

Desenvolvimento de um aquecedor solar automatizado: eficiência energética e sustentabilidade com tecnologia Arduino

Development of an automated solar heater: energy efficiency and sustainability with Arduino technology

Danilo de Souza Dias^{1*} , André Luiz da Conceição² 

Citação: Dias, D. S. & Conceição, A. L. (2026). Desenvolvimento de um aquecedor solar automatizado: eficiência energética e sustentabilidade com tecnologia Arduino. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 11, e026002. <https://doi.org/10.18554/rbcti.v11i00.7599>

Recebido: 20 mai. 2024

Aceito: 29 jan. 2026

Publicado: 16jul. 2026



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



1. FATEC – Faculdade de Tecnologia de Franco da Rocha , Gestão de Energia e Eficiência Energética, Franco da Rocha (SP), Brasil.
2. FATEC – Faculdade de Tecnologia de Campinas , Gestão de Energia e Eficiência Energética, Campinas (SP), Brasil.

*Autor correspondente: conceicao.andreluiz@yahoo.com.br

Resumo: O aumento do consumo de energia elétrica residencial no Brasil exige tecnologias de eficiência energética. Este estudo desenvolveu e avaliou um protótipo de aquecedor solar automatizado de baixo custo (Arduino) para analisar sua viabilidade técnica, econômica e desempenho térmico. Ensaios realizados em maio de 2024 monitoraram temperaturas em três configurações distintas. O sistema atingiu até 50 °C, temperatura adequada para banho. O custo de montagem (R\$ 900 a R\$ 1.000) foi inferior aos sistemas comerciais convencionais, viabilizando a aplicação em residências de menor renda. A automação garantiu estabilidade e monitoramento em tempo real. Os resultados confirmam a viabilidade técnica e o potencial sustentável do sistema durante o outono. Recomendam-se testes em outras estações e análises detalhadas de consumo e custo-benefício.

Palavras-chave: Eficiência energética. Aquecedor solar de água. Automação. Sustentabilidade. Arduino.

Abstract: Increasing residential electricity consumption in Brazil demands energy efficiency technologies. This study developed and evaluated a low-cost automated solar water heater prototype based on Arduino to analyze its technical and economic feasibility, as well as its thermal performance. Tests conducted in May 2024 monitored temperatures across three distinct configurations. The system reached up to 50 °C, a suitable temperature for bathing. The assembly cost (BRL 900 to BRL 1,000) was lower than conventional commercial systems, making it viable for lower-income households. Automation ensured stability and real-time monitoring. The results confirm the system's technical feasibility and sustainable potential during autumn. Further tests in other seasons, along with detailed consumption and cost-benefit analyses, are recommended.

Keywords: Energy efficiency; Solar water heater; Automation; Sustainability; Arduino.

1. Introdução

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), o aumento da eletrificação nas atividades domésticas e comerciais tem elevado a pressão sobre o sistema energético nacional, reforçando a necessidade de soluções que promovam maior eficiência e racionalidade no uso da energia. Dados da Pesquisa Mensal de Serviços (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2023) corroboram esse cenário, indicando que o consumo de eletricidade em residências e no comércio cresceu de forma consistente nos últimos anos. A eficiência energética, nesse sentido, consiste em otimizar o uso da energia, obtendo o mesmo resultado ou serviço com menor consumo de recursos energéticos (Goldemberg & Villanueva, 2003).

No Brasil, a matriz elétrica, embora predominantemente renovável, enfrenta desafios relacionados à sazonalidade hidrológica e ao aumento contínuo das tarifas. O país apresenta níveis elevados de irradiação ao longo do ano, o que favorece a adoção de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos. Fraidenraich (2015) e Cardoso, Nogueira e Haddad (2010) destacam que o aproveitamento térmico da energia solar, por meio de coletores solares, constitui tecnologia madura, com impacto ambiental reduzido e amplamente aplicável ao aquecimento de água em residências, o que pode reduzir significativamente o consumo elétrico associado ao banho.

Os Sistemas de Aquecimento Solar (SAS) baseiam-se na captação da radiação solar térmica e são compostos fundamentalmente por coletores e reservatórios térmicos (*boilers*). Duffie e Beckman (2013) descrevem os coletores como placas capazes de absorver a radiação solar e transferi-la à água que circula por tubulações, geralmente de cobre, fixadas a aletas enegrecidas. Já o reservatório térmico é isolado termicamente para minimizar perdas de calor (Duffie & Beckman, 2013).

No entanto, apesar das vantagens técnicas e ambientais, barreiras econômicas ainda restringem sua adoção. Napolini, Militão e Rüther (2010) enfatizam que os custos de aquisição e instalação de equipamentos comerciais continuam sendo o principal entrave para a popularização dessa tecnologia em famílias de baixa renda. Como alternativa, pesquisadores têm desenvolvido Aquecedores Solares de Baixo Custo (ASBC), que utilizam materiais reciclados ou de fácil aquisição, como forros de PVC e garrafas PET. Conforme destacam Cardoso et al. (2010), transpor o obstáculo do custo inicial de aquisição é fundamental para a democratização do acesso à água quente sanitária sustentável.

Adicionalmente, além dos sistemas térmicos, a conversão direta da radiação solar em eletricidade ocorre por meio de módulos fotovoltaicos. A produção de energia em um arranjo fotovoltaico é influenciada por diversos fatores técnicos e ambientais, tais como: irradiação solar local, orientação (desvio azimutal) e inclinação dos módulos, perdas nos inversores e cabos, possíveis sombreamentos, temperatura de operação das células e condições de limpeza da superfície dos equipamentos (Mamede Filho, 2017).

Nesse contexto, a integração de sistemas térmicos construídos com materiais alternativos aliados a tecnologias acessíveis de automação surge como uma solução promissora. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar experimentalmente um protótipo de aquecedor solar automatizado de baixo custo, baseado na plataforma Arduino, analisando seu desempenho térmico e sua viabilidade técnica e econômica.

2. Métodos

A condução deste estudo envolveu duas etapas complementares: uma revisão bibliográfica sistemática e uma investigação experimental realizada em ambiente controlado. A estrutura metodológica adotada fundamenta-se em procedimentos de pesquisa descritiva e experimental, com abordagem quali-quantitativa, conforme diretrizes clássicas apresentadas por Astivera (1989) e Severino (2007), permitindo a análise técnica e operacional de um protótipo de aquecedor solar automatizado de baixo custo.

A revisão bibliográfica contemplou obras relacionadas aos temas de energia, desenvolvimento humano, eficiência energética, aproveitamento térmico da energia solar, automação aplicada a sistemas térmicos e tecnologias alternativas de baixo custo. Foram consultados autores fundamentais que tratam do papel da energia no desenvolvimento socioeconômico (Goldemberg & Villanueva, 2003), dos fundamentos de eficiência e conservação (Mamede Filho, 2017), das bases do aquecimento solar (Fraidenraich, 2015; Cardoso, Nogueira & Haddad, 2010), das características e desempenho de coletores e reservatórios térmicos (Duffie & Beckman, 2013) e de estudos sobre viabilidade econômica e acessibilidade tecnológica para populações de menor renda (Naspolini, Militão & Rüther, 2010). Esse conjunto de referências subsidiou tanto o planejamento do protótipo quanto a definição dos parâmetros experimentais a serem avaliados.

A etapa experimental foi desenvolvida no Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Tecnologia de Franco da Rocha (FATEC), local onde o protótipo foi construído, instrumentado e testado. O procedimento experimental baseou-se no monitoramento contínuo do comportamento térmico do sistema em condições reais de insolação, considerando o objeto de estudo como uma fonte de observações sistemáticas, tal como propõe Severino (2007). Para orientar a análise, quatro dimensões foram consideradas: o aspecto ambiental (com foco em materiais reaproveitados e impactos potenciais), o aspecto social (viabilidade para residências de baixa renda), o aspecto econômico (custos de aquisição e montagem) e o aspecto técnico (desempenho térmico, precisão dos sensores, estabilidade do sistema e funcionalidade da automação).

A construção do protótipo, cujo arranjo esquemático detalhando as conexões entre Arduino, sensores, válvulas, bombas, coletores e reservatórios está representado na Figura 1, seguiu inicialmente um arranjo de testes em *protoboard*, com o objetivo de validar conexões e funcionalidades dos componentes eletrônicos. Após essa etapa preliminar, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso em fenolite para acomodação definitiva dos dispositivos e sua integração ao módulo microcontrolado. O sistema eletrônico foi composto por uma placa Arduino Mega como unidade central de controle, sensores de temperatura LM35 para medição contínua da água nas diferentes partes do sistema, um *display* LCD 16×2 para visualização local dos dados, uma placa *Ethernet Shield* para envio das informações a um servidor online e relés, válvulas solenoides, bombas elétricas e demais componentes auxiliares necessários à automação.

Figura 1 - Arranjo esquemático, montagem e isolamento térmico do protótipo.



Fonte: Autores (2024).

A parte hidráulica foi construída com dois reservatórios — caixa fria e caixa quente — instalados em tambores com isolamento térmico por manta, um coletor solar experimental com capacidade aproximada de três litros e tubulação conectada ao sistema automatizado. O processo operacional consistiu em manter a água no coletor até que a temperatura atingisse um valor predefinido (*setpoint*), momento em que o sensor LM35 enviava sinal ao Arduino, ativando o relé responsável pelo acionamento da bomba e transferindo a água aquecida para o reservatório térmico. Todo o processo foi monitorado em tempo real por meio do *display* LCD, de um aplicativo e de uma interface web conectada ao módulo *Ethernet*.

A programação do sistema foi desenvolvida na IDE Arduino, permitindo a leitura contínua dos dados dos sensores, a comparação dessas informações com os *setpoints* definidos para os ensaios, o acionamento automático das bombas, a transmissão dos dados a um servidor online e a disponibilização das informações ao usuário. Esse arranjo possibilitou a coleta automatizada, confiável e rastreável das medições ao longo do experimento, como mostrado na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Monitoramento e controle dos dados gerados pelo aquecedor solar.



Fonte: Autores (2024).

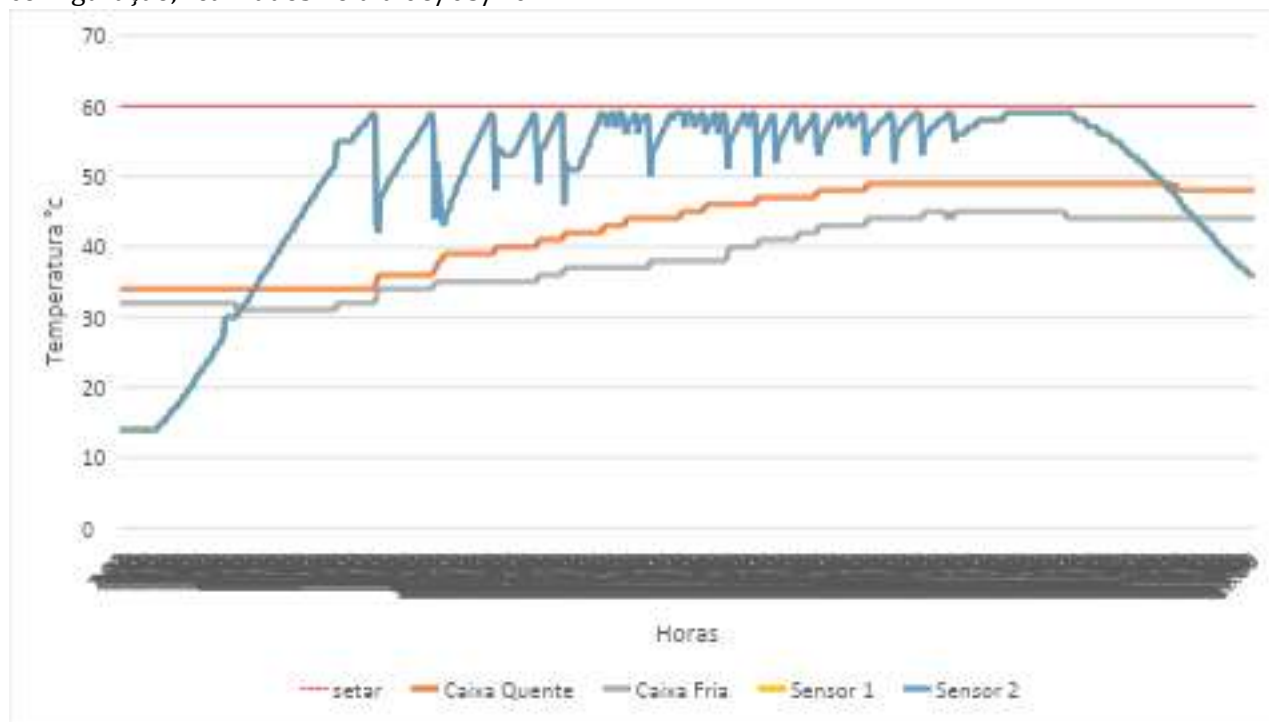
Os ensaios foram realizados durante três dias consecutivos no mês de maio de 2024, cada um correspondendo a uma configuração de *setpoint*: 60 °C, 70 °C e 55 °C. Em todas as configurações registraram-se: temperatura da água no coletor, temperatura nos reservatórios quente e frio, temperaturas nos sensores 1 e 2, horários das medições e comportamento térmico ao longo do período de insolação. Os dados brutos foram organizados em planilhas e tratados de forma comparativa, avaliando-se: o gradiente térmico entre coletor e reservatórios, o tempo de resposta do sistema até o acionamento das bombas, as taxas de aquecimento ao longo do dia, a estabilidade operacional e a consistência entre os sensores. A interpretação dos resultados foi realizada à luz da fundamentação teórica levantada na revisão, permitindo análise crítica e contextualizada do desempenho do protótipo.

3. Resultados e Discussão

A análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais permitiu avaliar o desempenho térmico do protótipo de aquecedor solar automatizado em três configurações distintas de *setpoint* (60 °C, 70 °C e 55 °C), testadas em dias consecutivos do mês de maio de 2024. Em cada ensaio, foram registradas as temperaturas da água no coletor, na caixa quente, na caixa fria e nos sensores LM35, acompanhando-se a evolução térmica ao longo do período de maior incidência de radiação solar. Os resultados discutidos a seguir dialogam com estudos sobre aquecimento solar, conforto térmico e eficiência energética, permitindo compreender a resposta do sistema frente às diferentes estratégias de acionamento.

Na primeira configuração, realizada em 06/05/2024, as bombas eram acionadas quando a temperatura do coletor atingia 60 °C. No início do dia, as temperaturas nos reservatórios refletiam equilíbrio com o ambiente, situando-se em torno de 34 °C na caixa quente e 32 °C na caixa fria. À medida que a radiação solar aumentava, observou-se elevação contínua da temperatura no coletor até a proximidade do *setpoint*, momento em que a água aquecida era enviada ao reservatório térmico. Como mostra a Figura 3, a caixa quente alcançou valores entre 49 °C e 50 °C durante o período de maior insolação, enquanto a caixa fria se manteve em níveis inferiores. Esses resultados são compatíveis com faixas de operação de sistemas solares residenciais descritas por Duffie e Beckman (2013), que apontam temperaturas típicas de 40–55 °C sob condições adequadas de irradiação.

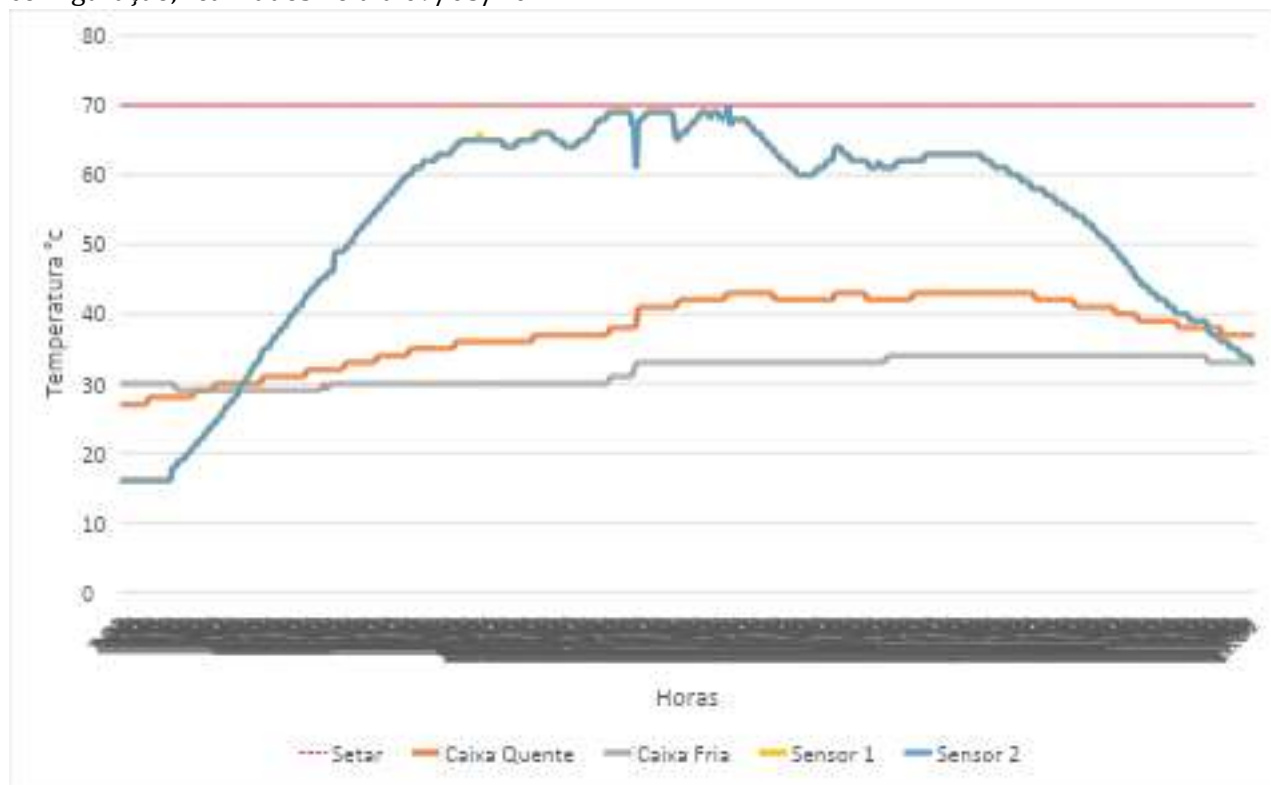
Figura 3 - Comportamento da temperatura da água ao longo do dia durante os ensaios da 1ª configuração, realizados no dia 06/05/2024.



Fonte: Autores (2024).

Na segunda configuração, testada em 09/05/2024, o *setpoint* foi elevado para 70 °C, de modo a investigar se valores mais altos no coletor resultariam em aumento proporcional da temperatura final no reservatório. Como ilustrado na Figura 4, apesar de o coletor ter atingido cerca de 69–70 °C, as temperaturas finais na caixa quente permaneceram entre 41 °C e 43 °C, inferiores às obtidas na primeira configuração. Esse comportamento decorre do maior tempo necessário para alcançar o *setpoint* elevado, reduzindo o número de ciclos de bombeamento e ampliando o período de exposição da água às perdas térmicas por convecção e radiação. A menor eficiência de transferência térmica, portanto, resultou em menor aproveitamento da energia disponível.

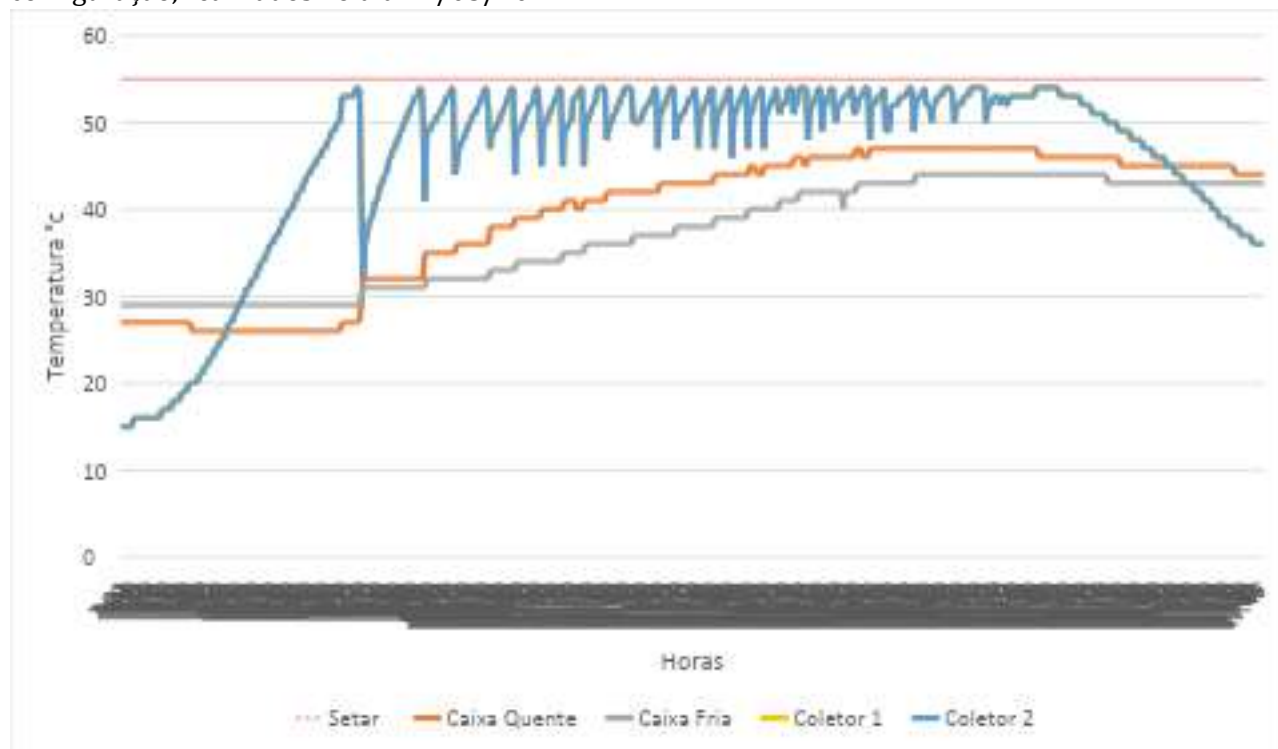
Figura 4 - Comportamento da temperatura da água ao longo do dia durante os ensaios da 2ª configuração, realizados no dia 09/05/2024.



Fonte: Autores (2024).

Na terceira configuração, realizada em 12/05/2024, adotou-se *setpoint* intermediário de 55 °C. Nesse caso, o coletor atingiu valores compatíveis com o limite definido, e o reservatório térmico alcançou temperaturas finais próximas de 47 °C. A Figura 5 evidencia que, embora ligeiramente inferior ao desempenho da primeira configuração, essa alternativa resultou em temperatura mais elevada que a da segunda configuração, apontando para um balanço mais eficiente entre frequência de acionamento, volume aquecido e perdas térmicas do sistema. Esse resultado reforça a adequação de *setpoints* moderados em sistemas compactos de baixo custo, conforme sugerem Cardoso et al. (2010).

Figura 5 - Comportamento da temperatura da água ao longo do dia durante os ensaios da 3ª configuração, realizados no dia 12/05/2024.



Fonte: Autores (2024).

A comparação entre as três configurações permite identificar padrões importantes: a primeira proporcionou o melhor desempenho térmico ($\approx 49\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$), seguida da terceira ($\approx 47\text{ }^{\circ}\text{C}$), ao passo que a segunda apresentou o menor rendimento ($\approx 41\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esse comportamento indica que *setpoints* excessivamente elevados, como $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, não favorecem sistemas de pequeno porte com isolamento térmico limitado, pois reduzem a eficiência no armazenamento de energia. Em contrapartida, valores na faixa de $55\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostraram-se mais adequados para maximizar o volume de água aquecida em condições reais de operação.

Observa-se nos gráficos que, por volta das 16h, a temperatura na caixa quente inicia uma curva de declínio devido à redução da irradiação solar e às perdas térmicas para o ambiente. Dessa forma, o sistema demonstra excelente capacidade de captação e transferência de calor ao longo da manhã e início da tarde, disponibilizando o maior potencial energético acumulado até as 16h, momento recomendado para a utilização da água aquecida antes que o resfriamento noturno se intensifique.

Além do desempenho térmico, destaca-se a contribuição da automação baseada em Arduino e sensores LM35, que permitiu monitoramento preciso, registro contínuo de dados e acionamento automático das bombas apenas quando os limites programados eram alcançados. Essa capacidade de controle melhora a coerência operacional do sistema e aproxima o protótipo das tendências contemporâneas de gestão inteligente da energia.

Algumas limitações, contudo, devem ser consideradas. Os ensaios foram realizados exclusivamente no mês de maio, o que restringe a análise às condições climáticas daquele período. Para compreender plenamente a sazonalidade do desempenho, recomenda-se a realização de testes adicionais em diferentes épocas do ano. Ademais, o estudo não abordou diretamente perfis reais de consumo de água quente, impossibilitando estimativas quantitativas de capacidade de atendimento a residências. Estudos futuros devem incluir análises de vazão, testes sob uso real e avaliações de

viabilidade econômica e ambiental mais robustas. Ainda foram realizados ajustes gráficos nas figuras para aprimorar a legibilidade, sem alteração dos valores experimentais.

4. Conclusão

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais demonstram que o protótipo de aquecedor solar automatizado de baixo custo apresentou viabilidade técnica, estabilidade operacional e desempenho térmico compatível com aplicações residenciais de pequeno porte. Em todas as configurações testadas, a temperatura da água no reservatório quente atingiu valores adequados ao conforto térmico para banho, variando entre aproximadamente 41 °C e 50 °C, dependendo do *setpoint* adotado nos coletores.

A análise comparativa das configurações indica que *setpoints* intermediários (55–60 °C) proporcionaram melhor equilíbrio entre temperatura final da água, frequência de acionamento das bombas e aproveitamento da energia disponível ao longo do dia. Por outro lado, o uso de *setpoint* elevado (70 °C) não resultou em melhoria proporcional de desempenho no reservatório, sugerindo que valores excessivamente altos podem reduzir a eficiência térmica do sistema em protótipos deste porte.

O emprego da plataforma Arduino e de sensores LM35 mostrou-se eficaz para o monitoramento contínuo da temperatura, para o controle automático do bombeamento e para o registro dos dados experimentais. Essa capacidade de automação contribui para a operação segura, racional e energeticamente eficiente do sistema, reforçando o potencial de tecnologias inteligentes de baixo custo para uso em eficiência energética no contexto residencial.

O custo de montagem do protótipo, estimado no intervalo de R\$ 900 a R\$ 1.000, confirma a possibilidade de desenvolvimento de sistemas de aquecimento solar acessíveis, com potencial aplicação em residências de menor renda. Embora materiais de maior qualidade — como *boiler* metálico e tubulação em latão — possam elevar o desempenho térmico, esses acréscimos implicam aumento proporcional dos custos e devem ser avaliados em função do perfil socioeconômico dos usuários.

Apesar dos resultados positivos, o estudo apresenta algumas limitações: (i) os ensaios foram realizados apenas no mês de maio (outono), não contemplando variações sazonais de radiação solar e temperaturas extremas (meses mais quentes de verão e mais frios de inverno); (ii) o volume de água aquecido e o perfil de consumo residencial não foram analisados de forma quantitativa; (iii) as análises econômicas restringem-se ao custo de montagem, não abordando custos de operação, durabilidade dos componentes ou retorno de investimento. Essas limitações não comprometem a validade dos resultados, mas indicam a necessidade de investigações complementares.

Diante do exposto, conclui-se que o protótipo representa uma alternativa promissora para aquecimento solar de água em contextos residenciais que demandem soluções de baixo custo e maior eficiência energética. O sistema demonstrou capacidade de elevar a temperatura da água a níveis adequados ao uso doméstico, operando de forma automatizada, estável e compatível com padrões técnicos discutidos na literatura. Estudos futuros devem incluir ensaios sazonais abrangentes, caracterização do volume efetivamente disponível para uso, avaliação socioeconômica ampliada e aprimoramentos no isolamento térmico e nos materiais utilizados.

Contribuição dos autores: Os autores Danilo de Souza Dias e André Luiz da Conceição contribuíram igualmente para a concepção do estudo, desenvolvimento metodológico, montagem física e programação do protótipo, bem como na coleta de dados, análise dos resultados, redação e revisão final do manuscrito.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver nenhum tipo de conflito de interesses, seja de natureza financeira, pessoal ou institucional, que possa ter influenciado os resultados ou as discussões apresentadas neste trabalho.

Declaração ética: O presente estudo é de natureza estritamente tecnológica e experimental, não envolvendo pesquisas, testes ou coletas de dados com seres humanos ou animais. Dessa forma, dispensa-se a submissão e aprovação prévia por um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP/CEUA). Todas as diretrizes de integridade e boas práticas científicas foram rigorosamente respeitadas.

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de bolsa de Iniciação Científica concedida ao autor Danilo de Souza Dias.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa, e à Faculdade de Tecnologia de Franco da Rocha (FATEC Franco da Rocha) pela disponibilização do espaço e dos equipamentos do Laboratório de Ensaio de Materiais, fundamentais para a condução das etapas experimentais deste estudo.

Referências

- Astivera, J. (1989). *Metodologia científica: o conhecimento de sua natureza e de seu método* (1ª ed.). Atlas.
- Cardoso, R. B., Nogueira, L. A. H., & Haddad, J. (2010). Economic feasibility of solar water heating in Brazil. *Energy Policy*, 38(1), 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.054>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Consumo final de energia*. Ministério de Minas e Energia. <http://www.epe.gov.br/pt/estudos-e-oportunidades/estudos-de-energia/energia-em-numeros/consumo-final-de-energia>
- Fraidenraich, G. (2015). *Energia solar*. Oficina de Textos.
- Goldemberg, J., & Villanueva, P. F. (2003). *Energia e desenvolvimento: bases para uma nova política energética*. Moderna.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Pesquisa Mensal de Serviços*. IBGE.

Mamede Filho, J. (2017). *Energia: hoje e amanhã*. Interciência.

Naspolini, H. F., Militão, H. S. G., & Rüther, R. (2010). The role and benefits of solar water heating in low-income housing in Brazil. *Energy Policy*, 38(11), 6978-6986. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.019>

Severino, A. J. (2007). *Metodologia do trabalho científico* (23ª ed. rev. e atual.). Cortez.

Viana, R. O. R. (2012). *Energia solar: um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica em residências* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais]. Repositório Institucional da UFMG.