

GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS: ANÁLISE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE TRACKERS SOLARES

Miquéias Nádio de Moraes e Silva¹
Fábio de Araújo Leite²

RESUMO: Neste artigo, tem-se como propósito avaliar a viabilidade técnica e econômica dos trackers em usinas fotovoltaicas, tendo em vista que a crescente demanda por energia limpa impulsiona a busca por soluções mais eficientes na geração solar. A partir dessas informações, foi desenvolvido um protótipo de tracker solar em pequena escala para ser utilizado como fator de comparação com as usinas que utilizam tracker em seus módulos. A metodologia inclui uma revisão bibliográfica e a montagem do protótipo, com uma função analítica dos estudos. Os resultados mostram que o sistema acompanha, de forma eficiente, a luz incidente, representando um tracker real em escala reduzida. O estudo reforça a importância do rastreamento solar para a otimização energética e sua aplicação prática na engenharia e nas pesquisas em energias renováveis.

Palavras-chaves: Tracker solar. Arduino. Seguidor solar. Usina fotovoltaica. Eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia limpa e renovável impulsiona a busca por soluções eficientes na geração de energia solar. As usinas fotovoltaicas desempenham um papel crucial nessa transição energética, mas a otimização da captação da radiação solar é fundamental para maximizar sua eficiência, tendo em vista que o mercado livre de energia se torna mais acessível com o passar do tempo. “A expansão do mercado livre de energia acessível a todos os consumidores brasileiros tem ganhado mais adeptos, e os principais afetados por essa possível mudança são os consumidores residenciais” (Nogueira 2019).

Nesse contexto, a eficiência energética faz com que os trackers solares emergem como uma tecnologia promissora, capaz de ajustar a posição dos painéis solares ao longo do dia, acompanhando o movimento do sol. Ao optar por utilizar um sistema fotovoltaico com tracker solar, pode parecer, à primeira vista, um investimento de custo elevado em comparação aos sistemas com instalação fixa. No entanto, quando analisada de forma mais aprofundada, a escolha pode ser viabilizada.

¹Graduando em Engenharia Elétrica. Centro universitário Santo Agostinho.

²Professor, orientador. Mestre em Engenharia Elétrica.

Em cerca de 80% dos projetos avaliados, é possível alcançar a geração necessária de energia mantendo o consumo dentro da demanda contratada pelo cliente. Isso ocorre porque o rastreador aumenta significativamente a captação de energia ao longo do dia, permitindo uma redução na quantidade de módulos fotovoltaicos utilizados. Como consequência, a potência exigida para o inversor no dimensionamento do sistema também diminui — o que contribui diretamente para a queda no custo total da instalação.

Neste artigo, é explorado o potencial dos trackers solares na otimização da geração de energia em usinas fotovoltaicas, analisando seus benefícios, tendo em vista usinas acima de 500 kWp e o desenvolvimento de um pequeno projeto prático para complementação e conclusão da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia Solar no Brasil

No Brasil, tradicionalmente, a matriz elétrica nacional ainda é fortemente dependente de fontes hídricas. De acordo com dados da Absolar (2025), apesar de as usinas hidrelétricas serem as principais fontes de energia no Brasil, vêm perdendo espaço para usinas alternativas, reduzindo parte de sua dependência quando comparamos dados de anos anteriores, já que, hoje, ocupando menos da metade da eletricidade gerada no país — equivalente a 44,1% — são usinas hidrelétricas, conforme ilustrado na Figura 1, que apresenta a composição da matriz elétrica nacional.

1142

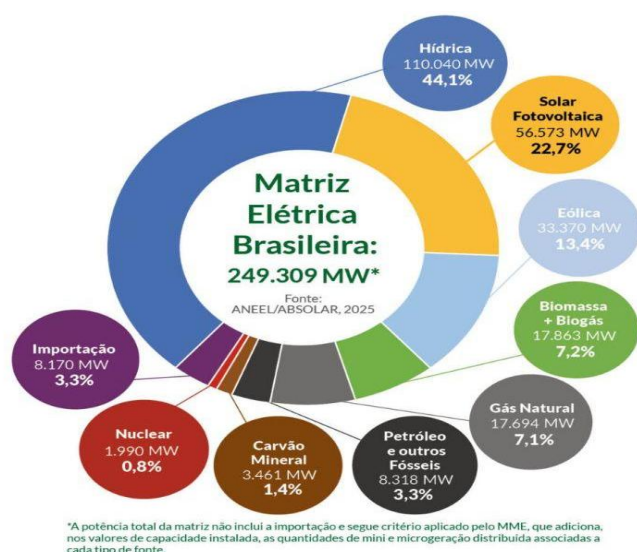


Figura 1: Matriz Elétrica no Brasil

O Brasil, por apresentar elevada incidência solar ao longo de todo o ano, encontra nas tecnologias solares uma opção viável e sustentável para diversificar sua matriz energética. A energia solar, por ser abundante e inesgotável, contribui significativamente para a redução dos danos ambientais provocados por fontes convencionais.

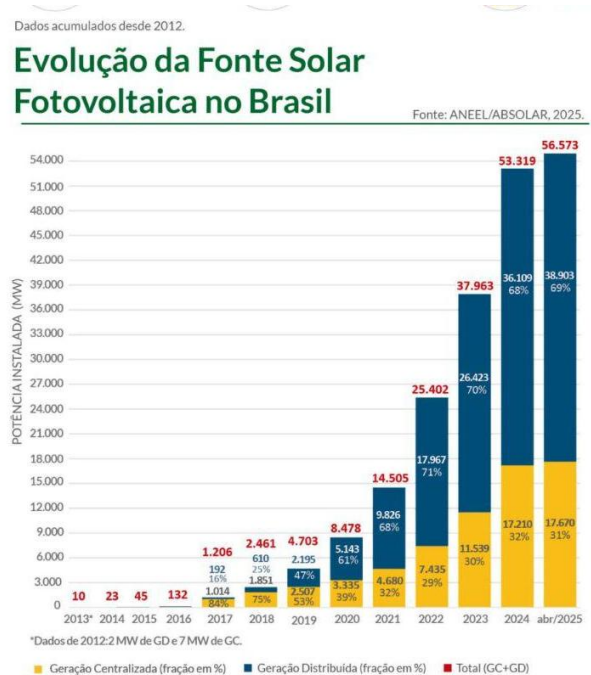


Figura 2: Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil

Fonte: Infográfico ABSOLAR, adaptado (2025).

Na figura 2, observa-se que o mercado brasileiro de energia solar fotovoltaica se encontra em expansão e representa, atualmente, uma das principais frentes de crescimento do setor elétrico nacional. Esse avanço é impulsionado por fatores como o elevado potencial de radiação solar, o aumento do custo da energia convencional, as políticas de incentivo à micro e minigeração distribuída e a crescente conscientização ambiental da população e dos investidores.

A geração distribuída, em particular, tem se destacado nos últimos anos por permitir a descentralização da produção de energia, promovendo o protagonismo do consumidor e a redução de perdas no sistema elétrico. Além disso, a expansão da energia solar no Brasil tem gerado impactos positivos na economia, como a criação de empregos diretos e indiretos, o fortalecimento da cadeia produtiva nacional e a atração de investimentos privados.

2.2 Energia Solar

A energia solar tem se consolidado como uma das fontes mais promissoras e limpas de geração elétrica no cenário global. Baseada no princípio do efeito fotovoltaico, sua utilização prática evoluiu a partir da descoberta científica realizada por Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando observou a geração de corrente elétrica em eletrodos metálicos imersos em eletrólito ao serem expostos à luz (Boyle, 2004).

A compreensão do efeito fotovoltaico ganhou base física sólida com os estudos da mecânica quântica, especialmente por meio do trabalho de Albert Einstein, que, em 1905, explicou o fenômeno com base no efeito fotoelétrico – pelo qual a luz, ao incidir sobre certos materiais, libera elétrons, gerando corrente elétrica (Green, 2005).

2.2.1 O Efeito Fotovoltaico e as Células Solares

O processo de conversão da luz solar em eletricidade ocorre por meio de dispositivos semicondutores denominados células fotovoltaicas. Essas células funcionam com base no princípio quântico do efeito fotovoltaico, no qual fótons incidentes sobre um material semicondutor fornecem energia suficiente para excitar os elétrons da camada de valência para a camada de condução, gerando uma corrente de elétrons livres – ou seja, uma corrente elétrica contínua (CC) (CRESESB, 2014).

1144

Esse processo é possível graças à estrutura de bandas de energia nos semicondutores, que possuem regiões com presença (junção p) e ausência (junção n) de elétrons. A junção pn é essencial para que, ao ser atingida por fótons com energia superior à largura da banda proibida, ocorra a geração de pares elétron-lacuna. Se esses pares forem formados na região do campo elétrico interno da junção, os portadores são separados, gerando uma diferença de potencial (ddp).

2.2.2 Da Célula ao Sistema Fotovoltaico

Individualmente, as células fotovoltaicas têm baixa potência, produzindo entre 1 e 2 Watts. Para aumentar essa capacidade, elas são conectadas em série e em paralelo, formando módulos ou painéis fotovoltaicos (CRESESB, 2014). Estes, por sua vez, são agrupados em arranjos maiores que compõem os sistemas fotovoltaicos, como nas usinas solares.

Após a geração em corrente contínua, a energia elétrica é conduzida até inversores, que a transformam em corrente alternada (CA). No entanto, essa tensão ainda é inferior à necessária para a rede de distribuição, sendo necessário o uso de transformadores elevadores de tensão, que ajustam os níveis elétricos antes da transmissão pela rede elétrica convencional.

2.2.3 Avanços Tecnológicos e Eficiência

A partir da célula de selênio criada por Charles Fritts em 1883, até os dispositivos modernos de silício, a eficiência das células fotovoltaicas tem aumentado significativamente. O marco decisivo foi a célula de silício desenvolvida pelos Laboratórios Bell, em 1954, com cerca de 6% de eficiência. Atualmente, tecnologias como células multi-junção atingem valores acima de 40% em condições laboratoriais conforme na Tabela 1 (NREL, 2023).

Década	Tecnologia	Eficiência Média (%)
1950	Silício (Bell Labs)	6
1980	Silício monocristalino	14
2000	Multicristalino	16
2020	Multi-junção (laboratório)	47,1 (máx)

Tabela 1: Evolução histórica da eficiência das células solares

Fonte: NREL, 2023

2.3 Materiais Constituintes do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são os dispositivos responsáveis por converter a radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. São formados por células fotovoltaicas, geralmente compostas de silício monocristalino ou policristalino, encapsuladas em estruturas de vidro temperado, EVA (etileno acetato de vinila) e polímeros protetores. O desempenho dos módulos está diretamente relacionado à sua eficiência, temperatura de operação e ao posicionamento em relação à incidência solar (Green *et al.*, 2022).

A escolha adequada do tipo de módulo influencia diretamente na produtividade energética do sistema. Módulos bifaciais, por exemplo, têm sido empregados em sistemas mais recentes por permitirem a captação de luz em ambas as faces, aumentando a geração em condições favoráveis de albedo (Morais *et al.*, 2023).

2.3.2 Inversores

O inversor é o equipamento encarregado de converter a corrente contínua (CC), gerada pelos módulos, em corrente alternada (CA), compatível com a rede elétrica. Além da conversão, o inversor também realiza o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), monitora o desempenho do sistema e garante a segurança por meio de proteções integradas contra sobrecorrente, sobretensão e ilhamento (CRESESB, 2014).

Existem diversos tipos de inversores no mercado, como os centrais, string e microinversores, sendo sua escolha dependente do porte e das características do sistema. A eficiência de conversão e a conformidade com normas técnicas, como a NBR 16149, são critérios essenciais na seleção do equipamento (ANEEL, 2023).

2.3.3 Estruturas Fixas

As estruturas fixas são responsáveis pela sustentação dos módulos fotovoltaicos, mantendo-os firmemente posicionados para captar a maior quantidade de radiação solar possível. Elas são dimensionadas conforme as condições ambientais locais (velocidade do vento, carga de neve, etc.) e devem ser resistentes à corrosão e às intempéries, geralmente sendo fabricadas em alumínio ou aço galvanizado (ABNT NBR 16690, 2019).

1146

Essas estruturas podem ser instaladas sobre telhados ou em solo, com diferentes ângulos de inclinação e orientação, que afetam diretamente o rendimento do sistema. Apesar de mais simples e econômicas, as estruturas fixas não acompanham o movimento aparente do sol, o que pode limitar a geração ao longo do dia (Ferreira, 2020).

2.3.4 Estruturas com Tracker Solar

As estruturas com sistemas de rastreamento solar (trackers) são projetadas para mover os módulos fotovoltaicos ao longo do dia, acompanhando a trajetória do sol no céu. Esse movimento pode ser em um eixo (horizontal ou vertical) ou em dois eixos, maximizando a captação de radiação direta e aumentando a geração de energia em até 25% em comparação com estruturas fixas, dependendo das condições locais (Pereira *et al.*, 2021).

Embora apresentem maior complexidade mecânica e eletrônica, e custos mais elevados, os trackers são especialmente vantajosos em projetos de grande escala, nos quais o aumento da produção compensa os investimentos adicionais. Sua utilização demanda análise cuidadosa de viabilidade técnica e econômica.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida por meio de abordagens aplicadas, como a experimental e a comparativa. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de estudar o estado atual dos seguidores solares, com suas tecnologias, quais são e como é a utilização de trackers solares em usinas fotovoltaicas, tanto em escala global quanto na região Nordeste do Brasil.

A partir desta etapa, foi possível desenvolver e fundamentar teoricamente a importância dos rastreadores solares, acompanhada de um estudo para a otimização da captação da energia solar por meio do seguidor solar, bem como identificar os principais tipos de sistemas utilizados, suas vantagens técnicas e implicações econômicas.

Na etapa seguinte, foi desenvolvido um protótipo funcional de um tracker solar de pequeno porte. A construção do sistema foi precedida por simulações utilizando a plataforma tinkercad, que permitiu testar circuitos, programações e componentes eletrônicos virtualmente, reduzindo custos e erros durante a fase de montagem física. Após os testes na plataforma, foi desenvolvido o protótipo na prática com o modelo e código de programação elaborado no tinkercad, utilizando a plataforma Arduino.

1147

3.1 Usinas com Tracker Solares

As usinas fotovoltaicas com rastreadores solares constituem um avanço considerável em comparação com as estruturas fixas tradicionais. Os rastreadores ajustam constantemente a posição dos módulos fotovoltaicos para seguir o movimento aparente do sol, otimizando a orientação e diminuindo o ângulo de incidência da radiação solar durante o dia. A literatura técnica considera essa função uma das estratégias mais eficientes para maximizar a captação de energia em instalações de grande porte (CRESESB, 2014).; Pereira *et al.*, 2021).

Os rastreadores mais comuns são os de eixo único (single-axis tracking – SAT), que se movem na direção Leste-Oeste, e os de dois eixos (dual-axis tracking – DAT), que podem ajustar tanto o azimute quanto a inclinação ao mesmo tempo. De acordo com o National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2023), os rastreadores de eixo único são bastante utilizados em usinas de grande porte por oferecerem um bom equilíbrio entre ganho energético e simplicidade mecânica. Por outro lado, os rastreadores de dois eixos são mais indicados para aplicações que exigem a máxima produção anual.

Nesse cenário, a Nextracker se destaca como uma das principais fornecedoras globais de plataformas avançadas para grandes projetos fotovoltaicos. De acordo com o segundo relatório financeiro divulgado pela empresa, no segundo trimestre do ano fiscal de 2026, a companhia obteve uma receita de US\$ 905 milhões, o que representa um aumento de 42% em comparação com o mesmo período do ano anterior (Nextracker, 2025).



Figura 3: Usina fotovoltaica no Brasil com tracker solar

Fonte: Nextracker (2025).

O panorama mostrado por essas empresas no mercado brasileiro sugere um futuro muito promissor para o setor de energia solar fotovoltaica, a figura 3 exibe uma usina com tecnologia da Nextracker no Maranhão com a utilização de trackers solares em funcionamento. Além do progresso econômico, atraindo mais investidores, o desenvolvimento das plataformas tecnológicas indica um futuro caracterizado pela automação, inteligência operacional e maior integração entre hardware e algoritmos de otimização.

1148

3.2 Eficiência Energética e Impactos Econômicos

A eficiência energética em sistemas fotovoltaicos está diretamente associada à capacidade de converter a radiação solar incidente em eletricidade útil, reduzindo perdas elétricas ao longo do processo de conversão. Em projetos de médio e grande porte, especialmente os com capacidade superior a 500 kWp, essa eficiência é crucial tanto para o desempenho geral da usina quanto para a viabilidade econômica do projeto (CRESESB, 2014).

O estudo especializado mostra que estruturas móveis com rastreamento solar melhoram consideravelmente a captação da irradiância. Boyle (2004) ressalta que a redução das perdas radiométricas e o aumento da densidade energética durante o dia são resultados do alinhamento

contínuo do módulo com o ângulo de incidência. Pesquisas internacionais também corroboram essa tendência: de acordo com o IEA PVPS (2020), rastreadores de eixo único podem aumentar a geração anual em 15% a 25%, enquanto sistemas de dois eixos podem exceder 30%, variando conforme a latitude e as condições atmosféricas locais.

No contexto do estudo técnico-econômico, vários autores indicam que a implementação de trackers é particularmente benéfica em usinas com capacidade superior a centenas de kWp, situação em que o custo extra dos mecanismos de rastreamento pode ser compensado pelo incremento na produção de energia (IEA, 2023; Pereira *et al.*, 2017).

Do ponto de vista econômico, esse ganho energético resulta em melhores indicadores de retorno, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de payback. A ABSOLAR (2023) indica que a redução constante do custo por watt instalado, juntamente com a maturidade tecnológica dos rastreadores, tem contribuído para tornar essa opção cada vez mais competitiva.

Segundo Almeida (2024), o sistema de rastreamento solar apresentou desempenho superior ao da estrutura fixa, alcançando um aumento médio de aproximadamente 18,5% na geração de energia durante o período analisado no gráfico da Figura 4, observando-se que, a partir desses dados, há um percentual positivo para a implementação dessa tecnologia em usinas resultando em um retorno financeiro mais rápido e interessante a longo e médio prazo.

1149

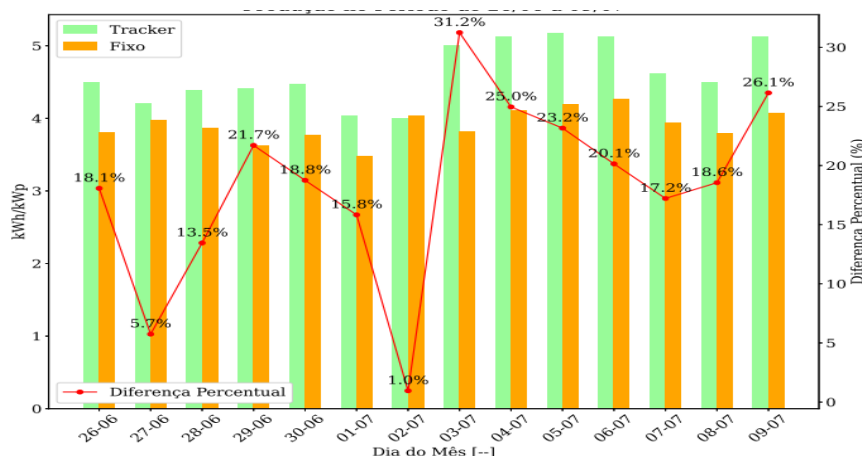


Figura 4: Comparação da geração entre usina fixa e usina com tracker, evidenciando ganho médio de 18,5% **Fonte:** Almeida (2024).

3.3 Montagem do Protótipo

Antes de iniciar a montagem física, foi essencial primeiro fazer uma simulação e montagem virtual usando o *tinkercad*. Isso permitiu testar as ideias preliminarmente e ajustar

os componentes necessários, sem custos com hardware. Para a realização do protótipo, foram utilizados os seguintes principais componentes eletrônicos:

- 1 Arduino Uno
- 2 Resistor
- 2 Sensor de Luz (LDR)
- 1 Display LCD 16x2
- 1 Protoboard
- 1 Mini Painel Solar 4V 130 mA (88,5 mm)
- 1 Módulo Serial I2C para LCD
- 1 Motor Micro Servo

Dando vida à ideia, primeiramente, para fazer um rastreador solar, foi utilizado um *Lead Development Representative – LDRs*, componente simples de utilizar compatível com o projeto. Para isso, foi utilizado um divisor de tensão com LDRs, ou seja, Cada LDR foi conectado em série com um resistor fixo, o qual serve como parte de um divisor de tensão que permite ao Arduino medir a intensidade de luz detectada pelo LDR.

Esta configuração é crucial para a conversão da variação de resistência do LDR em uma variação de tensão legível, facilitando o controle preciso do servo-motor para alinhar o painel solar com a fonte de luz. Dessa maneira, quando o Arduino ler os sinais analógicos, será possível comparar tais valores e atribuir as funções dadas ao servo-motor, alinhando o módulo na direção dos raios solares.

1150

No projeto, foi aplicada mais uma função, que é exibir a tensão do módulo fotovoltaico. Dessa maneira, ficará evidente que todos os dados exibidos permitem uma breve análise da eficiência energética, mostrando o quanto de energia é aproveitada com esse experimento.

Levando em conta as limitações do Arduino na sua entrada analógica de 5 Volts, optou-se por utilizar um módulo fotovoltaico com tensão máxima de 4 Volts. Apesar de existirem maneiras de adaptar, como um divisor de tensão adicional ou um ADC externo, considerando também os custos do projeto, a decisão escolhida harmonizou perfeitamente com os objetivos.

Na escolha do display, também foi considerado o uso do módulo I2C, facilitando ainda mais a comunicação do mesmo com o Arduino, diminuindo também as linhas de código e facilitando a montagem, pois foram usadas somente 2 portas analógicas. No tinkerCad, foi elaborado o esquema do circuito, que, neste mesmo programa, é possível depurar o código e emular com uma simulação em esquema real. Abaixo está o esquema do circuito montado e funcionando.

Na Figura 5 e na Figura 6, está uma imagem do circuito, mostrando todas as ligações feitas no microcontrolador, imagens geradas pela plataforma do Tinkercad, a mesma utilizada para simulação do circuito eletrônico e físico do projeto de tracker solar em pequena escala.

A lógica de rastreamento é baseada na comparação entre os valores dos dois sensores LDR. Quando a intensidade luminosa detectada no lado direito supera o valor do sensor esquerdo, acrescido de uma margem pré-definida, o servo incrementa sua posição e realiza um pequeno movimento para a direita.

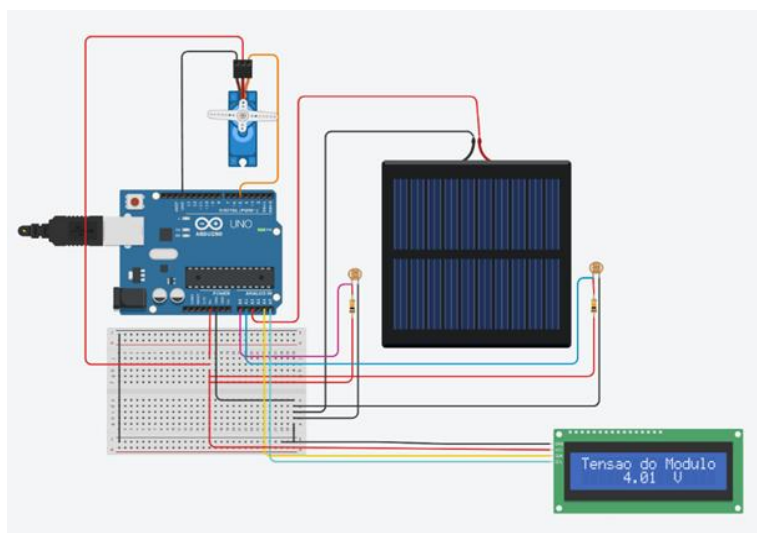


Figura 5: Imagem Montagem completa e executando no Tinkercad
Fonte: Elaboração própria.

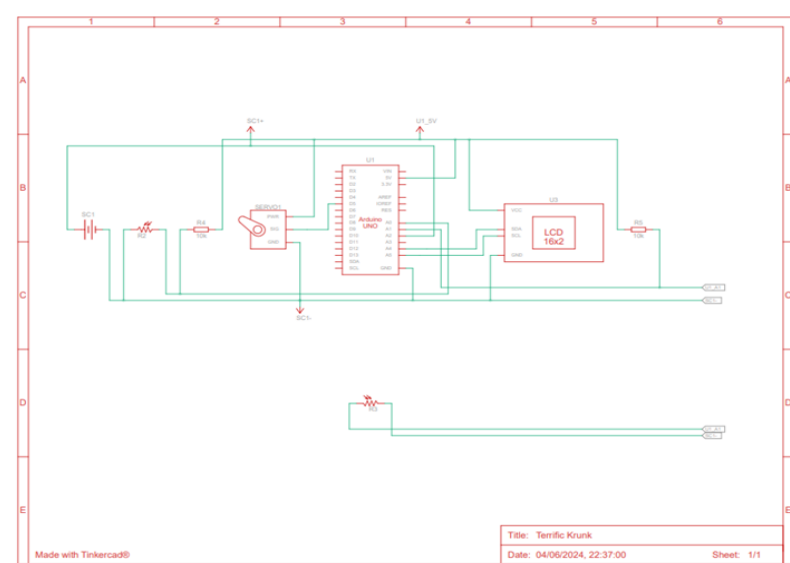


Figura 6: Imagem do Circuito
Fonte: Elaboração própria.

De maneira inversa, quando o sensor esquerdo recebe maior luminosidade, o servo decrementa sua posição, deslocando o painel para o lado oposto. Pequenas pausas são inseridas entre os ajustes para garantir estabilidade na movimentação.

Essa rotina garante que o painel acompanhe continuamente a posição de maior incidência luminosa, permitindo maior eficiência na captação de energia e uma operação mais fiel ao comportamento de um sistema de rastreamento solar em pequena escala.

Após as simulações, foi elaborada a montagem do protótipo fisicamente, podendo-se observar o funcionamento e aplicação do mesmo, com ótimos resultados. A Figura 7 exibe resultado final de como ficou a montagem do circuito proposto concluído com êxito, resultando no pleno funcionamento do sistema.

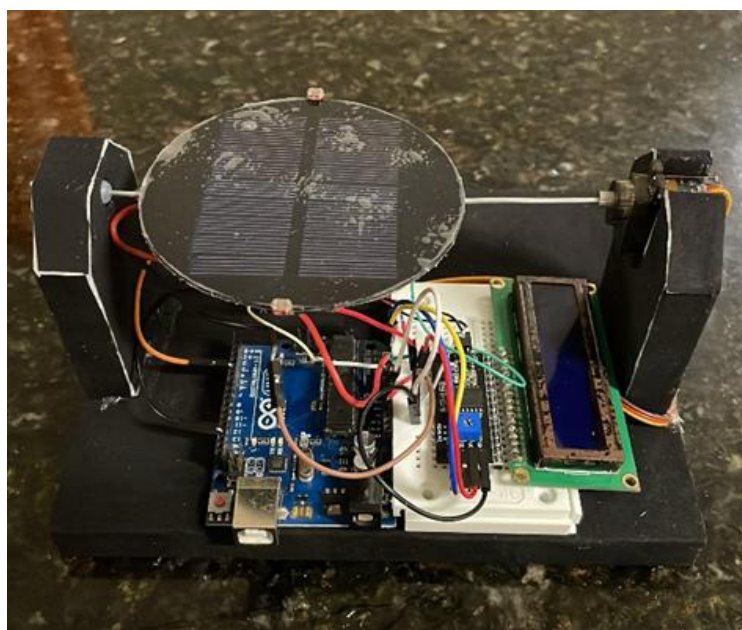


Figura 7: Imagem Montagem Física

Fonte: Elaboração própria.

Todos os componentes interagem conforme o previsto, permitindo o controle eficaz do servo-motor por meio do potenciômetro, bem como a exibição precisa das informações no display LCD. Dessa forma, os objetivos do projeto foram integralmente alcançados, demonstrando a viabilidade da solução implementada.

Na parte em anexos, encontra-se o link relacionado à montagem do protótipo, exemplificando sua montagem e conclusão do projeto em funcionamento real, apresentando perfeito funcionamento com os resultados significativos, é possível observar o tracker se movendo conforme a incidência da luz.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas no processo de estudo do trabalho comprovam que a utilização de trackers em usinas fotovoltaicas representa uma estratégia eficiente para maximizar a captação de energia destes painéis solares ao longo do dia. A partir da revisão bibliográfica consultada juntamente com as referências técnicas, foi demonstrado que os sistemas de rastreamento solar podem elevar a geração de energia entre 15% a 30%, variando conforme os modelos de trackers utilizados na unidade geradora, condições climáticas e latitude da instalação. Os ganhos energéticos se convertem diretamente em melhoria dos indicadores econômicos do projeto, favorecendo um retorno financeiro mais ágil e benéfico em usinas com potência superior a 500 kWp.

Após o desenvolvimento do protótipo em pequena escala, foi possível observar o comportamento na prática de um sistema de rastreamento solar fotovoltaico. O protótipo respondeu com precisão à variação luminosa captada pelos sensores, ajustando constantemente e de maneira eficaz a posição do módulo. Esse resultado comprova a viabilidade técnica da solução, corroborando os conceitos expostos na fundamentação teórica e nos estudos de caso. Ademais, a simulação prévia no tinkercad foi fundamental para minimizar erros e confirmar o circuito antes da montagem física, destacando a relevância de ferramentas virtuais no desenvolvimento de projetos de engenharia.

1153

Do ponto de vista econômico e energético, os resultados sugerem que a implementação de trackers é particularmente benéfica para usinas de médio e grande porte, nas quais o aumento da produção de energia justifica o investimento inicial mais elevado. Embora o custo dessa tecnologia ainda seja superior ao das estruturas fixas, observa-se um crescimento significativo de investimentos por parte de grandes empresas — especialmente no Brasil — no processo de industrialização dos rastreadores, o que tende a reduzir seus custos ao longo do tempo. Com isso o sistema rastreador tecnologia possui sua consolidação e cada vez mais é adotada em grandes projetos fotovoltaicos no Brasil e no cenário internacional.

Por fim, o rastreamento solar apresenta-se como uma solução capaz de melhorar significativamente o desempenho energético dos sistemas fotovoltaicos. O protótipo desenvolvido atingiu seu objetivo ao demonstrar, de maneira prática e compreensível, o funcionamento de um tracker solar. Dessa forma, este estudo contribui para o aprimoramento da compreensão técnica sobre a tecnologia e destaca seu potencial de aplicação na engenharia elétrica, bem como em pesquisas futuras voltadas às energias renováveis.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 16690: Sistemas fotovoltaicos – Requisitos para projeto e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. Resolução Normativa nº 1.059, de 21 de fevereiro de 2023. Estabelece critérios e procedimentos para o acesso de microgeração e minigeração distribuída. Brasília: ANEEL, 2023.

ALMEIDA, E. S. Desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar horizontal de um eixo de baixo custo baseado em microcontrolador. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. ABSOLAR. Boletim de dados consolidados – 2023. São Paulo: ABSOLAR, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BOYLE, G. Renewable energy: power for a sustainable future. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2004.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. CRESESB. Apostilas técnicas. 2014.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 9 maio 2025.

1154

FERREIRA, C. F. Análise técnica de estruturas de fixação em sistemas fotovoltaicos residenciais. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 9, n. 2, p. 23–30, 2020.

GREEN, M. A. Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion. Berlin: Springer, 2005.

GREEN, M. A. *et al.* Solar cell efficiency tables (version 60). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 30, n. 1, p. 3–12, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Snapshot of global PV markets 2020. Paris: IEA PVPS, 2020. Disponível em: <https://iea-pvps.org>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MORAIS, J. A. *et al.* Avaliação do desempenho de módulos fotovoltaicos bifaciais em diferentes superfícies de albedo. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), 2023.

NEXTRACKER. Nextracker registra US\$ 905 milhões em receita no 2T do ano fiscal de 2026. Comunicado de imprensa, 2025. Disponível em: <https://www.nextracker.com>. Acesso em: 21 nov. 2025.

NOGUEIRA, A. C. M. L.; BERTUSSI, G. L. O setor de energia elétrica brasileiro e a perspectiva de uma reforma setorial. Revista da UFMG, v. 26, n. 1 e 2, p. 16–45, 2019.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. NREL. Best research-cell efficiency chart, 2023. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 2 jun. 2025.

OLIVEIRA, F. M.; LEDESMA, J. J. G.; ANDO JUNIOR, O. H. Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para sistemas de energia solar fotovoltaica: técnicas, implementação e desempenho sob sombreamento parcial. São Paulo: Editora CRV, 2020.

PEREIRA, E. B. *et al.* Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PEREIRA, E. B. *et al.* Rastreamento solar aplicado a sistemas fotovoltaicos: análise de desempenho em diferentes regiões do Brasil. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 7, n. 2, p. 89-101, 2021.

PROGDISTRIB. Guia de boas práticas para projetos de geração distribuída fotovoltaica. São Paulo: Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD), 2022.

SOUZA, V. A. Projetos microcontrolados com energia solar. São Paulo: Clube de Autores, 2013.

VILLALVA, M. G.; FONSECA, N. F.; RIBEIRO, E. C. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2015.