

ESTUDO DE MINIMIZAÇÃO DE PERDA DE CALOR EM UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICO COM EFICIÊNCIA DE 60%

HEAT LOSS MINIMIZATION STUDY IN A THERMAL DESALINATION SYSTEM WITH EFFICIENCY OF 60%

Gabriel Garcia Bastos de Almeida ¹ 

Resumo: A escassez de recursos hídricos constitui um problema persistente em diversas regiões do mundo, com destaque para o Nordeste brasileiro, caracterizado por um regime climático semiárido. Nesse contexto, a dessalinização térmica apresenta-se como uma alternativa promissora para a conversão de água salobra ou salgada em água potável. Contudo, a elevada dissipação de calor inerente ao processo representa um desafio significativo à sua eficiência. Este trabalho teve como objetivo a modelagem e a otimização de um protótipo de dessalinização térmica de pequena escala, com foco na minimização das perdas térmicas. As simulações foram realizadas em linguagem Python, utilizando dois métodos de otimização: o Algoritmo Genético (AG) e a Evolução Diferencial (ED). Os valores mínimos de perda de calor obtidos foram 3.063.432,87 J e 3.067.263,45 J, correspondentes ao AG e à ED, respectivamente. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de convergência para avaliar a obtenção da solução ótima global ou de uma aproximação adequada. Os resultados indicam que, após a validação do modelo e das estratégias de otimização adotadas, foi possível reduzir significativamente as perdas térmicas com a eficiência energética estabelecida em 60% e uma melhoria na produtividade do processo de dessalinização térmica.

Palavras-chave: Otimização. Dessalinização. Água.

Abstract: Water scarcity is a persistent problem in several regions of the world, especially in the Brazilian Northeast, characterized by a semi-arid climate. In this context, thermal desalination presents itself as a promising alternative for the conversion of brackish or salty water into drinking water. However, the high heat dissipation inherent to the process represents a significant challenge to its efficiency. This work aimed to model and optimize a small-scale thermal desalination prototype, focusing on minimizing heat losses. The simulations were performed in Python language, using two optimization methods: the Genetic Algorithm (GA) and Differential Evolution (DE). The minimum heat loss values obtained were 3,063,432.87 J and 3,067,263.45 J, corresponding to the GA and DE, respectively. Additionally, a convergence analysis was conducted to evaluate the achievement of the global optimal solution or an adequate approximation. The results indicate that, after validating the model and the optimization strategies adopted, it was possible to significantly reduce thermal losses, promoting an increase in energy efficiency and an improvement in the productivity of the thermal desalination process.

Keywords: Optimization. Desalination. Water.

¹Doutorando em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, E-mail:gabriel-almeida07@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas globais atualmente é a disponibilidade de água potável, afetando diversas regiões no mundo. As regiões mais atingidas são as áreas áridas e semiáridas, no qual, possuem recursos hídricos limitados e longos períodos de seca e estiagem. A superpopulação, o turismo, a agricultura e a industrialização contribuíram para o aumento da demanda por água potável de qualidade (GORJIAN et al., 2021).

No Brasil, o clima semiárido enfrenta sérios desafios, com altas temperaturas, baixa umidade e estiagens de chuva prolongadas, causando um grande problema na Disponibilidade Hídrica *Per Capita* (DHPC). A DHPC é um dos parâmetros mais utilizados para expressar o quociente entre a disponibilidade hídrica da bacia local, com a população que vive nela (CUNHA; PONTES, 2022). Uma DHPC menor que 1.000 m³/hab.ano está classificada como estresse de água e, quando o valor é menor que 500 m³/hab.ano, classifica-se como escassez de água (SILVEIRA et al., 2015).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu-se que cada pessoa necessitaria de cerca de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene. Em julho de 2010, a Assembleia Geral das Nações Unidas reconheceu o direito humano à água e ao saneamento, incluindo o direito de todos os seres humanos ao acesso a água suficiente para uso pessoal e doméstico, de forma econômica e acessível. A mesma organização, ainda recomenda que um seja consumido em média 2 litros de água potável por dia para cada indivíduo.

O estado da Bahia, possui uma DHPC em média de 2.000 m³/hab.ano, porém, esses valores não representam uma disponibilidade de água de maneira uniforme para todo o estado. Grande parte do interior, a DHPC é bastante reduzida, por causa do clima semiárido da região, o que contribui para a falta de água, de forma a buscar novas soluções para o abastecimento hídrico da população (ANA, 2019). Uma dessas medidas é a captação de água subterrânea, todavia, as águas subterrâneas do estado encontram-se em formações de rochas cristalinas, devido ao seu contato prolongado com elas, fez

com que adquiram propriedades salinas, tornando essas águas salobras e impróprias para o consumo (CUNHA; PONTES, 2022).

No Brasil, a Resolução do Conama nº 357 (CONAMA, 2005) adota a seguinte classificação: a água doce deve possuir salinidade igual ou inferior a 0,05% ou ~ 500 mg/l; a água salobra deve apresentar salinidade superior a 0,05% e inferior a 3,0% ou entre 500 mg/L e 30.000 mg/l; e a água salina deve ter salinidade igual ou superior a 3,0% ou acima de 30.000 mg/l.

Uma das formas encontradas para solucionar esse problema de salinidade nas águas é a dessalinização. Atualmente, existem duas principais tecnologias, a dessalinização térmica, que utiliza os mesmos princípios que o ciclo hidrológico da água, aquecendo e coleta o vapor para condensá-lo e ter água dessalinizada. As tecnologias térmicas são divididas em: destilação *flash* de estágio múltiplo (MSF), destilação de efeito múltiplo (MED) e compressão de vapor (VC) – mecânica (MVC) e térmica (TVC) (CIOCCOLANTI; RENZI, 2018). E a dessalinização por membrana, onde utilizam membranas semipermeáveis que separam os sais da água. As tecnologias de membrana são divididas em: osmose reversa (RO), eletrodialise (ED) e reversão de eletrodialise (EDR) (BAHRAMI et al., 2019).

Em todo sistemas de dessalinização de água, existe uma corrente de água salgada ou salobra que inicia o processo, posteriormente, se divide em duas correntes de saída, uma é a água dessalinizada, no qual possui uma baixa proporção de sólidos totais dissolvidos (STD); e a segunda corrente que é o concentrado ou salmoura, onde possui uma alta concentração de STD, que necessita de um certo tratamento antes de ser descartada de forma imprópria para a natureza, pois, o concentrado pode causar sérios problemas ambientais (USBR, 2003).

Notavelmente, há um interesse crescente no desenvolvimento de usinas de dessalinização térmica de pequena escala, visando resolver o problema de escassez de água potável, porém, muitos protótipos térmicos ainda necessitam de aperfeiçoamentos e melhorias, de forma a maximizar a produção de água, minimizar as perdas de calor, um melhor planejamento e controle da produção etc. (HOSSEINI et al., 2018).

A eficiência dos protótipos de dessalinização térmicos varia amplamente dependendo do design, das condições operacionais e das tecnologias utilizadas. A recuperação de água, que é a proporção da água de alimentação que é convertida em água doce, geralmente varia entre 20% a 50%, onde a eficiência energética pode variar entre 4 a 15 kg de água doce por kWh de energia térmica, com uma eficiência de remoção de sais nos protótipos térmicos é geralmente alta, alcançando até 99,9% ou mais, dependendo do processo e das condições operacionais (SHARON; REDDY, 2015). Contudo, existem limitações no sistema térmico, que são as perdas de calor do sistema, mesmo com diversos tipos de materiais isolantes, no qual necessitam de desenvolvimento de novos materiais para melhorar a eficiência térmica e a recuperação de calor (RANJAN; KAUSHIK, 2013). Além disso, os protótipos de dessalinização térmicos de água em média possuem uma eficiência do sistema térmico em torno de 50% a 60% (SILVA et al. 2013).

Uma das alternativas para ajudar na otimização da eficiência dos protótipos de dessalinização, são alguns dos modelos heurísticos de busca do tipo evolucionário para chegar perto do melhor resultado possível. Dentre eles está o método do algoritmo genético (GA), que se baseia na teoria biológica de Charles Darwin da evolução natural e genética. É largamente usado para resolver problemas de otimização e simulação, usados para maximizar uma função ou minimizá-la, dependendo da aplicabilidade, e neles são criados uma população de indivíduos que pertence ao conjunto solução do problema, atendendo todas as restrições, depois essa mesma população é sujeita a operadores genéticos, como: seleção, cruzamento e mutação. (LINDEN, 2012).

Com isso, o presente estudo tem como objetivo desenvolver a modelagem e otimização do processo de um protótipo de dessalinização térmica de pequena escala, com eficiência de 60%. A abordagem visa minimizar as perdas térmicas do sistema por meio da identificação de parâmetros operacionais ótimos, garantindo uma eficiência energética. Adicionalmente, busca-se determinar as melhores condições de operação para assegurar a produção de um volume de água dessalinizada suficiente para atender às

necessidades diárias de hidratação de um indivíduo, conforme diretrizes estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema foi modelado e otimizado utilizando os softwares da biblioteca SciPy do Python, uma linguagem computacional matemática, com o objetivo de minimizar as perdas de calor no sistema de dessalinização térmica, que possui uma eficiência de 60%. Dessa forma, buscou-se gerar a massa de vapor estabelecida em 2 kg, que, ao ser coletada, corresponde à massa de água dessalinizada do sistema.

O protótipo estudado, do sistema de dessalinização térmica, é aquecido com energia elétrica, ou seja, uma resistência elétrica, que irá se transformar em energia térmica, aquecendo a água do tanque. Na literatura, esse modelo é caracterizado como *resistor puro*, pois, só existe uma resistência (SILVA et al., 2015). A potência média (P_m) do sistema é definida pela multiplicação da voltagem eficaz (V_{ef}) com a corrente eficaz (I_{ef}) que é fornecida pelo multímetro, Eq. (1):

$$P_m = V_{ef} \times I_{ef} \quad (1)$$

onde o calor que entra no experimento ou calor total (QT) é a potência média (P_m), multiplicado pelo tempo (t), Eq. (2):

$$QT = P_m \times t \quad (2)$$

onde a energia perdida do sistema, pode ser calculada pelo balanço de energia, ou seja, a 1ª Lei da Termodinâmica. Assim, a energia de perdas Q_p é definida por:

$$Q_p = QT - (Q_S + Q_L) \quad (3)$$

onde Q_S e Q_L representam o calor sensível (aquecimento da água no tanque de armazenamento) Eq. (4) e o calor latente (evaporação da água a ser condensada) Eq. (5), respectivamente.

$$Q_s = m t \times C_p \times (T_f - T_i) \quad (4)$$

$$Q_L = m v \times h_{fg} \quad (5)$$

substituindo suas expressões no balanço de energia, a energia de perdas pode ser determinada pela Eq. (6):

$$Q_p = (P_m \times t) - [(m_t \times C_p \times (T_f - T_i)) + (m_v \times h_{fg})] \quad (6)$$

A eficiência (η) do sistema de dessalinização térmico, pode ser expressa pela Eq. (7).

$$\eta = (Q_T - Q_p) / Q_T \quad (7)$$

onde Q_p representa a energia de perdas (J), P_m é a potência fornecida (W), t corresponde ao tempo do regime (s), m_t indica a massa da água (kg) e m_v a massa de vapor (kg). O calor específico da água, C_p , tem um valor de 4.184 J/kg·K, enquanto $(T_f - T_i)$ representa a diferença de temperatura entre o início e o fim do regime (K). O calor latente de evaporação, h_{fg} , é de 2.259.000 J/kg a 100°C. Um problema de otimização pode ser representado na forma padrão como a minimização de $f(x)$ como:

Minimizar $f(x)$

Sujeito a:

$$g_i(x) \leq 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(x) = 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots, p$$

$$x_k \in X \text{ para } k = 1, 2, \dots, n$$

onde $f(x)$ é a função objetivo que deve ser minimizada, $g_i(x) \leq 0$ são as restrições de desigualdade, $h_j(x) = 0$ são as restrições de igualdade, $x_k \in X$ representam as variáveis de decisão com seus respectivos domínios. As variáveis de decisão no problema são: P_m (Potência média em W): Potência fornecida ao sistema, t (Tempo em segundos): Tempo durante o qual a potência é aplicada, m_t (Massa total em kg): Massa total de água no sistema.

T_i (Temperatura inicial em K): Temperatura inicial da água no sistema. As constantes conhecidas do problema são: C_p (Calor específico da água): 4.184 J/kg.K e h_{fg} (Calor latente de evaporação da água à 100° C): 2.259.000 J/kg.

3 RESULTADOS

A função objetivo do problema é minimizar as perdas de calor (Q_p) do sistema de dessalinização térmico.

$$Q_p = f(P_m, t, m_t, T_i)$$

$$\text{Minimizar } Q_p(P_m, t, m_t, T_i) = (P_m \times t) - [(m_t \times C_p \times (T_f - T_i)) + (m_v \times h_{fg})]$$

Para a otimização foi utilizada a linguagem Python e suas bibliotecas como a Scipy, algumas restrições foram adicionadas, como as seguintes considerações:

Restrições de desigualdade:

$$g_1(P_m, t, m_t, T_i) = P_m \times t - (m_t \times C_p \times (T_f - T_i) + m_v \times h_{fg}) \geq 0$$

$$g_2(P_m) = P_m - 1.500 \leq 0$$

$$g_3(P_m) = 2.000 - P_m \leq 0$$

$$g_4(m_t) = m_t - 10 \leq 0$$

$$g_5(m_t) = 20 - m_t \leq 0$$

$$g_6(Q_p) = -Q_p \leq 0$$

$$g_7(t) = -t \leq 0$$

$$g_8(T_i) = T_i - 20 \leq 0$$

$$g_9(T_i) = 25 - T_i \leq 0$$

Restrições de igualdade:

$$h_1(T_f) = T_f - 100 = 0$$

$$h_2(m_v) = m_v - 2 = 0$$

Variáveis de decisão:

$$P_m \in [1.500, 2.000] \text{ J/s}$$

$$m_t \in [10, 20] \text{ kg}$$

$$t > 0 \text{ segundos}$$

$$T_i \in [20, 25] \text{ }^\circ\text{C}$$

No tocante a eficiência do sistema que deve ser de 60%. Esses valores já são conhecidos como constantes do problema, o calor específico (C_p) da água é de 4.184 J/kg.K; e o calor latente de evaporação da água (h_{fg}) a 100° C é de 2.259.000 J/kg. O problema tem 2 (dois) graus de liberdade. Isso significa que,

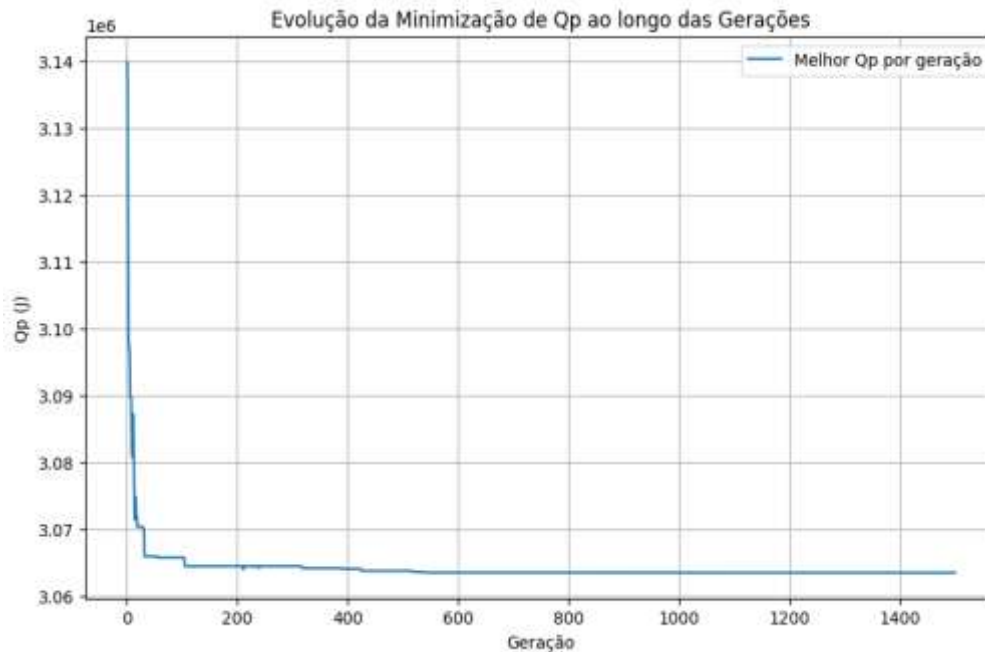
apesar das restrições impostas, ainda há flexibilidade para ajustar duas das variáveis de decisão dentro dos limites estabelecidos pelo problema.

Foi utilizado o método heurístico de algoritmo genético para tentar encontrar a solução mais perto da ótima, para isso, foi utilizado o tamanho da população no valor de 2.000 indivíduos, este parâmetro define o número de indivíduos (soluções) na população de cada geração. O número de gerações escolhidas foi de 1.500, essa quantidade de gerações indica quantas vezes o processo de evolução será repetido. A taxa de mutação ficou com um valor de 0.1, a qual indica a probabilidade de ocorrer uma mutação em um indivíduo após o crossover, a mutação introduz diversidade genética na população, prevenindo a convergência prematura para soluções subótimas. Uma taxa de mutação alta (como 10%) pode evitar que o algoritmo fique preso em ótimos locais, mas pode também dificultar a convergência para a solução ótima.

A taxa de crossover foi fixada em 0.8, na qual indica a probabilidade de crossover entre pares de indivíduos na população. O crossover é o processo de recombinar informações de dois pais para gerar novos descendentes. Um valor de 80% significa que a recombinação de características entre pais será aplicada frequentemente. Isso pode acelerar a convergência e ajudar a combinar boas características dos pais. Já o valor de penalidade foi de $1e10$, este é o valor de penalidade aplicado a soluções que não atendem às restrições do problema. O valor alto de penalidade, como $10e10$, é usado para garantir que soluções inviáveis, ou seja, que não atendem às restrições, sejam penalizadas fortemente, tornando-as menos prováveis de serem selecionadas para a próxima geração. Isso direciona o algoritmo a focar em soluções viáveis.

Na Figura 1, é possível verificar a diferença entre a evolução da minimização de perda de calor ao longo das gerações geradas. Pode-se observar que ao longo do número de gerações realizadas, o valor de perda de calor sofreu alteração significativa no início, porém, com o passar das gerações o valor de Q_p se estabilizou e não houve grandes variações nas últimas gerações, podendo indicar que o algoritmo convergiu para uma solução ótima ou próxima do ótimo.

Figura 1 – Evolução da minimização de perda de calor ao longo das gerações geradas pelo método heurístico de algoritmo genético.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para validação desse modelo de cálculo e otimização dos resultados foram utilizados dois métodos, o primeiro é a análise de convergência, que verifica a evolução do fitness ao longo das gerações. Se o valor de Q_p estabilizou e não gerou grandes variações nas últimas gerações, isso pode indicar que o algoritmo convergiu para uma solução ótima ou próxima do ótimo. O segundo foi por meio do método de evolução diferencial, que também é um algoritmo de otimização evolutiva usado para resolver problemas complexos de otimização, dessa forma, realizando comparações dos resultados obtidos realizando a validação dos resultados.

Foram obtidos então, os seguintes resultados com a modelagem e otimização, pelo método do algoritmo genético, com uma eficiência estabelecida do sistema de dessalinização térmico de 60%. Para a melhor minimização de perda de calor, foi obtido um valor de 1.252,47 J. Para as seguintes melhores combinação das variáveis de massa total de água, potência da resistência, tempo de operação do sistema e temperatura inicial, ficaram com resultados de 10.00 kg, 1.718,31 J/s, 4.457 segundos e 24,97° C, respectivamente. Dentro desses parâmetros, foram obtidos os valores de: calor total fornecido para o

sistema, igual a 7.658.507,67 J, o calor sensível, com valor de 3.139.255,2 J e o calor latente com 4.518.000 J. Notadamente, com uma temperatura final fixada em 100° C para evaporação da água e uma massa de vapor de água de 2 kg, assim, obtendo uma quantidade necessária para a hidratação de uma pessoa, conforme os parâmetros do ministério da saúde e da organização das nações unidas.

No tocante a melhor minimização de perda de calor utilizando o método de evolução diferencial, que obteve valor de 1.285,84 J, os parâmetros encontrados foram de potência da resistência com 1.559,84 J/s, o tempo de operação foi de 4.916 segundos, a massa de água com 10,02 kg e uma temperatura inicial de 24,89° C. Dentro desses parâmetros, foram obtidos os valores de: calor total fornecido para o sistema, igual a 7.668.173,44 J, o calor sensível, com valor de 3.148.887,60 J e o calor latente com 4.518.000 J.

Essa diferença de resultados encontrados, entre o algoritmo genético e o método de evolução diferencial, ficou da seguinte maneira, entre as potência, o valor foi de 158,47 J/s, no tempo teve uma diferença de 459 segundos, a massa de água ficou com 0,02 kg, na temperatura inicial de 0,08° C, a diferença de perda de calor foi de 33,37 J e a diferença entre os calores totais fornecidos (DE – GA) é 9.665,77 J. Desta forma, indicando que ambos estão convergindo para uma solução ótima global ou para ótimos locais muito próximos. Isso sugere que os métodos estão efetivamente explorando o espaço de soluções e encontrando resultados consistentes.

4 DISCUSSÃO

A dessalinização térmica, utilizada para obter água potável do mar em regiões áridas e setores industriais, enfrenta como principal desafio a alta demanda energética devido à evaporação e condensação da água (ABDELMAKSOUD, 2025). Reduzir perdas de calor é essencial para elevar a eficiência, diminuir o consumo e garantir viabilidade econômica (SHOEIBI et al., 2021). Essas perdas ocorrem por dissipação para o ambiente, trocadores de

calor, tubulações e isolamento inadequado, exigindo maior aporte de calor, o que eleva o uso de combustível e os custos operacionais (SINGH et al., 2024).

Na presente pesquisa, adotou-se uma eficiência térmica de 60% para o protótipo de dessalinização térmica analisado. Entretanto, a literatura indica que até 30% da energia térmica empregada em sistemas convencionais pode ser dissipada em decorrência de perdas inadequadamente controladas, comprometendo o desempenho global do processo. Essa ineficiência não apenas reduz a produtividade na geração de água doce, como também diminui a competitividade tecnológica da dessalinização (KERFAH et al., 2025). Atualmente, a eficiência global dos sistemas de destilação multietapada (MED) situa-se entre 40% e 50%, enquanto os sistemas de destilação por compressão de vapor (VCD) podem atingir valores de até 60% de eficiência térmica (MÜLLER-HOLST et al., 1999).

Ainda no presente estudo não foram abordados materiais destinados à minimização das perdas térmicas; entretanto, investigações voltadas a essa temática, aplicadas a sistemas de dessalinização térmica, evidenciam a viabilidade de diversas estratégias, entre as quais se destaca a utilização de materiais isolantes de alta eficiência, como lã de vidro, espuma de poliuretano e aerogéis. Tais materiais apresentam potencial para reduzir em aproximadamente 10% a 15% a dispersão de calor ao longo de tubulações, câmaras de evaporação e superfícies de trocadores de calor (NAZARI et al., 2022).

No presente estudo, foi possível coletar um total de 2 kg de água dessalinizada, com uma eficiência global do sistema de 60%. Resultados obtidos por Almeida et al. (2025) indicam que, durante o desenvolvimento de um protótipo de dessalinização térmica, a modelagem inicial estimou uma eficiência de 40%; entretanto, a eficiência real do protótipo construído foi de apenas 35%. De acordo com Huang et al. (2024), essa discrepância entre a eficiência projetada e a observada pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo controle inadequado das perdas térmicas, utilização de materiais isolantes de baixa qualidade ou aplicação incorreta desses materiais, bem como perdas durante o

processo de condensação, que comprometem o volume final de água dessalinizada produzido.

Estudos conduzidos por Almeida et al. (2024) e Cunha e Pontes (2022) apresentaram uma modelagem de um dessalinizador térmico de múltiplos estágios (seis) acoplado a um sistema de energia termossolar, projetado para a produção de 60 litros de água potável por dia, visando atender à demanda hídrica do semiárido nordestino. Nesse estudo, a eficiência global do sistema foi estimada em 80%, enquanto a eficiência operacional do dessalinizador permaneceu em torno de 50%, devido a perdas térmicas associadas tanto ao processo de transferência de calor no próprio equipamento quanto às limitações de conversão das placas termossolares. Em contraste, a presente pesquisa adota uma eficiência operacional de 60%, obtida a partir de estratégias de otimização voltadas à minimização das perdas de calor, contemplando melhorias no aproveitamento energético e na integração entre os componentes do sistema.

Schwarzer et al. (2009) desenvolveram e testaram um protótipo de dessalinização térmica acoplado a um sistema de energia termossolar, alcançando uma produção de 15 a 18 litros de água dessalinizada por metro quadrado de área coletora por dia. Esse desempenho corresponde a um fator de 5 a 6 vezes superior à produtividade observada em destiladores do tipo alambique, que foram analisados no referido estudo com eficiência de aproximadamente 60%. Considerando essa eficiência, o sistema proposto por Schwarzer et al. obteve uma produção total de cerca de 35 litros diários, enquanto, no presente estudo, foi estabelecida como meta operacional uma produção de 20 litros diários. Essa diferença evidencia tanto o potencial de aprimoramento do desempenho de destiladores térmicos por meio do acoplamento a fontes renováveis de energia, quanto a relevância de otimizar parâmetros de projeto e operação para maximizar a eficiência e a produtividade do processo de dessalinização.

5 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo computacional para o cálculo e otimização de um processo de dessalinização térmica da água, com eficiência de 60%, com o objetivo de minimizar as perdas térmicas do sistema. A modelagem para essa minimização foi a aplicação do algoritmo genético, considerando as variáveis de decisão: massa total de água, potência da resistência elétrica, tempo de operação e temperatura inicial da água. Os valores otimizados dessas variáveis foram 10,00 kg, 1.718,31 J/s, 4.457 segundos e 24,97° C, respectivamente.

A minimização da perda térmica foi obtida por meio de um algoritmo genético com uma população inicial de 2.000 indivíduos e um total de 1.500 gerações, empregando uma taxa de mutação de 0,1 e uma taxa de crossover de 80%. O valor de penalidade foi definido em 1×10^{10} . Como resultado, a perda de calor minimizada atingiu 3.063.432,87 J, com um calor total fornecido ao sistema de 7.658.582,18 J, sendo 3.140.523,17 J de calor sensível e 4.518.000 J de calor latente.

A validação dos resultados foi realizada por meio da análise de convergência e comparação com o método de Evolução Diferencial (ED). A comparação entre os métodos revelou uma variação de 158,47 J/s na potência, 456 segundos no tempo de operação, 0,02 kg na massa de água, 0,08° C na temperatura inicial e 3.830,58 J na perda de calor. Essas pequenas discrepâncias indicam que ambas as abordagens convergem para uma solução ótima global ou para ótimos locais muito próximos, demonstrando a robustez do modelo na exploração do espaço de soluções.

Com base nos resultados obtidos, definiu-se uma produção de 2 kg de vapor ao longo do período de operação, que, ao ser condensado, resulta na água dessalinizada do sistema. Esse volume atende à quantidade mínima necessária para a hidratação diária de uma pessoa, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo Ministério da Saúde e pela Organização das Nações Unidas (ONU).

REFERÊNCIAS

- ABDELMAKSOU, W. A. Enhancing water productivity of solar still using thermal energy storage material and flat plate solar collector. **Applied Water Science**, v. 15, n. 2, p. 1-12, 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf> Acesso em: 18 de Agosto de 2024.
- ALMEIDA, G. et al. Protótipo de pequena escala de dessalinização térmica de água salgada para o semiárido nordestino brasileiro. **Cadernos UniFOA**, v. 20, n. 55, p. 1-10, 2025.
- ALMEIDA, G. et al. Estudo de viabilidade técnico-econômica de protótipo de dessalinização termossolar para o semiárido nordestino. **Cadernos UniFOA**, v. 19, n. 54, 2024.
- BAHRAMI, M. et al. Comprehensive experimental and theoretical study of a novel still coupled to a solar dish concentrator. **Applied Thermal Engineering**, v. 151, p. 77-89, 2019.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021**. Brasília, 2021.
- CIOCCOLANTI, L.; RENZI, M. Coupling a small-scale concentrated solar power plant with a single effect thermal desalination system: Analysis of the performance. **Applied Thermal Engineering**, v. 143, p. 1046-1056, 2018.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, Brasil, 2005.
- CUNHA, D. P. S.; PONTES, K. V. Desalination plant integrated with solar thermal energy: a case study for the Brazilian semi-arid. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022.
- GORJIAN, S. et al. Performance evaluation and economics of a locally-made stand-alone hybrid photovoltaic-thermal brackish water reverse osmosis unit. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 100078, 2021.

HOSSEINI, A. et al. Development and performance evaluation of an active solar distillation system integrated with a vacuum-type heat exchanger. **Desalination**, v. 435, p. 45-59, 2018.

HUANG, J. et al. Key pathways for efficient solar thermal desalination. **Energy Conversion and Management**, v. 299, p. 117806, 2024.

KERFAH, R. et al. Increasing solar still efficiency with thermo-electric cooling: an experimental study and economic analysis. **International Journal of Ambient Energy**, v. 46, n. 1, p. 2447552, 2025.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, p. 46. 2012.

MÜLLER-HOLST, H.; et al. Simulação de dessalinização térmica de água do mar em pequena escala e otimização do projeto do sistema. **Desalination**, v. 122, n. 2-3, p. 255-262, 1999.

NAZARI, S. et al. Techno-economic estimation of a non-cover box solar still with thermoelectric and antiseptic nanofluid using machine learning models. **Applied Thermal Engineering**, v. 212, p. 118584, 2022.

ONU - Organização das Nações Unidas. **O Direito Humano à Água e Saneamento**. Disponível em:
<https://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_por.pdf > Acesso em: 22 de Agosto de 2024.

RANJAN, K. R.; KAUSHIK, S. C. Economic feasibility evaluation of solar distillation systems based on the equivalent cost of environmental degradation and high-grade energy savings. *Int. J. Low-Carbon Technol.* Ctt048 11 (1), 8–15, 2013

SCHWARZER, K. et al. A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. **Desalination**, v. 248, n. 1-3, p. 204-211, 2009.

SHARON, H.; REDDY, K. S. Performance investigation and enviro-economic analysis of active vertical solar distillation units. **Energy**, 84, 794–807, 2015

SHOEIBI, S. et al. A comprehensive review of Enviro-Exergo-economic analysis of solar stills. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111404, 2021.

SILVA, M. E. V. et al. Experimental study of tray materials in a thermal desalination tower with controlled heat source. **Desalination**, v. 374, p. 38-46, 2015.

SILVA, M. E. V. et al. Mass transfer correlation for evaporation–condensation thermal process in the range of 70° C–95° C. **Renewable energy**, v. 53, p. 174-179, 2013.

SILVEIRA, A. P. P. et al. **Dessalinização de águas**. Oficina de Textos, 2015.

SINGH, A. P. et al. Modelling and analysis of photovoltaic-thermal-thermoelectric-cooler air collector integrated mixed-mode greenhouse dryer with heat storage material. **Journal of Energy Storage**, v. 95, p. 112369, 2024.

USBR. Desalting Handbook for Planners. 3 rd Edition. **Desalination and Water Purification Research and Development Report #72**. Denver, CO: United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Water Treatment Engineering and Research Group. 2003. Disponível em: <<http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/report072.pdf>.> Acesso em: 15 de Agosto de 2024.