associadas aos reposicionamentos periódicos do concentrador. Após cada correção, o erro de rastreamento era reduzido e, em diversos momentos, verificou-se recuperação da potência gerada. Entretanto, pequenas diferenças entre a trajetória programada e a trajetória real do Sol provocaram o acúmulo progressivo do erro residual ao longo do dia. Como consequência, verificou-se que a eficiência das correções diminuiu gradativamente, comportamento que também se refletiu na evolução da potência elétrica.

Por outro lado, o sistema em malha fechada apresentou o menor erro absoluto médio entre as estratégias avaliadas, mantendo o concentrador continuamente próximo da condição de alinhamento durante todo o período experimental. Esse comportamento refletiu-se em uma resposta elétrica significativamente mais uniforme ao longo do ensaio.

Assim, foi possível determinar que pequenos erros de rastreamento não produziram reduções expressivas na potência elétrica gerada. Observou-se que o sistema em malha fechada manteve desempenho elétrico praticamente constante mesmo apresentando pequenos erros após as correções e em horários de menor disponibilidade da radiação solar, evidenciando que pequenos desvios angulares não comprometem significativamente a concentração da radiação sobre as células fotovoltaicas. Em contrapartida, erros progressivamente maiores, como os observados no sistema em malha aberta ao final do dia de teste e, principalmente, na condição fixa, refletiram-se em maiores reduções da potência gerada.

Além disso, os resultados experimentais demonstraram que a utilização do concentrador parabólico contribuiu para elevar a tensão elétrica produzida pelo conjunto fotovoltaico, sendo observados valores superiores à tensão nominal das células em diversos instantes dos ensaios. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da densidade de irradiância promovido pela concentração óptica do CPC, que intensifica a energia incidente sobre as células sempre que o alinhamento entre o concentrador e a direção da radiação solar é adequadamente mantido. Dessa forma, o desempenho do concentrador mostrou-se diretamente dependente da precisão do rastreamento solar implementado. Por fim, a comparação entre as três estratégias evidencia que o sistema em malha fechada apresentou o melhor compromisso entre precisão de posicionamento e estabilidade da geração elétrica, enquanto o sistema em malha aberta representou uma alternativa intermediária, proporcionando desempenho superior ao sistema fixo, porém inferior ao obtido com o controle baseado em realimentação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e testar experimentalmente um sistema automatizado de rastreamento solar para um concentrador parabólico composto de baixa concentração (CPC). Para validar a plataforma, foram realizados testes práticos em diferentes estratégias de operação: sistema fixo, rastreamento em malha aberta e rastreamento em malha fechada.

Os resultados obtidos demonstraram que a plataforma experimental apresentou funcionamento satisfatório durante os testes realizados, permitindo a execução das três estratégias de rastreamento propostas e a obtenção de dados confiáveis para análise. As adaptações implementadas durante o desenvolvimento, especialmente no sistema de

transmissão mecânica, contribuíram para aumentar a robustez estrutural do protótipo e garantir a estabilidade operacional necessária à realização dos experimentos.

A análise do erro de rastreamento evidenciou diferenças significativas entre as estratégias avaliadas. O sistema fixo apresentou um desalinhamento maior durante o início da manhã que diminui aproximando-se do meio dia e aumentando um crescimento contínuo do desalinhamento ao longo da tarde, enquanto o rastreamento em malha aberta reduziu parcialmente esse efeito por meio das correções realizadas, embora tenha apresentado acúmulo progressivo do erro residual devido à ausência de sensores de realimentação. Por sua vez, o sistema em malha fechada apresentou o melhor desempenho, mantendo o erro de rastreamento significativamente reduzido durante o experimento, mesmo sob condições de nebulosidade variável, demonstrando a eficiência da estratégia de controle baseada em sensores LDR.

Em relação ao desempenho elétrico, verificou-se que a redução do erro de rastreamento, devido ao melhor alinhamento entre o concentrador e a direção da radiação solar incidente, proporcionou um comportamento mais uniforme da potência elétrica gerada. Os resultados também evidenciaram que pequenos erros residuais não comprometeram significativamente o desempenho do concentrador, indicando que a estratégia de controle adotada foi suficiente para manter o sistema operando dentro da faixa angular aceitável para o melhor aproveitamento da radiação solar. Dessa forma, confirmou-se experimentalmente que a melhoria do posicionamento do concentrador reflete diretamente no desempenho elétrico do sistema fotovoltaico.

Como limitações do trabalho, destacam-se a influência das condições meteorológicas durante os ensaios e algumas limitações inerentes ao protótipo desenvolvido. Entre elas, ressalta-se a ausência de sensores de fim de curso para limitar automaticamente o deslocamento angular da estrutura e, além disso, a fabricação por impressão 3D da peça responsável pelo acoplamento entre o motor e a caixa de redução, material que se mostrou adequado para a etapa de desenvolvimento e validação experimental, porém apresentou limitações quanto à resistência mecânica quando submetido a oscilações do sistema durante os ensaios.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de sensores de fim de curso para aumentar a segurança operacional da plataforma, bem como o redesenvolvimento do componente de acoplamento entre o motor e a caixa de redução utilizando materiais de maior resistência mecânica, como alumínio ou aço, visando aumentar a confiabilidade e a durabilidade do conjunto de acionamento. Recomenda-se ainda a realização de mais ensaios experimentais e implementação de sensores que possam medir a Irradiância Normal Direta, a fim de obter uma amostragem maior de dias para comparação em diferentes épocas do ano e condições climáticas com diferentes níveis de variabilidade atmosférica, além do desenvolvimento de estratégias de controle mais avançadas, como controladores adaptativos ou preditivos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10899:2023: **Energia solar fotovoltaica**. 4 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 16 p.

AHSAN, Muhammad; AHMAD, Naseer; BADAR, Hafiz Muhammad Waqas. Simulation of solar angles for maximizing efficiency of solar thermal collectors. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY CONSERVATION AND EFFICIENCY (ICECE)*, 3. 2019. **Anais [...]**. IEEE, 2019. p. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECE.2019.8921376>.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/338202133_Simulation_of_Solar_angles_for_maximizing_Efficiency_of_Solar_Thermal_Collectors. Acesso em: 23 jun. 2026.

ALCATRÃO, Bruno Lourenço; ALCATRÃO, Carmo Santos; MORAIS, César Augusto Galvão de; SOUZA, Alexandre Jorge Duarte de. Development of solar tracker for low-cost offset parabolic thermal concentrator. *In: Interdisciplinarity and Innovation In Scientific Research*. Seven Editora Acadêmica, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56238/interdiinovationscresce-021>.

AMELIA, A. R.; IRWAN, Mohd Irwan; IBRAHIM, Safwati; ZHE, Leow Wai; MAT, Mohd Hafizuddin; RAHIM, Mohamad SHUKOR Abdul. Technologies of solar tracking systems: a review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 767, n. 1, p. 012052, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/767/1/012052>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340084108_Technologies_of_solar_tracking_systems_A_review. Acesso em: 23 jun. 2026.

ANGULO-CALDERÓN, Marthoz; SALGADO-TRÁNSITO, Iván; TREJO-ZÚÑIGA, Iván; PAREDES-ORTA, Carlos; KESTHKAR, Sajjad; DÍAZ-PONCE, Arturo. Development and accuracy assessment of a high-precision dual-axis pre-commercial solar tracker for concentrating photovoltaic modules. **Applied Sciences**, v. 12, n. 5, p. 2625, mar. 2022. MDPI. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12052625>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358987337_Development_and_Accuracy_Assessment_of_a_High-Precision_Dual-Axis_Pre-Commercial_Solar_Tracker_for_Concentrating_Photovoltaic_Modules. Acesso em: 04 jul. 2026.

BOUTAHIR, Mohamed Khalifa; FARHAOUI, Yousef; AZROUR, Mourade; ZEROUAL, Imad; ALLAOUI, Ahmad El. Effect of feature selection on the prediction of direct normal irradiance. **Big Data Mining and Analytics**, v. 5, n. 4, p. 309-317, dez. 2022. Tsinghua University Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.26599/bdma.2022.9020003>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362326479_Effect_of_Feature_Selection_on_the_Prediction_of_Direct_Normal_Irradiance. Acesso em: 27 jun. 2026.

EAMES, Philip. C.; NORTON, Brian. Validated, unified model for optics and heat transfer in line-axis concentrating solar energy collectors. **Solar Energy**, v. 50, n. 4, p. 339-355, 1993.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Balanco energético nacional 2025**: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf. Acesso em: 17 mar. 2026.

FADHIL, Muthna Jasim; FAYADH, Rashid Ali; WALI, Mousa K. Design and implementation of smart electronic solar tracker based on Arduino. **Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 17, n. 5, p. 2486, 1 out. 2019. Universitas Ahmad Dahlan. DOI: <http://dx.doi.org/10.12928/telkomnika.v17i5.10912>.

GÜÇLER, Deniz; EKMEKÇİ, Nejat; YAYLI, Yusuf; HELVACI, Mustafa. Obtaining the parametric equation of the curve of the sun's apparent movement by using quaternions. **Universal Journal of Mathematics and Applications**, v. 5, n. 2, p. 42-50, jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.32323/ujma.1091832>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360588322_Obtaining_the_Parametric_Equation_of

_the_Curve_of_the_Sun's_Apparent_Movement_by_Using_Quaternions. Acesso em: 26 jun. 2026.

GUIMARÃES, Ana Paula Cardoso. **Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre**. 2003. 162 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em:

https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/tese/200301_guimaraes_a_p_c_dr.pdf. Acesso em: 23 jun. 2026.

HAFEZ, A. Z.; YOUSEF, A. M.; HARAG, N. M. Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 754-782, ago. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>.

KABIR, Md. Humayun; JIHAD, Md. Himel Abu; CHOWDHURY, Suman. Analysis of solar panel power investigation using fixed axis, single axis and dual axis solar tracker. **Procedia Computer Science**, v. 252, p. 708-714, 2025. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.031>.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Burlington: Elsevier/Academic Press, 2009. 778 p. Disponível em: https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Solar/Solar_Energy_Engineering-Processes_and_Systems.pdf. Acesso em: 23 jun. 2026.

KUMBA, Krishna; UPENDER, Patri; BUDUMA, Parusharamulu; SARKAR, Mithu; SIMON, Sishaj P.; GUNDU, Venkateswarlu. Solar tracking systems: advancements, challenges, and future directions. **Energy Reports**, v. 12, p. 3566-3583, dez. 2024. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.038>.

KV, Pradeep Kumar; T., Srinath; REDDY, Venkatesh. Design, fabrication and experimental testing of solar parabolic trough collectors with automated tracking mechanism. **International Journal Of Research In Aeronautical And Mechanical Engineering**. p. 37-55. out. 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/4537499/Design_Fabrication_and_Experimental_Testing_of_Solar_Parabolic_Trough_Collectors_with_Automated_Tracking_Mechanism. Acesso em: 15 abr. 2026.

MARIBONDO, Juscelino de Farias. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares**. 2000. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MELO, Karen Barbosa de. **Estudo de métodos de cálculo da posição solar aplicados a sistemas de geração fotovoltaica**. 2019. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

MUSA, Abdulwaheed; ALOZIE, Emmanuel; SULEIMAN, Suleiman A.; OJO, John Adedapo; IMOIZE, Agbotiname Lucky. A review of time-based solar photovoltaic tracking systems. **Information**, v. 14, n. 4, p. 211, 30 mar. 2023. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/info14040211>.

PIGOZZO FILHO, Victor César. **Análise experimental de um sistema solar com concentrador cilindro parabólico**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: https://lepten.ufsc.br/producao/dissertacao_pigozzo.pdf. Acesso em: 25 jun. 2026.

RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Juan. M.; BOVE, Italo.; ALONSO-SUÁREZ, Rodrigo. Experimental characterization of the diffuse incident angle modifier of solar thermal collectors: improving consistency between test methods. **Renewable Energy**, v. 256, p. 123912, jan. 2026. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2025.123912>.

SALLABERRY, Fabienne; JALÓN, Alberto García de; TORRES, José-Luis; PUJOL-NADAL, Ramón. Optical losses due to tracking error estimation for a low concentrating solar collector. **Energy Conversion And Management**, v. 92, p. 194-206, mar. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.026>.

SILVA, Rui Carvalho da. **Análise e caracterização experimental de coletores solares de concentração CPC**. 2021. 217 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Especialização em Energia Térmica) – Universidade do Porto, 2021.

SOUSA, Marco; MARQUES, Adriano; ALMEIDA, João; SILVA, Leonardo. **Tracking system for a parabolic dish solar concentrator: development and evaluation**. Proceedings of SWC2025 - ISES Solar World Congress 2025, [S.l.], p. 1-12, 2026. International Solar Energy Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.18086/swc.2025.06.33>. Disponível em: <https://proceedings.ises.org/conference/swc2025/papers/swc2025-0079-deSousa.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2026.

SU, Yuehong; RIFFAT, Saffa B.; PEI, Gang. Comparative study on annual solar energy collection of a novel lens-walled compound parabolic concentrator (lens-walled CPC). **Sustainable Cities and Society**, v. 4, p. 35-40, out. 2012. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2012.05.001>.

TIAN, Meng; SU, Yuehong; ZHENG, Hongfei; PEI, Gang; LI, Guiqiang; RIFFAT, Saffa. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1272-1296, fev. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.050>.

MATERIAL COMPLEMENTAR

▪ MATERIAIS ADICIONAIS

Fluxograma apresentando as etapas de funcionamento para o sistema fixo, rastreamento em malha aberta e rastreamento em malha fechada, vídeo de funcionamento do rastreador e planilha com todos os dados experimentais coletados durante os ensaios.



	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

Versão do TCC completa

Assunto:	Versão do TCC completa
Assinado por:	Isaac Aquino
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:

- Isaac Emanuel de Sousa Sotério de Aquino, ALUNO (202012240009) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 18/08/2026 09:23:26.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/08/2026. 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: 1954836
Código de Autenticação: ef42224088

