

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ  
CURSO DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**CARLOS GRIGORIO DOS SANTOS FILHO  
ROBSON RODRIGO DE SOUZA  
VINICIUS DE AGUIAR SANTOS**

**SISTEMA SOLAR COM TROCADOR DE CALOR E REUSO DE  
ÁGUA**

**MAUÁ  
2025**

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**SISTEMA SOLAR COM TROCADOR DE CALOR E REUSO DE  
ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à FATEC Mauá, como parte dos  
requisitos para obtenção do Título de Tecnologia  
em fabricação mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Renato Marques de  
Barros.

Prof. Dr. Orientador: Renato Marques de Barros

MAUÁ - SP  
2025

## Folha de aprovação-obrigatória

### FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Carlos Grigorio dos; Santos, Vinicius de Aguiar.

Título: Sistema solar com trocador de calor e reuso de água.

57 p.; 30 cm.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso).

CEETEPS-FATEC Mauá/SP, 1º Sem. 2025.

Orientador: Prof. Renato Marques Barros.

Referências: p. 58.

Palavras-chave: Energia solar. Eficiência energética. Sistema híbrido.

Trocador de calor.

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**SISTEMA SOLAR COM TROCADOR DE CALOR E REUSO DE  
ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à FATEC Mauá, como parte dos  
requisitos para obtenção do Título de Tecnologia  
em fabricação mecânica.

Aprovação em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / 2025.

---

Prof. Dr. Renato Marques de Barros  
FATEC Mauá  
Orientador

---

Prof. Ronaldo Câmara Cozza  
FATEC Mauá  
Avaliador

---

Prof. Mauro Araújo de Sousa  
FATEC Mauá  
Avaliador

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos as nossas famílias que sempre nos apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Desejamos expressar nossos agradecimentos.

Em primeiro lugar a Deus, fonte de força para minha vida.

Ao Professor e orientador Dr. Renato Marques de Barros, pela dedicação, paciência e incentivo para transformar minhas preocupações em pesquisa.

À Banca examinadora formada pelos professores Ronaldo Câmara Cozza e Mauro Araújo de Sousa.

Aos professores da Graduação que me abriram horizontes para conclusão dessa etapa de estudos.

E, por fim, aos meus amigos de sala, pois, buscamos os mesmos objetivos.

## **RESUMO:**

O presente estudo apresenta o desenvolvimento de um sistema solar híbrido que integra painéis fotovoltaicos com trocador de calor e reaproveitamento de água, com o objetivo de melhorar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental. A proposta visa mitigar perdas de desempenho em climas quentes, onde a temperatura elevada dos painéis compromete sua eficiência. A solução utiliza um sistema de resfriamento com ventoinha e circulação de água, o qual reduz a temperatura dos painéis e permite o reuso da água, tornando o sistema mais sustentável.

O estudo discute o panorama da energia solar no Brasil, destacando seu crescimento impulsionado por fatores climáticos favoráveis, políticas públicas e avanços tecnológicos. Além de avaliar os desafios enfrentados, como os altos custos iniciais, ineficiências operacionais, e a variabilidade da radiação solar, o trabalho propõe alternativas técnicas, econômicas e regulatórias para superar essas limitações. A pesquisa inclui modelagens e experimentos práticos, demonstrando a viabilidade técnica e econômica do sistema híbrido. Com base em análises comparativas entre dados teóricos e testes em campo, verifica-se um ganho de até 4% na eficiência dos painéis com a redução de 10°C em sua temperatura operacional. A integração dos sistemas fotovoltaico e térmico permite um aproveitamento energético global superior a 70%, evidenciando a vantagem dos sistemas híbridos em contextos urbanos e rurais.

O projeto reforça a importância da inovação e adaptação tecnológica para promover soluções energéticas sustentáveis e acessíveis, alinhadas à transição energética e às metas climáticas nacionais e globais.

**Palavras-chave:** Energia solar. Eficiência energética. Sistema híbrido. Trocador de calor.

## **ABSTRACT:**

This study presents the development of a hybrid solar system that integrates photovoltaic panels with a heat exchanger and water reuse mechanism, aiming to improve energy efficiency and reduce environmental impact. The proposal seeks to mitigate performance losses in hot climates, where elevated panel temperatures compromise efficiency. The solution employs a cooling system with a fan and water circulation, which lowers the panel temperature and enables water reuse, making the system more sustainable.

The study discusses the solar energy landscape in Brazil, highlighting its growth driven by favorable climatic conditions, public policies, and technological advancements. In addition to evaluating current challenges—such as high initial costs, operational inefficiencies, and solar radiation variability—the research proposes technical, economic, and regulatory alternatives to overcome these limitations. The project includes modeling and practical experiments, demonstrating the technical and economic feasibility of the hybrid system.

Based on comparative analyses between theoretical data and field tests, the study confirms up to a 4% efficiency gain in the panels with a 10°C reduction in operating temperature. The integration of photovoltaic and thermal systems allows for a combined energy efficiency exceeding 70%, demonstrating the advantages of hybrid systems in both urban and rural settings.

The project underscores the importance of innovation and technological adaptation in promoting sustainable and accessible energy solutions, aligned with the global energy transition and national climate goals.

**Keywords:** Solar energy. Energy efficiency. Hybrid system. Heat exchanger.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b> – Esquema ilustrativo de um sistema fotovoltaico residencial, mostrando a conversão da luz solar em energia elétrica por meio de painéis solares, a transformação da corrente contínua em alternada pelo inversor, e a integração com a rede elétrica por meio do medidor bidirecional.....	16
<b>Figura 02</b> - Trajetória aparente do Sol e projeção dos raios solares sobre o plano horizontal .....	26
<b>Figura 3</b> - Representação de dois sistemas solares térmicos: (acima) sistema direto com trocador de calor; (abaixo) sistema com tanque de armazenamento térmico, permitindo maior flexibilidade no uso da energia gerada.....	32
<b>Figura 4</b> - Esquema de funcionamento de um sistema de aquecimento solar térmico com circulação natural. O sistema é composto por coletores solares, reservatório térmico, caixa d'água e tubulações, permitindo o aquecimento e o armazenamento de água utilizando energia solar .....	37
<b>Figura 5</b> – Painel Solar Fotovoltaico Resun RS6E-150P .....	45
<b>Figura 6</b> – Controlador de Carga EPEVER VS2024AU .....	46
<b>Figura 7</b> – Inversor de frequência .....	46
<b>Figura 8</b> – Disjuntor bipolar STECK 20A .....	47
<b>Figura 9</b> – Bomba submersível usada como carga.....	48
<b>Figura 10</b> – Controlador de temperatura .....	48
<b>Figura 11</b> – Sensor de temperatura .....	40
<b>Figura 12</b> – Imagem térmica com sistema desligado (alta temperatura).....	50
<b>Figura 13</b> – Imagem térmica com sistema ligado (temperatura reduzida) .....	51

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. HISTÓRIA, FUNCIONAMENTO E QUESTÕES DO SISTEMA SOLAR NO BRASIL .....</b>	<b>13</b>
2.1. Histórico da Geração do Sistema Solar no Brasil .....	13
2.2. Como Funciona o Sistema de Energia Solar Doméstica .....	15
2.3. Quais os Problemas?.....	19
2.4. Quais os Investimentos Iniciais? .....	22
2.5. Inconstância do Sol .....	26
<b>3. ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA NO SISTEMA SOLAR COM TROCADOR DE CALOR.....</b>	<b>31</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1 Potência do Módulo Solar .....	49
4.2 Perda de Eficiência por Temperatura .....	50
4.3 Sistema com Refrigeração Ativa .....	50
4.4 Consumo do Sistema de Refrigeração e Bomba .....	51
4.5 Comparativo de Custo com Aquecimento Elétrico .....	51
4.6 Discussão .....	52
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias alternativas que possibilitam maior eficiência energética com menor impacto ambiental. Nesse cenário, a energia solar destaca-se como uma das principais alternativas renováveis, sendo amplamente utilizada tanto para geração elétrica quanto térmica. O Brasil, com sua elevada incidência solar anual, apresenta condições ideais para a exploração desse recurso, favorecendo a disseminação dos sistemas fotovoltaicos em escala residencial, comercial e industrial (FRAIDENRAICH, 2024).

Embora os testes laboratoriais padronizados ofereçam parâmetros importantes para avaliação de desempenho dos módulos solares, esses ensaios são normalmente realizados em ambientes climatizados a 25 °C — condição muitas vezes distante da realidade brasileira. Na prática, os painéis operam em temperaturas significativamente superiores, o que compromete sua eficiência. Estudos indicam que a cada grau Celsius acima da temperatura de teste ocorre uma perda média de 0,4% na eficiência do painel. Em regiões quentes, como a cidade de Mauá, onde os testes deste trabalho foram realizados, a temperatura superficial dos painéis chegou a ultrapassar 50 °C, resultando em perdas de mais de 10% na capacidade de geração elétrica (MENDONÇA, 2024).

A presente pesquisa propõe o desenvolvimento e a análise de um sistema solar híbrido, que combina geração fotovoltaica com trocador de calor e mecanismo de reuso de água, buscando recuperar parte da eficiência energética comprometida pelo calor excessivo. A integração de um sistema de refrigeração com ventoinha e bomba permitiu reduzir a temperatura do painel durante os testes práticos, comprovando ganhos de desempenho. Além disso, a água utilizada no processo de resfriamento é reaproveitada, tornando o sistema mais sustentável.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo principal demonstrar, por meio de experimentos e análises técnicas, como as condições ambientais reais afetam o rendimento dos sistemas fotovoltaicos e como estratégias simples e acessíveis podem mitigar essas perdas. Ao comparar dados teóricos (datasheets) com resultados obtidos em campo, a pesquisa reforça a necessidade de adaptar os projetos de sistemas solares às condições climáticas locais, promovendo maior precisão nas estimativas de geração energética.

A relevância deste estudo está na sua contribuição prática para o aprimoramento de sistemas solares descentralizados, especialmente em regiões com elevada insolação. A abordagem adotada pode servir de base para futuros projetos voltados à melhoria da eficiência energética, à redução do desperdício de recursos naturais e à ampliação da autonomia energética residencial.

## **2. HISTÓRIA, FUNCIONAMENTO E QUESTÕES DO SISTEMA SOLAR NO BRASIL**

### **2.1 Histórico da Geração do Sistema Solar no Brasil**

O desenvolvimento da geração de energia solar no Brasil teve suas primeiras iniciativas na década de 1970, impulsionado pela crise do petróleo que levou o país a buscar fontes alternativas de energia. Nos anos seguintes, a evolução tecnológica e as preocupações ambientais fomentaram o interesse pelo setor solar, resultando na criação de instituições de pesquisa e no incentivo à implantação de projetos-piloto (FRAIDENRAICH, 2024). Com o passar das décadas, programas governamentais e parcerias com instituições acadêmicas contribuíram para a consolidação do setor, tornando o Brasil um dos líderes na adoção dessa tecnologia na América Latina.

O marco regulatório para a energia solar no Brasil começou a ser delineado no início dos anos 2000, com a implementação de legislações que incentivavam a geração distribuída. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 482 em 2012, permitindo que consumidores gerassem sua própria eletricidade e injetassem o excedente na rede, recebendo créditos energéticos (BEZERRA, 2021). Esse modelo favoreceu o crescimento da geração fotovoltaica, atraindo investimentos privados e tornando a energia solar uma opção viável tanto para residências quanto para empresas.

O avanço da pesquisa científica e da inovação tecnológica também foi essencial na expansão da energia solar no país. Instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e universidades federais promoveram estudos sobre eficiência de painéis fotovoltaicos, armazenamento de energia e impacto ambiental da tecnologia (FREITAS et al., 2025). O incentivo à pesquisa contribuiu para a melhoria da eficiência dos sistemas e redução dos custos de implementação, favorecendo a popularização da energia solar entre os consumidores brasileiros.

No aspecto econômico, a energia solar tem se mostrado uma alternativa competitiva diante das fontes tradicionais de eletricidade. Com a queda nos preços dos módulos fotovoltaicos e o aumento da eficiência dos sistemas, os projetos solares passaram a apresentar um retorno sobre investimento atrativo para

consumidores residenciais e empresariais (MENDONÇA, 2024). A disponibilidade de financiamentos e linhas de crédito especializadas facilitou a adoção da tecnologia, impulsionando ainda mais o crescimento do setor no Brasil.

A transição para fontes renováveis de energia também tem sido impulsionada por políticas ambientais e compromissos internacionais firmados pelo Brasil. O Acordo de Paris, por exemplo, estabeleceu metas de redução das emissões de gases de efeito estufa, incentivando a substituição gradual de fontes de energia poluentes por alternativas limpas e sustentáveis (GIACOBBO, 2024). Nesse contexto, a energia solar é importante na diversificação da matriz elétrica nacional e na redução da dependência de usinas hidrelétricas, especialmente em tempos de escassez hídrica.

O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil também está diretamente relacionado às condições climáticas favoráveis do país. Com altos índices de radiação solar ao longo do ano, estados como Minas Gerais, Bahia e Ceará despontam como líderes na geração de energia solar (NASCIMENTO et al., 2015). Esse fator geográfico tem permitido o desenvolvimento de grandes usinas solares, bem como a disseminação da tecnologia em micro e mini geração distribuída.

A criação de parques solares de grande escala tem sido uma estratégia adotada por investidores para atender à crescente demanda por energia renovável. Nos últimos anos, projetos de usinas solares fotovoltaicas foram implementados em diversas regiões do Brasil, contribuindo para a diversificação da matriz energética nacional (OTTONELLI et al., 2021). Essas usinas têm potencial para suprir o consumo de milhares de residências e empresas, reduzindo a pressão sobre outras fontes de geração elétrica.

Além dos benefícios ambientais e econômicos, a energia solar tem sido muito relevante na geração de empregos no Brasil. A expansão do setor tem impulsionado a formação de profissionais especializados, desde técnicos em instalação até engenheiros e pesquisadores (FERREIRA, 2024). Esse crescimento tem gerado impactos positivos na economia, ampliando oportunidades de trabalho e promovendo o desenvolvimento regional em áreas com grande potencial para a geração solar.

Contudo, desafios ainda se apresentam para a expansão do setor solar no Brasil. A necessidade de aprimoramento na infraestrutura de transmissão e

distribuição de energia, bem como a elaboração de políticas públicas que garantam a previsibilidade regulatória, são fatores essenciais para a consolidação do setor (MORAIS, 2015). A evolução tecnológica e a maior acessibilidade aos sistemas fotovoltaicos continuarão sendo determinantes para o crescimento sustentado da energia solar no país.

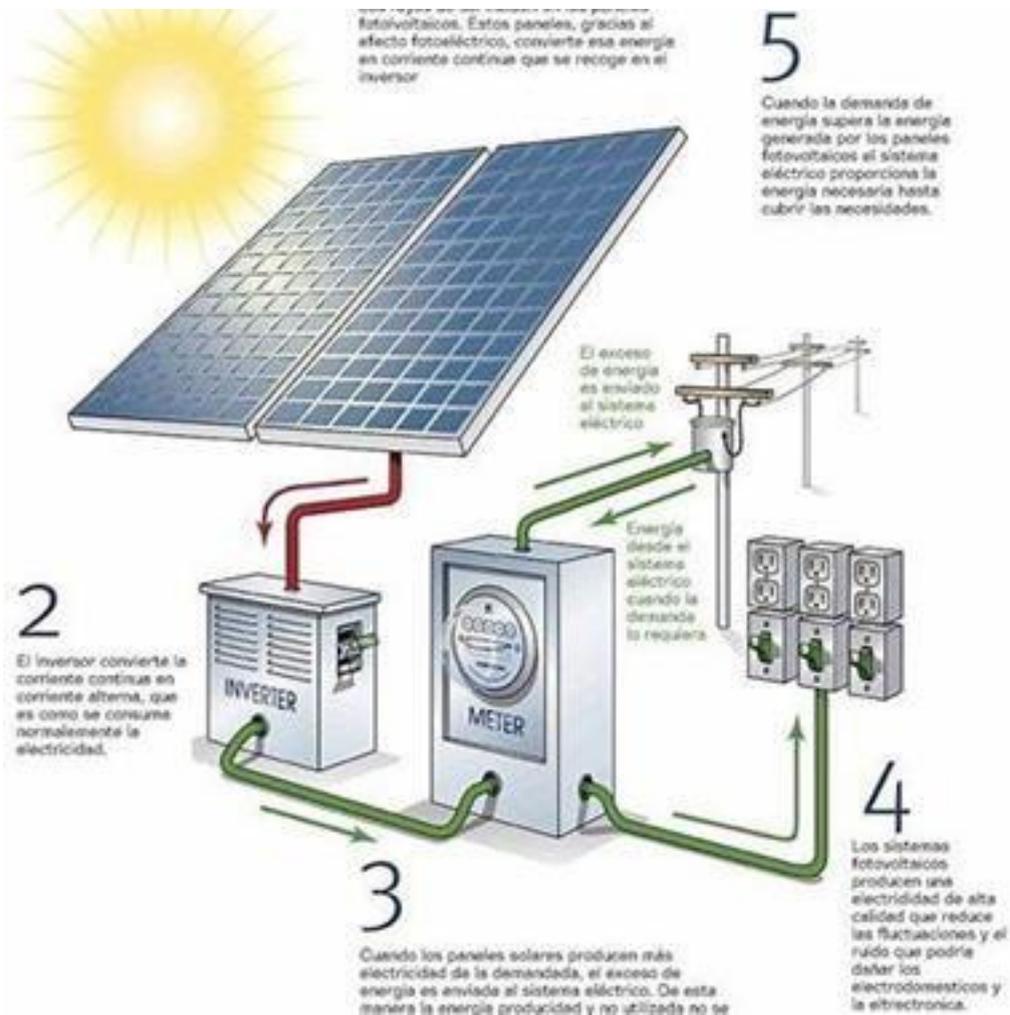
Diante desse panorama, a energia solar no Brasil se consolida como uma alternativa viável e sustentável para suprir a demanda crescente por eletricidade, aliando benefícios econômicos e ambientais. Com incentivos governamentais adequados e avanços na tecnologia, o setor tende a crescer ainda mais, tornando-se uma das principais fontes energéticas do país. No próximo tópico, será abordado o funcionamento do sistema de energia solar doméstica, uma das modalidades que mais cresce entre os consumidores brasileiros.

## **2.2 Como Funciona o Sistema de Energia Solar Doméstica**

O sistema de energia solar doméstica consiste em uma alternativa sustentável e eficiente para a geração de eletricidade, especialmente em regiões com alta incidência solar. Seu funcionamento baseia-se na conversão da radiação solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, que são compostos por células de silício capazes de transformar a luz do sol em corrente elétrica contínua. Essa energia, posteriormente, passa por um inversor que a converte em corrente alternada, tornando-a compatível com a rede elétrica residencial. Assim, além de proporcionar autonomia energética, esse sistema reduz a dependência de fontes tradicionais de eletricidade, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais causados pela geração convencional de energia (BEZERRA, 2021).

A principal vantagem da energia solar doméstica está na sua capacidade de gerar eletricidade de maneira renovável e limpa, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa. Em comparação com outras fontes, como hidrelétricas e termelétricas, o impacto ambiental do sistema fotovoltaico é significativamente menor, pois não demanda grandes áreas alagadas nem queima de combustíveis fósseis. A tecnologia também tem avançado constantemente, tornando os equipamentos mais acessíveis e eficientes, favorecendo sua popularização tanto em áreas urbanas quanto em regiões remotas sem acesso à rede elétrica convencional (FRAIDENRAICH, 2024).

**Figura 1** - Esquema ilustrativo de um sistema fotovoltaico residencial, mostrando a conversão da luz solar em energia elétrica por meio de painéis solares, a transformação da corrente contínua em alternada pelo inversor, e a integração com a rede elétrica por meio do medidor bidirecional



**Fonte:** Bezerra, 2021

Um fator relevante no funcionamento do sistema fotovoltaico doméstico é a possibilidade de armazenamento de energia por meio de baterias, permitindo o uso da eletricidade mesmo durante períodos noturnos ou dias nublados. Embora esse componente ainda represente um custo elevado para muitos consumidores, sua presença potencializa a independência energética e garante um fornecimento contínuo de eletricidade. Os sistemas híbridos, que combinam energia solar e outras fontes renováveis, podem aumentar a eficiência e a estabilidade da geração, reduzindo a necessidade de uso da rede elétrica pública (FREITAS et al., 2025).

A viabilidade econômica da energia solar doméstica tem sido amplamente discutida, principalmente no contexto brasileiro, onde a abundância de radiação solar favorece a instalação desses sistemas. O investimento inicial para a aquisição e instalação dos painéis fotovoltaicos pode ser relativamente alto, mas os benefícios a longo prazo compensam os custos, considerando a redução na conta de luz e os incentivos governamentais disponíveis. Em diversos estados, há programas de financiamento e isenção de impostos que facilitam a adesão à energia solar, tornando-a uma opção economicamente atrativa para consumidores residenciais e empresariais (MENDONÇA, 2024).

Além do fator econômico, a energia solar doméstica contribui para a segurança energética do país, reduzindo a sobrecarga nas redes de transmissão e minimizando os riscos de apagões. Com a crescente demanda por eletricidade e os desafios impostos pelas mudanças climáticas, a diversificação da matriz energética é essencial para garantir um fornecimento estável e sustentável. Assim, ao adotar sistemas fotovoltaicos, os consumidores não apenas se beneficiam financeiramente, mas também colaboram para o desenvolvimento de um modelo energético mais resiliente e menos dependente de fontes não renováveis (GIACOBBO, 2024).

A instalação do sistema fotovoltaico em residências exige um planejamento adequado, levando em consideração fatores como a orientação dos painéis, a inclinação ideal e a capacidade de geração em relação ao consumo energético da unidade. Para garantir o máximo aproveitamento da radiação solar, recomenda-se que os painéis sejam instalados em locais sem sombreamento excessivo e voltados para a direção que maximize a captação da luz ao longo do dia. Também é fundamental realizar uma análise detalhada do consumo elétrico da residência para dimensionar corretamente o sistema e evitar desperdícios ou insuficiências na geração de energia (NASCIMENTO et al., 2015).

O funcionamento do sistema de energia solar doméstica possui uma conexão com a rede elétrica, permitindo o uso do modelo de compensação de energia. Nesse sistema, a eletricidade excedente gerada durante o dia é injetada na rede pública, sendo convertida em créditos que podem ser utilizados posteriormente, quando a geração solar for insuficiente. Esse mecanismo, regulamentado pela legislação brasileira, possibilita uma redução significativa nos custos com eletricidade, tornando a energia solar uma alternativa viável mesmo para

consumidores que não possuem sistemas de armazenamento por baterias (NASCIMENTO; TRINDADE; CARVALHO, 2021).

Apesar das inúmeras vantagens, é importante considerar a manutenção e o desempenho dos painéis solares ao longo do tempo. A limpeza periódica das placas é essencial para evitar a acumulação de sujeira, poeira e detritos que possam comprometer a captação da luz solar. Ademais, é recomendável realizar inspeções técnicas regulares para verificar o funcionamento adequado do sistema e prevenir eventuais falhas. Com uma manutenção adequada, os painéis fotovoltaicos podem apresentar uma vida útil superior a 25 anos, garantindo um retorno consistente sobre o investimento realizado (OTTONELLI et al., 2021).

A evolução tecnológica tem contribuído para o aprimoramento dos sistemas fotovoltaicos, com o desenvolvimento de células solares mais eficientes e duráveis. Novas tecnologias, como o uso de perovskitas e módulos bifaciais, estão sendo pesquisadas para aumentar a eficiência na conversão da energia solar em eletricidade. Inovações em inversores e sistemas de monitoramento remoto permitem uma gestão mais inteligente da geração e do consumo de energia, otimizando o desempenho dos sistemas solares domésticos (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021).

No entanto, a adoção da energia solar doméstica ainda enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito ao custo inicial e à infraestrutura necessária para a instalação dos sistemas. Em algumas regiões, a disponibilidade de profissionais capacitados para a implementação e a manutenção dos painéis solares pode ser limitada, dificultando a popularização da tecnologia. Variações climáticas e mudanças na regulamentação do setor podem impactar a viabilidade econômica da energia solar, exigindo políticas públicas que incentivem sua adoção e garantam sua competitividade frente a outras fontes energéticas (FERREIRA, 2024).

No contexto da transição energética, a energia solar representa um passo fundamental para a sustentabilidade, reduzindo a dependência de fontes fósseis e promovendo uma matriz energética mais limpa e diversificada. Entretanto, para que essa transição ocorra de forma eficiente, é necessário o desenvolvimento de incentivos e subsídios que facilitem o acesso à tecnologia, tornando-a acessível a uma parcela maior da população. A democratização da energia solar não apenas beneficia os consumidores individuais, mas também fortalece a segurança

energética do país, reduzindo custos e impactos ambientais no longo prazo (MORAIS, 2015).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível avaliar os possíveis desafios enfrentados pelos usuários da energia solar doméstica, especialmente no que diz respeito aos equipamentos utilizados e às falhas na geração de eletricidade. O próximo tópico abordará essas questões em detalhes, analisando os principais problemas relacionados aos componentes do sistema fotovoltaico, bem como as dificuldades inerentes ao processo de geração de energia solar e suas implicações para os consumidores e para o setor energético como um todo.

### **2.3 Quais os Problemas?**

Embora os sistemas solares apresentem vantagens significativas, há desafios que precisam ser considerados para garantir seu funcionamento eficiente e econômico. O desempenho dos equipamentos pode ser influenciado por fatores como qualidade da fabricação, condições climáticas e instalação inadequada. O custo inicial e a necessidade de manutenção periódica representam barreiras para alguns consumidores. Mesmo com incentivos governamentais, a adesão à energia solar ainda enfrenta desafios técnicos e estruturais, exigindo planejamento e acompanhamento especializado (BEZERRA, 2021).

Os principais componentes de um sistema solar térmico incluem coletores solares, reservatórios térmicos, trocadores de calor e sistemas de bombeamento, cada um com especificações técnicas que impactam diretamente na eficiência do sistema. Os coletores solares, responsáveis pela captação da energia térmica, devem ser fabricados com materiais de alta durabilidade e resistência, uma vez que estão constantemente expostos às intempéries. Já os reservatórios térmicos necessitam de isolamento adequado para minimizar perdas de calor, garantindo maior eficiência na utilização da energia armazenada (FRAIDENRAICH, 2024).

O mercado brasileiro conta com diversos fabricantes de equipamentos para sistemas solares, incluindo empresas nacionais e internacionais, que oferecem produtos com diferentes níveis de tecnologia e eficiência. Destacam-se marcas como Soletrol, Bosch e Rinnai, que investem em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a durabilidade e a capacidade de captação dos coletores solares. No entanto, a grande diversidade de fabricantes também gera desafios relacionados à

padronização e à qualidade dos equipamentos disponíveis no mercado (OTTONELLI et al., 2021).

Dentre os principais problemas enfrentados nos equipamentos solares, destaca-se a baixa eficiência de alguns modelos, que pode comprometer o retorno sobre o investimento. A degradação dos componentes devido à exposição prolongada ao sol e às variações climáticas pode reduzir a vida útil do sistema. A qualidade da instalação também exerce uma importante função no desempenho, sendo essencial que os equipamentos sejam instalados de acordo com as especificações técnicas recomendadas pelos fabricantes para evitar falhas e perdas energéticas (FREITAS et al., 2025).

Um fator crítico é a necessidade de manutenção regular para assegurar o pleno funcionamento do sistema solar. A acumulação de poeira, resíduos e outros detritos sobre os painéis solares pode comprometer sua eficiência, reduzindo a captação da radiação solar. Da mesma forma, vazamentos nos sistemas térmicos e falhas nos inversores de corrente podem afetar diretamente o desempenho do sistema, exigindo inspeções periódicas e eventuais substituições de componentes (NASCIMENTO et al., 2015).

Além dos desafios relacionados aos equipamentos, a geração de energia solar também está sujeita a problemas inerentes ao processo de captação e conversão da luz solar em eletricidade. Um dos principais fatores que afetam a eficiência da geração fotovoltaica é o sombreamento dos painéis, que pode ocorrer devido a árvores, prédios ou outras obstruções. Pequenas sombras sobre os módulos podem causar perdas significativas na produção de energia, tornando fundamental um planejamento adequado na instalação (MENDONÇA, 2024).

A limpeza periódica dos módulos é essencial para garantir um desempenho adequado, especialmente em regiões com alta concentração de poeira ou poluição. Em áreas costeiras, a corrosão causada pela salinidade do ar também pode comprometer a durabilidade dos equipamentos, exigindo revestimentos especiais e inspeções regulares (NASCIMENTO; TRINDADE; CARVALHO, 2021).

A diminuição do rendimento em dias nublados ou chuvosos é outro desafio enfrentado pelos sistemas de energia solar, uma vez que a captação de radiação solar é diretamente afetada pela cobertura de nuvens. Embora os painéis fotovoltaicos sejam capazes de gerar energia mesmo em condições de baixa luminosidade, a produção pode cair significativamente, tornando necessário o uso de

baterias ou fontes complementares de energia para garantir um fornecimento contínuo (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021).

A necessidade de espaço adequado para a instalação dos coletores e reservatórios térmicos também é uma questão relevante, especialmente em áreas urbanas onde o espaço disponível nos telhados pode ser limitado. A inclinação e a orientação dos painéis são fatores determinantes para a eficiência do sistema, sendo essencial uma análise criteriosa do local de instalação para evitar sombras e maximizar a captação de luz solar ao longo do dia (GIACOBBO, 2024).

Além das dificuldades técnicas, a geração de energia solar enfrenta desafios econômicos e regulatórios que podem impactar sua viabilidade. A variação nos custos dos equipamentos, a disponibilidade de incentivos fiscais e as mudanças na legislação podem influenciar a decisão dos consumidores em investir na tecnologia. A implementação de políticas públicas que garantam maior previsibilidade e segurança para os investidores é essencial para fomentar o crescimento do setor solar no Brasil (MORAIS, 2015).

A intermitência na geração solar também exige soluções complementares para garantir a estabilidade do fornecimento elétrico, especialmente em sistemas conectados à rede pública. O uso de baterias para armazenamento de energia ainda apresenta um custo elevado, tornando-se um dos principais desafios para a adoção em larga escala. A necessidade de atualização das redes de distribuição para lidar com a variabilidade da energia solar representa um desafio adicional para as concessionárias e para o setor energético como um todo (FERREIRA, 2024).

A reciclagem e o descarte adequado dos painéis solares ao final de sua vida útil são questões ambientais que precisam ser consideradas. Os módulos fotovoltaicos contêm materiais que podem se tornar resíduos tóxicos se não forem descartados corretamente. Assim, a implementação de programas de reciclagem e a pesquisa por alternativas sustentáveis para a fabricação dos equipamentos são fundamentais para reduzir o impacto ambiental da tecnologia solar a longo prazo (BEZERRA, 2021).

Os desafios enfrentados pela geração solar não devem desestimular seu uso, mas sim impulsionar avanços tecnológicos e soluções inovadoras que aumentem sua eficiência e acessibilidade. O desenvolvimento de novos materiais, melhorias na conversão de energia e a implementação de sistemas inteligentes de gerenciamento energético são aspectos que podem contribuir para a superação

dessas dificuldades. Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, a energia solar tem potencial para se consolidar como uma das principais fontes de eletricidade do futuro (OTTONELLI et al., 2021).

Dessa forma, ao compreender os desafios enfrentados pelos sistemas de energia solar, torna-se possível buscar estratégias para minimizar seus impactos e otimizar sua utilização. O aprimoramento das tecnologias, o incentivo à capacitação profissional e a criação de políticas públicas favoráveis são fatores essenciais para garantir o crescimento sustentável da energia solar no Brasil. Com um planejamento adequado e investimentos direcionados, é possível superar as barreiras e tornar essa fonte energética ainda mais competitiva e acessível (FREITAS et al., 2025).

Assim, ao analisar os desafios e limitações da energia solar, torna-se evidente a importância de avaliar os investimentos iniciais necessários para a instalação e operação dos sistemas fotovoltaicos. No próximo tópico, será discutido o custo de implementação da tecnologia, incluindo os fatores que influenciam o orçamento e as alternativas para viabilizar financeiramente a adoção da energia solar em residências e empresas.

#### **2.4 Quais os Investimentos Iniciais?**

Segundo Bezerra (2021), a instalação de sistemas fotovoltaicos demanda custos com a aquisição de painéis solares, inversores, baterias e a mão de obra especializada para instalação, o que pode ser um fator limitante para quem deseja iniciar esse processo.

É fundamental, portanto, entender as variáveis que influenciam os custos de implantação de energia solar fotovoltaica. Esses custos não se restringem apenas à compra de equipamentos, mas também englobam aspectos como a análise de viabilidade econômica e os processos de licenciamento e aprovação junto aos órgãos competentes. De acordo com Freitas et al. (2025), a viabilidade econômica é um ponto central nesse tipo de investimento, pois envolve a análise de retorno sobre o investimento (ROI) e o período de payback, o que pode variar conforme a localização e o tipo de sistema escolhido. Assim, é imprescindível uma avaliação detalhada que leve em consideração todos os custos envolvidos, além das economias esperadas com a redução do consumo de energia elétrica.

Além do custo inicial, é necessário considerar as possibilidades de financiamento e incentivos fiscais oferecidos por governos e instituições financeiras. Essas medidas são fundamentais para tornar o acesso à energia solar mais acessível, especialmente para pequenas e médias empresas, bem como para consumidores residenciais. Segundo Giacobbo (2024), o financiamento é um mecanismo importante que pode diluir o impacto financeiro do investimento inicial e, assim, facilitar a adoção da tecnologia. No Brasil, a recente introdução de políticas públicas voltadas para o incentivo à geração de energia solar tem contribuído significativamente para o crescimento do setor, proporcionando melhores condições para que a energia solar se torne uma realidade no cotidiano de muitas famílias.

Embora os custos de operação sejam relativamente baixos, considerando que a energia solar não depende de insumos externos como combustíveis fósseis, é necessário realizar manutenções periódicas para garantir a eficiência do sistema. A duração média dos painéis solares, que pode variar entre 25 e 30 anos, também é um fator importante a ser considerado no planejamento financeiro do investimento. De acordo com Nascimento et al. (2021), a durabilidade dos equipamentos e a garantia de desempenho ao longo dos anos tornam a energia solar uma solução economicamente vantajosa no longo prazo, principalmente em regiões com alta incidência solar.

A escolha de uma empresa qualificada para a instalação do sistema também influencia os custos iniciais do projeto. A qualidade dos serviços prestados e a experiência da empresa podem impactar diretamente na performance do sistema fotovoltaico, assegurando que ele opere com a máxima eficiência possível ao longo do tempo. A seleção dos componentes, como inversores e baterias, deve ser feita com cuidado, pois a incompatibilidade entre esses itens pode acarretar em falhas no sistema e custos adicionais com reparos e substituições. Ferreira (2024) ressalta que a contratação de profissionais com conhecimento técnico adequado e que sigam as melhores práticas de instalação pode reduzir significativamente a necessidade de manutenções corretivas, contribuindo para a otimização do investimento.

Por outro lado, a escolha de sistemas que permitam a integração com outras fontes de energia renovável, como a eólica, também tem se mostrado uma alternativa interessante para reduzir a dependência de fontes externas. Embora essa configuração possa aumentar os custos iniciais de instalação, ela pode gerar uma maior eficiência energética a longo prazo, uma vez que a combinação dessas fontes

de energia pode garantir uma produção contínua, mesmo nos dias nublados ou sem vento. Segundo Fraidenaich (2024), essa tendência tem ganhado força no Brasil, especialmente em regiões que enfrentam períodos prolongados de seca, onde a combinação de fontes pode assegurar a continuidade do fornecimento de energia.

Em termos de inovação tecnológica, a indústria de energia solar tem avançado consideravelmente. O desenvolvimento de painéis solares mais eficientes, que captam uma maior quantidade de radiação solar e convertem mais energia, é um dos principais focos de pesquisa e desenvolvimento dentro do setor. Isso impacta diretamente os custos iniciais, pois, à medida que a tecnologia evolui, os preços dos equipamentos tendem a cair, tornando a instalação de sistemas fotovoltaicos cada vez mais acessível. Mendonça (2024) aponta que, com o avanço das tecnologias, espera-se uma redução ainda maior nos custos de implantação, o que ampliará o acesso à energia solar em diversas camadas da sociedade.

É importante destacar que o cenário de preços também depende do tipo de projeto e da escalabilidade do sistema solar. Sistemas residenciais geralmente demandam um investimento inicial menor em comparação aos sistemas comerciais ou industriais, que exigem uma infraestrutura maior e mais robusta. No entanto, a adoção da energia solar em grande escala, tanto no setor privado quanto público, tem ganhado força, devido às vantagens econômicas e ambientais que essa tecnologia proporciona. Segundo o estudo de Nascimento et al. (2015), a expansão da energia solar fotovoltaica em larga escala no Brasil é vista como um passo fundamental para reduzir a dependência de fontes não-renováveis e combater as mudanças climáticas.

A utilização de tecnologias complementares, como o armazenamento de energia em baterias, também tem se tornado cada vez mais viável. Embora o custo das baterias ainda seja um fator importante a ser considerado no planejamento financeiro, os avanços tecnológicos têm contribuído para a redução desses custos. Com a inclusão de sistemas de armazenamento, é possível garantir uma maior autonomia energética, evitando a dependência de redes externas, especialmente em regiões remotas ou em locais onde o fornecimento de energia elétrica é instável. Segundo Shimomaebara e Peyerl (2021), os avanços nesse campo podem revolucionar a maneira como a energia solar é utilizada, ampliando ainda mais o seu potencial de aplicação.

Ainda assim, a inconstância da produção de energia solar, devido à variabilidade da radiação solar, pode impactar a eficácia de sistemas fotovoltaicos em determinadas regiões. Essa limitação, no entanto, tem sido mitigada por meio do desenvolvimento de novas tecnologias e pela implementação de sistemas híbridos que combinam diferentes fontes de energia renovável, como a eólica e a biomassa. A integração desses sistemas aumenta a confiabilidade do fornecimento e diminui os impactos causados pela variabilidade da produção solar. De acordo com Ottoelli et al. (2021), a diversificação das fontes de geração de energia é uma tendência crescente no Brasil, que visa garantir uma matriz energética mais equilibrada e resiliente.

Ademais, o mercado de energia solar no Brasil tem atraído investidores devido ao potencial de crescimento e à rentabilidade a longo prazo. A viabilidade de projetos solares em território brasileiro tem sido confirmada por diversos estudos que apontam a rentabilidade desse tipo de investimento, principalmente considerando o cenário de escassez hídrica e os custos crescentes com a energia convencional. Giacobbo (2024) salienta que o Brasil, por sua localização geográfica privilegiada, tem condições ideais para expandir ainda mais o uso da energia solar, destacando-se no cenário mundial como um dos principais mercados emergentes para essa tecnologia.

Com a ampliação da conscientização ambiental e a crescente pressão por fontes de energia mais limpas, o mercado de energia solar continuará a crescer nos próximos anos. A combinação de incentivos fiscais, redução de custos com equipamentos e o avanço das tecnologias certamente tornarão essa fonte de energia mais acessível e viável para um número ainda maior de brasileiros. Segundo Freitas et al. (2025), a transição para fontes renováveis é inevitável e, nesse contexto, a energia solar é fundamental, tanto para o desenvolvimento econômico quanto para a preservação do meio ambiente.

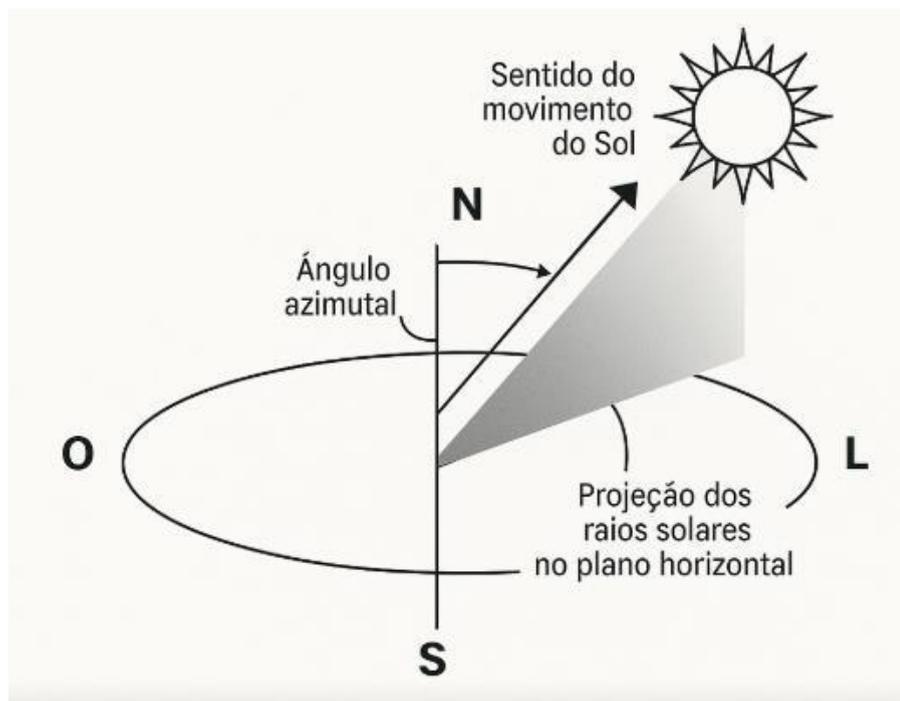
Com isso, ao considerarmos os investimentos iniciais necessários, é possível perceber que a adoção da energia solar envolve não apenas a análise dos custos imediatos, mas também a consideração de benefícios a longo prazo. O retorno financeiro pode ser expressivo, principalmente considerando a redução no valor das contas de energia elétrica e o impacto ambiental positivo. Por fim, é fundamental que o Brasil continue investindo em inovação e capacitação no setor de energia solar, garantindo que esse mercado continue a crescer de forma sustentável

e acessível a todos. A seguir, será abordada a *Inconstância do Sol* e seus impactos nos sistemas de energia solar.

## 2.5 Inconstância do Sol

A disponibilidade da radiação solar, fundamental para o funcionamento dos sistemas solares, não é constante, variando ao longo do dia e com as estações do ano. A intensidade da radiação pode ser afetada por fatores climáticos e geográficos, tornando-se um desafio para a eficiência desses sistemas. No entanto, para mitigar os efeitos dessa inconstância, a adoção de tecnologias complementares, como reservatórios térmicos, é essencial. Tais reservatórios permitem armazenar energia térmica gerada durante o dia, garantindo o fornecimento contínuo de energia, mesmo em períodos de baixa incidência solar. Em algumas situações, fontes complementares de aquecimento, como sistemas elétricos, podem ser incorporadas, proporcionando maior flexibilidade ao sistema. Dessa forma, é possível otimizar o aproveitamento da energia solar ao longo de todo o ano, sem que a eficiência seja comprometida (BEZERRA, 2021).

**Figura 2** – Trajetória aparente do Sol e projeção dos raios solares sobre o plano horizontal



**Fonte:** Bezerra, 2021

O uso de sistemas solares para geração de energia tem se tornado cada vez mais popular, especialmente em regiões com alto índice de radiação solar. Entretanto, a variação da intensidade solar ao longo do dia exige que se busque soluções para garantir um fornecimento constante e eficiente de energia. A implementação de sistemas de armazenamento térmico surge, portanto, como uma alternativa necessária para lidar com as flutuações naturais na disponibilidade de radiação. O desenvolvimento de novos materiais e tecnologias que melhorem a capacidade de armazenamento e a eficiência dos sistemas solares também tem sido foco de estudos e pesquisas. A combinação desses avanços com estratégias complementares de aquecimento pode levar a uma maior autonomia e sustentabilidade no uso da energia solar (FERREIRA, 2024).

O Brasil, devido à sua localização geográfica, apresenta grande potencial para a geração de energia solar. Contudo, a variabilidade da radiação solar, especialmente em regiões mais ao norte, impõe desafios à implementação de sistemas solares de grande escala. A solução para esses desafios envolve o aprimoramento da infraestrutura de armazenamento e o uso de fontes de energia complementares, como os aquecedores solares, que podem otimizar o uso da energia gerada. A integração de tecnologias como o monitoramento em tempo real e o ajuste automático da produção de energia solar pode contribuir para o gerenciamento mais eficiente dos recursos. A evolução desse tipo de tecnologia é essencial para superar a inconstância da radiação solar e garantir a viabilidade econômica dos sistemas solares (FRAIDENRAICH, 2024).

A variabilidade da radiação solar ao longo do ano exige uma análise detalhada dos fatores climáticos e sazonais que impactam os sistemas de geração de energia solar. Em regiões de maior incidência solar, como o nordeste brasileiro, essa variação pode ser menos acentuada, mas, mesmo assim, a instabilidade da radiação ao longo do dia demanda soluções inovadoras para maximizar a eficiência dos sistemas. O uso de sistemas híbridos, que combinam energia solar com outras fontes renováveis ou convencionais, tem se mostrado uma alternativa viável para reduzir os impactos das flutuações solares. Essa integração de tecnologias proporciona maior flexibilidade e segurança no fornecimento de energia, mesmo nos períodos de menor irradiação solar (MENDONÇA, 2024).

Embora a energia solar fotovoltaica seja considerada uma das fontes mais promissoras para a transição energética, a inconstância da radiação solar ainda

representa um obstáculo para a adoção plena dessa tecnologia. Para contornar essa questão, os pesquisadores têm se dedicado a desenvolver sistemas que integrem fontes de energia alternativas e complementares, garantindo que a demanda seja atendida em todo o ciclo diário e sazonal. A pesquisa sobre o uso de novas formas de armazenamento, como baterias de alta eficiência e tecnologias de hidrogênio, promete aumentar ainda mais a viabilidade dos sistemas solares, tornando-os mais autossuficientes e resilientes a variações climáticas (GIACOBBO, 2024).

A eficiência dos sistemas solares depende de diversos fatores, sendo a radiação solar um dos principais. Entretanto, a flutuação na intensidade dessa radiação ao longo do dia e das estações pode afetar diretamente a geração de energia, tornando a integração de sistemas de armazenamento fundamental para manter a continuidade da produção. A incorporação de soluções tecnológicas que permitam o controle dinâmico da geração de energia solar, como inversores inteligentes e sistemas de gerenciamento avançados, é fundamental para mitigar as inconstâncias. Com o avanço dessas tecnologias, torna-se possível ajustar a produção solar de acordo com a variação da radiação, otimizando os resultados e garantindo maior estabilidade ao sistema (MORAIS, 2015).

É importante ressaltar a possibilidade de integrar a energia solar com outras fontes renováveis, como a energia eólica, pois, a combinação dessas fontes pode ajudar a equilibrar a produção de energia ao longo do dia e do ano, já que a intensidade solar tende a ser maior durante o dia, enquanto a geração eólica pode ser mais eficiente durante a noite ou em períodos nublados. A integração dessas fontes renováveis oferece uma solução robusta para enfrentar as oscilações na disponibilidade de radiação solar, garantindo maior resiliência e continuidade na oferta de energia. Essa abordagem também contribui para a diversificação da matriz energética, um passo importante para a sustentabilidade a longo prazo (NASCIMENTO et al., 2021).

A diversificação das fontes de geração de energia tem se mostrado uma estratégia eficiente para contornar a inconstância da radiação solar. Além da integração com a energia eólica, o uso de sistemas híbridos que combinam energia solar com geradores movidos a biomassa ou com fontes geotérmicas pode ampliar ainda mais a segurança no fornecimento de energia. A implementação desses sistemas híbridos também favorece a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis, o que contribui para a mitigação das

emissões de gases de efeito estufa. Com essa estratégia, é possível não só melhorar a eficiência dos sistemas solares, mas também promover uma maior sustentabilidade na matriz energética (OTTONELLI et al., 2021).

A introdução de tecnologias de previsão e monitoramento contínuo da radiação solar é importante na otimização dos sistemas solares. Com o uso de sensores avançados e algoritmos de previsão, é possível antecipar as variações da radiação e ajustar o funcionamento dos sistemas de forma inteligente. Isso permite uma gestão mais eficiente da energia gerada, principalmente em locais onde a intensidade solar pode ser mais volúvel. O monitoramento em tempo real também facilita a detecção de falhas e a realização de manutenções preventivas, contribuindo para a longevidade dos sistemas solares e a redução de custos operacionais (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021).

Com o constante avanço da tecnologia, os sistemas de aquecimento solar têm se mostrado cada vez mais eficientes, mesmo diante das variações diárias da radiação solar. A utilização de coletadores solares de alto desempenho e o desenvolvimento de novos materiais para armazenamento térmico têm permitido otimizar o aproveitamento da energia solar, mesmo em períodos de baixa radiação. A capacidade de armazenar e utilizar a energia gerada durante o dia, mesmo em condições de céu nublado ou durante a noite, tem sido um dos maiores avanços no campo da energia solar. A pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais com maior eficiência térmica prometem impulsionar ainda mais essa tendência (FREITAS et al., 2025).

A necessidade de minimizar a inconstância da radiação solar na geração de energia levou à pesquisa de métodos mais eficientes de armazenamento. O uso de baterias de lítio e outros dispositivos de armazenamento de alta capacidade tem se mostrado promissor, permitindo que a energia gerada durante o dia seja estocada e utilizada em períodos de baixa radiação. Contudo, a eficiência desses sistemas ainda depende do avanço das tecnologias de baterias, que devem se tornar mais acessíveis e duráveis para viabilizar a implementação em larga escala. A pesquisa sobre o reaproveitamento de materiais para as baterias também é um campo relevante para garantir a sustentabilidade desses sistemas a longo prazo (NASCIMENTO et al., 2015).

A implementação de políticas públicas voltadas para o incentivo ao uso de energia solar tem sido um fator primordial para o avanço dessa tecnologia no Brasil.

Programas de financiamento e subsídios para a instalação de sistemas solares têm contribuído para a popularização dessa fonte de energia renovável, especialmente em áreas mais afastadas dos centros urbanos. Tais políticas públicas têm o poder de estimular a adoção de sistemas solares, ao mesmo tempo em que incentivam o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a eficiência e a capacidade de armazenamento. A integração de políticas públicas com iniciativas privadas é um caminho promissor para a consolidação da energia solar como uma fonte principal de geração de eletricidade (BEZERRA, 2021).

A busca pela sustentabilidade e a redução das emissões de carbono tem sido um dos maiores motores da adoção da energia solar no Brasil e no mundo. A redução da dependência de fontes de energia convencionais, como o petróleo e o carvão, é fundamental para garantir um futuro mais sustentável. A implementação de sistemas solares pode gerar uma economia significativa para os consumidores ao longo do tempo, com a diminuição da fatura de energia elétrica. Esse processo não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também representa uma oportunidade econômica significativa, principalmente em um contexto de crescente demanda por fontes de energia limpas e renováveis (FRAIDENRAICH, 2024).

### 3. ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA NO SISTEMA SOLAR COM TROCADOR DE CALOR

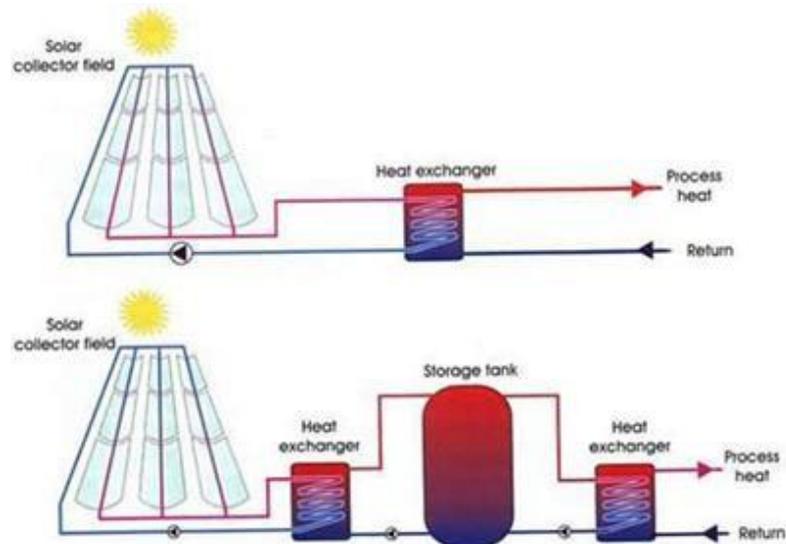
Este capítulo apresenta uma abordagem técnico-científica para estimar a produção de energia elétrica e energia térmica geradas por um sistema solar fotovoltaico com trocador de calor, considerando um modelo de instalação doméstica ou comercial de pequeno porte. Para isso, serão utilizados dados de radiação solar, eficiência dos equipamentos, condições de instalação e referências bibliográficas recentes que discutem a viabilidade, o funcionamento e o dimensionamento destes sistemas. A crescente preocupação com o meio ambiente e a busca por fontes de energia renovável têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias limpas, como a energia solar.

No contexto brasileiro, a elevada incidência solar é um fator determinante para o aproveitamento eficiente dessa fonte energética. A integração de sistemas híbridos, que combinam a geração elétrica e térmica, proporciona não apenas maior eficiência, mas também melhor aproveitamento da infraestrutura instalada. Nesse sentido, este capítulo visa oferecer um panorama técnico, econômico e ambiental da geração solar híbrida, evidenciando seu potencial para contribuir com a sustentabilidade e autonomia energética (NÓBREGA, 2020).

A energia solar pode ser convertida em eletricidade ou calor. No caso da energia elétrica, utiliza-se o efeito fotovoltaico, em que células solares transformam a radiação solar em corrente elétrica. Já na geração de energia térmica, os coletores solares aquecem um fluido (geralmente água) que pode ser utilizado para aquecimento de ambientes, processos industriais ou cogeração (NÓBREGA, 2020).

A **figura** a seguir apresenta dois esquemas de sistemas solares térmicos com trocador de calor. O primeiro mostra um sistema direto, em que o calor gerado pelos coletores solares é transferido diretamente para o processo. O segundo mostra um sistema com tanque de armazenamento térmico, que permite maior flexibilidade no uso do calor gerado:

**Figura 3** – Representação de dois sistemas solares térmicos: (acima) sistema direto com trocador de calor; (abaixo) sistema com tanque de armazenamento térmico, permitindo maior flexibilidade no uso da energia gerada.



**Fonte:** Nascimento, 2020

A conversão da energia solar em diferentes formas úteis permite uma ampla gama de aplicações, desde usos residenciais até industriais. A tecnologia envolvida nos sistemas solares tem evoluído significativamente, tornando os equipamentos mais acessíveis e eficientes. Além disso, a integração de soluções inteligentes, como sensores e sistemas de controle automático, tem contribuído para maximizar a eficiência e minimizar perdas (NASCIMENTO, 2020).

Segundo Bezerra (2021), o aproveitamento da radiação solar é uma das estratégias mais promissoras para a diversificação da matriz energética brasileira, devido à alta incidência solar na maioria do território nacional. Isso reforça a importância da adoção de tecnologias solares no Brasil. A energia gerada por um sistema fotovoltaico depende da irradiação solar local, da área total dos módulos, da eficiência dos painéis e das perdas do sistema.

A equação básica é:

$$1) E = H_t \times A \times \eta \times PR$$

Onde:

- E: Energia elétrica produzida (kWh/mês)
- $H_t$ : Irradiação solar mensal (kWh/m<sup>2</sup>)
- A: Área efetiva dos módulos (m<sup>2</sup>)
- $\eta$ : Eficiência dos módulos fotovoltaicos
- PR: Performance ratio (fator de desempenho do sistema, normalmente entre 0,75 e 0,85)

Exemplo: em uma região com irradiação solar de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia (equivalente a 150 kWh/m<sup>2</sup>/mês), com 10 m<sup>2</sup> de painéis de eficiência de 18% e PR = 0,80:

$$2) E = 150 \times 10 \times 0,18 \times 0,80 = 216 \text{ kWh/mês}$$

A energia térmica gerada por coletores solares depende da capacidade de aquecimento da radiação solar e da eficiência térmica do sistema. A equação aproximada é:

$$3) Q = H_t \times A \times \eta_t$$

Onde:

- Q: Energia térmica gerada (kWh/mês)
- $\eta_t$ : Eficiência térmica do coletor solar (em geral, entre 0,5 e 0,7)

Considerando os mesmos 10 m<sup>2</sup> de coletores e eficiência de 60%:

$$4) Q = 150 \times 10 \times 0,6 = 900 \text{ kWh/mês}$$

Quando combinamos um sistema solar térmico com um sistema fotovoltaico em um painel híbrido (PVT), é possível aproveitar a mesma superfície para gerar simultaneamente eletricidade e calor. Segundo Ferreira (2024) e Almeida et al. (2024), a cogeração com trocadores de calor acoplados aos módulos solares pode aumentar a eficiência global do sistema para mais de 70%.

A eficiência combinada pode ser estimada por:

$$5) \eta_{\text{global}} = \eta_{\text{PV}} + \eta_{\text{termica}} - (\eta_{\text{PV}} \times \eta_{\text{termica}})$$

Com  $\eta_{\text{PV}} = 0,18$  e  $\eta_{\text{termica}} = 0,6$ :

$$\eta_{\text{global}} = 0,18 + 0,6 - (0,18 \times 0,6) = 0,708 \text{ ou } 70,8\%$$

Um fator crítico nos sistemas fotovoltaicos é a perda de eficiência devido ao aumento da temperatura. Painéis solares perdem em média 0,4% de eficiência por grau Celsius acima de 25°C. A utilização de trocadores de calor para resfriar os painéis não apenas recupera energia térmica, mas também aumenta a produção elétrica (FERREIRA, 2024).

Estudos de Brum (2016) e Rodrigues (2014) indicam que a redução da temperatura do módulo em 10°C pode aumentar a eficiência fotovoltaica em até 4%.

Diversas pesquisas de campo apontam para o sucesso da aplicação de sistemas solares híbridos com cogeração em diferentes regiões do Brasil. O trabalho de Nascimento (2020) sobre painéis híbridos destaca que, em cidades do nordeste brasileiro, a irradiação elevada permite um retorno energético expressivo, com sistemas híbridos gerando até 30% mais energia útil do que sistemas fotovoltaicos convencionais.

Na pesquisa de Poswar (2022), foi analisado um sistema híbrido de biomassa com solar para pequenas comunidades isoladas. A análise revelou que a integração entre diferentes fontes pode garantir autonomia energética com baixa emissão de poluentes e baixo custo operacional.

Esses estudos demonstram que o aproveitamento conjunto da energia elétrica e térmica traz benefícios substanciais, tanto econômicos quanto ambientais, além de contribuir para a sustentabilidade e a segurança energética.

A análise de viabilidade econômica de sistemas solares híbridos deve considerar o custo inicial de instalação, vida útil dos componentes, economia com energia elétrica e manutenção. Segundo Mendonça (2024), o payback de um sistema híbrido varia entre 5 e 8 anos, dependendo do porte da instalação e do consumo energético do usuário.

Freitas et al. (2025) realizaram uma comparação entre sistemas fotovoltaicos e sistemas térmicos residenciais e concluíram que a combinação de ambos apresenta melhor retorno econômico e eficiência energética total superior.

Além disso, a adoção desses sistemas contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, estando alinhada com os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil na agenda climática.

A aplicação da energia térmica solar no setor industrial tem demonstrado resultados promissores, especialmente em processos que requerem aquecimento de fluidos em temperaturas moderadas. Indústrias de alimentos, bebidas, têxteis e químicas já adotam sistemas de coletores solares para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e mitigar emissões de carbono. Além disso, a previsibilidade da radiação solar em várias regiões brasileiras torna viável o dimensionamento de sistemas eficientes e adaptados às necessidades locais. Outro ponto relevante é a possibilidade de integração com outras fontes energéticas, promovendo sistemas híbridos mais resilientes. A substituição de caldeiras a gás ou óleo por sistemas solares também contribui para ganhos ambientais consideráveis. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento têm viabilizado novos materiais e técnicas de construção de coletores mais eficientes e duráveis. Assim, a energia térmica se consolida como uma solução estratégica para a transição energética industrial (GIACOBBO, 2024).

No setor residencial, o uso de coletores solares térmicos para aquecimento de água representa uma das formas mais acessíveis de inserção das energias renováveis. Muitas residências já contam com sistemas de baixo custo que suprem totalmente a demanda por água quente em regiões de clima quente e ensolarado. Comparado com chuveiros elétricos, esses sistemas proporcionam significativa economia de energia e redução na conta de luz. A implementação em larga escala desses dispositivos poderia aliviar a pressão sobre o sistema elétrico nacional, principalmente nos horários de pico. Além disso, incentivos governamentais e programas de financiamento popular podem acelerar essa adesão. O Brasil possui um dos maiores potenciais mundiais para esse tipo de aplicação, sobretudo nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. A conscientização da população sobre os benefícios ambientais e econômicos também é essencial para ampliar o uso da tecnologia (FREITAS et al., 2025).

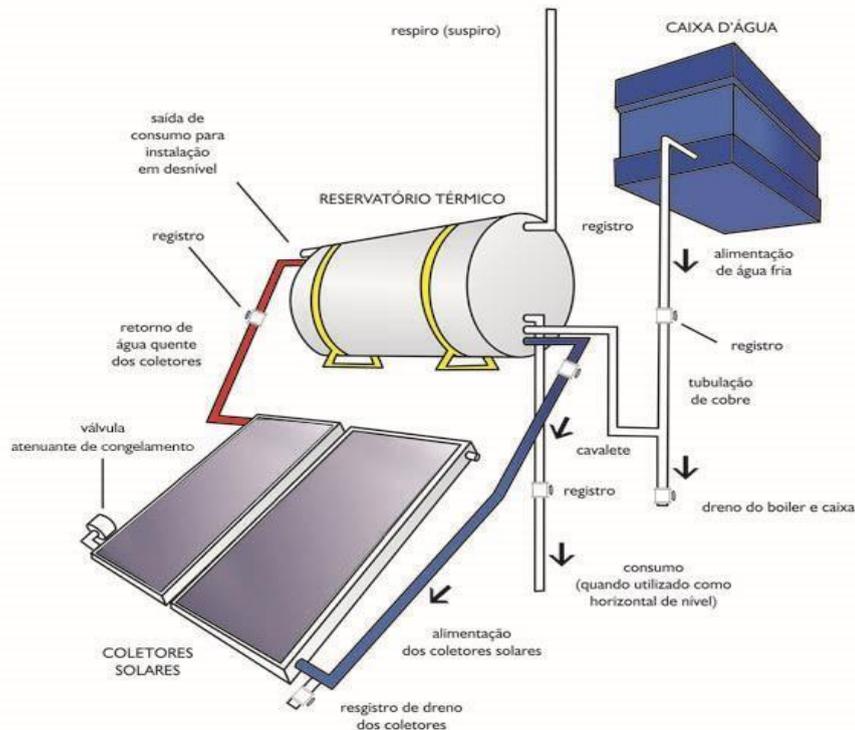
Uma das grandes vantagens dos sistemas térmicos solares está na sua simplicidade operacional. Os coletores planos e de tubos evacuados, por exemplo, possuem funcionamento passivo, o que reduz falhas operacionais e aumenta sua vida útil. Essa simplicidade também permite a utilização da tecnologia em áreas

remotas ou com infraestrutura limitada, como comunidades rurais e assentamentos isolados. Em muitos casos, o sistema pode operar por décadas com manutenção mínima, como a verificação periódica do fluido térmico e limpeza das superfícies captadoras. A independência energética gerada por esses sistemas contribui para o desenvolvimento sustentável e a autonomia local. Em comparação com sistemas fotovoltaicos, que demandam conversão elétrica e controle eletrônico, os sistemas térmicos se destacam pela robustez. Essa robustez é um dos fatores que motivam sua adoção em ambientes tropicais com alta incidência solar (BEZERRA, 2021).

É importante destacar que a eficiência de conversão dos coletores térmicos supera amplamente a dos módulos fotovoltaicos. Enquanto os primeiros podem atingir eficiências superiores a 70%, os painéis solares tradicionais raramente ultrapassam 20% de eficiência. Isso significa que, para a mesma área exposta ao sol, o sistema térmico aproveita muito mais a energia disponível. Essa característica é particularmente vantajosa em aplicações que exigem calor direto, como aquecimento de piscinas, secagem de grãos ou processos químicos. A escolha entre uma tecnologia e outra deve considerar a demanda energética específica: calor ou eletricidade. Além disso, o custo inicial de implantação dos sistemas térmicos tende a ser menor, com retorno financeiro mais rápido. Em longo prazo, isso representa maior viabilidade econômica e menor impacto ambiental (FRAIDENRAICH, 2024).

Para potencializar ainda mais o desempenho dos sistemas térmicos, o isolamento térmico eficiente dos componentes é importante. Reservatórios mal isolados ou tubulações expostas podem causar perdas significativas de calor, comprometendo a eficiência global. Materiais como poliuretano expandido, lã de vidro e mantas refletivas são frequentemente utilizados para minimizar essas perdas. Também é fundamental o correto posicionamento dos coletores, geralmente voltados para o norte, e inclinados de acordo com a latitude local para maximizar a captação solar. Sistemas bem projetados e instalados podem atingir eficiências superiores a 80% na conversão de energia solar em calor útil. Investimentos em projetos bem elaborados e em mão de obra qualificada são, portanto, essenciais. O conhecimento técnico sobre dimensionamento, instalação e manutenção é decisivo para o sucesso desses sistemas (ALMEIDA et al., 2024).

**Figura 4** - Esquema de funcionamento de um sistema de aquecimento solar térmico com circulação natural. O sistema é composto por coletores solares, reservatório térmico, caixa d'água e tubulações, permitindo o aquecimento e o armazenamento de água utilizando energia solar.



**Fonte:** Almeida et al., 2024

A integração entre sistemas térmicos solares e outras tecnologias, como termogeradores e sistemas de cogeração, tem gerado novas oportunidades. Os termogeradores, por exemplo, podem aproveitar o calor excedente dos coletores para produzir eletricidade em pequena escala, por meio do efeito Seebeck. Essa combinação amplia o aproveitamento energético e melhora a autonomia das instalações. Já os sistemas de cogeração associam aquecimento, resfriamento e produção de energia elétrica, maximizando a eficiência energética em edifícios comerciais e industriais. A flexibilidade desses arranjos permite adaptar a produção às variações sazonais de demanda. Além disso, tecnologias como resfriamento geotérmico podem ser combinadas com aquecimento solar para controle térmico em locais com climas extremos. Esses sistemas híbridos representam o futuro da geração distribuída de energia (FERREIRA, 2024).

Em áreas urbanas, a adoção de soluções térmicas solares enfrenta desafios como espaço disponível e sombreamento de edifícios vizinhos. Ainda assim, há

grande potencial para aplicações em coberturas de prédios, escolas, hospitais e centros esportivos. Políticas públicas de incentivo, como a obrigatoriedade de sistemas solares em novas construções, têm demonstrado sucesso em cidades como São Paulo e Belo Horizonte. Essas iniciativas ajudam a reduzir a demanda energética urbana e promovem a descentralização da matriz energética. Além disso, elas incentivam a criação de empregos no setor de instalação e manutenção de sistemas térmicos. A implementação de normas técnicas claras e fiscalização adequada garante a qualidade e segurança das instalações. A urbanização sustentável passa, necessariamente, pelo uso inteligente da energia solar (OTTONELLI et al., 2021).

O Brasil possui condições ideais para o desenvolvimento de tecnologias solares térmicas, devido à elevada irradiação média em todo o território nacional. Regiões como o Nordeste e o Centro-Oeste apresentam mais de 2.500 horas de sol por ano, o que garante alto rendimento dos sistemas. No entanto, o aproveitamento desse potencial ainda é limitado pela falta de políticas estruturadas e investimento em pesquisa aplicada. O desenvolvimento de tecnologias nacionais, adaptadas ao clima e à realidade socioeconômica brasileira, é fundamental. Instituições públicas e privadas precisam fomentar programas de inovação, treinamento técnico e difusão tecnológica. A cooperação entre universidades, centros de pesquisa e indústria pode acelerar o avanço do setor solar térmico. O fortalecimento da cadeia produtiva também contribui para a redução de custos e a geração de empregos (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021).

A análise da viabilidade econômica dos sistemas térmicos é um aspecto decisivo para sua disseminação. Estudos demonstram que, mesmo sem subsídios, o retorno do investimento ocorre entre 2 e 5 anos, dependendo do perfil de consumo e da região. Esse retorno rápido se deve ao baixo custo operacional e à economia com energia elétrica ou combustíveis. Em alguns casos, o sistema pode gerar excedente térmico que é aproveitado em outras aplicações, aumentando a rentabilidade. Também é importante considerar o valor agregado aos imóveis que possuem sistemas de energia renovável instalados. Essa valorização ocorre tanto por critérios ambientais quanto pelo conforto e economia proporcionados. A longo prazo, os benefícios ambientais, sociais e econômicos superam amplamente o investimento inicial (MENDONÇA, 2024).

A adoção de coletores solares térmicos também contribui para a segurança energética nacional. Ao reduzir a dependência de fontes não renováveis e vulneráveis à oscilação de preços internacionais, o país fortalece sua soberania energética. Em momentos de crise hídrica, como os enfrentados nos últimos anos, a energia solar térmica se apresenta como uma solução complementar e estratégica. A diversificação da matriz energética com fontes solares reduz riscos e aumenta a resiliência do sistema. Além disso, há uma correlação direta entre maior uso de renováveis e redução de emissão de gases de efeito estufa. A mitigação das mudanças climáticas é um dos maiores desafios globais, e a energia térmica solar é importante nessa agenda. Sua contribuição vai além da economia de energia: ela transforma o modelo energético em direção à sustentabilidade (GIACOBBO, 2024).

Apesar das vantagens, ainda há barreiras culturais e informacionais que limitam a adoção de sistemas térmicos solares. Muitos consumidores desconhecem o funcionamento e os benefícios dessas tecnologias, o que gera receio e resistência. Campanhas educativas, workshops e programas de demonstração são essenciais para difundir o conhecimento. A formação de técnicos e engenheiros especializados também é necessária para garantir a qualidade das instalações e ampliar a confiança do público. O setor público pode atuar como exemplo, instalando sistemas térmicos em escolas, hospitais e repartições. Essas ações demonstrativas ajudam a criar uma cultura de valorização da energia solar. O avanço da transição energética depende, em grande parte, do engajamento da sociedade (NASCIMENTO et al., 2015).

Os sistemas de aquecimento solar também podem ser utilizados em processos agrícolas, como a secagem de grãos e frutas. Essa aplicação permite o aproveitamento de excedentes solares e contribui para a agregação de valor aos produtos rurais. Pequenos produtores podem se beneficiar significativamente, reduzindo custos com combustíveis e aumentando sua autonomia. Além disso, o uso de energia solar evita a poluição causada pela queima de lenha ou diesel, comuns em secadores convencionais. A adoção dessas soluções no campo também promove o desenvolvimento regional e a sustentabilidade das cadeias produtivas. Políticas públicas voltadas ao agro podem incluir linhas de crédito específicas para esses sistemas. A descentralização da energia térmica no meio rural amplia o alcance das energias renováveis (POSWAR, 2022).

Com o avanço da digitalização, surgem sistemas inteligentes de controle e monitoramento de energia térmica solar. Sensores de temperatura, pressão e fluxo permitem ajustes automáticos no sistema, otimizando o desempenho. Além disso, softwares de simulação auxiliam no planejamento e dimensionamento mais preciso das instalações. Essa automação torna os sistemas mais eficientes e adaptáveis às variações de demanda e condições climáticas. A integração com dispositivos móveis permite o acompanhamento remoto e facilita a manutenção preventiva. Essas inovações aumentam a confiabilidade dos sistemas e reduzem os custos operacionais ao longo do tempo. O futuro da energia térmica solar passa, portanto, pela combinação entre simplicidade estrutural e inteligência operacional (RODRIGUES, 2014).

A crescente busca por edifícios sustentáveis e com alta eficiência energética tem impulsionado o uso de energia térmica solar no setor da construção civil. Projetos arquitetônicos modernos já preveem a instalação de coletores solares térmicos como parte integrante do design, visando atender às exigências de certificações ambientais como LEED e AQUA. O aquecimento solar de água é frequentemente associado a outras soluções passivas, como ventilação natural e isolamento térmico eficiente, criando edificações com baixo impacto ambiental. Além disso, essas soluções contribuem para o conforto térmico dos usuários e para a redução da pegada de carbono da construção. Incorporadoras e construtoras têm percebido o valor mercadológico de ofertar imóveis com infraestrutura sustentável. Esse diferencial pode ser decisivo no momento da compra, especialmente entre consumidores mais conscientes. O futuro das edificações inteligentes está intimamente ligado ao uso racional e renovável da energia (MORAIS, 2015).

O desenvolvimento de painéis solares híbridos, que combinam a geração térmica e fotovoltaica, representa uma inovação promissora. Esses dispositivos captam simultaneamente calor e eletricidade, aumentando o rendimento energético por metro quadrado instalado. A tecnologia é particularmente útil em locais com espaço limitado, como telhados de edifícios comerciais ou residenciais. A sinergia entre os dois sistemas reduz perdas de calor nos módulos fotovoltaicos e melhora o desempenho geral. No entanto, ainda há desafios relacionados ao custo e à durabilidade dos materiais utilizados, o que demanda mais pesquisa e desenvolvimento. A consolidação dessa tecnologia poderá tornar a energia solar ainda mais versátil e eficiente. Projetos-piloto já demonstraram sua viabilidade

técnica e apontam para um futuro promissor da integração solar multifuncional (NASCIMENTO, V. F., 2020).

O uso de trocadores de calor solo-ar, integrados a sistemas térmicos solares, tem se mostrado uma estratégia eficaz para climatização de ambientes. Essa tecnologia aproveita a temperatura mais estável do subsolo para pré-aquecer ou resfriar o ar que circula no interior dos edifícios. Quando combinada com coletores solares, pode-se manter uma temperatura confortável com baixo consumo energético. Esse tipo de sistema é especialmente adequado para construções em áreas com grande variação térmica entre o dia e a noite. Estudos têm demonstrado que a eficiência térmica aumenta significativamente com o uso de métodos construtais no projeto dos trocadores. Além disso, o uso de materiais recicláveis na construção desses dispositivos contribui para uma arquitetura mais sustentável. Trata-se de uma solução ambientalmente amigável e com grande potencial de replicação (BRUM, 2016).

Em países de clima tropical como o Brasil, o aproveitamento térmico da radiação solar tem vantagens técnicas e econômicas incomparáveis. A substituição de fontes fósseis por coletores solares em aquecimento de água e processos industriais reduz a emissão de gases de efeito estufa de forma direta e mensurável. Além disso, o uso da energia térmica solar está alinhado com os compromissos internacionais assumidos pelo país no Acordo de Paris. A integração de soluções solares térmicas em políticas públicas ambientais e energéticas pode acelerar o cumprimento das metas de redução de carbono. A combinação entre tecnologias acessíveis, disponibilidade solar e políticas bem estruturadas forma a base de uma transição energética eficaz. O caminho para uma matriz limpa passa pela valorização dessas soluções já disponíveis (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021).

Na região Nordeste do Brasil, marcada por altos índices de irradiação solar, a energia térmica apresenta uma solução estratégica para diversas aplicações, inclusive no combate à pobreza energética. Muitas comunidades rurais ainda utilizam fontes precárias para aquecer água, como fogueiras e botijões de gás, que implicam riscos à saúde e custos elevados. A introdução de sistemas solares térmicos nesses contextos melhora a qualidade de vida e promove a inclusão energética. Projetos sociais que combinam educação, capacitação técnica e financiamento acessível têm apresentado bons resultados na disseminação da tecnologia. O impacto positivo é sentido tanto na esfera ambiental quanto na social,

reforçando a função da energia solar como vetor de desenvolvimento humano. Essa abordagem integrada é fundamental para assegurar justiça energética e reduzir desigualdades regionais (NASCIMENTO et al., 2015).

A análise térmica dos sistemas solares é uma etapa essencial para seu desempenho ideal. Modelos computacionais têm sido desenvolvidos para simular o comportamento térmico dos coletores e dos reservatórios sob diferentes condições de operação. Esses modelos permitem prever perdas de calor, eficiência de captação e tempo de resposta do sistema, otimizando o dimensionamento e reduzindo custos. Ferramentas baseadas em métodos numéricos e análises por elementos finitos oferecem precisão e flexibilidade nos estudos de projeto. Além disso, simulações permitem avaliar a influência de variáveis climáticas e operacionais, favorecendo o planejamento em diversas regiões geográficas. Esse tipo de análise é indispensável para aplicações em larga escala ou com alta demanda térmica. O avanço da modelagem térmica fortalece a confiabilidade e a performance dos sistemas solares (NÓBREGA, 2020).

As oportunidades de crescimento do setor solar térmico no Brasil ainda são pouco exploradas diante do seu potencial. Apesar da maturidade tecnológica e das vantagens econômicas, o mercado apresenta baixa penetração em segmentos como o hoteleiro, educacional e hospitalar. A adoção mais ampla depende de ações coordenadas entre governos, empresas e instituições de ensino. A inclusão da energia solar térmica em programas de eficiência energética, linhas de crédito específicas e incentivos fiscais pode acelerar sua difusão. Além disso, o estabelecimento de metas nacionais para a participação da energia térmica na matriz energética incentivaria investimentos. O setor necessita também de campanhas institucionais que valorizem a solução perante o público geral e empresarial. O reconhecimento de seu potencial estratégico deve ser traduzido em políticas concretas (OTTONELLI et al., 2021).

A tecnologia de armazenamento térmico é um componente vital para a continuidade do fornecimento de calor em períodos sem insolação, como à noite ou em dias nublados. Os sistemas mais comuns utilizam reservatórios de água com isolamento térmico, mas há estudos avançando para o uso de materiais de mudança de fase (PCMs) que oferecem maior densidade energética. Esses materiais armazenam calor latente durante a transição de estado, liberando-o lentamente conforme a temperatura ambiente diminui. Isso permite maior controle sobre a

disponibilidade térmica e reduz perdas por dissipação. Em aplicações industriais, o uso de sais fundidos e outros compostos tem sido testado com sucesso para armazenar calor em maiores escalas. O aperfeiçoamento desses sistemas aumenta a confiabilidade das soluções térmicas solares e possibilita sua adoção em locais com menor regularidade solar. O armazenamento eficiente é o elo que conecta a intermitência solar à demanda constante por calor (FREITAS et al., 2025).

O crescimento das cidades e a demanda por soluções sustentáveis têm impulsionado a adoção de tecnologias solares térmicas em condomínios residenciais e edifícios multifamiliares. Nesses contextos, o uso compartilhado de coletores solares e reservatórios centralizados torna o sistema mais eficiente e economicamente viável. A economia gerada pode ser distribuída entre os moradores, reduzindo significativamente os custos com energia elétrica. Além disso, os condomínios ganham em valorização imobiliária, pois oferecem soluções sustentáveis e confortáveis. O gerenciamento coletivo da energia também pode fomentar a consciência ambiental e o senso de comunidade entre os residentes. A legislação urbana é nesse processo, estabelecendo incentivos ou exigências para construções novas. O uso coletivo da energia solar térmica é um exemplo de como a sustentabilidade pode ser incorporada à vida urbana (MENDONÇA, 2024).

Além do aquecimento de água, a energia térmica solar pode ser utilizada em sistemas de refrigeração por absorção, especialmente em locais onde há alta demanda de climatização. Essa tecnologia permite converter calor em frio utilizando líquidos refrigerantes e soluções absorventes, como água e brometo de lítio. A combinação com energia solar torna possível climatizar ambientes de forma sustentável, sem o uso intensivo de eletricidade. É uma alternativa especialmente viável para edifícios comerciais, hospitais e centros de dados, onde o consumo de energia com ar-condicionado é elevado. Apesar de ainda pouco difundida no Brasil, a refrigeração solar já é realidade em outros países tropicais. Com políticas adequadas e maior divulgação, essa aplicação pode ganhar espaço e representar uma revolução no setor de climatização. Trata-se de uma extensão natural da energia solar térmica para novos usos (FERREIRA, 2024).

Na agricultura, a energia térmica solar tem sido explorada para a pasteurização de leite, esterilização de utensílios e aquecimento de estufas. Tais aplicações contribuem para o aumento da produtividade, redução de perdas e melhoria da qualidade sanitária dos alimentos. Em regiões frias ou de altitude, o uso

de coletores solares em estufas permite estender o período de cultivo e proteger plantas sensíveis ao frio. Já a pasteurização solar representa uma alternativa econômica e ecológica para pequenos produtores de leite, que muitas vezes não têm acesso a tecnologias convencionais. A simplicidade dos sistemas permite sua adoção sem necessidade de grande infraestrutura. Isso favorece a agricultura familiar e impulsiona práticas mais sustentáveis no campo. A energia térmica solar, assim, contribui diretamente para a segurança alimentar e o desenvolvimento rural (BEZERRA, 2021).

A normatização e a certificação de componentes solares térmicos são fundamentais para assegurar a qualidade e a confiança do consumidor. No Brasil, o INMETRO e a ABNT desempenham papéis importantes na criação de normas técnicas que regulam desde a fabricação até a instalação dos sistemas. A certificação garante que os produtos atendam a critérios mínimos de desempenho e segurança, protegendo o consumidor final e fortalecendo o mercado. Além disso, normas bem definidas incentivam a inovação tecnológica e estabelecem parâmetros para financiamento e incentivos públicos. O cumprimento dessas normas deve ser fiscalizado de forma rigorosa para evitar fraudes e garantir a credibilidade do setor. A normatização é, portanto, uma base estruturante para a expansão do mercado solar térmico. Seu fortalecimento deve caminhar junto ao crescimento da demanda (ALMEIDA et al., 2024).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa apresenta e discute os resultados obtidos nos testes do sistema solar com trocador de calor e reuso de água, realizados em condições reais de operação. Diferente dos testes laboratoriais padronizados, que são feitos a 25 °C, o experimento foi conduzido em ambiente com temperatura elevada, o que impacta expressivamente o desempenho do painel solar. A análise termográfica demonstrou que o módulo fotovoltaico atinge temperaturas superiores a 50 °C em operação, resultando em perdas de eficiência que não são previstas nos testes de fábrica.

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis, associada à necessidade de autonomia em regiões remotas ou com fornecimento instável de eletricidade, impulsiona a aplicação de sistemas fotovoltaicos híbridos. Neste experimento, foi montado e analisado um sistema híbrido composto por painel solar, controlador de carga, bateria, inversor e uma bomba de água, permitindo operação tanto com radiação solar direta quanto por armazenamento em bateria. O painel solar utilizado, modelo RS6E-150P da Resun, possui potência máxima de 150W, com corrente operacional de 8,33A e tensão de 18V. Trata-se de um painel policristalino, cuja eficiência é adequada para aplicações de pequeno porte como sistemas de bombeamento ou iluminação rural. A escolha deste módulo é coerente com a literatura, que aponta os módulos policristalinos como alternativas economicamente viáveis e eficientes em climas tropicais (NASCIMENTO, 2021).

**Figura 5** – Painel Solar Fotovoltaico Resun RS6E-150P



**Fonte:** Próprio autor, 2025

O sistema é gerenciado por um controlador de carga EPEVER VS2024AU, que regula o fluxo energético entre painel, bateria e carga. Esse dispositivo é essencial para a segurança e vida útil do sistema, evitando sobrecarga ou descarga profunda da bateria, o que condiz com as boas práticas indicadas por FREITAS et al. (2025), que destacam a importância do gerenciamento inteligente em sistemas fotovoltaicos.

**Figura 6** – Controlador de Carga EPEVER VS2024AU



**Fonte:** Próprio autor, 2025

A energia excedente gerada durante o período de insolação é armazenada em uma bateria estacionária de 12V/7Ah, garantindo o funcionamento da carga (no caso, uma bomba submersível de baixa tensão) durante períodos nublados ou noturnos. Essa capacidade de operar independentemente da luz solar caracteriza o sistema como híbrido, oferecendo maior confiabilidade. Tal abordagem é alinhada com as propostas de POSWAR (2022), que reforça o valor dos sistemas híbridos para suprir demandas energéticas críticas em localidades isoladas.

**Figura 7** – Inversor de frequência



**Fonte:** Próprio autor, 2025

O inversor de 300W da marca High-Link converte a energia armazenada em corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC), tornando o sistema compatível com aparelhos domésticos comuns. Segundo BEZERRA (2021), a integração de inversores em sistemas solares amplia significativamente a aplicação e utilidade dos mesmos, sendo um componente essencial para sistemas residenciais off-grid.

Um ponto relevante é a inclusão de um disjuntor bipolar de 20A (STECK), fundamental para a proteção do circuito contra sobrecorrentes. Esse tipo de cuidado técnico é discutido por GIACOBBO (2024), que ressalta a importância da segurança elétrica em projetos de geração distribuída.

**Figura 8** – Disjuntor bipolar STECK 20A



**Fonte:** Próprio autor, 2025

Na fase experimental, foram observadas duas situações operacionais distintas:

1. Modo solar direto: em condições de elevada radiação solar, o painel forneceu energia suficiente para acionar diretamente a bomba submersível via o controlador, sem recorrer à bateria.
2. Modo noturno/nublado: na ausência de sol, a bateria alimentou a bomba com o mesmo desempenho, validando a eficiência do sistema híbrido.

Essa flexibilidade operacional destaca-se como uma das principais vantagens do sistema, em consonância com FRAIDENRAICH (2024), que enfatiza a importância

da diversificação de fontes em cenários de transição energética.

**Figura 9** – Bomba submersível usada como carga



**Fonte:** Próprio autor, 2025

O uso de um sensor de temperatura com display digital, embora não essencial para o funcionamento elétrico, adiciona um elemento de monitoramento ambiental, permitindo o registro térmico durante o experimento. Tal instrumento é especialmente útil em aplicações que exigem controle de temperatura, como sistemas de climatização ou aquecimento solar, conforme discutido por ALMEIDA et al. (2024).

**Figura 10** – Controlador de temperatura



**Fonte:** Próprio autor, 2025

Assim, este estudo confirma a viabilidade técnica de um sistema solar híbrido de pequeno porte, mostrando-se uma alternativa acessível, escalável e aplicável a diversas necessidades. A sua simplicidade de montagem, aliada à segurança e autonomia operacional, reforça o potencial da energia solar como vetor de inclusão energética e sustentabilidade (MENDONÇA, 2024).

**Figura 11** – Sensor de temperatura



**Fonte:** Próprio autor, 2025

#### 4.1 Potência do Módulo Solar

Para calcular a potência média mensal do módulo solar, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$E_{gm} = (P \times I_{nd} \times \eta_{sistema} \times 30) / 1000$$

Onde:

- $E_{gm}$ : Energia gerada mensalmente (kWh);
- $P$ : Potência do módulo solar (W);
- $I_{nd}$ : Irradiação média diária (kWh/m<sup>2</sup>/dia);
- $\eta_{sistema}$ : Eficiência do sistema.

Com base nos dados experimentais:  $P = 150 \text{ W}$ , Irradiação = 4,43 kWh/m<sup>2</sup>/dia, Eficiência = 98%, obteve-se:

$$E_{gm} = (150 \times 4,43 \times 0,98 \times 30) / 1000 = 15,95 \text{ kWh/mês}$$

## 4.2 Perda de Eficiência por Temperatura

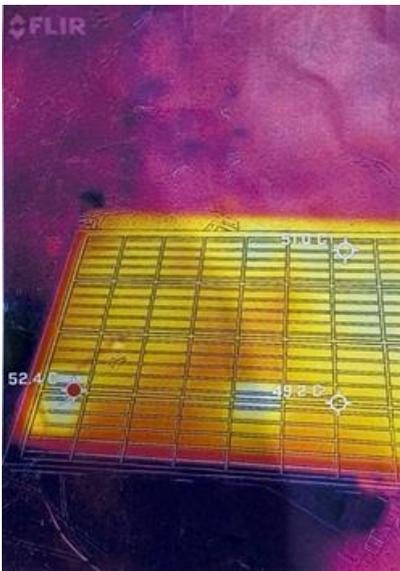
A câmera termográfica indicou que a temperatura média do painel chegou a aproximadamente 50,8 °C com o sistema desligado. Considerando que os testes de fábrica são realizados a 25 °C e que a cada grau acima disso ocorre perda de 0,4% na eficiência, temos:

$$\Delta T = 50,8 - 25 = 25,8 \text{ °C} \Rightarrow \text{Perda} = 25,8 \times 0,004 = 10,32\%$$

Energia corrigida:

$$15,95 - (15,95 \times 0,1032) = 14,31 \text{ kWh/mês}$$

**Figura 12** – Imagem térmica com sistema desligado (alta temperatura)



**Fonte:** Próprio autor, 2025

## 4.3 Sistema com Refrigeração Ativa

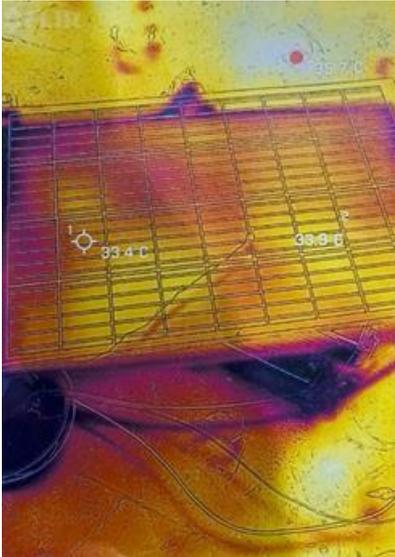
Com o sistema de refrigeração ativo, a temperatura do painel foi reduzida para uma média de 33,65 °C, conforme mostra a imagem térmica. Isso representa uma perda de eficiência significativamente menor:

$$\Delta T = 33,65 - 25 = 8,65 \text{ °C} \Rightarrow \text{Perda} = 8,65 \times 0,004 = 3,46\%$$

Energia corrigida:

$$15,95 \times (1 - 0,0346) = 15,40 \text{ kWh/mês}$$

**Figura 13** – Imagem térmica com sistema ligado (temperatura reduzida)



Fonte: Próprio autor, 2025

#### 4.4 Consumo do Sistema de Refrigeração e Bomba

O sistema de apoio, composto por uma ventoinha e uma bomba, consome:

$$E_{\text{ventoinha}} = (4,335 \times 6 \times 30) / 1000 = 0,78 \text{ kWh/mês}$$

$$E_{\text{bomba}} = (3,81 \times 6 \times 30) / 1000 = 0,6858 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Total} = 1,4658 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Energia líquida gerada: } 15,40 - 1,4658 = 13,93 \text{ kWh/mês}$$

#### 4.5 Comparativo de Custo com Aquecimento Elétrico

Para aquecer 20 litros de água em 5 °C:

$$\text{Energia necessária} = 0,116 \text{ kWh} \Rightarrow \text{Custo diário} = \text{R\$ } 0,09$$

$$\text{Custo mensal com sistema elétrico: R\$ } 2,70$$

$$\text{Custo mensal com sistema solar: R\$ } 1,02$$

$$\text{Economia: R\$ } 1,68/\text{mês}$$

#### 4.6 Discussão

Os resultados evidenciam que o desempenho real do módulo solar é sensivelmente afetado pela temperatura ambiente. A discrepância entre os testes laboratoriais padronizados a 25 °C e as condições reais de uso foi comprovada pelas imagens termográficas. A perda de até 10% de eficiência sem refrigeração pode

comprometer a geração de energia esperada.

A implementação do sistema de refrigeração se mostrou eficaz, reduzindo a temperatura do painel em mais de 15 °C e recuperando cerca de 1,1 kWh/mês. Mesmo considerando o consumo dos dispositivos auxiliares, o sistema híbrido proporciona maior eficiência energética e menor custo operacional. Esses dados reforçam a importância de considerar as condições reais no dimensionamento e avaliação de sistemas solares.

Deste modo, os resultados obtidos ao longo do experimento evidenciam de forma clara e inequívoca a discrepância entre os valores de desempenho anunciados em condições laboratoriais e o comportamento real do sistema em campo. O teste termográfico revelou que, sob radiação solar direta e sem mecanismos de resfriamento, a temperatura do painel atingiu em média 50,8 °C. Considerando que os ensaios laboratoriais padronizados ocorrem a 25 °C, esse aumento de temperatura implicou uma perda de eficiência de aproximadamente 10,3%. Trata-se de uma diferença que compromete diretamente a previsão de energia gerada, especialmente em regiões de clima quente.

Esse fenômeno é amplamente documentado na literatura, que aponta uma perda média de 0,4% de eficiência por grau Celsius acima de 25 °C. Na prática, isso significa que módulos instalados em áreas tropicais ou mal ventiladas podem operar com até 15% abaixo do seu desempenho nominal, caso nenhuma medida mitigadora seja adotada.

A instalação do sistema de refrigeração ativo — com uso de ventoinha e bomba de circulação — demonstrou uma significativa redução térmica, baixando a temperatura do painel para cerca de 33,65 °C. Como consequência, a perda de eficiência caiu para 3,46%, evidenciando a eficácia do resfriamento como estratégia de otimização. Embora esse sistema consuma energia elétrica adicional (cerca de 1,46 kWh/mês), os ganhos energéticos líquidos justificam sua adoção em contextos de elevada exposição solar. Além disso, o custo operacional total do sistema híbrido (solar + refrigeração) ainda se mostrou inferior ao custo mensal de sistemas puramente elétricos de aquecimento de água.

Esse cenário reforça uma crítica fundamental ao modelo atual de avaliação de desempenho de sistemas solares: os dados de fábrica, embora úteis como referência, não devem ser utilizados como valores absolutos para projeções de campo. O dimensionamento adequado de instalações fotovoltaicas deve

necessariamente considerar fatores ambientais locais, incluindo temperatura média, ventilação natural, sombreamento, entre outros.

Além do impacto térmico, a monografia também destaca a importante função da termografia como ferramenta de diagnóstico. As imagens capturadas forneceram evidência visual direta da concentração de calor nas células do módulo e do efeito da ventilação ativa, representando uma abordagem de baixo custo e alta eficácia para validar intervenções técnicas.

Deste modo, é importante mencionar que a combinação entre a geração fotovoltaica e a recuperação térmica, mesmo que de maneira indireta, insere o sistema analisado no conceito de cogeração solar. Esse modelo híbrido tende a se expandir no Brasil, especialmente em aplicações descentralizadas, rurais e de baixo consumo, como mostra a literatura nacional e internacional.

Assim, conclui-se que a integração de estratégias de resfriamento em sistemas fotovoltaicos não apenas melhora o desempenho energético, mas também aproxima as projeções técnicas da realidade de uso, aumentando a confiabilidade, a eficiência e a sustentabilidade das soluções solares descentralizadas.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar o desempenho de um sistema fotovoltaico híbrido com trocador de calor e reaproveitamento de água, submetido a condições reais de operação. A motivação central foi verificar como a temperatura ambiente, sobretudo em regiões quentes, que afeta a eficiência de

geração de energia solar, considerando que os testes de fábrica são realizados em condições ideais (25 °C), pouco representativas da realidade brasileira.

Os experimentos conduzidos demonstraram que, em campo, a temperatura dos módulos solares pode ultrapassar os 50 °C, o que ocasiona perdas de eficiência superiores a 10%. Essa constatação reforça a necessidade de adaptar os sistemas solares às condições locais, incluindo estratégias para mitigação térmica.

A solução adotada no projeto que foi um sistema de refrigeração com ventoinha e bomba, se mostrou eficiente na redução da temperatura dos painéis, diminuindo as perdas de desempenho para cerca de 3,5%. Embora o sistema de refrigeração consuma energia, o ganho líquido de eficiência compensa esse consumo. Além disso, a água utilizada no resfriamento foi reaproveitada, promovendo economia de recursos e alinhamento com princípios de sustentabilidade.

A comparação entre o sistema híbrido proposto e o aquecimento elétrico convencional demonstrou vantagem em termos de custo de operação e eficiência energética, tornando o modelo viável tanto técnica quanto economicamente. A utilização de termografia, por sua vez, se destacou como ferramenta de diagnóstico acessível e eficaz para monitoramento da temperatura dos módulos.

Conclui-se, portanto, que adaptar os sistemas fotovoltaicos às condições reais de operação (especialmente em relação à temperatura) é fundamental para garantir seu desempenho ideal. Soluções simples e de baixo custo, como o resfriamento ativo e o reuso de água, podem ter impacto significativo na eficiência e sustentabilidade de sistemas solares descentralizados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se expandir o estudo para diferentes estações do ano, avaliar o comportamento do sistema ao longo do tempo e investigar a integração com outras fontes renováveis, como energia eólica ou sistemas de armazenamento. Também seria relevante analisar o retorno financeiro em escala maior, visando aplicações residenciais, comerciais e rurais.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. H. A. et al. *Gerador termelétrico em estado sólido com aquecimento solar e resfriamento geotérmico*. 2024.

BEZERRA, F. D. *Energia solar: v. 6 n. 174 (2021)*. *Caderno Setorial ETENE*, v. 6, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2797>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRUM, R. S. da. *Teoria Construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar*. 2016.

FERREIRA, W. *Reuso da água, recuperação de calor residual e cogeração com termogeradores em destiladores Pilsen*. 2024.

FRAIDENRAICH, N. *Ciência e tecnologia solar no Brasil: 60 anos*. Porto Alegre: Editora AGE, 2024. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=uTHxEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=A+gera%C3%A7%C3%A3o+de+energia+solar+no+Brasil&ots=NQZ3\\_bODKm&sig=WhBvKw9oTfoCmCyeHnre4P7gU1c#v=onepage&q=A%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20solar%20no%20Brasil&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=uTHxEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=A+gera%C3%A7%C3%A3o+de+energia+solar+no+Brasil&ots=NQZ3_bODKm&sig=WhBvKw9oTfoCmCyeHnre4P7gU1c#v=onepage&q=A%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20solar%20no%20Brasil&f=false). Acesso em: 13 mar. 2025.

FREITAS, I. D. L. et al. *Análise comparativa de viabilidade econômica entre aquecimento solar de água e energia solar fotovoltaica em sistema residencial*. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/2165>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GIACOBBO, D. G. *Segurança e transição energética: tomo III*. São Paulo: Synergia, 2024.

MENDONÇA, P. H. S. de. *Análise sobre a viabilidade econômica da energia solar no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/f6ada6fa-0b16-4210-b486-b82dd7234b7d>. Acesso em: 13 mar. 2025.

MORAIS, L. C. de. *Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras*. 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/ceb3cb86-b301-4a38-92f6-6194fe73768e>. Acesso em: 13 mar. 2025.

NASCIMENTO, A. S. et al. *Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro*. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8153>. Acesso em: 13 mar. 2025.

NASCIMENTO, V. A. M. A. do; TRINDADE, T. B.; CARVALHO, C. M. *Análise dos parâmetros para geração de energia solar fotovoltaica no Acre, Brasil*. 2021. Disponível em: <https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/interespaco/article/view/16383>. Acesso em: 13 mar. 2025.

NASCIMENTO, V. F. do. *Projeto de um painel solar híbrido*. 2020.

NÓBREGA, E. S. B. de. *Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

OTTONELLI, J. et al. *Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil*. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 52, n. 4, p. 8–26, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1199>. Acesso em: 13 mar. 2025.

POSWAR, R. T. M. *Análise técnica de um sistema híbrido usando biomassa e energia solar para geração de eletricidade*. 2022.

RODRIGUES, M. K. *Modelagem computacional aplicada à melhoria do desempenho térmico de trocador de calor solo-ar através do método Constructal Design*. 2014. Dissertação (Mestrado).

SHIMOMAEBARA, L. A.; PEYERL, D. *Energia solar no Brasil: histórico e planejamento energético*. *Revista de Políticas Públicas*, v. 25, n. 2, p. 854–869, 2021. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/3211/321171229021/html/>. Acesso em: 13 mar. 2025.