

Análise da eficiência energética de sistemas de aquecimento solar de água com armazenamento de calor sensível em Moçambique

Energy efficiency analysis of solar water heating systems with sensible heat storage in Mozambique

Análisis de eficiencia energética de sistemas solares de calentamiento de agua con almacenamiento de calor sensible en Mozambique

Recebido: 06/09/2024 | Revisado: 22/09/2024 | Aceitado: 23/09/2024 | Publicado: 26/09/2024

Fernando Chichango

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0613-921X>
Universidade Zambeze, Moçambique
E-mail: fernando.chichango@uzambeze.ac.mz

Luís Cristóvão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-8102>
Universidade Zambeze, Moçambique
E-mail: lumecristovao@gmail.com

Jorge Nhambiu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2905-2402>
Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique
E-mail: nhambiu@gmail.com

Fabião Cumbe

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2203-0839>
Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique
E-mail: cumbe98@yahoo.com

Gil Gabriel Mavanga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-9810>
Universidade Pedagógico de Maputo, Moçambique
E-mail: ggmavanga@gmail.com

Resumo

Considerando a crescente procura de soluções energéticas sustentáveis e a necessidade de reduzir os custos de eletricidade, a dependência de combustíveis fósseis e a desflorestação, o objetivo deste artigo é apresentar um estudo de caso de desempenho de implementação de sistemas de aquecimento solar com armazenamento de calor sensível em Moçambique. Este estudo investiga a eficiência destes sistemas quando os sistemas de armazenamento de calor são integrados. O método de estudo de caso inclui a recolha de dados empíricos através de medições de campo e simulações computacionais. Os resultados indicam que o aquecedor solar, quando integrado com sistemas de armazenamento térmico, tem elevado potencial de eficiência energética. As simulações mostram que, ao armazenar a energia excedente diária, o aquecedor solar pode alcançar até dois dias de autonomia energética, graças à abundante radiação solar na região e à capacidade térmica de pedra-sabão e óleo térmico. No entanto, estes sistemas enfrentam desafios como a variabilidade climática e os elevados custos iniciais. Além disso, o estudo destaca que, com políticas públicas adequadas e incentivos financeiros, a adoção de sistemas de aquecimento solar pode ser uma solução viável e sustentável para o abastecimento de água quente em Moçambique. A implementação de tais sistemas não só contribuiria para a redução da dependência dos combustíveis fósseis, mas também promoveria o desenvolvimento sustentável no país.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Aquecimento Solar; Armazenamento de Calor Sensível; Sistemas Solares.

Abstract

Considering the growing demand for sustainable energy solutions and the need to reduce electricity costs, dependence on fossil fuels and deforestation, the aim of this article is to present a case study of the implementation performance of solar heating systems with sensible heat storage in Mozambique. This study investigates the efficiency of these systems when heat storage systems are integrated. The case study method includes the collection of empirical data through field measurements and computer simulations. The results indicate that the solar heater, when integrated with thermal storage systems, has high energy efficiency potential. The simulations show that, by storing the daily surplus energy, the solar heater can achieve up to two days of energy autonomy, thanks to the abundant solar radiation in the region and the thermal capacity of soapstone and thermal oil. However, these systems face challenges such as climate variability and high upfront costs. In addition, the study highlights that, with appropriate public policies and financial incentives, the adoption of solar heating systems can be a viable and sustainable solution for hot water supply in

Mozambique. The implementation of such systems would not only contribute to the reduction of dependence on fossil fuels but also promote sustainable development in the country.

Keywords: Energy Efficiency; Solar Heating; Sensible Heat Storage; Solar Systems.

Resumen

Teniendo en cuenta la creciente demanda de soluciones energéticas sostenibles y la necesidad de reducir los costes de electricidad, la dependencia de los combustibles fósiles y la deforestación, el objetivo de este artículo es presentar un estudio de caso sobre el rendimiento de la implementación de sistemas de calefacción solar con almacenamiento de calor sensible en Mozambique. Este estudio investiga la eficiencia de estos sistemas cuando se integran sistemas de almacenamiento de calor. El método de estudio de caso incluye la recopilación de datos empíricos a través de mediciones de campo y simulaciones por computadora. Los resultados indican que el calentador solar, cuando se integra con sistemas de almacenamiento térmico, tiene un alto potencial de eficiencia energética. Las simulaciones muestran que, al almacenar el excedente de energía diario, el calentador solar puede alcanzar hasta dos días de autonomía energética, gracias a la abundante radiación solar de la región y a la capacidad térmica de la esteatita y el aceite térmico. Sin embargo, estos sistemas se enfrentan a desafíos como la variabilidad climática y los altos costos iniciales. Además, el estudio destaca que, con políticas públicas e incentivos financieros adecuados, la adopción de sistemas de calefacción solar puede ser una solución viable y sostenible para el suministro de agua caliente en Mozambique. La implementación de tales sistemas no solo contribuiría a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también promovería el desarrollo sostenible en el país.

Palabras clave: Rendimiento Energético; Calefacción Solar; Almacenamiento de Calor Sensible; Sistemas Solares.

1. Introdução

O acesso à água quente é essencial para o bem-estar e conforto das famílias, contribuindo significativamente para a saúde mental e emocional dos moradores (Rinnai, 2020). Além de ser crucial para atividades diárias como tomar banho, lavar louças e roupas, a água quente é mais eficaz na remoção de sujeira e germes, promovendo padrões adequados de higiene e prevenindo doenças (KLCLIMA, 2023). No entanto, o aquecimento de águas sanitárias representa uma parte significativa do consumo de energia nos lares, tornando necessário o investimento em sistemas de aquecimento eficientes para reduzir custos operacionais e o impacto ambiental (KLCLIMA, 2023).

A crescente demanda por fontes de energia renováveis tem impulsionado a adoção de tecnologias solares. Moçambique, com sua abundante radiação solar (Cristóvão et al., 2021), apresenta um grande potencial para a utilização de aquecedores solares de água. Esses sistemas, compostos por coletores solares e um reservatório térmico, captam a radiação solar e transferem o calor para água, oferecendo uma alternativa sustentável e econômica (Silva, 2020).

Contudo, os aquecedores solares convencionais enfrentam limitações no fornecimento de água quente durante dias nublados e períodos de maior demanda, como as horas noturnas e matinais. Essas limitações são agravadas quando o sistema auxiliar elétrico não funciona devido à falta de rede elétrica, uma situação típica na maioria das regiões de Moçambique, que possui uma taxa de eletrificação abaixo de 57% (Chichango & Cristóvão, 2023).

Em Moçambique, os sistemas de aquecimento de água são predominantemente convencionais, importados e vendidos a preços inacessíveis para a maioria da população, limitando o acesso à energia limpa e renovável (Chichango & Cristóvão, 2021). A literatura existente sobre o tema é escassa, especialmente em países em desenvolvimento, criando uma lacuna que precisa ser preenchida para promover soluções adequadas e acessíveis.

Os gastos de energia para aquecimento de água em residências são inevitáveis. Conforme Reis (2018), o aquecimento de águas sanitárias representa uma parte significativa do consumo de energia nos lares. Em Portugal, por exemplo, o aquecimento de água sanitária é um dos maiores consumidores de energia, representando cerca de 23,5% do consumo energético total de uma vivenda (Adene, 2016). O relatório do INE (2021) mostra que a energia para aquecimento de águas representou 22,0% do consumo total de energia no setor doméstico em 2020. Segundo Luzegas (2024), o aquecimento de água numa habitação pode representar cerca de 10% do consumo de energia.

Os gastos com o conforto térmico e outras aplicações de ar climatizado, água quente ou fria estão associados ao uso

de energia. O uso de energia não renovável acarreta custos que vão além dos financeiros, incluindo impactos ambientais que têm se tornado cada vez mais evidentes nos últimos anos. Esses impactos são particularmente graves em países em desenvolvimento, que possuem poucas possibilidades de evitar desastres e lidar com as consequências desses eventos naturais. Moçambique é um exemplo desses países, tendo recentemente sofrido com ciclones severos de forma consecutiva nos últimos 5 anos (Meque, et al., 2023).

De acordo com o prognóstico de Nhambiu e Chichango (2024c), o aumento populacional em Moçambique está previsto para elevar significativamente a demanda energética. Se medidas sustentáveis não forem implementadas, o país corre o risco de se tornar um grande poluente devido ao aumento do desmatamento e contribuição para elevação da temperatura global. Para mitigar esses riscos, é essencial investir em energias renováveis, aumentar a eficiência energética, promover o reflorestamento e a conservação das florestas, além de educar a população sobre práticas sustentáveis.

Além disso, incentivos governamentais e parcerias internacionais podem desempenhar um papel crucial na adoção de tecnologias e práticas sustentáveis. Essas ações não só ajudarão a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também garantirão um futuro mais sustentável para Moçambique, protegendo o meio ambiente e melhorando a qualidade de vida da população.

Na busca de alternativas para reduzir os custos de energia e o desmatamento causado pela elevada demanda de biomassa para aquecimento de água em residências, os sistemas solares de aquecimento de água se apresentam como uma solução eficaz. No entanto, para superar as limitações no fornecimento de água quente durante dias nublados e nas horas de maior demanda, como as noturnas e matinais, propõe-se a integração de um sistema auxiliar de armazenamento de calor (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de caso de desempenho de implementação de sistema de aquecimento solar com armazenamento de calor sensível em Moçambique. Especificamente, busca-se avaliar a eficiência dos coletores solares quando integrados a um sistema auxiliar de armazenamento de calor sensível. A pesquisa também analisará as oportunidades e os desafios de implementação desses sistemas em residências moçambicanas.

2. Referencial Teórico

Evolução Histórica de aquecimento solar de água para residências

O aquecimento solar de água tem uma longa história. Em 1767, Horace de Saussure realizou as primeiras experiências documentadas, utilizando uma caixa com isolamento térmico para captar e reter calor solar (Saussure, 1767). Em 1936, Charles Greeley Abbott inventou um aquecedor solar mais eficiente (Abbott, 1936). No Brasil, esses sistemas ganharam popularidade nas últimas décadas, especialmente em áreas rurais e isoladas, onde a energia elétrica é limitada ou cara (Oliveira, 2018). Esses sistemas reduzem o consumo de energia elétrica e são uma fonte de energia limpa e renovável (Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável, 2021).

Evolução Tecnológica de Aquecedores Solares de Água

A evolução dos aquecedores solares reflete avanços tecnológicos e a demanda por soluções sustentáveis. Em 1891, Clarence Kemp patenteou o primeiro aquecedor solar comercial, o "Climax Solar Water Heater" (Kemp, 1891). Durante a década de 1950, a crise energética impulsionou o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, como coletores planos com tubos de cobre e vidro temperado (Frontmatter, 2013). Os sistemas de aquecimento solar de água podem ser classificados em distintas categorias, conforme apresentado no Quadro (1).

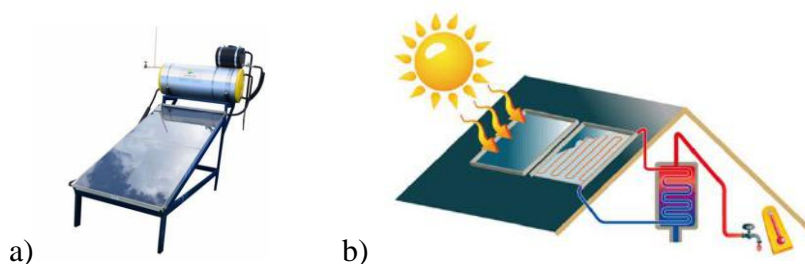
Quadro 1 - Classificação dos tipos de coletores solares para aquecimento de água.

Classif.	Categoria	Descrição	Aplicações	Fonte
Quanto superfície de absorção	Coletores Planos	Superfície plana que absorve a radiação solar	Residências e piscinas	Silva, 2020
	Coletores de Tubos de Vácuo	Utilizam tubos de vidro evacuados para minimizar a perda de calor	Regiões com baixa radiação solar, altas temperaturas	Pereira, 2019
Quanto a cobertura	Coletores Sem Cobertura	Não possuem cobertura de vidro ou plástico, menos eficientes	Aquecimento de piscinas	Duarte, 2012
	Coletores com Cobertura	Possuem cobertura de vidro ou plástico que ajuda a reter o calor	Residências e comerciais	Thermal Engineering, 2024
Quanto a forma de circulação da água	Coletores Passivos	Não utilizam bombas ou controles eletrônicos, dependem da circulação natural	Sistemas de termosifão	Ferreira, 2022
	Coletores Ativos	Utilizam bombas e controles eletrônicos para circular o fluido	Sistemas de circulação forçada	Oriol Planas-Engenheiro Técnico Industrial (2017)
	Coletores Híbridos	Combinam tecnologias de aquecimento solar com outras fontes de energia	Sistemas que necessitam de fonte complementar	Oriol Planas-Engenheiro Técnico Industrial. (2017, abril 20).

Fonte: Autoria própria.

Em adição a classificação do Quadro 1, os coletores solar podem ser do tipo direto ou indireto. Os sistemas diretos, a água a ser usada é aquecida diretamente pela radiação solar no coletor solar, e nos sistemas indiretos, utilizam um fluido térmico, fluido de trabalho, que é aquecido pela radiação solar na placa coletora e, posteriormente, transfere o calor para a água a ser utilizada por meio de trocador de calor. A Figura 1 apresenta os sistemas de aquecimento de água de forma directa (a) e indirecta (b).

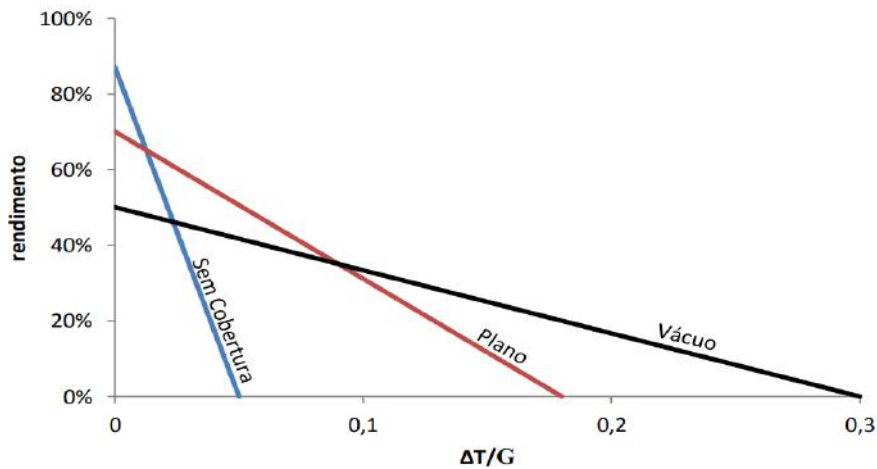
Figura 1 - Aquecedores solares de água de placa plana.



Fonte: (a) PatroSol | Aquecedor Solar com Ofertas Incríveis! e (b) Soluciones solar residencial - Vivasolar Colombia (vivasolar-colombia.com)

Os aquecedores de placa plana são amplamente utilizados em residências devido à sua simplicidade e eficiência. Segundo Silva (2020); Chichango e Cristóvão (2023), esses coletores são os mais fáceis e acessíveis para modificações e inovações, tornando-os uma escolha popular para aplicações domésticas. Além disso, a literatura destaca que os coletores de placa plana possuem uma boa relação custo-benefício, especialmente em climas moderados, onde as perdas térmicas são menores (Heliodin, 2024). A Figura 2 apresente um diagrama de comparação de rendimentos de coletores solares.

Figura 2 - Comparação de rendimento de diferentes tipos de coletores solares.



Fonte: Duarte (2012).

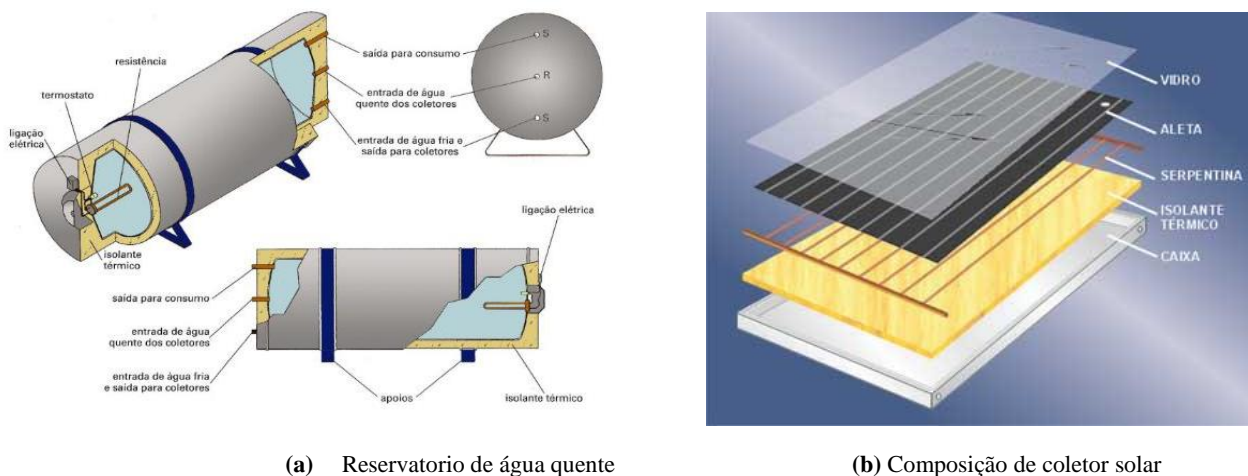
Esses coletores funcionam com base na absorção da radiação solar por uma superfície plana, que aquece um fluido de transferência de calor. Este fluido pode ser a própria água a ser utilizada (sistemas diretos) ou um fluido intermediário que transfere o calor para a água, sistemas indiretos. A eficiência desses sistemas pode ser aumentada com o uso de coberturas de vidro, que ajudam a reter o calor e reduzir as perdas.

Armazenamento de água quente em aquecedores solar

No geral, os sistemas de armazenamento de calor incluem: Armazenamento de Calor Sensível: Utiliza materiais como água, óleo, pedra-sabão etc., para armazenar calor. Armazenamento de Calor Latente: Utiliza materiais de mudança de fase (PCM) para armazenar calor. Armazenamento Térmico por Adsorção: Utiliza materiais adsorventes para armazenar calor. Contudo, para o armazenamento de água quente em sistemas solar térmicos geralmente envolve o uso de depósitos acumuladores denominados termosolares. Esses depósitos são projetados para manter a água aquecida por longos períodos, minimizando as perdas de calor (Chichango et al., 2024).

Para garantir a eficiência do armazenamento de água quente, os depósitos e as placas de coletor são equipados por isolantes como poliuretano ou lã de vidro (Figura 3). Esse isolamento é crucial para manter a água quente disponível durante períodos sem sol, como à noite ou em dias nublados. A eficiência desses sistemas pode variar entre 50% e 90%, dependendo da qualidade do isolamento (Portal Energia, 2019).

Figura 3 - Reservatório de água quente a) e coletor solar b) com isolamento térmico.



(a) Reservatório de água quente

(b) Composição de coletor solar

Fontes: a) Construdeia (2013); b) Nagase (2024).

Por outro lado, há estudos que comprovam que a integração de tecnologias de armazenamento de calor da água melhora a eficiência do armazenamento de água quente ou fria por longos períodos (Sarbu & Sebarchievici, 2018). Entre diferentes tecnologias e materiais de armazenamento de calor propostos para análise neste documento são óleo térmico e pedra-sabão, materiais de conservação de calor sensível.

Óleo Térmico

Segundo Pereira & Santos (2019) óleo térmico é um fluido utilizado em sistemas de transferência de calor devido à sua capacidade de operar em altas temperaturas sem mudar de fase. Ele é comumente usado em sistemas de aquecimento solar e em processos industriais que requerem controle preciso da temperatura. O óleo térmico possui alta capacidade de armazenamento de calor e estabilidade térmica, o que o torna ideal para aplicações que demandam transferência eficiente de calor. O Quadro 2 apresenta variedades de óleos usados no armazenamento de calor.

Quadro 2 - Propriedades termofísicas de Óleos termicos com potencial de armazenamento de calor.

Tipo de Óleo Térmico	Ponto de Ebulição (°C)	Estabilidade Térmica (°C)	Capacidade de Calor (J/kg·K)	Pressão de Vapor (Pa)	Referências
Mineral	300	400	2000	Baixa	New Sol, 2020
Sintético	400	450	2500	Muito Baixa	New Sol, 2020
Grau Alimentício	250	350	1800	Baixa	Grupo Filtroil, 2023
Alta Temperatura	350	500	2200	Muito Baixa	Imtab, 2024

Fonte: Autoria própria.

Do Quadro 2, pode-se observar quatro tipos de óleos térmicos, destacando suas propriedades como ponto de ebulição, estabilidade térmica, capacidade de calor e pressão de vapor. Cada tipo de óleo é adequado para diferentes aplicações industriais, dependendo dessas características.

Pedra-sabão ou esteatite

pedra-sabão, também conhecida como esteatite, é uma rocha metamórfica composta predominantemente de talco, com quantidades variáveis de clorita e anfibólios (como tremolita, antofilita e cummingtonite), além de vestígios de óxidos de ferro-crómio. Pode apresentar-se em forma xistosa ou maciça. Sua formação ocorre através do metamorfismo de protólitos ultramáficos (como dunitos ou serpentinitos) e do metassomatismo de dolomitos siliciosos (Geology Science, 2023).

Em termos de composição, o esteatito "puro" contém aproximadamente 63,37% de sílica, 31,88% de magnésia e 4,74% de água, além de pequenas quantidades de outros óxidos, como CaO e Al₂O₃ (Geology Science, 2023). A pedra-sabão é valorizada por suas excelentes propriedades de retenção de calor, sendo capaz de absorver, armazenar e irradiar calor por longos períodos. Devido a essas características, é amplamente utilizada em lareiras, fogões e utensílios de cozinha. Sua resistência a altas temperaturas e durabilidade a tornam um material valioso para diversas aplicações térmicas (Material Properties, 2023; Chichango et al., 2024). O Quadro 3, apresenta quatro variedades de pedra sabao com potencial de armazenamento de calor termico deido a elevada propriedade de estabilidade térmica.

Quadro 3 - Propriedades termofísicas de variedades de Pedra-sabão para armazenamento de calor.

Variedade de Pedra-Sabão	Densidade (kg/m ³)	Capacidade de Calor (J/kg·K)	Condutividade Térmica (W/m·K)	Estabilidade Térmica (°C)	Referência
Esteatite Pura	2700	800	6.0	1000	Geology Science, 2023
Esteatite com Clorita	2900	850	5.5	950	Geology Science, 2023
Esteatite com Anfibólios	3000	900	5.0	900	Material Properties, 2023

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 3 mostra que a pedra-sabão, em suas diferentes variedades, possui propriedades termofísicas que a tornam eficiente para armazenamento de calor. A densidade, capacidade de calor, condutividade térmica e estabilidade térmica variam entre as variedades, indicando sua adequação para diversas aplicações industriais e domésticas.

3. Metodologia

A pesquisa é conduzida com o método de Estudo de Caso. De acordo com Pereira et al. (2018), um estudo de caso envolve uma descrição e análise minuciosa de um caso específico que possui características únicas que o tornam notável. A condução da pesquisa Análise da eficiência energética de sistemas de aquecimento solar de água com armazenamento de calor sensível em Moçambique com base na metodologia de Estudo de Caso, é essencial devido à crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis no país. Utilizando a metodologia de estudo de caso, é possível realizar uma análise detalhada e contextualizada de sistemas específicos, permitindo identificar as melhores práticas e desafios únicos enfrentados em Moçambique para aquecimento de água em residências.

Esta abordagem pode fornecer insights valiosos que podem ser aplicados para otimizar a eficiência energética e promover o uso de tecnologias de aquecimento solar, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a redução de custos energéticos para a população local.

O estudo de caso inclui a coleta de dados, simulação e análise de resultados. A coleta de dados empíricos foi realizada através de medições de campo e simulações computacionais. As medições de campo podem incluir a instalação de sensores para monitorar a temperatura, a radiação solar e o desempenho dos sistemas de armazenamento de calor. Devido a custos

elevados dos equipamentos de coleta de dados, optou-se pelas simulações computacionais que foram conduzidas utilizando software especializado para modelar o comportamento térmico dos sistemas sob diferentes condições climáticas (Smith et al., 2020).

Análise de Dados

Os dados coletados foram analisados utilizando técnicas estatísticas e gráficos comparativos para identificar padrões e correlações. Esses gráficos foram construídos com base em modelos matemáticos fundamentados em referências confiáveis e normas específicas. A análise incluiu a comparação dos resultados das medições de campo com as simulações computacionais para validar os modelos teóricos. Além disso, foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar o impacto de variáveis como a capacidade térmica dos materiais de armazenamento e a variabilidade climática (Jones & Brown, 2019).

Limitações do Estudo

Apesar dos esforços para garantir a robustez da pesquisa, algumas limitações devem ser reconhecidas. A variabilidade climática e os elevados custos iniciais dos sistemas de aquecimento solar representam desafios significativos. Além disso, a generalização dos resultados pode ser limitada devido às especificidades do contexto moçambicano (Smith et al., 2020).

Implicações Práticas

Os resultados deste estudo têm importantes implicações práticas para a implementação de sistemas de aquecimento solar em Moçambique. Com políticas públicas adequadas e incentivos financeiros, a adoção desses sistemas pode ser uma solução viável e sustentável para o abastecimento de água quente, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e promovendo o desenvolvimento sustentável no país (Jones & Brown, 2019).

4. Estudo de Caso

Local da Instalação

A proposta de instalação de secador solar é nas zonas rurais em Moçambique, concretamente na província de Manica. Moçambique, localizado no sudeste da África, possui um clima tropical com alta incidência de radiação solar, tornando-o um local ideal para a instalação de coletores solares de água quente. A energia solar térmica é uma solução sustentável e eficiente para o aquecimento de água, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

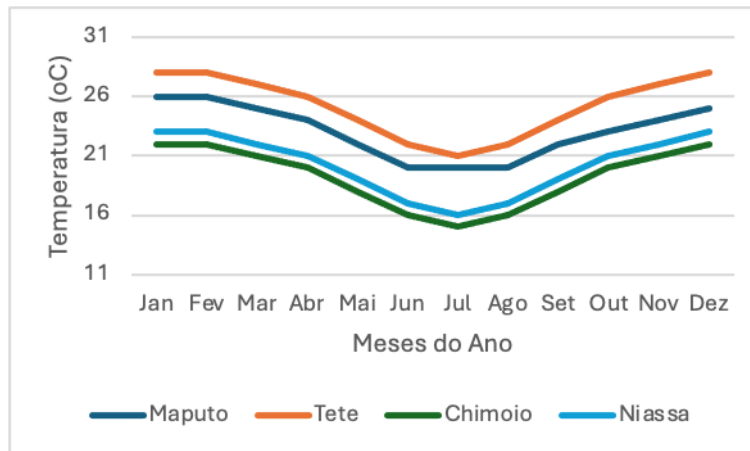
As regiões que mais demandam aquecedores solares são geralmente aquelas com temperaturas mais baixas e maior altitude, como as áreas montanhosas e planálticas (Marransos, 2021). Chimoio, na província de Manica é uma das regiões que possui esse perfil. Nessas regiões, as temperaturas médias anuais são inferiores a 22°C, e a precipitação é superior a 1400 mm. A Figura 4 apresenta quatro províncias de Moçambique com histórico de climas frios, destacando -se a Província de Manica com gradiente térmico mais baixo do país ao longo de todo ano. Mas com elevado potencial de energia renovável (Chichango & Cristóvão, 2024).

Dados adicionais:

- Instalação numa residência unifamiliar para 4 ocupantes;
- Localização geográfica: Latitude: -19.0401° e Longitude: 033.431814° (Solargis, 2017)
- Irradiação Global 5.5 kWh/(m². dia) local conforme Solargis (2017)
- Temperatura do ar (T_{ambiente}): 22 °C (Solargis, 2017).
- Orientação e inclinação dos coletores solares: Azimute: 10,3° a leste do norte magnético (Beale, 2024) e Inclinação ótima: 21° (Solargis, 2017).

• O tempo de Insolação diária média mínima (Março) 4 h e media máxima (Dezembro) 8horas (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2024).

Figura 4 - Temperatura média mensal das províncias de Moçambique.



Fonte: Adaptado de Weather API, (2023).

Do gráfico na Figura 4 nota -se que a cidade de Chimoio na província Manica apresenta valores medios anuais mais baixos do país.

Modelo de cálculo

Os cálculos foram efectuados com base nas equações apresentadas no Quadro 4 que apresenta o número de fórmula e a fonte.

Quadro 4 - Resumo de fórmulas usadas na simulação para a obtenção da eficiência.

Fórmula	arâmetro	Expressão	Fonte
1	Irradiância e Radiação	$Irradiância \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{Irradiação (MJ/m^2)}{Tempo (s)} \times 10^6$ Onde: Irradiância (W/m ²) é a potência de energia solar que pode ser recebida por unidade de área. Irradiação (MJ/m ²) é a energia total acumulada ao longo de um período. Tempo (s) é o período durante o qual a energia foi recebida (em segundos).	Fernando et al., (2009)
2	Energia Solar captada	$E_{solar} = \eta \cdot A \cdot I \cdot t$ Onde: E _{solar} - Energia aproveitável pelo coletor solar em Joules (J) ou kilowatt-hora (kWh); I - é a radiação solar média (em W/m ²); A - é a área do coletor solar (em m ²); t - é o tempo de insolação diário (em horas) e η é o rendimento do coletor solar.	Goswami et al. (2000); Frontmatter (2013).
3	Volume Consumido	$V_{consumo} = \sum(Q_{pu} \times T_u \times f_{uso})$ V _{consumo} é o volume total de água quente consumido diariamente, expresso em litros (L); Q _{pu} é a vazão de utilização do aparelho, expressa em litros por minuto (L/min); T _u é o tempo médio de utilização diário do aparelho, expresso em minutos (min); f _{uso} - frequência de uso que é o número total de utilizações do aparelho por dia.	ABNT (2020)
4	Volume do sistema de armazenamento	$V_{armazenamento} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armazenamento} - T_{ambiente}}$ Onde: Varmazenamento - volume do sistema de armazenamento do aquecedor solar em litros (L); V _{consumo} é o volume de consumo diário, expresso em litros (L); T _{consumo} é a temperatura de consumo de utilização em graus Celsius (°C); Tarmazenamento é a temperatura de armazenamento da água em graus Celsius (°C); Tambiente é a temperatura ambiente média anual do local de instalação, expressa em graus Celsius (°C).	ABNT (2020)
5	Energia útil	$E_{util} = \frac{V_{armazenamento} \times \rho \times g \times C_p \times (T_{armazenamento} - T_{ambiente})}{3600} \times 30 \text{ dias}$ Onde: E _{util} - é a energia útil, expressa em quilowatts hora por mês; Varmazenamento- é o volume do sistema de armazenamento do aquecedor em litros (L); ρ é a massa específica da água igual a 1, em quilogramas por litro (kg/L); Cp é o calor específico da água igual a 4,18, expresso em kJ/(kg.°C);	ABNT (2020),

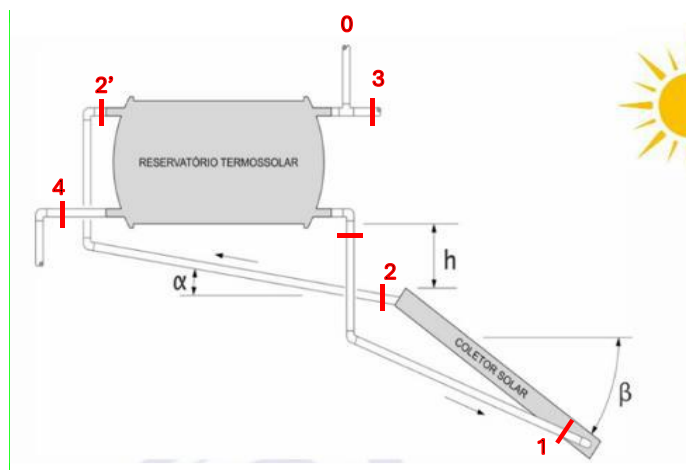
6	Perdas	$E_{perdas} = 0.15 E_{util}$	ABNT (2020)
7	Área do coletor Solar	$A_{coletora} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{E_{solar}} \quad (7.1)$ $A_{coletora} = \frac{E_{util} + E_{perdas} \times FC_{instalação} \times 4.89}{PMEE \times I} \quad (7.2)$ onde A_coletora é a área coletora, expressa em metros quadrados (m ²); m - é a massa de água a ser aquecida; E_solar é a energia coletada (kWh/h). O valor 4.89kWh/(m ² .dia) é padrão ABNT (2020).	ABNT (2020)
	Produção Média Mensal de Energia específica Fator de correção para inclinação e orientação do coletor	$PMEE = \eta \times Irradiação \quad (7.3)$ e $FC_{instalação} = \frac{1}{1 - [1.2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{optimo})^2 + 3.5 \times \gamma^2]} \quad (7.4)$ PMEE - é a Produção Média Mensal de Energia específica kWh/(mês.m ²). η - é a eficiência térmica do coletor solar. A Irradiação Solar é a média mensal de radiação solar incidente no plano do coletor (kWh/m ²). FC_Instalação é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor; β é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, expressa em graus (°); β ótimo é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação, expressa em graus (°); γ é o ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico, expresso em graus (°).	Kalogirou (2009). Frontmatter (2013)
8	Fração solar (FS)	$FS = \frac{Q_{solar}}{Q_{total}}$ Onde: Q_solar é a quantidade de energia térmica fornecida pelo sistema solar e Q_total é a demanda total de energia térmica para o aquecimento de água.	Silva (2020)
9	A eficiência energética	$Eficiência = \frac{Energia \ Útil}{Energia \ Solar \ Incidente}$	Silva (2021)

Fonte: Autoria própria.

O quadro apresenta as fórmulas para dados de entrada na simulação da eficiência energética.

Em adição, na Figura 5 é apresentado o modelo de cálculo com pontos de volume de controle. Nesta figura, são apresentados os pontos de entrada e saída de água nos componentes do coletor solar, onde há variação da temperatura da água.

Figura 5 - Modelo esquemático de aquecedores solar de água do tipo placa plana termossifão.



Fonte: Adaptado de ABNT (2020).

Legenda:

Circuito hidráulico: Reservatório Termossolar: Armazena a água aquecida pelo coletor solar, Coletor solar: Absorve a energia solar e aquece a água. Tubagem: Circulação de água.

Pontos de controle: Ponto 0 - Respiro; Ponto1. Entrada da água no coletor solar; 2. Saída da água quente do coletor solar; ponto 2'. Entrada de Água quente no reservatório. Ponto 3. Entrada da água fria entra no sistema; Ponto 4. Saída de Água Quente do sistema para uso.
Ângulos de inclinação: O ângulo α (alfa) inclinação da tubagem para facilitar o fluxo natural da água quente. O β (beta) representam a inclinação do coletor solar, que é importante para maximizar a absorção de energia solar.

A Figura 5 apresenta o modelo de cálculo da eficiência energética de um coletor de placa plana, utilizado como padrão. Nesta figura, são notáveis os pontos de volume de controle de entrada e saída de água, essenciais para a avaliação das variações na quantidade e na temperatura da água.

5. Resultados e Discussão

Os resultados aqui apresentados são baseados nos coletores planos com tubos de cobre e vidro temperado conforme Frontmatter. (2013), patenteado em 1891 por Clarence Kemp (Kemp, 1891). Estes coletores solares com cobertura de vidro superam a eficiência de coletores sem cobertura apresentados por Gomes (2018) e T. Silva (2020) que geralmente são mais usados em piscinas. E os coletores planos têm menor rendimento em comparação com os coletores que utilizam tubos de vidro evacuados para minimizar a perda de calor (Pereira, 2019);

Cálculo consumo de água por banho, no lavatório e na cozinha conforme a Equação (03). Dados de vazão e tempo de uso, conforme ABNT (2020), os pontos de consumo de água quente estão apresentados na Tabela 1. Com base na fórmula (03) foi obtido o volume total da demanda de água quente na residência.

Tabela 1 - Resultado de cálculo do consumo de água quente na residência.

Ponto de Uso	Vazão Mínima (L/min)	Vazão Máxima (L/min)	Vazão Assumida (L/min)	Ciclo diário (min/p)	Número de vezes	Número de Usuários	Consumo Total (L)
Chuveiro	3	15	3	6	2	4	144
Lavatório	3	4.8	3.5	2	2	4	56
Pia da Cozinha	2.4	7.2	2	2	2	4	32
Total							232

Fonte: Autoria própria.

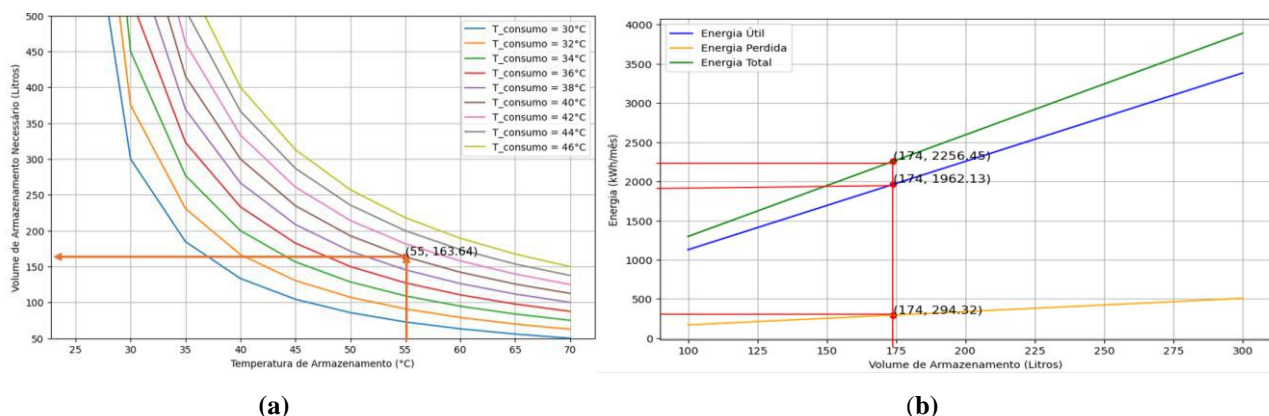
Dos cálculos realizados, o consumo diário de água é de aproximadamente 232 litros. O reservatório será de 250L de capacidade mínimo. A quantidade calculada foi comparada com o volume obtido pelo simulador da SOLETROL (Soletrol, 2024) que resultou em 287 L, esta diferença é razoável e pode ser pela diferença de vazão não nos pontos de consumo que não são apresentados no simulador.

A variação da temperatura nos pontos de consumo influencia significativamente no volume e na temperatura de armazenamento como pode ilustrar o gráfico da Figura 6 (a).

Segundo a ABNT (2020), o volume de armazenamento deve ser maior ou igual a 75% do volume de consumo. Para este dimensionamento, o valor obtido é próximo dos 174 litros recomendados, com uma diferença de apenas 9 litros a menos. Assim, pode-se assumir que o volume de armazenamento será de 174 litros em um reservatório de 200 litros.

A energia da água que chega aos pontos de consumo é denominada energia útil, e ela varia com o volume de armazenamento por dia. Conforme a ABNT (2020), estima-se que o total de perdas de energia nos circuitos hidráulico primários e secundários, pode ser 15% da energia útil. Com uma temperatura de armazenamento de 55°C e temperatura ambiente de 22°C, simulou-se a variação da energia necessária com base no volume de armazenamento. O gráfico da Figura 6 mostra a dependência desses dois parâmetros.

Figura 6 – (a) Variação da temperatura com o volume de armazenamento. (b) Variação de energia com o volume de armazenamento.



Fonte: Autoria própria.

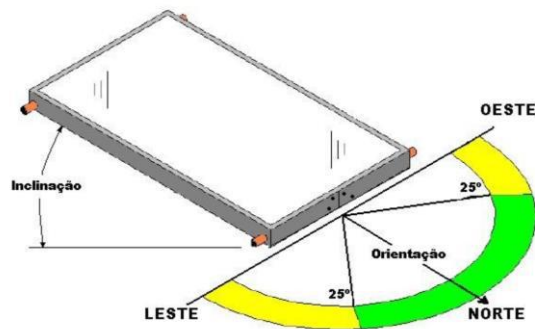
Os gráficos da Figura 6, ilustram claramente como as temperaturas de consumo e de armazenamento afetam o volume de armazenamento necessário e este último, afeta na energia necessária para aquecer a água armazenada. Ajustar essas temperaturas pode otimizar o sistema de aquecimento solar de água, reduzindo o volume de armazenamento necessário e, consequentemente, os custos e o espaço necessários para o sistema. A energia total, que é a soma da energia útil e da energia perdida, também cresce de forma linear. Isso indica que maiores volumes de armazenamento resultam em maior demanda de energia para armazenar e, consequentemente, maiores perdas de energia, embora as perdas representem uma fração constante da energia útil.

Energia solar coletada

Os fatores que afetam diretamente a energia solar coletada são a radiação local, o tempo de insolação e a eficiência do coletor solar. O rendimento dos coletores solares planos pode variar de 30% a 50%, mas podem chegar a 60% e 80% quando são fabricados de materiais de alta qualidade e projetados para maximizar a eficiência (TISST, 2023). O tempo médio de insolação depende do local e do período do ano, em Manica os meses de baixas temperaturas são: junho, julho e agosto conforme o gráfico da Figura 4. A média diária da média dos três meses é de 7 horas por dia. Esse valor que está dentro do intervalo emmsionado por Chichango et al., (2023) de 7- 9 horas, enquanto a irradiação solar diária varia entre 4,5 e 6,0 kWh/(m².dia) (INAM; FUNAE 2020) correspondente a 1620 – 2150 kWh anuais, conforme o Chichango & Cristóvão (2021).

De acordo com Silva (2020) a orientação dos coletores é feita com base no ângulo Azimute - Refere-se à direção horizontal do coletor em relação ao norte verdadeiro. Ajustar o ângulo azimute permite que o coletor solar esteja alinhado com a trajetória do sol ao longo do dia, garantindo que a superfície do coletor receba a máxima quantidade de radiação solar direta. A orientação e a inclinação (em dfunção do ângulo Zenital) são expressas conforme ilustra a Figura 7. Esses parametros afetam diretamnte o factor de instalação do coletor solar.

Figura 7 - Diagrama de instalação de painel solar indicando orientação e inclinação.



Fonte: Conteudista (2020).

A Figura 7 mostra, além da inclinação do coletor solar, a faixa de orientação que maximiza a captação de energia solar ao longo do ano. A orientação na faixa verde é a que mais capta energia solar em comparação com a faixa amarela.

Os valores dos parâmetros que influenciam na captura de radiação solar, relativos à orientação e inclinação, são apresentados na Tabela 2. Esta tabela inclui o valor do fator de correção obtido com base nos valores dos parâmetros apresentados pela literatura.

Tabela 2 - Parâmetros de de instalação do coletor solar.

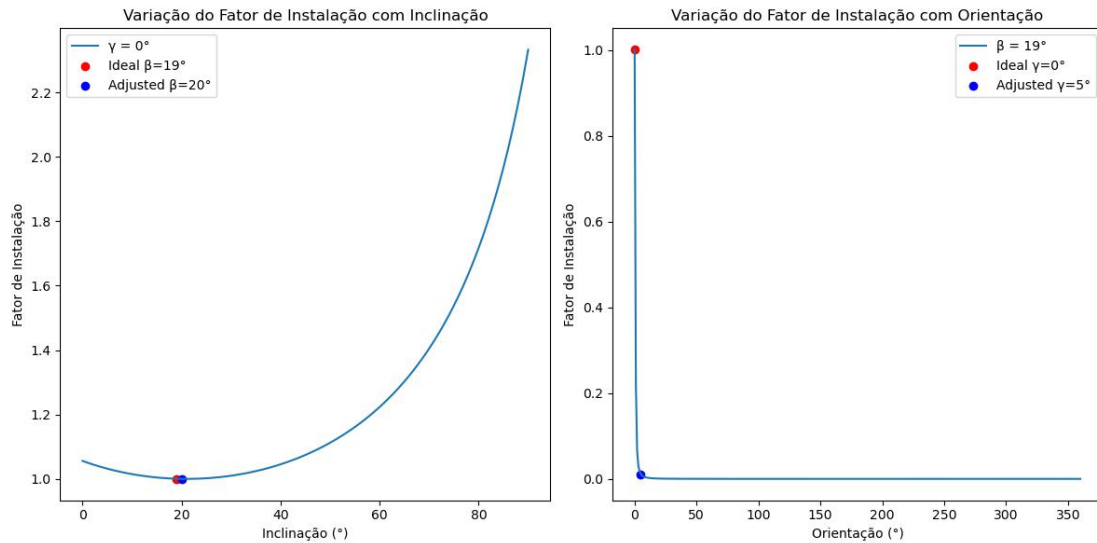
Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Irradiação Global	kWh/(m ² . dia)	5.0	INAM e FUNAE (2020)
Inclinação Ótima (β_{otimo})	Graus	21	Global Atlas (2024)
Latitude (β)	Graus	19	Global Atlas (2024)
Orientação para o Norte magnético	Graus	10,3	Beale (2024)
Área do coletor solar para energia útil demandada	m ²	3.5	Calculado
Factor de Instalação FC_Instalação (γ) fórmula (7.4)	adimensional	0.00269	Kalogirou (2009). Frontmatter, 2013)

Fonte: Autorial própria.

Nota-se da Tabela 2, que o fator de correção para a inclinação e orientação do coletor solar é muito pequeno (aproximadamente 0,0027). Isso sugere que a configuração atual do coletor solar está longe do ideal, resultando em uma eficiência significativamente reduzida o que pode resultar em menor eficiência de captação solar do coletor solar.

Feita a simulação para valor ideal resultou em: Inclinação Ideal (19°) e Orientação Ideal (0°): Este cenário oferece o melhor fator de instalação, próximo de 1, indicando máxima eficiência, o grafico é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Variação do fator de instalação com base nos ângulos de inclinação e orientação do painel solar.

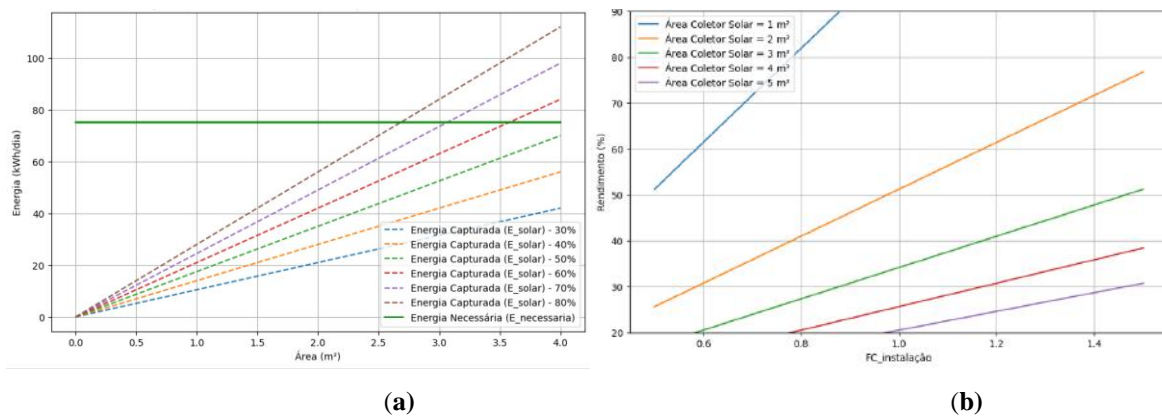


Fonte: Autoria própria.

Verifica-se no gráfico da Figura 8 que para pequenos ajustes na inclinação (20°): Pequenas variações na inclinação ainda mantêm um fator de instalação alto. Orientação ajustada (5°): Pequenas variações na orientação têm um impacto significativo, reduzindo drasticamente o fator de instalação. Portanto, para maximizar a captação solar em Manica, Moçambique, recomenda-se manter a inclinação dos painéis solares próxima a 19° e a orientação voltada diretamente para o norte geográfico.

Os resultados da simulação são apresentados no gráfico da Figura 9, que mostra na alínea (a) a relação entre a energia solar e a área do coletor solar, e na alínea (b) a relação do rendimento com a área do coletor solar e o fator de correção da instalação do coletor.

Figura 9 - Fatores que impactam na captação de energia solar.

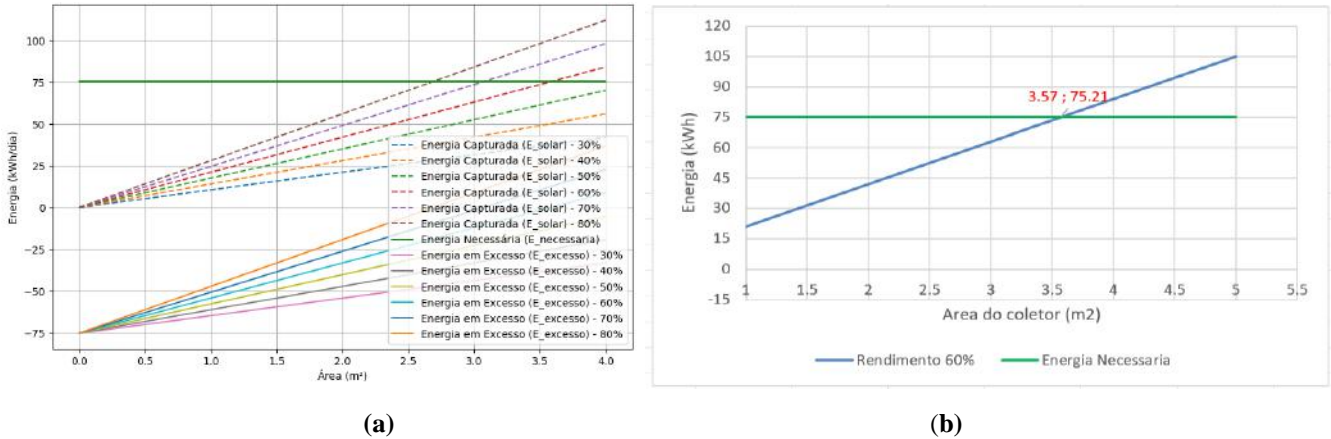


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9, o gráfico alínea (a) da mostra que a energia solar captada aumenta linearmente com a área do coletor solar para todas as eficiências. Coletores mais eficientes captam mais energia para a mesma área, destacando a importância de escolher coletores eficientes para maximizar a captação de energia solar. E no gráfico da alínea (b) mostra que o rendimento do coletor solar aumenta com aumento de fator de instalação.

A energia necessária por dia pode ser comparada com a energia que o coletor solar pode disponibilizar. A Figura 10 apresenta a comparação das energias em função da área e da eficiência do coletor solar.

Figura 10 - Comparação da energia solar capturada com a energia necessária por dia.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico da alínea (a) da Figura 10, mostra que a energia solar captada aumenta com a área do coletor solar e a eficiência do coletor. Para uma eficiência de 60%, uma área de aproximadamente 3,57 m² é necessária para atingir a demanda de 75,21 kWh por dia, como mostra o gráfico alínea (b). Com uma eficiência de 20%, a área necessária aumenta significativamente, enquanto com uma eficiência de 60%, a área necessária diminui. Isso destaca a importância de otimizar tanto a área quanto a eficiência do coletor solar para atender às necessidades energéticas de forma eficiente.

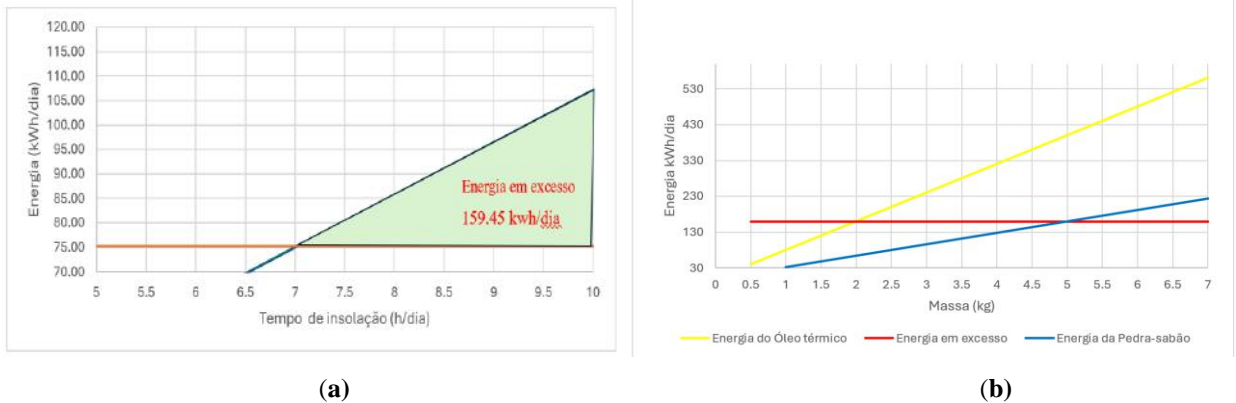
No gráfico alínea (b) a linha vermelha no gráfico serve como referência para a energia necessária, facilitando a visualização das combinações de área e eficiência que atendem ou excedem essa demanda. Quando a área de coletor solar e a eficiência são altas, o coletor pode capturar mais energia do que o necessário, proporcionando um excesso que pode ser utilizado ou armazenado.

Com base na Figura 10 gráfico (b), pode se notar que a área de coletor solar 3,57 m², para 60% conforme TISST (2023), corresponde a fração solar FS= 1, valores menores dessa área significam que o coletor solar não atende a demanda de energia necessária.

Armazenamento do excesso energia solar

O excesso de energia solar diário pode ser armazenado em forma de calor sensível, segundo a literatura a pedra – sabão e o óleo térmico podem reter calor e transferi-lo para água quando cessar a radiação solar e baixar a temperatura no reservatório de água quente. A energia diária em excesso para armazenamento é apresentada na Figura 11 alínea (a) e a capacidade de armazenamento dessa energia em excesso é representado no gráfico alínea (b).

Figura 11 - Energia em excesso e capacidade de armazenamento em óleo e em pedra-sabão.



Fonte: Autores

Na Figura 11, a área acima da linha de energia captada com uma eficiência de 60% do coletor solar e a linha de energia diária necessária para o sistema representa a energia em excesso. Essa energia em excesso corresponde à energia que pode ser armazenada em uma determinada massa de óleo térmico ou pedra-sabão, conforme mostrado no gráfico alínea (b).

Portanto, a interseção da linha de energia em excesso com a linha de energia que pode ser armazenada pelo óleo ou pedra-sabão indica a quantidade desse material de armazenamento. Quanto maior for a massa, maior será a capacidade de armazenamento de energia. Com base no gráfico (b), pode-se notar que o óleo tem maior capacidade de armazenamento de calor, necessitando de menos massa (2 kg) do que a pedra-sabão (5 kg) para o mesmo rendimento (80%) e a mesma variação de temperatura (50°C).

Os resultados obtidos foram baseados na simulação de uso de óleo térmico mineral com capacidade de calor de 2000 J/kg·K e temperatura do ponto de ebulição até 300°C, permitindo maior capacidade de armazenamento de calor sem mudança de fase (New Sol, 2020). Para a pedra-sabão, foi usada esteatite pura com propriedades apresentadas por Geology Science (2023). A capacidade de calor é de 800 J/kg·K, menor que de óleo térmico, mas a pedra-sabão apresenta uma grande estabilidade térmica (1000°C) o que permite absorver grandes quantidades de calor sem se desfazer

Análise da eficiência

Considerando a fração solar (FS), de acordo com o dimensionamento, é $FS = 1$, para o período de insolação de 7 horas por dia, média para os três meses mais frios em Manica. Mas fora desses meses a fração solar será maior que 1, indicando haver um excesso de energia.

Para um valor de insolação de 10 horas (o máximo no verão a média é de 14 horas), a energia em excesso foi quantificada (159.45kWh/dia). Essa energia é energia em excesso durante o dia de radiação, mas quando armazenada pode ser convertido em energia útil em dias nublados com pouca radiação criando uma autonomia ao sistema. A energia em excesso (que é perdida quando não há sistema de armazenamento auxiliar) pode ser convertida em dias de autonomia, assim

$$Autonomia\ Energética = \frac{E_{solar\ Aproveitável}}{E_{util}} \quad (10)$$

Onde: Autonomia Energética é o tempo que o sistema vai continuar a fornecer energia sem radiação solar (em dias) e Energia solar Aproveitável é a quantidade de energia total captado pelo coletor solar sem incluir ia energia útil (energia em excesso) em unidades de energia. E_{util} é a energia correspondente a variação temperatura da água de consumo. A Tabela 3 apresenta os resultados de cálculo de eficiência térmica dos sistemas analisados.

Tabela 3 - Comparação da eficiência dos sistemas solar térmicos analisados.

Tipo de energia	Sistema sem armazenamento térmico	Sistem com armazenamento térmico
Energia aproveitável (excesso)	0	159.45
Energia útil	65.4	65.4
Energia necessária (inclui perdas)	75.21	75.21
Energia captada pelo coletor solar	74.34	74.34
Fração energética	99%	99%
Eficiência Energética	88%	302%

Fonte: Autoria própria.

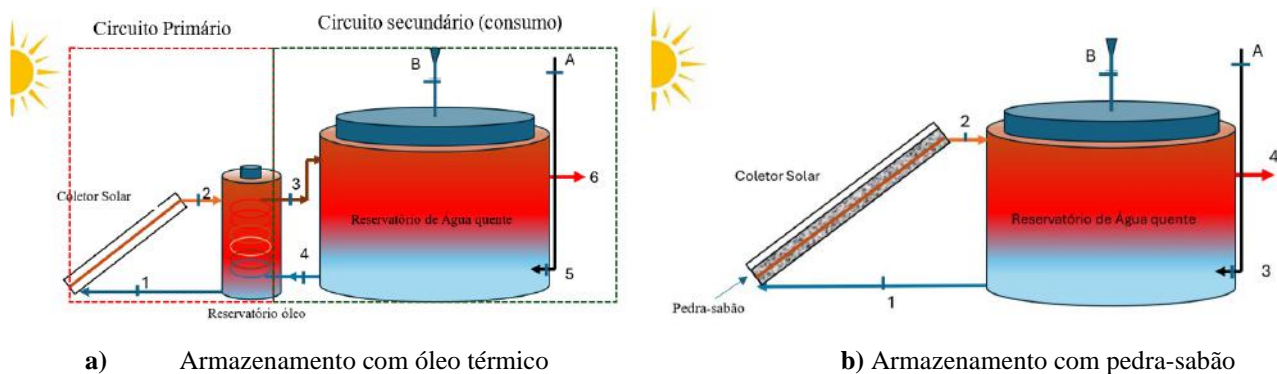
A Tabela 3 compara a eficiência energética de sistemas de aquecimento solar de água com e sem armazenamento térmico. No sistema sem armazenamento térmico, não há energia aproveitável em excesso, enquanto o sistema com armazenamento térmico aproveita 159.45 unidades de energia excedente. Ambos os sistemas têm a mesma energia útil (65.4) e energia necessária (75.21), com a energia coletada pelos coletores solares sendo (74.34). A fração energética é alta para ambos os sistemas (99%), indicando uma alta proporção de energia solar utilizada. No entanto, a eficiência energética do sistema com armazenamento térmico é significativamente maior (302%) em comparação com o sistema sem armazenamento (88%) e 60% referenciado por TISSST (2023). A eficiência obtida pode ser alta devido a demanda reduzida de água quente consequente de poucos pontos de uso na residência. Outro ponto de vista pode ser pela elevada diponibilidade da radiação solar no local.

No entanto, a eficiência obtida pode ser facilmente interpretada quando traduzida em dois dias de autonomia, (calculado pela Equação (10). Quanto maior forem os dias de autonomia pode destacar a vantagem do armazenamento térmico e a maximção da utilização da energia solar disponível.

Aplicação da tecnológica

Moçambique tem um grande potencial para energia solar. O armazenamento térmico pode ajudar a aproveitar essa energia de forma mais eficiente, armazenando calor durante o dia para uso à noite (Burke & Rangel, 2019). Segundo Ferrão et al. (2024), o uso de materiais como pedra-sabão, que possui alta capacidade de armazenamento de calor, pode ser uma solução econômica e sustentável. A implementação dessas tecnologias, juntamente com outras formas de desenvolvimento sustentável durante a transição energética, oferece oportunidades significativas para o desenvolvimento geral. Isso pode gerar empregos e promover o desenvolvimento de habilidades técnicas locais (Armazenamento de Energia Térmica (TES Thermal Energy Storage), sem data); Nhambiu & Chichango, 2024a). O sistema de armazenamento proposto pelos autores está apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Integração de sistema de armazenamento de calor para aquecimwnto de água com sistema termossifão.



Legenda:

Circuito hidráulico: Reservatório Termossolar: Armazena a água aquecida pelo coletor solar, Coletor solar: Absorve a energia solar e aquece a água. Tubagem: Circulação de água.

Pontos de controle: Ponto 1: entrada de óleo no coletor para figura a) e de água para a figura b); Ponto 2: Saída de Óleo aquecido fig. (a) e Saída de água aquecida fig. (b). Ponto 3: Saída de água do trocador para o reservatório, na fig. (b) é entrada de água fria no sistema. Ponto 4: entrada da água no trocador de calor para fig. (a). Saída de água quente para o consumo na fig. (b). Ponto 5: Entrada da água fria para o sistema. Ponto 6. Saída da água quente para o consumo. Ponto A: Entrada da água do reservatório de água fria. Ponto B: válvula de segurança.

A Figura 12 apresenta dois diagramas esquemáticos de sistemas de aquecimento solar de água. O primeiro diagrama (a) mostra um sistema de Armazenamento com óleo térmico, onde um coletor solar aquece o óleo que, por sua vez, transfere calor para um reservatório de água. O segundo diagrama (b) ilustra um sistema de Armazenamento com pedra-sabão, onde o calor capturado pelo coletor solar é armazenado em pedras-sabão, que depois aquecem a água no reservatório.

Ambos os sistemas de armazenamento de energia térmica, seja com óleo térmico ou pedra-sabão, representam tecnologias promissoras para a utilização eficiente e sustentável da energia solar. No entanto, a implementação dessas tecnologias em Moçambique enfrenta diversos desafios que precisam ser superados para que seu potencial seja plenamente realizado.

Desafios

1. A falta de infraestrutura adequada é um obstáculo significativo para a implementação de sistemas de armazenamento térmico. A instalação e manutenção desses sistemas requerem investimentos iniciais elevados, o que pode ser um desafio em regiões com recursos financeiros limitados. Além disso, a ausência de uma rede de distribuição eficiente e de instalações de suporte pode dificultar ainda mais a adoção dessas tecnologias. É essencial que haja um planejamento estratégico e investimentos em infraestrutura básica para garantir a viabilidade e sustentabilidade dos sistemas de armazenamento térmico (Ferrão et al., 2024).

2. A operação e manutenção de sistemas de armazenamento térmico exigem conhecimento especializado, necessitando de treinamento contínuo para os profissionais locais. A falta de técnicos qualificados pode comprometer a eficiência e durabilidade desses sistemas. Portanto, é crucial implementar programas de formação para garantir que os profissionais estejam preparados para lidar com tecnologias avançadas. Métodos de inclusão social eficientes, como os apresentados por Chichango et al. (2023), são fundamentais para envolver e capacitar a comunidade local, promovendo a aceitação e sucesso das soluções sustentáveis. No entanto, a transição para energia solar, reduzindo o consumo de fontes fósseis ou elétricas, é um desafio complexo que requer uma abordagem multifacetada. Segundo Nambiu & Chichango (2024a), estudos futuros nesta área são essenciais.

3. A eficácia do armazenamento térmico pode depender significativamente das condições geológicas locais. Em algumas regiões, essas condições podem não ser ideais, o que pode limitar a aplicabilidade e a eficiência dos sistemas de armazenamento térmico. Portanto, é crucial realizar estudos geológicos detalhados antes da implementação desses sistemas para garantir sua viabilidade e maximizar seu desempenho (Azevedo, 2024).

4. A integração de soluções sustentáveis na agenda política é essencial para o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia térmica em Moçambique. É necessário que haja leis e decretos específicos que incentivem e apoiem a implementação dessas tecnologias para uma transição energética sustentável (Nhambiu & Chichango, 2024b). Sem suporte político adequado, a adoção de tecnologias de armazenamento de energia térmica pode ser significativamente dificultada.

5. Além disso, o Governo de Moçambique aprovou a Estratégia de Transição Energética (ETS), que prevê a descarbonização do sector dos transportes até 2030 (Nhambiu & Chichango, 2024b) com isso, é crucial que haja um compromisso governamental em promover políticas de incentivo fiscal, subsídios e programas de capacitação para garantir que essas tecnologias sejam acessíveis e viáveis para a população. A ausência de uma estrutura política sólida pode criar obstáculos burocráticos e escassez de financiamento, prejudicando o progresso das soluções sustentáveis no país. De acordo com Rosa et al., (2023), embora o país possua recursos naturais abundantes, enfrenta desafios significativos para utilizar esses recursos de forma eficaz, alimentar a população e diminuir a pobreza.

6. O acesso limitado à energia elétrica em zonas rurais de Moçambique também restringe o acesso à água canalizada, essencial para sistemas de aquecimento solar. Sem água canalizada, a população precisa carregar água manualmente, muitas vezes por longas distâncias, dificultando o uso dessas tecnologias. Apesar dos desafios, com planejamento e investimentos adequados, essas tecnologias podem ser cruciais para um futuro energético sustentável no país, beneficiando a população local.

7. Moçambique ainda depende significativamente de combustíveis fósseis, o que impacta negativamente a transição para uma energia sustentável. No entanto, a implementação de projetos de economia circular, como a mistura de combustíveis fósseis com biocombustíveis produzidos a partir de etanol de resíduos agrícolas (Chichango & Cristovao, 2024), pode ser uma solução viável. Essas medidas não só são ambientalmente favoráveis, mas também têm o potencial de impulsionar o desenvolvimento econômico local e erradicar a pobreza no país.

6. Conclusões

O estudo analisou a eficiência energética de sistemas de aquecimento solar de água com armazenamento de calor sensível em Moçambique. A pesquisa destacou a importância do acesso à água quente para o bem-estar das famílias e a necessidade de sistemas eficientes para reduzir custos e impactos ambientais. A análise mostrou que os sistemas solares têm grande potencial no país devido à alta radiação solar, mas enfrentam desafios como a limitação em dias nublados e os altos custos de importação. No entanto, com a integração de um sistema auxiliar de armazenamento térmico, o estudo mostra que os sistemas podem ter dias de autonomia que podem aumentar dependendo de perfil de utilização da água quente e assim superar os desafios de intermitência, garantindo a disponibilidade de água quente. Para a simulação feita o aquecedor solar integrado com um sistema de armazenamento resultou em pelo menos, dois dias de autonomia energética, o que pode minimizar os custos de aquisição de energia elétrica ou de outras fontes de energia.

Para futuras pesquisas, recomenda-se explorar tecnologias híbridas que combinem aquecimento solar com outras fontes de energia, investigar materiais alternativos para armazenamento de calor, e realizar estudos de viabilidade econômica detalhados para diferentes regiões de Moçambique. Além disso, é crucial desenvolver políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias solares acessíveis e sustentáveis. Para garantir a validade dos resultados, aconselha-se a adoção de estratégias, incluindo a triangulação de dados, a revisão por pares e a replicação dos experimentos em diferentes locais. A triangulação de dados envolve a comparação de resultados obtidos por diferentes métodos e fontes, enquanto a revisão por pares pode assegurar a qualidade e a credibilidade das conclusões. A replicação dos experimentos pode permitir verificar a consistência dos resultados em diferentes contextos.

Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pelo Fundo Nacional de Investigação (FNI), cujo apoio foi fundamental para a realização desta pesquisa. Expresso a minha gratidão aos professores pela orientação e pelos conselhos durante todas as etapas deste projeto.

Conflito de Interesses

Os autores deste artigo declaram que não possuem qualquer conflito de interesse financeiro, pessoal ou profissional que possa influenciar os resultados ou a interpretação dos dados apresentados.

Referências

- ABNT. (2020). NBR 15569, pp 59. https://tuxdoc.com/download/nbr-15569-2020-sistema-de-aquecimento-solar-de-agua-em-circuito-direto_pdf.
- Adene. (2016). Aquecimento e Produção de Águas Quentes Sanitárias para uma Vivenda. <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/22998/1/Juan-Diego-Rivas-Henriques.pdf>.
- Armazenamento de Energia Térmica (TES Thermal Energy Storage). (sem data). Uevora.pt. Obtido 21 de setembro de 2024, de <http://www.newsol.uevora.pt/pt-pt/tecnologia-tes/>.
- Azevedo, J. (2024). Eficiência energética. O que é armazenamento de energia térmica? <https://www.ecycle.com.br/armazenamento-de-energia-termica/>.
- Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável. (2021, outubro 18). *Serviços e Informações do Brasil*. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/10/brasil-e-referencia-no-campo-da-energia-limpa-e-renovavel>.
- Burke, O. F., & Rangel, C. M. (2019). Os ciclos termoquímicos e o armazenamento de energia solar térmica. *Química*, 43(152), 36-42.
- Chichango, F. (2014). Análise de emissões de CO2 na produção e utilização do biodiesel de óleo de coco em Maganja da Costa–Moçambique. Dissertação de Mestrado. 1(1).34. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i5.45674>.
- Chichango, F., & Cristóvão, L. (2021). Mozambique Solar Thermal Energy Technologies: Current Status and Future Trends. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 11(5). <https://doi.org/10.7176/JETP/11-5-02>
- Chichango, F., & Cristóvão, L. (2024). Revisão da literatura sobre métodos e processos de produção de bioetanol a partir de cascas de banana para desinfecção e saneamento do ambiente nas comunidades, região central de Moçambique. *Research, Society and Development*, 13(3), e12713344921. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i3.44921>.
- Chichango, F., Cristóvão, L. & Mahanuque, O. (2023). Empowering women through vocational training: Evidence from rural areas affected by armed conflict in Mozambique. *Research, Society and Development*, 12(14), e108121441196-e108121441196. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i14.41196>.
- Chichango, F., Cristóvão, L., Muguirima, P., & Grande, S. (2023). Solar dryer technologies for agricultural products in Mozambique: An overview. *Research, Society and Development*, 12(4), e6812439850. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.39850>.
- Chichango, F., Cristóvão, L., Nhambui, J., Cumbe, F., & Mavanga, G. G. (2024). Literature review of potential materials for the construction of an alternative flat-plate solar collector. *Research, Society and Development*, 13(5), e0513545674. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i5.45674>.
- Construdeia. (2013). Coletor Solar. Recuperado de https://www.construdeia.com/coletor-solar/#google_vignette.
- Conteudista. (2020, setembro 11). Como Posicionar os Módulos Fotovoltaicos. ENERGIÉS. <https://energies.com.br/como-posicionar-os-modulos-fotovoltaicos/>
- Cristóvão, L., Chichango, F., Massinga Jr, P., & Macanguisse, J. (2021). The potential of renewable energy in Mozambique: An overview12. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 11(2), 30-37. <https://doi.org/10.7176/JETP/11-2-04>.
- Duarte, P. N. A. (2012). Colectores Solares Térmicos - Análise de desempenho térmico de soluções tecnológicas no mercado. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - Energia Térmica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Frontmatter. (2013). *Em Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603.fmatter>
- FUNAE [Fundo de Energia]. (2020). Recurso Solar. Recuperado de <https://funae.co.mz/recurso-solar/> em 2 de Setembro de 2024.
- Geology Science. (2023). Rocha de pedra-sabão | Propriedades, Composição, Formação, Usos. Recuperado de <https://pt.geologyscience.com/rochas/pedra-sab%C3%A3o/>.
- Grupo Filtroil. (2023). Fluido térmico: o que é e propriedades. Retrieved from: <https://grupofiltroil.com.br/oleos-industriais/fluido-termico-o-que-e-e-propriedades/#:~:text=As%20propriedades%20de%20um%20flu%C3%ADdo%20t%C3%A9rmico%20podem%20variar,de%20trabalhar%20em%20temperaturas%20entre%20-88%C2%B0C%20e%20400%C2%B0C>.
- Imtab. (2024, setembro 13). Óleo térmico: como funciona a troca de calor na indústria? Imtab. <https://blog.imtab.com.br/oleo-termico/>
- INAM [Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique]. (2020). *Relatório Climático Anual*. Maputo, Moçambique.
- INE [Instituto Nacional de Estatística]. (2021). Resultados Preliminares do Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2020. Recuperado de https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=513378214&att_display=n&att_download=y
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2024). Ipma.pt. <https://www.ipma.pt/pt/index.html>
- Jones, A., & Brown, B. (2019). Análise de dados em estudos de caso. *Revista de Pesquisa em Energia*, 15(2), 123-145.

- Kalogirou, S. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition. Em Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition.
- KLCLIMA. (2023). Eficiência no aquecimento de águas sanitárias. Relatório Técnico, 34-56.
- Meque, R., Cristóvão, L., & Chichango, F. (2023). Socio-environmental impacts caused by tropical cyclones Idoi and Eloise in Sussundenga District, Mozambique. *Research, Society and Development*, 12(14), e72121440818. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i14.40818>.
- Nagase, W. (2024). Água Quente e Lazer. Soluções em Aquecimento. Recuperado de <https://www.aguaquentecampinas.com.br/>.
- New Sol. (2020). *Armazenamento de Energia Térmica (TES Thermal Energy Storage)*. Uevora.pt. <http://www.newsol.uevora.pt/pt-pt/tecnologia-tes/>
- Nhambiu, J., & Chichango, F. (2024a, maio 31). Comprehensive Analysis of the Energy Transition in Mozambique: Opportunities and Challenges for Achieving the Established Global Goals. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 45–65. <https://doi.org/10.7176/JETP/14-2-04>
- Nhambiu, J., & Chichango, F. (2024b, julho 14). Prognóstico do impacto ambiental das emissões veiculares em Moçambique: Uma análise quantitativa do uso de combustíveis fósseis e a crescente importação de veículos já usados. *Research, Society and Development*, 13, e8013746368. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i7.46368>
- Nhambiu, J., & Chichango, F. (2024c, setembro 14). Forecasting energy consumption in Mozambique: A comparative analysis of advanced machine learning models from 2025 to 2045. *Journal of Research, Society and Development*, e3613946830.
- Oriol Planas-Engenheiro Técnico Industrial. (2017, abril 20). Energia solar ativa. [Solar-energia.net](https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/energia-solar-ativa). <https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/energia-solar-ativa>
- Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da Pesquisa Científica [e-book]. Santa Maria, RS: UFSM, NTE.
- Pereira, A. (2019). Coletores de tubos de vácuo: eficiência em climas frios. *Ciência e Tecnologia Solar*.
- Rinnai. (2020). Importância do acesso à água quente para o bem-estar. Relatório Anual, 78-89.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 10(1), 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
- Silva, T. (2020). Coletores solares planos: uma revisão. *Revista de Energia Renovável*.
- Smith, L., Johnson, R., & Williams, T. (2020). Modelagem computacional de sistemas de aquecimento solar. *Journal of Renewable Energy*, 22(3), 234-245.
- Solargis. (2017). Global solar atlas. <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>
- Soletrol, a. L. no B. em A. S. (2024). Soletrol Aquecedores Solares de Água - Simulação de consumo de água quente. Com.Br. <https://www.soletrol.com.br/extras/simulador-de-consumo-de-agua-quente/>.
- Thermal Engineering. (2024). Coletores solares térmicos para aquecimento de água residencial. <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/coletores-solares-termicos-para-aquecimento-de-agua-residencial/>.
- Weather API. (2023). Worldweatheronline.com. <https://www.worldweatheronline.com>.