

Desenvolvimento de um sistema automatizado de rastreamento solar para aplicação em concentradores solares de baixa concentração

Isaac Emanuel de Sousa Sotério de Aquino (IFPB, Campus Cajazeiras), Leticia Kelly Cabral de Vasconcellos (IFPB, Campus Cajazeiras), Carlos Eduardo Israel Monteiro (IFPB, Campus Cajazeiras), Leonardo Pereira de Lucena Silva (IFPB, Campus Cajazeiras)

E-mails: isaac.soterio@academico.ifpb.edu.br, leticia.cabral@academico.ifpb.edu.br, carlos.israel@academico.ifpb.edu.br, lucena.leonardo@ifpb.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.02.05-0 Sistemas Eletrônicos de Medida e de Controle.

Palavras-chave: rastreamento automatizado; malha aberta; malha fechada; eficiência energética.

1. Introdução

O crescente esgotamento das fontes de energias tradicionais e os impactos ambientais provocados pelo uso de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por fontes renováveis e sustentáveis (Alcatrão *et al.*, 2023). Entre essas, especialmente no Nordeste brasileiro, destaca-se a energia solar, cuja posição geográfica assegura elevada incidência de radiação solar. Ao fazer uma análise do recurso solar, observa-se que o Brasil apresenta uma irradiação global entre 3,5 e 6,25 kWh/m² por dia, o que equivale a um potencial anual de 1277 a 2281 kWh/m² por ano (PEREIRA *et al.*, 2017). A eficiência na conversão da radiação abundante em energia útil ainda é um desafio tecnológico. Para otimizar essa captação dessa energia, utilizam-se concentradores parabólicos compostos (CPCs), dispositivos não formadores de imagem que permitem a concentração da radiação solar em um receptor térmico ou fotovoltaico (LI *et al.*, 2013). No entanto, sua eficiência é impactada pela movimentação do Sol ao longo do dia, exigindo, assim, sistemas de rastreamento solar para garantir o alinhamento ideal entre a abertura do coletor e a incidência da radiação solar.

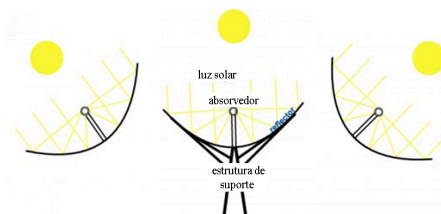
O presente projeto propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado de rastreamento solar, voltado para sistemas fotovoltaicos com concentradores parabólicos compostos de baixa concentração, com foco na comparação de dois modos de controle: malha aberta (sem utilizar sensores) e malha fechada (com sensores). A proposta visa projetar, construir e testar o sistema de rastreamento, avaliando a eficiência de cada abordagem. Os objetivos específicos do projeto são: (1) modelar o sistema por meio de softwares de desenho considerando parâmetros físicos e operacionais; (2) implementar o sistema de rastreamento em um protótipo físico; (3) desenvolver controle em malha aberta, utilizando algoritmos baseados na posição do sol durante o dia; (4) integrar sensores para controle em malha fechada; e (5) coletar os dados dos dois métodos e comparar a eficiência energética.

2. Materiais e métodos

A pesquisa, caracterizada como aplicada, de natureza experimental e com abordagem quantitativa, teve sua metodologia de execução do projeto estruturada em seis etapas principais: (I) definição do problema experimental; (II) projeto conceitual e modelagem; (III) projeto preliminar — hardware e software; (IV) detalhamento e fabricação do protótipo; (V) testes de validação; e (VI) análise comparativa dos resultados.

Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura técnica e científica sobre rastreamento solar, coletores CPC, sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT) e estratégias de controle automatizado. A estrutura dos concentradores deverá ser composta por chapas de alumínio de alta refletividade, com dimensões aproximadas de 1000x1600x0,5 mm, e células fotovoltaicas individuais montadas sobre um trocador de calor em cobre, por onde circulará o fluido refrigerante. O sistema será projetado com rastreamento solar em um eixo (Leste-Oeste), utilizando motor de passo e uma redução de engrenagens para o acionamento. A Figura 1 mostra como funciona o rastreamento solar com 1 grau de liberdade.

Figura 1 — Representação esquemática de rastreamento solar com 1 grau de liberdade



Fonte: La Moana (2012).



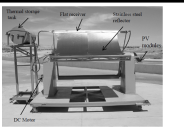


Para o sistema de controle serão implementadas duas estratégias distintas. O sistema em malha aberta basear-se-á em princípios fundamentais da posição do sol ao longo do dia, utilizando algoritmos em função da hora e posição geográfica para calcular o melhor ângulo de incidência da radiação solar. Já o sistema em malha fechada será composto por sensores LDR ou sensores de radiação solar, fornecendo feedback em tempo real ao microcontrolador (Arduino) que enviará os comandos para o ajuste no posicionamento. A eficiência de ambos os modelos de rastreamento será avaliada por meio de medições elétricas (tensão e corrente) e térmica (temperatura e vazão).

3. Resultados e discussão

Projeta-se que os testes experimentais demonstrem um aumento na eficiência dos sistemas fotovoltaicos equipados com CPCs e rastreamento solar. De acordo com estimativas baseadas no estudo de Fadhil *et al.* (2019), rastreadores de 1 grau de liberdade indicam aumento na captação de energia em até 32% e os com dois graus em até 50%. A principal hipótese é que o sistema em malha fechada apresentará melhor eficiência, principalmente em situações climáticas variáveis, enquanto a malha aberta pode oferecer uma solução mais econômica em regiões estáveis.

Preende-se, ainda, avaliar o comportamento dos mecanismos de travamento e consumo energético dos atuadores, buscando um equilíbrio entre desempenho e economia energética do sistema. O controle em malha aberta é simples e barato, mas menos preciso. Já o controle em malha fechada, mais preciso, exige maior custo e complexidade. Na Tabela 1, podem ser observados exemplos que mostram sistemas de malha aberta e soluções em malha fechada. Na análise de custo-benefício, serão consideradas métricas como o custo total de implementação, consumo energético do sistema, precisão de rastreamento e robustez frente a variações climáticas. Esses indicadores serão comparados à complexidade de instalação e programação de cada tipo de malha de controle, permitindo uma avaliação mais ampla da viabilidade técnica e econômica de cada abordagem.



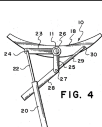
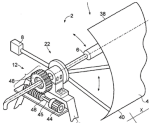

Tabela 1 — Soluções de controle de posicionamento

Autor	Solução	Autor	Solução	Autor	Solução
Souza Filho (2008)	 Controle em malha aberta, custo reduzido.	Pigozzo Filho (2013)	 Malha fechada com fotossensores.	Odeh e Abu-mulaweh (2013)	 Malha fechada, fotossensores.
Matrai (2008)	 Malha aberta, baseada em timer.	Kumar <i>et al.</i> (2013)	 Malha aberta intermitente.		

Fonte: O próprio autor.

Para garantir precisão e baixo consumo energético, sistemas de movimentação com partida suave e autotravamento foram estudados. Na Tabela 2 estão apresentadas algumas soluções.

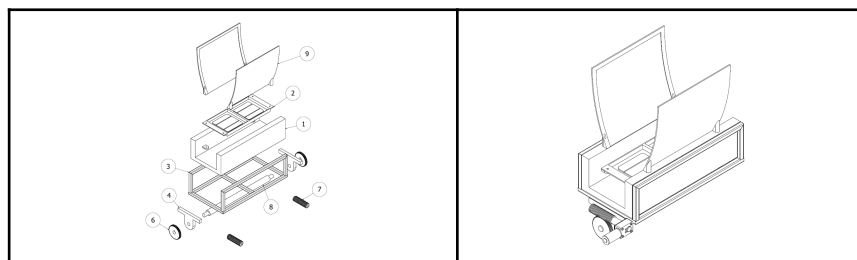
Tabela 2 — Soluções para o atuador do sistema de controle

Autor	Solução	Autor	Solução	Autor	Solução
Souza Filho (2008)	 Motor elétrico de baixo consumo, sem travamento.	Pigozzo Filho (2013)	 Atuador linear com baixo consumo e travamento, mas com custo elevado.	Solar Kinetics (1979)	 Cilindros hidráulicos, precisos, mas caros.
Dow corning (2013)	 Motor elétrico com redutor, baixo custo e boa precisão.	Kumar <i>et al.</i> (2013)	 Motor elétrico com redutor, baixo custo e boa precisão.		

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 2 é possível observar um desenho em CAD do conceito do coletor CPC junto com a estrutura de suporte de todo o sistema de rastreamento.

Figura 2 — Projeto Conceitual do Coletor CPC Proposto



Fonte: O próprio autor (2025)

4. Considerações finais

Este trabalho visa promover soluções eficientes e acessíveis de rastreamento solar, comparando estratégias de controle em malha aberta e fechada, considerando não apenas a eficiência energética, mas também aspectos de custo, complexidade de implementação e adaptabilidade a diferentes realidades climáticas e geográficas. Espera-se contribuir para o aprimoramento de tecnologias integradas de geração de energia fotovoltaica e térmica, e oferecer alternativas viáveis com potencial para aplicações no setor residencial e industrial.

Referências

ALCATRÃO, Bruno Lourenço; ALCATRÃO, Carmo Santos; MORAIS, César Augusto Galvão de; SOUZA, Alexandre Jorge Duarte de. Desenvolvimento de rastreador solar para concentrador térmico parabólico Offset de baixo custo, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56238/interdiinovationscrese-021>. Disponível em: <https://sevenpublicacoes.com.br/editora/article/view/2855/4535>. Acesso em: 22 fev. 2025.

DOW CORNING CORPORATION (Midland). Frank Perrin; Cold Knap Way. SOLAR REFLECTION APPARATUS. US nº 20130056000A1.

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

GÜNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S. Parabolic Trough Technology. In: ENERMENA (Jordânia). *Advanced CSP Teaching Materials*. Amman: Enermena, 2011. p. 245-317.

KUMAR, P.; SRINATH; REDDY, V. Design, Fabrication and Experimental Testing of Solar Parabolic Trough Collector with Automated Tracking Mechanism. *International Journal Of Research In Aeronautical And Mechanical Engineering*. Bangalore, 04 ago. 2013. p. 37-55.

LA MOANA. Sistemas de calhas parabólicas e seus componentes. Disponível em: <https://hubpages.com/technology/Parabolic-trough-systems-and-their-components>. Acesso em: 05 jun. 2025.

LI, X.; DAI, Y.J.; LI, Y.; WANG, R.Z.. Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber. *Solar Energy*, [S.L.], v. 93, p. 220-234, jul. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.002>.

MATRAI, B. B. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR CONCENTRADOR. 2008. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2008.

ODEH, Saad D.; ABU-MULAWEH, Hosni I. Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system. *Global Journal Of Engineering Education*. Austrália, p. 21-27. jan. 2013.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. L., RÜTHER, R., ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S. V., SOUZA, J. G. (2017). Atlas brasileiro de energia solar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2. ed., p. 80.

PIGOZZO FILHO, V. C.. Análise Experimental de um Sistema Solar com Concentrador Cilindro Parabólico. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SOLAR KINETICS, INC. (Estados Unidos da América). J. A. Hutchison. Solar collector system. US nº US4178913 A, 23 dez. 1977, 18 dez. 1979.