

ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE

ESTUDO DE VIABILIDADE DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
RESIDENCIAL: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA VERSUS
AQUECIMENTO SOLAR DIRETO

FELIPE MAGALHÃES ROCHA DUQUE

RESENDE

2024

FELIPE MAGALHÃES ROCHA DUQUE

ESTUDO DE VIABILIDADE DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
RESIDENCIAL: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA VERSUS
AQUECIMENTO SOLAR DIRETO

Trabalho de Graduação apresentado à
Associação Educacional Dom Bosco,
Faculdade de Engenharia de Resende,
Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica,
como requisito parcial para obtenção do
diploma de Bacharel em Engenharia
Elétrica/Eletrônica.

RESENDE

2024

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

D946 Duque, Felipe Magalhães Rocha
Estudo de viabilidade de aquecimento de água residencial: energia solar fotovoltaica versus aquecimento solar direto / Felipe Magalhães Rocha Duque - 2024.
51f.

Orientador: Eduardo Souza Motta
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia elétrica. 2. Viabilidade econômica. 3. Energia solar. 4. Sistema fotovoltaico. 5. Aquecimento de água. I. Motta, Eduardo Souza. II. Faculdade de Engenharia de Resende. III. Associação Educacional Dom Bosco. IV. Título.

CDU 620.91(043)

FELIPE MAGALHÃES ROCHA DUQUE

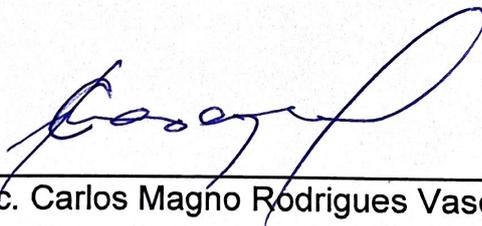
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO ENGENHARIA ELÉTRICA/ELETRÔNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

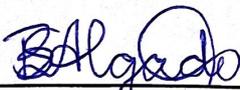
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Eduardo de Souza Motta (Orientador)



Prof. MSc. Carlos Magno Rodrigues Vasques



Prof.(a) Bianca Azevedo Machado

Novembro 2024

RESUMO

Este estudo analisou a viabilidade técnica e econômica de dois sistemas de energia solar para aquecimento de água em um sítio rural: um sistema fotovoltaico com bomba de calor e um sistema de aquecimento solar direto com coletores. A análise considerou os custos de instalação, manutenção, economia anual e retorno sobre o investimento (ROI) ao longo de 25 anos, utilizando cálculos do Valor Presente Líquido (VPL) com uma taxa de juros de 11% ao ano. O sistema fotovoltaico, composto por 22 painéis de 280W, apresentou uma economia anual de R\$ 5.040,00, ROI de 7,66 anos e VPL de R\$ 24.381,42. Por outro lado, o sistema solar direto, com 23 coletores para piscina e dois coletores para chuveiros, gerou uma economia anual de R\$ 2.600,00, ROI de 6,2 anos e VPL de R\$ 10.600,62. Embora o sistema fotovoltaico seja mais abrangente em termos de aplicação energética, o sistema solar direto demonstrou maior viabilidade econômica inicial devido ao menor investimento necessário e ao retorno financeiro mais rápido. Ambos os sistemas evidenciam eficiência energética e contribuem para a sustentabilidade e a redução do consumo de energia elétrica no longo prazo.

Palavras-Chave: Energia Solar; Aquecimento de Água; Viabilidade Econômica; Sistemas Fotovoltaicos; Aquecimento Solar Direto.

ABSTRACT

This study analyzed the technical and economic feasibility of two solar energy systems for water heating in a rural site: the photovoltaic system with heat pump and the direct solar heating system with collectors. The analysis considered the costs of installation, maintenance, annual savings, and return on investment (ROI) over 25 years, using Net Present Value (NPV) calculations with an interest rate of 11% per year. The photovoltaic system, consisting of 22 panels of 280W, presented an annual saving of R\$ 5,040.00, ROI of 7.66 years and NPV of R\$ 24,381.42. On the other hand, the direct solar system, with 23 collectors for swimming pools and two collectors for showers, generated annual savings of R\$ 2,600.00, ROI of 6.2 years and NPV of R\$ 10,600.62. Although the PV system is more comprehensive in terms of energy application, the direct solar system has demonstrated greater initial economic viability due to the lower investment required and the faster financial return. Both systems are energy efficient and contribute to sustainability and the reduction of electricity consumption in the long term.

Keywords: Solar Energy; Water Heating; Economic Viability; Photovoltaic Systems; Direct Solar Heating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Funcionamento de sistema fotovoltaico	13
Figura 2: Funcionamento de sistema solar direto.....	14
Figura 3: Bomba de calor Ortum S28 Wi-Fi.....	20
Figura 4: Funcionamento de bomba de calor.....	20
Figura 5: Boiler Komeco 200L.....	21
Figura 6: Dados de irradiação solar no município de Volta Redonda.....	23
Figura 7: Pannel solar OSDA 280w.....	25
Figura 8: MIN 6000TL-Xda Growatt	26
Figura 9: Estruturas de suporte para pannel solar.....	26
Figura 10: Gráfico de distribuição percentual de custos do sistema fotovoltaico	28
Figura 11: Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico.....	30
Figura 12: Coletor solar TS Solar CPTS 300.....	33
Figura 13: Coletor solar Solar&Sol Cobre 1X1 PP	35
Figura 14: Coletor solar Solar&Sol Cobre 1X1 PP	37
Figura 15: Fluxograma de funcionamento do sistema solar direto	45
Figura 16: Gráfico de comparação do investimento inicial entre os dois sistemas....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo médio mensal do boiler e bomba de calor.....	22
Tabela 2: Custos de instalação do sistema fotovoltaico	27
Tabela 3: Custos de manutenção do sistema fotovoltaico	29
Tabela 4: Especificações da localidade da instalação	32
Tabela 5: Especificações da localidade da instalação	32
Tabela 6: Especificações da área coletora.....	34
Tabela 7: Custos de instalação do sistema solar direto	36
Tabela 8: Custos de manutenção do sistema solar direto.....	38
Tabela 9: Roi sobre investimento do sistema fotovoltaico.....	40
Tabela 10: Roi sobre investimento do sistema solar direto	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	OBJETIVOS.....	9
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	10
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1.	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E AQUECIMENTO SOLAR DIRETO..	11
2.1.1.	Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica.....	12
2.1.2.	Sistemas de Aquecimento Solar Direto.....	14
2.1.3.	Comparação entre Sistemas Fotovoltaicos e de Aquecimento Solar Direto	16
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1.	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	17
3.2.	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	17
3.3.	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	18
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1.	ANÁLISE DE VIABILIDADE DOS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR.....	19
4.1.1.	Viabilidade do Sistema Fotovoltaico	19
4.1.1.1.	<i>Capacidade Térmica Necessária.....</i>	19
4.1.1.2.	<i>Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.....</i>	22
4.1.1.3.	<i>Custos do projeto.....</i>	27
4.1.1.4.	<i>Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico</i>	30
4.1.2.	Viabilidade do Sistema de Aquecimento Solar Direto.....	31
4.1.2.1.	<i>Capacidade técnica necessária</i>	31
4.1.2.2.	<i>Custos do projeto.....</i>	36
4.1.3.	Comparação entre os dois sistemas	39
4.1.3.1.	<i>Análise de viabilidade econômica.....</i>	39
4.1.3.2.	<i>Fluxograma de funcionamento do sistema solar direto</i>	44
4.1.3.3.	<i>Comparação entre o Sistema Fotovoltaico e o Sistema de Aquecimento Solar Direto.....</i>	45
4.1.3.4.	<i>Eficiência Energética e Impacto no Consumo</i>	48
5.	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico do Brasil, sendo a hidroeletricidade a principal fonte de energia utilizada no país. No entanto, a distribuição de energia elétrica ainda representa um desafio significativo, especialmente em regiões rurais afastadas da rede elétrica nacional. A adoção de sistemas de aquecimento de água por energia solar não só oferece uma alternativa sustentável para essas áreas, mas também contribui para a redução do consumo de energia elétrica nos horários de pico (ABRAHÃO; SOUZA, 2021).

Este estudo foca na viabilidade técnica e econômica do uso de energia solar fotovoltaica em comparação com o aquecimento solar direto para o aquecimento de água residencial em um sítio rural, que serve tanto como área de lazer quanto para aluguel. Além disso, o estudo fornecerá uma síntese de avaliação que poderá servir como guia para avaliações futuras, contribuindo para a tomada de decisões em projetos similares. O problema central deste estudo é identificar a melhor solução de aquecimento de água para residências rurais que maximiza a eficiência energética e a sustentabilidade. A questão se torna ainda mais relevante considerando as limitações de acesso à rede elétrica e a necessidade de reduzir o consumo de energia durante os horários de pico (SILVA et al., 2014).

Espera-se que esses sistemas forneçam água quente de forma eficiente e contribuam para a redução da demanda de energia elétrica, especialmente durante os horários de pico. Estudos anteriores indicam que sistemas de aquecimento solar podem resultar em significativas economias de energia e redução de custos operacionais, particularmente em climas quentes e ensolarados (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; GIGLIO, 2015).

1.1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica e econômica do aquecimento de água residencial utilizando energia solar fotovoltaica em comparação com o aquecimento solar direto, em um contexto rural.

Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência energética do sistema fotovoltaico e do sistema solar direto para o aquecimento de água;
- Comparar os custos de instalação e manutenção dos dois sistemas;
- Analisar o impacto econômico de ambos os sistemas na redução do consumo de energia elétrica e de aquecimento;
- Analisar o tempo de retorno do investimento (payback) dos sistemas de energia solar fotovoltaico e de aquecimento solar direto.

1.2. JUSTIFICATIVA

Justifica-se este estudo de modo que a crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis no Brasil torna urgente a busca por alternativas que minimizem os impactos ambientais e promovam eficiência energética. A energia solar, em suas diferentes aplicações, destaca-se como uma opção viável para atender a essas necessidades, especialmente em regiões com alta incidência solar. Em áreas rurais, onde o acesso à rede elétrica pode ser limitado, sistemas de aquecimento de água por energia solar apresentam-se como uma alternativa prática, eficiente e alinhada aos objetivos de sustentabilidade.

A escolha entre sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar direto exige uma análise cuidadosa de viabilidade técnica e econômica, considerando fatores como custos iniciais, manutenção e economia gerada ao longo do tempo. O estudo justifica-se, portanto, pela necessidade de oferecer informações detalhadas e comparativas sobre essas tecnologias, possibilitando que consumidores e profissionais do setor energético tomem decisões embasadas em dados concretos. Além disso, a comparação entre as soluções auxilia na identificação de cenários onde cada sistema apresenta maior eficiência e retorno sobre o investimento.

Por fim, este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de estratégias que ampliem o uso de energia solar no Brasil, promovendo o acesso a soluções sustentáveis e econômicas, especialmente em contextos rurais. A análise apresentada visa não apenas atender à demanda por energia limpa e renovável, mas também fomentar a conscientização sobre a importância de tecnologias

alternativas na transição para um modelo energético mais sustentável e menos dependente de fontes não-renováveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E AQUECIMENTO SOLAR DIRETO

A energia solar é uma fonte de energia renovável e sustentável que pode ser aproveitada de duas maneiras principais: através de sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar direto. Ambos os sistemas têm o potencial de fornecer soluções de aquecimento de água eficientes e sustentáveis, mas existem diferenças significativas entre eles que podem influenciar a escolha de um sistema em detrimento do outro. O sistema fotovoltaico converte a energia solar diretamente em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, sendo uma solução versátil que pode ser utilizada para diversos fins, desde o fornecimento de eletricidade para residências até o abastecimento de grandes indústrias. Por outro lado, o aquecimento solar direto utiliza coletores solares para captar a radiação solar e convertê-la em calor, aquecendo diretamente a água para uso doméstico ou industrial.

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por módulos que contêm células de silício cristalino ou de filmes finos, responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade. Este tipo de sistema é particularmente vantajoso em regiões com alta incidência solar, podendo reduzir significativamente a dependência de fontes de energia não-renováveis e contribuir para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. A energia gerada pode ser armazenada em baterias para uso posterior ou injetada na rede elétrica, proporcionando uma fonte contínua e confiável de energia.

Por outro lado, o aquecimento solar direto, também conhecido como sistema de energia solar térmica, é composto por coletores solares, um reservatório térmico e um sistema de distribuição. Este sistema é mais simples e geralmente mais barato do que os sistemas fotovoltaicos. Os coletores solares absorvem a radiação solar e transferem o calor para a água que circula em tubulações internas. Este processo é eficiente, mas a demanda por água quente pode ser menor em climas quentes, principalmente para o uso em banhos, onde a temperatura ambiente já é elevada.

No entanto, o aquecimento solar direto ainda pode ser uma solução eficaz para substituir o uso de chuveiros elétricos, como demonstrado no estudo realizado no município de Itajubá, Minas Gerais, que avaliou a viabilidade da substituição de chuveiros elétricos por sistemas de energia solar térmica, destacando a economia de energia e a redução de custos para os moradores (SOUSA et al., 2018).

Em suma, a escolha entre um sistema fotovoltaico e um sistema de aquecimento solar direto dependerá das necessidades específicas de cada usuário, bem como das condições climáticas e financeiras. Enquanto os sistemas fotovoltaicos oferecem a flexibilidade de gerar eletricidade para uma ampla gama de aplicações, os sistemas de aquecimento solar direto proporcionam uma solução eficiente e econômica para o aquecimento de água. A adoção de qualquer uma dessas tecnologias representa um passo importante em direção a um futuro mais sustentável e menos dependente de fontes de energia não-renováveis.

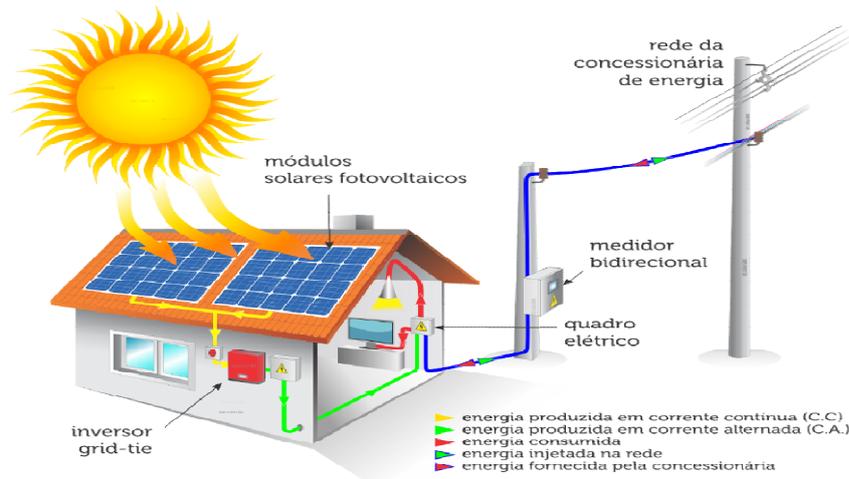
2.1.1. Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica

Os sistemas de energia solar fotovoltaica (Figura 1) convertem a luz solar diretamente em eletricidade através do uso de células solares compostas por materiais semicondutores, como o silício, que possuem a capacidade de gerar uma corrente elétrica quando expostos à luz solar, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (ABRAHÃO; SOUZA, 2021). Esta eletricidade gerada é em corrente contínua (CC), que precisa ser convertida para corrente alternada (CA) através de um inversor para ser utilizada em aparelhos elétricos, como aquecedores de água, sistemas de iluminação, eletrodomésticos e até mesmo ser injetada na rede elétrica pública (SILVA et al., 2014). A eficiência de um sistema fotovoltaico depende de vários fatores, incluindo a intensidade da luz solar, a orientação e inclinação dos painéis solares, e a eficiência das células solares e do inversor.

A eficiência de um sistema fotovoltaico é influenciada por diversos fatores. Primeiramente, a intensidade da luz solar é crucial: regiões com maior incidência solar tendem a produzir mais energia elétrica. Além disso, a orientação e inclinação dos painéis solares são determinantes para a captura ideal da luz solar ao longo do dia e do ano. Painéis orientados para o norte (no hemisfério sul) e inclinados de acordo com a latitude local maximizam a exposição solar. A eficiência das células solares também é um aspecto vital. Células de alta qualidade e tecnologia avançada,

como as de silício monocristalino, apresentam melhor desempenho. Outro componente essencial é o inversor, que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), adequada para uso em residências e indústrias. A qualidade e eficiência do inversor impactam diretamente na quantidade de energia útil disponível.

Figura 1: Funcionamento de sistema fotovoltaico



Fonte: FÁBIO (2020)

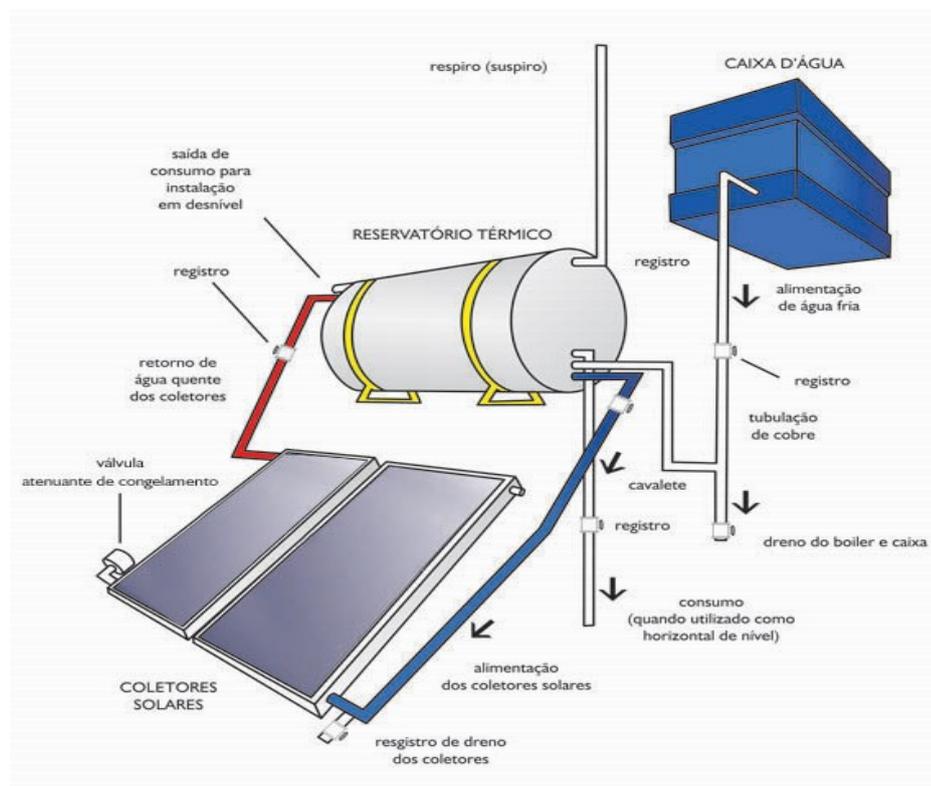
Os sistemas fotovoltaicos também são conhecidos por seu impacto ambiental positivo. Eles não produzem emissões durante a operação, contribuindo para a redução dos gases de efeito estufa e mitigando as mudanças climáticas. A manutenção desses sistemas é relativamente baixa, envolvendo principalmente a limpeza periódica dos painéis para garantir a máxima eficiência. Além disso, com a evolução tecnológica e a redução dos custos de produção, os sistemas fotovoltaicos tornaram-se cada vez mais acessíveis economicamente, viabilizando sua implementação em uma variedade de contextos, desde residências até grandes empreendimentos comerciais.

De acordo com uma revisão bibliográfica sobre energia solar fotovoltaica, a diversificação da matriz energética brasileira é impulsionada por fatores como a diminuição das chuvas, que afeta a produção hidrelétrica, e a necessidade de explorar recursos renováveis que oferecem flexibilidade e sustentabilidade (SILVA et al., 2014). Assim, a energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma solução promissora, com benefícios ambientais, econômicos e sociais, destacando-se como uma tecnologia em constante avanço tanto no Brasil quanto no cenário mundial.

2.1.2. Sistemas de Aquecimento Solar Direto

Os sistemas de aquecimento solar direto (Figura 2) utilizam a energia térmica do sol para aquecer a água diretamente, sendo uma solução eficiente e sustentável para atender à demanda por água quente em residências e instalações comerciais. Esses sistemas são compostos por coletores solares, dispositivos responsáveis por captar a radiação solar e convertê-la em calor. O calor gerado é transferido para a água por meio dos tubos dos coletores solares. Essa configuração simples e eficiente oferece uma alternativa econômica ao aquecimento por eletricidade ou gás, contribuindo para a sustentabilidade energética. A eficiência desses sistemas depende de diversos fatores, incluindo a intensidade e duração da luz solar, a orientação e inclinação dos coletores, a eficiência do trocador de calor e a demanda de água quente do usuário (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012).

Figura 2: Funcionamento de sistema solar direto



Fonte: SOLETROL (2023)

Um componente fundamental desses sistemas é o reservatório de água quente, conhecido como boiler. O boiler é responsável por armazenar a água aquecida pelos coletores solares, garantindo que ela esteja disponível para uso

posterior, mesmo durante períodos de baixa incidência solar, como à noite ou em dias nublados. O dimensionamento adequado do boiler é essencial para o bom funcionamento do sistema, pois ele deve ser capaz de armazenar a quantidade de água necessária para atender à demanda diária. Boilers térmicos possuem isolamento para minimizar a perda de calor, mantendo a água aquecida por várias horas após o pôr do sol. Isso aumenta a eficiência geral do sistema, pois evita a necessidade de reaquecimento frequente da água, economizando energia e custos operacionais (GIGLIO, 2015).

Os coletores solares utilizados nesses sistemas podem ser de dois tipos principais: coletores planos e coletores de tubos a vácuo, cada um com suas características específicas de eficiência e custo. Coletores planos são os mais comuns, compostos por uma superfície absorvente protegida por uma cobertura de vidro ou material transparente, que ajuda a minimizar as perdas térmicas. Esse tipo de coletor é mais eficiente em regiões com alta incidência solar e temperaturas moderadas, mas pode perder eficiência em climas mais frios. Já os coletores de tubos a vácuo são projetados para reduzir significativamente as perdas de calor por condução e convecção, o que os torna mais adequados para climas frios ou nublados. Eles utilizam tubos de vidro selados a vácuo, o que proporciona maior isolamento térmico, permitindo um aquecimento mais eficiente da água, mesmo em condições climáticas adversas (GIGLIO, 2015).

Outro fator crítico para o desempenho ideal desses sistemas é a orientação e inclinação dos coletores solares. Para maximizar a captação da radiação solar, os coletores devem ser orientados para o norte no hemisfério sul, com uma inclinação ajustada de acordo com a latitude local. Esse posicionamento garante a exposição máxima à luz solar ao longo do ano. Além disso, a manutenção regular do sistema, especialmente a limpeza dos coletores e a verificação do estado do trocador de calor, é crucial para manter a eficiência energética (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012).

Estudos indicam que os sistemas de aquecimento solar direto são altamente eficientes e podem resultar em economias significativas de energia, especialmente em regiões com alta insolação. Altoé et al. (2012) conduziram uma análise comparativa que demonstrou a viabilidade econômica e ambiental dos sistemas solares térmicos em relação aos métodos convencionais de aquecimento, como o uso de chuveiros elétricos. A redução do consumo de eletricidade nos horários de

pico é outro benefício relevante desses sistemas, contribuindo para o alívio da sobrecarga nas redes elétricas em momentos de maior demanda. Além disso, Giglio (2015) enfatiza a importância do comportamento do usuário para otimizar os resultados. A conscientização sobre o uso racional da água aquecida e a manutenção periódica do sistema podem aumentar ainda mais a economia de energia e a eficiência do sistema.

Portanto, os sistemas de aquecimento solar direto, com o suporte do reservatório de água quente, representam uma tecnologia madura e eficiente para o uso sustentável da energia solar. Esses sistemas não apenas reduzem a dependência de fontes de energia não renováveis, como também contribuem significativamente para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com os objetivos globais de sustentabilidade ambiental (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012; GIGLIO, 2015).

2.1.3. Comparação entre Sistemas Fotovoltaicos e de Aquecimento Solar Direto

Embora ambos os sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar direto aproveitem a energia solar, eles apresentam características distintas que podem influenciar a escolha de um sistema em detrimento do outro, dependendo das necessidades e condições específicas de cada usuário (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012; GIGLIO, 2015).

A principal diferença entre os dois sistemas reside na forma como a energia solar é utilizada e convertida. Enquanto os sistemas fotovoltaicos convertem a energia solar em eletricidade, que pode ser usada para uma variedade de propósitos, os sistemas de aquecimento solar direto são especificamente projetados para aquecer água. Esta especialização faz com que os sistemas de aquecimento solar direto sejam geralmente mais eficientes na conversão da energia solar em calor. No entanto, os sistemas fotovoltaicos oferecem uma flexibilidade maior, podendo suprir diferentes demandas energéticas além do aquecimento de água (SILVA et al., 2014).

Os custos de instalação e manutenção também variam entre os dois sistemas. Os sistemas fotovoltaicos tendem a ter um custo inicial mais elevado devido ao preço das células solares e dos inversores, mas podem proporcionar maior retorno a longo prazo ao oferecer uma fonte contínua de eletricidade e reduzir a dependência de fontes de energia não-renováveis. Por outro lado, os sistemas de aquecimento

solar direto geralmente têm um custo inicial menor e são mais simples de instalar e manter, o que pode ser uma vantagem significativa para muitos usuários (ABRAHÃO; SOUZA, 2021).

Portanto, a escolha entre sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar direto deve ser baseada nas necessidades específicas de cada situação, considerando fatores como a demanda energética, o orçamento disponível, as condições climáticas locais e os objetivos de sustentabilidade (ALTOÉ; OLIVEIRA FILHO; CARLO, 2012; GIGLIO, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo adota uma abordagem quantitativa e qualitativa para avaliar a viabilidade técnica e econômica de sistemas de aquecimento de água, comparando o sistema fotovoltaico com bomba de calor e o sistema de aquecimento solar direto com coletores solares, em um contexto rural. O objetivo é determinar qual sistema apresenta melhor desempenho e custo-benefício para o aquecimento de água em piscinas e chuveiros.

3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados focou exclusivamente no consumo energético relacionado ao aquecimento de água. Inicialmente, foram coletadas informações sobre a demanda de água quente da residência, considerando o uso em chuveiros e piscina. Estes dados foram obtidos por meio de medições diretas e análise do histórico de contas de energia elétrica, bem como de relatórios de uso diário da água.

Para o sistema de aquecimento solar direto, os dados incluíram a análise da eficiência dos coletores solares e do boiler, que armazena a água aquecida para uso noturno. No caso do sistema fotovoltaico com bomba de calor, a avaliação considerou a energia gerada pelos painéis solares, que alimentam diretamente a bomba de calor e o boiler elétrico para aquecimento da água.

3.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

A análise de viabilidade técnica examinou a capacidade de ambos os sistemas em atender à demanda por água quente. No caso do sistema solar direto,

foi avaliada a eficiência dos coletores solares planos em capturar e transferir a energia térmica para o boiler, garantindo o aquecimento necessário. O dimensionamento dos coletores seguiu as orientações da NBR 15569, considerando o volume de água e a radiação solar local.

Para o sistema fotovoltaico com bomba de calor, o desempenho foi medido pela quantidade de energia gerada pelos painéis solares e sua eficiência em alimentar a bomba de calor. O sistema foi projetado para operar com uma eficiência global de 80%, levando em conta perdas por conversão e transmissão de energia.

Ambos os sistemas foram avaliados quanto à capacidade de reduzir o consumo de energia elétrica da rede, especialmente durante os horários de pico, contribuindo para uma maior eficiência energética da residência.

3.3. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de viabilidade econômica foi realizada considerando os custos de instalação, operação e manutenção dos dois sistemas de aquecimento de água propostos: o sistema fotovoltaico com bomba de calor e o sistema de aquecimento solar direto com coletores solares.

Para o sistema fotovoltaico com bomba de calor, foram avaliados os custos relacionados à aquisição e instalação de painéis solares, inversores, bomba de calor e boiler elétrico. No caso do sistema solar direto, foram considerados os custos dos coletores solares, boiler, tubulação e outros componentes necessários.

Além do investimento inicial, foram analisados os custos de manutenção periódica de ambos os sistemas, que incluem limpeza, inspeções preventivas e eventuais reparos. Os dados obtidos serviram como base para calcular o retorno sobre o investimento (ROI) de cada sistema, utilizando a fórmula do valor presente líquido (VPL), considerando uma taxa de desconto anual representativa das condições econômicas atuais.

A metodologia busca comparar o impacto financeiro de cada sistema ao longo do tempo, incluindo a análise da economia anual gerada e o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado. Essas análises foram conduzidas sem adiantar os resultados específicos, permitindo uma avaliação isenta e fundamentada no capítulo de discussão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DE VIABILIDADE DOS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR

Este tópico apresenta uma avaliação detalhada dos sistemas de aquecimento de água por meio de energia solar, considerando tanto o sistema fotovoltaico com bomba de calor quanto o sistema de aquecimento solar direto. A análise abrange aspectos técnicos e econômicos de cada sistema, incluindo o cálculo de economia anual, custos de manutenção e o retorno sobre o investimento (ROI) ao longo do tempo. Com base em dados específicos de consumo energético, taxas de juros e custos de instalação, são apresentados os resultados de viabilidade financeira de cada sistema, apontando suas vantagens e limitações no contexto de um sítio rural. Essa avaliação busca oferecer uma visão clara sobre qual sistema proporciona maior eficiência e retorno econômico, auxiliando na tomada de decisão quanto à implementação de soluções de energia solar.

4.1.1. Viabilidade do Sistema Fotovoltaico

4.1.1.1. Capacidade Térmica Necessária

Uma regra prática é considerar que, para cada 1.000 litros de água, são necessários cerca de 1,16 kW de potência térmica para elevar a temperatura da água em 1°C. Portanto, a piscina possuindo 18 m² e 1,5m de profundidade, o volume seria de aproximadamente 27.000 litros.

- Potência Térmica Necessária: $27.000 \text{ litros} \times 1,16 \text{ kW}/1.000 \text{ litros} = \underline{\underline{31,32 \text{ kW}}}$

Seleção da Bomba de Calor

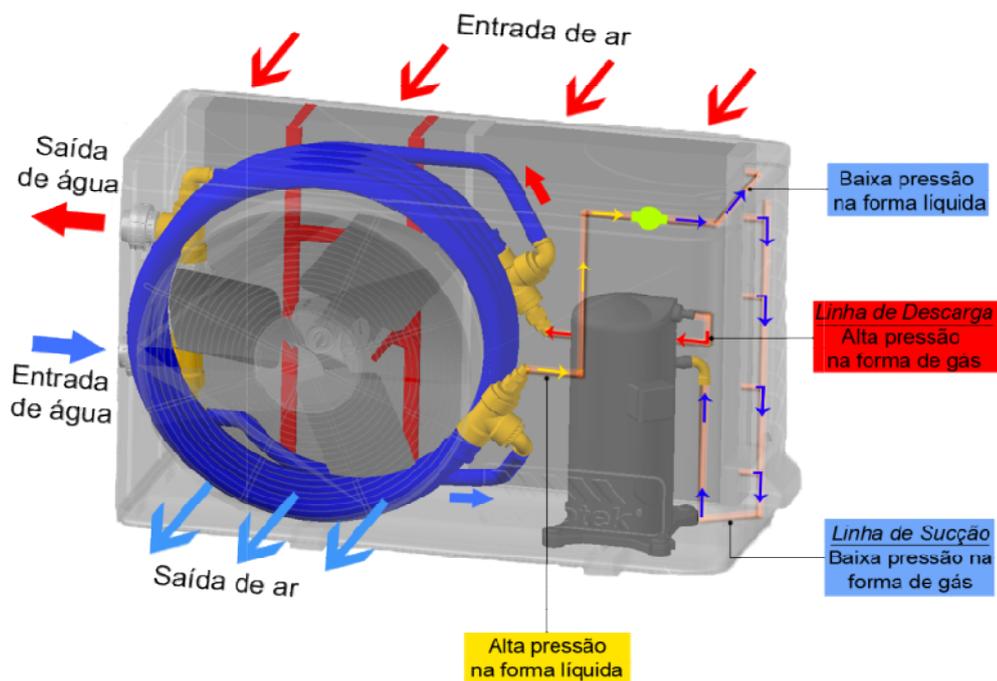
Uma bomba de calor com capacidade entre 30.000 e 35.000 BTU/h foi considerada adequada. Sendo assim, foi selecionada a Bomba de Calor Ortum S28 Wi-Fi, da Sibrape (Figura 3), que possui uma capacidade de 28.000 BTU/h, suficiente para piscinas de até 30.000 litros. Essa escolha visa garantir um aquecimento mais eficaz e atender às condições específicas do sistema. Devido ao volume da piscina e sua elevada inércia térmica, não se considerou o uso de uma bomba de calor para aquecê-la em dias sem sol.

Figura 3: Bomba de calor Ortum S28 Wi-Fi



Fonte: Sibrape (2024)

Figura 4: Funcionamento de bomba de calor



Fonte: Sibrape (2024)

Conforme a Figura 4, a bomba de calor funciona transferindo calor de uma fonte externa para um ambiente interno por meio de um ciclo termodinâmico. O fluido refrigerante, inicialmente em estado líquido e baixa pressão, passa pelo evaporador, onde absorve calor e se transforma em gás. Esse gás é comprimido pelo compressor, aumentando sua pressão e temperatura. Em seguida, no

condensador, o fluido cede calor ao ambiente a ser aquecido (como a água da piscina), retornando ao estado líquido. Por fim, ele passa pela válvula de expansão, onde sua pressão é reduzida, reiniciando o ciclo. Esse sistema é eficiente, pois utiliza menos energia elétrica do que o calor transferido.

Seleção do boiler

O Boiler Komeco 200 Litros (Figura 5) é uma solução eficiente e versátil para o aquecimento de água em residências, sendo ideal para atender famílias de 2 a 4 pessoas. Fabricado com aço inoxidável (AISI 304 ou 316), o boiler oferece alta resistência à corrosão e excelente durabilidade, garantindo um desempenho confiável ao longo do tempo. Equipado com resistência elétrica e termostato ajustável, ele permite o aquecimento da água mesmo em períodos de baixa insolação, assegurando o conforto dos usuários. Seu isolamento térmico em poliuretano expandido minimiza a perda de calor, otimizando a eficiência energética. Além disso, o modelo é compatível tanto com sistemas de aquecimento solar direto quanto com sistemas fotovoltaicos, proporcionando flexibilidade e economia na redução do consumo de energia elétrica.

Figura 5: Boiler Komeco 200L



Fonte: Komeco (2024)

Cálculo do Consumo Médio Mensal

O consumo médio diário da bomba de calor S28 foi estimado conforme informações disponíveis no manual do produto. A potência de entrada para

aquecimento da bomba S28 é de 1,35 kW. O tempo médio de funcionamento diário dependerá de fatores como o tamanho da piscina, a temperatura inicial e ambiente, e a utilização de capa térmica. O manual indica que, após atingir a temperatura desejada, o equipamento pode operar cerca de 8 a 10 horas por dia para manter a temperatura.

Considerando uma utilização média de 8 horas por dia, o consumo diário pode ser calculado multiplicando a potência de entrada pela duração do funcionamento: $1,35kW \times 8horas = 10,8kWh/dia$.

Com relação ao boiler, com base no manual, o modelo possui uma potência de 3 kW (3000 W). O consumo diário depende diretamente do tempo de utilização, que, para esta estimativa, foi considerado como 4 horas por dia, sendo assim, $3kW \times 4horas = 12kWh/dia$.

Portanto, com base nas especificações dos equipamentos a Tabela 1 apresenta o cálculo do consumo médio mensal do boiler e da bomba de calor.

Tabela 1: Consumo médio mensal do boiler e bomba de calor

Equipamento	Consumo Diário (kWh)	Consumo Mensal (kWh)
Boiler Komeco 200L	12	360
Bomba de Calor Ortum S28	10,8	324
Total	22,8	684

Fonte: Sibrape (2024); Komeco (2024)

4.1.1.2. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

A geração de energia elétrica pelas placas solares é baseada no efeito fotovoltaico, um fenômeno que ocorre em materiais semicondutores, como o silício dopado, quando expostos à luz solar. As células fotovoltaicas das placas solares são compostas por camadas de silício tratadas com impurezas específicas, formando uma junção PN (positivo-negativo). A camada tipo P (positiva) é dopada com materiais como boro, que possuem menos elétrons, criando "lacunas" para os elétrons. A camada tipo N (negativa) é dopada com fósforo ou outros materiais que têm excesso de elétrons (OLIVEIRA et al., 2018).

Quando a luz solar atinge a célula, os fótons transferem energia suficiente para excitar os elétrons do silício, rompendo a ligação com seus átomos. Esses

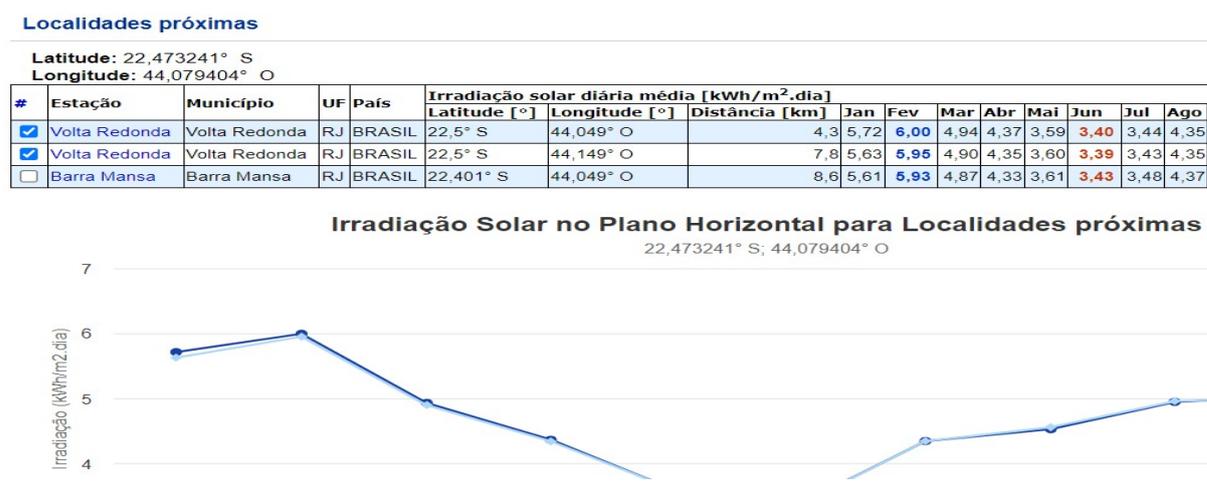
elétrons livres migram para a camada tipo N, enquanto as lacunas geradas são atraídas para a camada tipo P. A junção PN cria um campo elétrico interno que direciona o fluxo de elétrons, gerando uma corrente elétrica contínua (OLIVEIRA et al., 2018).

Essa corrente é capturada por condutores metálicos, formando um circuito elétrico. A energia gerada é então enviada para um inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada, adequada para consumo residencial ou comercial. Esse processo sustentável permite a produção de eletricidade limpa a partir da luz solar, destacando a eficiência do efeito fotovoltaico como base da tecnologia de energia solar (OLIVEIRA et al., 2018).

Irradiação solar

O tempo de exposição solar é um fator crucial para determinar a quantidade de energia que os painéis solares podem gerar ao longo do dia. Para obter esses dados de maneira precisa, foi realizada uma consulta ao site da CRECESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), que fornece informações detalhadas sobre a irradiação solar média em diferentes regiões do Brasil.

Figura 6: Dados de irradiação solar no município de Volta Redonda



Fonte: CRECESB (2024)

Esse valor de irradiação solar representa a quantidade de energia solar que atinge uma área específica (em kWh/m²) ao longo de um dia, variando de acordo com a localização geográfica da residência. A partir desses dados, é possível calcular a energia gerada pelos painéis solares com base na exposição solar real da

área em que o sistema será instalado. A Figura 6 retirada do site da CRECESB demonstra que a irradiação média de 4,67 kWh/m².

Cálculo do Rendimento do Sistema

O rendimento do sistema fotovoltaico foi calculado considerando as perdas esperadas por fatores como temperatura, sujeira, cabos e eficiência do inversor. Após a contabilização de todas essas perdas, o rendimento final do sistema foi estimado em 80%.

Perdas:

- Por temperatura: 11% (100-11,5) = **0,885**
- Incomp. elétrica: 1,5% (100-1,5) = **0,985**
- Sujeira: 2,0% (100-2,0) = **0,980**
- Cabeamento CC: 1,0% (100-1,0) = **0,990**
- Cabeamento CA: 1,0% (100-1,0) = **0,990**
- Inversor: 4% (100-4,0) = **0,960**
- $\eta_{rend} = \mathbf{80\%}$

Dimensionamento de painéis

Foi calculada a potência necessária para os painéis.

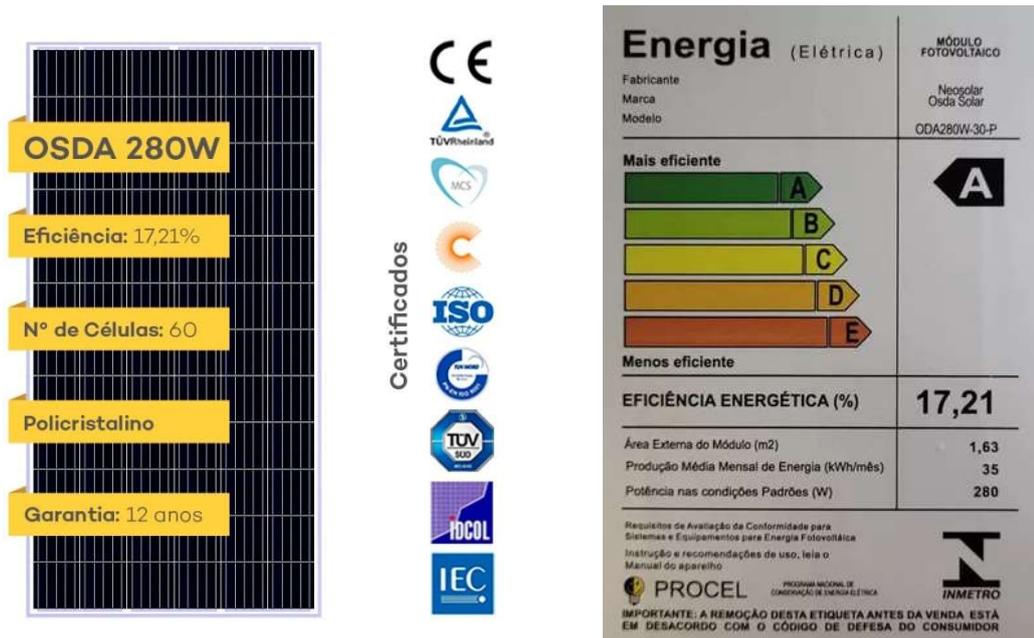
$$P_{total\ paineis} = \frac{Energ.\ Geração}{Tempo\ exp.\ x\ \eta_{rend.}}$$

$$P_{total\ paineis} = \frac{22,8Kwh/dia}{4,67Kwh/dia \times 0,8}$$

$$\underline{P_{total\ paineis} = 6,1Kw}$$

Com base no valor de 6,1Kw, foi selecionado o modelo de painel a ser utilizado no projeto. O modelo selecionado foi o OSDA 280W (Figura 7), possuindo o selo A PROCEL de eficiência energética.

Figura 7: Painel solar OSDA 280w



Fonte: Redimax (2024)

$$\text{Quant. paineis} = \frac{P_{\text{total paineis}}}{P_{\text{painel escolhido}}}$$

$$\text{Quant. paineis} = \frac{6,1\text{Kw}}{0,28\text{Kw}}$$

$$\text{Quant. paineis} = \mathbf{21,78 \text{ paineis}}$$

Diante disso, foi determinado a necessidade de 22 painéis.

Cálculo do Inversor

O dimensionamento do inversor foi feito considerando uma margem de 20% para evitar subdimensionamento ou superdimensionamento.

- $P_{\text{total}} = 22 \times 0,28 = \mathbf{6,16kW}$
Adicionando uma margem de 20%
- $P_{\text{mínima do inversor}} = 2,8 \times (1 - 0,20) = \mathbf{4,93kW}$
- $P_{\text{máxima do inversor}} = 2,8 \times (1 + 0,20) = \mathbf{7,39kW}$

Dessa forma, o inversor escolhido deve atender a uma faixa de potência entre 4,93 kW e 7,39 kW. Diante disso foi escolhido o inversor solar MIN 6000TL-Xda Growatt (Figura 8).

Figura 8: MIN 6000TL-Xda Growatt



Fonte: Growatt (2024)

Os painéis solares serão instalados no telhado utilizando estruturas de suporte (Figura 9).

Figura 9: Estruturas de suporte para painel solar



Fonte: Redimax (2024)

4.1.1.3. Custos do projeto

Custo de instalação do projeto

A Tabela 2 apresenta os custos de materiais e mão de obra para a instalação do sistema fotovoltaico.

Tabela 2: Custos de instalação do sistema fotovoltaico

Item	Qtd.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Bomba de Calor Ortum S28 Wi-Fi	1	R\$ 9.500,00	R\$ 9.500,00
Boiler Komeco 200L	1	R\$ 2.300,00	R\$ 2.300,00
Painéis Solares 280w	22	R\$ 449,00	R\$9.878,00
Inversor de Frequência	1	R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00
Estruturas de Suporte	22	R\$ 200,00	R\$ 4.400,00
Fiação e Cabeamento	50 metros	R\$ 10,00	R\$ 500,00
Conectores e Disjuntores	5	R\$ 50,00	R\$ 250,00
Mão de Obra	-	R\$ 1.500,00	R\$ 1.500,00
Caixa de Proteção	1	R\$ 400,00	R\$ 400,00
Total			R\$ 31.728,00

Fonte: Autor (2024)

O custo total de instalação do sistema fotovoltaico com bomba de calor e boiler foi estimado em R\$ 31.728,00, considerando todos os componentes necessários. O item de maior valor é a Bomba de Calor Ortum S28 Wi-Fi, com custo de R\$ 9.500,00, responsável por aquecer a água da piscina de forma eficiente. Em seguida, o Boiler Komeco 200L, utilizado para o aquecimento da água do chuveiro, custa R\$ 2.300,00, garantindo o armazenamento de água quente.

Os Painéis Solares 280W, essenciais para a geração de energia elétrica, foram dimensionados em 22 unidades, com custo unitário de R\$ 449,00, totalizando R\$ 9.878,00. Para converter a energia gerada pelos painéis, foi incluído um Inversor de Frequência, com valor de R\$ 3.000,00. As Estruturas de Suporte para os painéis solares custam R\$ 4.400,00, considerando 22 unidades a R\$ 200,00 cada.

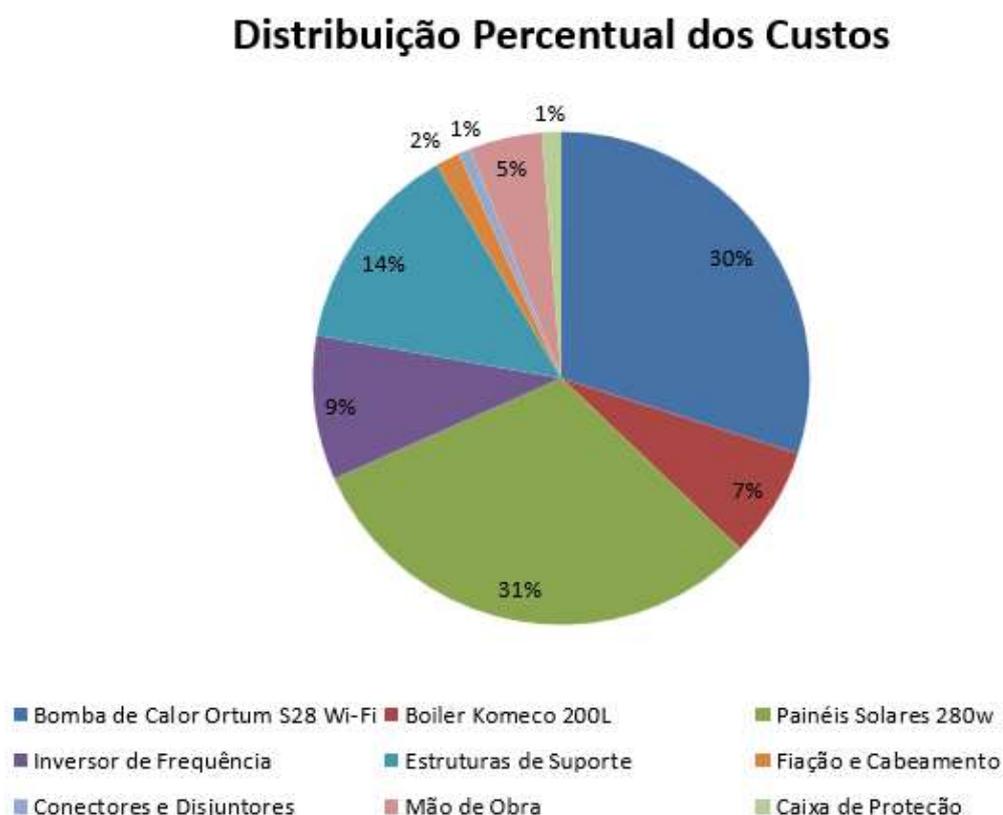
Para a conexão e proteção do sistema, foram estimados R\$ 500,00 para 50 metros de Fiação e Cabeamento e R\$ 250,00 para 5 Conectores e Disjuntores, com

custo unitário de R\$ 50,00. A Caixa de Proteção, que garante a segurança do sistema, tem um custo de R\$ 400,00.

Por fim, o custo de Mão de Obra para a instalação foi estimado em R\$ 1.500,00, considerando a complexidade do projeto e o tempo necessário para instalação. Esse valor cobre a montagem e configuração completa do sistema. Com todos os itens somados, o investimento total para a instalação do sistema fotovoltaico é de R\$ 31.728,00.

A Figura 10 apresenta o gráfico da distribuição percentual dos custos do projeto. A maior parcela corresponde à bomba de calor Ortum S28 Wi-Fi, com 29,9% do custo total, seguida pelos painéis solares 280W, que representam 31,1%. O inversor de frequência contribui com 9,5%, enquanto as estruturas de suporte correspondem a 13,9%. O boiler Komeco 200L representa 7,3% do custo total, e a fiação e cabeamento somam 1,6%. Os conectores e disjuntores compõem 0,8%, a mão de obra representa 4,7%, e a caixa de proteção, 1,3%.

Figura 10: Gráfico de distribuição percentual de custos do sistema fotovoltaico



Fonte: Autor

Custo de manutenção do sistema

A Tabela 3 apresenta os custos médios de manutenção para o sistema fotovoltaico.

Tabela 3: Custos de manutenção do sistema fotovoltaico

Item	Frequência	Custo Anual (R\$)
Limpeza dos Painéis Solares	2 vezes/ano	R\$ 500,00
Inspeção Preventiva	Anual	R\$ 100,00
Manutenção Bomba de Calor	Anual	R\$ 100,00
Manutenção do Boiler	Anual	R\$ 100,00
Reparos Eventuais e Componentes	Conforme necessidade	R\$ 100,00
Total Anual		R\$ 900,00

Fonte: Autor (2024)

O custo total de manutenção anual do sistema fotovoltaico e de aquecimento solar foi estimado em R\$ 900,00, contemplando todas as atividades necessárias para garantir seu funcionamento eficiente e prolongar sua vida útil. A limpeza dos painéis solares, realizada duas vezes ao ano, tem um custo anual de R\$ 500,00 e é essencial para remover sujeira e detritos que possam reduzir a captação de energia solar, garantindo a máxima eficiência do sistema.

A inspeção preventiva, com um custo anual de R\$ 100,00, é realizada uma vez ao ano e abrange a verificação de cabos, conexões, estrutura de suporte e funcionamento do inversor. Este procedimento ajuda a identificar possíveis problemas antes que se tornem críticos, assegurando a operação segura do sistema.

A manutenção da bomba de calor e do boiler é igualmente importante, ambas realizadas anualmente ao custo de R\$ 100,00 cada. Essas manutenções envolvem a verificação do desempenho, limpeza de componentes internos e ajustes necessários para garantir o aquecimento eficiente da água e o funcionamento ideal desses equipamentos.

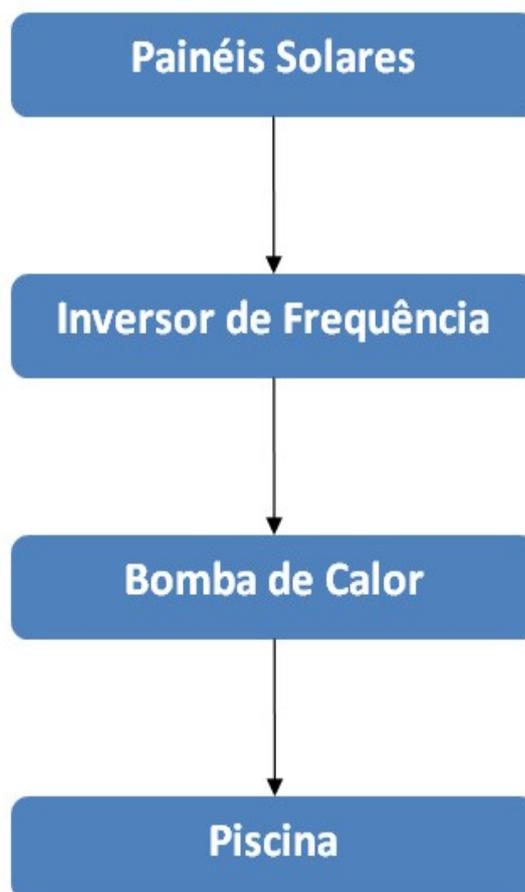
Por fim, foi estimado um valor de R\$ 100,00 para reparos eventuais e substituição de componentes, como conectores ou disjuntores, que podem apresentar falhas ou desgaste ao longo do tempo. Esse custo cobre pequenos ajustes e substituições para manter a segurança e a eficiência do sistema. Com

esses serviços de manutenção regular, o sistema terá sua performance otimizada, garantindo economia e eficiência energética a longo prazo.

4.1.1.4. Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico

Conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 11, os painéis solares captam a energia solar e geram eletricidade. Essa energia é convertida em corrente alternada pelo inversor de frequência. A eletricidade alimenta a bomba de calor, que transfere calor para a água, aquecendo-a. Por fim, a água quente é armazenada no boiler, pronta para uso. Este sistema é sustentável e eficiente para atender às demandas de aquecimento.

Figura 11: Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico



Fonte: Autor

4.1.2. Viabilidade do Sistema de Aquecimento Solar Direto

No sistema de aquecimento solar direto, os coletores solares aquecem diretamente a água que é armazenada no boiler. O principal diferencial deste sistema em relação ao fotovoltaico é sua eficiência no aquecimento de água, dado que os coletores são projetados especificamente para maximizar a captação de radiação solar para fins térmicos. Considerando que a demanda de aquecimento de água no sítio ocorre principalmente para o uso em banheiros e piscina, a instalação de coletores solares foi dimensionada para atender essa demanda com um volume de boiler adequado para garantir o uso contínuo.

4.1.2.1. Capacidade técnica necessária

Temperatura Ideal da Água

Para o banho, a temperatura ideal da água deve estar entre 45°C e 50°C.

Identificação do Mês mais Frio

Foi identificado que o mês mais frio em Volta Redonda é julho, com temperaturas variando entre 13°C e 23°C. Essa informação é importante para definir o quanto a água precisa ser aquecida durante esse período crítico.

Aumento de Temperatura Desejado

O objetivo é aumentar a temperatura da água da piscina de 13°C para 25°C durante o mês mais frio. Portanto, o aumento necessário é de 12°C.

Dimensionamento do sistema

Seguindo a norma NBR 15569 foram elaboradas três tabelas, a Tabela 4 apresenta as especificações da localidade da instalação.

Tabela 4: Especificações da localidade da instalação

Parâmetros da localidade	Valor
Cidade	Volta Redonda
Estado	Rio de Janeiro
Endereço	Rua Torres, 502
Latitude (graus)	22,5
Longitude (graus)	44,1
Moradores	4
γ ângulo de orientação geográfica (graus)	45
Inclinação do telhado em % (se horizontal adotar 0%)	35
Inclinação do telhado em graus	19,3
β ângulo de inclinação de instalação dos coletores (graus)	20
Equipamentos com água quente	Ducha, lavabo e cozinha
Radiação local I_g (kWh/dia/m ²)	4,67

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 5 expõe os valores de volume de armazenamento.

Tabela 5: Especificações da localidade da instalação

Parâmetro	Valor
Vconsumo (L)	624
Tconsumo (°C)	40
Tambiente (°C)	23,6
Tarmazenamento (°C)	50
Varmazenamento (L)	387,6363636
75%. Vconsumo (L)	468

Fonte: Autor (2024)

De acordo com dados sobre dimensionamento (SODRAMAR, 2023), se a temperatura da água precisa ser aumentada em 12°C, a área dos coletores solares deve ser equivalente a 120% da área da piscina.

- Área coletores = Área piscina \times 1,2
- Área coletores = 18 \times 1,2
- Área coletores = **21,6m²**

Os cálculos mostram que, para garantir que a água da piscina atinja a temperatura desejada durante o mês mais frio, é necessário instalar uma área de coletores solares equivalente a 120% da área da piscina, totalizando 21,6 m² de coletores. Serão utilizados os coletores CPTS 300 da TS Solar (Figura), sendo necessário aproximadamente 23 coletores solares. A Tabela 6 apresenta as especificações da área coletora.

Figura 12: Coletor solar TS Solar CPTS 300



Fonte: TS Solar (2024)

Tabela 6: Especificações da área coletora

Parâmetro	Valor
γ ângulo de orientação geográfica (graus)	45
β ângulo de inclinação de instalação (graus)	20
Latitude	22,5
β ótimo (+10°)	32,5
FCinstal (fator de correção da instalação)	1,1
Fabricante Placa	TS SOLAR
Modelo	CPTS-300
Área de 1 placa (m ²)	0,90 m ²
Produção Média Mensal de Energia (kWh/mês.m ²)	101,8 (com base nas especificações)
PMDEE (kWh/m ²) Produção média diária de energia específica	3,39 (calculado com base nas especificações)
Eútil (kWh/dia) energia útil	19,21
Perdas nas tubulações (%)	15%
Eperdas (kWh/dia) perdas nas tubulações (kWh/dia)	2,88
Latitude	22,5
Longitude	44,1
Ig (kWh/m ² .dia) Radiação global média anual local	4,67
Área coletora total (m ²)	21,6 m ²
Nº de placas	23 placas (21,6 m ² / 0,90 m ²)
Volume de armazenamento (L)	200

Fonte: Autor (2024)

Dimensionamento do sistema para o chuveiro

O sistema para aquecimento do chuveiro será composto de dois coletores solares Solar&Sol Cobre 1X1 PP(Figura 13) e um boiler Komeco 200L (Figura 5).

Figura 13: Coletor solar Solar&Sol Cobre 1X1 PP



Fonte: Solar e sol (2024)

Considerando a necessária de coletores para dois chuveiros, e os chuveiros possuem consumo médio de 40 litros por banho, sendo utilizados em média em dois banhos por dia.

- *Consumo total diário = 40 litros/banho × 2 banhos/dia/chuveiro × 2 chuveiros = **160 litros/dia***

Cada coletor Solar&Sol tem capacidade de aquecer 100 litros por dia. Com 2 coletores, a capacidade de aquecimento será:

- *Capacidade total dos coletores = 100 litros/placa × 2 placas = **200 litros/dia***

Essa capacidade atende ao consumo diário de 160 litros, com uma margem adicional de 40 litros para garantir eficiência mesmo em dias de menor insolação.

A energia necessária para aquecer 160 litros de água:

- *$E = 160\text{kg} \times 1\text{kcal/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C} = **3.200\text{kcal}**$*

Convertendo para kWh:

- *$E = 860 / 3.200\text{kcal} = **3,72\text{kWh/dia}**$*

Os coletores solares Solar&Sol Cobre 1X1 PP produzem em média 4,66kWh/dia, isso supera a demanda diária de 3,72 kWh, garantindo que o sistema atenda à necessidade de aquecimento de 160 litros de água.

4.1.2.2. Custos do projeto

Custo de instalação do projeto

A Tabela 7 apresenta os custos de materiais e mão de obra para a instalação do sistema de aquecimento solar direto para a piscina.

Tabela 7: Custos de instalação do sistema solar direto

Item	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Coletores solares piscina	23	R\$ 90,00	R\$ 2.070,00
Coletores solares chuveiro	2	R\$ 700,00	R\$ 1.400,00
Boiler	1	R\$ 2.300,00	R\$ 2.300,00
Estruturas de Suporte	25	R\$ 50,00	R\$ 1.250,00
Tubulação e Conexões	30 metros	R\$ 20,00	R\$ 600,00
Bombas Hidráulicas	1	R\$ 1.320,00	R\$ 1.320,00
Mão de Obra	-	R\$ 2.200,00	R\$ 2.200,00
Total			R\$ 11.140,00

Fonte: Autor (2024)

O custo total de instalação do sistema de aquecimento solar direto foi estimado em R\$ 11.140,00, incluindo todos os componentes e serviços necessários para garantir seu funcionamento eficiente. O sistema foi dimensionado para atender à demanda de água quente tanto da piscina quanto dos chuveiros, assegurando conforto e eficiência energética. A instalação contará com 23 coletores solares destinados ao aquecimento da piscina, com um custo total de R\$ 2.070,00, e dois coletores específicos para os chuveiros, no valor total de R\$ 1.400,00. Esses coletores são responsáveis por captar a energia solar e transferi-la para a água, garantindo seu aquecimento de forma sustentável.

Para armazenar a água quente, será utilizado um boiler ao custo de R\$ 2.300,00, que assegurará o fornecimento contínuo de água aquecida, mesmo em períodos de menor insolação. A instalação dos coletores será feita com o auxílio de 25 estruturas de suporte, cujo custo total foi calculado em R\$ 1.250,00.

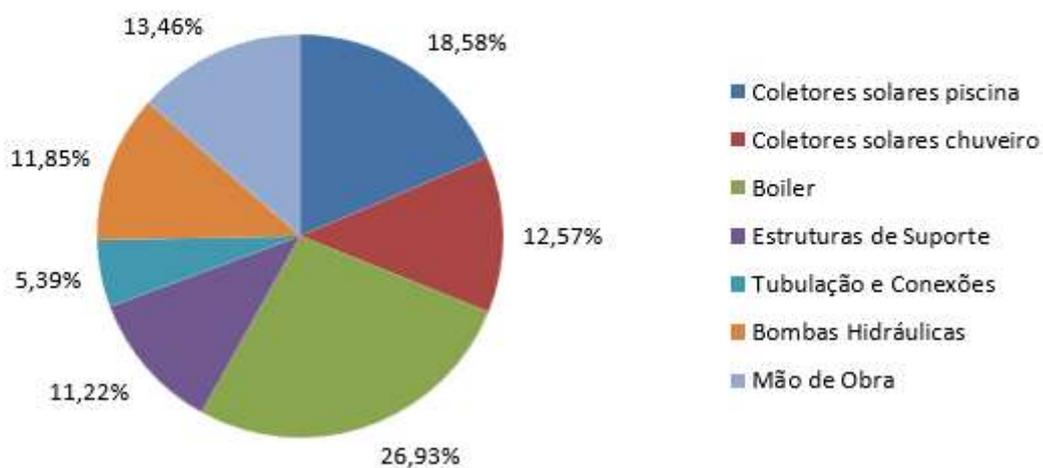
O projeto também inclui 30 metros de tubulação e conexões, ao custo total de R\$ 600,00, para garantir o fluxo adequado de água entre os coletores, o boiler e a rede de distribuição de água quente. Para manter a circulação eficiente, especialmente em áreas onde a gravidade não é suficiente, será instalada uma bomba hidráulica no valor de R\$ 1.320,00. Por fim, os custos de mão de obra foram

estimados em R\$ 2.200,00, abrangendo todos os serviços de instalação, desde a fixação dos coletores até a conexão de todos os componentes do sistema.

O gráfico de pizza da Figura 14 ilustra a distribuição percentual dos custos de instalação do sistema de aquecimento solar direto, totalizando R\$ 11.140,00. O boiler é o item mais caro, representando 26,9% do custo total, seguido pelos coletores solares para piscina, que correspondem a 18,6%. A mão de obra ocupa 13,5%, mostrando a relevância dos serviços especializados. Os coletores solares para chuveiro somam 12,6%, enquanto as bombas hidráulicas representam 11,8%. As estruturas de suporte têm uma participação de 11,2%, e a tubulação e conexões, com 5,4%, possuem o menor impacto no orçamento.

Figura 14: Coletor solar Solar&Sol Cobre 1X1 PP

Distribuição percentual dos custos



Fonte: Autor

Custo de manutenção do sistema

A Tabela 8 apresenta os custos médios de manutenção para o sistema de aquecimento solar direto.

Tabela 8: Custos de manutenção do sistema solar direto

Item de Manutenção	Frequência	Custo Médio Estimado (R\$)
Limpeza dos Coletores Solares	2 vezes/ano	R\$ 500,00
Inspeção Preventiva	Anual	R\$ 100,00
Manutenção do Boiler	Anual	R\$ 100,00
Reparos Eventuais e Componentes	Conforme necessidade	R\$ 100,00
Total Anual		R\$ 800,00

Fonte: Autor (2024)

Os custos de manutenção do sistema de aquecimento solar direto foram estimados em R\$ 800,00 por ano, abrangendo todas as atividades necessárias para manter o sistema funcionando de forma eficiente. A limpeza dos coletores solares, que é realizada duas vezes ao ano, tem um custo anual de R\$ 500,00 e é essencial para garantir a eficiência térmica, removendo sujeira e detritos acumulados que podem reduzir a captação de energia solar.

A inspeção preventiva é realizada uma vez ao ano, com um custo de R\$ 100,00. Esse procedimento inclui a verificação de componentes como tubulações, conexões e válvulas, assegurando que o sistema opere de maneira segura e eficiente. A manutenção do boiler, também anual, é estimada em R\$ 100,00 e envolve a revisão do equipamento para garantir que ele aqueça e armazene a água de forma adequada.

Por fim, foram considerados R\$ 100,00 para reparos eventuais e substituição de pequenos componentes, como válvulas e conexões, que podem apresentar desgaste ao longo do tempo. Esse valor cobre correções pontuais, garantindo a continuidade do funcionamento do sistema sem interrupções significativas.

4.1.3. Comparação entre os dois sistemas

4.1.3.1. Análise de viabilidade econômica

A análise econômica e o retorno sobre o investimento (ROI) dos sistemas fotovoltaico e de aquecimento solar direto são determinantes na escolha da solução mais adequada para atender às necessidades energéticas de um sítio. Para essa avaliação, além do custo de instalação e manutenção, foi levado em consideração o custo do kWh da concessionária Light, que na região de Volta Redonda é de aproximadamente R\$0,89/kWh. Com isso, foi possível calcular o impacto econômico dos sistemas em termos de economia de energia elétrica e de tempo de retorno sobre o investimento.

Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico com bomba de calor foi projetado para atender à demanda de energia elétrica da residência e aquecer a água da piscina e do chuveiro de maneira eficiente e sustentável. O investimento inicial foi estimado em R\$ 31.728,00, abrangendo a instalação de 22 painéis solares OSDA 280W, um inversor de frequência, uma bomba de calor Ortum S28 Wi-Fi, um boiler Komeco de 200 litros, além de todos os itens necessários, como estruturas de suporte, fiação, conectores e mão de obra.

Este sistema foi dimensionado para gerar uma média de 15,75 kWh por dia, totalizando 472,5 kWh por mês. Considerando o custo atual da energia elétrica na região de Volta Redonda, de R\$ 0,89/kWh, o custo evitado com consumo de energia mensal é de aproximadamente R\$ 420,00, resultando em um custo evitado anual de R\$ 5.040,00. Esses valores refletem uma significativa redução nos gastos com energia elétrica, tornando o sistema fotovoltaico uma alternativa atrativa tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Em termos de manutenção, o sistema fotovoltaico apresenta custos relativamente baixos. A manutenção anual foi estimada em R\$ 900,00, abrangendo a limpeza dos painéis solares duas vezes por ano, inspeções preventivas, e eventuais reparos menores em componentes como conexões e disjuntores. Esses custos são importantes para garantir a eficiência e longevidade do sistema, mas não comprometem a viabilidade econômica a longo prazo.

Retorno sobre o investimento (ROI)

A Tabela 9 apresenta os parâmetros relacionados ao ROI do sistema fotovoltaico.

Tabela 9: Roi sobre investimento do sistema fotovoltaico

Parâmetro	Valor
Economia Líquida Anual	R\$4.140,00
Economia Anual	R\$5.040,00
Custo de Manutenção Anual	R\$ 900,00
Taxa de Juros	11%
Investimento Inicial	R\$31.728,00
Número de Anos para Retorno (N)	Aproximadamente 7,66
Valor Presente Líquido (VPL, 10 anos)	R\$24.381,42

Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados, o sistema fotovoltaico com bomba de calor não demonstra ser economicamente viável no prazo de 10 anos, considerando o investimento inicial ajustado para R\$ 31.728,00. O Valor Presente Líquido (VPL), calculado para um período de 10 anos com uma taxa de juros de 11% ao ano, é de R\$ 24.381,42, um valor inferior ao investimento inicial.

Esse resultado indica que o sistema não recupera integralmente o valor investido no período analisado, gerando um déficit em relação ao capital aplicado. Além disso, o *payback*, ou tempo necessário para o retorno do investimento, foi calculado em aproximadamente 7,66 anos, um prazo que não garante uma margem de retorno significativa dentro da vida útil esperada do sistema.

ROI em relação a vida útil dos equipamentos

O Retorno sobre o Investimento (ROI) do sistema fotovoltaico em relação à vida útil foi analisado com base em seus principais componentes e na economia gerada ao longo do tempo. O investimento inicial para a instalação do sistema é de R\$ 31.728,00, enquanto a economia líquida anual é de R\$ 4.140,00, resultante da diferença entre a economia total (R\$ 5.040,00) e os custos de manutenção anual (R\$ 900,00).

Considerando a vida útil estimada dos painéis solares, que é de 25 anos, a economia total gerada ao longo desse período seria de R\$ 4.140,00 multiplicado por 25, totalizando R\$ 103.500,00. Descontando o investimento inicial de R\$ 31.728,00, o lucro líquido acumulado ao final da vida útil do sistema seria de R\$ 71.772,00.

Além disso, é necessário considerar a substituição do inversor, que tem uma vida útil média de 10 a 15 anos e um custo estimado de R\$ 3.000,00 por substituição. Mesmo assim, o impacto desse custo na análise de ROI é pequeno em comparação com a economia gerada, mantendo o sistema altamente lucrativo ao longo de sua vida útil.

Esses cálculos demonstram que o sistema fotovoltaico é uma solução economicamente viável em longo prazo, garantindo um retorno financeiro expressivo muito além do investimento inicial. A economia acumulada durante os 25 anos compensa os custos de manutenção e reposição de componentes, tornando o sistema uma escolha sustentável e rentável.

ROI em relação a garantia

O Retorno sobre o Investimento (ROI) do sistema fotovoltaico em relação à garantia dos equipamentos foi avaliado considerando o período de 12 anos, que é o tempo de cobertura oferecido pelos fabricantes. O investimento inicial do sistema é de R\$ 31.728,00, e a economia líquida anual gerada é de R\$ 4.140,00, resultado da economia total (R\$ 5.040,00) menos os custos anuais de manutenção (R\$ 900,00).

Durante o período de garantia, a economia acumulada é calculada multiplicando a economia líquida anual pelo número de anos da garantia, ou seja, $R\$ 4.140,00 \times 12 \text{ anos} = R\$ 49.680,00$. Descontando o investimento inicial de R\$ 31.728,00, o lucro líquido ao final do período de garantia seria de R\$ 17.952,00.

Esse resultado mostra que o sistema não apenas recupera o investimento inicial antes do término da garantia (payback de 7,66 anos), mas também gera um retorno financeiro adicional durante os anos restantes cobertos pela garantia. O período de garantia reduz os riscos associados a falhas nos equipamentos, garantindo segurança ao investimento durante os primeiros 12 anos de operação.

Essa análise demonstra que, no horizonte da garantia, o sistema fotovoltaico é uma escolha economicamente viável, com retorno financeiro suficiente para justificar o investimento inicial e gerar lucro dentro de um período seguro. Além disso,

a continuidade do funcionamento após o término da garantia amplia ainda mais o retorno ao longo da vida útil do sistema.

Sistema de Aquecimento Solar Direto

O sistema de aquecimento solar direto foi dimensionado para atender à demanda de água quente da piscina e dos chuveiros, utilizando 23 coletores solares TS Solar CPTS-300 para a piscina 2 coletores Solar&Sol Cobre 1X1 PP para o chuveiro junto a um boiler Komeco de 200 litros. O investimento inicial foi estimado em R\$ 11.140,00, considerando os custos de instalação, que incluem, tubulação, bomba hidráulica, estruturas de suporte e mão de obra. Esse sistema se destaca pela alta eficiência térmica, utilizando energia solar para aquecer diretamente a água, com um rendimento estimado em 80%, o que garante aquecimento eficiente em regiões com alta radiação solar, como Volta Redonda.

Com uma área total de 21,6 m² de coletores, o sistema é capaz de atender tanto à piscina quanto aos chuveiros, elevando a temperatura da água da piscina de 13°C para 25°C e a dos chuveiros para 45°C a 50°C. Isso garante conforto térmico mesmo durante os meses mais frios, sem depender do consumo de energia elétrica para o aquecimento de água.

Do ponto de vista econômico, o sistema proporciona uma economia anual estimada entre R\$ 1.620,00 a R\$ 2.600,00, considerando o custo da energia elétrica de R\$ 0,89/kWh. Essa economia representa uma redução significativa nos custos operacionais relacionados ao aquecimento de água, especialmente em comparação com sistemas convencionais, como chuveiros elétricos.

Os custos de manutenção foram estimados em R\$ 800,00 anuais, abrangendo limpeza, inspeções preventivas e reparos eventuais. A limpeza dos coletores solares, realizada uma ou duas vezes por ano, tem um custo de R\$ 400,00, sendo essencial para manter a eficiência térmica. As inspeções preventivas custam R\$ 100,00 por ano e garantem o funcionamento correto do sistema, enquanto a manutenção do boiler e pequenos reparos em tubulações ou conexões somam R\$ 300,00 anuais.

Retorno sobre o investimento (ROI)

A Tabela 10 apresenta os parâmetros relacionados ao ROI do sistema solar direto.

Tabela 10: Roi sobre investimento do sistema solar direto

Parâmetro	Valor
Economia Líquida Anual	R\$ 1.800,00
Economia Anual	R\$ 2.600,00
Custo de Manutenção Anual	R\$ 800,00
Taxa de Juros	11%
Investimento Inicial	R\$ 11.140,00
Valor Presente Líquido (VPL, 10 anos)	R\$ 10.600,62

Fonte: Autor (2024)

Com base nos cálculos, o sistema de aquecimento solar direto também se revela economicamente viável. O Valor Presente Líquido (VPL) para um período de 10 anos é de R\$ 10.600,62, inferior ao investimento inicial de R\$ 11.140,00. Isso demonstra que o sistema não recupera o investimento no prazo, mas gera um retorno financeiro positivo ao longo do período analisado.

O *payback* do sistema, ou seja, o tempo necessário para recuperar o investimento inicial, é de aproximadamente 6,2 anos. Após esse período, o sistema oferece economia direta nos custos operacionais, consolidando-se como uma solução sustentável e financeiramente vantajosa para o aquecimento de água.

ROI em relação a vida útil dos equipamentos

O Retorno sobre o Investimento (ROI) do sistema solar direto em relação à vida útil foi analisado com base em seus principais componentes e na economia gerada ao longo do tempo. O investimento inicial para a instalação do sistema é de R\$ 11.140,00, enquanto a economia líquida anual é de R\$ 1.800,00, resultante da diferença entre a economia total (R\$ 2.600,00) e os custos de manutenção anual (R\$ 800,00).

Considerando a vida útil estimada dos coletores solares, que é de 20 anos, a economia total gerada ao longo desse período seria de R\$ 1.800,00 multiplicado por 20, totalizando R\$ 36.000,00. Descontando o investimento inicial de R\$ 11.140,00, o lucro líquido acumulado ao final da vida útil do sistema seria de R\$ 24.860,00.

Alem disso, é necessário considerar a substituição do boiler, que tem uma vida útil média de 20 anos e um custo estimado de R\$ 2.300,00 por substituição.

Mesmo assim, o impacto desse custo na análise de ROI é pequeno em comparação com a economia gerada, mantendo o sistema altamente lucrativo ao longo de sua vida útil.

Esses cálculos demonstram que o sistema solar direto é uma solução economicamente viável em longo prazo, garantindo um retorno financeiro expressivo além do investimento inicial. A economia acumulada durante os 20 anos compensa os custos de manutenção e reposição de componentes, tornando o sistema uma escolha sustentável e rentável.

ROI em relação a garantia

O Retorno sobre o Investimento (ROI) do sistema solar direto em relação à garantia dos equipamentos foi avaliado considerando o período de 5 anos, que é o tempo de cobertura oferecido pelos fabricantes. O investimento inicial do sistema é de R\$ 11.140,00, e a economia líquida anual gerada é de R\$ 1.800,00, resultado da economia total (R\$ 2.600,00) menos os custos anuais de manutenção (R\$ 800,00).

Durante o período de garantia, a economia acumulada é calculada multiplicando a economia líquida anual pelo número de anos da garantia, ou seja, $R\$ 1.800,00 \times 5 \text{ anos} = R\$ 9.000,00$. Descontando o investimento inicial de R\$ 11.140,00, o lucro líquido ao final do período de garantia seria de R\$ 2.140,00.

Esse resultado mostra que o sistema não recupera o investimento inicial antes do término da garantia (payback de 6,2 anos), mas gera um retorno financeiro adicional durante os anos restantes cobertos pela garantia. O período de garantia reduz os riscos associados a falhas nos equipamentos, garantindo segurança ao investimento durante os primeiros 5 anos de operação.

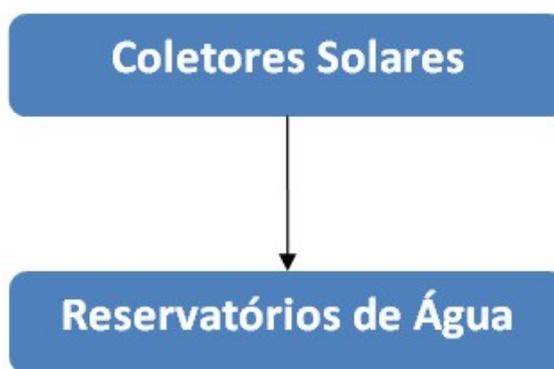
Essa análise demonstra que, no horizonte da garantia, o sistema solar direto é uma escolha economicamente viável, com retorno financeiro suficiente para justificar o investimento inicial e gerar lucro dentro de um período seguro. Além disso, a continuidade do funcionamento após o término da garantia amplia ainda mais o retorno ao longo da vida útil do sistema.

4.1.3.2. Fluxograma de funcionamento do sistema solar direto

Conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 15, no sistema solar direto, água circula pelos coletores solares, que absorvem o calor do sol e aquecem

a água diretamente. Essa água aquecida é transportada por meio das tubulações e conexões, com o auxílio das bombas hidráulicas, que garantem o fluxo contínuo. Por fim, a água é armazenada no boiler, pronta para ser utilizada em piscinas, chuveiros ou outros pontos de consumo. Este sistema é simples, eficiente e utiliza energia solar diretamente para o aquecimento da água.

Figura 15: Fluxograma de funcionamento do sistema solar direto



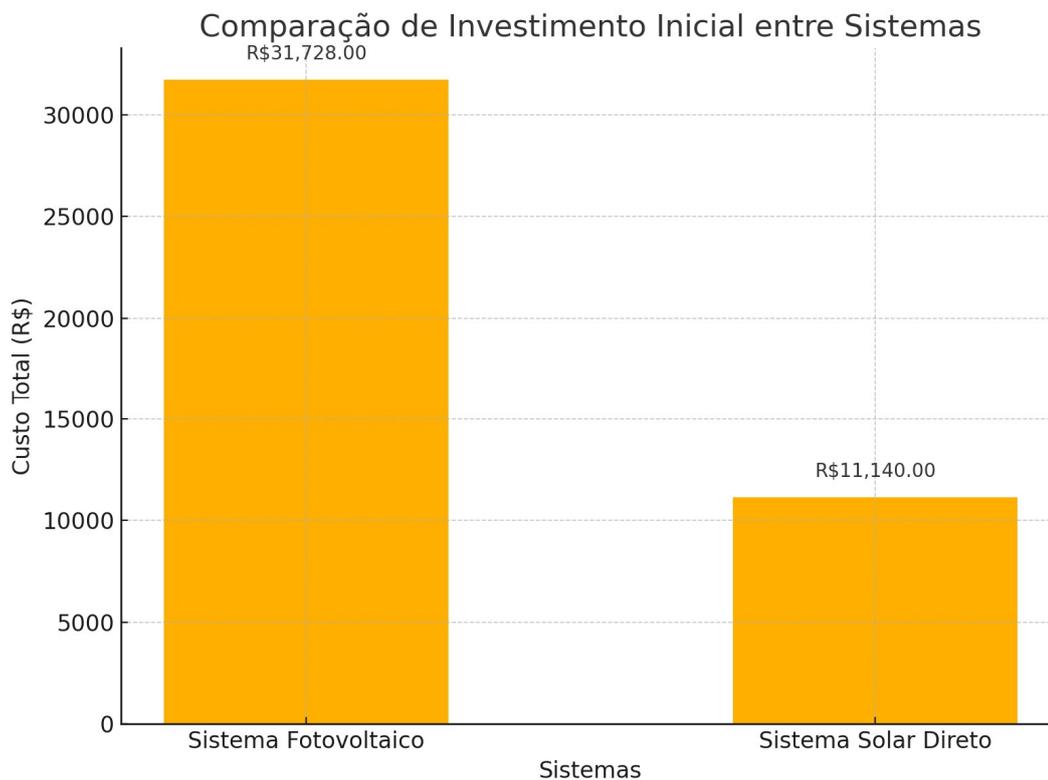
Fonte: Autor

4.1.3.3. Comparação entre o Sistema Fotovoltaico e o Sistema de Aquecimento Solar Direto

Investimento Inicial

- **Sistema Fotovoltaico:** O custo total de instalação é estimado em R\$ 31.728,00, abrangendo painéis solares, bomba de calor, boiler, inversor de frequência, estruturas de suporte e mão de obra. Este valor reflete um investimento inicial significativamente mais alto devido à inclusão dos painéis fotovoltaicos.
- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:** O custo total de instalação é de R\$ 11.140,00, incluindo coletores solares, boiler, tubulação e bomba hidráulica. Este sistema apresenta um investimento inicial consideravelmente menor.

Figura 16: Gráfico de comparação do investimento inicial entre os dois sistemas



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 16 ilustra a comparação do investimento inicial entre o Sistema Fotovoltaico e o Sistema de Aquecimento Solar Direto. O Sistema Fotovoltaico apresenta um custo total de R\$ 31.728,00, enquanto o Sistema de Aquecimento Solar Direto tem um custo de R\$ 11.140,00. Isso representa uma diferença significativa de 185% no investimento inicial entre os dois sistemas, com o fotovoltaico sendo mais caro.

Essa diferença substancial ocorre devido à complexidade e ao custo dos componentes do sistema fotovoltaico, como painéis solares e inversores de frequência. Por outro lado, o sistema de aquecimento solar direto, por ser mais específico e simples em sua aplicação, apresenta um custo inicial bem menor, tornando-se uma opção mais acessível em cenários de orçamento limitado.

Eficiência Energética

- **Sistema Fotovoltaico:** A eficiência global do sistema é alta, gerando energia elétrica para diversos fins, além de alimentar a bomba de calor para aquecer a água. O sistema opera com uma eficiência de 80%, considerando perdas na

conversão e transmissão de energia.

- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:**A eficiência térmica do sistema é de 80%, mas com foco exclusivo no aquecimento de água. Por ser projetado especificamente para esta finalidade, ele se destaca na eficiência térmica em regiões com alta radiação solar.

Economia Anual

- **Sistema Fotovoltaico:**A economia anual gerada pela redução no consumo de energia elétrica da rede é estimada em R\$ 5.040,00, considerando o custo de R\$ 0,89/kWh e o consumo médio mensal de 472,5 kWh.
- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:**A economia anual é de aproximadamente R\$ 2.600,00, eliminando o consumo de energia elétrica para aquecimento de água. Embora a economia seja menor, o sistema proporciona redução imediata nos custos de energia relacionados à água quente.

Retorno sobre o Investimento (ROI)

- **Sistema Fotovoltaico:**Com base na economia líquida anual de R\$ 4.140,00 e aplicando uma taxa de juros compostos de 11% ao ano (taxa SELIC atual), o Valor Presente Líquido (VPL) calculado para 10 anos é de R\$ 24.381,42, o que ainda fica abaixo do investimento inicial de R\$ 31.728,00. O *payback* estimado é de aproximadamente 7,66 anos, indicando que o sistema começa a se pagar a partir desse período. Apesar de apresentar benefícios em longo prazo, o retorno financeiro não se mostra tão competitivo devido ao investimento inicial elevado e à taxa de juros atual. A análise é particularmente relevante em regiões onde as tarifas de energia elétrica estão em constante aumento, podendo alterar o cenário de viabilidade econômica.
- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:**Considerando a economia líquida anual de R\$ 1.800,00 e aplicando a mesma taxa de juros de 11% ao ano, o VPL para 10 anos é de R\$ 10.600,62, inferior ao investimento inicial de R\$ 11.140,00. O *payback* estimado é de 6,2 anos, refletindo o menor custo inicial e um retorno mais rápido. Apesar de gerar uma economia anual menor, o curto prazo de retorno é um diferencial relevante, especialmente para projetos

com orçamento inicial limitado.

Custos de Manutenção

- **Sistema Fotovoltaico:** O custo anual de manutenção é de R\$ 900,00, abrangendo a limpeza dos painéis solares, inspeção preventiva e eventuais reparos.
- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:** A manutenção anual é estimada em R\$ 800,00, incluindo a limpeza dos coletores solares, inspeção do sistema e pequenos reparos. Este custo é ligeiramente menor devido à simplicidade dos coletores solares.

Versatilidade e Aplicabilidade

- **Sistema Fotovoltaico:** Este sistema é mais versátil, pois gera energia elétrica que pode ser utilizada para outros dispositivos na residência, além de aquecer a água. Sua aplicabilidade é ampla, atendendo a diversas demandas energéticas.
- **Sistema de Aquecimento Solar Direto:** Embora eficiente no aquecimento de água, este sistema é menos versátil, pois sua aplicação é restrita ao aquecimento térmico. É ideal para locais com alta demanda de água quente, como piscinas e chuveiros.

4.1.3.4. Eficiência Energética e Impacto no Consumo

A análise da eficiência energética e do impacto no consumo de energia é fundamental para compreender o desempenho e a contribuição de cada sistema na redução dos custos operacionais. Tanto o sistema fotovoltaico com bomba de calor quanto o sistema solar direto com coletores oferecem soluções sustentáveis e eficazes, mas com abordagens distintas.

O sistema fotovoltaico com bomba de calor apresenta uma eficiência global de 80%, considerando as perdas na conversão de energia solar em elétrica e o uso dessa energia em diferentes equipamentos da residência. Com uma produção média de 472,5 kWh por mês, o sistema reduz consideravelmente a dependência da rede elétrica, proporcionando uma economia anual de R\$ 5.040,00. Sua versatilidade é um de seus principais pontos fortes, permitindo que a energia excedente gerada pelos painéis seja utilizada em outros dispositivos, como iluminação,

eletrodomésticos e ventilação, maximizando o impacto positivo no consumo total de energia elétrica.

Por outro lado, o sistema solar direto com coletores opera com uma eficiência térmica de 80%, sendo altamente eficaz no aquecimento de água para uso em piscinas e chuveiros. Este sistema praticamente elimina o consumo de energia elétrica para essas finalidades, resultando em uma economia anual de até R\$ 2.600,00, dependendo do perfil de uso. Como os coletores solares aquecem diretamente a água, sem necessidade de conversão elétrica, o sistema se mostra ideal para locais com alta demanda de água quente, oferecendo uma solução simples e direta.

Comparando os impactos, o sistema fotovoltaico destaca-se por sua versatilidade, atendendo a uma ampla gama de necessidades energéticas, enquanto o sistema solar direto foca exclusivamente no aquecimento de água. Ambos proporcionam uma significativa redução da dependência da rede elétrica, mas o fotovoltaico se sobressai por oferecer suporte a diferentes dispositivos, enquanto o solar direto elimina o custo de aquecimento de água. Ambos os sistemas são eficientes e sustentáveis, porém em contextos distintos: o fotovoltaico possui uma aplicação mais abrangente, enquanto o solar direto é mais eficaz em sua especialização. A escolha entre os dois sistemas deve ser baseada nas prioridades e necessidades específicas do usuário, considerando a diversificação do uso da energia gerada ou a maximização da eficiência térmica.

5. CONCLUSÃO

A análise comparativa entre o sistema fotovoltaico com bomba de calor e o sistema de aquecimento solar direto destacou as principais vantagens e limitações de cada solução no contexto de um sítio rural. Ambos os sistemas demonstraram alta eficiência energética e impacto significativo na redução do consumo de energia elétrica, promovendo sustentabilidade e economia financeira a longo prazo.

O sistema fotovoltaico se sobressaiu por sua versatilidade, com uma geração média de 472,5 kWh/mês. Além de atender à demanda de aquecimento de água, possibilitou o uso da energia excedente em outros dispositivos residenciais, gerando uma economia anual estimada de R\$ 5.040,00. Contudo, seu investimento inicial de R\$ 31.728,00 e custos anuais de manutenção de R\$ 900,00 resultaram em um

payback de aproximadamente 7,66 anos, com um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 24.381,42 em 10 anos, considerando uma taxa de juros de 11% ao ano. Esses números refletem um retorno financeiro moderado, mas ainda relevante em regiões com tarifas de energia elétrica elevadas.

Por outro lado, o sistema de aquecimento solar direto apresentou alta eficiência térmica, atendendo às demandas de aquecimento de água para piscina e chuveiros de forma eficiente. Com um investimento inicial de R\$ 11.140,00 e custos anuais de manutenção de R\$ 800,00, o sistema gerou uma economia anual de até R\$ 2.600,00, dependendo do padrão de uso. O payback foi estimado em cerca de 6,2 anos, com um VPL de R\$ 10.600,62 em 10 anos, o que demonstra uma viabilidade econômica significativa.

Embora o sistema fotovoltaico ofereça uma solução ampla para o consumo energético geral da residência, o sistema de aquecimento solar direto se destacou por sua vantagem no custo inicial, representando menos da metade do investimento necessário para o sistema fotovoltaico. Essa abordagem torna o aquecimento solar direto especialmente atraente para projetos com restrições orçamentárias ou focados em uma solução específica de alto impacto financeiro, como o aquecimento de água.

Conclui-se, portanto, que o sistema de aquecimento solar direto é a alternativa mais vantajosa nesse contexto. Seu menor custo de instalação, aliado à rápida recuperação do investimento, posiciona-o como uma solução eficiente, prática e econômica para atender às necessidades de aquecimento de água.

É importante destacar que este estudo foi realizado de forma teórica, e os sistemas não foram implantados no local para validação prática. Como trabalhos futuros, sugere-se ampliar a análise para diferentes regiões rurais com variações climáticas, avaliando o impacto dessas variáveis na eficiência dos sistemas. Além disso, seria interessante adaptar o estudo para contextos como hotéis, escolas e outras aplicações comerciais ou institucionais, explorando como esses sistemas podem atender demandas mais amplas ou específicas. Essas perspectivas podem contribuir para uma avaliação ainda mais abrangente e prática da viabilidade desses sistemas em diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

- 1) ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200532>.
- 2) SILVA, Arthur Santos et al. Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**, v. 2, p. 7-18, 2014.
- 3) ALTOÉ, Leandra; OLIVEIRA FILHO, Delly; CARLO, Joyce Correna. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.75-87, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212012000300006>.
- 4) GIGLIO, Thalita Gorban Ferreira. **Influência do usuário na economia de energia obtida por meio do uso de sistema de aquecimento solar de água em habitações de interesse social**. 2015. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_ThalitaGiglio2.pdf.
- 5) SOUSA, Lays Camila de et al. Avaliação de um sistema de energia solar térmica para a substituição de chuveiro elétrico numa residência no município de Itajubá, Minas Gerais, Brasil. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018, Gramado.
- 6) FÁBIO W. Como funciona a energia solar?. **Sebrae Respostas**. 2020.
- 7) SOLETROL. **Como Funciona o Aquecedor Solar de Água Soletrol**. 2023. Disponível em: <https://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>
- 8) SIBRAPE. **Ortum**. 2024. Disponível em: <https://sibrape.com.br/produtos/piscinas/aquecedores/ortum/>
- 9) KOMECO. **Reservatório térmico**. 2024. Disponível em: <https://www.komeco.com.br/reservatorio-termico/>
- 10) CRECESB. **Potencial solar**. 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>
- 11) REDIMAX. **Painel Solar Fotovoltaico OSDA ODA280-30-P**. 2024. Disponível em: <https://redimax.com.br/2024/produto/painel-solar-fotovoltaico-osda-oda280-30-p/>
- 12) GROWATT. **Inversor on Grid**. 2024. Disponível em: <https://br.growatt.com/>
- 13) SODRAMAR. **5 dicas para dimensionar um aquecedor para piscina de clube ou condomínio**. 2023. Disponível em: <https://sodramar.com.br/acessorios-piscinas-blog/5-dicas-para-dimensionar-um-aquecedor-para-piscina-de-clube-ou-condominio/>
- 14) TS SOLAR. **CPTS 300**. 2024. Disponível em: <https://ts-solar.com.br/>
- 15) SOLAR E SOL. **Coletor solar cobre 1x1**. 2024. Disponível em: <https://www.solaresol.com.br/>
- 16) OLIVEIRA, Luiz Henrique et al. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica**. 2018.