

Artigos

Construção do protótipo de um dessalinizador solar e avaliação da sua eficiência na remoção da salinidade de águas do Território do Sertão Produtivo–BA

Construction of a prototype of a solar desalination plant and evaluation of its efficiency in removing salinity from waters in the Sertão Produtivo Territory–BA

Ivanilson Vieira Souza Junior¹; Gustavo Pimentel Badaró¹; Calliane Lima Nunes¹; Ana Karoline Oliveira Pereira¹; Igor Rodrigues Fernandes Das Neves¹; Giovanna Dias Oliveira Laranjeira¹

¹ Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Baiano - Campus Guanambi, BA.

✉ ivanilson.junior@ifbaiano.edu.br, gustavopimentel.badaro@gmail.com, callianen@gmail.com, anakarolineo832@gmail.com, igorrodrigues20241@gmail.com, giolaranjeira15@gmail.com

Palavras-chave:

Dessalinização solar;
Potabilidade da água;
Salinidade.

Keywords:

Solar desalination;
Water potability;
Salinity.

Revisão por pares.
Recebido em: 25/06/2024.
Aprovado em: 14/11/2024.

Resumo

As águas consumidas em localidades do Território do Sertão Produtivo–BA apresentam características físico-químicas que evidenciam um elevado teor de salinidade. O processo de dessalinização solar destaca-se por seu caráter sustentável, utilização de fonte de energia limpa, baixo custo e aplicabilidade no fornecimento de água potável, especialmente em pequenas comunidades, apesar de sua baixa produção diária. Este estudo propôs a construção de um protótipo de dessalinizador solar para remoção de íons que conferem salinidade a essas águas. Baseado em estudos anteriores, com as devidas adaptações, o protótipo foi elaborado utilizando: caixa de isopor, bandeja de zinco com óxido de alumínio, lona preta, tubos e conexões, cobertura de vidro transparente, garrafa âmbar e mangueira flexível. Os parâmetros físico-químicos cloreto, condutividade elétrica, dureza, potencial hidrogeniônico (pH) e sólidos dissolvidos totais foram determinados quantitativamente por métodos analíticos clássicos. As análises foram realizadas antes e após o processo de dessalinização para comparação posterior. Houve reduções superiores a 95% nos teores dos parâmetros avaliados após a dessalinização solar. A eficiência do protótipo foi avaliada estatisticamente, e comprovou que a remoção da salinidade foi significativa. Os teores das variáveis estudadas foram correlacionados com o padrão de potabilidade da água estabelecido pela legislação. A produção média diária foi de $2,00 \pm 0,08 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, com o tempo de dessalinização ocorrendo do nascente ao poente.

Abstract

The water consumed in locations within the Sertão Produtivo Territory–BA exhibits physicochemical characteristics indicating a high salinity level. The solar desalination process stands out for its sustainable nature, utilization of clean energy, low cost, and applicability in providing drinking water, especially in small communities, despite its low daily production. This study proposed the construction of a solar desalination prototype aimed at removing ions that contribute to the salinity of this water. Based on previous studies and with necessary adaptations, the prototype was constructed using an insulated box, a zinc tray with aluminum oxide, black tarp, pipes and fittings, a transparent glass cover, an amber bottle, and flexible tubing. The physicochemical parameters—chlorides, electrical conductivity, hardness, hydrogen ion potential (pH), and total dissolved solids—were quantitatively determined using classical analytical methods. Analyses were conducted before and after the desalination process for subsequent comparison. There were reductions exceeding 95% in the levels of the evaluated parameters after solar desalination. The prototype's efficiency was statistically evaluated, confirming that the removal of salinity was significant. The levels of the studied variables were correlated with the water potability standards established by legislation. The average daily production was $2,00 \pm 0,08 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, with the desalination process occurring from sunrise to sunset.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30282>

1. INTRODUÇÃO

O controle de qualidade da água destinada ao consumo humano é fundamental para a manutenção dos padrões de potabilidade. O consumo de água tratada em algumas localidades do Território Sertão Produtivo–BA tem gerado

questionamentos acerca de sua qualidade. Alguns a definem como “salobra”, “pesada” e “dura”. Nesse contexto, surge a necessidade de avaliar os parâmetros de qualidade que as tornam salinas. Estando esses índices fora dos padrões de potabilidade preconizados pela legislação, fica evidente a demanda por tecnologias, métodos e processos que viabilizem a redução de íons que conferem salinidade a essas

águas.

As tecnologias de tratamento de água desempenham um papel crucial no desenvolvimento e aplicação de métodos e técnicas que transformam as águas brutas (*in natura*) em potáveis. Existem diversas etapas que caracterizam o tratamento, compostas por processos físicos, químicos e biológicos (Di Bernardo, 2017; Libânio, 2008). Em alguns casos, ocorre a combinação de processos em uma mesma fase ou etapa, promovendo a remoção de resíduos e contaminantes de diversas naturezas (Von Sperling, 2018). A escolha da tecnologia a ser adotada depende de inúmeros fatores, sobretudo das características da água a ser tratada e da viabilidade econômica (Di Bernardo, 2017; Von Sperling, 2018).

A dessalinização solar é um processo de purificação da água por via física, no qual ocorre a evaporação da água salina para separação do sal e, posteriormente, condensação do vapor, sendo o calor proveniente da luz solar a principal fonte de energia propulsora da destilação (Fang; Mu; Tu, 2021; Abu El-Maaty *et al.*, 2023). Ela é empregada em várias partes do mundo, principalmente em regiões com escassez de recursos hídricos, mas que apresentam elevado índice de radiação solar (Zhang *et al.*, 2021; Kanchana *et al.*, 2023). Caracteriza-se pela utilização de uma fonte de energia limpa, de baixo custo; e aplicabilidade no fornecimento de água potável para ingestão, sobretudo em pequenas comunidades (Marinho *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2021; Dawoud *et al.*, 2024). Além disso, as condições climáticas naturais do Sertão Produtivo, com baixo índice pluviométrico ao longo do ano (máxima 1.243 mm e mínima 356 mm) e altas temperaturas em boa parte dos meses (máxima de 45,0 °C e mínima de 16,1 °C), (BAHIA, 2010; Lima *et al.*, 2020) viabilizam a utilização da luz solar como fonte natural de evaporação da água. No entanto, a principal desvantagem é a produção de baixas vazões diárias, tornando seu uso mais viável para ingestão (Mariano, 2019).

Estudos, apresentados a seguir, propõem a construção de dessalinizadores com diferentes configurações e adaptações, mantendo o mesmo princípio de funcionamento. Isto é, disposição da água salgada ou salobra em uma bandeja de base retangular, parte superior com dupla inclinação e calhas laterais para o recolhimento da água condensada. Com o sistema montado, a água é submetida a processos físicos de evaporação/condensação por meio da destilação solar (Buros *et al.*, 1980; Cardoso *et al.*, 2020).

Buros *et al.* (1980) desenvolveram um dessalinizador que funciona de acordo com essa ideia e serve de referência para diversos autores. Bezerra *et al.* (2019) propôs um protótipo de

um dessalinizador solar artesanal híbrido de água salobra para o tratamento de águas no semiárido nordestino, utilizando materiais alternativos como isopor e embalagens de leite industrial, que possuem película de alumínio e fechamento térmico, contribuindo para a retenção do calor, aumento da temperatura interna e, conseqüentemente, maior eficiência do processo de obtenção do destilado, além de uma cobertura de vidro com película fumê. De Brito *et al.* (2020) propuseram um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para obtenção de água potável no semiárido paraibano. Ele é composto por uma bandeja de alumínio com 1,50 m de comprimento, 0,20 m de largura e 0,10 m de altura, com uma superfície útil de 0,30 m² para dessalinização, pintada de preto fosco para absorção da radiação solar, com placas de vidro de 3 mm de espessura na parte superior com inclinações e calhas nas laterais internas para receber as águas condensadas, que escoam e são direcionadas para uma proveta que serve como coletor externo das águas destiladas. Além disso, foi montado um sistema de isolamento com poliestireno expandido na base do dessalinizador e nas laterais externas, visando evitar perdas de calor para o ambiente.

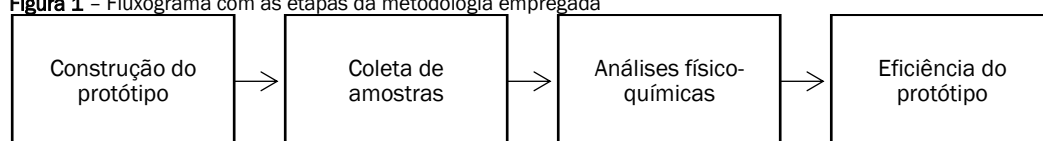
Aboufotouh *et al.* (2023) obtiveram uma eficiência de remoção de 99,5% e 99,9% para sólidos totais dissolvidos (STD) e cloreto, respectivamente, ao realizarem a dessalinização solar de água do mar, visando a produção de água potável para comunidades rurais. Eles comprovaram que o destilador solar, além de apresentar baixos custos operacionais e de manutenção, e não exigir mão de obra especializada, tem um custo significativamente inferior ao da água comercializada, com um valor de 0,08142 dólares por litro. Segundo os autores, esse sistema permite o desenvolvimento de uma unidade simples que, geralmente, não requer etapas preliminares ou pós-tratamento, tornando-se uma solução viável e acessível para o fornecimento de água potável em regiões de recursos limitados e condições climáticas favoráveis.

O presente estudo propôs a construção do protótipo de um dessalinizador solar, com o objetivo de avaliar sua eficiência na redução de íons que conferem salinidade às águas naturais de mananciais superficiais e subterrâneos inseridos no Território do Sertão Produtivo-BA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido baseado nos princípios metodológicos da pesquisa experimental, com abordagem quantitativa, conforme figura 1 e detalhes descritos nos subtópicos a seguir.

Figura 1 – Fluxograma com as etapas da metodologia empregada

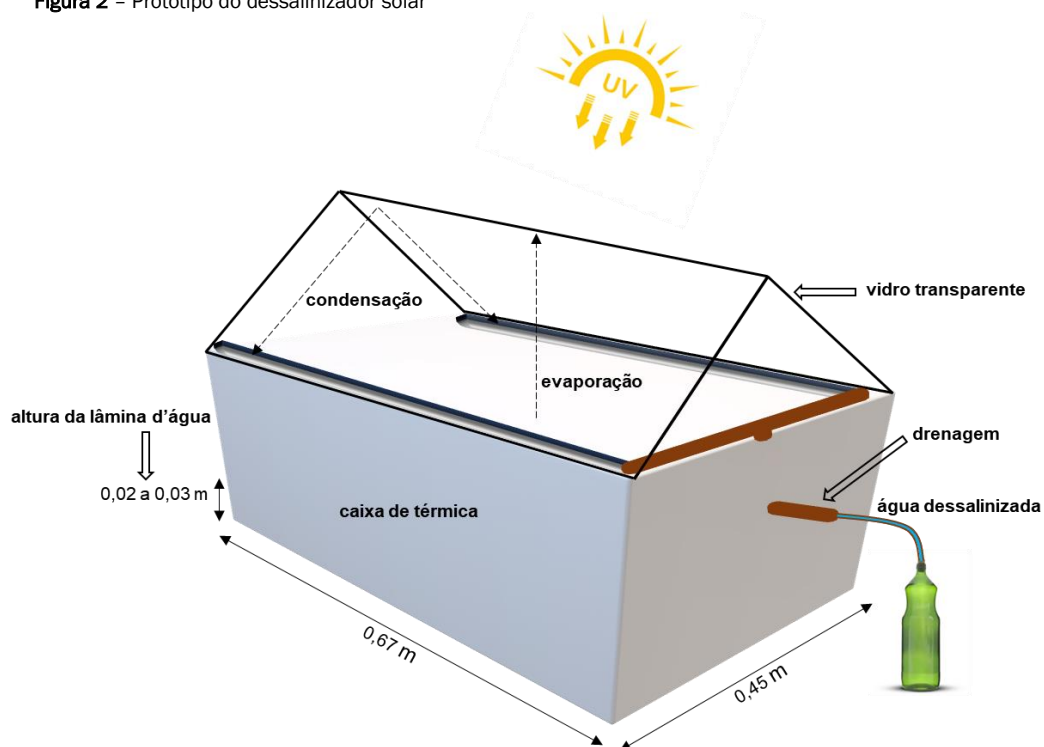


2.1 Construção do protótipo do dessalinizador solar

O protótipo do dessalinizador solar (figura 2) foi construído com base nos modelos propostos por Buros *et al.* (1980), no modelo artesanal híbrido de Bezerra *et al.* (2019) e nas adaptações feitas por Brito *et al.* (2020). Uma caixa térmica de isopor de 100 litros, com dimensões de aproximadamente 67 cm de comprimento, 45 cm de largura e 30 cm de altura, foi utilizada como base para a estrutura do dessalinizador. A caixa foi cortada em formato de casa, permitindo uma configuração com duas bandas simétricas com inclinação de aproximadamente 17°. Na parte interna, foi instalada uma bandeja pré-moldada de zinco com óxido de alumínio, medindo aproximadamente 66 cm de comprimento, 44 cm de largura e 10 cm de altura, que serve como reservatório interno para a água a ser dessalinizada. Sob essa bandeja, foi adicionada uma lona preta para aumentar a absorção da

radiação solar incidente, aumentando assim a eficiência do processo. Na parte frontal superior, foram instaladas calhas de PVC para coletar a água destilada oriunda do sistema de drenagem lateral das calhas de vidro conectada à própria cobertura. Elas foram projetadas com inclinação de 5% em direção ao fluxo de escoamento. A caixa de isopor foi coberta com uma placa de vidro de 3 mm de espessura, permitindo a entrada de radiação solar entre 06h00 e 18h00. Externamente, uma garrafa de âmbar de 1,5 litros foi utilizada como reservatório de coleta da água dessalinizada, conectada ao sistema por uma mangueira flexível. As placas de vidro inclinadas a aproximadamente 17° foram projetadas para serem removíveis, facilitando a limpeza interna e a retirada de resíduos de sais formados durante o processo de destilação. A altura da lâmina d'água foi mantida em aproximadamente 2 cm, conforme estudos anteriores que indicam maior eficiência de produção nessa faixa.

Figura 2 – Protótipo do dessalinizador solar



Fonte: autoria própria (2024).

2.2 Coleta de amostras

As amostras de água foram coletadas em localidades do território do Sertão Produtivo, na Bahia. Os pontos de coleta foram a barragem de Ceraíma (Distrito de Guanambi) e os poços artesianos pertencentes a pequenas comunidades dos municípios baianos: Candiba, Iuiú, Palmas de Monte Alto e Pindaí. A coleta de amostras para realização dos ensaios laboratoriais foi efetuada em frascos plásticos inertes previamente higienizados, sendo acondicionadas em caixa de isopor com gelo até a chegada no laboratório, seguida pela refrigeração a 4 °C até a realização das análises. As águas a serem dessalinizadas foram armazenadas em garrafas plásticas inertes de 20 litros. Em até 24 horas após a coleta

elas foram submetidas a um processo semanal de dessalinização solar. As frações de amostras de água dessalinizadas foram armazenadas em frascos de plástico inerte previamente higienizados e direcionados para análise das variáveis de estudo.

2.3 Análises físico-químicas

Foi realizada análise quantitativa, antes e após a dessalinização solar, dos parâmetros físico-químicos: cloreto, condutividade elétrica, dureza total, pH e sólidos dissolvidos totais. Os ensaios laboratoriais foram realizados com base nos *Standard Methods for the Examination of Water and*

Wastewater da APHA (American Public Health Association). A concentração de cloreto e a dureza total foram determinadas por volumetria de precipitação e complexação, respectivamente. A condutividade elétrica, teor de sólidos

dissolvidos totais e salinidade foram quantificados por condutimetria; e o pH por potenciometria. A sistematização dessas informações e os equipamentos utilizados são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros físico-químicos analisados e métodos analíticos

Parâmetro	Método analítico	Equipamento/Instrumento
Condutividade elétrica	Condutimetria	Condutivímetro (precisão $\pm 0,50$)
Sólidos dissolvidos totais	Condutimetria	Condutivímetro (precisão $\pm 0,50$)
Dureza total	Titulometria - EDTA	Instrumental
Salinidade	Condutimetria	Condutivímetro (precisão $\pm 0,50$)
Cloreto	Titulometria - Mohr	Instrumental
pH	Potenciometria	pH-metro (precisão $\pm 0,01$)

EDTA: ethylenediaminetetraacetic acid (titulante empregado em volumetria de complexação)

Método de Mohr: volumetria de precipitação que usa o AgNO_3 como titulante e o K_2CrO_4 como indicador

2.4 Avaliação da eficiência do protótipo do dessalinizador solar

A eficiência do protótipo foi avaliada a partir do volume médio produzido, em litros, por metro quadrado por dia ($\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), e do índice de remoção das variáveis de estudo que conferem salinidade à água. Os parâmetros físico-químicos, dureza total e cloreto foram determinados antes e após a dessalinização solar, por meio de ensaios realizados em triplicata e obtidos a partir de médias aritméticas, considerando um intervalo de confiança de 95%. A condutividade elétrica, pH, salinidade e sólidos dissolvidos totais foram quantificados por leitura direta, após calibração prévia dos equipamentos mencionados na seção anterior.

O tratamento dos dados e a análise dos resultados foram realizados utilizando estatística descritiva, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, o teste não paramétrico de Wilcoxon para grupos pareados e gráficos de *Box plot*. Para essas análises, empregou-se o *software* Jamovi (versão 2.5.6) (*The Jamovi Project*, 2023). A redução percentual dos parâmetros físico-químicos foi calculada, e os dados foram examinados tanto em termos percentuais quanto com testes estatísticos. Por fim, os resultados foram comparados com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS n.º 888 de 2021 e discutidos a partir de estudos similares e das recomendações da OMS para dessalinização da água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Protótipo do Dessalinizador solar construído

O protótipo do dessalinizador mostrou boa versatilidade na sua utilização, evidenciado pela facilidade de montagem e desmontagem, o que proporcionou a inserção e retiradas das amostras de água, bem como a realização de limpezas periódicas, para remoção de resíduos e sais oriundos do processo de dessalinização.

As amostras foram dessalinizadas de novembro de 2023 a março de 2024. O volume médio diário produzido foi de 579 ± 21 ml. Considerando a área de dessalinização solar obtida pelas medidas da bandeja interna de zinco com óxido de

alumínio, a produção para esse protótipo pode ser expressa por:

$$\text{Produção média diária} = 0,579 \text{ L} / (0,66 \text{ m} \times 0,44 \text{ m}) = 2,00 \pm 0,080 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$$

A produção de $2,00 \pm 0,08 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ foi relativamente próxima a de alguns estudos e distante de outros. De Brito *et al.* (2020) obtiveram em média $1,5833 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ de água potável. Silva *et al.* (2020) propuseram um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados, e obtiveram produção máxima de água potável de $2,7308 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$. Da Silva *et al.* (2023) produziram uma média de $2,3290 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ para um destilador solar de dupla inclinação e $2,5080 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ para um destilador solar piramidal. Uma revisão de literatura proposta por Conserva *et al.* (2023) traz alguns tipos de dessalinizadores e suas respectivas produções diárias. Variações na elaboração do protótipo podem aumentar a eficiência no que concerne ao volume diário (Conserva *et al.*, 2023).

A utilização da bandeja de zinco com óxido de alumínio foi proposta pelo presente estudo e se mostrou bastante eficiente, possibilitando o armazenamento robusto e eficaz das águas salinas, além de proporcionar a absorção e transferência de calor para o meio aquático. Além disso, seu material é resistente à oxidação, o que evita a degradação do material e a contaminação do sistema. A lona preta proporcionou maior eficiência na absorção da radiação solar, o que melhora o rendimento do processo.

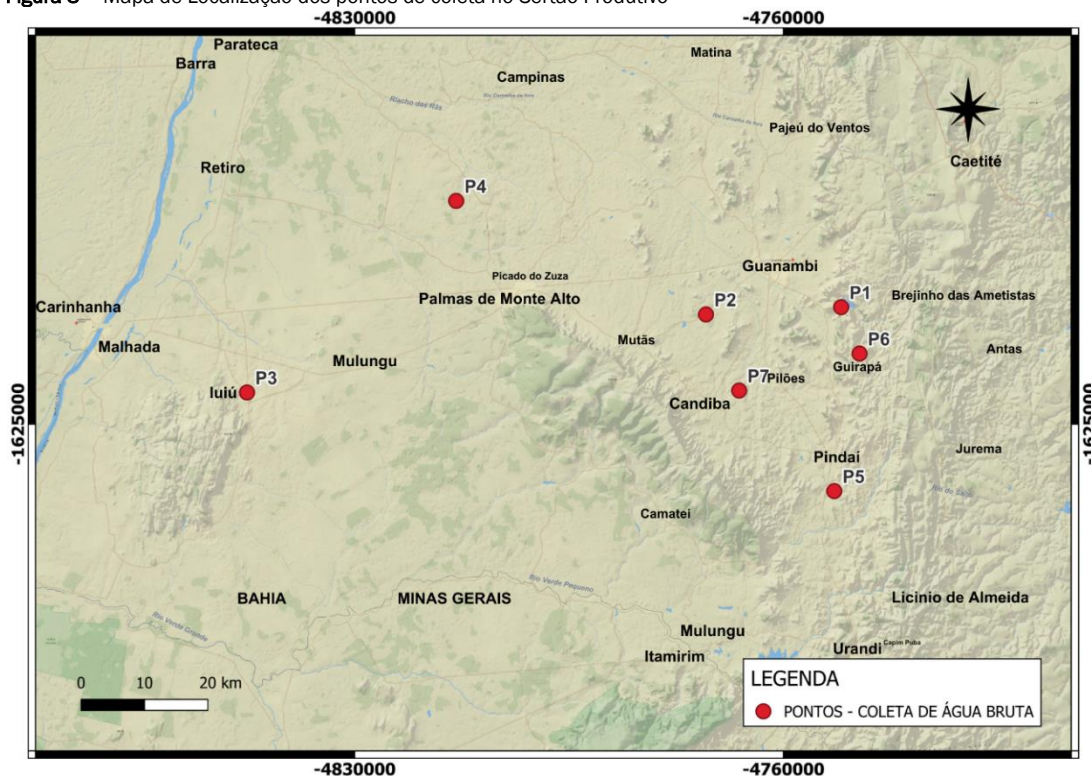
3.2 Avaliação da eficiência do protótipo do dessalinizador solar

O quadro 2 e a figura 3 apresentam as localidades do Território do Sertão Produtivo-BA, onde foram coletadas as amostras de água para avaliação da eficiência do protótipo do dessalinizador solar. A escolha dos pontos de coleta foi estratégica, abrangendo uma diversidade de fontes hídricas da região, incluindo uma barragem e poços artesianos em zonas ruais. Esta abordagem permitiu uma avaliação abrangente da eficácia do protótipo do dessalinizador solar em diferentes condições de salinidade da água.

Quadro 2 – Localidades do Sertão Produtivo referentes aos pontos de coleta

Pontos de coleta	Localidades	Coordenadas geográficas
P1	Barragem de Ceraíma (Distrito de Guanambi)	14° 16'34.2"S 42° 40'30.7"W
P2	Poço artesiano em zona rural de Guanambi	14° 17'11.4"S 42° 52'24.4"W
P3	Poço artesiano em zona rural de Luiú	14° 23'50.2"S 43° 32'48.1"W
P4	Poço artesiano em zona rural de Palmas de Monte Alto	14° 07'30.4"S 43° 14'23.7"W
P5	Poço artesiano em zona rural de Pindai	14° 32'14.3"S 42° 41'07.1"W
P6	Poço artesiano em Guirapá (Distrito de Pindai)	14° 20'31.4"S 42° 38'53.5"W
P7	Poço artesiano em zona rural de Candiba	14° 23'40.3"S 42° 49'29.2"W

Figura 3 – Mapa de Localização dos pontos de coleta no Sertão Produtivo



Fonte: autoria própria (2024).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de qualidade da água antes e após o processo de dessalinização solar para diferentes pontos de coleta no Território do Sertão Produtivo,

Bahia. Os parâmetros analisados incluem condutividade elétrica (C.E.), sólidos dissolvidos totais (SDT), salinidade, dureza total, cloreto e pH.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade da água antes e após a dessalinização solar

Pontos de coleta	C.E. ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	SDT ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Salinidade (%)	Dureza total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$)	Cloreto ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
P1	295,80	150,00	0,01	107,04	63,81	7,35
P1.1	7,70	3,75	0,00	4,56	3,15	6,88
P2	3260,00	1676,00	0,18	1948,70	978,42	6,68
P2.1	7,90	4,12	0,00	3,01	3,59	6,81
P3	960,10	482,90	0,06	250,10	106,35	7,60
P3.1	7,41	3,56	0,00	5,00	3,89	6,71
P4	1717,00	752,80	0,10	694,28	418,31	7,58
P4.1	6,25	3,48	0,00	3,00	4,43	5,54
P5	755,60	320,20	0,05	308,12	141,80	7,78
P5.1	6,66	3,47	0,00	8,00	4,97	5,58
P6	888,40	377,30	0,05	374,15	134,71	7,84
P6.1	9,18	5,56	0,00	8,00	4,19	6,45
P7	765,40	325,20	0,04	346,14	127,62	6,96
P7.1	7,21	3,41	0,00	2,96	3,71	6,65
VMP	-	500	-	300	250	-

P1: água bruta; P1.1: água dessalinizada (segue a mesma ideia para os demais pontos de coleta); C.E: condutividade elétrica; SDT: sólidos dissolvidos totais; pH: potencial hidrogeniônico; VMP: valor máximo permitido pela Portaria GM/MS n.º 888 de 2021; -: valor máximo permitido inexistente.

Conforme a tabela 1, as águas brutas dos pontos P1, P5, P6 e P7 apresentaram salinidade até 0,05%, sendo classificadas, de acordo à resolução CONAMA n.º 357/2005, como águas doces. Os pontos P2, P3 e P4 apresentaram salinidade superior a esse valor, sendo classificados como salobras. (Brasil, 2005).

Ao comparar os parâmetros físico-químicos avaliados para águas brutas, e os valores máximos permitidos, observou-se que apenas os pontos P1 e P3 apresentaram conformidade com a Portaria GM/MS n.º 888 de 2021, mesmo sem

tratamento. Nos demais pontos, foi constatado pelo menos um parâmetro fora dos padrões de potabilidade.

Em contrapartida, as águas brutas subterrâneas doces ou salobras inerentes aos pontos de coleta com valores elevados para cloreto e sólidos dissolvidos totais podem ser empregadas, de acordo à resolução CONAMA n.º 396/2008, para fins de dessedentação de animais, irrigação e recreação (quadro 3). O anexo I dessa resolução apresenta diversos parâmetros que relacionam os valores máximos permitidos e os usos preponderantes de águas subterrâneas. (Brasil, 2008).

Quadro 3 – Usos preponderantes das águas brutas subterrâneas dos pontos de coleta

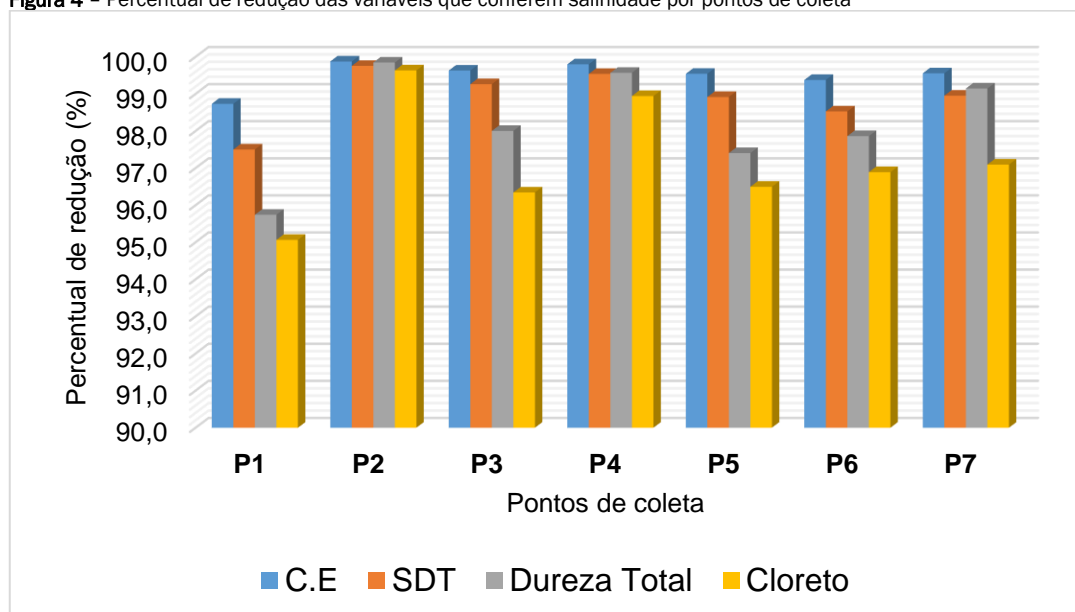
Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano	Dessedentação de animais	Irrigação	Recreação
Valor Máximo Permitido (VMP) com ou sem tratamento				
Cloreto (mg.L ⁻¹)	250	250	100 a 700	400
SDT (mg.L ⁻¹)	1000	1000	1000	1000
Pontos de coleta e usos da Água				
Cloreto	P3, P5, P6 e P7	P3, P5, P6 e P7	P3, P4, P5, P6 e P7	P3, P5, P6 e P7
SDT	P3, P4, P5, P6 e P7	P3, P4, P5, P6 e P7	P3, P4, P5, P6 e P7	P3, P4, P5, P6 e P7

Fonte: Adaptado de resolução CONAMA n.º 396/2008

É importante ressaltar que o P1 se refere a um manancial superficial, não sendo classificado pela Resolução CONAMA n.º 396/2008, mas pela Portaria GM/MS n.º 888 de 2021. O P2 foi o único manancial que não se enquadrou nas categorias de usos preponderantes, considerando os parâmetros de cloreto e sólidos dissolvidos totais (SDT) para água bruta (AB). Os teores desses parâmetros ultrapassaram os Valores Máximos Permitidos (VMP), o que torna necessário o tratamento da água. As variáveis C.E, salinidade, dureza total

e pH não estão expressas nessa resolução (BRASIL, 2008). A eficiência do processo foi inicialmente constatada mediante cálculo dos percentuais de reduções dos teores dos parâmetros físico-químicos que conferem salinidade as águas, ao submeter as amostras a dessalinização solar. O gráfico de barras (figura 4) mostra que houve reduções superiores a 95,0% nas concentrações de C.E, SDT, dureza total e cloreto.

Figura 4 – Percentual de redução das variáveis que conferem salinidade por pontos de coleta



Para confirmar a hipótese em relação à eficiência do protótipo do dessalinizador solar, as variáveis de estudo, que conferem

salinidade, foram submetidas a testes estatísticos que viabilizassem a comparação do antes (água bruta) e depois

(água dessalinizada). A tabela 2 apresenta o resultado da avaliação da normalidade dos dados, utilizando o teste estatístico de Shapiro-Wilk. As variáveis C.E, SDT, dureza total e cloreto apresentaram valor de $p < 0,05$, indicando que as amostras de água bruta não tinham distribuição normal,

sendo analisadas estatisticamente por métodos não paramétricos (teste de Wilcoxon e *Box plot*). A salinidade e o pH apresentaram valor de $p > 0,05$, indicando que esses dados tinham normalidade, sendo tratadas a partir da média e desvio padrão.

Tabela 2 – Teste estatístico de normalidade de Shapiro-Wilk para as amostras de água bruta

	C.E	SDT	Salinidade	Dureza total	Cloreto	pH
W de Shapiro-Wilk	0,800	0,763	0,856	0,698	0,686	0,901
p Shapiro-Wilk	0,041	0,017	0,140	0,004	0,003	0,335

W: Estatística do teste de Shapiro-Wilk que avalia a normalidade dos dados

p : Valor-p associado ao teste que avalia a probabilidade de os dados apresentarem normalidade

Os grupos amostrais foram avaliados de maneira pareada, em que as águas brutas foram analisadas antes da dessalinização solar e após a dessalinização solar, sendo denominadas AD (água dessalinizada). As concentrações de cada parâmetro avaliado nos 7 pontos de coleta (P1 a P7), correspondem à média aritmética das análises em triplicata de uma amostra por ponto de coleta, totalizando 7 amostras. Os critérios de presença de variáveis quantitativas não ordinais contínuas, não normalidade/normalidade dos dados, necessidade de comparação entre dois grupos pareados

(água bruta/água dessalinizada) e quantidade amostral foram determinantes para escolha dos testes estatísticos.

A tabela 3 mostra o resultado da estatística descritiva das variáveis sem distribuição normal dos dados, os quais foram avaliados a partir da mediana e quartis, através do teste não paramétrico de Wilcoxon e visualização do *Box plot*. A tabela 4 apresenta o resultado da estatística descritiva das variáveis com distribuição normal, tratados a partir da média e desvio padrão.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos parâmetros sem distribuição normal

	C.E	C.E*	SDT	SDT*	Dureza total	Dureza total*	Cloreto	Cloreto *
Mediana	888	7,41	377	3,56	346	4,56	135	3,89
Mínimo	296	6,25	150	3,41	107	2,96	63,8	3,15
Máximo	3260	9,18	1676	5,56	1949	8,00	978	4,97
25° percentil	761	6,94	323	3,48	279	3,00	117	3,65
50° percentil	888	7,41	377	3,56	346	4,56	135	3,89
75° percentil	1339	7,80	618	3,94	534	6,50	280	4,31

*AD: água dessalinizada; as unidades de medidas dos parâmetros são as mesmas da tabela 1

Tabela 4 – Estatística descritiva dos parâmetros com distribuição normal

	Salinidade	Salinidade*	pH	pH*
Média	0,0700	0,00	7,40	6,37
Desvio-padrão	0,0554	0,00	0,433	0,573
Mínimo	0,0100	0,00	6,68	5,54
Máximo	0,180	0,00	7,84	6,88

*AD: água dessalinizada; as unidades de medidas dos parâmetros são as mesmas da tabela 1

Com base nos valores de média e desvio padrão, foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) para salinidade e pH antes e após a dessalinização solar das águas. A salinidade apresentou CV de 79,14% para AB e não apresentou desvio padrão quantificável para AD, evidenciando a eficiência do processo. O pH apresentou CV de 5,85% para AB e CV 8,99% para AD. O aumento da acidez na AD pode estar associado à reação dos destilados com o dióxido de carbono atmosférico,

uma vez que o CO₂ é um óxido ácido que reage com água e forma ácido carbônico (Atkins; Jones, 2006; Von Sperling, 2018). Todavia, não foram realizadas análises de acidez e alcalinidade, as quais poderiam fornecer subsídios para estabelecer discussões baseadas em aspectos quantitativos. O potencial hidrogeniônico da AD, contudo, não comprometeu a sua potabilidade, já que todas as amostras apresentaram consonância com a Portaria GM/MS n.º 888 de

2021, a qual não estabelece valor específico de pH.

O teste de Wilcoxon foi realizado com duas variáveis dependentes, uma com valor de p mais próximo da normalidade (C.E, $p < 0,041$) e outra com valor de p mais distante da normalidade (cloreto, $p < 0,003$). Essa escolha ocorreu para evitar testes múltiplos, o que poderia aumentar

a probabilidade de obtenção do erro tipo I (falso positivo). Esse intervalo escolhido permitiu inferir que os parâmetros SDT e dureza total, por apresentarem valor de p nessa faixa, seguem a mesma tendência. A tabela 5 apresenta o resultado desse teste estatístico (com valor de $p < 0,05$) que evidencia a eficiência do processo para redução dos íons que conferem salinidade às águas, sendo estatisticamente significativa.

Tabela 5 – Teste estatístico de Wilcoxon para dois grupos pareados

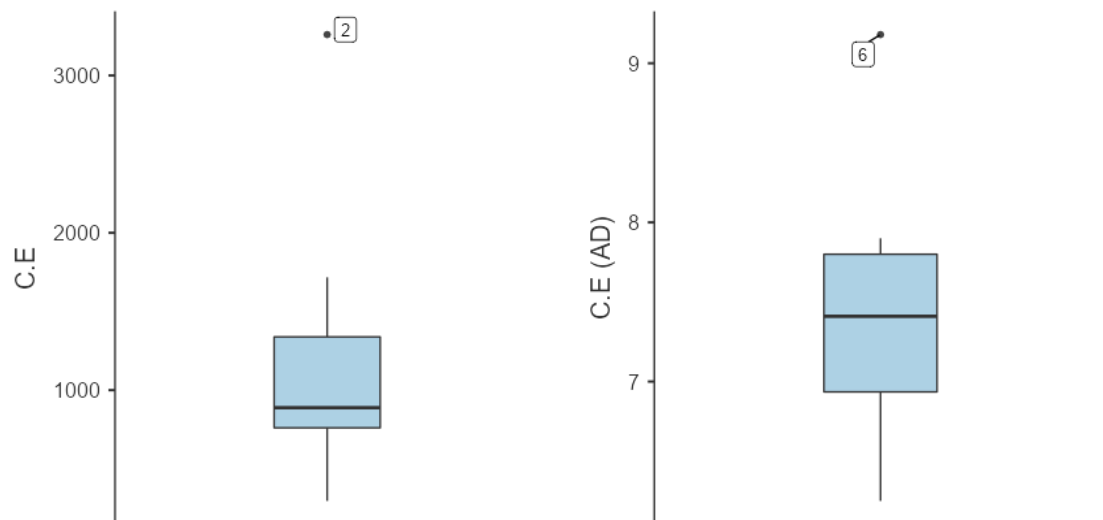
Pareamento			Estatística	p
C.E (AB)	C.E (AD)	W de Wilcoxon	28,0	0,016
Cloreto (AB)	Cloreto (AD)	W de Wilcoxon	28,0	0,016

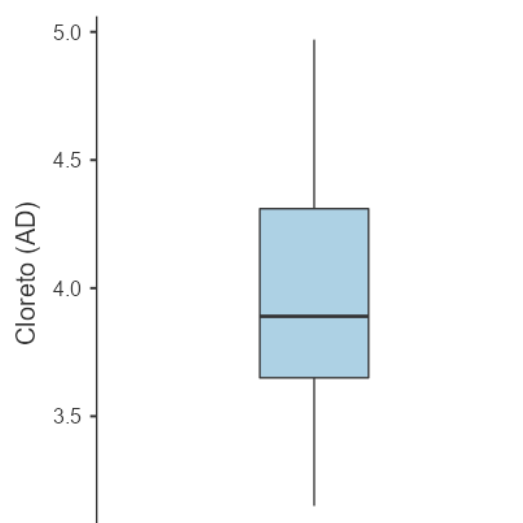
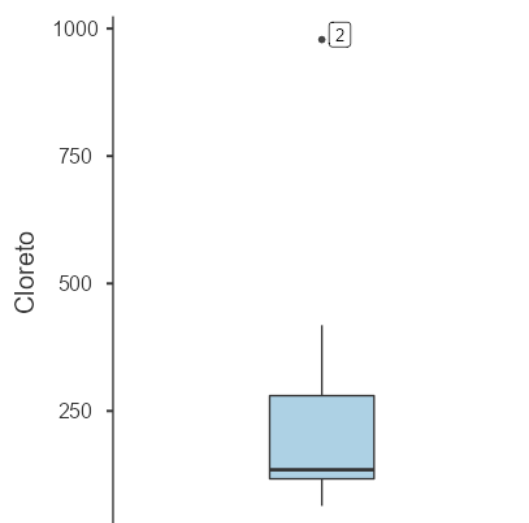
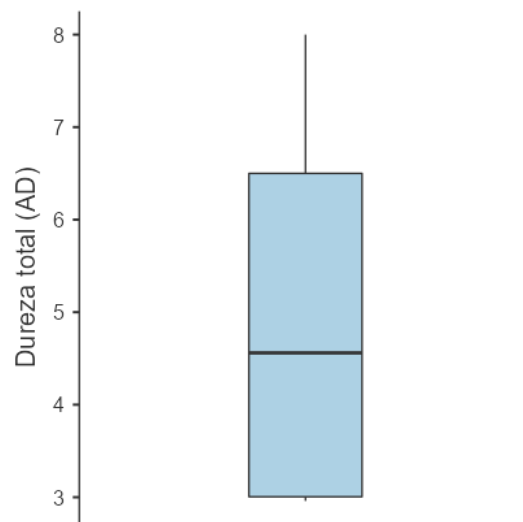
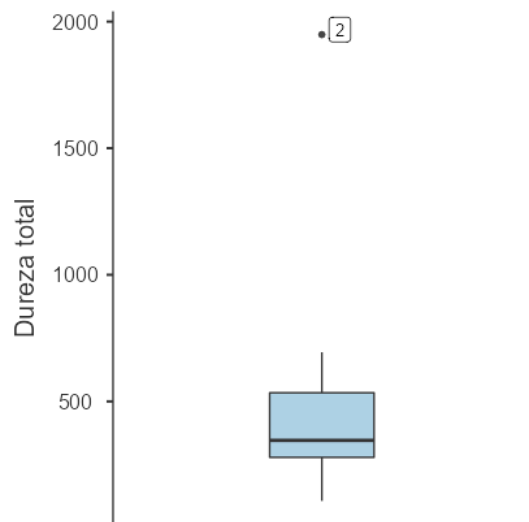
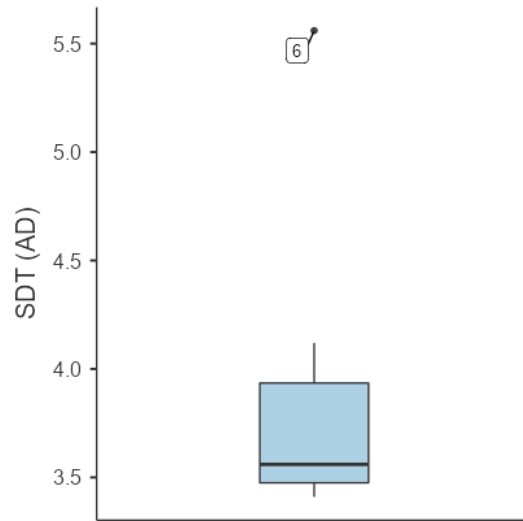
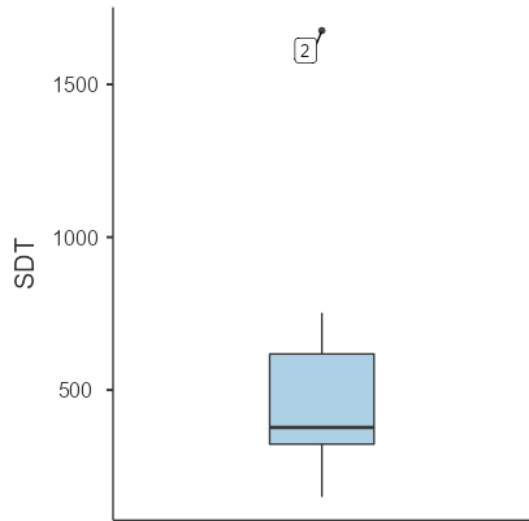
Nota. $H_a \mu$ Medida 1 - Medida 2 $\neq 0$

A tabela 3 e o gráfico *Box plot* (figura 5) evidenciam a heterogeneidade dos dados antes da dessalinização solar das águas, e homogeneidade após o processo. Para a condutividade elétrica (C.E), a mediana elevada e a ampla faixa interquartil caem drasticamente após o processo, indicando uma redução substancial na concentração de íons. O teor de sólidos dissolvidos totais (SDT) segue um padrão

similar, com uma significativa diminuição na mediana e na dispersão, refletindo a remoção eficiente. A dureza total também diminui significativamente, com os valores se aproximando de zero após a dessalinização. Os valores de cloreto apresentam uma notável redução a partir dos dados iniciais, que eram desordenados, com a mediana na parte inferior da caixa, mas que se tornaram mais uniformes.

Figura 5 – Comparação das variáveis antes e após a dessalinização solar





Observa-se a presença de *outliers* (pontos discrepantes na parte superior do gráfico *Box plot*). Eles correspondem ao teor de salinidade encontrado na amostra P2, muito superior aos demais pontos. Isso indica que as variáveis estão interrelacionadas e diminuem drasticamente após a dessalinização. O P6 também apresentou *outliers* nas águas dessalinizadas para variáveis C.E e SDT, no entanto, as faixas interquartis foram consideravelmente menores do que nas águas brutas, confirmando a eficiência do protótipo.

Em um estudo de Kanchana *et al.* (2023), investigou-se a eficácia da tecnologia de dessalinização solar na redução da salinidade das águas subterrâneas na região metropolitana de Chennai, localizada na costa leste de Tamil Nadu, no sul da Índia. A pesquisa envolveu a coleta de oito amostras de água, de diferentes locais ao longo da costa de Chennai. O uso de um dessalinizador solar não apenas demonstrou uma redução significativa nos níveis de salinidade, mas também reforçou o potencial desta tecnologia como uma solução eficaz e sustentável.

Ao comparar os teores das variáveis de estudo com os parâmetros de potabilidade expressos na Portaria GM/MS n.º 888 de 2021 (BRASIL, 2021) constatou-se que todos os parâmetros avaliados estavam no padrão de potabilidade. Algumas variáveis de estudos já correspondiam a legislação, no entanto, apresentaram concentrações próximas ou superiores ao VMP, o que pode ocasionar: problemas renais, hipertensão, desidratação, efeito laxativo, câncer pancreático, incrustações em tubulações, formação insuficiente de espuma, sabor desagradável (Gomes *et al.*, 2018; Von Sperling, 2018; Costa, 2022). O P3 apresenta essas características para sólidos dissolvidos totais e dureza total. As amostras de água *in natura* apresentaram salinidades variadas.

De Brito *et al.* (2020) também obtiveram as amostras no padrão de potabilidade após a dessalinização solar, considerando os parâmetros físico-químicos avaliados. No entanto, evidenciaram a importância dos minerais para a saúde humana, principalmente os íons cálcio e magnésio. Eles mencionaram a adição de sais, quando necessário, às águas dessalinizadas, como alternativa para manter concentrações adequadas (mínimo de 30 mg/L de sais), recomendadas pela Resolução da Diretoria Colegiada – RDC N° 316, de 17 de outubro de 2019, do Ministério da Saúde. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), a água dessalinizada é pobre em minerais, necessitando de um pós-tratamento, onde se adicionam substâncias como carbonatos de cálcio e magnésio, ou adicionam-se pequenos volumes de água mineralizada. Por outro lado, a água dessalinizada fornece uma parcela dos minerais essenciais diários, os quais podem ser complementados através da dieta.

Os resultados obtidos no presente estudo confirmam a viabilidade do uso de dessalinizadores solares em regiões semiáridas como o Sertão Produtivo. A tecnologia é sustentável, de baixo custo e utiliza uma fonte de energia limpa, o que a torna uma solução prática para pequenas comunidades. A produção diária de água, embora pequena, é

suficiente para a ingestão, proporcionando uma alternativa eficaz para a melhoria da qualidade da água em regiões com escassez desse recurso natural e alta salinidade, quando disponíveis (Ghaffour *et al.*, 2015). O aumento da quantidade de dessalinizadores viabiliza uma maior produtividade, tornando possível o atendimento a famílias, sobretudo as que se encontram em vulnerabilidade socioeconômica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo de dessalinizador solar desenvolvido demonstrou ser uma solução eficiente e sustentável para a redução da salinidade da água no Sertão Produtivo, Bahia. A significativa redução nos parâmetros de salinidade e a conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos destacam o potencial dessa tecnologia para fornecer água potável em regiões semiáridas. Nesse território de identidade, é comum o uso de águas com tais características para o consumo humano, considerando a escassez hídrica e o acesso restrito ao tratamento, sobretudo em localidades rurais.

O custo aproximado para a construção do protótipo foi de R\$ 380,00. O volume diário produzido, de $2,00 \pm 0,08$ L·m⁻²·dia, sugere o uso preferencial para ingestão. A utilização simultânea de vários dessalinizadores com área ampliada pode viabilizar a produção de um volume diário condizente com a necessidade de abastecimento. No entanto, seriam necessários estudos com ênfase em mensurar esses aspectos.

Estudos posteriores podem avaliar a eficiência desse processo considerando outras variáveis, como a remoção de microrganismos patogênicos, que pode ser determinada a partir da análise de coliformes termotolerantes, um parâmetro fundamental na avaliação da eficiência do tratamento e atendimento ao padrão de potabilidade. Aspectos climáticos, geológicos, econômicos e sociais tornam a dessalinização solar uma alternativa sustentável e promissora para regiões semiáridas com escassez de água tratada, como no Sertão Produtivo, BA.

REFERÊNCIAS

- ABU EL-MAATY, Ahmed E. *et al.* Innovative approaches to solar desalination: a comprehensive review of recent research. *Energies*, v. 16, n. 9, p. 3957, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16093957>
- ABOULFOTOH, Ahmed *et al.* Optimizing solar distillation to meet water demand for small and rural communities. *Desalination and Water Treatment*, v. 292, p. 10-21, 2023. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29496>
- ATKINS, P. W.; JONES, Loretta. *Princípios de química - questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BAHIA. Secretaria do Planejamento. *Plano Territorial de Desenvolvimento Sustentável – Sertão Produtivo*. Salvador: SEPLAN, 2010. Disponível em: <https://www.seplan.ba.gov.br/wp-content/uploads/PTDS-Territorio-Sertao-Produtivo.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024

- BEZERRA, Vanessa Rosales *et al.* Proposta de um prototipo de dessalinização artesanal solar híbrido de água salobra para o semiárido nordestino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE. *Anais [...]* João Pessoa. 2019.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008*. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n.º 66, Seção 1, p. 64-68, 7 abr. 2008.
- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. Dispõe sobre a qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 maio 2021.
- BUROS, O. K.; *et al.* *The USAID desalination manual*. Washington, D.C, Agency for international development, 1980.
- CARDOSO, Maria Karolina Borba *et al.* Dessalinizador solar do tipo cascata aplicado em poços artesanais no interior da Paraíba. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 135-142, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29799>
- CONSERVA, Vanessa Rosales *et al.* Uma revisão sobre desempenho de dessalinizadores solar no Brasil. *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, v. 15, n. 9, p. 9644-9663, 2023. <https://doi.org/10.55905/cuadv15n9-088>
- COSTA, W. M. da. *Utilização de adsorventes argilominerais visando redução de dureza como alternativa de pré-tratamento ao uso da osmose reversa*. 2022. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/70564/3/2022_tese_wmcosta.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.
- DA SILVA, Karyna Steffane *et al.* Study of solar still in groundwater treatment in Brazilian northeast. *Desalination and water treatment*, v. 293, p. 14-26, 2023. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29550>
- DAWOUD, Mohamed A. *et al.* The Performance and Feasibility of Solar-Powered Desalination for Brackish Groundwater in Egypt. *Sustainability*, v. 16, n. 4, p. 1630, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16041630>
- DE BRITO, Yohanna Jamilla Vilar *et al.* Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 156-165, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29773>
- DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Ângela Di Bernardo & VOLTAN, Paulo E. N. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 3. ed. São Carlos: LDiBe, 2017.
- FANG, Shibiao; MU, Lin; TU, Wenrong. Application design and assessment of a novel small-decentralized solar distillation device based on energy, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic parameters. *Renewable Energy*, v. 164, p. 1350-1363, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.075>
- GHAFFOUR, Noredine *et al.* Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. *Desalination*, v. 356, p. 94-114, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024>
- GOMES, Mirelly Alexandre *et al.* Avaliação Hidroquímica e de Parâmetros Físico-Químicos de Qualidade das Águas Subterrâneas da Zona Urbana do Município de Sousa-PB. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 2, p. 162-172, 2018. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i2.29115>
- KANCHANA, V. *et al.* Investigating underground water salinity in east coastline of Tamil Nadu, India and improving its quality through solar assisted desalination. *Urban Climate*, v. 49, p. 101440, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101440>
- LIBÂNIO, Marcelo. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 2.ed, Átomo, 2008.
- LIMA, BR de *et al.* Uso e qualidade de água subterrânea utilizada por agricultores familiares no Território Sertão Produtivo, Estado da Bahia, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 16, p. 679-689, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071615](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071615)
- MARIANO, H. Q. S. *Estudo de sistema de produção de água potável através do processo de destilação solar: Cabo Verde*. 2019. 116 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/14992/1/DM_HelderMariano_2019_MEM.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.
- MARINHO, Francisco José *et al.* Dessalinizador Solar associado a coletor de águas de chuvas para fornecer água potável. *Enciclopédia Biosfera*, v. 11, n. 20, 2015. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2115>. Acesso em: 11 jun. 2024.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Guidelines for drinking-water quality*. 4. ed. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.fsnnetwork.org/sites/default/files/2022-03/Guidelines-for-drinking-water-quality.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- SILVA, Adriano Oliveira *et al.* Potabilização de água salobra por meio de um dessalinizador solar portátil com refletores de radiação integrados. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 3, p. 285-295, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29923>
- THE JAMOVİ PROJECT. *Jamovi* (Versão 2.5.6) [Software de computador]. Sydney, 2023. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.

ZHANG, Lenan et al. Passive, high-efficiency thermally-localized solar desalination. *Energy & Environmental Science*, v. 14, n. 4, p. 1771-1793, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0EE03991H>