



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Análise da viabilidade técnica e financeira sobre a utilização de sistemas fotovoltaicos fixos ou com rastreador solar

Samuel Breno de Souza

João Monlevade, MG
2026

Samuel Breno de Souza

**Análise da viabilidade técnica e financeira sobre
a utilização de sistemas fotovoltaicos fixos ou
com rastreador solar**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Thainan Santos Theodoro

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026**

Dedico este trabalho a Deus primeiramente, que me deu condições de poder chegar até aqui, a todos os meus Familiares que me acompanharam nessa trajetória e a Ufop pela infra estrutura e professores de qualidade.

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso. Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava ao curso. Aos professores pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional. Agradeço também a minha avó por ter me acolhido durante toda essa trajetória. Agradeço a minha namorada, pelo amor e companheirismo.

"Be the change you want to see in the world"
– Mahatma Gandhi

Resumo

Sistemas fotovoltaicos ganharam bastante espaço no Brasil, acompanhando uma tendência mundial de busca por fontes renováveis e sustentáveis de energia. No entanto, não existe consenso sobre o quando é mais vantajoso usar sistemas fixos ou com *trackers* para rastreamento solar e melhor aproveitamento da energia solar. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica do uso de *trackers* em sistemas fotovoltaicos, buscando entender a partir de qual faixa de potência eles passam a ser economicamente e tecnicamente vantajosos. Para dar confiabilidade aos resultados, foi utilizada a ferramenta PV*SOL, que é amplamente reconhecida no setor e permite simular diferentes cenários de forma detalhada e próxima da realidade. A metodologia consistiu em simular diversos cenários no PV*SOL, variando a potência dos sistemas entre 10 kW e 1 MW para configurações fixas e com rastreamento de um eixo. A partir dessas simulações, foram analisados aspectos técnicos (como geração de energia, eficiência e rendimento) e financeiros (como *payback*, taxa interna de retorno (TIR), Retorno do Investimento (do inglês, *Return of Investment*) (ROI) e custo de geração). Os resultados mostraram que os *trackers* sempre entregam maior produção de energia em comparação aos sistemas fixos, com ganhos médios de 20 a 25%. No entanto, em sistemas menores (até cerca de 300 kW), esse ganho não compensa o maior custo inicial, fazendo com que os fixos se mostrem mais atrativos financeiramente. A partir de potências intermediárias, como 500 kW, a diferença começa a diminuir, e acima de 800 kW o rastreamento se torna mais economicamente vantajoso. Espera-se que este trabalho possa servir como referência para o meio acadêmico, contribuindo para novas pesquisas e estudos comparativos, além de ser útil para empresas e profissionais do setor fotovoltaico que buscam otimizar custos e maximizar a eficiência de seus empreendimentos.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Viabilidade, *Trackers*, *Payback*, TIR, ROI.

Abstract

Photovoltaic systems have gained significant ground in Brazil, following a global trend toward the adoption of renewable and sustainable energy sources. However, there is no consensus on when it is more advantageous to use fixed systems or systems with trackers for solar tracking and improved utilization of solar energy. In this context, the objective of this work is to evaluate the economic feasibility of using trackers in photovoltaic systems, seeking to understand from which power range they become economically and technically advantageous. To ensure the reliability of the results, the PV*SOL tool was used, which is widely recognized in the sector and allows different scenarios to be simulated in a detailed and realistic manner. The methodology consisted of simulating various scenarios in PV*SOL, varying system power between 10 kW and 1 MW for fixed configurations and single-axis tracking. From these simulations, technical aspects (such as energy generation, efficiency, and performance) and financial aspects (such as payback, internal rate of return (IRR), Return on Investment (ROI), and cost of generation) were analyzed. The results showed that trackers always deliver higher energy production compared to fixed systems, with average gains of 20 to 25%. However, in smaller systems (up to about 300 kW), this gain does not offset the higher initial cost, making fixed systems more financially attractive. From intermediate power levels, such as 500 kW, the difference begins to decrease, and above 800 kW tracking becomes more economically advantageous. It is expected that this work may serve as a reference for the academic community, contributing to new research and comparative studies, as well as being useful for companies and professionals in the photovoltaic sector seeking to optimize costs and maximize the efficiency of their projects.

Keywords: Photovoltaic Systems, Viability, Trackers, Payback, IRR, ROI..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento da Energia Solar.	13
Figura 2 – Níveis de radiação solar no Brasil.	14
Figura 3 – <i>tracker</i> de eixo duplo	17
Figura 4 – Tela Inicial.	27
Figura 5 – Fluxograma.	29
Figura 6 – Dados do projeto.	30
Figura 7 – Localização da usina.	30
Figura 8 – Seleção do painel fotovoltaico,	31
Figura 9 – Escolha dos inversores	32
Figura 10 – Perdas do sistema.	33
Figura 11 – Capex e Opex do sistema.	35
Figura 12 – Energia anual gerada x Potencia x Rendimento	48
Figura 13 – Ganho de geração x Potencia	49
Figura 14 – <i>CAPITAL EXPENDITURE</i> (CAPEX) x Eficiência do Sistema	49
Figura 15 – CAPEX x Custo de Geração de Energia	50
Figura 16 – <i>Payback</i> x TIR	51
Figura 17 – <i>Payback</i> x TIR x ROI	52

Lista de Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GD	Geração Distribuída
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CRESESB	Centro de referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito
FS	sistema fotovoltaico (do inglês, <i>photovoltaic system</i>)
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede
TIR	taxa interna de retorno
TMA	taxa mínima de atratividade
VPL	valor presente líquido
ROI	Retorno do Investimento (do inglês, <i>Return of Investment</i>)
EPÉ	Empresa de Pesquisa Energética
LCOE	Custo Nivelado de Energia (do inglês, <i>levelized cost of energy</i>)
CAPEX	<i>CAPITAL EXPENDITURE</i>
OPEX	<i>OPERATIONAL EXPENDITURE</i>

Lista de tabelas

Tabela 1 – Inversores utilizados nas simulações	31
Tabela 2 – Custo médio por watt-pico (Wp) instalado	34
Tabela 3 – Relação de custo Fixo/ <i>Tracker</i>	35
Tabela 4 – Parâmetros Financeiros	37
Tabela 5 – CAPEX das Usinas	37
Tabela 6 – Resultados técnicos das Usinas de 10kW	38
Tabela 7 – Resultados Financeiros das Usinas de 10kW	39
Tabela 8 – Resultados técnicos das Usinas de 50kW	39
Tabela 9 – Resultados Financeiros das Usinas de 50kW	40
Tabela 10 – Resultados técnicos das Usinas de 100kW	40
Tabela 11 – Resultados Financeiros das Usinas de 100kW	41
Tabela 12 – Resultados técnicos das Usinas de 300kW	41
Tabela 13 – Resultados Financeiros das Usinas de 300kW	42
Tabela 14 – Resultados técnicos das Usinas de 500kW	42
Tabela 15 – Resultados Financeiros das Usinas de 500kW	43
Tabela 16 – Resultados técnicos das Usinas de 800kW	43
Tabela 17 – Resultados Financeiros das Usinas de 800kW	44
Tabela 18 – Resultados técnicos das Usinas de 1MW	45
Tabela 19 – Resultados Financeiros das Usinas de 1MW	45
Tabela 20 – Resultados técnicos das Usinas	46
Tabela 21 – Resultados Financeiros das Usinas	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1	Energia Solar Fotovoltaica	15
2.2	Sistemas Fotovoltaicos Fixos e com <i>Trackers</i>	15
2.2.1	Sistemas Fixos	16
2.2.2	Sistema de Rastreamento Solar (<i>Tracker</i>)	16
2.2.2.1	<i>Tracker</i> de Eixo Único	16
2.2.2.2	<i>Trackers</i> de Eixo Duplo	17
2.3	Impacto do Rastreamento Solar na Eficiência Energética	18
2.3.1	Comparação entre Sistemas Fixos e com <i>trackers</i>	18
2.3.2	Influência da Latitude e do Clima nos Ganhos de Eficiência	19
2.3.3	Aumento de Produção Energética	19
2.4	Custos Associados ao Uso de <i>trackers</i> em Usinas Fotovoltaicas	20
2.4.1	Custo de Aquisição e Instalação de <i>trackers</i>	20
2.4.2	Custos Operacionais e de Manutenção	21
2.4.3	Impacto do Custo dos <i>trackers</i> na Viabilidade Econômica	22
2.5	Métricas de Avaliação Econômica e Financeira	23
2.5.1	Valor Presente Líquido	23
2.5.2	Taxa Interna de Retorno	24
2.5.3	Payback	24
2.6	Conclusões parciais	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	PVSOL	26
3.2	Cenários propostos	27
3.3	Fluxograma	28
3.4	Dimensionamento	28
3.4.1	Posicionamento Geográfico dos Módulos	28
3.4.2	Módulos Fotovoltaicos	29
3.4.3	Inversores	31
3.4.4	Perdas do Sistema	32
3.5	Aspectos financeiros de uma Usina	33
3.5.1	CAPEX	33
3.5.2	OPEX	34
3.6	Estruturação dos Cenários	34

3.6.1	Parâmetros Técnicos	36
3.6.2	Parâmetros Financeiros	36
4	RESULTADOS	38
4.1	Usina de 10kW	38
4.1.1	Resultados técnicos	38
4.1.2	Resultados Financeiros	39
4.2	Usina de 50kW	39
4.2.1	Resultados técnicos	39
4.2.2	Resultados Financeiros	40
4.3	Usina de 100kW	40
4.3.1	Resultados técnicos	40
4.3.2	Resultados Financeiros	41
4.4	Usina de 300kW	41
4.4.1	Resultados técnicos	41
4.4.2	Resultados Financeiros	42
4.5	Usina de 500kW	42
4.5.1	Resultados técnicos	42
4.5.2	Resultados Financeiros	43
4.6	Usina de 800kW	43
4.6.1	Resultados técnicos	43
4.6.2	Resultados Financeiros	44
4.7	Usina de 1MW	44
4.7.1	Resultados técnicos	44
4.7.2	Resultados Financeiros	45
4.7.3	Resumo dos Resultados	45
4.7.3.1	Resumo Técnico das Usinas	45
4.7.3.2	Resumo Financeiro das Usinas	46
4.8	Análise geral	46
4.8.1	Aspectos técnicos	47
4.8.2	Aspectos Financeiros	49
4.9	Conclusões Parciais	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

Este capítulo faz uma introdução sobre conceitos e assuntos introdutórios que envolvem energia solar, mais especificamente sistema fotovoltaico (do inglês, *photovoltaic system*) (FS). É feita uma breve contextualização, análise do cenário atual no Brasil. Além disso, é feita uma revisão bibliográfica, apresentação do problema e contribuições do trabalho.

A crise climática tem se tornado uma das maiores preocupações da sociedade contemporânea, impulsionando a busca por soluções energéticas sustentáveis que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2023). O aumento da temperatura global, eventos climáticos extremos e a crescente pressão por políticas ambientais rigorosas têm levado governos e setores produtivos a investirem em fontes renováveis de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (CEPEL; CRESESB, 2025). Neste contexto, a energia solar fotovoltaica surge como uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais da geração elétrica tradicional.

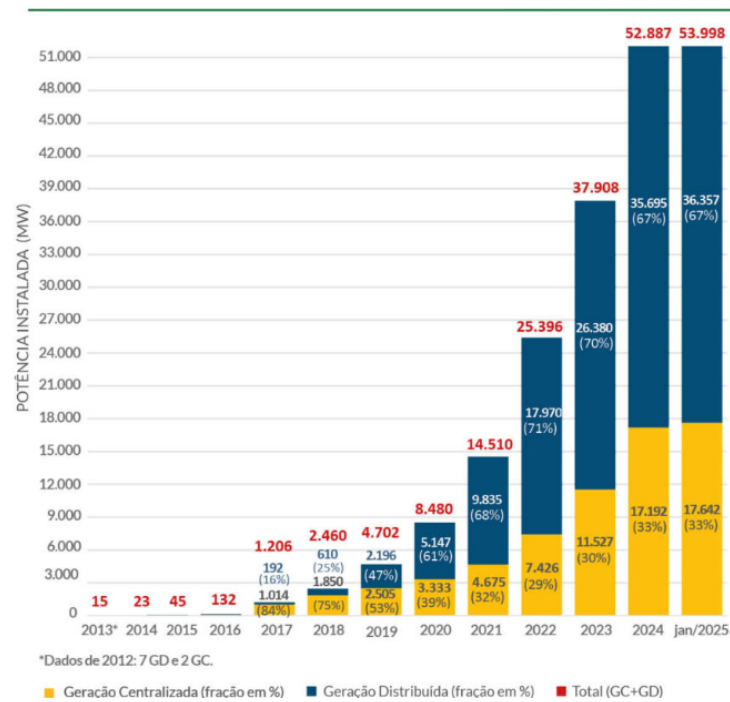
Além dos desafios ambientais, o custo da eletricidade tem sido um fator crítico para consumidores e indústrias em todo o mundo. A volatilidade nos preços da energia elétrica, impulsionada por fatores como a escassez hídrica e oscilações nos preços dos combustíveis fósseis, tem aumentado a demanda por soluções que garantam maior previsibilidade e eficiência econômica na geração elétrica ((EPE), 2022). No Brasil, onde grande parte da matriz energética é baseada em hidrelétricas, períodos de seca podem resultar em aumentos tarifários significativos, tornando a diversificação da matriz uma necessidade estratégica (RODRIGUES; CAMARGOS et al., 2016).

A energia solar fotovoltaica se destaca nesse cenário por sua abundância, baixo impacto ambiental e viabilidade técnica em diversas regiões do mundo. Nos últimos anos, os avanços tecnológicos e a redução dos custos dos módulos fotovoltaicos tornaram essa fonte cada vez mais competitiva, viabilizando sua adoção em larga escala (LIMA, 2024). Além disso, políticas de incentivos e mecanismos regulatórios têm impulsionado investimentos no setor, consolidando a energia solar como uma solução viável para suprir a crescente demanda energética de forma sustentável (LUCAS et al., 2024). A Figura 1, mostra o quão importante a energia solar vem se tornando na matriz energética brasileira.

O Brasil possui um dos maiores potenciais solares do mundo, com uma irradiação média superior a 5 kWh/m²/dia na maior parte do território (PEREIRA; RUTHER, 2021). Esse potencial, aliado a políticas de fomento e incentivos à geração distribuída, tem acelerado a expansão da energia solar no país, que já representa uma parcela significativa da matriz elétrica nacional (ANEEL,). A Figura 2 nos mostra o potencial de irradiação solar no Brasil.

No entanto, para que o setor alcance sua máxima eficiência e competitividade,

Figura 1 – Crescimento da Energia Solar.



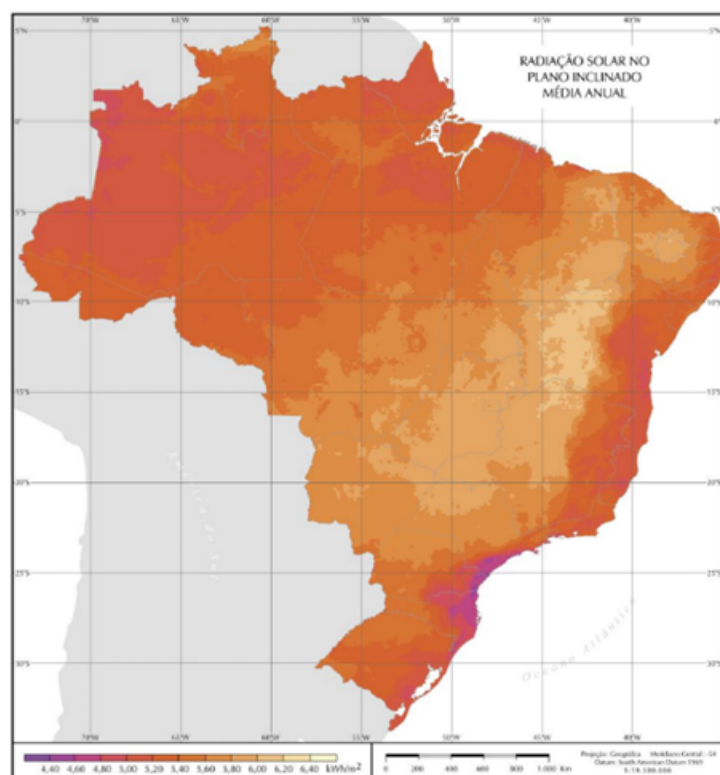
Fonte: Retirado de ABSOLAR (2024).

torna-se essencial a adoção de tecnologias que otimizem a captação da radiação solar, aumentando a geração de energia sem a necessidade de ampliação da área ocupada pelos sistemas.

Nesse contexto, os sistemas de rastreamento solar (*trackers*) surgem como uma alternativa tecnológica capaz de maximizar a captação da luz solar ao longo do dia, aumentando a eficiência da geração fotovoltaica em comparação aos sistemas fixos. Estudos indicam que os *trackers* podem elevar a geração de energia em até 25% para sistemas de eixo único e até 40% para sistemas de duplo eixo, dependendo da localização e das condições climáticas (DENHOLM et al., 2021). No entanto, essa tecnologia também implica custos adicionais de instalação, operação e manutenção, o que levanta um questionamento central sobre sua viabilidade financeira em diferentes escalas de potência.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica do uso de *trackers* em sistemas fotovoltaicos, buscando identificar a partir de qual potência instalada essa tecnologia se torna financeiramente vantajosa. Para isso, serão consideradas variáveis como custos de implementação, ganhos energéticos e métricas financeiras, como Retorno do Investimento (*ROI*), Taxa Interna de Retorno TIR e *Payback*. A análise contribuirá para a tomada de decisão no setor fotovoltaico, auxiliando investidores e projetistas a otimizar seus projetos com base em critérios técnicos e econômicos.

Figura 2 – Níveis de radiação solar no Brasil.



Fonte: Retirado de ABSOLAR (2024).

2 Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão abordados todos os conceitos técnicos e econômicos relevantes sobre micro-geração e mini-geração solar. Com base nesses critérios analisar a viabilidade econômica da utilização de sistemas de geração fixos ou móveis.

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais fontes de energia renovável no mundo. Seu crescimento se deve à redução de custos dos módulos fotovoltaicos, às políticas de incentivo governamentais e à necessidade de descarbonização da matriz energética (SANTOS, 2023).

No Brasil, a geração fotovoltaica tem expandido rapidamente devido à alta incidência solar e ao avanço da tecnologia de geração distribuída e centralizada ((EPE), 2022). No entanto, para maximizar a eficiência da geração e reduzir o Custo Nivelado de Energia (do inglês, *levelized cost of energy*) (LCOE), estratégias como o uso de sistemas de rastreamento solar têm sido estudadas e implementadas.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos Fixos e com *Trackers*

Os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados de maneira fixa ou equipados com mecanismos de rastreamento solar, conhecidos como *trackers*. Os sistemas fixos são aqueles em que os painéis permanecem em uma inclinação e orientação estáticas ao longo do dia e do ano, geralmente otimizadas para maximizar a captação de energia em uma determinada região.

Por outro lado, os *trackers* são dispositivos mecânicos e eletrônicos projetados para ajustar continuamente a posição dos painéis fotovoltaicos em relação ao movimento aparente do sol, aumentando a eficiência energética do sistema (DHIBI et al., 2020).

Embora existam diferentes tipos de rastreamento solar, este trabalho concentra sua análise exclusivamente no sistema de um eixo. Essa escolha se justifica pelo fato de ser a configuração mais utilizada em projetos de médio e grande porte no Brasil, apresentando maior acessibilidade e difusão no mercado. Em contraste, os sistemas de dois eixos, apesar de oferecerem ganhos adicionais de eficiência, possuem um custo de implantação elevado e ainda são pouco aplicados na realidade nacional, o que limita sua viabilidade prática.

2.2.1 Sistemas Fixos

Os sistemas fotovoltaicos fixos constituem a forma mais tradicional de implantação de usinas solares, tanto em pequena escala (residencial e comercial) quanto em projetos de maior porte. Nesses arranjos, os módulos fotovoltaicos são instalados em estruturas estáticas, com inclinação (*Tilt*) e azimute definidos de acordo com a latitude e a orientação solar do local, sem movimentação ao longo do dia. A grande vantagem dessa configuração é a simplicidade construtiva, que implica em menor custo inicial (CAPEX) e operações de manutenção mais simples e baratas (*OPERATIONAL EXPENDITURE* (OPEX)) em comparação a sistemas com rastreamento solar (*trackers*) (ABSOLAR, 2023).

No Brasil, os sistemas fixos são amplamente utilizados em telhados residenciais e comerciais devido à limitação de espaço e ao fato de apresentarem boa relação custo-benefício. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) destaca que essa tecnologia responde por grande parte da Geração Distribuída (GD) conectada à rede, sendo o arranjo padrão para a maioria das unidades consumidoras com microgeração (SANTOS, 2023).

Em termos de desempenho energético, a principal limitação dos sistemas fixos é que a captação da radiação solar não é maximizada ao longo do dia, já que a inclinação e o azimute permanecem constantes. Dessa forma, a geração tende a ser maior no período central do dia e menor nas primeiras horas da manhã e no final da tarde. Estudos apontam que, em comparação com sistemas com rastreamento de um eixo, o ganho energético anual dos fixos pode ser de 10% a 25% menor, a depender da localização geográfica e das condições de irradiância direta e difusa (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Apesar dessa limitação, sistemas fixos ainda se destacam pela maior confiabilidade mecânica e por apresentarem LCOE competitivos, especialmente em projetos de menor porte. Segundo a (SANTANA, 2023), o custo por watt instalado em sistemas fotovoltaicos fixos no Brasil é, em média, inferior ao de sistemas com *trackers*, variando conforme a faixa de potência instalada. Isso faz com que, para sistemas residenciais e comerciais, o arranjo fixo continue sendo a opção mais difundida e economicamente atrativa.

2.2.2 Sistema de Rastreamento Solar (*Tracker*)

Os sistemas de rastreamento solar (*trackers*) são dispositivos que ajustam a inclinação dos painéis fotovoltaicos ao longo do dia para maximizar a captação da radiação solar direta. Diferentemente dos sistemas fixos, que operam com um ângulo de inclinação fixo, os *trackers* acompanham a trajetória do sol, reduzindo as perdas de geração.

2.2.2.1 *Tracker* de Eixo Único

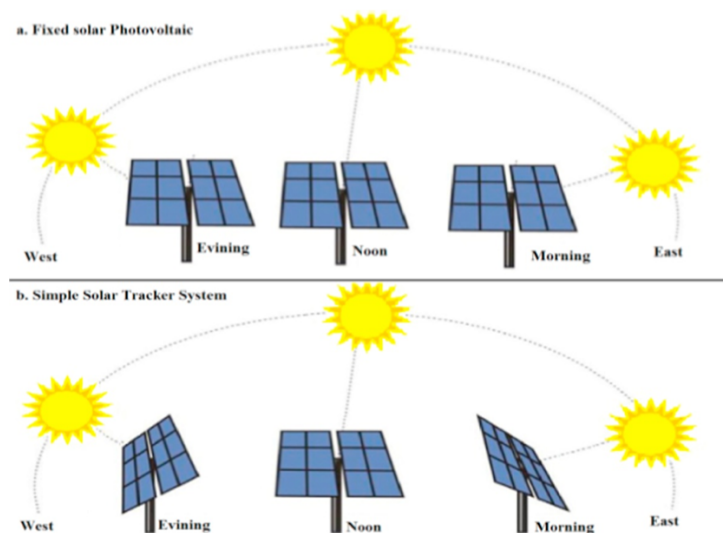
Os *trackers* de eixo único são os mais amplamente utilizados devido ao seu equilíbrio entre custo e ganho energético. Esse sistema movimenta os módulos fotovoltaicos ao longo de um único eixo, geralmente na direção norte-sul, permitindo que os painéis

sigam a trajetória solar no sentido leste-oeste ao longo do dia. Dessa forma, o ângulo de incidência dos raios solares é reduzido em relação ao sistema fixo, proporcionando um aumento de eficiência entre 15% e 25% dependendo das condições climáticas e da latitude da instalação (RIBEIRO; FILHO, 2020).

Existem dois principais subtipos de *trackers* de eixo único: os horizontais e os verticais. No primeiro caso, o eixo de rotação é paralelo ao solo, sendo amplamente empregado em usinas de grande porte devido à simplicidade mecânica e ao menor consumo de energia dos atuadores. Já no segundo, o eixo é perpendicular ao solo, o que pode ser vantajoso em determinadas latitudes mais altas, onde a variação angular do Sol ao longo do dia é maior (MANSOURI; KALOGIROU, 2020).

A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento de um *tracker* de eixo único horizontal, destacando como os módulos acompanham a posição solar ao longo do dia, e mostrando a diferença entre o mesmo e um sistema fixo.

Figura 3 – *tracker* de eixo duplo



Fonte: Retirado de ??).

Além da vantagem de aumentar a produção de energia sem um incremento expressivo nos custos, os *trackers* de eixo único apresentam desafios como a necessidade de manutenção periódica dos motores e sistemas de controle, além de um consumo energético próprio que, embora pequeno, pode impactar a eficiência líquida do sistema. Estudos apontam que esse consumo varia entre 1% e 3% da produção total da usina, sendo um fator relevante na análise econômica (CASTRO et al., 2021).

2.2.2.2 Trackers de Eixo Duplo

Os *trackers* de eixo duplo, por sua vez, oferecem um grau de otimização ainda maior, pois ajustam a posição dos módulos tanto no eixo horizontal (leste-oeste) quanto

no eixo vertical (norte-sul). Isso permite que os painéis estejam constantemente perpendiculares aos raios solares, maximizando a captação da radiação direta. Esse sistema pode proporcionar um incremento de eficiência entre 30% e 40% em relação aos sistemas fixos, sendo especialmente vantajoso em regiões onde a radiação direta tem uma participação elevada no total da radiação incidente (KARPIĆ et al., 2019).

Entretanto, o maior ganho energético dos *tracker* de eixo duplo vem acompanhado de desafios técnicos e financeiros, pois o acréscimo na complexidade mecânica e eletrônica resulta em custos de instalação e manutenção significativamente superiores. Além disso, esses sistemas são mais vulneráveis a falhas mecânicas, dado o número maior de componentes móveis.

Apesar de sua alta eficiência, a utilização de *trackers* de eixo duplo é menos comum em grandes usinas solares, uma vez que o custo adicional nem sempre é justificado pelo ganho energético. Normalmente, essa tecnologia é mais viável em aplicações de menor escala, como sistemas *off-grid* e instalações onde o espaço disponível para os painéis é limitado (LIM et al., 2020).

2.3 Impacto do Rastreamento Solar na Eficiência Energética

O uso de sistemas de rastreamento solar, conhecidos como *trackers*, tem sido amplamente estudado como uma solução para maximizar a captação de energia fotovoltaica ao longo do dia. Enquanto sistemas fotovoltaicos fixos permanecem inclinados em um ângulo predeterminado, *trackers* ajustam dinamicamente a posição dos módulos solares, acompanhando a trajetória aparente do sol no céu. Esse movimento permite um aumento na incidência da radiação solar direta sobre as células fotovoltaicas, reduzindo perdas por ângulos desfavoráveis e aumentando a eficiência da conversão energética (JAVED et al., 2020).

2.3.1 Comparação entre Sistemas Fixos e com *trackers*

Sistemas fotovoltaicos fixos são amplamente utilizados devido à sua simplicidade, menor custo inicial e menor necessidade de manutenção. No entanto, esses sistemas sofrem perdas devido à variação angular da radiação solar ao longo do dia e das estações do ano. Em contrapartida, sistemas com *trackers* podem aumentar a geração de energia em 20% a 45%, dependendo da tecnologia utilizada e da localização geográfica (MANSOURI; KALOGIROU, 2020). *Trackers* de eixo único, que acompanham o movimento solar ao longo do eixo leste-oeste, proporcionam ganhos médios de 25% a 35% em comparação com sistemas fixos. Já os *trackers* de duplo eixo, que ajustam a inclinação tanto no eixo leste-oeste quanto no norte-sul, podem alcançar ganhos superiores a 40% em locais de elevada irradiância solar direta (ZGRAGGEN et al., 2022).

Embora o aumento na geração seja evidente, a decisão entre utilizar sistemas fixos ou *trackers* depende de uma série de fatores, incluindo o custo do equipamento, consumo energético do rastreamento, manutenção e a disponibilidade de incentivos financeiros. Em regiões com alta proporção de radiação difusa, como áreas com clima predominantemente nublado, os benefícios do rastreamento podem ser reduzidos, uma vez que a incidência da luz não provém exclusivamente da posição direta do sol (KOUSSA et al., 2011).

2.3.2 Influência da Latitude e do Clima nos Ganhos de Eficiência

A eficiência do rastreamento solar é diretamente influenciada pela latitude e pelas condições climáticas da região em que o sistema está instalado. Em localidades próximas ao equador, a diferença na captação de energia entre sistemas fixos e móveis tende a ser menor, pois o sol percorre uma trajetória mais próxima ao zênite durante o ano. No entanto, em regiões de latitudes médias e altas, onde a variação da altura solar ao longo das estações é mais acentuada, o uso de *trackers* se torna mais vantajoso (AGOSTINHO, 2023).

Além da latitude, o clima local desempenha um papel essencial na viabilidade do rastreamento solar. Em áreas com alta incidência de céu claro e radiação solar direta, *trackers* apresentam melhor desempenho. Por outro lado, em locais com elevada cobertura de nuvens, a fração de radiação difusa aumenta, reduzindo a eficácia do rastreamento. Estudos indicam que em regiões onde a radiação difusa representa mais de 50% da radiação total, a vantagem dos *trackers* diminui consideravelmente (MEKHILEF et al., 2012).

2.3.3 Aumento de Produção Energética

Diversos estudos têm investigado o impacto do uso de sistemas de rastreamento solar no desempenho energético de usinas fotovoltaicas, evidenciando ganhos significativos em relação aos sistemas de estrutura fixa. No contexto brasileiro, (NETO; VALE; GUERRA, 2020) analisaram uma usina fotovoltaica instalada na região Nordeste do Brasil e constataram que a adoção de um sistema de rastreamento solar de eixo único proporcionou um aumento aproximado de 32% na geração anual de energia, quando comparado a um sistema fixo de mesma potência instalada. Os autores associam esse ganho à elevada incidência de radiação solar direta característica da região, que favorece a eficiência dos sistemas com rastreamento.

Resultados semelhantes foram observados em um estudo experimental conduzido por (LIMA, 2020), que comparou o desempenho de um sistema fotovoltaico equipado com rastreador solar de um eixo a um sistema fixo operando sob as mesmas condições ambientais. O estudo demonstrou que o sistema com rastreamento apresentou um ganho de geração energética de até 23% em relação ao sistema fixo, reforçando a relevância dessa

tecnologia para maximizar a captação da radiação solar ao longo do dia, especialmente em locais com elevada disponibilidade de irradiância direta.

Esses resultados indicam que, embora os ganhos energéticos proporcionados pelos *trackers* variem de acordo com fatores climáticos, geográficos e tecnológicos, a utilização de sistemas de rastreamento solar pode representar uma estratégia eficaz para o aumento da produção energética em usinas fotovoltaicas, particularmente em regiões de alta insolação.

2.4 Custos Associados ao Uso de *trackers* em Usinas Fotovoltaicas

A implementação de sistemas de rastreamento solar (*trackers*) em usinas fotovoltaicas traz benefícios significativos em termos de eficiência energética, mas também implica custos adicionais que devem ser analisados para determinar sua viabilidade financeira. Os principais componentes de custo envolvem a aquisição e instalação do sistema de rastreamento, os custos operacionais e de manutenção, além do consumo energético necessário para o funcionamento dos motores e mecanismos de ajuste. A análise desses fatores permite avaliar em que cenários a adoção do rastreamento se torna economicamente justificável em comparação com sistemas fixos.

2.4.1 Custo de Aquisição e Instalação de *trackers*

Os custos iniciais de um sistema fotovoltaico com rastreamento são superiores aos de um sistema fixo, devido à necessidade de estruturas mecânicas e componentes eletrônicos adicionais. De acordo com estudos recentes, a inclusão de um *trackers* de eixo único pode elevar o custo do investimento inicial em 10% a 25%, enquanto um sistema de duplo eixo pode representar um aumento de 30% a 50% no custo total da instalação (WISSMANN et al., 2024).

Os principais fatores que influenciam o custo de aquisição e instalação incluem:

- Tipo de *trackers*: Sistemas de eixo único são mais baratos e apresentam menor complexidade mecânica, enquanto *trackers* de duplo eixo requerem mecanismos mais sofisticados para permitir ajustes em ambas as direções.
- Dimensão e capacidade da usina: Grandes usinas fotovoltaicas podem obter economias de escala, reduzindo o custo unitário por megawatt instalado.
- Condições do solo e infraestrutura: A instalação de *trackers* requer uma base estrutural mais robusta para suportar os movimentos e garantir estabilidade, o que pode aumentar os custos em terrenos irregulares ou com baixa resistência mecânica.
- Mão de obra e logística: O transporte e a instalação dos *trackers* envolvem um maior grau de especialização, resultando em custos adicionais em comparação aos suportes fixos tradicionais.

Estudos de caso mostram que o custo de instalação pode variar significativamente de acordo com a localização geográfica e disponibilidade de tecnologia. Segundo um relatório da *International Renewable Energy Agency* (STATISTICS, 2022), o custo médio de instalação de *trackers* de eixo único foi estimado entre US 150 a US 250 dólares por kW, enquanto para sistemas de duplo eixo os valores podem atingir US 300 a US 450 dólares por kW.

2.4.2 Custos Operacionais e de Manutenção

Os sistemas de rastreamento solar demandam custos operacionais e de manutenção mais elevados em comparação com sistemas fixos. Isso ocorre devido à presença de componentes móveis, motores e sensores que requerem inspeção e substituição periódicas. A manutenção corretiva e preventiva é essencial para evitar falhas mecânicas que possam comprometer o desempenho da usina.

Os principais custos associados à manutenção incluem:

- Lubrificação e ajustes mecânicos: *trackers* possuem peças móveis que sofrem desgaste ao longo do tempo, exigindo lubrificação e reposição de componentes para garantir um funcionamento eficiente.
- Em sistemas de rastreamento solar, a presença de componentes mecânicos e eletrônicos como motores elétricos, sensores de luminosidade e atuadores adiciona complexidade às operações de manutenção em comparação aos sistemas de estrutura fixa. Esses componentes móveis estão continuamente expostos a condições ambientais adversas, o que aumenta a necessidade de inspeção, manutenção preventiva e, eventualmente, substituição ao longo da vida útil do projeto. Estudos técnicos indicam que *trackers* dependem fortemente de sensores e mecanismos de controle para manter o alinhamento dos módulos com o Sol, o que requer rotinas específicas de manutenção e verificação de funcionamento desses dispositivos para garantir a performance energética e reduzir falhas operacionais (BARBOZA, 2025)(PALIYAL et al., 2024).
- Consumo energético: Os sistemas de rastreamento necessitam de energia elétrica para operar os mecanismos de movimentação. Esse consumo representa um custo adicional, geralmente variando entre 1% e 5% da energia gerada pelo sistema (CHANG, 2009). Em grandes usinas, essa parcela pode ter impacto significativo na viabilidade econômica.
- Monitoramento e controle: Sistemas modernos de rastreamento utilizam softwares de controle e monitoramento remoto, os quais demandam infraestrutura tecnológica e mão de obra qualificada para operação contínua.

De acordo com dados levantados pela Empresa de Pesquisa Energética ((EPE), 2017), os custos anuais de operação e manutenção (O&M) de projetos fotovoltaicos no Brasil variam conforme a tecnologia adotada. No conjunto de projetos analisados no 2^a Leilão de Energia de Reserva (LER/2016), verificou-se que os custos de O&M anuais representaram, em média, cerca de 0,8% do investimento total em projetos com estrutura fixa, enquanto os mesmos custos em projetos com rastreadores de eixo único corresponderam a cerca de 1,2% do investimento total. Essa diferença indica que sistemas com rastreamento solar podem implicar custos de O&M mais elevados do que sistemas com estrutura fixa, principalmente em função da maior complexidade mecânica e dos componentes adicionais associados aos *trackers*.

2.4.3 Impacto do Custo dos *trackers* na Viabilidade Econômica

A viabilidade financeira do uso de *trackers* depende do equilíbrio entre o aumento da geração de energia e os custos adicionais envolvidos. O retorno sobre o investimento (ROI) e o período de *payback* são métricas fundamentais para determinar se o sistema de rastreamento é economicamente atrativo para um determinado projeto.

Para avaliar essa viabilidade, diversos estudos utilizam indicadores como:

- Valor Presente Líquido (valor presente líquido (VPL)): Mede a rentabilidade do projeto ao longo do tempo, considerando a diferença entre receitas e custos descontados ao valor presente.
- Taxa Interna de Retorno (TIR): Representa a taxa de retorno do investimento e permite compará-lo com outras alternativas de aplicação de capital.
- Período de *Payback*: Indica o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado através da economia ou aumento na geração de energia.

Estudos empíricos de desempenho econômico têm demonstrado que a adoção de sistemas de rastreamento solar pode reduzir o tempo de retorno do investimento (*payback*) em comparação com arranjos fixos quando há ganhos energéticos relevantes. Em uma análise comparativa realizada por (SILVA, 2024), um sistema fotovoltaico com rastreador apresentou *payback* menor do que um sistema fixo, devido ao aumento de produção energética proporcionado pelo rastreamento, mesmo após considerar custos adicionais de operação e manutenção. Isso sugere que, em regiões com alta irradiância e tarifas de energia elevadas, a utilização de *trackers* pode melhorar a competitividade econômica dos projetos fotovoltaicos em médio e grande porte (SILVA, 2024).

Além disso, relatórios internacionais sobre custos de geração renovável da *International Renewable Energy Agency* ((IRENA), 2024) indicam uma declinação contínua nos custos de energia solar fotovoltaica, refletida na redução do custo nivelado médio

ponderado de eletricidade em projetos solares instalados globalmente, o que favorece a competitividade de tecnologias mais avançadas, como rastreadores solares, em comparação com sistemas convencionais fixos ((IRENA), 2024)(IRENA, 2024).

2.5 Métricas de Avaliação Econômica e Financeira

Newman, Lavelle e Eschenbach (2000) alegam que diferentes técnicas de engenharia pode ser usadas na tomada de decisão para investimentos em projetos, mas os aspectos econômicos dominam o problema, sendo, portando, preponderantes na determinação da melhor solução. Conforme Budel (2017), a análise e a avaliação de projetos são feitas com base nos fluxos de caixa gerados pelos mesmos. Os critérios de análise mais atuais são:

- Valor Presente Líquido;
- Taxa interna de retorno;
- *Payback* Simples;
- *Payback* Descontado;
- Taxa mínima atrativa

2.5.1 Valor Presente Líquido

O método do VPL tem como finalidade determinar um valor no instante inicial a partir de um fluxo de caixa formado de uma série de receitas e despesas (FANTI et al., 2015). Segundo Silva e Farias (2015), com VPL é possível decidir qual a melhor alternativa de investimento calculando os valores atuais equivalentes as séries correspondentes e comparando-os, no qual o resultado com o maior valor positivo é o mais rentável. O calculo do VPL, conforme BRON (2007), pode ser obtido através da equação abaixo

$$V_{PL} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (2.1)$$

em que V_{PL} é o valor presente líquido [R\$]; FC_t é a entrada ou fluxo de caixa de cara período t [R\$]; i é a taxa mínima de atratividade (taxa mínima de atratividade (TMA)) esperada pelo investidor [% ao período]; n é o período estimado para o projeto,

Conforme Hess e Holliday (1992), a TMA apresenta um forte grau de subjetividade, uma vez que parte do investidor qual devera ser o rendimento requerido para o projeto. Camloffski (2014) alega que um investidor de perfil conservador ou moderado pode considerar taxas próximas à taxa básica de juros, ou seja, oferecidas por bancos em aplicações financeiras de baixo risco, satisfatórias. Porém um investidor de perfil mais agressivo não se contentará com um rendimento significativamente baixo.

2.5.2 Taxa Interna de Retorno

A TIR, segundo Camloffski (2014), é a taxa de juros que torna o valor presente do fluxo de caixa igual a zero, ou seja, é a rentabilidade projetada do investimento estimado quanto se deseja executar um projeto de acordo com o fluxo de caixa definido. Os investimentos com o resultado TIR maior que o valor da TMA são considerados rentáveis e são passíveis de análise (FILHO; KOPITTKKE, 2010). A equação abaixo proposta por Rodrigues, Camargos et al. (2016) expressa o calculo da TIR.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + K)^t} - FC_0 \quad (2.2)$$

em que FC_0 é o investimento realizado no momento zero [R\$]; FC_t é a entrada ou fluxo de caixa de cara perido t [R\$]; k é a TIR [% ao período]; n é o período estimado para o projeto.

A característica particular dos problemas de engenharia econômica decorre do fato de alternativas de investimento envolverem entradas e saídas de caixa diferentes, em instantes de tempo diferentes (HESS; HOLLIDAY, 1992). Conforme Newman, Lavelle e Eschenbach (2000), a quantia disposta no presente é equivalente ao valor disposto em uma data futura tendo esta equivalência denominada como taxa de juros equivalentes. Taxas equivalentes são taxas de juros que mesmo pertencendo e diferentes períodos de capitalização, quando incidem sobre um me capitam, resultam em rendimentos ou valores acumulados idênticos, ao fim de um mesmo período financeiro (??). Newman, Lavelle e Eschenbach (2000) utilizam a equação abaixo para o calculo da taxas de juros equivalentes

$$i_{eq} = (1 + i_n)^n - 1 \quad (2.3)$$

em que... Ondeie i_{eq} é a taxa de jutos equivalente ao período [% ao período]; i_n é a taxa de jusos no período n [% ao período] n é o numero de períodos.

2.5.3 Payback

O período de recuperação de capital ou PayBack Simples, é o periodo de tempo em que ocorre o retorno do investimento, sendo calculado no fluxo de caixa da vida útil Brito et al. (2011). Para Vilela et al. (2012), a aceitação de um projeto com base no *Payback* Simples é válida desde que o período de recuperação do capital seja inferior ao período máximo proposto inicialmente. Vale ressaltar que Blank e Tarquin (2009) afirmam que o período de recuperação do capital nunca deve ser considerado como o principal indicador para definição de uma alternativa, mas sim como uma ferramenta para prover uma triagem inicial ou uma informação complementar em conjunto com uma análise realizada pelo VPL ou outro método.

Embora não deixe de representar um parâmetro de análise, o *Payback* Simples não pode ser considerado do ponto de vista financeiro, visto que, simplesmente não leva em

conta o princípio básico das finanças, que é o valor do dinheiro no tempo (CAMLOFFSKI, 2014).

2.6 Conclusões parciais

O capítulo contextualizou o conceito de viabilidade técnica e financeira, foram apontadas algumas das vantagens para uso de recursos de energia solar para geração.

Apresentou-se também o dimensionamento das usinas de geração distribuída como Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede (SFCD). Foram apresentadas as principais variáveis de entrada, e como obtê-las.

Foram também abordadas as principais técnicas de análise de viabilidade econômicas de FS, como TIR, TMA VPL e Payback.

Por fim, apresentaram-se as estruturas tarifárias que compõe a conta de energia elétrica, como **ICMS!** (**ICMS!**), **PIS!** (**PIS!**), **CIP!** (**CIP!**) e **Cofins!** (**Cofins!**), e o valor do acréscimo que incide com o tipo de bandeira que vigora no momento.

3 Metodologia

Nesta seção será exibida a ferramenta utilizada para auxiliar na coleta de dados e simulação de casos, para obtenção de resultados

3.1 PVSOL

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a ferramenta PVSOL, um software especializado no dimensionamento, simulação e análise de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e isolados. O PVSOL foi criado pela empresa alemã Valentin Software GmbH, reconhecida mundialmente pelo desenvolvimento de soluções computacionais voltadas para a modelagem de sistemas de energia renovável, especialmente solar fotovoltaica e térmica.

O PVSOL é amplamente empregado em estudos acadêmicos e profissionais devido à sua capacidade de realizar simulações dinâmicas que consideram fatores como radiação solar, orientação e inclinação dos módulos, sombreamentos parciais, eficiência dos inversores, perdas elétricas, além de aspectos econômicos do investimento. Essas funcionalidades permitem uma análise precisa da geração de energia ao longo do tempo, possibilitando estimativas realistas do desempenho energético e financeiro do sistema projetado.

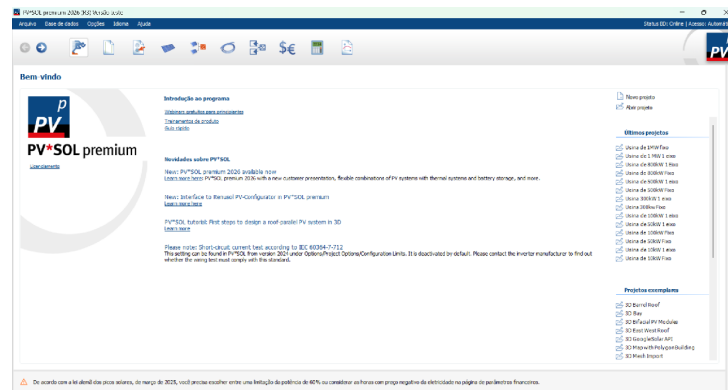
Dentre suas principais funções, destacam-se:

- Modelagem detalhada do arranjo fotovoltaico: escolha do tipo de módulo, inversores, número de strings e configuração elétrica;
- Análise de sombreamento em 3D: criação de cenários com edificações, árvores e obstáculos que possam impactar a produção de energia;
- Simulação de geração horária, mensal e anual: possibilitando o cálculo da curva de geração de acordo com dados climáticos locais;
- Avaliação financeira: análise de custos de investimento, operação e manutenção, fluxo de caixa, tempo de retorno e viabilidade econômica;
- Comparação de diferentes configurações de sistemas: como sistemas fixos, trackers de um eixo e trackers de dois eixos, permitindo identificar a opção mais vantajosa tecnicamente e economicamente.

Assim, a utilização do PVSOL neste trabalho se justifica por sua confiabilidade e precisão, sendo uma ferramenta consolidada no mercado internacional e já validada em diversas

pesquisas científicas e projetos de engenharia. A aplicação do software possibilita a obtenção de resultados consistentes, fundamentais para a análise comparativa proposta neste estudo. A Figura 4, mostra a tela inicial a ferramenta PV*SOL utilizada neste trabalho.

Figura 4 – Tela Inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 Cenários propostos

Neste estudo, serão realizadas simulações para diferentes potências de sistemas fotovoltaicos (10kW, 50kW, 100kW, 300kW, 500kW e 800kW e 1MW), comparando duas configurações distintas: sistema fixo, sistema com rastreamento de um eixo (*single-axis tracker*). As análises incluirão a geração de energia anual (kWh/ano), os custos de implantação e manutenção, e o tempo de retorno do investimento (*payback*).

A metodologia adotada consistirá nos seguintes passos:

- Definição dos parâmetros de simulação: Seleção da localização geográfica, escolha dos módulos fotovoltaicos e inversores, e configuração dos tipos de montagem dos painéis.
- Simulação no PVSOL: Entrada dos dados técnicos e financeiros no software e execução das simulações para cada cenário.
- Coleta e organização dos resultados: Extração dos dados gerados pelo PVSOL para análise comparativa entre os sistemas fixo e com rastreamento.
- Análise dos resultados: Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso de trackers em comparação com sistemas fixos, considerando geração de energia, custos e payback.
- Elaboração de gráficos e tabelas: Representação visual dos resultados para facilitar a interpretação e a comparação entre os diferentes cenários simulados.

Com essa abordagem, buscamos garantir que os resultados apresentados sejam tecnicamente embasados e aplicáveis a estudos de viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a análise do impacto do uso de *trackers* na eficiência e no retorno financeiro dos investimentos em energia solar.

3.3 Fluxograma

Com o objetivo de organizar e sistematizar as etapas metodológicas adotadas neste trabalho, a Figura 5 apresenta o fluxograma que resume o processo de desenvolvimento do estudo. O fluxograma descreve, de forma sequencial, as principais etapas realizadas, desde a definição da ferramenta de simulação e do local do projeto até a análise e comparação dos resultados obtidos.

As simulações foram conduzidas utilizando o software PV*SOL, contemplando diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos, incluindo estruturas fixas e com rastreamento solar. Dessa forma, o fluxograma permite uma visualização clara da metodologia empregada, facilitando a compreensão do encadeamento lógico das atividades e garantindo a reprodutibilidade dos resultados apresentados.

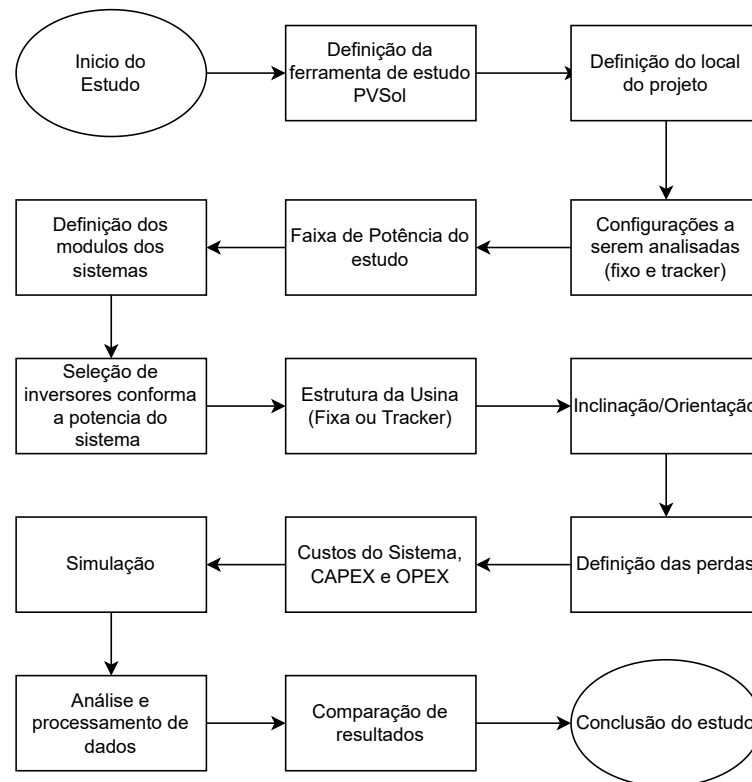
3.4 Dimensionamento

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos consiste em definir, de maneira técnica e criteriosa, a configuração adequada de todos os componentes do sistema, desde os módulos e inversores até os cabeamentos, arranjos físicos e eventuais transformadores necessários para a conexão à rede elétrica. Esse processo é essencial para garantir a eficiência energética, a segurança operacional e a viabilidade econômica do empreendimento. No presente trabalho, o dimensionamento foi realizado por meio do software PV*SOL, que possibilita a simulação de diferentes cenários, considerando as condições climáticas locais, a orientação dos módulos, as características elétricas dos equipamentos e as normas aplicáveis ao setor. Nas subseções a seguir, são apresentados os critérios adotados para a padronização dos módulos, a escolha dos inversores, o dimensionamento de cabos, a utilização de transformadores e a definição dos arranjos dos painéis fotovoltaicos, justificando tecnicamente cada decisão tomada no processo. A Figura 6 mostra a tela inicial do PV*SOL, que é de onde partimos para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaico.

3.4.1 Posicionamento Geográfico dos Módulos

As simulações foram realizadas considerando a cidade de Belo Horizonte MG, situada na latitude 19,9° Sul. Em localidades do hemisfério sul, a orientação mais favorável

Figura 5 – Fluxograma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

dos módulos fotovoltaicos é voltada para o norte geográfico, de modo a maximizar a captação da radiação solar ao longo do ano.

De acordo com as recomendações do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito), a inclinação ótima dos painéis é de aproximadamente 20°. Essa configuração possibilita um melhor aproveitamento da irradiação solar global, garantindo o equilíbrio entre a geração de energia nos diferentes períodos sazonais. Dessa forma, a adoção da inclinação de 20° e orientação para o norte atende ao projeto. A Figura 7, mostra onde é definida a localização geográfica da usina fotovoltaica na ferramenta PV*SOL.

3.4.2 Módulos Fotovoltaicos

Para garantir uniformidade na análise dos diferentes sistemas simulados, adotou-se a padronização dos módulos fotovoltaicos no software PV*SOL. A utilização de um mesmo modelo de painel, com potência nominal, eficiência e características técnicas bem definidas, permite uma comparação justa entre diferentes cenários de potência instalada e configurações de rastreamento solar. A escolha do módulo considerou critérios como

Figura 6 – Dados do projeto.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 7 – Localização da usina.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

eficiência média do mercado, confiabilidade do fabricante e disponibilidade comercial no Brasil. Segundo (VILELA et al., 2012), a seleção de módulos deve priorizar não apenas a potência unitária, mas também a eficiência de conversão e o coeficiente de temperatura, que influenciam diretamente no desempenho energético do sistema.

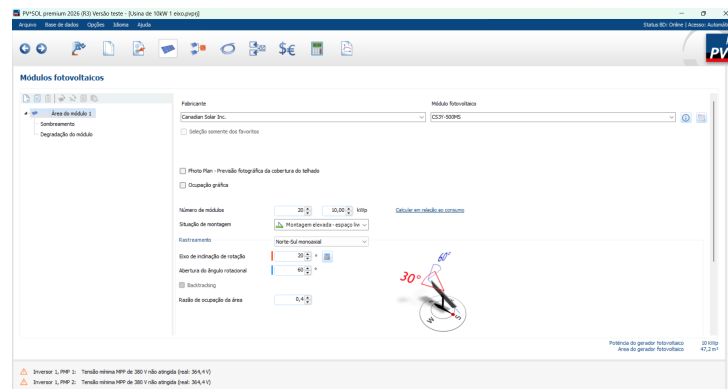
Para a realização das simulações no software PV*SOL, optou-se pela utilização do módulo *Canadian Solar CS3Y-500MS*, com potência nominal de 500Wp e tecnologia de células monocristalinas. Esse modelo apresenta eficiência de conversão próxima a 21%, garantindo maior aproveitamento da radiação solar incidente e consequente aumento da geração elétrica por área instalada.

Além da alta eficiência, o módulo incorpora a tecnologia *half-cell*, que reduz perdas resistivas e melhora a performance em condições de sombreamento parcial, característica relevante para aplicações em usinas de médio e grande porte. A escolha desse módulo justifica-se, ainda, por sua ampla disponibilidade comercial no mercado brasileiro e pela

sua representatividade em projetos fotovoltaicos de maior escala.

Outro aspecto relevante é que a adoção de módulos de maior potência unitária contribui para a redução de custos indiretos, como cabeamento, estruturas de suporte e mão de obra, uma vez que se necessita de menor número de painéis para atingir a mesma potência instalada. Dessa forma, a utilização do CS3Y-500MS garante não apenas a confiabilidade e o desempenho energético do sistema, mas também a viabilidade econômica e a consistência metodológica das análises realizadas neste trabalho. A Figura 8, mostra onde é feita a seleção dos módulos na ferramenta PV*SOL.

Figura 8 – Seleção do painel fotovoltaico,



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.3 Inversores

No que se refere aos inversores, sua seleção foi realizada de acordo com a potência de cada sistema simulado, observando-se a disponibilidade de modelos comerciais no Brasil e compatíveis com o banco de dados do PV*SOL. A Tabela 1, mostra os inversores adotados para as respectivas potências estudadas,

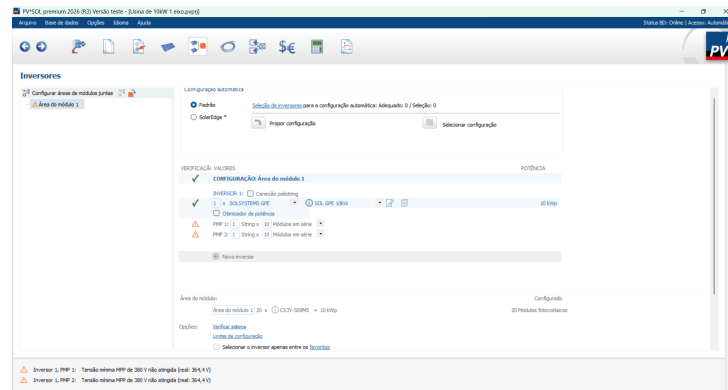
Porte da Usina	Fabricante	Quantidade	Inversor
10kW	SOLSYSTEMS GPE	1	SOL GPE 10kW
50kW	SOLSYSTEMS GPE	1	SOL GPE 50kW
100kW	SOLSYSTEMS GPE	2	SOL GPE 50kW
300kW	CANADIAN SOLAR INC.	3	CSI-100K-T4001B-E
500kW	CANADIAN SOLAR INC.	4	CSI-125KTL-GI-E
800kW	WEG	4	SIW500H ST200 H3
1MW	WEG	5	SIW500H ST200 H3

Tabela 1 – Inversores utilizados nas simulações

A adoção desses equipamentos não ocorreu de forma aleatória, mas baseou-se em critérios técnicos e de mercado, considerando a confiabilidade dos fabricantes, a disponibilidade no território nacional e a compatibilidade com projetos de diferentes portes. Dessa

forma, a padronização estabelecida contribui para a consistência das análises, permitindo comparações precisas entre os diferentes cenários de potência e configuração avaliados neste trabalho. A Figura 9, mostra onde é feita a seleção dos inversores na ferramenta PV*SOL.

Figura 9 – Escolha dos inversores



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.4 Perdas do Sistema

O software PV*SOL disponibiliza duas abordagens distintas para a definição das perdas em sistemas fotovoltaicos. A primeira delas é o modelo detalhado, no qual cada tipo de perda pode ser configurado individualmente, contemplando aspectos como perdas ôhmicas em cabos, eficiência dos inversores, perdas por *mismatch*, sombreamento, sujeira, temperatura, entre outros fatores técnicos. Essa abordagem permite maior precisão no dimensionamento, sobretudo em projetos executivos, onde as condições reais da instalação já estão definidas com clareza.

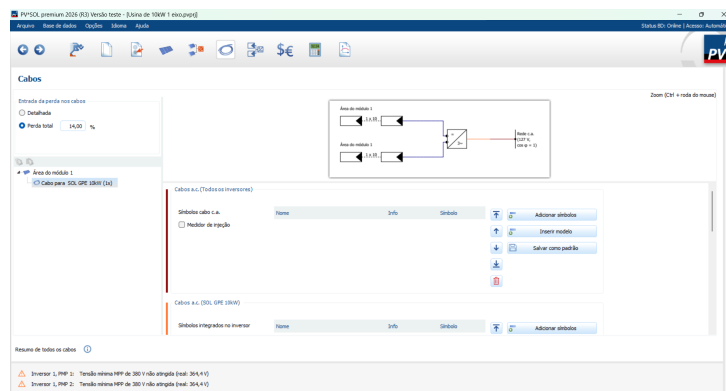
Por outro lado, o modelo simplificado possibilita a inserção de um único percentual global de perdas, que agrega todos os efeitos mencionados de forma consolidada. Esse método é frequentemente utilizado em estudos de pré-viabilidade ou em análises comparativas, uma vez que simplifica a modelagem sem comprometer a representatividade dos resultados.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do modelo simplificado, aplicando um valor global de 14% de perdas em todas as simulações realizadas. O valor de 14% fundamenta-se em referências amplamente reconhecidas. O *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)*, ferramenta de referência internacional para estimativas solares, adota esse percentual como padrão para estudos simplificados de desempenho de sistemas fotovoltaicos. Além disso, pesquisas acadêmicas nacionais, como o trabalho de (TONOLO et al., 2019) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), também apresentam

valores típicos de perdas globais em faixas de 12% a 16%, reforçando a adequação do percentual adotado.

Portanto, a utilização do modelo simplificado, com perdas fixadas em 14%, garante a confiabilidade dos resultados, preserva a comparabilidade entre diferentes cenários e mantém o foco no objetivo central deste trabalho: analisar a viabilidade econômica da utilização de *trackers* em sistemas fotovoltaicos com distintas escalas de potência. A Figura 10, mostra onde é definida as perdas do sistema fotovoltaico na ferramenta PV*SOL.

Figura 10 – Perdas do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5 Aspectos financeiros de uma Usina

3.5.1 CAPEX

O CAPEX, ou despesa de capital, corresponde ao investimento inicial necessário para a implantação de um sistema fotovoltaico, englobando todos os custos relacionados à aquisição, transporte, instalação e comissionamento do empreendimento. Em projetos de geração solar, o CAPEX é considerado o principal fator econômico a ser avaliado, uma vez que representa a maior parcela dos desembolsos financeiros do projeto, sendo determinante para a viabilidade econômico-financeira do mesmo ((EPE), 2022).

Para a determinação do CAPEX neste trabalho, adotou-se como referência os valores apresentados por (SISQUINI; SISQUINI; SISQUINI, 2024), apresentados na Tabela 2, no estudo os autores apresentam uma análise detalhada dos custos médios de implantação de usinas fotovoltaicas no Brasil, contemplando diferentes portes de sistemas, desde aplicações residenciais até grandes usinas solares.

Já os sistemas com *trackers* exigem componentes mecânicos adicionais e maior complexidade de instalação, o que impacta diretamente no seu custo inicial. Os *trackers* podem elevar o CAPEX não apenas pela estrutura móvel em si, mas também por re-

Porte da Usina (kWp)	Custo Médio (R\$/Wp)
Residencial (até 10 kWp)	5,50 - 7,50
Comercial (10 kWp a 500 kWp)	4,50 - 6,50
Industrial (acima de 500 kWp)	3,80 - 5,80
Grandes usinas (acima de 1 MWp)	3,50 - 5,50

Tabela 2 – Custo médio por watt-pico (Wp) instalado

quererem manutenção mais frequente, ocuparem mais área e demandarem cabeamentos e proteções especiais, fatores que não são necessários em sistemas fixos.

Com o objetivo de embasar a diferença de custos de investimento entre sistemas fotovoltaicos de estrutura fixa e sistemas com rastreamento solar, foi realizada uma revisão de trabalhos acadêmicos nacionais e internacionais que abordam comparações econômicas entre essas configurações para diferentes faixas de potência instalada. A Tabela 3 apresenta a relação de custo entre sistemas com *tracker* e sistemas fixos, obtida a partir de artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e publicações em periódicos técnicos. Observa-se que a razão de custo *tracker*/fixo varia conforme a potência do sistema, o escopo do estudo e as premissas adotadas por cada autor, apresentando valores típicos entre aproximadamente 1,15 e 1,80. Dessa forma, os dados consolidados permitem estimar um acréscimo percentual no CAPEX associado à utilização de rastreadores solares, servindo como base técnica e bibliográfica para a definição dos custos de investimento utilizados nas simulações e análises financeiras desenvolvidas neste trabalho.

3.5.2 OPEX

O OPEX (Operational Expenditure) refere-se aos custos operacionais recorrentes, incluindo manutenção, monitoramento, limpeza, seguros e eventuais falhas técnicas. Em sistemas fotovoltaicos com rastreadores solares (*trackers*), os custos de manutenção apresentam um incremento relevante em relação às estruturas fixas, devido à presença de componentes móveis como motores, sensores e sistemas de controle que requerem inspeções periódicas, lubrificação e eventuais reparos. Assim como no Caderno de Preços da Geração (2022/2023) (EPE, 2022) neste trabalho será utilizado OPEX de 1,5% para sistemas fixos e 2% para sistemas com (*trackers*). A Figura 11, mostra onde é definido CAPEX E OPEX do sistema fotovoltaico na ferramenta PV*SOL.

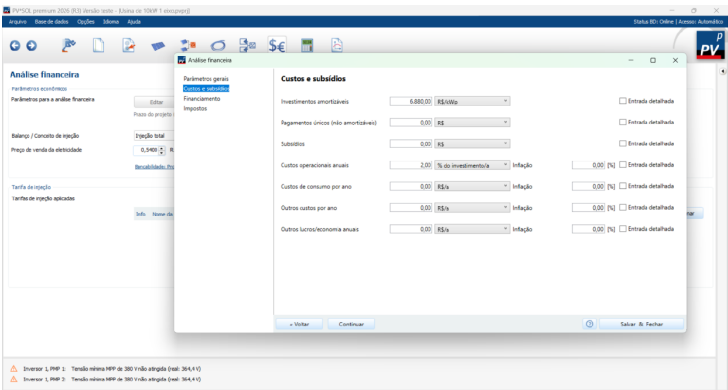
3.6 Estruturação dos Cenários

Nesta etapa, são apresentados os diferentes cenários de simulação desenvolvidos no software PV*SOL, contemplando variadas potências de sistemas fotovoltaicos e distintas configurações de instalação. Foram considerados arranjos com estrutura fixa, bem como sistemas equipados com rastreadores solares de um eixo, de modo a possibilitar uma

Potência do sistema (kW)	Potência do estudo (kW)	Custo relativo tracker/fixo	Média	Fonte
10	8,76	1,19	1,195	(Núcleo do Conhecimento, 2021)
10	3	1,20	1,195	(Revista FT, 2025)
50	75	1,50	1,345	(NÓBREGA et al., 2019)
50	75	1,19	1,345	(PINTO, 2025)
100	100	1,50	1,345	(NÓBREGA et al., 2019)
100	75	1,19	1,345	(PINTO, 2025)
300	300	1,80	1,485	(ARAÚJO et al., 2023)
300	300	1,17	1,485	(CASOTTO, 2021)
500	500	1,36	1,36	(PINTO, 2025)
800	781	1,18	1,19	(GOL; ŠČASNÝ, 2023)
800	800	1,20	1,19	(REGIA, 2022)
1000	1000	1,18	1,165	(PINTO, 2025)
1000	2000	1,15	1,165	(MARCELLO et al., 2022)

Tabela 3 – Relação de custo Fixo/*Tracker*

Figura 11 – Capex e Opex do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

análise comparativa tanto em termos de desempenho energético quanto de viabilidade econômica. Essa estruturação permite avaliar de forma consistente o impacto da escala de potência e da tecnologia empregada sobre os indicadores técnicos e financeiros do projeto.

3.6.1 Parâmetros Técnicos

Para a realização das simulações no software PV*SOL, foi necessário definir os parâmetros técnicos que caracterizam o sistema fotovoltaico em cada cenário analisado. Esses aspectos incluem a localização geográfica, o modelo de módulo utilizado, a inclinação e orientação dos painéis, a configuração dos rastreadores solares quando aplicáveis, os inversores selecionados e a representação gráfica do arranjo do sistema, garantindo consistência metodológica em todas as análises realizadas.

- Localização da Usina: As simulações foram realizadas para a cidade de Belo Horizonte – MG, situada na latitude 19,9°S, longitude 43,9°O. A escolha da localidade foi feita considerando sua alta incidência solar e relevância para estudos de viabilidade fotovoltaica.
- Módulo Fotovoltaico: Foi utilizado o módulo *Canadian Solar Inc.* – CS3Y-500MS, de 500 Wp. Esse modelo foi escolhido por sua ampla disponibilidade no mercado brasileiro e eficiência em torno de 21%.
- Inclinação e Orientação: Para os sistemas fixos, os módulos foram orientados para o norte geográfico (0°) e com inclinação de 20°, conforme recomendações do CRESESB para Belo Horizonte.
- Sistemas com Rastreadores (*trackers*): Nos cenários em que foram utilizados *trackers*, a angulação de movimento considerada foi de -60° a +60°, contemplando o rastreamento solar ao longo do dia.
- Adotou-se o modelo simplificado de perdas com percentual global fixo de 14% aplicado a todos os cenários, assegurando padronização metodológica.

3.6.2 Parâmetros Financeiros

Para garantir a consistência e a comparabilidade entre os cenários analisados, adotou-se como premissa que o custo operacional e de manutenção OPEX, o custo da energia elétrica e a vida útil dos sistemas serão mantidos iguais para todas as configurações, variando apenas em função das respectivas potências instaladas. Dessa forma, as diferenças observadas nos resultados financeiros refletem exclusivamente o impacto da adoção de estruturas fixas ou com rastreador solar.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros financeiros empregados como dados de entrada nas simulações realizadas durante os testes.

Na sequência, a Tabela 5 apresentam os custos de investimento inicial CAPEX referentes a cada sistema fotovoltaico analisado, contemplando as configurações de estrutura fixa e com rastreador solar. Esses custos englobam os principais componentes do sistema, como módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas de suporte, equipamentos elétricos,

Tipo de Sistema	OPEX	Custo de Energia	Vida Útil
Fixo	1,5%	0,54	25 anos
Tracker	2,0%	0,54	25 anos

Tabela 4 – Parâmetros Financeiros

instalação e demais despesas associadas à implantação. A apresentação do CAPEX por configuração e por potência instalada permite uma comparação direta entre os sistemas, evidenciando o impacto econômico da adoção de estruturas fixas ou com rastreamento solar no investimento inicial do empreendimento.

Potência do Sistema (kW)	Tipo de Sistema	CAPEX (R\$)
10	Fixo	55.000,00
10	Tracker	66.000,00
50	Fixo	255.000,00
50	Tracker	318.750,00
100	Fixo	480.000,00
100	Tracker	600.000,00
300	Fixo	1.350.000,00
300	Tracker	1.687.000,00
500	Fixo	2.100.000,00
500	Tracker	2.520.000,00
800	Fixo	3.120.000,00
800	Tracker	3.740.000,00
1000	Fixo	3.500.000,00
1000	Tracker	4.200.000,00

Tabela 5 – CAPEX das Usinas

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no capítulo anterior, considerando sistemas fotovoltaicos de diferentes portes e suas configurações distintas: sistemas fixos e sistemas com rastreamento solar de um eixo. As análises contemplam potências de 10 kW, 50 kW, 100 kW, 300 kW, 500 kW, 800 kW e 1MW, permitindo avaliar o desempenho técnico e econômico em diferentes escalas de projeto. Para cada cenário, foram observados parâmetros como a geração anual de energia, o investimento inicial CAPEX, os custos operacionais OPEX, o TIR, o Tempo de Retorno do Investimento (*Payback*). Após a apresentação dos resultados, são realizadas análises comparativas com o objetivo de identificar em quais faixas de potência a adoção do rastreamento solar se torna mais vantajosa em relação ao sistema fixo, fornecendo subsídios técnicos e financeiros para a tomada de decisão em projetos de usinas fotovoltaicas.

4.1 Usina de 10kW

4.1.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 10kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 6 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	14.523	1.376, 15	67, 60%
<i>Tracker</i>	17.746	1.698, 48	69, 73%

Tabela 6 – Resultados técnicos das Usinas de 10kW

Nas usinas de 10 kW, observa-se que a utilização de *tracker* proporciona um aumento significativo na produção de energia anual, passando de 14.523 kWh no sistema fixo para 17.746 kWh no sistema rastreador. Esse incremento representa aproximadamente 22% a mais de geração. O rendimento específico também acompanha essa evolução, variando de 1.376 kWh/kWp no fixo para 1.698 kWh/kWp no *tracker*. Em termos de eficiência global do sistema, a diferença é modesta, mas perceptível: o fixo apresenta 67,6%, enquanto o *tracker* alcança 69,7%.

4.1.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 10kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 7 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,2198	7 anos, 10 meses	11,91	14,26
<i>Tracker</i>	0,2331	8 anos	11,94	14,52

Tabela 7 – Resultados Financeiros das Usinas de 10kW

Nas usinas de 10 kW, o sistema de estrutura fixa apresenta um menor *payback*, de aproximadamente 7 anos e 10 meses, enquanto o sistema com *tracker* atinge o retorno em cerca de 8 anos, indicando uma recuperação do investimento mais rápida para a configuração fixa. Em termos de custo de geração de energia, o sistema fixo também se mostra mais vantajoso, com valor médio de R\$ 0,2198/kWh, frente a R\$0,2331/kWh no sistema com *tracker*.

Por outro lado, os indicadores de rentabilidade apresentam valores próximos entre as duas configurações. O sistema fixo registra uma TIR de 11,91% e ROI de 14,26%, enquanto o sistema com *tracker* alcança uma TIR ligeiramente superior, de 11,94%, e ROI de 14,52%. Apesar dessa pequena vantagem do *tracker* nos indicadores de retorno percentual, o maior custo de geração e o *payback* mais longo fazem com que, para a escala de 10 kW, o sistema fixo permaneça como a alternativa economicamente mais atrativa.

4.2 Usina de 50kW

4.2.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 50kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 8 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	72.251	1.430,18	70,25
Tracker	88.295	1.751,08	71,89

Tabela 8 – Resultados técnicos das Usinas de 50kW

Nos SFCR de 50 kW, a diferença técnica mantém-se proporcional. O sistema fixo injeta cerca de 72.251 kWh/ano, ao passo que o *tracker* atinge 88.295 kWh/ano, representando também um ganho de aproximadamente 22%. O rendimento específico sobe de 1.430 kWh/kWp para 1.751 kWh/kWp, evidenciando melhor aproveitamento do recurso

solar. Já a eficiência, embora próxima, é ligeiramente superior no *tracker* (71,9%) em comparação ao fixo (70,3%).

4.2.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 50kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 9 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1961	7 anos, 3 meses	13,07	15,30
Tracker	0,234	8 anos, 4 meses	11,00	13,95

Tabela 9 – Resultados Financeiros das Usinas de 50kW

Nas usinas de 50 kW, o sistema de estrutura fixa apresenta desempenho econômico superior em relação ao sistema com *tracker*. O *payback* do sistema fixo é de aproximadamente 7 anos e 3 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno mais longo, de cerca de 8 anos e 4 meses. O custo de geração de energia também é significativamente menor no sistema fixo, com valor médio de R\$ 0,1961/kWh, frente a R\$ 0,234/kWh no sistema com *tracker*.

No que se refere aos indicadores de rentabilidade, o sistema fixo apresenta TIR de 13,07% e ROI de 15,30%, ambos superiores aos obtidos pelo sistema com *tracker*, que registra TIR de 11,00% e ROI de 13,95%. Dessa forma, para a escala de 50 kW, os resultados indicam que o sistema de estrutura fixa é economicamente mais atrativo, apresentando menor custo de geração, retorno do investimento mais rápido e melhores indicadores financeiros globais.

4.3 Usina de 100kW

4.3.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 100kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 10 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	144.501	1.430,18	70,30
<i>Tracker</i>	176.590	1.751,08	71,89

Tabela 10 – Resultados técnicos das Usinas de 100kW

Para as usinas 100 kW, o cenário se repete: o sistema fixo gera 144.501 kWh/ano, enquanto o *tracker* alcança 176.590 kWh/ano, mantendo a tendência de 22% de ganho.

O rendimento específico passa de 1.430 para 1.751 kWh/kWp, e a eficiência do sistema se mantém superior no rastreador (71,89% contra 70,3%).

4.3.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 100kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 11 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1846	6 anos, 9 meses	14,13	16,26
<i>Tracker</i>	0,22	7 anos, 10 meses	11,99	14,83

Tabela 11 – Resultados Financeiros das Usinas de 100kW

Nas usinas de 100 kW, o sistema de estrutura fixa mantém desempenho econômico superior quando comparado ao sistema com *tracker*. O *payback* do sistema fixo é de aproximadamente 6 anos e 9 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno mais longo, de cerca de 7 anos e 10 meses. O custo de geração de energia do sistema fixo também é inferior, com valor médio de R\$ 0,1846/kWh, frente a R\$ 0,22/kWh no sistema com *tracker*.

Em relação aos indicadores de rentabilidade, o sistema fixo apresenta TIR de 14,13% e ROI de 16,26%, valores superiores aos observados no sistema com *tracker*, que registra TIR de 11,99% e ROI de 14,83%. Dessa forma, para a escala de 100 kW, os resultados indicam que a configuração com estrutura fixa é economicamente mais atrativa, combinando menor custo de geração, retorno mais rápido do investimento e melhores indicadores financeiros.

4.4 Usina de 300kW

4.4.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 300kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 12 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	457.813	1.525,68	74,90
<i>Tracker</i>	557.047	1.856,46	76,20

Tabela 12 – Resultados técnicos das Usinas de 300kW

Nas usinas de 300 kW, a produção sobe de 457.813 kWh/ano no fixo para 557.047 kWh/ano no *tracker*. O ganho percentual em relação à geração é de aproximadamente 22%,

mas aqui a melhoria no rendimento específico é ainda mais destacada: 1.525 kWh/kWp no fixo contra 1.856 kWh/kWp no *tracker*. Além disso, a eficiência do sistema aumenta, passando de 74,9% para 76,2%.

4.4.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 300kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 13 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1622	5 anos, 11 meses	18,31	18,31
<i>Tracker</i>	0,2133	7 anos, 8 meses	12,24	15,06

Tabela 13 – Resultados Financeiros das Usinas de 300kW

Nas usinas de 300 kW, o sistema de estrutura fixa apresenta vantagem econômica significativa em relação ao sistema com *tracker*. O *payback* do sistema fixo é de aproximadamente 5 anos e 11 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno mais prolongado, de cerca de 7 anos e 8 meses. O custo de geração de energia também se mostra inferior no sistema fixo, com valor médio de R\$ 0,1622/kWh, frente a R\$ 0,2133/kWh no sistema com *tracker*.

Quanto aos indicadores de rentabilidade, o sistema fixo registra TIR de 18,31% e ROI de 18,31%, ambos substancialmente superiores aos obtidos pelo sistema com *tracker*, que apresenta TIR de 12,24% e ROI de 15,06%. Assim, para a escala de 300 kW, os resultados indicam de forma clara que o sistema de estrutura fixa é economicamente mais atrativo, apresentando menor custo de geração, retorno do investimento mais rápido e melhores indicadores financeiros globais.

4.5 Usina de 500kW

4.5.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 500kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 14 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	769.662	1.539,20	75,60
<i>Tracker</i>	935.237	1.870,36	76,80

Tabela 14 – Resultados técnicos das Usinas de 500kW

Nas usinas de 500 kW, observa-se que o sistema fixo atinge 769.662 kWh/ano, enquanto o *tracker* chega a 935.237 kWh/ano, consolidando um incremento de 22%. O rendimento também cresce de 1.539 kWh/kWp para 1.870 kWh/kWp, com melhoria na eficiência, que passa de 75,6% para 76,8%.

4.5.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 500kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 15 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1637	5 anos, 7 meses	17,37	19,79
<i>Tracker</i>	0,1832	6 anos, 4 meses	15,14	17,68

Tabela 15 – Resultados Financeiros das Usinas de 500kW

Nas usinas de 500 kW, o sistema de estrutura fixa mantém desempenho econômico superior em relação ao sistema com *tracker*. O *payback* do sistema fixo é de aproximadamente 5 anos e 7 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno mais longo, de cerca de 6 anos e 4 meses. O custo de geração de energia do sistema fixo também é inferior, com valor médio de R\$ 0,1637/kWh, frente a R\$ 0,1832/kWh no sistema com *tracker*.

No que se refere aos indicadores de rentabilidade, o sistema fixo apresenta TIR de 17,37% e ROI de 19,79%, ambos superiores aos obtidos pelo sistema com *tracker*, que registra TIR de 15,14% e ROI de 17,68%. Dessa forma, para a escala de 500 kW, os resultados indicam que o sistema de estrutura fixa é economicamente mais atrativo, apresentando menor custo de geração, retorno mais rápido do investimento e melhores indicadores financeiros globais.

4.6 Usina de 800kW

4.6.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 800kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 16 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	1.202.618	1.538,66	73,84
<i>Tracker</i>	1.498.156	1.872,61	76,88

Tabela 16 – Resultados técnicos das Usinas de 800kW

Nas usinas de 800 kW, a diferença é ainda mais expressiva: o sistema fixo gera 1.202.618 kWh/ano, enquanto o *tracker*) atinge 1.498.156 kWh/ano, o que corresponde a cerca de 25% de aumento na produção. O rendimento específico cresce de 1.538 kWh/kWp para 1.872 kWh/kWp, acompanhado de uma elevação na eficiência global (73,84% no fixo contra 76,88% no *tracker*).

4.6.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 800kW de eixo fixo e móvel. A Tabela 17 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1427	5 anos, 2 meses	18,97	20,81
<i>Tracker</i>	0,1487	5 anos, 1 mês	19,47	21,79

Tabela 17 – Resultados Financeiros das Usinas de 800kW

Nas usinas de 800 kW, observa-se uma maior proximidade entre os resultados econômicos das duas configurações analisadas. O *payback* do sistema de estrutura fixa é de aproximadamente 5 anos e 2 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno ligeiramente mais rápido, de cerca de 5 anos e 1 mês. Em relação ao custo de geração de energia, o sistema fixo ainda apresenta vantagem, com valor médio de R\$ 0,1427/kWh, frente a R\$ 0,1487/kWh no sistema com *tracker*.

No entanto, ao analisar os indicadores de rentabilidade, o sistema com *tracker* passa a apresentar resultados superiores, registrando TIR de 19,47% e ROI de 21,79%, enquanto o sistema fixo apresenta TIR de 18,97% e ROI de 20,81%. Dessa forma, para a escala de 800 kW, os resultados indicam um cenário de equilíbrio econômico entre as configurações, no qual o sistema fixo mantém menor custo de geração, enquanto o uso de *tracker* proporciona maior rentabilidade percentual, sinalizando uma transição na viabilidade econômica do rastreamento solar em potências mais elevadas.

4.7 Usina de 1MW

4.7.1 Resultados técnicos

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados técnicos obtidos através da simulação das usinas de 1MW de eixo fixo e móvel. A Tabela 18 mostra os resultados da simulação:

Nas usinas de 1MW, a produção do sistema fixo alcança 1.538.740 kWh/ano, enquanto o *tracker* chega a 1.872.695 kWh/ano, representando novamente um ganho de

Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
Fixo	1.538.740	1.538,66	75,60
<i>Tracker</i>	1.872.695	1.872,61	76,90

Tabela 18 – Resultados técnicos das Usinas de 1MW

22%. O rendimento específico cresce de 1.538 para 1.872 kWh/kWp, com a eficiência global também sendo superior no rastreador (76,9% contra 75,6% no fixo).

4.7.2 Resultados Financeiros

Nesta seção será feita um resumo com os principais resultados financeiros obtidos através da simulação das usinas de 1MW de eixo fixo e móvel. A Tabela 19 mostra os resultados da simulação:

Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
Fixo	0,1251	4 anos, 6 meses	21,99	23,74
<i>Tracker</i>	0,13	4 anos, 4 meses	22,67	24,91

Tabela 19 – Resultados Financeiros das Usinas de 1MW

Nas usinas de 1 MW, o sistema com estrutura fixa e o sistema com *tracker* apresentam desempenho econômico bastante próximo, com leve vantagem para a configuração com rastreamento solar em alguns indicadores. O *payback* do sistema fixo é de aproximadamente 4 anos e 6 meses, enquanto o sistema com *tracker* apresenta um retorno ligeiramente mais rápido, de cerca de 4 anos e 4 meses. Quanto ao custo de geração de energia, o sistema fixo mantém valor inferior, com média de R0,1251/kWh, frente a R0,13/kWh no sistema com *tracker*.

Em relação aos indicadores de rentabilidade, o sistema com *tracker* apresenta TIR de 22,67% e ROI de 24,91%, superiores aos valores obtidos pelo sistema fixo, que registra TIR de 21,99% e ROI de 23,74%. Dessa forma, para a escala de 1 MW, os resultados indicam que, apesar do ligeiro aumento no custo de geração, o uso de *trackers* se torna economicamente mais atrativo, proporcionando maior retorno financeiro e menor tempo de recuperação do investimento.

4.7.3 Resumo dos Resultados

4.7.3.1 Resumo Técnico das Usinas

Com o intuito de facilitar a visualização e a consulta dos principais resultados técnicos obtidos nas simulações, a Tabela 20 apresenta um resumo dos parâmetros energéticos das usinas fotovoltaicas analisadas. Os dados estão organizados de forma a permitir uma comparação direta entre as diferentes potências instaladas e as configurações de sistema

consideradas, reunindo informações referentes à energia anual gerada, rendimento específico e eficiência dos sistemas. Dessa forma, a Tabela 20 atua como um instrumento de apoio às análises técnicas já realizadas e às discussões que serão aprofundadas nas seções subsequentes deste capítulo.

Potência	Sistema	Energia anual [kWh]	Rendimento[kWh/kWp]	Eficiência[%]
10 kW	Fixo	14.523	1.376,15	67,60%
10 kW	<i>Tracker</i>	17.746	1.698,48	69,70%
50 kW	Fixo	72.251	1.430,18	70,25%
50 kW	<i>Tracker</i>	88.295	1.751,08	71,89%
100 kW	Fixo	144.501	1.430,18	70,25%
100 kW	<i>Tracker</i>	176.590	1.751,08	71,89%
300 kW	Fixo	457.813	1.525,68	74,90%
300 kW	<i>Tracker</i>	557.047	1.856,46	76,20%
500 kW	Fixo	769.662	1.539,20	75,61%
500 kW	<i>Tracker</i>	935.237	1.870,36	76,80%
800 kW	Fixo	1.202.618	1.538,66	73,84%
800 kW	<i>Tracker</i>	1.498.156	1.872,61	76,88%
1 MW	Fixo	1.538.740	1.538,66	75,58%
1 MW	<i>Tracker</i>	1.872.695	1.872,61	76,90%

Tabela 20 – Resultados técnicos das Usinas

4.7.3.2 Resumo Financeiro das Usinas

De maneira complementar, a Tabela 21 consolida os principais indicadores financeiros associados às usinas fotovoltaicas estudadas, com o objetivo de proporcionar uma visão geral e organizada dos resultados econômicos obtidos. A apresentação sintetizada dos custos, do tempo de retorno do investimento e dos indicadores de rentabilidade possibilita uma consulta mais ágil e eficiente aos dados, servindo como base para as análises comparativas e para a discussão dos resultados financeiros que serão desenvolvidas posteriormente. Assim a Tabela 21 contribui para a clareza e a sistematização das informações econômicas do estudo.

4.8 Análise geral

Nesta seção são apresentados os principais resultados consolidados do estudo, abordando tanto os aspectos técnicos quanto os financeiros dos sistemas fotovoltaicos avaliados. A análise técnica contempla indicadores como a energia anual gerada, o rendimento específico e a eficiência global, discutindo o comportamento desses parâmetros em função da potência instalada e do tipo de tecnologia adotada (sistema fixo ou com rastreamento). Já a análise financeira foca em métricas como custo nivelado de geração (R\$/kWh), *payback*,

Potência	Sistema	Custo de geração[R\$/kWh]	<i>PayBack</i> [anos]	TIR[%]	ROI[%]
10 kW	Fixo	0,2198	7 anos, 10 meses	11,91	14,26
10 kW	<i>Tracker</i>	0,2331	8 anos	11,64	14,52
50 kW	Fixo	0,1961	7 anos, 3 meses	13,07	15,30
50 kW	<i>Tracker</i>	0,2340	8 anos, 4 meses	11,00	13,95
100 kW	Fixo	0,1846	6 anos, 9 meses	14,13	16,26
100 kW	<i>Tracker</i>	0,2200	7 anos, 10 meses	11,99	14,83
300 kW	Fixo	0,1622	5 anos, 11 meses	16,34	18,31
300 kW	<i>Tracker</i>	0,2133	7 anos, 8 meses	12,24	15,06
500 kW	Fixo	0,1637	5 anos, 7 meses	17,37	19,79
500 kW	<i>Tracker</i>	0,1832	6 anos, 4 meses	15,14	17,68
800 kW	Fixo	0,1427	5 anos, 2 meses	18,97	20,81
800 kW	<i>Tracker</i>	0,1487	5 anos, 1 mês	19,47	21,79
1 MW	Fixo	0,1251	4 anos, 6 meses	21,99	23,74
1 MW	<i>Tracker</i>	0,1300	4 anos, 4 meses	24,91	24,08

Tabela 21 – Resultados Financeiros das Usinas

taxa interna de retorno (TIR) e retorno sobre o investimento (ROI), permitindo verificar a viabilidade econômica e comparar o desempenho entre as diferentes configurações estudadas. Dessa forma, busca-se oferecer uma visão integrada que relacione ganhos de desempenho energético com os impactos nos custos de implantação e retorno financeiro, apontando em que situações a utilização de *trackers* passa a ser mais vantajosa.

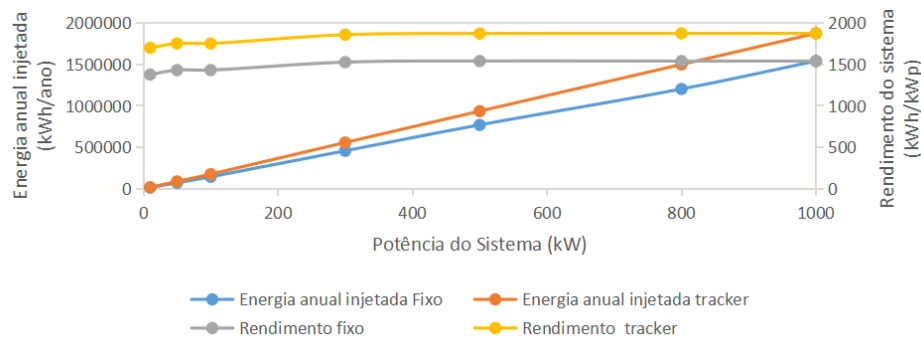
4.8.1 Aspectos técnicos

A análise da energia anual gerada evidencia que os sistemas com rastreamento de um eixo apresentam desempenho superior em comparação aos sistemas fixos em todas as potências avaliadas. Esse comportamento se deve à maior captação da radiação solar proporcionada pelo movimento do *tracker*, que acompanha o deslocamento aparente do sol ao longo do dia.

Quando se observa o rendimento específico (kWh/kWp), a mesma tendência é confirmada: o sistema com *tracker* demonstra maior aproveitamento energético por unidade de potência instalada. Esse comportamento está diretamente associado à redução das perdas angulares, uma vez que o seguidor solar mantém os módulos mais próximos da inclinação ideal durante o dia. Em contrapartida, no sistema fixo, a limitação do ângulo de inclinação reduz o aproveitamento da radiação em horários de baixa incidência solar. A Figura 12 nos mostra na relação entre as tres grandezas mencionadas.

O gráfico, mostrado na Figura 13, exibe o ganho percentual de geração em função da potência instalada evidencia que o uso de sistemas com rastreamento solar proporciona um incremento técnico relativamente constante na geração de energia ao longo das diferentes faixas de potência analisadas. Observam-se variações pontuais no comportamento do ganho percentual, as quais podem ser atribuídas às características do modelo de simu-

Figura 12 – Energia anual gerada x Potencia x Rendimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

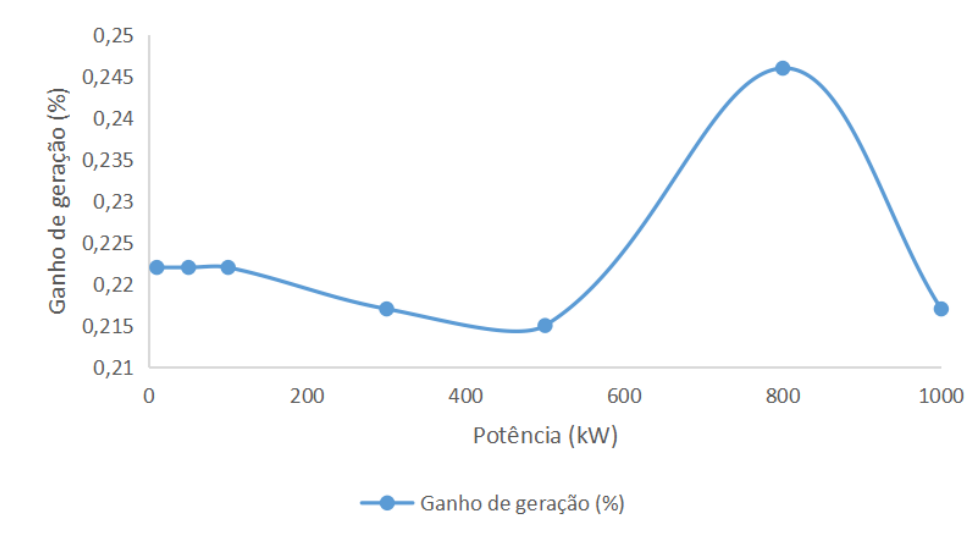
lação e às configurações elétricas adotadas, não indicando, entretanto, uma tendência de crescimento contínuo do rendimento específico com o aumento da potência instalada.

Esse comportamento reforça que o rastreamento solar não deve ser interpretado como uma tecnologia cujo benefício técnico cresce proporcionalmente com a escala do sistema, mas sim como uma solução que amplia a captação de energia ao longo do dia, resultando em um ganho energético absoluto mais significativo em sistemas de maior porte. Dessa forma, embora o ganho percentual de geração se mantenha relativamente estável, o impacto desse incremento torna-se mais relevante à medida que a potência instalada aumenta.

Nesse contexto, a análise puramente técnica mostra-se insuficiente para determinar a viabilidade do uso de *trackers*, tornando necessária a avaliação dos reflexos econômicos associados a esse ganho energético. Assim, na sequência, são analisados os aspectos financeiros dos sistemas estudados, visando identificar em que condições o aumento de geração proporcionado pelo rastreamento solar se traduz em vantagens econômicas efetivas.

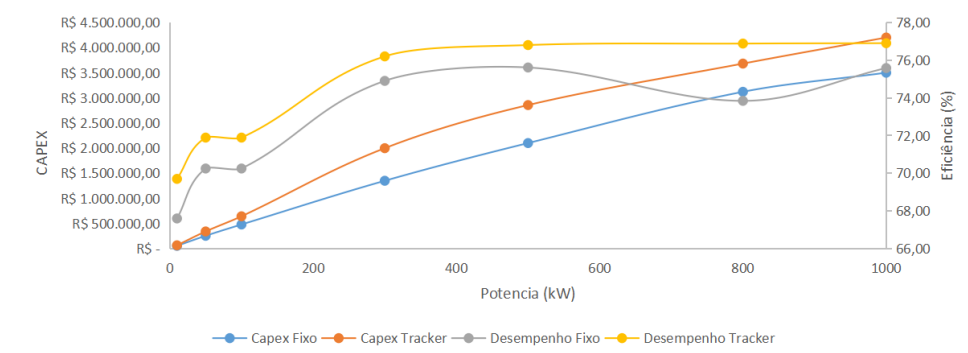
No que se refere à eficiência global do sistema, observa-se também vantagem para os projetos com rastreamento. Isso se deve ao fato de que, além da maior captura de energia, o *tracker* contribui para minimizar sombreamentos e melhorar o fator de utilização dos módulos. Contudo, é importante destacar que esse ganho de eficiência não ocorre de forma isolada, pois está diretamente associado a um aumento no custo de capital (CAPEX). Em outras palavras, a maior produção de energia proporcionada pelo rastreamento só é viável mediante um investimento inicial mais elevado, decorrente da necessidade de estruturas móveis, sistemas de acionamento, componentes adicionais e maior demanda de manutenção preventiva. Para ilustrar essa relação entre desempenho e investimento, a Figura 14 apresenta a comparação entre o CAPEX e a eficiência global dos sistemas fixos e com rastreamento ao longo das diferentes potências analisadas, evidenciando o *trade-off* existente entre maior rendimento energético e maior custo de implantação.

Figura 13 – Ganho de geração x Potencia



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 14 – CAPEX x Eficiência do Sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

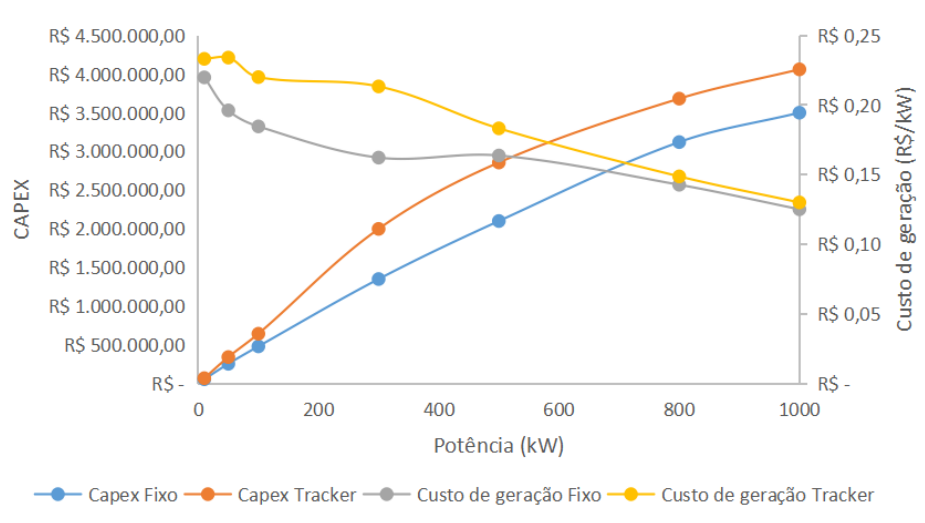
4.8.2 Aspectos Financeiros

No âmbito econômico, os resultados mostram que o custo de geração (R\$/kWh) é diretamente influenciado pelo investimento inicial. Apesar de gerar mais energia, o sistema com rastreamento possui um custo de implantação mais elevado, o que tende a aumentar o custo nivelado de energia em sistemas de menor porte.

O comportamento ilustrado no Gráfico na Figura 15 evidencia a relação entre o investimento inicial e o custo de geração de energia para sistemas fotovoltaicos fixos e com rastreamento solar. Observa-se que o CAPEX dos sistemas com *tracker* apresenta crescimento mais acentuado em comparação aos sistemas fixos, refletindo os custos adicionais associados à aquisição, instalação e integração dos mecanismos de rastreamento.

Ao analisar o custo de geração de energia, verifica-se que, embora os sistemas com rastreamento apresentem uma redução progressiva desse indicador à medida que a po-

Figura 15 – CAPEX x Custo de Geração de Energia



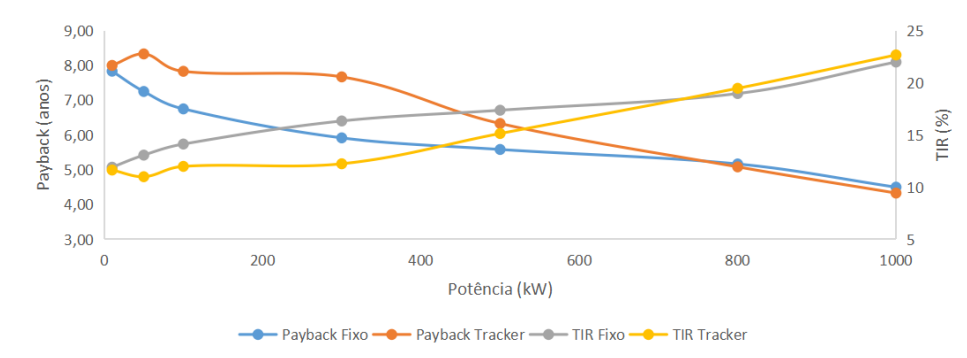
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

tência instalada aumenta, o custo de geração permanece superior ao dos sistemas fixos na faixa de potência considerada neste estudo. Isso indica que, nas condições avaliadas, o ganho energético proporcionado pelo *tracker* não foi suficiente para compensar integralmente o maior investimento inicial.

Ainda assim, a tendência de aproximação entre as curvas sugere que, em potências instaladas superiores às analisadas ou sob diferentes condições de custo e operação, pode ocorrer o cruzamento entre os custos de geração dos sistemas fixos e rastreados. Tal comportamento reforça o caráter dependente de escala da viabilidade dos sistemas com rastreamento solar, especialmente em projetos de maior porte.

Já o Gráfico apresentado na Figura 16 ilustra de forma integrada a evolução do *payback* e da Taxa Interna de Retorno (TIR) em função da potência instalada, comparando sistemas fotovoltaicos de estrutura fixa e com rastreamento solar. Inicialmente, observa-se que, em sistemas de menor porte (10 a 100 kW), os sistemas fixos apresentam melhor desempenho financeiro. Nessa faixa, o *payback* dos sistemas fixos é sistematicamente inferior ao dos sistemas com *tracker*, enquanto a TIR também se mostra superior, indicando que o aumento do CAPEX associado ao rastreamento ainda não é compensado pelo ganho adicional de geração.

À medida que a potência instalada aumenta, nota-se uma redução progressiva do *payback* em ambas as configurações, porém com comportamento mais acentuado nos sistemas com rastreamento. Na faixa intermediária (300 a 500 kW), embora o sistema fixo ainda apresente menor tempo de retorno, a diferença entre as duas soluções diminui significativamente. Paralelamente, a TIR dos sistemas com *tracker* cresce de forma consistente, aproximando-se dos valores observados nos sistemas fixos, evidenciando um cenário de transição na viabilidade econômica.

Figura 16 – *Payback* x TIR

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

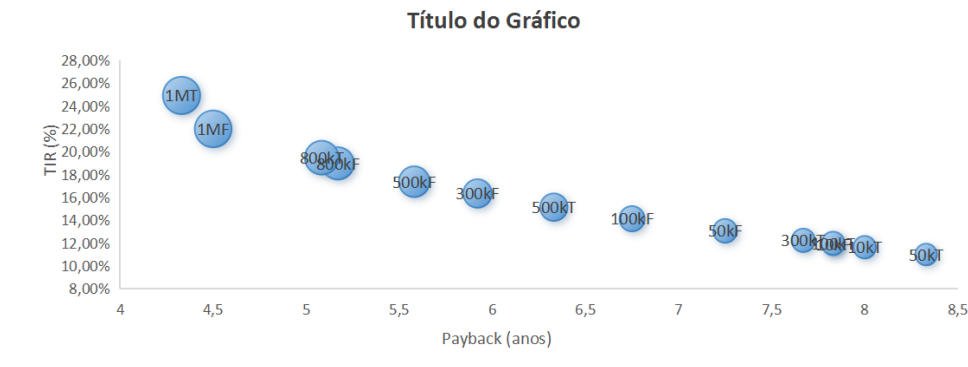
Em sistemas de maior porte, a partir de aproximadamente 800 kW, ocorre o cruzamento das curvas de *payback* e de TIR. Nessa faixa, os sistemas com rastreamento passam a apresentar *payback* inferior ao dos sistemas fixos, além de TIR superior, demonstrando que o investimento adicional requerido pelos *trackers* é compensado pela maior eficiência energética e pelo aumento da geração anual. Esse comportamento caracteriza uma mudança clara na atratividade financeira, consolidando o rastreamento como a alternativa economicamente mais vantajosa em empreendimentos de maior escala.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a viabilidade do uso de *trackers* está diretamente associada à potência instalada do sistema. Enquanto em projetos de pequeno porte a solução fixa se mostra mais racional sob o ponto de vista financeiro, em usinas de médio a grande porte o rastreamento solar passa a oferecer melhores indicadores econômicos, reforçando a importância da análise conjunta dos aspectos técnicos e financeiros, conforme discutido nas seções seguintes.

A Figura 17 apresenta o gráfico de bolhas, que integra em uma única visualização três indicadores financeiros fundamentais para a avaliação dos sistemas fotovoltaicos: o *payback*, representado no eixo horizontal, o TIR, no eixo vertical, e o ROI, indicado pelo tamanho das bolhas. Essa abordagem permite comparar, de forma direta, o desempenho econômico de sistemas fixos e com rastreamento ao longo das diferentes faixas de potência analisadas.

Observa-se que, nas potências menores, entre 10 kW e 300 kW, os sistemas de estrutura fixa apresentam maior atratividade financeira. Nessa faixa, o *payback* dos sistemas fixos é sistematicamente menor, enquanto a TIR e o ROI também se mantêm superiores aos dos sistemas com *tracker*. Esse comportamento indica que, em projetos de pequeno porte, o aumento de geração proporcionado pelo rastreamento ainda não é suficiente para compensar o maior investimento inicial associado à tecnologia, tornando o sistema fixo a alternativa economicamente mais racional.

À medida que a potência instalada aumenta, especialmente na faixa intermediária

Figura 17 – *Payback* x TIR x ROI

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

(300 a 500 kW), percebe-se uma redução progressiva da diferença entre os dois arranjos. Embora o sistema fixo ainda apresente ligeira vantagem em termos de *payback* e TIR, os indicadores do *tracker* se aproximam de forma significativa, evidenciando um cenário de transição. Nessa etapa, a escolha entre as configurações passa a depender mais do perfil do investidor e da estratégia adotada, já que o rastreamento começa a se mostrar tecnicamente competitivo, ainda que não plenamente dominante do ponto de vista financeiro.

Nas potências mais elevadas, especialmente a partir de 800 kW, ocorre o cruzamento claro das curvas financeiras, indicando uma mudança no cenário de viabilidade. O sistema com *tracker* passa a apresentar *payback* menor, além de TIR e ROI superiores aos do sistema fixo. Esse comportamento demonstra que, em usinas de maior porte, o custo adicional do rastreamento é diluído pelo ganho expressivo de geração de energia, resultando em maior rentabilidade e retorno mais rápido do capital investido.

Dessa forma, o gráfico evidencia que a atratividade do rastreamento solar está fortemente associada à escala do empreendimento. Enquanto sistemas de pequeno porte favorecem soluções fixas, projetos de médio porte representam uma zona de equilíbrio entre as tecnologias, e usinas de grande porte consolidam o *tracker* como a opção economicamente mais vantajosa, reforçando sua relevância estratégica para empreendimentos com maior potência instalada.

4.9 Conclusões Parciais

De maneira geral, os resultados mostraram que os sistemas com rastreamento solar sempre apresentam melhor desempenho técnico, com maior geração de energia, rendimento específico e eficiência global em todas as potências analisadas. Porém, do ponto de vista financeiro, o comportamento é diferente: nas potências menores (até 300 kW), os sistemas fixos se mostraram mais vantajosos, com menor custo de geração, *payback* mais curto e melhores índices de TIR e ROI. A partir de 500 kW, o cenário muda, e

os trackers começam a apresentar resultados equivalentes, consolidando-se como a opção mais atrativa nas potências maiores (800 kW e 1 MW), onde o ganho energético compensa plenamente o investimento adicional.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e financeira da utilização de sistemas fotovoltaicos fixos e com rastreamento solar de um eixo em diferentes portes de usinas, variando de 10 kW até 1 MW. Para isso, foram realizadas simulações no software PV*SOL, ferramenta amplamente utilizada no setor fotovoltaico, o que confere confiabilidade e consistência aos resultados obtidos.

As análises mostraram que os sistemas com rastreamento apresentam maior geração de energia em todas as potências estudadas, com ganhos médios de 20 a 25% em relação aos sistemas fixos. Contudo, o ponto-chave está na viabilidade econômica. Em sistemas de menor porte (até 300 kW), os fixos se mostraram mais atrativos financeiramente, já que possuem menor custo de geração, *payback* mais curto e melhores indicadores de TIR e ROI.

A partir da faixa de 500 kW, os resultados passam a indicar equilíbrio entre as duas configurações, e em potências acima de 800 kW o uso de *trackers* se torna claramente mais vantajoso, apresentando menor tempo de retorno e índices financeiros superiores, além de manter o ganho técnico de produção de energia.

Dessa forma, conclui-se que a adoção de rastreadores solares de um eixo é recomendada principalmente para usinas de grande porte (maior que 800 kW), onde o investimento adicional é compensado pelo aumento de geração e pelo melhor desempenho financeiro. Já para projetos menores, a configuração fixa ainda permanece como a opção mais eficiente em termos de custo-benefício.

TIR, VPL e *Payback*,

Referências

- ABSOLAR. *Infográfico ABSOLAR: Mercado Brasileiro de Energia Solar Fotovoltaica*. 2024. <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Acesso em: 23 fev. 2026. 13, 14
- (ABSOLAR), A. B. de E. S. F. Infográfico do mercado fotovoltaico no brasil. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. 16
- AGOSTINHO, C. W. Orientação automática de módulos fotovoltaicos para o acompanhamento do movimento sazonal do sol utilizando controle inteligente. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023. 19
- ANEEL, A. *IE9 for Windows Phone 7: Adobe Flash, demos and development*. Disponível em: <<https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:agencia.nacional.energia.eletrica:resolucao.homologatoria:2020-11-19;2798>>. 12
- ARAÚJO, G. C. d. et al. Avaliação do desempenho e da viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica com rastreador solar em condições de campo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2023. 35
- BARBOZA, L. E. A. Tecnologias e classificação de rastreadores solares: uma revisão técnica. *RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.51473/rcmos.v1i2.2025.1790>>. 21
- BLANK, L.; TARQUIN, A. *Engenharia econômica*. [S.l.]: AMGH Editora, 2009. 24
- BRITO, M. A. D. et al. Research on photovoltaics: review, trends and perspectives. In: IEEE. *XI Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.], 2011. p. 531–537. 24
- BRON, L. G. Balian, jose eduardo amato. *Análise de Investimentos e*, 2007. 23
- BUDEL, D. A. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos em residências. Universidade Federal de Santa Maria, 2017. 23
- CAMLOFFSKI, R. *Análise de investimentos e viabilidade financeira das empresas*. [S.l.]: Editora Atlas SA, 2014. 23, 24, 25
- CASOTTO, E. P. Avaliação técnico-econômica da aplicabilidade de rastreadores solares de eixo único em projeto de eficiência energética para a região de vitória/es. Vitória, 2021. 35
- CASTRO, F. et al. La construcción científica del conocimiento de los estudiantes a partir de las gráficas con tracker. *Revista Universidad y Sociedad*, Editorial "Universo Sur", v. 13, n. 1, p. 83–88, 2021. 17
- CEPEL; CRESESB. *SunData – Base de Dados de Radiação Solar*. 2025. <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Acesso em: 23 fev. 2026. 12

- CHANG, T. P. Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system. *Applied energy*, Elsevier, v. 86, n. 10, p. 2071–2078, 2009. 21
- DENHOLM, P. et al. The challenges of achieving a 100% renewable electricity system in the united states. *Joule*, Elsevier, v. 5, n. 6, p. 1331–1352, 2021. 13
- DHIBI, K. et al. Reduced kernel random forest technique for fault detection and classification in grid-tied pv systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 10, n. 6, p. 1864–1871, 2020. 15
- (EPE), E. de P. E. *Overview of New Solar PV Projects in Brazil*. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-78/NT_EPE-DEE-NT-030_2017-r0.pdf>. 22
- (EPE), E. de P. E. Plano decenal de expansão de energia 2032. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>. 12, 15, 33, 34
- FANTI, L. D. et al. O uso das técnicas de valor presente líquido, taxa de interna de retorno e payback descontado: Um estudo de viabilidade de investimentos no grupo bredda ltda. *Desafio Online*, v. 3, n. 2, p. 127–143, 2015. 23
- FILHO, N. C.; KOPITTKKE, B. H. Análise de investimentos: Matemática. *São Paulo: Atlas SA*, 2010. 24
- GOL, A. E.; ŠČASNÝ, M. Techno-economic analysis of fixed versus sun-tracking solar panels. *International Journal of Renewable Energy Development*, v. 12, n. 3, p. 615–626, 2023. Disponível em: <<https://ijred.cbiorid.org/index.php/ijred/article/view/50165>>. 35
- HESS, R. F.; HOLLIDAY, I. E. The spatial localization deficit in amblyopia. *Vision research*, Elsevier, v. 32, n. 7, p. 1319–1339, 1992. 23, 24
- IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. 12
- (IRENA), I. R. E. A. *Renewable Power Generation Costs in 2023*. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>>. 22, 23
- JAVED, M. R. et al. Comparison of the adaptive neural-fuzzy interface system (anfis) based solar maximum power point tracking (mppt) with other solar mppt methods. In: IEEE. *2020 IEEE 23rd international multitopic conference (INMIC)*. [S.l.], 2020. p. 1–5. 18
- KARPIĆ, J. et al. Comparison of solar power measurements in alpine areas using a mobile dual-axis tracking system. *Energy informatics*, Springer, v. 2, n. Suppl 1, p. 23, 2019. 18
- KOUSSA, M. et al. Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. *Applied Energy*, Elsevier, v. 88, n. 5, p. 1756–1771, 2011. 19

- LIM, B.-H. et al. Industrial design and implementation of a large-scale dual-axis sun tracker with a vertical-axis-rotating-platform and multiple-row-elevation structures. *Solar Energy*, Elsevier, v. 199, p. 596–616, 2020. 18
- LIMA, D. S. Análise comparativa entre um sistema solar com rastreo e um fixo. *Conexões - Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 4, p. 146–151, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21439/conexoes.v14i4.1334>>. 19
- LIMA, R. A. d. *Evolução da geração de energia solar fotovoltaica no contexto da diversificação da Matriz Energética Nacional*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024. 12
- LUCAS, B. et al. Influência da morfologia urbana na capacidade de geração de energia fotovoltaica por bipvs. *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, v. 20, p. 1–12, 2024. 12
- MANSOURI, R.; KALOGIROU, S. A. Tracking and fixed photovoltaic systems: A comparative review. *Solar Energy*, v. 211, p. 1234–1246, 2020. 17, 18
- MARCELLO, I. de C. et al. Análise técnico-econômica de uma usina fotovoltaica utilizando sistema de trackers com algoritmo backtracking. Universidade Federal de Minas Gerais, 2022. 35
- MEKHILEF, S. et al. Solar energy in malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 386–396, 2012. 19
- Núcleo do Conhecimento. *Rastreadores solares: tipos, funcionamento e aplicações*. 2021. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares>>. 35
- NETO, L. J. de B.; VALE, M. R. B. G.; GUERRA, F. K. O. V. Desenvolvimento de rastreador solar didático de um eixo para painéis fotovoltaicos. In: *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2020. 19
- NEWMAN, D.; LAVELLE, J.; ESCHENBACH, T. *Engineering Economic (8th eds)*. [S.l.]: Engineering Press, 2000. 23, 24
- NÓBREGA, B. S. et al. Comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no nordeste do brasil. *Revista Principia*, n. 46, p. 182–195, 2019. 35
- PALIYAL, P. S. et al. Automatic solar tracking system: a review pertaining to advancements and challenges in the current scenario. *Clean Energy*, v. 8, n. 6, p. 237–262, 2024. 21
- PEREIRA, M.; RUTHER, R. Energía solar fotovoltaica. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 3, p. 61–84, 2021. 12
- PINTO, G. W. G. Análise do impacto técnico e financeiro no uso de trackers e módulos bifaciais em usinas fotovoltaicas em belo horizonte. 2025. 35
- REGIA, C. V. P. *Análise de desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico em diferentes regiões climáticas brasileiras, considerando sistemas fixos e com rastreadores solares*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243545>>. 35

- Revista FT. *Estudo comparativo de viabilidade de um seguidor solar de baixo custo para fins residenciais*. 2025. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/estudo-comparativo-de-viabilidade-de-um-seguidor-solar-de-baixo-custo-para-fins-residenciais/>>. 35
- RIBEIRO, C. A. de S.; FILHO, J. B. de M. Análise comparativa da tecnologia fotovoltaica aplicada em microgeração fixa e sistema tracker com o mínimo de engrenagens. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 5, n. 4, p. 20–25, 2020. 17
- RODRIGUES, A.; CAMARGOS, M. C. O. et al. Análise econômico-financeira do aproveitamento energético do gás metano proveniente de instalação de suinocultura. *Revista Univap*, v. 22, n. 40, p. 430–430, 2016. 12, 24
- SANTANA, R. Análise da regulação da geração distribuída de energia elétrica no Brasil: estimação da distribuição do subsídio. 2023. 16
- SANTOS, V. V. d. O crescimento da geração de energia solar fotovoltaica pela perspectiva da geração de empregos (2017-2022). Universidade Federal de Uberlândia, 2023. 15, 16
- SILVA, F. C. L. d.; FARIAS, J. A. d. Análise econômica da produção de acácia mearnsii de wild e carvão vegetal no vale do caí e taquari, rio grande do sul. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 45, p. 927–932, 2015. 23
- SILVA, P. H. *Solar Tracker e sua eficiência: análise econômica comparativa*. 2024. TCC (Undergraduate Thesis), accessed via Scribd. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/958157595/TCC-Solar-Tracker-e-sua-eficiencia-Pedro-Henrique-Silva>>. 22
- SISQUINI, M. S. R.; SISQUINI, C. R.; SISQUINI, G. R. Custo médio de uma usina fotovoltaica no Brasil: análise e perspectivas. In: CONFEA/CREA. *Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC*. Vitória, ES, 2024. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/contecc>>. Acesso em: 28 ago. 2025. 33
- STATISTICS, R. C. International renewable energy agency (irena); 2022. 2022. 21
- TONOLO, É. A. et al. *Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. 32
- VILELA, M. C. et al. Análise da viabilidade econômico-financeira de projeto de piscicultura em tanques escavados. 2012. 24, 30
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. *São Paulo: Érica*, v. 2, 2012. 16
- WISSMANN, J. A. et al. Desenvolvimento de sistema de rastreamento solar gravitacional e pendular para painel fotovoltaico isolado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2024. 20
- ZGRAGGEN, J. et al. Physics informed deep learning for tracker fault detection in photovoltaic power plants. In: PHM SOCIETY. *14th Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, Nashville, USA, 1-4 November 2022*. [S.l.], 2022. v. 14, n. 1. 18