

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

Tecnologias e classificação de rastreadores solares: uma revisão técnica

Technologies and classification of solar trackers: a technical review

Lucas Emanuel Almeida Barboza – UFPE

Resumo

O rastreamento solar é uma tecnologia fundamental para maximizar a eficiência da conversão de energia fotovoltaica, permitindo que os módulos acompanhem a trajetória do Sol e otimizem o ângulo de incidência da irradiação. Este artigo apresenta uma revisão técnica sobre o funcionamento e as classificações dos rastreadores solares (trackers). Discute-se o embasamento teórico que comprova matematicamente os ganhos de produtividade, que podem chegar a 57% em condições ideais. Além disso, o trabalho detalha as classificações quanto ao mecanismo (eixo único e duplo), sistemas de controle (malha aberta e fechada) e sistemas de direção (ativos, passivos e manuais), analisando as vantagens e limitações de cada tecnologia.

Palavras-chave: Rastreamento Solar. Eficiência Fotovoltaica. Eixo Único. Eixo Duplo. Sistemas de Controle.

Abstract

Solar tracking is a fundamental technology for maximizing photovoltaic energy conversion efficiency, allowing modules to follow the Sun's path and optimize the irradiation incidence angle. This paper presents a technical review on the operation and classification of solar trackers. It discusses the theoretical basis mathematically proving productivity gains, which can reach 57% under ideal conditions. Furthermore, the work details classifications regarding mechanism (single and dual axis), control systems (open and closed loop), and drive systems (active, passive, and manual), analyzing the advantages and limitations of each technology.

Keywords: Solar Tracking. Photovoltaic Efficiency. Single Axis. Dual Axis. Control Systems.

1. INTRODUÇÃO

A busca por maior eficiência na geração de energia solar tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias auxiliares robustas. Entre elas, destaca-se o rastreamento solar, um sistema projetado para acompanhar o movimento relativo do Sol em relação à Terra. A principal finalidade desta tecnologia é diminuir o ângulo de incidência entre a reta normal ao equipamento e a irradiação direta provinda do Sol, garantindo que os módulos operem próximos à sua capacidade máxima durante a maior parte do dia.

Rhiff (2014) destaca que o rastreamento solar não é usado exclusivamente para painéis fotovoltaicos, mas também para outros equipamentos como refletores, lentes e outros serviços óticos. Embora a implementação de eixos de movimento, seja único ou duplo, adicione complexidade e custo ao projeto (SUNGUR, 2009), o aumento substancial na captação de irradiação justifica sua aplicação em diversos cenários. Este artigo visa definir o funcionamento destes sistemas, demonstrar teoricamente seus ganhos e classificar as tecnologias disponíveis no mercado atual.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

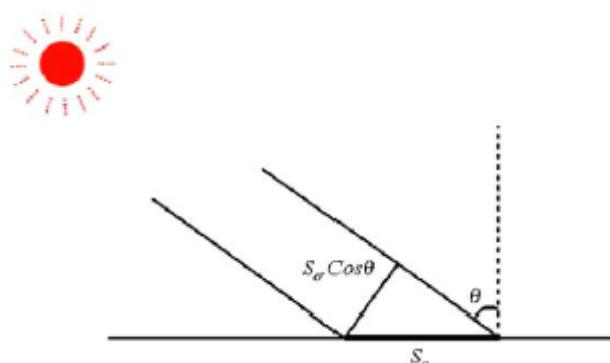
2 MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO E FUNCIONAMENTO

O rastreador permite que o módulo acompanhe constantemente a trajetória solar, aumentando a irradiação direta recebida ao longo do dia (RECA-CARDEÑA e LÓPEZ-LUQUE, 2018). Os ganhos na produtividade pelo uso de rastreadores podem ser, em média, entre 30 a 40% por ano (RACHARLAA e RAJANB, 2017).

Para ilustrar teoricamente esse ganho, utilizam-se os cálculos presentes em Mousazadeh et al. (2009). Considere θ o ângulo de incidência dos raios do Sol em relação à reta normal à superfície (como ilustrado na Figura 1), e assuma-se que a irradiação direta máxima (I) é de 1000 W/m^2 . Considera-se também que o período do dia solar é de 12 h (43200 s) e que o rastreador solar sempre direciona o painel fotovoltaico de modo a manter sua face perpendicular aos raios solares. Denomine-se S_o a área do painel e S a área efetiva do painel perpendicular aos raios solares.

Figura 1 – Incidência direta dos raios solares sobre uma superfície horizontal



Fonte: MOUSAZADEH et al. (2009).

Para um painel fotovoltaico fixo, a área efetiva é $S = S_o \cos \theta$, em que θ varia de $-\pi/2$ a $\pi/2$ ao longo do dia. A velocidade angular do Sol movendo-se ao longo do céu é de $\omega = 2\pi/T = 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ($\theta = \omega t$) e a energia infinitesimal produzida é $dW = ISdt$. Desprezando a influência da atmosfera nos cálculos, a energia diária por unidade de área é:

$$\circ \quad W = \int_{-21600}^{+21600} IS_o \cos \omega t dt = IS_o \quad 3,03 \times 10^7 \frac{W_s}{m^2 dia} = 8,41 \frac{kWh}{m^2 dia}$$

Para um painel fotovoltaico com rastreador solar, desprezando o efeito da atmosfera, a área efetiva é igual à área do painel ($S = S_o$), a energia por unidade de área para todo o dia é:

$$\circ \quad W = IS_o t = 4,75 \times 10^7 \frac{W_s}{m^2 dia} = 13,2 \frac{kWh}{m^2 dia}$$

Constata-se, portanto, que, em condições ideais e para uma irradiação direta incidente de 1000 W/m^2 , a utilização de rastreadores em painéis fotovoltaicos aumenta a produção diária em

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

aproximadamente 57%. Na prática, comparando-se com a irradiância na superfície horizontal, em dias de verão, os ganhos são em torno de 50% e, em dias de inverno, 300% ou mais (DGS, 2008).

Nos dias ensolarados, isto é, com poucas nuvens e com alto valor de radiação direta, os sistemas de rastreamento solar permitem um aproveitamento substancial da energia provinda do Sol. De acordo com DGS (2008), o verão é o período no qual há os maiores ganhos energéticos, devido à maior taxa de irradiância e devido ao fato de existirem menos nuvens no céu.

3. MATERIAL E MÉTODO

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa descritiva de cunho bibliográfico. A metodologia adotada consistiu na análise e síntese de literatura técnica especializada sobre sistemas de rastreamento solar. Foram consultadas obras de referência na área de engenharia de energia solar, normas técnicas e artigos científicos que abordam a mecânica, eletrônica e física envolvidas no rastreamento solar. A classificação dos sistemas foi estruturada com base nos componentes fundamentais identificados por Reca-Cerdeña e López-Luque (2018): mecanismos, sistemas de controle e sistemas de direção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das tecnologias disponíveis permite classificar os rastreadores solares em categorias distintas, cada uma com aplicações e eficiências específicas.

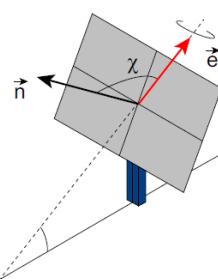
4.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO MECANISMO

O mecanismo é a parte responsável por movimentar o sistema, construído para suportar condições climáticas adversas e possuir vida útil compatível com os módulos.

4.1.2 Eixo Único

Os sistemas de eixo único apresentam apenas um grau de liberdade de rotação. O eixo pode ser horizontal, vertical ou inclinado. A Figura 2 mostra um esquema geral onde o ângulo entre o eixo de rotação e o eixo normal ao plano coletor se mantém constante.

Figura 2 – Eixo de rotação unitário e o eixo normal a um rastreador de eixo único



Fonte: RECA-CARDEÑA e LÓPEZ-LUQUE (2018).

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

A Tabela 1 apresenta os tipos mais comuns de rastreadores de eixo único.

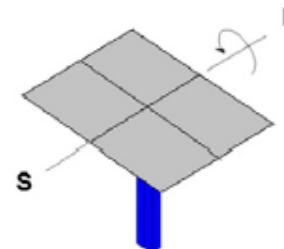
Tabela 1 — Tipos Mais Comuns De Rastreadores De Eixo Único

Tipo de Rastreador de Eixo Único

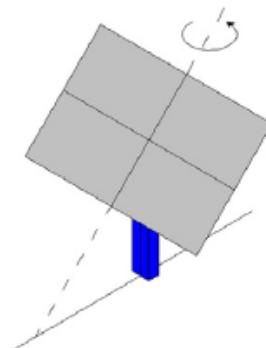
Imagen

Rastreador de eixo horizontal Norte-Sul

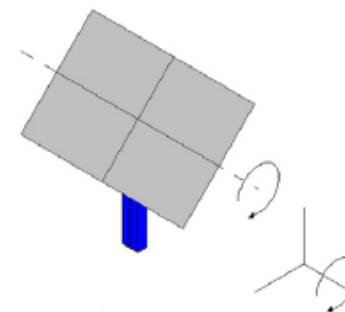
O eixo é horizontal e se encontra na direção Norte-Sul, com $\chi = 90^\circ$.

*Rastreador Polar: eixo polar Norte-Sul inclinado com ângulo igual a latitude local*

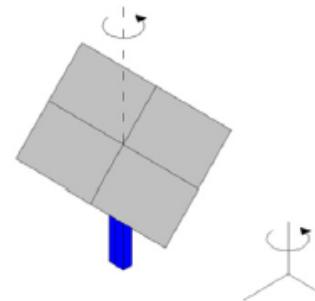
A rotação é ajustada de forma a seguir o meridiano da Terra que contém o Sol. A velocidade angular é de $15^\circ/\text{h}$. Com esta configuração, o rastreador solar pode ser utilizado em latitudes do norte e em lugares próximos ao equador.

*Rastreador de eixo horizontal Leste-Oeste*

Nesta configuração, o eixo de rotação está na direção Leste-Oeste.

*Rastreador Azimutal*

A inclinação do ângulo do módulo é constante e igual a latitude local, rastreando o ângulo de azimute do Sol. O simples e robusto mecanismo dos rastreadores azimutais permite um custo-benefício significativo se comparado aos de eixo duplo, fazendo-o ser o mais usado na prática.



Fonte: RECA-CARDEÑA e LÓPEZ-LUQUE (2018)

Segundo o DGS (2008), as vantagens do eixo único incluem menor complexidade e consumo

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

de energia. As desvantagens são o rastreamento de apenas um movimento do Sol (diário ou anual) e a ineficiência em dias nublados.

4.1.2 Eixo Duplo

Apresentam dois graus de liberdade, acompanhando o movimento solar diário e anual. São essenciais em sistemas de concentração de potência (HAFEZ et al., 2018). Compostos geralmente por sensores LDR, dois motores e um controlador.

Os principais tipos são:

1. **Inclinação de ponta (Equatoriais):** Utilizam coordenadas equatoriais. Eixos no plano do módulo evitam sombreamento (Figura 3 e 4).
2. **Azimute-altura:** Utilizam coordenadas horizontais. Variam azimute e altura através de anéis de apoio (Figura 3 e 5).

Figura 3 – Rastreadores de Inclinação de Ponta e de Azimute-Altitude e seus eixos de rotação



Fonte: HONG et al. (2016).

Figura 4 – Rastreadores de Inclinação de Ponta



Fonte: SEI (2016).

Figura 5 – Rastreadores Azimute-Altitude.



Fonte: SEI (2016).

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

4.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS SISTEMAS DE CONTROLE

Malha Fechada: Utilizam feedback direto de fotosensores (ex: LDR) para seguir o Sol. Podem sofrer desorientação em dias nublados, exigindo sistemas auxiliares (CHONG e WONG, 2009).

Malha Aberta: Utilizam cálculos astronômicos baseados em data, hora e localização. Independentes de condições climáticas externas.

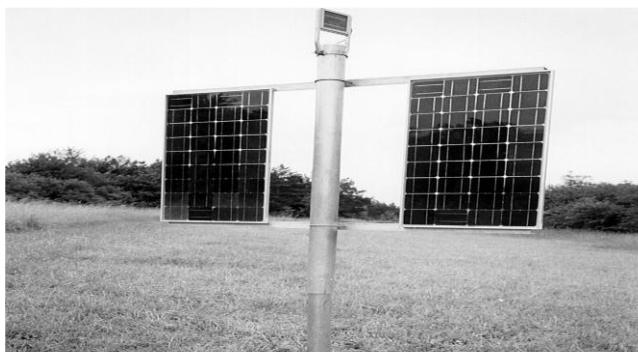
4.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS SISTEMAS DE DIREÇÃO

4.3.1 Ativos

Utilizam motores elétricos. Os principais tipos são (MOUSAZADEH et al., 2009):

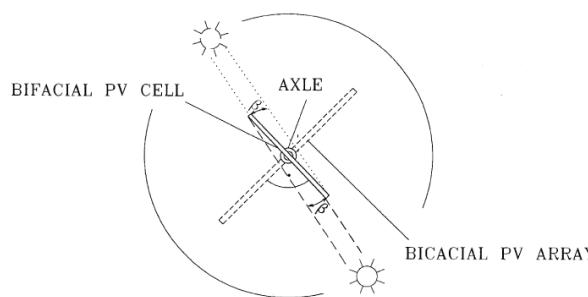
- Microprocessador e Sensores Elétricos Óticos: O mais comum. Usa pares de sensores em regiões antiparalelas. O controlador busca equalizar a radiação recebida.
- Célula Solar Auxiliar Bifacial: Uma célula bifacial alimenta diretamente um motor eletromagnético de corrente contínua. Não usa baterias ou eletrônica complexa, aumentando a confiabilidade (Figura 6 e 7).
- Cronológico: Sistema de malha aberta baseado em algoritmos astronômicos (RACHARLAA e RAJANB, 2017). Alta eficiência por não gastar energia buscando o sol, mas requer dados precisos de localização.

Figura 6 – Rastreadores baseados em célula solar auxiliar bifacial.



Fonte: POULEK e LIBRA (2000).

Figura 7 – Esquema Básico de um rastreador baseado em célula solar auxiliar bifacial.



Fonte: POULEK e LIBRA (2000).

4.3.2 Passivos

Funcionam por equilíbrio de fluidos voláteis ou ligas com memória de forma. Quando há diferença de iluminação, o desequilíbrio térmico gera forças mecânicas que movem o sistema.

Vantagem: baixa complexidade. Desvantagem: baixa eficiência e problemas em baixas temperaturas.

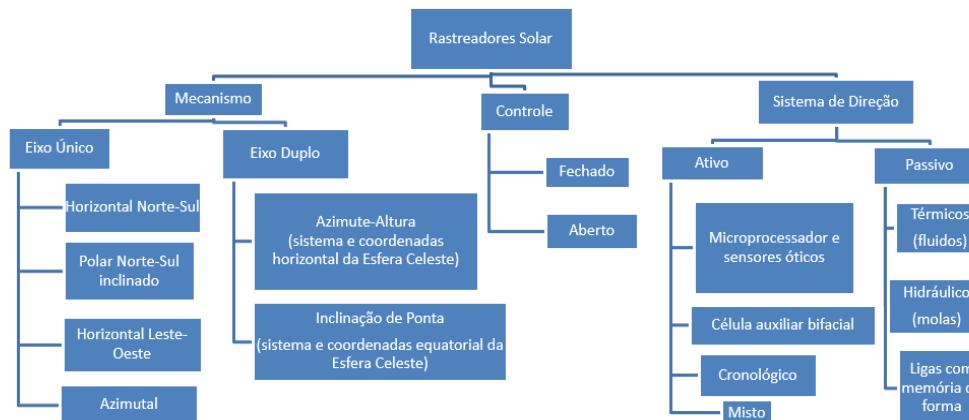
Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

4.3.3 Manual

Utiliza trabalho humano para ajustes sazonais. Reduz complexidade e manutenção, sendo usado em aplicações simples como secadores solares (HAFEZ et al., 2018).

A Figura 8 apresenta um resumo esquemático das classificações abordadas.

Figura 8 – Esquema da Classificação dos Rastreadores Solares.



Fonte: Própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que a utilização de rastreadores solares é uma estratégia eficaz para o aumento da geração de energia, com ganhos teóricos significativos. Embora os sistemas de eixo duplo ofereçam a maior precisão, sua complexidade e custo muitas vezes favorecem o uso de rastreadores de eixo único, especialmente o azimutal, em grandes usinas. A escolha entre sistemas ativos, passivos ou cronológicos depende das especificidades do projeto, balanceando a necessidade de precisão com a confiabilidade e custos de manutenção.

REFERÊNCIAS

- CHONG, K. K.; WONG, C. W. *General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector*. Solar Energy, v. 83, n. 3, p. 298-305, 2009.
- DGS. *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers*. 2. ed. Earthscan, 2008.
- 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, 2018.
- HONG, T. et al. *A preliminary study on the 2-axis hybrid solar tracking method for the smart photovoltaic blind*. Energy Procedia, v. 88, p. 484-490, 2016.
- MOUSAZADEH, H. et al. *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 30/11/2025 | aceito: 02/12/2025 | publicação: 04/12/2025

POULEK, V.; LIBRA, M. *A very simple solar tracker for space and terrestrial applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 60, n. 2, p. 99-103, 2000.

RACHARLAA, S.; RAJANB, K. *Solar tracking system: a review*. International Journal of Sustainable Engineering, v. 10, n. 2, p. 72-81, 2017.

RECA-CARDEÑA, J.; LÓPEZ-LUQUE, R. *Advances in renewable energies and power technologies: solar and wind energies*. 1. ed. Elsevier Science, 2018.

RHIFF, A. *A position control review for a photovoltaic system: dual axis sun tracker*. IETE Technical Review, v. 28, n. 6, p. 479-485, 2014.

SEI. *Tracking the sun*. 2020.

SUNGUR, C. *Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey*. Renewable Energy, v. 34, n. 4, p. 1119-1125, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) e o Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) ambos da Universidade Federal de Pernambuco. Além disso, agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).