



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 2, p. 28–41
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n2.p28-41>

Estudo experimental e numérico do processo de destilação solar para produção de água potável

Experimental and numerical study of the solar distillation process for potable water production

Thiago de Mello Silva Soares¹, Vitória Caroline Azevedo², Alex Garcez Utsumi³, Nádia Guimarães Sousa^{4*}

¹ Engenheiro Químico, Universidade Federal do Triângulo Mineiro– UFTM, MG, Brasil

² Engenheira Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro– UFTM, MG, Brasil

³ Professor do curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro– UFTM, MG, Brasil

⁴ Professora do curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro– UFTM, MG, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: nadia.sousa@uftm.edu.br

Received: 03 April 2025 | Accepted: 22 July 2025 | Published online: 03 August 2025

Resumo: Com apenas 2,5% da água disponível sendo doce, a destilação solar surge como uma solução promissora para torná-la apta para consumo. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade da produção de água potável de um destilador solar do tipo escada (DSE) a partir do estudo experimental e numérico. Os experimentos consistiram na exposição do DSE aos raios solares, registro contínuo da temperatura e análise da água destilada. Além disso, foram estudadas diferentes configurações para o destilador com intuito de melhorar a produtividade. As simulações matemáticas do processo de destilação foram implementadas utilizando o software livre Scilab®. Os resultados mostraram que, melhorias simples e acessíveis, como o uso de deflectores e convecção forçada afetam diretamente a eficiência do DSE, aumentando a produtividade diária em até 2,19 vezes. A melhor configuração do sistema proporcionou coeficientes de determinação aceitáveis ($R^2 \approx 0,80$), mostrando uma congruência entre os dados experimentais e o modelo matemático obtido. Por fim, estudo demonstrou a viabilidade da produção de água potável estabelecidos pela legislação, auxiliando na busca por soluções sustentáveis na gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: recursos hídricos; energia solar; destilação; potabilidade; modelo matemático.

Abstract: With only 2.5% of the available water being freshwater, solar distillation emerges as a promising solution to make it suitable for consumption. The aim of this study was to analyze the feasibility of producing potable water from a solar cascade still (SCS) through experimental and numerical studies. The experiments involved exposing the SCS to sunlight, continuously recording the temperature, and analyzing the distilled water. Additionally, different configurations of the solar still were studied to improve productivity. Mathematical simulations of the distillation process were implemented using the free software Scilab®. The results showed that simple and accessible improvements, such as the use of deflectors and forced convection, directly affected the efficiency of the SCS, increasing daily productivity by up to 2.19 times. The best system configuration provided acceptable determination coefficients ($R^2 \approx 0.80$), demonstrating congruence between the experimental data and the obtained mathematical model. Finally, the study demonstrated the feasibility of potable water production in accordance with legal standards, contributing to the search for sustainable solutions in water resource management.

Keywords: water resources; solar energy; distillation; potable; mathematical model.

1 Introdução

O tema da água no mundo tem se tornado um assunto amplamente discutido nas últimas décadas, sendo abordado tanto pela mídia quanto em congressos, fóruns e salas de aula. Essa preocupação é justificada pela crescente ameaça de escassez de água potável (Venancio, 2015). Segundo os dados da Organização

Mundial de Saúde, cerca de 1,1 bilhão de pessoas no mundo não tem acesso a água potável (Da Silva et al., 2022). A conscientização sobre essa questão tem sido fundamental para promover ações e soluções que assegurem a disponibilidade desse recurso vital (Martins, 2003).

A escassez de água potável tem impulsionado a busca por métodos de tratamento e purificação, e a destilação solar surge como uma alternativa viável. O destilador solar é um equipamento de utilização simples, que se destaca pela alta eficiência na utilização da energia solar e pelos baixos custos operacionais. Ele é capaz de tratar água contaminada ou salgada, convertendo-a em água adequada para consumo humano e animal (Soares, 2004).

Diferentes configurações de destiladores solares têm sido estudadas com intuito de aumentar a produtividade. O destilador solar tipo escada (DSE) é um sistema composto por múltiplos estágios em série, em que cada estágio aquece e evapora a água, resultando em uma água cada vez mais pura. A estrutura em forma de escada permite que o vapor seja condensado nos estágios superiores, enquanto a água destilada é coletada nos estágios inferiores. Estes destiladores têm diversas aplicações, como o fornecimento de água potável em comunidades rurais e em situações emergenciais (Spirandeli, 2017).

O uso de modelos matemáticos para prever o comportamento de processos vem sendo amplamente estudado, visto que, podem ser realizados vários testes, em diferentes condições de operação, sem a necessidade de alterações físicas no equipamento estudado (Faria et al., 2020). Portanto, o sistema de destilação solar pode ser representado por um conjunto de equações, permitindo assim, obter o comportamento das temperaturas em pontos estratégicos do equipamento, através de simulações. Além disso, possibilita estudar as principais variáveis que afetam na produtividade do sistema. Sendo assim, uma ferramenta valiosa no projeto e na melhoria e otimização dos destiladores.

Na literatura, podem ser encontrados trabalhos que detalham estudos experimentais e numéricos para avaliar o funcionamento de destiladores solares. A influências das principais variáveis do processo no desempenho do destilador são estudadas, como a profundidade da água da bacia (El-Sebey, 2022), a variação da altura entre a bacia e a cobertura (Rajaseenivasan, 2017) e os diferentes tipos de cobertura (Altarawneh, 2017). Outras configurações de destiladores menos estudados, como os tipo escada, podem ser encontradas nos trabalhos de Dashtban e Tabrizi (2011) e Bouzaid (2019), que se basearam em equações de balanço de energia para descreverem as trocas de calor entre os componentes do sistema. Além disso, pode ser citado o uso dos destiladores solares para purificação de misturas, como o trabalho de Silva et al., 2024, que estudaram a destilação solar de uma mistura de etanol e óleo e a validação do modelo matemático do sistema.

Portanto, este trabalho teve como objetivo o estudo experimental e numérico de um destilador solar do tipo escada para produção de água potável. Os experimentos foram realizados propondo diferentes configurações para o destilador solar com a finalidade de melhorar o seu desempenho. Posteriormente, foi avaliada a qualidade físico-química e microbiológica, das amostras advinda de mananciais de água doce do Rio Grande, antes e depois da destilação solar. O software livre Scilab foi utilizado para simular o modelo matemático obtido para as temperaturas e para a produtividade de água destilada. Além disso, buscou validar o modelo matemático por meio da combinação dos resultados numéricos e dos testes práticos.

2 Metodologia

Este trabalho possui natureza experimental e teórico-computacional. Foi utilizado o software livre Scilab® para realizar as simulações computacionais do modelo matemático do destilador solar do tipo escada.

2.1 Método experimental

O destilador solar utilizado foi desenvolvido por Spirandeli (2017), Figura 1. A unidade experimental é composta por uma bacia tipo escada feita de zinco galvanizado que possui 4 bandejas, totalizando 0,5 m² de área superficial. No início dos experimentos a unidade foi posicionada ao ar livre, exposta ao sol, e abastecida com água até sua capacidade total de aproximadamente 3 litros.

A água utilizada no DSE foi coletada na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, localizada no município de Delta-MG. Após a coleta da água do Rio Grande, a unidade experimental foi exposta à radiação solar para a destilação. As amostras foram coletadas para a realização das análises de potabilidade.

As análises físico-químicas e microbiológicas das amostras antes e depois do tratamento foram realizadas pela Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas (Codau). Os resultados obtidos foram comparados com os valores permitidos de acordo com a tabela de padrão organoléptico de potabilidade estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888, publicada em 4 de maio de 2021.



Figura 1. Destilador solar tipo escada (DSE): a) Vista panorâmica. B) Vista interna.

Após essas análises, novos experimentos foram realizados com a finalidade de compreender a influência de parâmetros relevantes do processo na produtividade diária de água destilada. Nesse caso, foi realizado um planejamento fatorial 2k, e as variáveis qualitativas analisadas foram a presença ou ausência de manutenção de nível de água na bacia, convecção forçada e uso de defletores externos. Resultando no total de 8 experimentos (2^3), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Experimentos realizados.

Experimento	Ações	Experimento	Ações
1	Sem melhorias	5	Uso de defletor
2	Manutenção do nível da bacia	6	Manutenção do nível da bacia e uso de defletor
3	Convecção forçada	7	Convecção forçada e uso de defletor
4	Manutenção do nível da bacia e convecção forçada	8	Todas a melhorias

A Figura 2, mostra o destilador sem nenhuma melhoria - Experimento 1 (Figura 2a) e com todas as melhorias - Experimento 8 (Figura 2b).



Figura 2. Configurações do DSE: a. Experimento 1. b. Experimento 8.

As medições de temperatura foram realizadas através de um multímetro Minipa® e termopares tipo K aderidos às superfícies da cobertura de vidro e da bacia. As medições foram realizadas em intervalos de 1h, com início às 9h e término às 18h. A frente do equipamento foi orientada para o norte, de modo a melhor aproveitar a incidência dos raios solares durante a maior parte do dia.

Também foi preciso monitorar a intensidade dos raios solares durante cada período através da plataforma *online* do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), que possui uma estação automática de medição na cidade de Uberaba. Além disso, as velocidades médias do vento a cada hora foram coletadas a partir da plataforma *online Weather Underground*.

2.2 Modelagem matemática

O modelo matemático desenvolvido foi baseado em adaptações realizadas nos trabalhos de Bouzaid et al. (2019) e Dashtban e Tabrizi (2011). A modelagem foi feita por meio da aplicação teórica de princípios da

termodinâmica e da lei de resfriamento de Newton, combinados com balanços de energia na cobertura de vidro e na bacia do destilador solar tipo escada. As simulações do modelo matemático foram realizadas pelo *software* livre Scilab®, através do solucionador *lsoda* do pacote ODEPACK. Além disso, foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Não há escape de vapor para fora do destilador.
- A temperatura de cada componente é uniforme.
- Propriedades físicas dos materiais constantes.
- A condensação ocorre apenas na superfície da cobertura.
- A diferença de temperatura entre a bacia e a água é considerada como 2°C.

2.2.1 Cobertura de vidro

De acordo com Bouzaïd et al. (2019), a Eq. (1) representa a variação da temperatura da cobertura (T_g) ao longo do tempo. O balanço de energia foi realizado levando em consideração os fluxos de radiação solar incidente, refletida e transmitida. A absorção da radiação solar pela cobertura de vidro foi considerada, bem como as perdas de calor por convecção e radiação para o ambiente circundante.

$$m_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = Q_{rwg} + Q_{cwg} + Q_{ewg} - Q_{rgsky} - Q_{cga} + Q_{ag} \quad (1)$$

em que: Q_{rwg} , Q_{cwg} e Q_{ewg} são os fluxos de calor por irradiação, convecção e evaporação entre a água da bacia e a cobertura, respectivamente. Q_{rgsky} e Q_{cga} são os fluxos de calor por irradiação e convecção entre a cobertura e o ambiente, respectivamente e Q_{ag} é o fluxo de calor por irradiação sobre a cobertura.

As Eqs. (2) a (6) representam os fluxos de calor. Estes foram determinados por meio da lei de resfriamento de Newton, ou seja, são diretamente proporcionais à diferença de temperatura entre os meios e à área de troca térmica e seus respectivos coeficientes de troca térmica.

$$Q_{rwg} = h_{rwg} A_w (T_w - T_g) \quad (2)$$

$$Q_{cwg} = h_{cwg} A_w (T_w - T_g) \quad (3)$$

$$Q_{ewg} = h_{ewg} A_w (T_w - T_g) \quad (4)$$

$$Q_{rgsky} = h_{rgsky} A_g (T_g - T_{sky}) \quad (5)$$

$$Q_{cga} = h_{cga} A_g (T_g - T_a) \quad (6)$$

em que: A_w e A_g são a área de água na bacia e da cobertura de vidro, respectivamente e T_w é a temperatura da água na bacia. O coeficiente de radiação entre a água e a cobertura de vidro (h_{rwg}) foi determinado pela Eq. (7).

$$h_{rwg} = \frac{\sigma(T_w^2 + T_g^2)(T_w + T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \quad (7)$$

em que: σ corresponde à constante de Stefan-Boltzman, ε_w e ε_g são a emissividade da água e da cobertura de vidro, respectivamente. Em seguida, h_{cwg} foi aproximado pela relação de Dunkle (1961), descrito pela Eq. (8), sendo P_w a pressão de vapor da água armazenada dentro da bacia, calculada pela Eq. (9).

$$h_{cwg} = 0,884 \left[T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)(T_g + 273)}{268,9 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$P_w = e^{\left(25,317 - \frac{5144}{T_w + 273} \right)} \quad (9)$$

O coeficiente de evaporação, h_{ewg} , foi estimado a partir da relação utilizada por Dunkle (1961), de acordo com a Eq. (10) e P_g foi calculado pela Eq. (9), neste caso utilizou T_g como parâmetro.

$$h_{ewg} = 16,273 \times 10^{-3} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (10)$$

Para o cálculo do coeficiente de troca térmica por irradiação, h_{rgsky} , utilizou a Eq. (11) e o T_{sky} foi determinado a partir da Eq. (12).

$$h_{rgsky} = \sigma \varepsilon_w (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad (11)$$

$$T_{sky} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (12)$$

O coeficiente convectivo entre a cobertura de vidro e o ambiente está relacionado com a velocidade do vento circundante (V), sendo calculado pela Eq. (13), desenvolvida por Kreith e Bohn (2003).

$$h_{cga} = 5,8 + 2,8V \quad (13)$$

Finalmente, a fração absorvida dos raios solares pela cobertura, Q_{ag} , foi calculada pela Eq. (14). Que considera a absorvividade de luz da cobertura (α_g), um valor que varia entre 0 até 1, considerado 0 total transparência do material e 1 a total opalescência.

$$Q_{ag} = I_g A_g \alpha_g \quad (14)$$

em que: I_g é a irradiação solar.

2.2.2 Bacia

Já para o estudo dinâmico da temperatura da bacia (T_b), foi feita uma adaptação para os modelos de Bouzaid et al. (2019) e Dashtban e Tabrizi (2011), de modo que o balanço de energia para a bacia foi descrito pela Eq. (15).

$$m_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = Q_b - Q_{cbw} - U_b (T_b - T_{amb}) \quad (15)$$

em que: Q_b é o fluxo de calor por irradiação na bacia, determinado pela Eq. (16), Q_{cbw} é o fluxo de calor convectivo entre a bacia e a água, calculado pela Eq. (17) e o termo final é a parcela que determina a perda de energia para o ambiente. O coeficiente convectivo h_{cbw} foi relacionado através da condutividade térmica da água (λ_w) e do comprimento característico da bacia (L_b), como descrito pela Eq. 18.

$$Q_b = I_g A_b \alpha_b \tau_g \tau_w \quad (16)$$

$$Q_{cbw} = h_{cbw} A_b (T_b - T_w) \quad (17)$$

$$h_{cbw} = \frac{\lambda_w}{L_b} \quad (18)$$

Segundo Dashtban e Tabrizi (2011), a produtividade teórica, expressa em kg/s.m^2 , que relaciona a diferença de temperatura entre a água e a cobertura de vidro, o coeficiente de troca térmica por evaporação (h_{ewg}) e o calor latente de vaporização da água (L_v), foi calculada pela Eq. (19).

$$\text{Produtividade} = \frac{h_{ewg} (T_w - T_b)}{L_v} \quad (19)$$

Segundo Santos (2008), a eficiência do destilador pode calculada utilizando a Eq. (20).

$$\eta = \frac{m_p L_v}{A_w I_g} \times 100 \quad (20)$$

Para a simulação envolvendo convecção forçada, foi utilizado um ventilador de mesa de modo a direcionar o ar ambiente para a superfície da cobertura de vidro. O coeficiente convectivo de troca térmica entre o ar ambiente e a cobertura de vidro foi estimado a partir de valores apresentados por Incropera (2002),

que consideram a faixa convecção forçada para gases entre $15 \text{ W/m}^2\text{.K}$ - $250 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Portanto, para este trabalho, foi considerado $h_{cga}=200 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Além disso, o coeficiente evaporativo de troca térmica entre a água e a cobertura foi considerado de $22,46 \text{ W/m}^2\text{.K}$ de acordo com a estimativa realizada por Rahbar et al. (2015).

Na Tabela 2 estão presentes os valores dos parâmetros empregados na solução do modelo matemático. Esses parâmetros serviram como ponto de partida para todas as análises, sendo ajustados conforme a natureza da análise em questão.

Tabela 2. Valores dos parâmetros do modelo.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
ε_w	0,95	C_{pb}	441 J/kg.K
ε_g	0,9	C_{pw}	4180 J/kg.K
τ_w	0,95	A_b	1,0 m ²
α_b	0,9	A_g	0,65 m ²
α_g	0,4	A_w	0,5 m ²
α_w	0,05	m_g	7 kg
τ_g	0,9	m_b	10 kg
U_b	13,5 W/m ² .K	L_v	2,256x10 ⁶ J/kg

O ajuste do modelo aos dados experimentais foi analisado utilizando o coeficiente de determinação R^2 . Adicionalmente, a análise incorporou o método de raiz do erro quadrático médio (RSMD) que é uma métrica estatística que avalia a diferença entre os valores previstos por um modelo teórico e os valores observados experimentalmente. Ao quantificar essa discrepância, o RSMD fornece uma medida da precisão com que o modelo teórico representa os dados empíricos, contribuindo assim para uma avaliação mais completa da qualidade e adequação das relações.

2 Resultados e discussões

Os resultados obtidos para o estudo da potabilidade da água após a destilação em comparação com a água bruta advinda do Rio Grande estão dispostos nas Tabela 3 e 4. Analisando os resultados físico-químicos (Tabela 3), foi observada redução em todos os parâmetros analisados, com ênfase na remoção de Ferro (95,45%), Manganês (>89,62%), Cor aparente (100%) e Turbidez (73,33%).

Tabela 3. Resultados para análise físico-química.

Parâmetros físico-químicos	Água <i>in natura</i> (Rio Grande)	Água destilada	VMP*	Remoção (%)
Acidez [mg/L]	4,2	3,7	-	11,90
Turbidez [NTU]	4,5	1,2	5,0	73,33
pH	6,7	6,6	-	1,49
Dureza de carbonatos [mg/L]	19,3	8,7	-	54,92
Dureza de não carbonatos [mg/L]	23,9	10,5	-	56,07
Dureza total [mg/L]	43,2	19,2	300	55,56
Cor aparente [uH]	16	0,0	15	100,00
Alcalinidade de bicarbonatos [mg/L]	19,3	8,7	-	54,92
Alcalinidade de carbonatos [mg/L]	<1,0	<1,0	-	-
Alcalinidade de hidróxidos [mg/L]	<1,0	<1,0	0,0	-
Condutividade [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	57,5	55,6	-	3,3
Ferro [mg/L]	0,22	0,01	0,3	95,45
Fluoreto [mg/L]	0,12	0,08	1,5	33,33
Manganês [mg/L]	0,289	<0,03	0,1	>89,62

* V.M.P = Valor máximo permitido segundo a Portaria GM/MS n° 888

A Dureza Total, outro parâmetro importante para a qualidade da água, alcançou o valor de 19,2 mg CaCO₃/L, valor significativamente abaixo do resultado apresentado por outras pesquisas, como a de Silva et al. (2020) para o estudo de dessalinização de água salobra, que teve como resultado a concentração de 50 mg CaCO₃/L. Por outro lado, apesar da redução de 3,30% da condutividade elétrica, o resultado de 55,6 µS/cm ainda se distancia da condutividade obtida por Spirandeli (2017) de 11,6 µS/cm, discrepância que ter sido causada pela menor eficiência de remoção em si, originada pela reforma do equipamento, ou, também, por contaminação de alguma substância no recipiente de coleta que interferiu no resultado.

Immich (2021) também descreveu em seu trabalho uma alta eficiência de redução da cor aparente, com a média de 86,18%. Por fim, ainda de acordo com a Tabela 3, houve uma diminuição significativa da alcalinidade de bicarbonatos, como também apresentado pelo trabalho de Borba Cardoso et al. (2020).

Analizando os resultados microbiológicos (Tabela 4), indicam que o processo de destilação solar obteve uma alta eficiência de remoção das bactérias Coliformes e *Escherichia coli*. A água bruta advinda do Rio Grande apresentou uma densidade de Coliformes Totais e *E. coli* de 231 e 21,3 NMP/100 mL, respectivamente. Ao final do tratamento essas densidades foram zeradas, assim como observado em estudos como o de Immich (2021) e Soares (2004).

Tabela 4. Resultados para as análises microbiológicas.

Parâmetros microbiológicos	Água <i>in natura</i> (Rio Grande)	Água destilada	Limite aceitável	Remoção (%)
Coliformes totais [NMP/100 mL]	231,0	0,0	0,0	100
<i>Escherichia coli</i> [NMP/ 100 mL]	21,3	0,0	0,0	100

A Figura 3 apresenta os dados experimentais obtidos para o Experimento 1 coletados no dia 12 de maio de 2024, permitindo uma observação detalhada das variações das temperaturas, velocidade do vento, radiação solar e produtividade ao longo do dia.

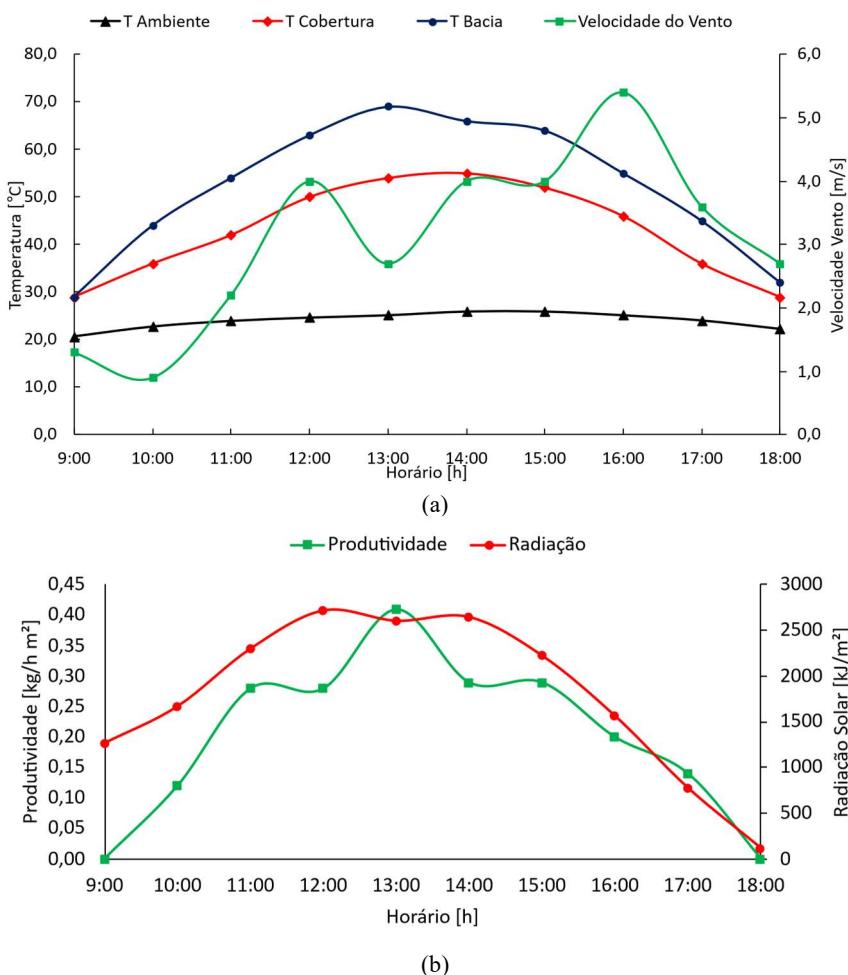


Figura 3. Dados para o Experimento 1: a. Temperatura e velocidade do vento. b. Produtividade e radiação solar.

A partir da Figura 3a, observa-se que as temperaturas do ambiente, da cobertura e da bacia seguem um padrão diurno previsível. As temperaturas começam a aumentar desde o início, atingindo o pico entre 12 h e 14 h, período de maior intensidade de radiação solar. Após esse ponto, as temperaturas começam a diminuir gradualmente até a noite. Esse mesmo comportamento é evidenciado de forma unânime em diversas pesquisas, como a de Kumar, Tiwari e Gaur (2010) que relataram as maiores temperaturas obtidas entre 12 h e 13 h.

As produtividades mássicas e volumétricas, Figura 3b, revelam informações cruciais sobre a taxa de evaporação ao longo do dia. Nota-se que a produtividade aumentou consideravelmente no período de maior intensidade de radiação solar e temperaturas mais altas. Esse aumento na taxa de evaporação está diretamente relacionado à radiação solar, que fornece a energia necessária para o processo de evaporação ocorrer de forma mais intensa.

Ainda de acordo com a Figura 3b, notou-se que a maior taxa de produtividade volumétrica obtida é aproximadamente 0,41 kg/m².h, bem próxima ao resultado relatado por Spirandeli (2017), de aproximadamente 0,5 kg/m².h. Moura (2019) também obteve resultados semelhantes em seu estudo sobre modelagem e simulação numérica de um destilador solar passivo, elencando que o horário de maior produtividade mássica no mês de junho foi entre 12 h e 14 h.

A velocidade do vento, apesar de ter uma pequena variação ao longo do dia, não parece exercer um papel tão significativo na evaporação, pelo menos nos limites deste estudo. É importante lembrar que ventos mais fortes poderiam influenciar a evaporação, mas neste caso, outras variáveis podem ter uma influência maior, como é o caso da radiação solar.

A Figura 4 apresenta os dados obtidos a partir do Experimento 8, no dia 02 de junho de 2024, o qual englobou as três melhorias em conjunto, oferecendo percepções sobre como a convecção forçada, a manutenção de nível e o uso do defletor se interligam para influenciar o sistema como um todo.

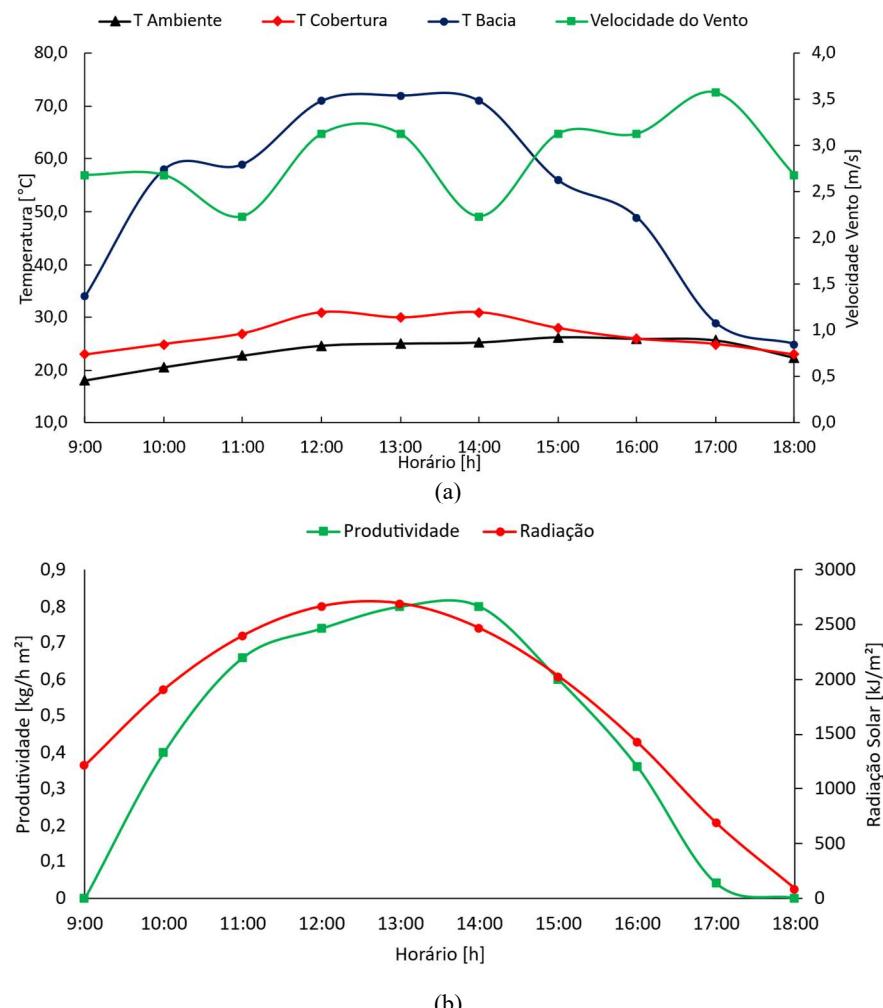


Figura 4. Dados para o Experimento 8: a. Temperatura e velocidade do vento. b. Produtividade e radiação solar.

Através da Figura 4a, foi possível identificar que a utilização da convecção forçada diminuiu consideravelmente a temperatura média da cobertura, saindo de 43°C, no primeiro experimento, para 27°C, no oitavo experimento. Além disso, foi observado o aumento de 8% na temperatura média da bacia no horário de maior intensidade solar. Esses fatores foram responsáveis por incrementar a produtividade diária em aproximadamente 2,19 vezes.

Ao comparar os dois conjuntos de dados apresentados, com todas as melhorias e sem melhorias, fica evidente que a implementação das técnicas teve um impacto positivo na produtividade do sistema. A Tabela 5 apresenta a produtividade média diária e a eficiência média do destilador para todos os experimentos realizados.

Tabela 5. Produtividade (P) e eficiência (η) médias do destilador para cada experimento.

Experimento	P [kg/hm ²]	η [%]	Experimento	P [kg/hm ²]	η [%]
1	0,3	25	5	0,3	34
2	0,3	37	6	0,4	40
3	0,4	43	7	0,4	52
4	0,3	40	8	0,6	50

Os resultados revelam que à medida que as melhorias são implementadas, a produtividade média diária aumenta consideravelmente. O Experimento 8, que incorpora todas as melhorias possíveis, obtém a produtividade mais alta, atingindo 0,6 kg/h·m², destacando a importância dessas melhorias em um contexto de escassez global de água potável.

Esses resultados já eram esperados, uma vez que Zurigat e Abu-Arabi (2004), na pesquisa sobre o efeito da velocidade do vento na produtividade diária, relataram um aumento de mais de 50% e Omara, Kabeel e Younes (2013), em seu experimento sobre destiladores solares modificados com refletores, observaram um incremento da produtividade em 75%. Resultados ainda mais promissores, como o de Abdul Jabbar e Hussein (2010), relataram que o uso de refletores internos aumentaria em aproximadamente 2,45 vezes a produtividade diária em comparação ao destilador solar convencional.

A eficiência média do destilador também aumenta com as melhorias, sendo a mais alta registrada no Experimento 8, com 49,81%. Multah et al. (2014) também observaram um aumento da eficiência térmica em seu trabalho com a utilização de refletores externos, partindo de uma eficiência máxima de 52,3% para 60,2%. Mesmo melhorias simples, como o uso de um defletor e a manutenção do nível da bacia, causam um impacto significativo na produtividade e eficiência em comparação com o cenário inicial sem melhorias.

A introdução de convecção forçada também contribui para o aumento da produtividade e eficiência, embora em menor escala do que outras melhorias. Em resumo, os resultados enfatizam a importância de abordagens progressivas e abrangentes na melhoria da tecnologia de destilação solar do tipo escada, pois a combinação de todas as melhorias resulta na melhoria do desempenho.

Para a validação do modelo matemático proposto, foi feita a comparação das simulações com os dados experimentais coletados. A Figura 5 apresenta as variáveis de temperatura da cobertura de vidro e da bacia (Figura 5a) e produtividade do sistema (Figura 5b) ao longo do tempo de operação para o Experimento 1 – sem a implementação de nenhuma melhoria.

Analizando a Figura 5 nota-se que, de modo geral, o modelo matemático foi adequado para representar os complexos fenômenos de troca térmica envolvidos no processo, com $R^2=0,92$ para bacia e cobertura e $R^2=0,63$ para a produtividade de água destilada. Por ser um modelo fenomenológico, pode-se considerar os valores do coeficiente de determinação aceitáveis, indicando que o modelo matemático utilizado explicou de forma satisfatória as variações dos dados experimentais para a cobertura e bacia. Neste caso, a previsão do modelo apresentou valores de produção de água destilada superiores aos dados experimentais (Figura 5b), isso pode ser explicado por perdas, de vapor ou destilado, não computadas no modelo.

Ademais, o desvio médio quadrático (RSMD), que quantifica a diferença entre os valores observados experimentalmente e os valores teóricos previstos, foram iguais a 10,4% para a temperatura da cobertura e 9,3% para a bacia. Em comparação com o estudo de Dashtban e Tabrizi (2011), que relataram em seu experimento o RSMD de 4% para a cobertura de vidro, o resultado encontrado neste trabalho, é maior, porém ainda satisfatório.

Pela Figura 5a também foi possível notar que os maiores erros relativos para as temperaturas do modelo são iguais a 10,9% para a bacia e 15,2% para a cobertura. Em seu estudo sobre análise numérica para o desempenho térmico de um DSE, Bouzaid et al. (2019) obteve o maior erro relativo de 2,5% para a

cobertura e 8,2% para a bacia. Isso indica que os valores encontrados estão em congruência com os resultados da literatura através de uma margem de erro aceitável.

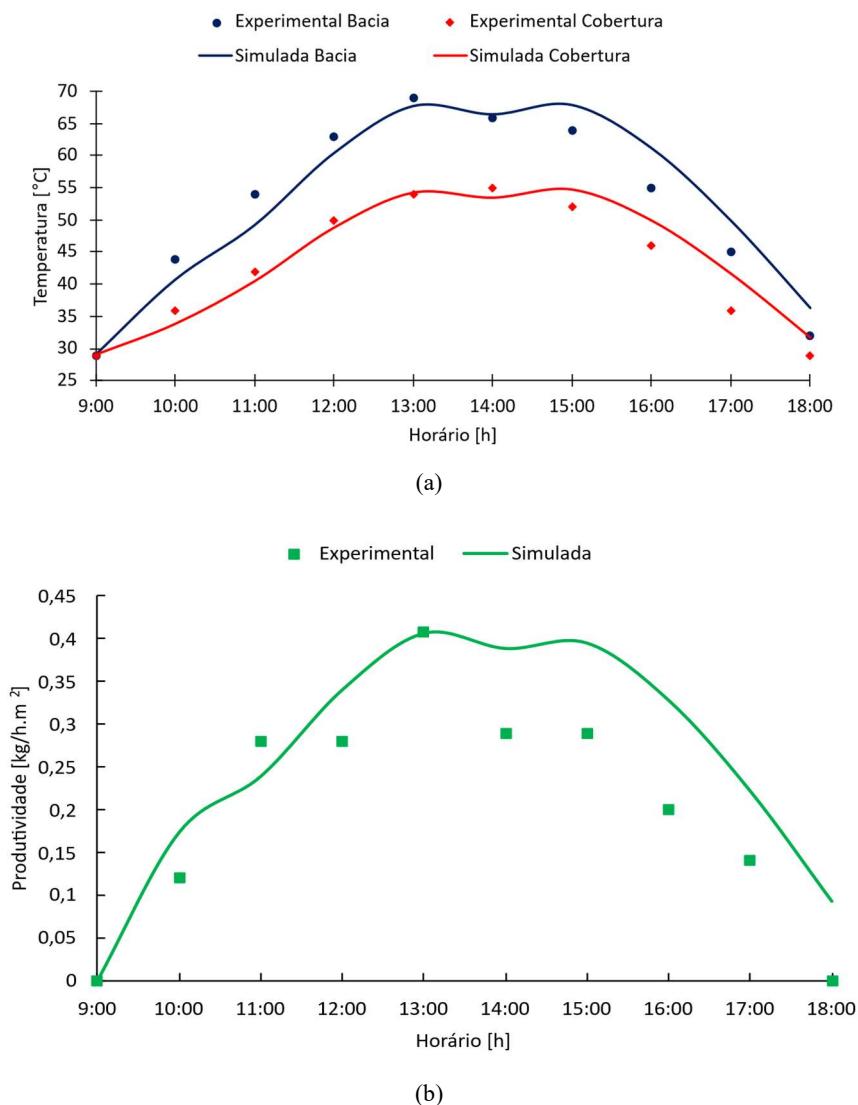


Figura 5. Comparação entre os dados experimentais e o modelo matemático – Experimento 1: (a) Temperatura. (b) Produtividade.

A Figura 6 apresenta os resultados das simulações para as condições do Experimento 8, no qual foram implementadas todas a melhorias no DSE.

Nesse caso, obteve-se $R^2=0,93$ para a bacia, $R^2=0,77$ para a cobertura e $R^2=0,75$ para a produtividade de água destilada. Ao realizar a análise comparativa dos valores do coeficiente de determinação do Experimento 1 com o Experimento 8, foi possível observar que houve uma redução significativa no coeficiente de determinação para a cobertura. Esse resultado sugere que as modificações implementadas no modelo matemático, como o aumento percentual na intensidade dos raios solares pelo uso de refletor e a utilização do coeficiente convectivo de troca térmica para convecção forçada (h_{cga}), não foram suficientes. Entretanto, por ser um modelo fenomenológico, pode-se considerar que os valores do coeficiente de determinação foram aceitáveis e analisando a Figura 6a, o modelo matemático manteve a tendência dos dados experimentais.

É importante ressaltar que a variação nos coeficientes de determinação pode ser atribuída a várias razões, tais como possíveis vazamentos de vapor no equipamento, que podem introduzir variações não previstas no modelo matemático. Além disso, a hipótese simplificadora da diferença de temperatura entre a bacia e a água durante todo o experimento pode interferir diretamente no resultado do modelo.

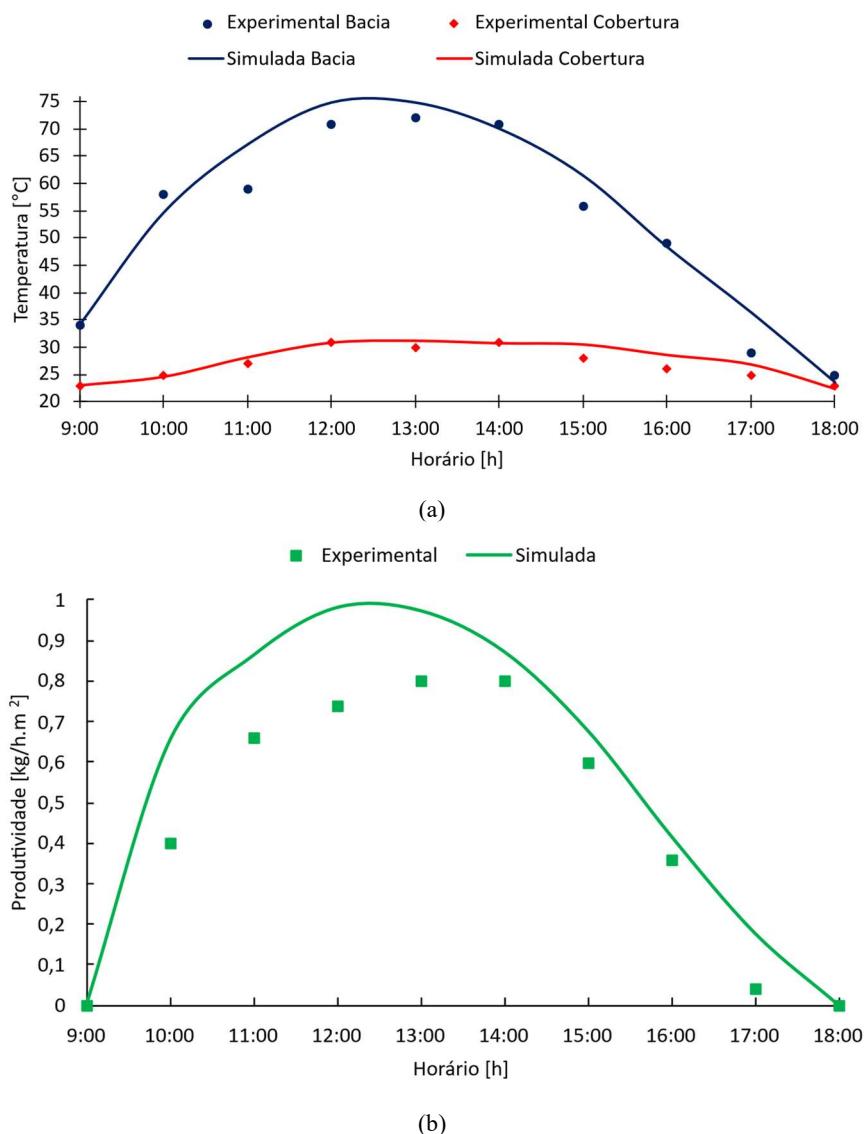


Figura 6. Comparação entre os dados experimentais e o modelo matemático – Experimento 8: (a) Temperatura. (b) Produtividade.

Por fim, também foi possível destacar que, em comparação com o primeiro experimento, o RSMD para a temperatura da cobertura aumentou para 15,7% e da bacia foi reduzido à 9,2%. A variação no RSMD entre o primeiro e o segundo experimento pode ser atribuída a diversas influências, como as mudanças nos procedimentos experimentais, diferenças nas condições ambientais e limitações nos modelos teóricos. Porém, ainda pode-se afirmar que os resultados estão dentro do limite satisfatório embasado pelas pesquisas realizadas nesse campo de estudo.

Bouzaid et al. (2019) também perceberam em sua simulação numérica que o modelo matemático conseguiu prever com maior precisão a temperatura da bacia do que a da cobertura. Isso significa que ainda há fatores relevantes que precisam ser melhor estudados a fim de se obter uma análise mais detalhada sobre o processo de destilação solar e os fenômenos físicos que a abrangem.

4 Conclusões

Este estudo ofereceu uma contribuição para o avanço na utilização da destilação solar como uma alternativa viável para o tratamento de água em áreas com recursos limitados. Bem como, a validação do modelo matemático para posterior utilização na previsão das temperaturas e produtividade em diferentes condições de operação. Dentre os pontos de contribuição podem ser citados:

- A integração de modelagem matemática, simulações e experimentos práticos permitiu confirmar a hipótese de que é possível produzir água potável a partir do destilador solar do tipo escada. Entretanto, necessita de mais estudos para a confirmação da segurança para o consumo humano.

- b. Os parâmetros de qualidade da água destilada apresentaram reduções substanciais em impurezas. Além disso, o processo de destilação solar mostrou alta eficiência na remoção de bactérias Coliformes e *Escherichia coli*.
- c. Os dados experimentais obtidos mostraram que o uso de deflectores e convecção forçada afetaram diretamente na produtividade e eficiência do destilador solar. Portanto, melhorias simples e acessíveis podem ser implementadas com a finalidade de aumentar o desempenho do processo de destilação solar.
- d. A partir dos resultados das simulações pode-se afirmar que o modelo matemático foi capaz de prever o comportamento das temperaturas e da produtividade de água destilada uma vez que seguiu a mesma tendência dos dados experimentais. Entretanto sugere-se refinar os parâmetros do modelo, acrescentando equações constitutivas que levem em consideração as perdas de calor não calculadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.

Referências bibliográficas

- Abdul Jabbar, KN e Hussein, IA (2010) ‘Effect of inclination of the external reflector of simple solar still in winter: An experimental investigation for different cover angles’, *Desalination*, 264(1-2), pp. 129-133. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.016>.
- Altarawneh, I, Rawadieh, S, Batiha, M, Al-Makhadmeh, L, Alrowwad, S e Tarawneh, M (2017) ‘Experimental and numerical performance analysis and optimization of single slope, double slope and pyramidal shaped solar stills’, *Desalination*, 423, pp. 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.023>.
- Borba Cardoso, MK, Vilar de Brito, YJ, Silva, KS, Silva, CB, De Lima, CAP e De Medeiros, KM (2020) ‘Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesianos no interior da Paraíba’, *Águas Subterrâneas*, 34(2), pp. 135–142. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29799>.
- Bouzaid, M, Ansari, O, Taha-Janan, M, Mouhsin, N e Oubrek, M (2019) ‘Numerical analysis of thermal performances for a novel cascade solar desalination still design’, *Energy Procedia*, 157, pp. 1071-1082. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.274>.
- Brasil. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. (2021) *PORTARIA GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021*. Brasília.
- Dashtban, M e Tabrizi, FF (2011) ‘Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage’, *Desalination*, 279(1–3), pp. 415-422. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.044>.
- Da Silva, SS, Rubio, F, Ramirez, KG, Soares, LM, Frigo, JP, Coldebella, PF, Gonçalves, CCS e Boroski, M (2023) ‘Estudo da contaminação da água superficial e subterrânea de um lixão desativado: Arroio Dourado – Foz do Iguaçu – PR’, *Revista Tecnologia e Sociedade*, 19(55), pp. 345-365. <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/13939> (Acessado em: 6 setembro 2024).
- Dunkle, RV (1961) ‘Solar Water Distillation, the Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still’, *International Developments in Heat Transfer, ASME, Proc. International Heat Transfer, Part V*, University of Colorado, p. 895.
- El-Sebaey, MS, Ellman, A, Hegazy, A e Panchal, H (2022) ‘Experimental study and mathematical model development for the effect of water depth on water production of a modified basin solar still’, *Case Studies in Thermal Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101925>.
- Faria, EV, Sousa, NG e Santos, KG (2020) ‘Estudo experimental e numérico do perfil de aquecimento de um forno solar aplicado à secagem’, *Research, Society and Development*, 9(7). <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4368>.
- Immich, V (2021) *Avaliação do uso de destilador solar piramidal ativo para produção de água para consumo humano em situações emergenciais*. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/20399/Immich_Vinicius_2021_TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Acessado em: 6 setembro 2024).

- Incropera, FP, Dewitt, DP, Bergman, TL e Lavine, AS (2002) *Fundamentos de transferência de calor e massa*. Rio de Janeiro: LTC.
- Kreith, F e Bohn, MS (2003) *Princípios de Transferência de Calor*. Ed. Thomson.
- Kumar, S, Tiwari, GN e Gaur, MK (2010) ‘Development of empirical relation to evaluate the heat transfer coefficients and fractional energy in basin type hybrid (PV/T) active solar still’, *Desalination*, 250, pp. 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.030>.
- Martins, A (2003) ‘O planeta está sedento’, *Folha Universal*, São Paulo, p. 2A, 16 nov. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/enem/geografia/escassez-hídrica-no-brasil-e-no-mundo> (Acessado em: 3 setembro 2024).
- Muftah, AF, Alghoul, MA, Fudholi, A, Abdul-Majeed, MM e Sopian, K (2014) ‘Factors affecting basin type solar still productivity: a detailed review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 430–447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.052>.
- Omara, ZM, Kabeel, AE e Younes, MM (2013) ‘Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors’, *Desalination*, 314, pp. 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.01.007>.
- Rahbar, N, Esfahani, JA e Fotouhi-Bafghi, E (2015) ‘Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still – CFD simulation and theoretical analysis’, *Solar Energy*, 113, pp. 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.032>.
- Rajaseenivasan, T, Prakash, R, Vijayakumar, K, Srithar, K (2017) Mathematical and experimental investigation on the influence of basin height variation and stirring of water by solar PV panels in solar still. *Desalination*, v.415, p.67–75 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.010>.
- Santos, RD (2008) ‘Destilador solar de cobertura piramidal e isolamento em material compósito a base de gesso e EPS’, *Congresso Iberoamericano de Energia Solar*, Galicia, Espanha.
- Silva, IB, Faria, EV, Sousa, NG, e Santos, KG (2024). Numerical modeling and experimental validation of a passive solar distillation of ethanol. *Latin American Journal of Energy Research*, 11(2), 161–175. <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p161-175>.
- Soares, C (2004) *Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87556/208790.pdf?sequence=1> (Acessado em: 10 maio 2024).
- Spirandeli, ABL (2017) *Projeto e construção de destilador solar tipo escada: análise de configurações e fatores relevantes no processo de dessalinização solar*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba.
- Venancio, DFV, Santos, RM, Cassaro, SP e Costa, PC (2015) ‘Crise Hídrica e sua contextualização mundial’, *Encyclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2015E/a%20crise%20hidrica.pdf> (Acessado em: 3 setembro 2024).
- Zurigat, YH e Abu-Arabi, MK (2004) ‘Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit’, *Applied Thermal Engineering*, 24(7), pp. 1061–1072. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.010>.